



HAL
open science

Capteur RFID UHF simple, fiable, et efficace : application à l'emballage alimentaire intelligent

Benjamin Saggin

► To cite this version:

Benjamin Saggin. Capteur RFID UHF simple, fiable, et efficace : application à l'emballage alimentaire intelligent. Electronique. Université Montpellier, 2021. Français. NNT : 2021MONTS123 . tel-03934748

HAL Id: tel-03934748

<https://theses.hal.science/tel-03934748v1>

Submitted on 11 Jan 2023

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

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

THÈSE POUR OBTENIR LE GRADE DE DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE MONTPELLIER

En Électronique

École doctorale Information, Systèmes et Structures (I2S)

Unité de recherche Institut d'Électronique et des Systèmes (IES)

CAPTEUR RFID UHF SIMPLE, FIABLE, ET EFFICACE APPLICATION À L'EMBALLAGE ALIMENTAIRE INTELLIGENT

Présentée par Benjamin SAGGIN

Le 17 décembre 2021

Sous la direction de
Brice SORLI et Arnaud VENA

Devant le jury composé de

Smaïl TEDJINI, Professeur des universités, LCIS, Université Grenoble-Alpes

Daniela DRAGOMIRESCU, Professeur des universités, LAAS, Université de Toulouse

Robert STARAJ, Professeur des universités, LEAT, Université Côte d'Azur

Valérie GUILLARD, Professeur des universités, IATE, Université de Montpellier

Camille RAMADE, Ingénieur projet, Tageos, Montpellier

Arnaud VENA, Maître de conférences HDR, IES, Université de Montpellier

Brice SORLI, Maître de conférences HDR, IES, Université de Montpellier

Rapporteur

Rapporteure

Examineur

Examinatrice

Invité

Co-directeur de thèse

Directeur de thèse



UNIVERSITÉ
DE MONTPELLIER

« [...] Il suffit de se souvenir d'allumer la lumière. »

(A. Dumbledore dans Harry Potter et le Prisonnier d'Azkaban de J. K. Rowling)

À mes parents,

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier les membres du jury qui ont bien voulu évaluer mes travaux de thèse. Merci pour leurs très aimables paroles qui ont suivi ma soutenance, m'ont touché, et particulièrement ému mes parents.

Les expériences menées au cours de cette thèse ont mobilisé un grand nombre d'instruments, de compétences, et, bien sûr, de personnes. Sans elles, ce travail de thèse n'aurait pas été possible. Merci à Fabrice Gaubiac pour avoir permis d'utiliser une salle de TP de l'IUT biologie et nous avoir fourni tout le matériel et le support dont nous avons besoin. À ce propos, je remercie Chlôe Mandron qui m'a beaucoup aidé lors des expériences microbiologiques. Merci à Fabrice Cano, Saïd Khalfaoui, et Thomas Cohen pour l'aide dans la conception et leur réalisation de pièces mécaniques. Merci à Michel Ramonda, Frédéric Pichot, et Jean Marie Peiris pour leur aide quant à l'utilisation des instruments qui ont permis de caractériser la couche de biopolymère. Merci à Thierry Taliercio et Pierre Fehlen pour la mise en place de la caractérisation par spectroscopie infrarouge des échantillons et l'interprétation des résultats. Merci à Kenza Alvarado et Mikaël Della Seta pour leur travail dans les mesures diélectriques des différents polymères qui profitent à ma thèse et à la continuité du projet.

Je tenais à remercier Valérie Guillard pour avoir supporté le projet GLOPACK qui a financé en partie ma thèse et pour m'avoir permis d'utiliser les instruments du laboratoire IATE. A ce propos, je tenais particulièrement à remercier Fanny Conffigniez qui m'a beaucoup aidé à me former sur différents instruments et m'a aidé à comprendre les interactions entre les biopolymères et l'environnement. Merci à mes collègues du laboratoire IATE qui sont tous extrêmement bienveillants : Sébastien Gaucel, Marouane Kabbej, Chloë Bonnenfant, Camille Faucon, Amandine Antoine-Michard ; et bien sûr, la terreur des bureaux restés ouverts et des ordinateurs non verrouillés, Isabelle Dedieu.

De plus, j'ai aussi pu bénéficier du soutien de mes collègues de l'IES et amis : Boris Rigault, Sophie Tauleigne, Adrien Carretero, Benoit Charlot, David Sanchez, Baptiste Baradel, Rudy Desgarceaux, Manon Chevallier et Léo Chamard, Florian Baudry, Zeineb Loghmari, Prabir Mahato, Sylvain Dutrieux, Stéphan Cahuzac, alias « Cahu » ; la plus belle, Claire Jolly ; les sœurs, Oramany Phouphetlinthong et Audrey Sebban ; mes cher amis, Afaf Meghit et Malik Bouyaed ; mon exemple, Alaeddine Abbes ; mon directeur de conscience, Daniel Andrés Díaz Thomas ; mon maître Jedi, Yassin Belaizi ; le philosophe, Jayakrishnan Methapettyparambu Purushothama, alias « JK » ; la princesse du Gard, Amandine Sandoval ; l'as de la chimie, Clément Kotras ; mes collègues, exilés du bâtiment 5, Sneha Hegde, Guillaume Pellecier, Xavier Sidambarompoulé, Mourad Jeybli, Olivier Martos ; et enfin, mes « stagiaires », Lauris Copin, Anis Afettouche, Chayma El-Amraoui. Je tiens à remercier tout particulièrement Lauris Copin, Amandine Sandoval, Yassin Belaizi, et Clément Kotras pour leur relecture attentive de mon manuscrit de thèse.

Je suis particulièrement reconnaissant du soutien de mes deux directeurs de thèse, Brice Sorli et Arnaud Vena, malgré un début de thèse difficile... Ils ont su m'accompagner au cours de cette période de rémission et ont montré la patience nécessaire à ce processus. Merci pour votre humour, pour vos conseils, pour les discussions techniques, mais aussi d'autres, moins techniques ...

Merci aux équipes des CHU de Montpellier et de Marseille pour leurs interventions réussies qui m'ont permis de continuer sereinement ma vie (et, par ailleurs, mes travaux de thèse) ...

Enfin, je remercie mes parents et mes proches pour leur soutien et leur amour de tous les jours, ainsi que leurs encouragements dans la poursuite de mes études.

Grâce à toutes ces personnes et celles que j'oublie, mes travaux de thèses ont été possibles.

Merci à tous.

SOMMAIRE

Introduction générale.....	9
Chapitre 1 : Avancées de la technologie des capteurs RFID	13
1.1. Introduction.....	15
1.2. Technologie RFID.....	16
1.2.1. Historique	16
1.2.2. Solutions d’identification.....	17
1.2.3. Principe de fonctionnement.....	19
1.2.4. Standardisation RAIN.....	24
1.2.4.1. Modulation et démodulation	25
1.2.4.2. Mémoire	28
1.2.4.3. Circuits logiques.....	30
1.3. Technologie RAIN-capteur.....	32
1.3.1. Présentation	32
1.3.2. Fonctionnement	36
1.3.2.1. Transmission numérique des mesures.....	36
1.3.2.1.1. Circuit intégré RAIN avec fonctions capteur	37
1.3.2.1.2. Conceptions assistées par microcontrôleur	41
1.3.2.2. Fonctionnalisation de l’antenne en capteur	45
1.3.2.2.1. Commutation pour la détection de seuil	46
1.3.2.2.2. Modulation de fréquence	47
1.3.2.2.3. Modulation d'amplitude	50
1.3.2.2.4. Estimation de la distance	54
1.3.2.2.5. Autres techniques	58
1.4. Conclusion	59
1.4.1. Analyses.....	59
1.4.2. Axes de recherche étudiés dans cette thèse.....	61
Références.....	62
Annexe 1-A Enquête sur les caractéristiques des circuits intégrés RAIN	74
Chapitre 2 : Conception du capteur RFID et de la solution de lecture associée.....	77
2.1. Introduction.....	79
2.1.1. Positionnement	79
2.1.2. Contexte	81
2.2. Méthodologie de conception du capteur RFID	82
2.2.1. Propriétés des matériaux	82
2.2.1.1. Permittivité diélectrique.....	83
2.2.1.2. Perméabilité magnétique	85

2.2.1.3.	Impédance	86
2.2.1.4.	Ligne de transmission	87
2.2.2.	Corps d'épreuve biosourcé et biodégradable	90
2.2.2.1.	Composition des matériaux.....	90
2.2.2.2.	Propriétés diélectriques	92
2.2.3.	Transducteur à électrodes interdigitées	94
2.2.3.1.	Implémentation d'un modèle mathématique.....	94
2.2.3.2.	Optimisation du capteur.....	99
2.2.4.	Conception des antennes	99
2.2.4.1.	Directivité	100
2.2.4.2.	Types.....	102
2.2.4.3.	Simulateurs électromagnétiques	103
2.2.5.	Adaptation de la puce, de l'antennes et du capteur	110
2.2.6.	Perspectives.....	112
2.3.	Méthodologie de lecture du capteur RFID	114
2.3.1.	Base logicielle	114
2.3.2.	Compléments pour la mesure	114
2.4.	Conclusion	116
	Références.....	117
	Annexe 2-A Technology Readiness level	121
	Annexe 2-B Mesures des propriétés diélectriques de biopolymères	122
Chapitre 3 :	Essais et validation du capteur RFID.....	125
3.1.	Contexte	127
3.2.	Fabrication du capteur RFID	128
3.2.1.	Réalisation de capteur RFID	128
3.2.2.	Dépôt du biopolymère	129
3.3.	Contrôle du capteur RFID	132
3.3.1.	Adaptation de l'antenne.....	132
3.3.2.	Fonctionnement complet.....	134
3.4.	Tests en humidité	136
3.4.1.	Banc de mesures et méthodes	136
3.4.1.1.	Chambre climatique	136
3.4.1.2.	Lecture RFID dans la chambre climatique	138
3.4.2.	Résultats	139
3.5.	Essais et validation du capteur RFID au dioxyde de carbone	142
3.5.1.	Banc de mesures et méthodes	142
3.5.1.1.	Cellule de mesures sous environnement gazeux	142
3.5.1.2.	Chambre thermostatique et contrôle des paramètres environnementaux	144

3.5.1.3. Banc de mesures avec lecture RFID automatique.....	146
3.5.2. Résultats	147
3.6. Conclusion	150
Références.....	152
Chapitre 4 : Emballage agro-alimentaire intelligent et validation industrielle du capteur-RFID....	155
4.1. Contexte et objectifs	157
4.2. Détection de la dégradation de la viande	158
4.2.1. Matériels et méthodes	158
4.2.1.1. Perméation des emballages	158
4.2.1.2. Préparation des échantillons.....	158
4.2.1.3. Dégradation de la viande.....	159
4.2.2. Résultats	160
4.3. Mesures RFID-capteur avec un lecteur conventionnel	166
4.3.1. Développement de la solution	166
4.3.2. Validation de la solution.....	169
4.4. Evaluation dans des conditions industrielles	169
4.5. Conclusion	173
Références.....	174
Conclusion générale	177
Perspectives.....	178

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Mon travail de thèse s'est déroulé au sein de l'IES (Institut d'Électronique et des Systèmes) à Montpellier. Et, plus particulièrement dans l'équipe RFEF (Radiofréquences et Électronique Flexible), qui est spécialisée dans le développement de solutions capteur communicant sans fil. L'équipe s'intéresse aux technologies RFID (Radiofrequency Identification) passives qui permettent de réduire le coût de réalisation et l'impact environnemental. Ces compétences sont reconnues dans le domaine industriel avec notamment un partenariat récurrent avec la société Tageos, fabricante d'étiquettes RFID passives et flexibles. Par ses collaborations avec plusieurs acteurs de la logistique, l'équipe RFEF fournit des solutions principalement dans la bande de fréquence UHF (Ultra-Haute Fréquence). En effet, cette technologie RFID UHF permet une lecture sans vision directe avec une distance de l'ordre de plusieurs mètres. Elle permet aussi, le plus souvent, un stockage dynamique des informations associées à l'objet auquel l'étiquette est fixée. Les applications logistiques ont alors été dans le domaine du pharmaceutique, de la gestion du personnel et du matériel hospitalier, de l'art, du suivi de santé, et de la logistique alimentaire...

Ainsi, ce travail s'inscrit dans une suite de travaux qui ont fait l'objet de thèses.

Tout commence en 2008 avec le travail de thèse de Camille Ramade en collaboration avec Tageos. Le but initial était de concevoir un procédé de dépôt d'antennes et de puces sur du papier, afin de créer les étiquettes RFID à bas coût. Tageos a souhaité continuer l'optimisation avec le travail de thèse de Fanny Jacquemoud-Collet (2014). Au cours de sa thèse, l'ajout d'une fonction capteur commencera à être évoqué.

Par la suite, Fabien Bibi (2015) étudia les propriétés diélectriques de biopolymères, notamment avec le gluten de blé, en collaboration avec le laboratoire IATE (Ingénierie des Agro-polymères et des Technologies Émergentes) et financé par le projet NextGenPack. La transmission électromagnétique dépend fortement des propriétés diélectriques et son application en tant que transducteur intégré dans une antenne RFID est étudiée. Le travail de caractérisation de biopolymère est ensuite continué par Fernando Teixeira Silva (2017) (collaboration IATE et Embrapa Brésil). L'application visée est un capteur de température intégré à une étiquette RFID.

Enfin, la thèse de Yassin Belaizi (2018) commence l'optimisation de l'étiquette RFID équipé d'un capteur à base de biopolymère, avec une application au diagnostic agroalimentaire. Ce travail entre dans le cadre d'un laboratoire commun, SPIDLab (Smart Passive RFID LAB), entre l'IES (Institut d'Électronique et des Systèmes) de l'Université de Montpellier et Tageos. Financé par l'ANR, le laboratoire SPIDLab a pour but d'améliorer les systèmes de capteur RFID. Pour cela, le laboratoire innove dans la conception des transpondeurs RFID afin de leur associer une fonctionnalité capteur et améliore la fiabilité des procédés de lecture. Les domaines d'application sont le milieu médical et pharmaceutique ainsi que l'emballage alimentaire.

Mon travail de thèse est soutenu par l'ANR (Agence Nationale de la Recherche) et le programme Horizon 2020 de la Commission européenne (connu sous le nom de H2020). Dans ce travail, des avancées dans la conception d'antennes et une interface de programmation logicielle RFID sont proposées, avec une application capteur spécifique.

Cette dernière application fait partie du projet GLOPACK, financé par le programme H2020. Ce projet vise une modernisation des emballages alimentaires afin d'en améliorer leurs performances écologiques. Dans ce but, trois principales actions sont menées.

La première est d'utiliser un biopolymère, le PHBV (Poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalérate)), pour produire des ustensiles alimentaires biodégradables, et de promouvoir son utilisation. Le PHBV

est un plastique biodégradable et biocompatible, produit par des bactéries comme réserves alimentaires dans des conditions limitant leur croissance.

La deuxième action est d'améliorer la conservation des aliments contenus. Cela passe par l'utilisation d'emballages, dits « actifs », dont l'atmosphère est modifiée pour asphyxier les microorganismes et ainsi limiter leur croissance. Le projet introduit également des additifs naturels dans la structure de l'emballage, et non plus dans le produit. Par exemple, afin de préserver l'atmosphère modifiée, l'acide gallique absorbe l'excédent d'oxygène. Le carvacrol, extrait de l'huile essentielle de plantes de la famille des Lamiaceae (thym, origan, ...), est ajouté pour sa propriété antimicrobienne.

Enfin, la troisième action est, à terme, de communiquer des informations dynamiques sur la dégradation des aliments dans le temps en fonction des conditions de stockage. Afin d'améliorer le traitement logistique, la technologie RFID UHF est choisie. L'étiquette, ou « tag », contenant les informations de l'emballage sera équipée d'un capteur intégré à l'antenne qui permettra un suivi de la dégradation alimentaire.

Mon travail de thèse s'inscrit dans cette troisième action. Une solution simple de « tags-capteurs » accompagnée d'un moyen de lecture de l'information pour suivre la dégradation des aliments doit être portée vers un degré de développement supérieur aux travaux de thèse précédents. Une étude de la conception du tag et du capteur associé est menée afin de fiabiliser la mesure avec le nouveau modèle mais aussi à travers la solution de lecture permettant l'extraction de l'information capteur et de sa fiabilisation. Afin que cette solution soit utilisée dans les domaines industriels, le système complet doit être efficace en utilisant le moins de ressources possibles et en s'adaptant aux régulations radio en vigueur.

Pour cela, je présente, dans le premier chapitre, un état de l'art des solutions d'étiquettes RFID avec fonction capteur. Ce chapitre permet d'explorer toutes les possibilités offertes par le protocole de communication sans fil EPC (Electronic Product Code) UHF de génération 2 en termes de récupération de la valeur mesurée. Les avantages et inconvénients de chacune seront répertoriés afin de dresser un bilan. Les exigences de simplicité, de fiabilité, et d'efficacité seront ensuite comparées à ce bilan pour orienter notre conception.

Le deuxième chapitre présente la solution de tag-capteur développé au cours de cette thèse à travers l'exploration de toute la solution de mesure (mesurande, transducteur, capteur, et conditionnement). Les nombreux outils utilisés pour la conception du tag-capteur sont également présentés. Dans ce chapitre, les différentes solutions envisagées pour de futurs projets seront aussi étudiées.

Le troisième chapitre vise la validation du bon fonctionnement du tag-capteur. Après des tests sur la résonance des antennes à une fréquence bien précise, nous avons pu équiper les tags-capteurs de leur CI (Circuit Intégré), ou « puce ». La fréquence de résonance réelle est, là aussi, comparée à la fréquence simulée. Finalement, afin de valider le bon fonctionnement de la partie capteur, nous avons testé la réponse du tag-capteur à des variations d'humidité et de CO₂.

Le dernier chapitre se consacre aux tests effectués dans l'application finale du tag-capteur, l'emballage alimentaire. Pour cela, le tag-capteur est fixé sur la partie interne du film de protection d'une barquette alimentaire, et est soumis à la dégradation d'une pièce de viande. Les réponses de plusieurs tags-capteurs sont comparées à des mesures sur l'état de la viande (comptage microbien, colorimétrie) et de l'emballage (concentrations en O₂ et CO₂). Dans un premier temps, cette expérience a été conduite dans les locaux de l'université de Montpellier. Puis, par Coopbox, un partenaire industriel du secteur agro-alimentaire, en toute autonomie, afin de valider la reproductibilité de la mesure.

Chapitre 1 : Avancées de la technologie des capteurs RFID

SOMMAIRE

Chapitre 1 : Avancées de la technologie des capteurs RFID	12
2.1. Introduction.....	15
2.2. Technologie RFID.....	16
2.2.1. Historique	16
2.2.2. Solutions d'identification	17
2.2.3. Principe de fonctionnement.....	19
2.2.4. Standardisation RAIN	24
2.2.4.1. Modulation et démodulation	25
2.2.4.2. Mémoire	28
2.2.4.3. Circuits logiques	30
2.3. Technologie RAIN-capteur.....	32
2.3.1. Présentation	32
2.3.2. Fonctionnement	36
2.3.2.1. Transmission numérique des mesures.....	36
2.3.2.1.1. Circuit intégré RAIN avec fonctions capteur	37
2.3.2.1.2. Conceptions assistées par microcontrôleur	41
2.3.2.2. Fonctionnalisation de l'antenne en capteur	45
2.3.2.2.1. Commutation pour la détection de seuil	46
2.3.2.2.2. Modulation de fréquence	47
2.3.2.2.3. Modulation d'amplitude	50
2.3.2.2.4. Estimation de la distance	54
2.3.2.2.5. Autres techniques	58
2.4. Conclusion	59
2.4.1. Analyses.....	59
2.4.2. Axes de recherche étudiés dans cette thèse.....	61
Références.....	62
Annexe 1-A Enquête sur les caractéristiques des circuits intégrés RAIN	74

1.1. INTRODUCTION

Ce premier chapitre dresse un état de l'art des publications scientifiques et du marché des capteurs RFID UHF (identification par radiofréquence à ultra-haute fréquence), depuis les débuts de cette technologie jusqu'à aujourd'hui. Basé sur plus de 500 documents, comprenant des articles de journaux évalués par des pairs, des présentations de conférences, des pages Web et des brevets, ce chapitre vise à fournir un contexte profond afin de prendre une décision éclairée sur notre sujet d'étude. Pour correspondre à ce dernier, cet état de l'art est particulièrement axé sur les transpondeurs sans batterie (ou passifs) qui sont conformes au protocole EPC (Electronic Product Code) de 2^{ème} génération.

Tout d'abord, nous présentons les fondements des technologies RFID par le point de vue historique, un état de l'art d'autres solutions d'identification utilisées, et des principes généraux qui régissent les technologies RFID. Par la suite, nous abordons la définition du protocole EPC Génération 2 en décrivant les différents modules d'un circuit intégré répondant à ce protocole. Les différents types de modulation utilisés par les systèmes RFID-capteur pour transmettre leurs mesures sont ensuite présentés. Pour chaque modulation, nous abordons la théorie associée, les outils et les méthodes pour leur mise en œuvre. Enfin, nous concluons sur la bonne utilisation de chaque type de modulation, de leurs combinaisons possibles, et de leurs avantages/inconvénients. Avec une bibliographie ciblée sur notre application, nous définissons les caractéristiques souhaitées pour la future réalisation.

1.2. TECHNOLOGIE RFID

1.2.1. Historique

Les communications filaires nécessitent de nombreuses ressources. Pour cela, Guglielmo Marconi a breveté en 1897 des dispositifs de communication sans fil, des radio télégraphes [1]. Cette découverte fait suite aux travaux de doctorat de Heinrich Hertz prouvant la théorie de Maxwell [2]. À l'origine, la simple modulation ON-OFF (c'est-à-dire OOK) était utilisée en radiocommunications. En construisant tous les équipements nécessaires (c'est-à-dire le générateur d'ondes continues et le principe hétérodyne), Reginald Fessenden a créé le premier signal radio modulé en amplitude, pour produire le premier téléphone sans fil en 1903 [3]. La percée des tubes à vide a permis de créer des amplificateurs et des redresseurs utilisés dans les circuits électroniques. Alors que les travaux théoriques précédents ont duré plus de 10 ans, la modulation de fréquence a été pleinement démontrée par Edwin Howard Armstrong en 1936 [4]. L'utilisation de la modulation de fréquence par rapport à la modulation d'amplitude permet de libérer le spectre de fréquence et donc de permettre davantage de communications. Comme toutes deux sont des modulations angulaires, la modulation de phase est similaire à la modulation de fréquence. Elle consiste à accélérer ou à ralentir la fréquence du signal pour atteindre une valeur de phase spécifique. Sa largeur de bande dépend du taux de modulation du signal résultant. Aujourd'hui, la modulation la plus utilisée est la QAM (Quadrature Amplitude Modulation) qui utilise à la fois la modulation de phase et d'amplitude.

La RFID (Radio-Frequency Identification) est un sous-produit de l'application militaire des ondes radio utilisées par la technologie RADAR (Radio Detection and Ranging). Bien que certaines expériences aient déjà été menées sur la détection d'objets par réflexion d'ondes radio [5], les systèmes RADAR ont attiré l'attention pendant la période tendue qui a précédé la Seconde Guerre mondiale [6]. En Grande-Bretagne, les recherches menées par Sir Robert Alexander Watson-Watt ont abouti aux premiers concepts de systèmes IFF (Identification ami/ennemi) [7]. Les premiers concepts étaient assez simples, consistant en une antenne dipôle accordée pour résonner aux fréquences RADAR et éteinte périodiquement, mais ils n'ont jamais fonctionné. Au fil des nouvelles versions de l'IFF, la réponse des « transpondeurs » (c'est-à-dire des objets qui identifient le porteur) s'est complexifiée. Avec les versions Mark I et Mark II, le signal était codé. Avec la version Mark III, les transpondeurs ne répondaient qu'à un signal d'interrogation spécial et ont montré le début du comportement des étiquettes RFID modernes.

Alors que la Seconde Guerre mondiale a été gagnée ensemble, les États-Unis et l'Union soviétique vivaient dans un climat d'extrême tension, prélude à la guerre froide. L'ajout d'un capteur aux transpondeurs passifs n'a pas tardé. Le 4 août 1945, l'ambassadeur des États-Unis en Union soviétique reçoit un cadeau [8]. Ce « cadeau » est une grande sculpture du Grand Sceau des États-Unis et est également un dispositif d'écoute clandestin. Léon Theremin, de nationalité Russe, emprisonné dans un Goulag, musicien et physicien, a conçu le « bug » contenu dans cet objet. L'objet est composé d'une antenne unipolaire couplée à une cavité en cuivre argenté. Un mince film conducteur utilisé comme diaphragme désaccorde légèrement la cavité avec les ondes sonores incidentes.

La miniaturisation des composants qui composent un dispositif radio-communicant nécessite de combiner plusieurs technologies. Bien que le transistor ait été inventé en 1925 par Julius Edgar Lilienfeld, on considère souvent que l'invention est due à John Bardeen et Walter Houser Brattain (supervisés par William Shockley) aux Bell Labs d'AT&T en raison de la démonstration scientifique publiée début 1948 [9]. Un grand pas en avant consiste à choisir un matériau semi-conducteur qui peut être transformé en conducteur ou en isolateur dans une zone précise en ajoutant un autre matériau et par un procédé photographique. Le précédent transistor a été amélioré par la création du MOSFET

(Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor), grâce à la découverte de la passivation du silicium en SiO₂ par Mohamed John Atalla [10]. Cette technique de construction de transistors planaires a été brevetée pour la première fois par Fairchild Semiconductor en 1959 [11]. Les objectifs suivants étaient d'intégrer plus de fonctionnalités sur le même CI (Circuit Intégré) et de le rendre plus petit. Le premier objectif a été atteint par Fairchild Semiconductor en 1960 en isolant les composants avec des plastiques dans une tranche de silicium gravée chimiquement [12], ou avec des zones semi-conductrices fortement dopées et hautement résistives [13]. Gordon Moore, cofondateur d'Intel et employé de Fairchild Semiconduction en 1960, est l'auteur de la loi de Moore [14]. Cette théorie stipule que la complexité des circuits intégrés "*double tous les deux ans*", et elle se vérifie encore aujourd'hui [15].

À cette époque, la RFID était principalement liée à la sécurité. Le premier dispositif EAS (Electronic Article Surveillance) a été breveté en 1966 [16], mais ce n'est pas la première tentative d'utiliser les phénomènes RF (Radiofréquence) pour empêcher les vols [17]. Le système se compose de deux éléments principaux [18], des points de contrôle émettant un champ magnétique de 1 MHz et un circuit électrique résonnant fixé aux articles. Lorsque l'article protégé passe à travers un point de contrôle, le circuit résonant absorbe l'énergie du champ magnétique et agit comme le circuit secondaire d'un transformateur électrique. Et ceci peut être détecté depuis un portique aux sorties du magasin.

En 1973, Mario Cardullo invente les transpondeurs numériques réinscriptibles [19], [20]. L'idée était de remplacer le code-barres optique réfléchissant, qui est susceptible d'être endommagé et qui ne peut pas être réinscrit, par un dispositif électronique passif (sans batterie). L'idée était trop en avance pour l'époque, l'investissement a échoué et, plus tard, d'autres sociétés se sont emparées de l'idée. Toutefois, Cardullo avait raison en ce qui concerne le premier domaine d'intérêt. En 1988, Micro Design AS (aujourd'hui Q-Free ASA), une société norvégienne, a travaillé avec les autorités routières de son pays pour créer le premier AVI (Automated Vehicle Identification) à pleine vitesse et sans arrêt [21]. Cette invention fait appel à l'utilisation de dispositifs d'ondes acoustiques de surface couplés à une antenne [22] pour rétro moduler un identifiant lorsqu'il est éclairé par un champ électromagnétique de 856 MHz.

1.2.2. Solutions d'identification

Dans le but d'associer un objet à des informations le concernant, il est plus simple de l'identifier par un code unique plutôt que par son nom. En effet, le nom d'un objet peut ne pas assez bien le distinguer d'un autre. Pour évaluer le montant à investir dans un système qui rend plus automatique l'identification, l'examen des coûts d'acquisition est primordial. C'est pourquoi les fabricants se sont d'abord tournés vers des solutions d'identifications très peu coûteuses utilisant l'impression de suites de chiffres et/ou de lettres. Ces indications sont adaptées à la lecture par un opérateur humain. Dans ce cas, pour permettre une automatisation du processus, la machine aura besoin d'un système OCR (Reconnaissance Optique des Caractères, en anglais). Les désavantages de cette technique sont son taux d'erreur élevé et son coût prohibitif. Ainsi, l'automatisation préférera les systèmes « codes-barres », inventés dans les années 50 [23]. Ces systèmes encodent l'identifiant dans leur structure 2D. Le code est souvent binaire, car monochromatique, et sa lecture se fait par comparaison de réflectance de la surface. Plusieurs systèmes de codes-barres existent et se séparent en 2 catégories (*cf.* Figure 1-1) : les codes linéaire (à 1 dimension), les codes matriciels (à 2 dimensions). Pour les premiers, l'UPC (Universal Product Code) domine très largement le marché, notamment pour les produits commercialisés. Pour les seconds, le code QR (Quick Response) s'est imposé. Grâce à ses 2 dimensions, l'information encodée peut être plus importante. Le code QR encode souvent un modèle URI (Uniform Resource Identifier) lui permettant des utilisations variées.



Figure 1-1 Codes-barres (à gauche, DataBar Expanded, et à droite, QR code L) pour un produit commercialisé (Decathlon Slip de bain 900 Print XEN Black 42)

Un URI est une suite de caractères alphanumérique. Un exemple d'URI est l'adresse d'un site internet, comme présenté en Figure 1-2. Dans cet exemple, l'URI fait appel au protocole HTTPS (protocole de transfert hypertextuel sécurisé, en français). Il se connecte au serveur de l'IES hébergé par l'université de Montpellier, et cible un fichier spécifique à afficher. Afin d'être supportés par la plupart des appareils, les schémas sont enregistrés auprès de l'IANA (Internet Assigned Numbers Authority), autorité de régulation d'internet.



Figure 1-2 Exemple d'URI (adresse vers un site de l'IES)

GS1, pour « Global Standard 1 », est un organisme mondial non gouvernemental à but non lucratif et qui essaie d'harmoniser l'identification des objets. GS1 a créé l'EPC, pour « Electronic Product Code », qui est un standard permettant d'identifier plus précisément les objets. En effet, celui-ci porte une série d'informations sur la nature de l'objet ainsi que le numéro de série unique de ce dernier. Un exemple d'EPC est donné dans le Tableau 1-1 pour un article de sport commercialisé par Decathlon.

URI DE L'EPC		epc:id:sgtin:358378.0757584.1966780				
PARTIE ADRESSEE	epc	id	sgtin	358378	0757584	1966780
SIGNIFICATION	Schéma URI	Utilisation	Schéma EPC	Préfixe de l'entreprise	Référence de l'article	Numéro de série
VALEUR	EPC	Identité pure	Article commercial	Decathlon	Slip de bain 900 imprimé XEN Noir 42	1041970

Tableau 1-1 Exemple d'URI EPC (Decathlon Slip de bain 900 Print XEN Black 42)

Un schéma supplémentaire définit le type d'identification et les informations qui sont contenues dans la suite de l'URI. Plusieurs schémas ont été définis par GS1, comme le montre le Tableau 1-2. En effet, des utilisations différentes nécessitent des données différentes. Par exemple, l'identification d'un article commercial nécessite de connaître la société, la référence de l'article et son numéro de série. La plupart des systèmes nécessitent un identifiant d'entreprise. Les entreprises doivent s'inscrire auprès de GS1 pour obtenir leur préfixe [49] et sont ensuite identifiées publiquement. Pour l'instant, le schéma EPC n'est pas enregistré auprès de l'IANA.

SCHEMA	UTILISE POUR IDENTIFIER	EXEMPLE
--------	-------------------------	---------

NUMERO D'ARTICLE COMMERCIAL MONDIAL (GTIN)	Produits et services	Une boîte de soupe, une barre de chocolat, un album de musique
NUMERO DE LOCALISATION GLOBAL (GLN)	Parties et lieux	Entreprises, entrepôts, usines, magasins
CODE DE CONTENEUR D'EXPEDITION EN SERIE (SSCC)	Unités logistiques	Charges unitaires sur palettes, cages roulantes, colis
IDENTIFIANT MONDIAL DES BIENS CONSIGNES (GRAI)	Actifs remboursables	Caisses-palettes, caisses, conteneurs
IDENTIFIANT INDIVIDUEL MONDIAL DES BIENS (GIAI)	Biens	Équipements médicaux, manufacturiers, de transport et informatiques
NUMERO DE RELATION DE SERVICE MONDIAL (GSRN)	Relations entre les prestataires de services et les bénéficiaires	Membres du programme de fidélisation, médecins d'un hôpital, membres d'une bibliothèque
IDENTIFICATEUR MONDIAL DE TYPE DE DOCUMENT (GDTI)	Documents	Avis d'impôts, formulaires d'expédition, permis de conduire
NUMERO D'IDENTIFICATION MONDIAL POUR LES ENVOIS (GINC)	Consignations	Unités logistiques transportées ensemble dans un conteneur maritime
NUMERO D'IDENTIFICATION MONDIAL DES ENVOIS (GSIN)	Expéditions	Unités logistiques livrées ensemble à un client
NUMERO DE COUPON GLOBAL (GCN)	Coupons	Coupons numériques
IDENTIFIANT DE COMPOSANT/PARTIE (CPID)	Composants et pièces	Pièces détachées pour automobiles
NUMERO DE MODELE MONDIAL (GMN)	Modèle de produit	Dispositifs médicaux

Tableau 1-2 Schémas GS1 [25]

Avec l'EPC, l'identification devient plus précise mais occupe aussi plus de place. Stocker les informations de manière numérique doit alors être envisagé.

Le principal argument en faveur de l'utilisation de la RFID est que cette technologie ne nécessite pas de visibilité directe. De plus, elle offre un stockage électronique dynamique, les informations peuvent être modifiées au cours du transit de l'objet identifié. Cela permet d'ajouter ou de modifier un schéma EPC. Par exemple, avant d'être un bien consigné et d'avoir un identifiant GRAI (*cf.* Tableau 1-2), un objet a dû être acheté et avoir un identifiant GTIN. Enfin, avec des options de sécurité, la technologie rend la falsification impossible.

1.2.3. Principe de fonctionnement

Afin de lire les informations stockées dans un transpondeur RFID, un appareil lecteur émet une onde électromagnétique qui contient une requête. Deux types de transpondeur RFID existent (appelé aussi « tag », pour « étiquette » en anglais).

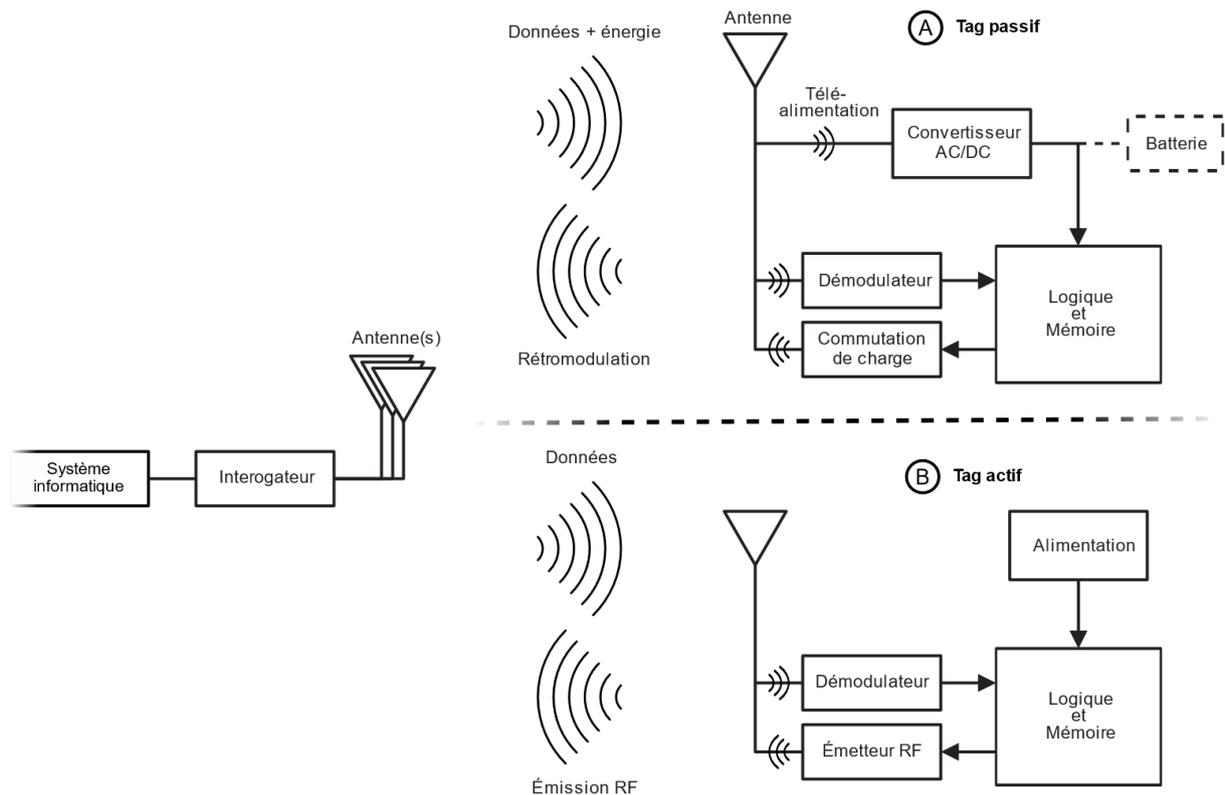


Figure 1-3 Architecture des transpondeurs passifs (A) et actifs (B) [26]

Comme décrit dans la Figure 1-3 (A), lorsque l'onde est réceptionnée par un tag RFID passif, elle lui fournit de l'énergie pour alimenter son circuit logique et lui permet de répondre à la requête. Chaque objet possède une « empreinte RADAR » qui est mesurable par un système de transmission/réception adapté. Pour communiquer des informations numériques aux lecteurs, les tags RFID passifs ont la capacité de commuter une charge dans le circuit de l'antenne, et ainsi de moduler leur empreinte RADAR. Cette technique est appelée « rétro modulation » et nécessite une onde incidente en provenance du lecteur. Pour assurer des opérations nécessitant un apport supplémentaire d'énergie ou pour fonctionner sans lecteur, certains tags peuvent être assistés d'une source d'alimentation externe. Ce sont donc des tags semi-passifs. La qualification de tag « passif assisté d'une batterie », ou BAP, en anglais, est fréquemment utilisée.

Les tags RFID actifs (Figure 1-3 (B)) ont une portée plus grande car l'onde incidente n'alimente pas le circuit logique. De plus, l'onde incidente n'est pas renvoyée vers le lecteur mais le tag en émet une. Néanmoins, pour cela, ils nécessitent une alimentation externe (batterie, panneau solaire, secteur, ...).

En 1946, Harald Trap Friis, un ingénieur radio américain d'origine danoise, a introduit une « [...] formule de transmission simple » pour calculer la puissance transmise entre deux antennes dans un milieu uniforme [27]. Cette formule tient compte de la configuration de l'antenne et de l'atténuation du canal due à la diffusion des ondes sphériques dans l'espace. L'Équation 1-1 est une version moderne de cette formule qui utilise le gain de l'antenne à la place de son ouverture.

$$P_{T_{rx}} = P_{R_{tx}} \cdot G_{R_{tx}} \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi \cdot d_{R_{tx} \rightarrow T_{rx}}} \right)^2 \cdot PLF_{R_{tx} \rightarrow T_{rx}} \cdot G_{T_{rx}}$$

P = puissance [W], R = valeur pour le lecteur, T = valeur pour le tag, $_{rx}$ = valeur reçue, $_{tx}$ = valeur envoyée, G = gain de l'antenne, λ = longueur d'onde, d = distance entre l'antenne du tag et du lecteur, PLF = Facteur de dépolarisation

Équation 1-1 Atténuation du canal de transmission

Comme l'illustre la Figure 1-4, les ondes radio envoyées par les lecteurs sont toujours atténuées, notamment du fait de la distribution de l'énergie dans l'espace. Mais en espace libre, l'affaiblissement principal du canal est dû à la dispersion dans l'espace des ondes sphériques, et en fonction de la longueur d'onde. Une fois reçus, les tags absorbent l'énergie et/ou rétro module le signal, en fonction des états de communication. Là encore, les ondes radio rétro modulées sont atténuées sur leur chemin de retour vers les lecteurs. Les lecteurs mesurent la puissance rétro modulée reçue, mieux connue sous le nom de RSSI (Return Signal Strength Indicator).

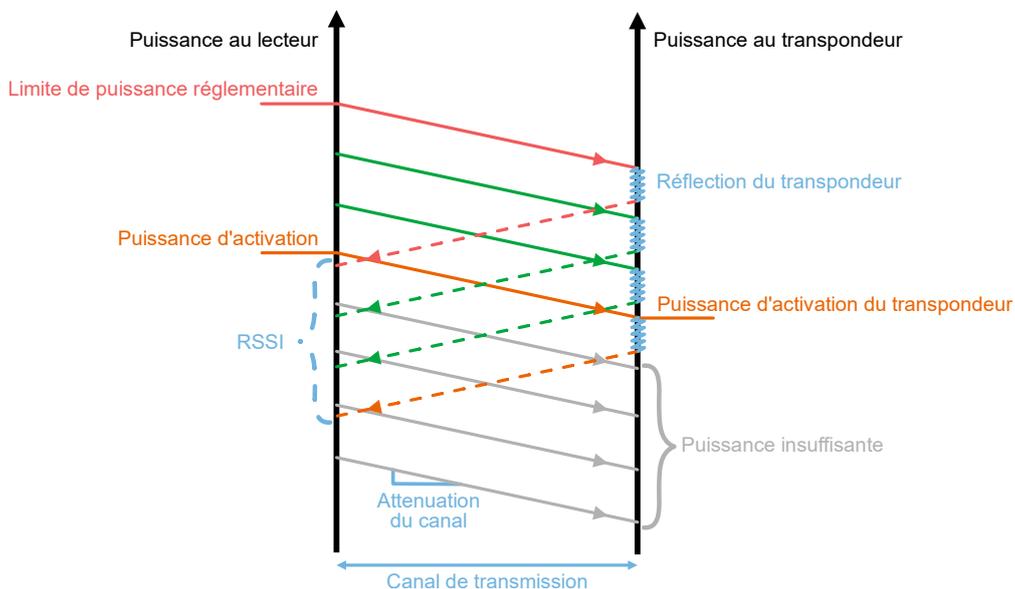


Figure 1-4 Canal de transmission

Pour obtenir un échange complet entre un lecteur et un tag passif, l'Équation 1-1 doit être appliquée à la propagation du signal lecteur-tag et tag-lecteur. Et, comme le montre la Figure 1-4, le RSSI varie en fonction de la puissance envoyée par le lecteur. Les lecteurs doivent envoyer une puissance constante pour garantir des mesures RSSI correctes.

$$P_{R_{rx}} [W] = P_{R_{tx}} \cdot G_{R_{tx}} \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi \cdot d_{R_{tx} \rightarrow T_{rx}}} \right)^2 \cdot PLF_{R_{tx} \rightarrow T_{rx}} \cdot G_{T_{rx}} \cdot K_{bs} \cdot G_{T_{tx}} \cdot PLF_{T_{tx} \rightarrow R_{rx}} \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi \cdot d_{T_{tx} \rightarrow R_{rx}}} \right)^2 \cdot G_{R_{rx}}$$

K_{bs} = atténuation de rétro modulation

Équation 1-2 Échange de puissance entre le lecteur et le tag [28]

Dans le cadre de l'utilisation de tags actifs, le RSSI est aussi mesuré, mais est uniquement fonction de la puissance d'émission du tag RFID actif qui subit une seule atténuation de la part du canal.

Dans le but de remplacer les systèmes d'identification optique, la solution passive est préférée. En effet, l'ajout d'une alimentation implique une dépendance extérieure (changement de batterie,

présence de lumière, ...). Ce qui ne serait plus à l'avantage de la solution d'identification par radiofréquence seule.

La fréquence de l'onde résonnante avec le tag RFID dépend de l'application choisie pour le tag. Plus la fréquence de l'onde est grande, plus d'informations peuvent transiter dans une même période. Dans le spectre radio présenté en Figure 1-5 se trouvent 5 bandes de fréquences utilisées par les technologies RFID. L'échange EPC n'est standardisé que sur les bandes HF et UHF (860-960 MHz). Aussi, nous aborderons que ces 2 solutions.

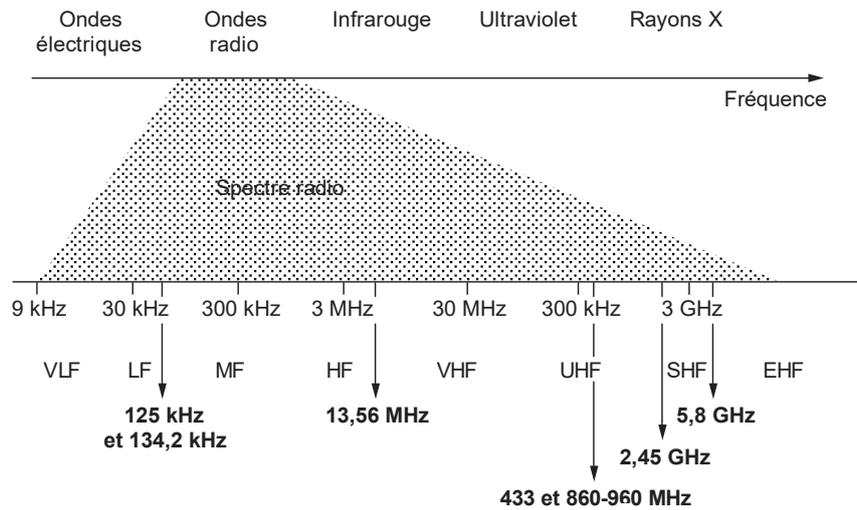


Figure 1-5 Bandes de fréquences utilisées par la communication RFID [26]

Les tags RFID HF, appelés tags NFC (Near-Field Communication), communiquent, comme leur nom l'indique, en champ proche. En effet, quand une onde RF est émise, on peut distinguer 3 zones respectivement de la distance à la source : les zones de Rayleigh, Fresnel, et Fraunhofer. Dans la communication NFC, un tag va fonctionner dans les zones les plus proches. On dit qu'il fonctionne en « champ inductif » car l'impédance du tag influence l'impédance de l'antenne d'émission. L'antenne d'émission et de réception sont 2 bobines, comme le montre la Figure 1-6 (droite). Et, rapprocher 2 bobines va créer un transformateur électrique entre les 2 antennes, transférant l'énergie vers le tag. Les tags RFID UHF (exemple en Figure 1-6 (gauche)) fonctionnent dans la bande 860-960 MHz et utilisent le « champ radiatif », en zone de Fraunhofer. A ces distances, la modulation de l'impédance du tag n'aura pas d'influence sur le circuit de l'antenne lecteur. Pour réceptionner les informations en provenance du tag, le lecteur mesure la puissance qu'il reçoit. La communication UHF est alors plus complexe mais permet de communiquer plus loin.

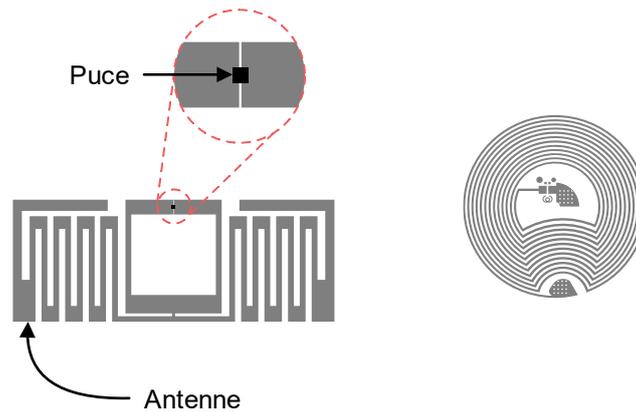


Figure 1-6 Tags RFID UHF (gauche) (Invengo Bullet XC-TF8013-C107 [29]) et NFC (droite) (Invengo NLoop XCTF-3006 [30]) (tailles réelles des tags)

Chaque pays a ses propres spécifications pour l'utilisation des bandes de fréquences radio. Mais pour une interopérabilité mondiale et une réduction des coûts, les pays tentent d'harmoniser leur spectre radio. Plus les pays sont grands, plus ils ont d'influence sur la normalisation. Comme l'illustre la Figure 1-7, 4 spectres principaux se distinguent dans la bande UHF [31]: le spectre FCC (Federal Communications Commission), le spectre ETSI basse fréquence (European Telecommunications Standards Institute), le spectre ETSI haute fréquence et la bande chinoise.

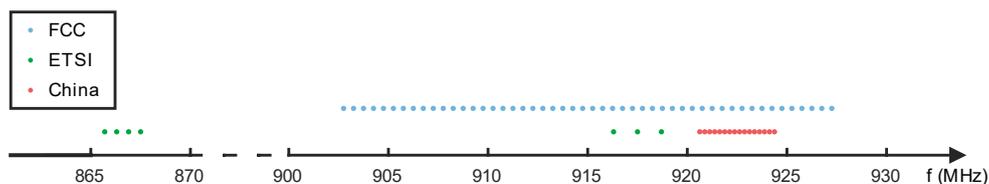


Figure 1-7 Principales bandes de fréquences régionales

Le spectre FCC a été attribuée pour la première fois par les États-Unis d'Amérique en 1989 et mise à jour en 2010 [32]. La FCC indique que 52 bandes de 250 kHz sont disponibles de 902,75 à 927,25 MHz et doivent être séparées par 500 kHz.

La bande inférieure ETSI était très étroite avec 4 bandes disponibles (865,7 - 866,3 - 866,9 - 867,5 MHz), une largeur de bande de 200 kHz et séparées par 600 kHz [33]. L'ordonnance de la Commission européenne du 11 octobre 2018 [34] ajoute plusieurs bandes au spectre pour s'aligner sur le spectre FCC. À ce jour, elle n'est pas appliquée dans plus d'un tiers des pays européens (par exemple, Croatie, France, Allemagne, Grèce, Italie, Lettonie, Pologne, Portugal, Roumanie, Espagne). Le spectre ETSI haute fréquence est composé de 3 bandes (916,3 - 917,5 - 918,7 MHz) avec une largeur de bande de 400 kHz et un espacement des canaux de 1200 kHz.

En 2007, le MIIT (Ministère de l'Industrie et des Technologies de l'Information) de Chine a publié ses spécifications concernant l'utilisation des fréquences UHF RFID. Il définit la bande 920,5 - 924,5 MHz avec 20 canaux [35]. La largeur de bande et la séparation des canaux sont de 250 kHz.

Les bandes de la FCC et de la Chine utilisent la technique FHSS (Frequency-Hopping Spread Spectrum). Elle consiste à changer continuellement la fréquence utilisée pour éviter les interférences. Dans les régions FCC, la communication RFID UHF doit utiliser une fréquence spécifique pendant « 0,4 seconde et dans une période de 20 secondes » [32]. En Chine, la communication RFID UHF peut utiliser une seule fréquence pendant 2 secondes [35].

Comme indiqué dans la Figure 1-6 (gauche), un tag RFID se compose de 2 parties principales : une antenne et un circuit intégré, ou « puce ». Tous deux doivent être appariés, c'est-à-dire que leur impédance doit être le conjugué complexe l'un de l'autre.

Bien qu'il existe des puces avec des impédances différentes, l'antenne du tag doit toujours être adaptée, et donc être conçue en conséquence. Cependant, l'impédance du circuit intégré est souvent conçue pour correspondre à un type d'antenne particulier et à un cas d'utilisation particulier (par exemple, une antenne en boucle pour un couplage de proximité). De nombreuses recherches ont été menées pour concevoir l'antenne la plus petite et/ou la plus efficace possible. Mais il est plus important de cibler la bonne application. L'efficacité du tag dépendra fortement de son environnement direct.

1.2.4. Standardisation RAIN

L'arrivée du nouveau millénaire et les progrès des circuits numériques ont rassemblé tous les progrès antérieurs (c'est-à-dire, les réponses seulement quand elles sont demandées, la mémoire réinscriptible et, même, les capteurs intégrés). Concevoir toutes ces parties et les faire fonctionner dans un environnement industriel et complexe peut s'avérer difficile. Pour simplifier ce processus, la normalisation était la clé. En 1998, le MIT (Massachusetts institute of technology) et l'organisation GS1 se sont associés pour créer la norme EPC (Electronic Product Code) [36]. Le MIT devait s'accorder sur les caractéristiques électroniques. GS1 (Global Standard 1), préalablement connue pour l'UPC (Universal Product Code), devait normaliser les données stockées en mémoire en fonction de l'application et promouvoir la technologie RFID. Pour ce dernier point, l'organisation RAIN a été créée en 2014 pour promouvoir la technologie RFID UHF GS1 Generation 2 nouvellement créée [37].

Aujourd'hui, de nombreux circuits intégrés et lecteurs prennent en charge cette norme. Et en 2016, les fabricants faisaient état de 9,4 milliards de transpondeurs RAIN vendus en une année [38].

Aujourd'hui, de nombreuses grandes entreprises utilisent la technologie RAIN. Decathlon, un détaillant français d'articles de sport, utilise des étiquettes RAIN pour identifier chaque produit, faire un inventaire plus rapide des stocks et des rayons, et accélérer le passage en caisse [39]. McDonald's utilise des portants équipés de tags RAIN pour que les employés puissent localiser et servir les clients plus rapidement [40].

Pour prétendre à la conformité RAIN, le tag doit respecter le protocole EPC UHF Gen2 [41]. Une micrographie d'un CI (Circuit Intégré) d'un tag-capteur RAIN a été publiée par Yin et al. [44] et est présentée dans la Figure 1-8 comme un exemple de disposition des divers composants d'une puce RAIN.

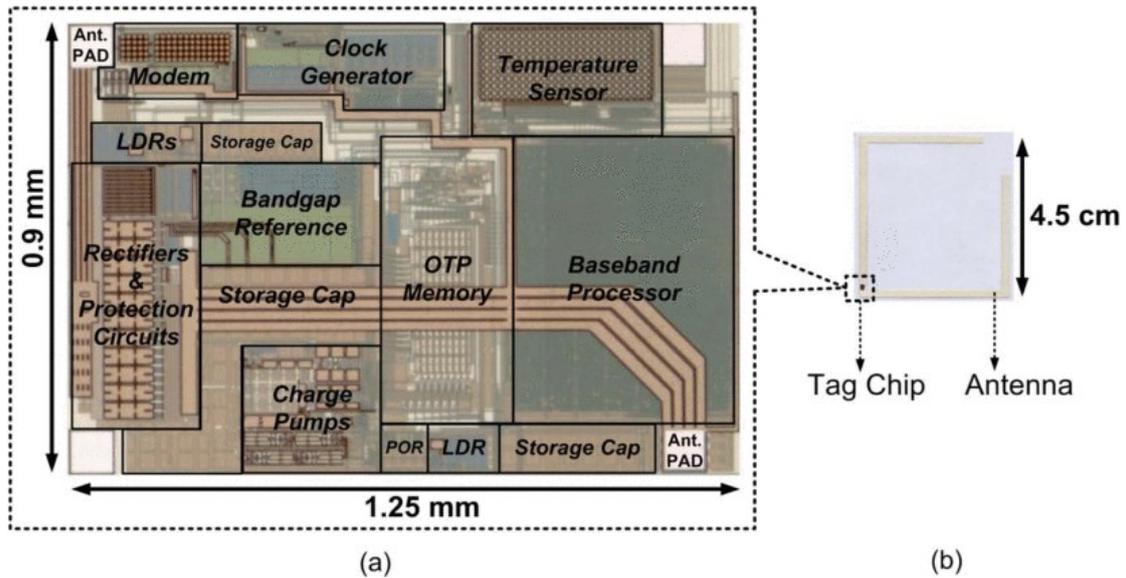


Figure 1-8 Disposition du CI de Yin et al. (a) dans la configuration complète du tag (b) [44]

Au fil des années, la diminution de la surface des puces RAIN est conforme aux prévisions de la loi de Moore [14]. La surface minimale a été réduite d'un facteur 2 en l'espace d'une décennie pour atteindre 0,1 mm² avec la série Impinj M700, comme on peut le voir avec la Figure 1-9. A l'inverse, certains fabricants ajoutent de plus en plus de fonctionnalités aux CIs qui deviennent plus grands. L'exemple le plus remarquable se trouve dans la série « echo » de EM Microelectronic qui apporte le support de la technologie NFC. Cette série de puces se détache de la tendance de réduction de la surface de la puce surtout depuis l'ajout de fonctions capteur avec les modèles « echo-T » et « echo-V ».

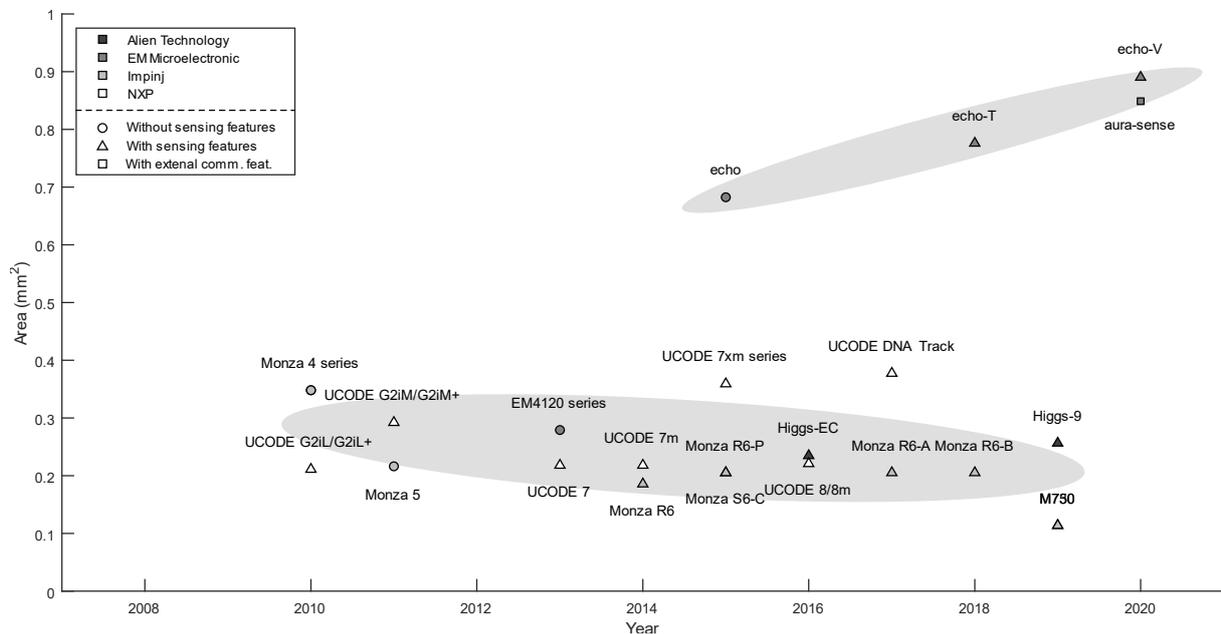


Figure 1-9 Enquête sur la taille des puces au cours du temps (cf. Annexe 1-A)

1.2.4.1. Modulation et démodulation

Pour faciliter la compréhension, la transmission du lecteur au tag sera appelée transmission « montante ». À l'opposé, la transmission de tag à lecteur sera dite « descendante ».

La synchronisation revêt une grande importance dans de nombreux circuits, notamment dans les circuits RF. En raison de leur fonctionnement passif, les circuits intégrés RAIN reçoivent le signal de référence des lecteurs et n'ont pas besoin de disposer d'autres horloges pour que le modem (circuit de modulation-démodulation) fonctionne.

La transmission montante peut utiliser la modulation d'amplitude (sans porteuse, et avec ou sans une des bandes latérales supprimées), ou la modulation de phase. Seuls 2 symboles sont utilisés dans les 2 modulations. Le symbole qui transmet le plus de puissance au tag sera appelé « haut ». À l'opposé, le symbole « bas » transmet moins de puissance. La profondeur de modulation (c'est-à-dire le contraste entre le symbole haut et le symbole bas) doit rester au moins égale à 80 % de l'intensité maximale du champ.

Pour que le circuit intégré interprète le signal RF qu'il reçoit du lecteur et y réponde, plusieurs étapes sont nécessaires. Le signal RF est utilisé par trois composants différents : le gestionnaire d'énergie ou PMU (Power Management Unit), le générateur d'horloge, et le modem.

Pour que le PMU obtienne un courant continu stabilisé à partir du signal radiofréquence, le signal entrant passe par des étages de redressement. Un étage redresseur comprend souvent deux couples de diodes et de condensateurs pour former un générateur Cockcroft-Walton, ou un doubleur de tension Greinacher, comme le montre la Figure 1-10.

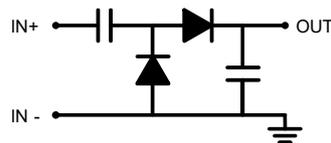


Figure 1-10 Étage redresseur

La puissance d'activation du tag, ou sensibilité, est la puissance minimale reçue pour qu'une puce produise une réponse complète à une requête. La sensibilité est principalement donnée pour une opération de lecture de bloc mémoire et est alors appelée « sensibilité en lecture ».

En raison de la proximité physique des composants, la réduction de la surface du CI (illustrée à la Figure 1-11) entraîne une diminution du bruit et de l'atténuation dus aux pistes, et donc une amélioration de l'efficacité énergétique. Comme le montre la Figure 1-11, les puces RAIN sont de plus en plus sensibles, et ce, presque continuellement avec les années. Là encore, la série M700 d'Impinj est la meilleure de sa catégorie avec une sensibilité de lecture de -24 dBm. Cependant, d'autres CIs ont toujours besoin de plus de puissance car ils alimentent des fonctions supplémentaires (par exemple, EM Microelectronics aura-sense avec des fonctionnalités capteur) ou qu'ils possèdent plus de mémoire (cf. Figure 1-15).

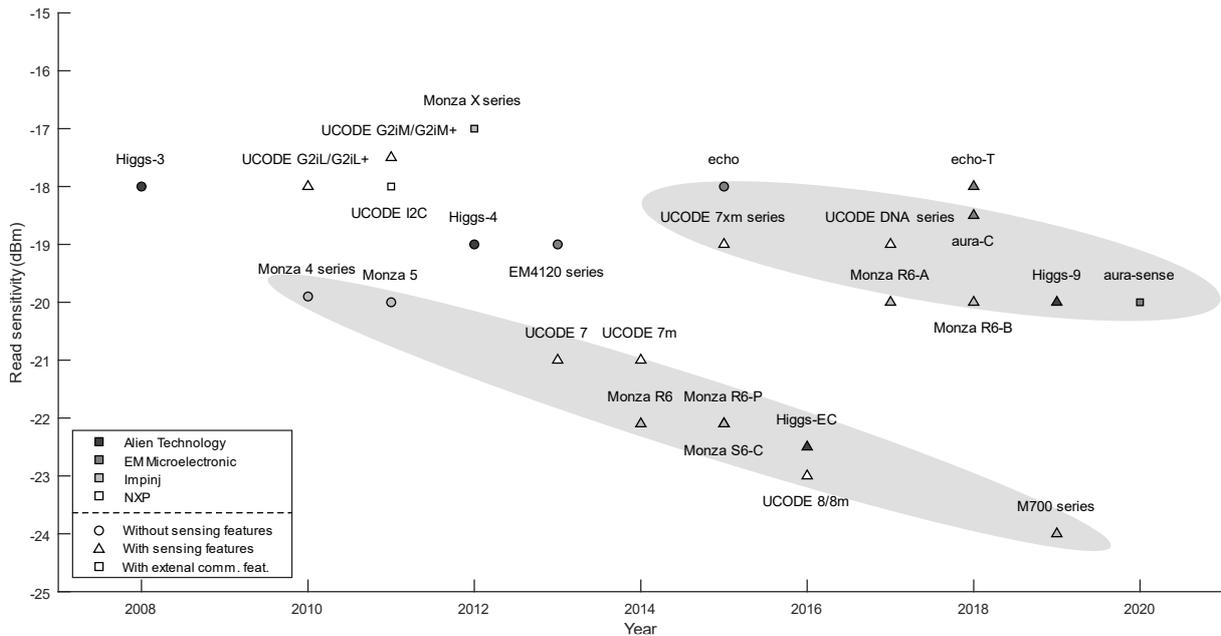


Figure 1-11 Enquête sur la sensibilité de lecture au cours du temps (cf. Annexe 1-A)

La transmission descendante se fait par modulation de la réflexion du tag. Le protocole propose les deux mêmes types de modulation que pour la liaison montante : modulations d'amplitude ou de phase. Et ces modulations transmettent des signaux binaires avec, donc, deux symboles : « haut » et « bas ». Pour la liaison descendante, le protocole GS1 EPC UHF Gen2 n'indique pas de plage pour la profondeur de modulation. Comme à l'état "haut", la puce reflète la puissance, la modulation d'amplitude a un impact sur l'énergie récoltée par la puce. En revanche, la modulation de phase donne simplement au signal un retard de phase de 180 ° entre les symboles haut et bas. Cependant, le lecteur doit percevoir un signal faible pour détecter un tag à modulation de phase. C'est pourquoi la modulation dans les puces repose souvent sur un simple transistor qui peut court-circuiter l'antenne et renvoyer toute l'énergie disponible (par exemple, Yin et al. CI [42]). Par conséquent, la liaison descendante repose souvent sur la modulation d'amplitude.

La liaison descendante peut utiliser 2 encodages de données : FM0 ou Miller.

L'encodage FM0 joue sur la fréquence de changement entre les états haut et bas. Cette fréquence dépend des états binaires (0 ou 1). Comme le montre la Figure 1-12, l'état 0 utilise une fréquence de base, et l'état 1 divise la fréquence par 2. En utilisant l'encodage FM0, les données transmises sont toujours accompagnées d'un état 1 de fin de transmission.

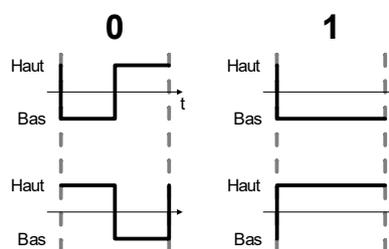


Figure 1-12 Codage des données FM0

Dans le codage Miller, les deux états utilisent la même fréquence de base. Selon l'état binaire des données à envoyer, le moment où se produit une transition de phase de 180 ° dans le signal diffère. Deux états 0 consécutifs présentent, entre eux, une transition de phase. Le signal de base reste cohérent dans tous les autres états de transition (01, 10 et 11). Un état 1 présente une transition de

phase au milieu de sa séquence. Le nombre de périodes du signal de base dans une séquence est défini par le lecteur dans le paramètre M de la première commande « Query ». Il peut être de 2, 4 ou 8 cycles par séquence (par exemple, la séquence 001_b pour M = 4 dans la Figure 1-13). Comme pour FM0, l'indication de fin de transmission est un état 1.

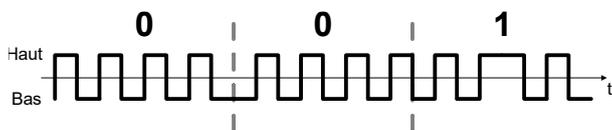


Figure 1-13 Exemple de codage Miller (séquence 001_b pour M = 4)

Comme les commandes du lecteur, les réponses du tag doivent commencer par une séquence spécifique, c'est-à-dire un "préambule".

Le codage FM0 utilise la séquence 101011_b, mais l'avant-dernier bit (c'est-à-dire le 1) est faussement codé. Une « tonalité pilote » précède le préambule et comporte 12 états 0.

Le préambule de codage Miller est 4 · M périodes de fréquence de base suivies de 010111_b. La tonalité pilote de Miller est constituée de 12 périodes de fréquence de base.

La suppression de la tonalité pilote dans les réponses dites « immédiates » est possible en réglant le paramètre « TRext » de la commande « Query ».

1.2.4.2. Mémoire

Selon la norme RAIN, la présence d'une mémoire non volatile et inscriptible n'est pas obligatoire pour les puces [41], mais la plupart d'entre elles en sont dotées. Les tags RAIN sont principalement utilisés pour leur mémoire. La capacité du tag à conserver des données, à les échanger sans visibilité directe avec le lecteur, et à les modifier à la volée est très importante par rapport aux codes imprimés (les numéros de série imprimés à l'encre ou les codes-barres). Bien que certains tags utilisent des architectures mémoire différentes (par exemple, AMS SL900A [43]), GS1 définit la mémoire des tags RAIN comme étant divisée en 4 banques : Réservé, EPC (Electronic Product Code), TID (Tag Identifier), et zones de mémoire utilisateur.

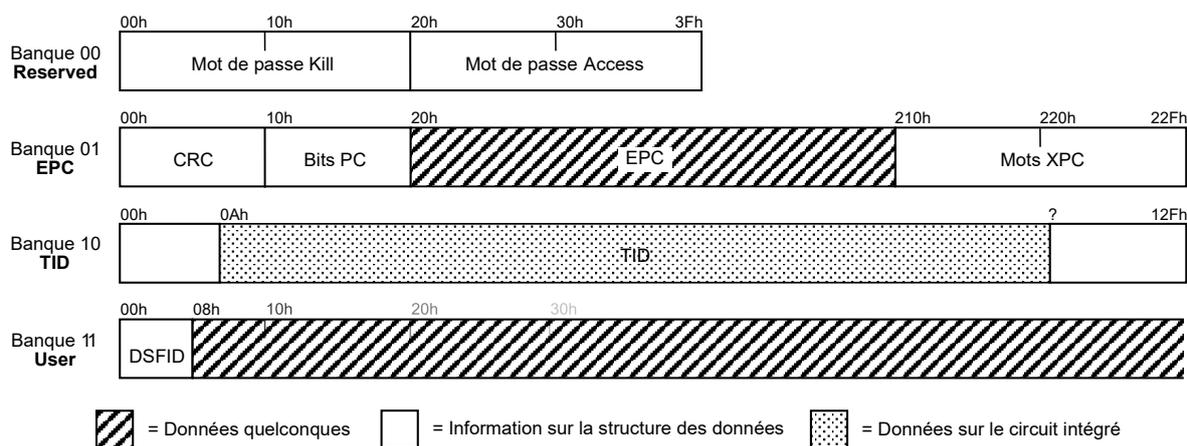


Figure 1-14 Architecture mémoire RAIN [44]

Lors des opérations de lecture et d'écriture, les données sont échangées par blocs de 16 bits, appelés « mots ».

Comme défini par GS1 dans la Figure 1-14, la mémoire réservée accueille seulement deux mots de passe de 32 bits.

Le premier est le mot de passe « kill » est utilisé avec la commande « kill » qui rend la puce inopérable de façon permanente.

Le mot de passe « access » est comparé à celui envoyé avec la commande « access » pour changer l'état du CI en communication « sécurisée ». Ce processus permet de débloquent de nouvelles commandes dans la puce.

Par défaut, cette banque mémoire est inaccessible et attend justement que la puce passe à l'état « sécurisé ».

La mémoire EPC commence par un CRC (contrôle de redondance cyclique) de 16-bits calculé sur les bits EPC suivants. La longueur de la mémoire EPC considérée pour le calcul du CRC est indiquée dans le mot PC (Protocol-Control) suivant. Un changement d'EPC doit entraîner le calcul d'un nouveau CRC. Les PC et XPC (Extended PC) contiennent des données sur l'état du CI. Ils comprennent la longueur de l'EPC, le format de la mémoire et les indicateurs de présence de banque mémoire utilisateur et XPC. En outre, si des XPC existent, ils comprennent également des informations indiquant si le tag est alimenté par une batterie, s'il peut être physiquement retiré de son article et si l'article attaché est dangereux.

La mémoire EPC est d'une grande importance pour le secteur de la logistique. Aussi, c'est dans cette mémoire qu'un tag va stocker l'EPC. De 96 à 496 bits environ (cf. Annexe 1-A), la taille de mémoire EPC varie en fonction de l'utilisation future du CI. Comme indiqué par GS1 dans le Tableau 1-2, le schéma EPC dépend du secteur cible et la longueur de l'EPC dépend du schéma.

La mémoire TID est segmentée en plusieurs champs. Si la puce est conforme à la norme GS1, comme indiqué dans le Tableau 1-3, la première valeur hexadécimale correspond à l'indicateur de classe d'attribution ISO/IEC 15963, commun à la majorité des tags RFID. Les 3 valeurs hexadécimales suivantes qui composent le reste du TID « court » sont partagées entre plusieurs valeurs. Les 3 bits suivants correspondent aux indicateurs de structure de la mémoire, les 9 bits suivants identifie le fabricant du CI (MDID) et la partie restante indique le modèle du CI.

Valeur hexadécimale	E2 _h	80 _h				68 _h	90 _h	
Valeur binaire	11100010_b	10000000_b				01101000_b	10010000_b	
Valeur binaire adressée	11100010_b	1_b	0_b	0_b	00000_b	0110_b	1000_b	10010000_b
Signification	Indicateur de classe d'attribution ISO/IEC 15963	Indicateur TID étendu	Indicateur de sécurité	Support des fichiers	MDID (Identifiant du concepteur)	Numéro de modèle de l'étiquette		
Valeur	Oui	Oui	Non	Non	NXP	UCODE 7 (SL3S1204)		

Tableau 1-3 Structure du TID « court » (adresse = 00_h) (par exemple, NXP UCODE 7)

Pour améliorer les opérations automatisées des tags, GS1 publie les MDID et les numéros de modèle des étiquettes sous forme de fichier JSON (JavaScript Object Notation). Ce fichier est toujours disponible sur leur site web avec un lien fixe [45].

Comme le décrit la Figure 1-15, les fabricants de CIs ont tendance à diviser la mémoire utilisateur dans les circuits intégrés en deux groupes : ceux qui ont besoin de stocker des données supplémentaires, et

ceux qui n'en ont pas besoin. On remarque que les puces ayant des fonctionnalités de communication numérique possèdent plus de mémoire.

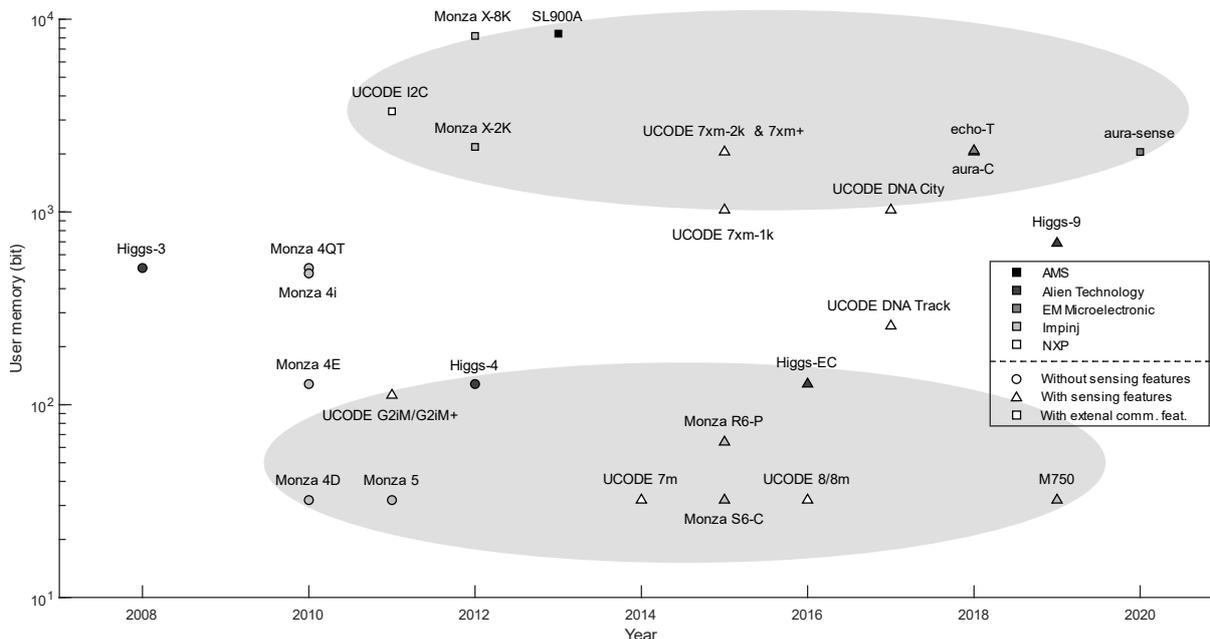


Figure 1-15 Enquête sur la mémoire utilisateur au cours du temps (cf. Annexe 1-A)

Pour la première catégorie, la mémoire de l'utilisateur commence par l'octet DSFID (Data Storage Format Identifier) afin de se conformer à la spécification GS1. Il définit la méthode d'accès et le format des données suivantes. Les formats par défaut sont dédiés au stockage de plusieurs URI EPC. Pour réussir à diviser les URI d'autres données, certains CI implémentent un système de fichiers. Grâce à des commandes supplémentaires, on peut indexer un nouveau fichier, y accéder, modifier sa sécurité ou le supprimer. La mémoire utilisateur peut aussi être utilisée pour stocker des données concernant les caractéristiques capteur : valeurs d'étalonnage ou mesures (par exemple, le stockage des mesures dans l'AMS SL900A [43]).

1.2.4.3. Circuits logiques

Le protocole EPC UHF Gen2 définit 4 types de commandes : obligatoire, optionnelle, personnalisée et propriétaire. Ces commandes ont besoin d'un mot pseudo-aléatoire généré par le transpondeur pour fonctionner, le RN16. Son côté éphémère et aléatoire permet de garder un lien entre tag et lecteur. Comme l'indique la Figure 1-16, le RN16 n'est disponible qu'après avoir atteint les états « ouvert » ou « sécurisé ».

Les commandes obligatoires concernent principalement l'inventaire des tags et les opérations de base (c'est-à-dire lire, écrire, tuer et verrouiller).

Plusieurs commandes sont optionnelles dans la conception du CI, et sont fonction de la puissance de calcul qui y est intégrée. Cependant, pour assurer l'interopérabilité, elles sont formulées par le protocole. La moitié d'entre elles concernent l'accès à la mémoire (par exemple, modifier plusieurs mots en une seule fois, ou modifier un fichier entier). L'autre moitié concerne la sécurité et les puces avec une solution cryptographique intégrée.

Des commandes personnalisées peuvent être implémentées dans une puce par son fabricant. Par exemple, EM Microelectronic EM4325 implémente une commande personnalisée pour obtenir la valeur capteur [46].

Les commandes propriétaires sont réservées au fabricant et sont définitivement désactivées lorsque la puce est commercialisée.

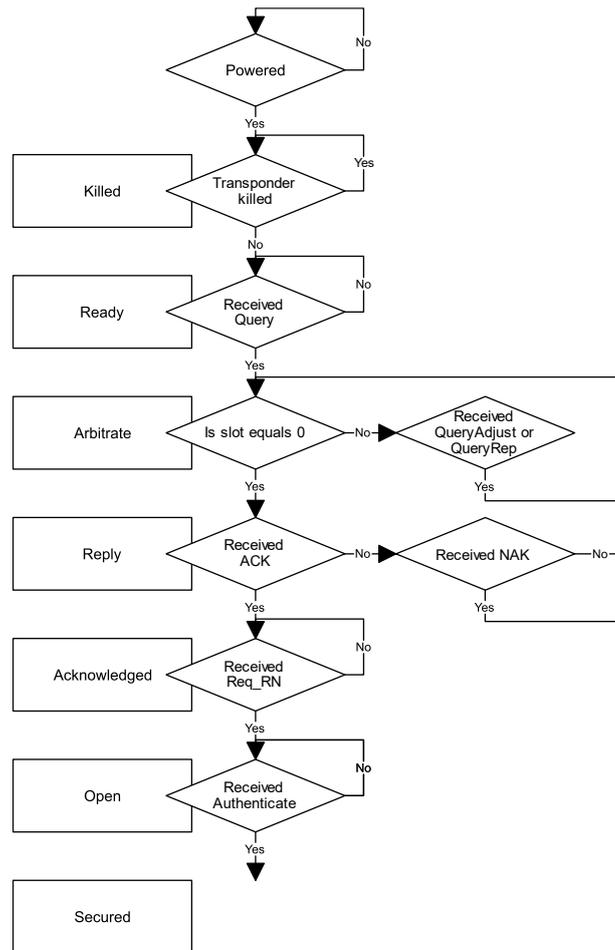


Figure 1-16 Machine d'état du CI RAIN [43]

Le CI du tag est une machine à états finis comprenant 7 états : prêt, arbitrage, réponse, acquitté, ouvert, sécurisé et tué. Comme l'indique la Figure 1-16, chaque état accepte certains accès à la mémoire et certaines commandes, et en interdit d'autres. La logistique étant le principal secteur cible, il est prévu qu'un tag RAIN soit utilisé avec d'autres pour suivre de nombreux objets. Pour cela, la communication entre un tag et un lecteur ne doit pas perturber un autre.

Tout d'abord, les tags doivent recevoir un signal EM conforme pour s'allumer. Ensuite, s'ils n'étaient pas en état « tué », ils sont maintenant dans l'état « prêt ». La ronde d'inventaire commence par l'envoi du lecteur d'une commande « Query » [41, p. 60]. Selon le paramètre Q (nombre de slots) spécifié dans la commande, les tags choisissent chacun, à l'aide de leur générateur de nombres aléatoires, un slot entre 0 et $2^Q - 1$. Les tags dont le slot est égal à zéro répondent immédiatement et sont alors en état « réponse ».

Si plusieurs tags répondent en même temps, ils créent des collisions. Certains lecteurs peuvent gérer les collisions, les résoudre et extraire le RN16 renvoyé par le tag pour poursuivre le processus d'inventaire. Lorsque les collisions ne peuvent plus être résolues car le nombre de collisions est trop important, un lecteur envoie une commande « QueryAdjust » aux tags pour augmenter le paramètre Q. La commande « QueryAdjust » peut être simplement utilisée pour mettre à jour le slot de tag, ou pour diminuer le paramètre Q afin d'accélérer l'inventaire si le nombre de tags est faible.

Lorsque le RN16 d'un tag est reçu avec succès, le lecteur envoie la commande « ACK » avec le RN16 correspondant. Le tag ciblé passe à l'état « acquitté ». En fonction du mode d'inventaire sélectionné avec la commande « select » et de la structure de la mémoire EPC, le tag envoie différentes parties de

la mémoire EPC. Une fois encore, le choix d'envoyer l'EPC au lieu du TID indique que le secteur logistique est très important. En effet, l'EPC contient des informations sur l'article attaché et non sur la puce.

Exécutée dans n'importe quel état du tag (sauf « tué »), la commande « Select » filtre les tags qui répondront à l'inventaire. Les filtres peuvent porter sur l'EPC, la TID, le DSFID (Data Storage Format Identifier), ou sur les types de fichiers.

Le module logique du CI peut également mettre en œuvre d'autres fonctions : communication numérique externe (interface périphérique série dans l'EM Microelectronics EM4325 [46], ou gestion des fonctions de mesure (détection de la température dans l'AMS SL900A [43]).

1.3. TECHNOLOGIE RAIN-CAPTEUR

1.3.1. Présentation

Dans le développement des solutions RAIN, il n'a pas fallu longtemps pour ajouter des circuits capteurs aux tags RAIN. En janvier 2005, Intel Research et l'université de Washington ont publié un article présentant la plate-forme open-source WISP (Wireless Identification and Sensing Platform) [47] qui a donné naissance à de nombreux projets capteurs...

Parmi les tags-capteurs RAIN, deux architectures de base se distinguent. Les tags-capteurs peuvent transmettre les valeurs mesurées jusqu'au lecteur soit de manière :

- Numérique, la valeur sera encodée dans une réponse du protocole RAIN (Figure 1-17 A),
- Analogique, la qualité de communication entre tag et lecteur sera modulée en fonction de la mesure (Figure 1-17 B).

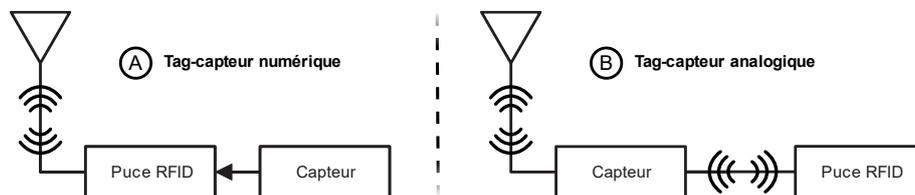


Figure 1-17 Architecture des tags-capteurs

Parmi les fabricants de puces RAIN, de plus en plus offrent une capacité de détection ou une IO (entrée/sortie) numérique. Comme le montre la Figure 1-18, la plupart des interfaces détectent le dépassement du seuil (10 circuits intégrés comportent des détecteurs de contact électrique (« détérioration » et « contact électrique »). La détection de l'impédance de l'antenne et de la puissance reçue ne nécessite pas de connexions électriques supplémentaires, il suffit d'ajouter ces fonctions aux circuits intégrés. Il en va de même pour la détection de la température, qui peut être ajoutée facilement et à bas coût avec un « silicon bandgap temperature sensor » [48]. Mais l'ajout d'une communication numérique externe (SPI (Serial Peripheral Interface), I²C (Inter-Integrated Circuit), 1-wire, ou UART (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter)) nécessite que les circuits intégrés aient des modules logiques plus puissants. Dans le cas d'un capteur analogique externe ou intégré, les circuits intégrés ont besoin de CANs (Convertisseurs Analogique-Numérique) connectés à leur module logique. Enfin, l'ajout d'une communication numérique ou analogique externe ou l'intégration d'un capteur augmente considérablement le coût des circuits intégrés produits.

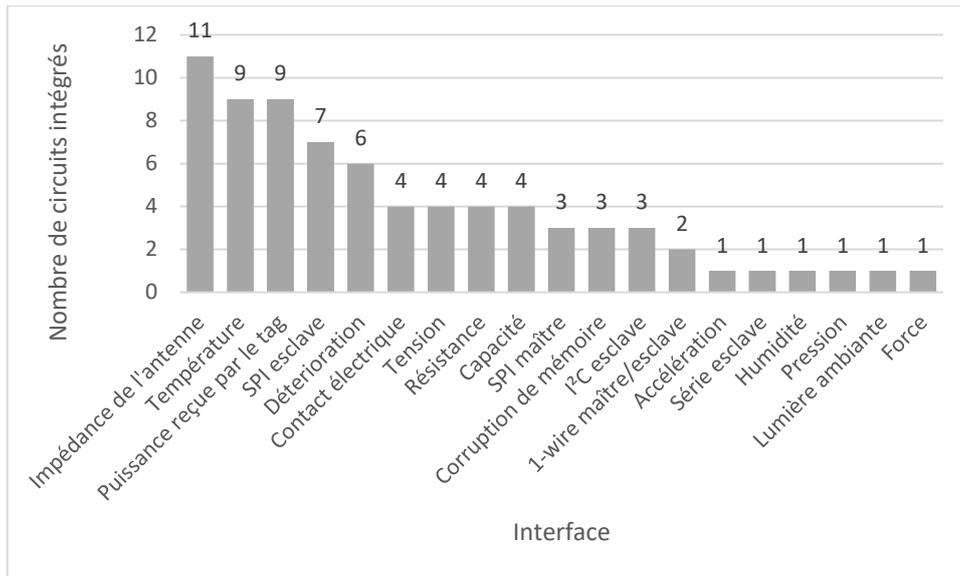


Figure 1-18 Interfaces des circuits intégrés compatibles capteur

Comme le montre la Figure 1-19, la plupart des solutions nécessitent un CI séparé qui gère les mesures dans la mémoire du CI RAIN. D'autres solutions utilisent des capteurs intégrés dans les puces RAIN, mais ciblent principalement la température avec le capteur intégré au circuit. Pour réduire le coût du tag tout en offrant une fonction de détection avancée, de plus en plus de fabricants utilisent des capteurs intégrés à l'antenne permettant de mesurer à la fois l'impédance de l'antenne et la puissance reçue [49]–[53].

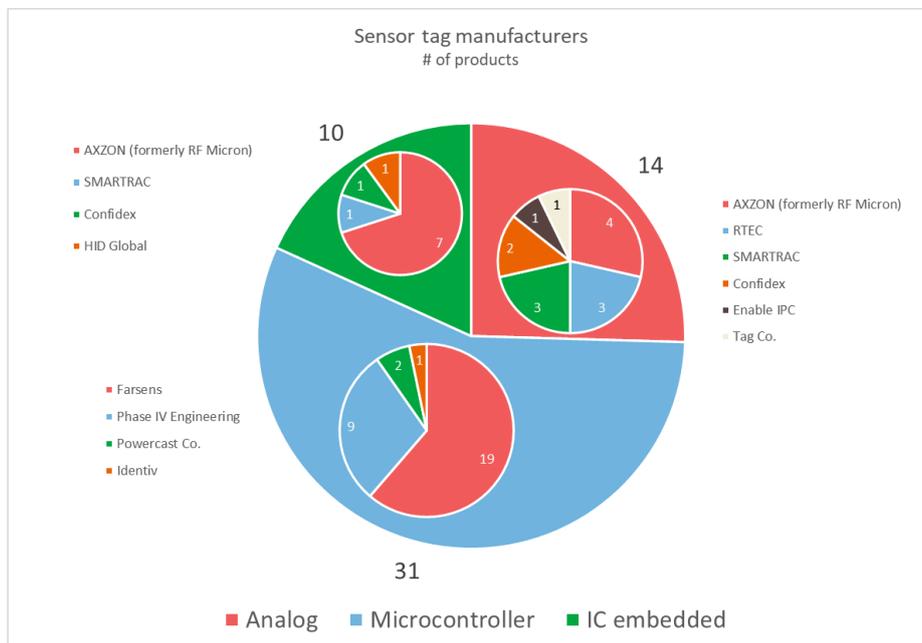


Figure 1-19 Fabricants de tags de détection

À partir de la bibliographie présentée dans ce document, de nombreuses métriques sont facilement récupérables. Par exemple, le taux de publication (Figure 1-20) montre l'intérêt du domaine de recherche.

Jusqu'en 2014, le domaine de recherche a connu une croissance constante jusqu'à son déclin autour de 2016. La mise à jour de la base de données au début de 2019 révèle que les tags-capteur RAIN suscitent à nouveau l'intérêt des chercheurs.

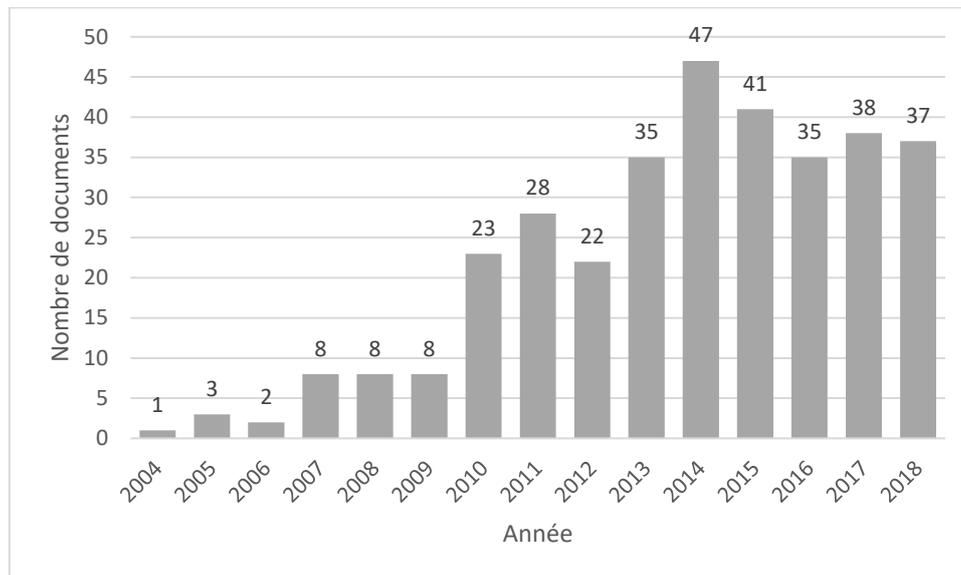


Figure 1-20 Taux de publications

Cette bibliographie présente aussi les secteurs ciblés par les documents. Comme le montre la Figure 1-21, les auteurs ont consacré leurs travaux à trois principaux secteurs.

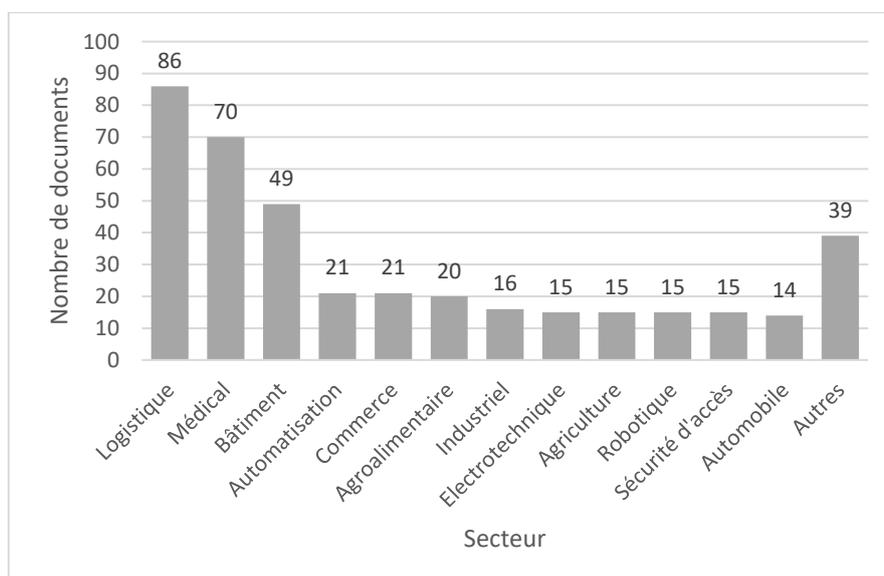


Figure 1-21 Secteurs ciblés

Le premier secteur est la logistique, avec plus de 80 documents. En effet, c'est le secteur originellement ciblé par les concepteurs de circuits intégrés. D'après le premier document présentant la norme EPC [54], cette technologie est censée « révolutionner la chaîne d'approvisionnement » en offrant un moyen sans visibilité directe d'identifier des objets, de modifier à la volée les données qui leur sont associées et de sécuriser ces données, si nécessaire.

Les documents ciblant le secteur de la logistique traitent de la sécurité du transport des marchandises, ils traitent de la surveillance de certaines variables environnementales. En raison de la pression exercée pour réduire les coûts de la logistique, un quart des articles est consacré à la détection de

seuil. De cette façon, la récupération des mesures est plus facile et réduit le déploiement de solutions matérielles ou logicielles complexes.

Le secteur médical pousse les chercheurs à innover car il est considéré comme rentable et le sentiment de servir le bien-être des gens est beaucoup plus présent. Les dispositifs de santé sont souvent considérés comme coûteux et l'étude bibliographique sur le secteur médical confirme cette hypothèse. Un seul document parmi plus de 70 dont l'application visée concerne le secteur médical mentionne un capteur de seuil.

Les tags-capteur de mouvement font l'intérêt de 20 % des documents et sont principalement conçus pour les personnes âgées ou fragiles. La plupart du temps, la détection des mouvements est assurée par des algorithmes étudiant les caractéristiques du canal entre les tags et les lecteurs. Il est également possible d'utiliser un capteur inertiel intégré aux tags, mais l'ajout de composants matériels est plus coûteux.

L'examen clinique complet commence généralement par la mesure de la température corporelle. En effet, c'est l'une des valeurs physiques les plus faciles d'accès et elle est l'indication d'infections ou d'activités physiques. Ainsi, la détection de la température représente plus qu'un septième des documents.

Le troisième secteur vu comme moteur de l'innovation en matière de tags-capteurs RAIN est celui du bâtiment. Les dispositifs SHM (Structural Health Monitoring) peuvent être plus chers car ils doivent durer longtemps pour surveiller un bâtiment pendant des années.

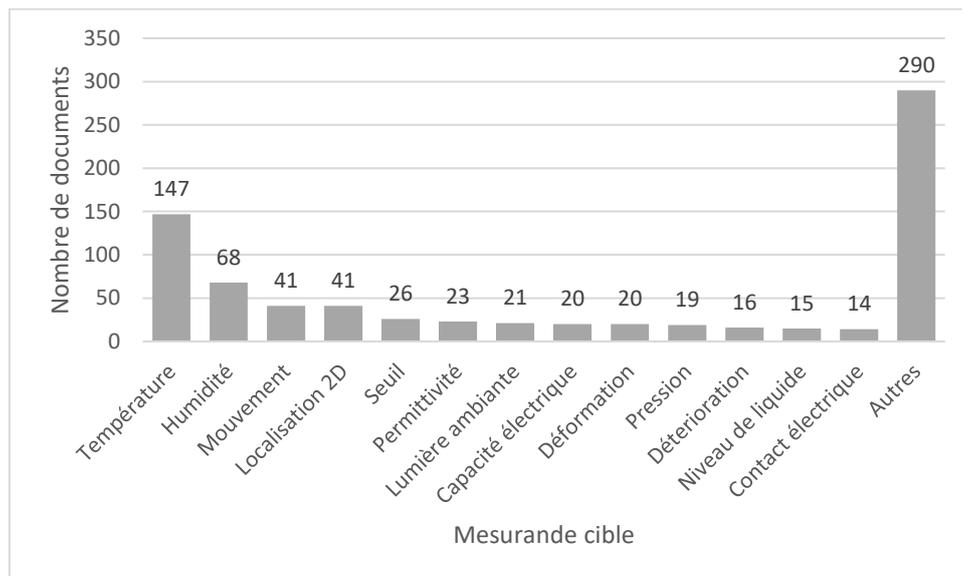


Figure 1-22 Mesurandes cibles

Comme indiqué dans la section précédente, intégrer un capteur de température est facile et bon marché, c'est pourquoi l'intérêt pour la température est nettement supérieure aux autres mesurandes. En outre, cette valeur de mesure est à la base de presque toutes les activités physiques qui nous entourent (par exemple, les réactions chimiques ou l'état des patients). C'est pourquoi elle représente plus de 20 % des documents présents dans notre bibliographie comme le montre la Figure 1-22.

Les antennes sont sensibles aux matériaux proches les uns des autres, en particulier ceux à forte permittivité électrique ou à forte perméabilité magnétique. Avec l'eau qui possède une haute permittivité (par ex. $\epsilon_{r_{eau}}(f = 1.821 \text{ GHz}, T = 25 \text{ }^\circ\text{C}) = 78$ [55]), l'humidité affecte grandement les antennes.

Parmi les mesurandes les plus ciblées (Figure 1-22), la localisation et la détection des mouvements sont dues à l'utilisation originelle de la RFID dans la logistique. Ici, ces mesurandes sont utilisés pour assurer l'intégrité des produits transportés.

La catégorie « autres » désigne tous les mesurandes pour lesquels on compte moins de 13 documents. Le nombre de 290 documents nous informe de la diversité des mesurandes ciblés.

1.3.2. Fonctionnement

1.3.2.1. Transmission numérique des mesures

Comme la transmission numérique des mesures nécessite davantage de composants et de traitement des données, le prix des tags est plus élevé. Cependant, en utilisant le protocole RAIN, les mesures sont numérisées avant la transmission sans fil et ne sont pas sujettes à l'atténuation du canal.

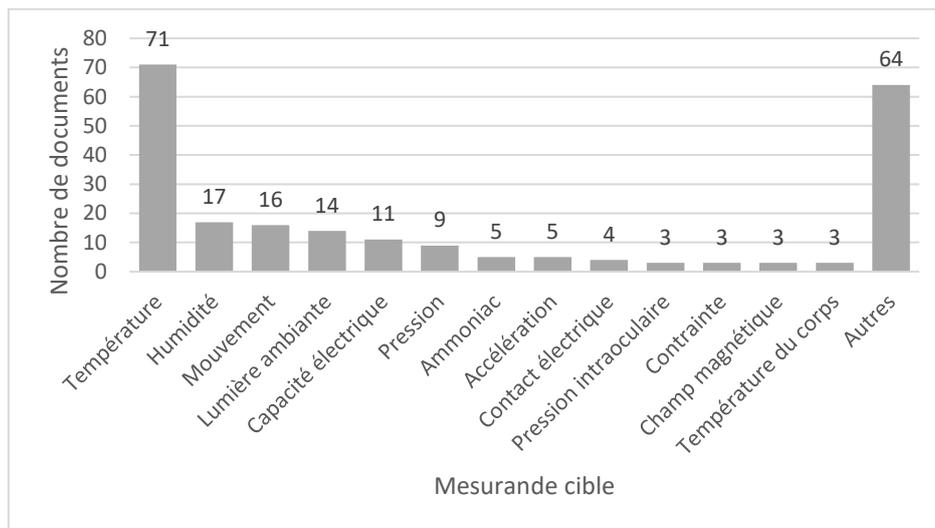


Figure 1-23 Mesurandes cibles de la transmission numérique

Parmi les transmissions numériques, la température domine les mesurandes, comme le montre la Figure 1-23. Cela est dû aux développements de puces et à l'intégration plus simple de capteurs de température numériques.

Comme les circuits intégrés ont plus de fonctionnalités, les cibles de détection dans cette section devraient être plus diverses. Or, ce n'est pas le cas. Nous attribuons cela au fait d'un manque de maturité de la technologie RFID UHF passive et au manque de puissance disponible pour permettre une communication lointaine et une mesure stable. En effet, d'autres solutions de mesure sans-fil sont disponibles aujourd'hui (par exemple, Bluetooth) et la nature passive de la technologie RAIN n'est pas encore mise en avant.

Comme le montre la Figure 1-24, peu de puces sont compatibles pour être connectées avec d'autres éléments. La moitié d'entre elles est capable de numériser une mesure, et l'autre moitié nécessite un composant externe.

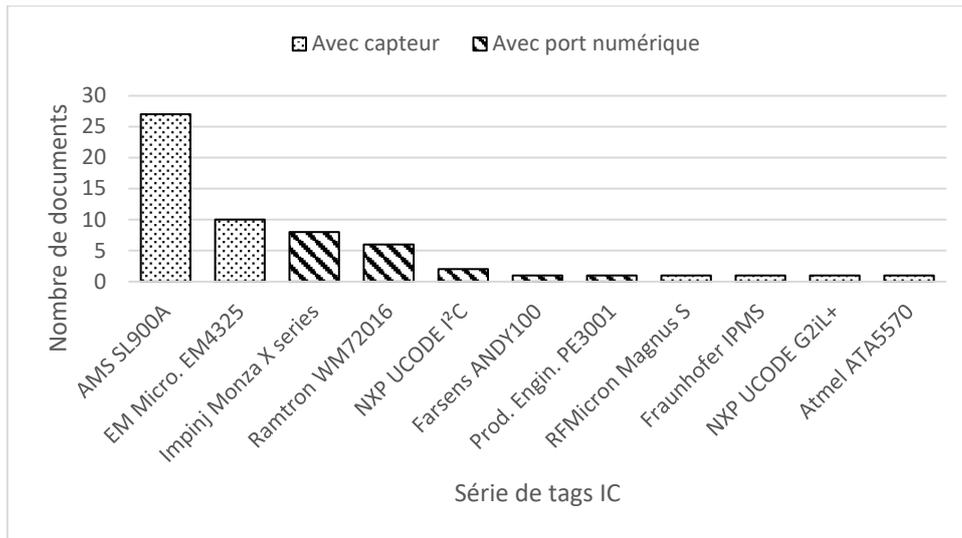


Figure 1-24 Utilisations académiques des puces pour la transmission numérique des mesures

1.3.2.1.1. Circuit intégré RAIN avec fonctions capteur

Le développement d'un CI avec fonctionnalité capteur nécessite plus de ressources qu'un CI commun et doit faire face aux réglementations RAIN. En effet, le CI doit intégrer un circuit logique pour envoyer le résultat au lecteur et une mémoire dédiée pour stocker le résultat. Si le capteur est analogique, comme le montre la Figure 1-25 (gauche), il a besoin d'un convertisseur pour transformer la mesure en résultat numérique, et d'un élément capteur. Si le capteur est numérique, il doit supporter un protocole numérique pour échanger des données, comme dans la Figure 1-25 (droite).



Figure 1-25 Diagramme du CI RAIN avec fonction de détection analogique (gauche) ou numérique (droite)

Le circuit EM Microelectronics EM4425 est le CI RAIN le plus utilisé pour la détection de la température. Il a été utilisé pour surveiller le séchage du béton dans le cadre du travail de Manzari *et al.* [56], pour cartographier la température dans les tuyaux (Lopez-Soriano *et al.* [57]), pour surveiller la santé de patient (Amendola *et al.* [58], Rashee *et al.* [59]), et pour rétablir la sensation thermique chez les personnes atteintes de neuropathie (Di Cecco *et al.* [60]). En outre, l'EM4425 est utilisé dans un produit commercial dédié à la détection de la température, le tag Confidex TempLabel [61].

Parmi les CI avec fonctionnalité capteur, le SL900A d'AMS est le plus utilisé, comme le montre la Figure 1-24. Son fabricant, connu auparavant sous le nom de « Austriamicrosystems », est spécialisé dans la conception de CI capteur. En plus de sa conformité totale avec RAIN, le SL900A présente les caractéristiques suivantes [62]:

- Gestion de la batterie avec collecte d'énergie à partir de l'énergie incidente du lecteur
- Communication SPI (en mode esclave)
- Horloge en temps réel pour l'horodatage
- Détection de la température de -29 °C à 58 °C
- 2 interfaces de capteurs externes dont une qui prend en charge la mesure de capacité
- CAN (Convertisseur Analogique-Numérique) multiplexé avec une résolution de 10 bits sur la détection.

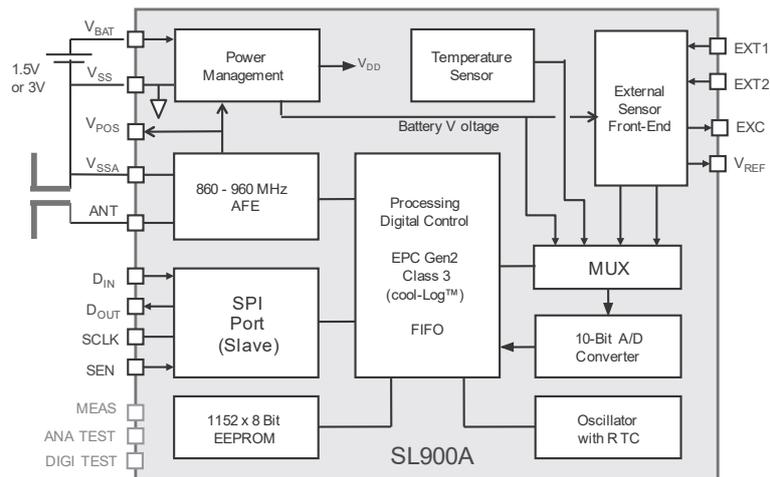


Figure 1-26 Schéma fonctionnel de l'AMS SL900A

Le principal inconvénient de toutes ces caractéristiques est la faible sensibilité RF (-6,9 dBm) lorsqu'il n'est alimenté que par l'énergie incidente.

Les auteurs choisissent le plus souvent le SL900A pour son CAN haute résolution et sa fonction de mesure de température intégrée.

Vena *et al.* associent un magnétomètre simple-axe à l'AMS SL900A pour contrôler la quantité et la qualité du mouvement [63]. Vidal Aroca *et al.* utilisent le même CI pour numériser l'état de flexion des doigts en utilisant un capteur de flexion résistif de Spectra Symbol [64]. Ces deux derniers projets ont pour but de surveiller la rééducation des victimes d'accidents vasculaires cérébraux dans le processus de récupération de l'hémiplégie.

Vena *et al.* ont également présenté une prothèse corporelle équipée d'un tag basé sur le SL900A [65]. Un capteur de pression est connecté au CI et peut indiquer si la prothèse est toujours bien fixée à l'os. Une autre fonction consiste à identifier les prothèses grâce aux caractéristiques RAIN d'identifiants uniques.

Fonseca *et al.* [66] et Pichorim *et al.* [67] ont, tous deux, développé des tags-capteurs de l'humidité du sol. Ces deux projets utilisent des électrodes interdigitées car ce composant permet une conception coplanaire.

Après avoir calibré la pression du ballon de sport en fonction de la force exercée sur sa surface, Rennane *et al.* utilisent un capteur de force flexible et le SL900A pour détecter indirectement la pression [68]. Ils ont construit un ballon de sport conforme à la norme RAIN avec un capteur de pression intégré.

Certains groupes de recherche travaillent à l'intégration de capteurs directement dans le circuit intégré du tag afin d'améliorer la fiabilité, la précision et la sensibilité.

La grande majorité d'entre eux intègrent un capteur de température dans leur conception. Et près de la moitié des articles scientifiques sur les CI avec capteur intégré sont entièrement consacrés à la température [69]–[78].

Plusieurs circuits intégrés RAIN commerciaux sont dotés d'un capteur de température : AXZON Magnus S3 series, et RFM5000, AMS SL900A, SERMA Productivity engineering PE3001, et EM Microelectronics EM4325. Ils prennent en charge une large gamme de températures (de -30 °C à +50 °C environ) qui couvre de nombreuses applications (logistique du froid, température du corps).

Feldengut *et al.* ont conçu un CI RAIN avec 4 entrées de détection de contact électrique [79]. Pour ne pas gaspiller d'énergie, le CI envoie un petit courant dans une entrée. Si un élément externe est

connecté à l'entrée, le courant circulera dans celui-ci avant de revenir par la masse. Plus son impédance est faible, plus la tension sur le connecteur d'entrée est faible. Cette entrée est également connectée à un comparateur qui indique si la tension d'entrée est suffisamment élevée pour être considérée comme un circuit ouvert.

La détection de la lumière étant bien connue dans les conceptions microélectroniques, il n'est pas étonnant qu'elle ait été l'un des premiers mesurandes. En 2005, Cho *et al.* ont présenté un tag capable de détecter la température ambiante et la lumière [80]. Une photodiode intégrée décharge un circuit composé de transistors, et ce proportionnellement à la lumière. À l'aide d'une porte NOR, le taux de décharge est comparé à un signal d'horloge. Il en résulte des impulsions dont le nombre est lié à la quantité de lumière reçue.

En 2006, Zhou et Wu ont présenté un CI sensible aux champs magnétiques [81]. En se basant sur l'effet Hall des transistors, ils en combinent deux pour augmenter la sensibilité. Avec un amplificateur supplémentaire, la sensibilité résultante est de 40 V/T. Comparé au champ magnétique de 22-67 μT [82], ce CI est plus adapté à la détection d'aimants qu'à une boussole.

Le suivi des bio signaux in-vivo des insectes nécessite des composants électroniques aussi petits que possible. Sans alimentation externe, le tag RAIN est suffisamment léger pour qu'un insecte puisse le porter. Yeager *et al.* ont conçu un CI et une antenne correspondante pour cette utilisation [83]. Le circuit intégré intègre un CAN (registre à approximation successive) de 8 bits précédé d'un amplificateur stabilisé par un hacheur. Ce dernier élimine le bruit du signal, surtout pour les signaux de basse fréquence. L'entrée capteur est alors connectée à un thermocouple implanté dans le muscle de l'aile d'une mite pour surveiller comment la température peut affecter la performance du muscle.

Certains circuits intégrés, présentés dans le Tableau 1-4, sont dotés d'une fonction de « réglage automatique », ou *auto-tuning*, qui adapte les composants internes afin de recevoir et de rétro moduler au mieux le signal. Une fois que le CI s'adapte avec succès, il stocke dans sa mémoire l'impédance choisie. Cette technologie a été brevetée par Impinj en 2015 [84], [85].

Grâce à cette caractéristique, Zannas, El Matbouly, Duroc et Tedjini ont créé un tag sensible à la température [86]. En utilisant comme substrat un matériau dont la permittivité dépend de la température, les auteurs ont forcé le circuit intégré à s'adapter pour ne pas perdre le signal avec la température. Les inconvénients de cette technique est qu'une autre variable peut agir sur le tag et le désaccorder, et que l'adaptation de la puce se fait uniquement sur 5 valeurs.

Pour transmettre la mesure à deux états (un seuil), on pourrait utiliser un CI capable de détecter un arrachement d'une partie du circuit de l'antenne, si le capteur est de type résistif.

Avec l'UCODE G2iM+ de NXP, Identiv commercialise le tag DetectL Dry Inlay qui détecte la détérioration du tag [87]. Le tag est entouré d'un fil dont les deux extrémités sont connectées au port de détection de contact électrique du CI.

La norme RAIN permet d'inventorier plusieurs tags. Lorsque des personnes doivent sélectionner un tag spécifique, elles ont besoin de connaître une partie de l'identifiant unique pour le sélectionner ou bloquer l'interaction RF entre le lecteur et les autres tags. Pour automatiser ce filtrage, Gladysza et Lysiak ont installé un capteur de lumière infrarouge entre les broches de détection de contact électrique d'un CI NXP UCODE G2iL+ [88]. Ainsi, un lecteur peut savoir qu'un tag spécifique doit être sélectionné en interrogeant simplement l'état des contacts électriques.

Si le capteur utilisé fournit de l'énergie pour alimenter un tag semi-passif, les auteurs pourraient également utiliser l'indicateur de batterie d'un CI semi-passif pour envoyer la mesure de seuil.

Kantareddy *et al.* utilisent le port d'alimentation externe de l'EM Microelectronic EM4325 pour détecter une réaction résistive ou électrochimique [89]. Ils ont réussi à obtenir les caractéristiques du

port afin de surmonter le seuil et pour entraîner un changement d'indicateur. La réaction résistive sert à détecter le gaz NO₂ et la réaction électrochimique à détecter le glucose. La détection de ces réactions est utile mais a seulement été utilisée comme preuve de concept dans cet article.

En utilisant le même circuit intégré, Vera *et al.* ont innové en connectant le port d'alimentation externe à quelques photodiodes pour détecter la lumière ambiante [90]. Les photodiodes fournissent une tension avec la lumière, ce qui déclenche la fonction d'alimentation externe du circuit intégré. Cette opération est rapide car le courant fourni est faible. Une lecture constante de la puissance d'activation du tag est donc nécessaire. La luminosité bascule la puce du mode passif au mode semi-passif, et inversement. Cela occasionne également un changement de la puissance d'activation détectable au niveau du lecteur.

Fabricant	Série	Modèle	Auto-tuning	Indicateur de puissance reçue	Semi-passif	Détection de contact électrique	
Impinj	M700	M730	●				
		M750	●				
	Monza R6	R6-A	●				
		R6-B	●				
		R6-C	●				
		R6-P	●				
	Monza S6	S6-C	●				
	Monza X	X-2K				●	
X-8K					●		
NXP	UCODE 8	8	●				
		8m	●				
	UCODE 7	7			●		
		7m			●		
		7xm			●		
	UCODE G2iM	G2iM				●	●
		G2iM+				●	●
	UCODE G2iL	G2iL				●	●
		G2iL+				●	●
	UCODE DNA	City			●		
		Track			●		
	AXZON (anciennement RFMicron)	Magnus	S2	●	●		
S3 M3D			●	●			
S3 M3E				●			
Xerxes		Xerxes-I	●	●	●		
		Xerxes-II	●	●	●		
AMS		SL900A			●		
SERMA		PE3001			●		
Farsens		Rocky100			●		
EM Microelectronic	EM4320	EM4324			●		
		EM4325			●	●	
	echo	echo-T					●
		echo-V					●

Tableau 1-4 Caractéristiques de détection intégrée aux CIs RAIN

Une autre caractéristique intéressante des CIs est l'indicateur de puissance reçue par le tag, ou « On-chip RSSI » en anglais. Une fois transmis au lecteur, un logiciel serait capable d'estimer précisément l'atténuation du canal de transmission.

En tant qu'un des leaders dans le domaine des tags de détection, AXZON (anciennement RFMicron) innove avec ses fonctions d'auto-tuning et d'indicateur de puissance reçue. La majorité des tags commercialisés équipé de CI AXZON visent à détecter l'humidité : RFMicron RFM2100 [91], RFM2110

[92], et RFM2120 [93], RTEC RS MAGNUS [50], ATOM MAGNUS [94], et PROTON MAGNUS [95], SMARTRAC SENSOR DOGBONE [51], PATCH [96], et TADPOLE [97]. En général, la détection de l'humidité est assurée par une petite zone de l'antenne qui interagit autant que possible avec le matériau externe (par exemple, des électrodes interdigitées). Avec un circuit d'antenne classique, ces CI sont sensibles aux changements de l'environnement électromagnétique à proximité (par exemple, la présence d'un matériau à haute permittivité ou d'un métal). En raison de la haute permittivité du corps humain, le tag RFMicron Chameleon annonce une détection de présence [98].

1.3.2.1.2. Conceptions assistées par microcontrôleur

Pour pouvoir utiliser des microcontrôleurs dans des circuits de tags, ils doivent consommer très peu et doivent être peu coûteux. Le CI gère le protocole RAIN et communique avec le microcontrôleur principalement par le biais du bus série, comme le montre la Figure 1-27.

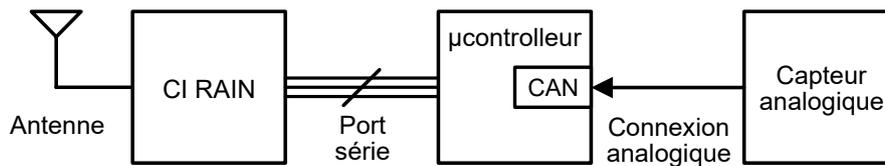


Figure 1-27 CI RAIN assisté par microcontrôleur

Alors que le SL900A intègre des fonctions de CAN et d'enregistrement autonome, certains l'utilisent comme un pont vers un microcontrôleur.

Fonseca *et al.* utilisent un circuit intégré RFID SL900A, un microcontrôleur PIC16 et un collecteur d'énergie sans fil externe [99]. En se basant sur le changement de la permittivité du sol causé par sa teneur en eau, les auteurs surveillent l'humidité du sol en utilisant une ligne de transmission. La ligne est enterrée, et un signal électrique de 175 MHz est fourni par un oscillateur. Le signal circule dans la ligne et est récupéré à l'autre extrémité. Un nouveau signal PWM (modulé en largeur d'impulsion) est produit à partir de la différence entre les fréquences des signaux entrant et sortant. Le signal numérique produit est facilement détecté par le microcontrôleur.

L'EM4325 d'EM Microelectronics est l'une des interfaces analogiques les plus utilisées. Elle comprend un capteur de température, un capteur de contact électrique, un port SPI maître /esclave, et un circuit de gestion de l'énergie.

Unander *et al.* impriment l'antenne, le capteur d'humidité interdigité et le circuit en utilisant de l'encre argent sur du papier [100]. Pour enregistrer les mesures lorsque aucun lecteur n'est présent, ils incluent des batteries flexibles qui sont chargées à l'aide de la fonction de collecte d'énergie de l'EM4325. Pour gérer les mesures et inclure plus de mémoire, les auteurs utilisent le microcontrôleur PIC18LF de Microchip Technology.

C. S. Dos Santos *et al.* ont choisi le microcontrôleur Texas Instruments MSP430 pour créer un enregistreur de température autonome [101]. Pour stocker jusqu'à 32700 mesures de température, l'EM4325 les déplace vers la mémoire du microcontrôleur.

Un transformateur électrique voit passer beaucoup d'énergie, Wang *et al.* profitent des fuites magnétiques qu'il peut y avoir pour alimenter un tag [102]. Le tag utilise le même microcontrôleur et le même CI RAIN que le projet précédent. Il est alimenté par une bobine placée près du circuit principal du transformateur électrique. Avec un accéléromètre à 3 axes, il surveille les vibrations des transformateurs qui est un signe de défaut à venir.

Powercast commercialise un enregistreur sans fil conforme à RAIN avec ou sans capacité semi-passive [103]. La marque propose plusieurs solutions de capteur (température, lumière, ou humidité). Il

comprend un CI RAIN, un microcontrôleur et divers capteurs numérique, comme décrit dans la Figure 1-28. Mais comme la plupart des produits commerciaux, la conception reste confidentielle.

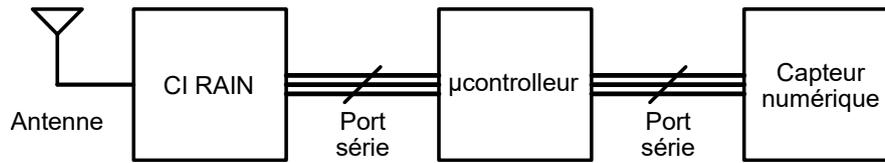


Figure 1-28 Diagramme du microcontrôleur avec le RAIN IC et le capteur numérique

Certains projets parviennent à gérer le protocole RAIN uniquement avec un microcontrôleur. Ils doivent alors reconstruire des circuits de modulation/démodulation et de collecte d'énergie. Ils doivent également implémenter la machine d'état RAIN dans la logique du microcontrôleur. Ces projets suivent généralement le schéma présenté à la Figure 1-29.

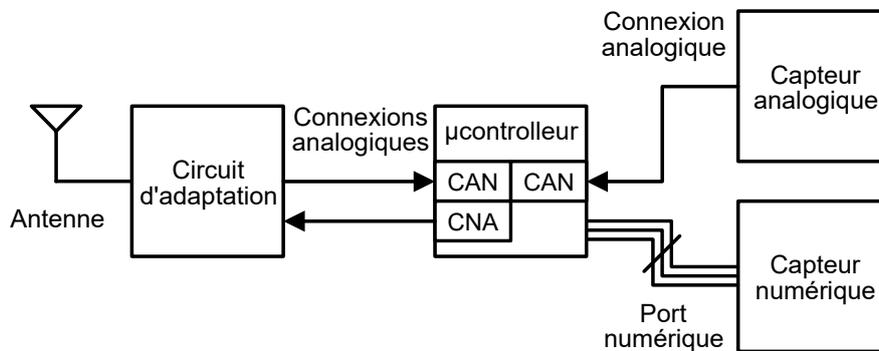


Figure 1-29 Diagramme du microcontrôleur avec support du protocole RAIN intégré

En 2011, l'IPMS (Institut de Photonique et des Micro Systèmes) Fraunhofer a réussi à intégrer dans la même puce un CI RAIN et un microcontrôleur [104]. De cette façon, le microcontrôleur n'a pas à s'occuper de la machine d'état RAIN et s'occupe simplement de ces instructions. Le CI ainsi obtenu dispose d'une mémoire de 4 kbit, du jeu d'instructions PIC16 de Microchip Technology, d'une alimentation pour composants externes ou d'un mode entièrement passif, d'un capteur de température intégré, d'un GPIO (General Purpose Input/Output), d'un CAN 10 bits et d'un port I²C. Par la suite, Heiß et Hildebrandt ont testé leur circuit intégré dans un environnement à haute température, jusqu'à 170 °C [105]. Ils ont associé au CI un capteur numérique pour les hautes températures. Ainsi, ils ont pu surveiller la température à l'intérieur de commutateurs de haute puissance électrique. Le CI IPMS a réussi le test.

En 2016, Sauer et Fischer, également de l'IPMS, ont proposé d'ajouter un capteur d'humidité irréversible au CI précédent [106]. Des sels sensibles à l'humidité empêchent la nanoparticule d'argent de conduire le courant électrique. Le capteur de seuil d'humidité résistif qui en résulte est connectée à un port GPIO, et indique donc si le tag a été exposé à une forte humidité.

Les circuits intégrés RAIN de Farsens combinent également des circuits d'adaptation et un microcontrôleur dans le même boîtier. Quelques exemples d'utilisations sont trouvés dans des publications scientifiques. En 2014, Solar *et al.* utilisent le CI Farsens pour surveiller la température à l'intérieur d'un aimant de rotor avec une plage de température extrême [107]. Cela pourrait être utilisé comme une alarme en cas de surchauffe. L'utilisation d'un tag-capteur RAIN est tout indiqué. L'élément surveillé ici n'est pas facilement accessible à la mesure.

Farsens ANDY100 dispose d'une alimentation en énergie pour des composants supplémentaires et d'un port SPI qui supporte le mode « maître » [108]. Cependant, l'énergie RF à fournir par un lecteur est élevée avec une sensibilité RF de -2 dBm. Dans un article de conférence de 2014, Zalbide Agirrezabalaga *et al.* ont présenté la conception de l'ANDY100 et deux exemples d'application [109]. L'un visait à détecter la température et l'autre la pression. En 2017, Jauregi *et al.* ont lié l'ANDY100 à un générateur thermoélectrique pour détecter la température corporelle jusqu'à 3 mètres [110]. Le tag visait une application médicale pour surveiller la santé des patients. En utilisant le circuit Farsens Medusa-M2233 avec le circuit intégré ANDY100, Oharada *et al.* ont créé un tag fonctionnant en champ proche dont la lecture actionnera différente fonction selon son mouvement [111]. Il comprend un accéléromètre connecté à un port SPI. Ce dernier connecte un écran pour montrer à l'utilisateur une indication concernant des informations personnelles au moment du passage. Comme il est basé sur l'ANDY100, le circuit final a besoin de beaucoup d'énergie et c'est pourquoi il fonctionne seulement en champ proche.

Ce problème d'énergie a été résolu grâce à Rocky100, doté d'une sensibilité RF de -14 dBm, d'une plus grande mémoire, d'un SPI avec mode maître/esclave, de ports GPIO et d'un générateur PWM (Pulse-Width Modulation) [112].

Afin de réduire le temps de conception d'un tag-capteur RAIN, le logiciel et le matériel nécessaire pour produire une solution WISP (Wireless Identification and Sensing Platform) sont disponibles en source ouverte sur GitHub [113]. Les contributeurs sont issus du département de génie électrique et informatique de l'université de Washington ainsi que des laboratoires de recherche Intel et de Disney. Pour réduire le matériel nécessaire, P. Sample *et al.* ont intégré tout le protocole RAIN dans le microcontrôleur MSP430 de Texas Instruments et y ont ajouté des composants électroniques pour créer un modem approprié [114]. Le schéma final proposé par l'équipe est illustré dans la Figure 1-30. En se basant sur des composants électroniques accessibles et économes en énergie, le WISP prouve que la fabrication d'un tag RAIN ne nécessite pas forcément une conception de CI.

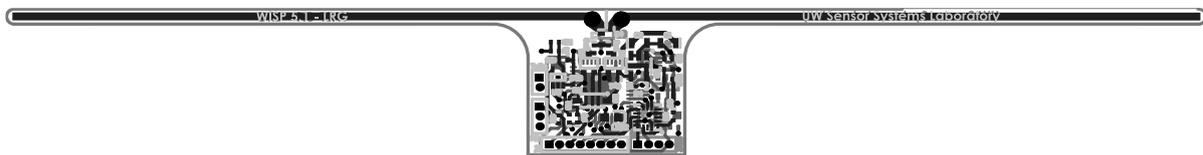


Figure 1-30 Disposition du WISP 5 [115]

La démodulation entrante et la rétro modulation sont assurées par un circuit simple, comme le montre la Figure 1-31. Le schéma du modem peut être divisé en 3 circuits :

- Partie A : adaptation de l'antenne (et rétro modulation)
- Partie B : récolte d'énergie
- Partie C : démodulation du signal entrant

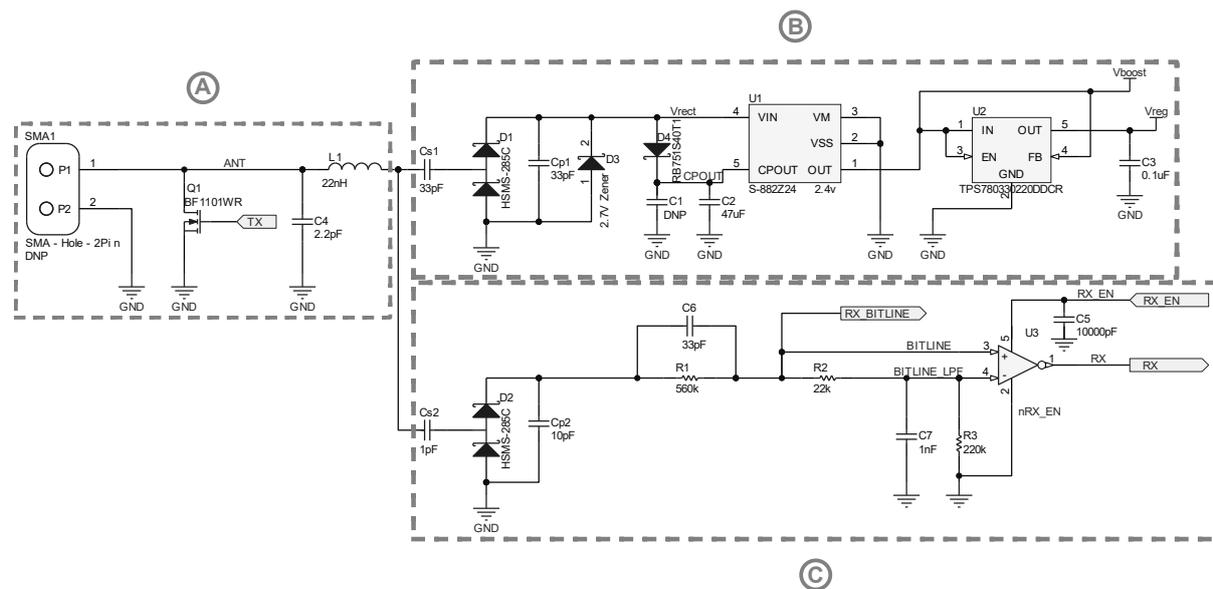


Figure 1-31 Schéma du modem utilisé par le projet WISP 5 [115]

La communication RAIN étant limitée à 640 kbps [41], l'utilisation du microcontrôleur Texas Instruments MSP430FR5969 suffit à cette limite, tout en permettant de réduire la consommation d'énergie [116]. Ce microcontrôleur offre un CAN qui décode la commande RAIN à partir de l'enveloppe des signaux entrants. D'autres entrées analogiques sont disponibles, ainsi que des ports SPI, I²C et UART. Ces entrées peuvent servir d'interface à des capteurs ou des actionneurs.

Malgré le fait que ce projet soit inspirant, les développements ont été arrêtés en 2018. Le projet est désormais archivé et son site web contenant la documentation est fermé (toujours accessible grâce à l'Internet Archive) [115].

En 2008, Yeager *et al.* ont présenté la première application du projet WISP [117]. Une ligne de transmission ouverte passe sur le côté d'une bouteille et est connectée au CAN du MSP430. La capacité du microcontrôleur à passer d'une broche de sortie à une broche d'entrée permet à cette mesure de rester simple. Grâce à son temps de charge/décharge, la ligne est utilisée pour détecter le niveau du liquide. Comme ce projet vise principalement le secteur de la logistique, le capteur de température intégré MSP430 est également utilisé pour surveiller la surexposition à la température. Pour améliorer la sensibilité et la précision des mesures de température, Sample *et al.* ont connecté le capteur de température analogique Texas Instruments LM94021 au WISP [118].

En 2016, T. Hoang *et al.* présentent un tag basé sur le WISP qui détecte l'ouverture des containers [119]. Dans ce projet, le modem du WISP n'est pas composé de composants discrets et est intégré dans une seule puce électronique. De plus, deux de ces modems sont utilisés pour les polarisations verticale et horizontale. Les deux signaux sont combinés pour fournir au MSP430 le signal RAIN. L'ouverture du scellé est détectée à l'aide d'une fibre optique. Contrairement aux signaux électriques, les signaux optiques ne risquent pas d'être perturbés par le conteneur métallique. Pour éviter le piratage ou la substitution de la source optique, des impulsions optiques aléatoires sont utilisées.

Pour améliorer la localisation des tags, les auteurs bénéficient d'une plus grande puissance de calcul du WISP.

En 2013, Zhao et R. Smith intègrent un capteur à ultrasons au tag [120]. En plaçant des balises à ultrasons autour de la zone, ils ont pu localiser l'emplacement du tag. Le dispositif mesure le temps de

retard des signaux ultrasonores. Cette technique n'est pas employée avec les signaux électromagnétiques en raison de leur vitesse, de la distance entre le lecteur et le tag et de son coût. Et, en 2015, Naderiparizi *et al.* ont installé une caméra dans un tag passif [121]. Combiné à des tags WISP qui clignotent à l'aide de diodes électroluminescentes et qui agissent comme des balises, le WISP-Cam peut se localiser. Bien que la WISP-Cam soit autonome pour traiter les images et supprimer l'arrière-plan statique, elle a toujours besoin d’une architecture spécifique pour se synchroniser avec les tags clignotants.

Dementyev et Smith ont étendu les fonctionnalités du WISP à l'électroencéphalogramme (EEG) [122]. Utilisant la norme RAIN, ce dispositif ne numérise que le signal d'une seule électrode entre le front et l'occiput sur le côté droit du crâne (le lobe de l'oreille droite du patient sert de masse active). De cette façon, les chercheurs ont pu enregistrer les signaux qui sont significatifs de l'état d'ouverture des yeux.

1.3.2.2. Fonctionnalisation de l’antenne en capteur

Dans les projets de tags qui utilisent la transmission analogique des mesures, deux types d’atténuation du signal se distinguent. La première est due au canal de transmission et peut donc détecter un changement des milieux que l’onde traverse. La seconde est due à l'antenne du tag, elle permet de mesurer une variable quelconque pourvu que l’antenne ait été fonctionnalisée pour cela. Les deux dépendent fortement des matériaux qui entourent le lecteur et le tag.

L'utilisation d'un tag RAIN conventionnel comme capteur peut permettre de réaliser des économies importantes en termes de matériaux et de conception. Cependant, cela est contrebalancé par une manière plus complexe pour récupérer les mesures des tags. En outre, de nombreux articles utilisent des configurations de lecteurs complexes qui visent principalement les laboratoires.

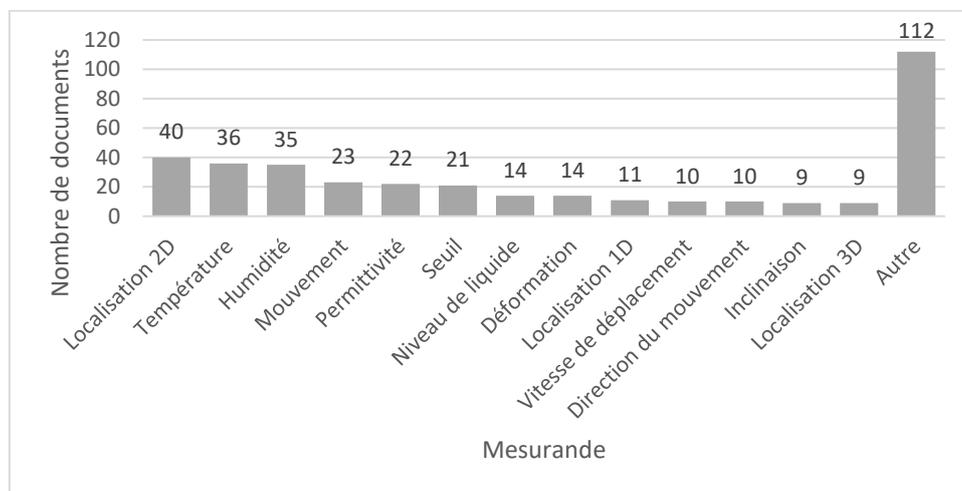


Figure 1-32 Mesurandes ciblées de la transmission analogique

Comme indiqué précédemment, la température est toujours la première valeur ciblée, mais l'humidité est aussi une valeur très étudiée. Parmi les tags qui utilisent la modulation analogique, l'humidité est la plus facile à intégrer en raison de la grande influence de l'eau sur la transmission. Ceci est lié au mesurande ciblé suivant, la permittivité. En effet, les matériaux proches du tag affectent la transmission principalement par leurs propriétés diélectriques.

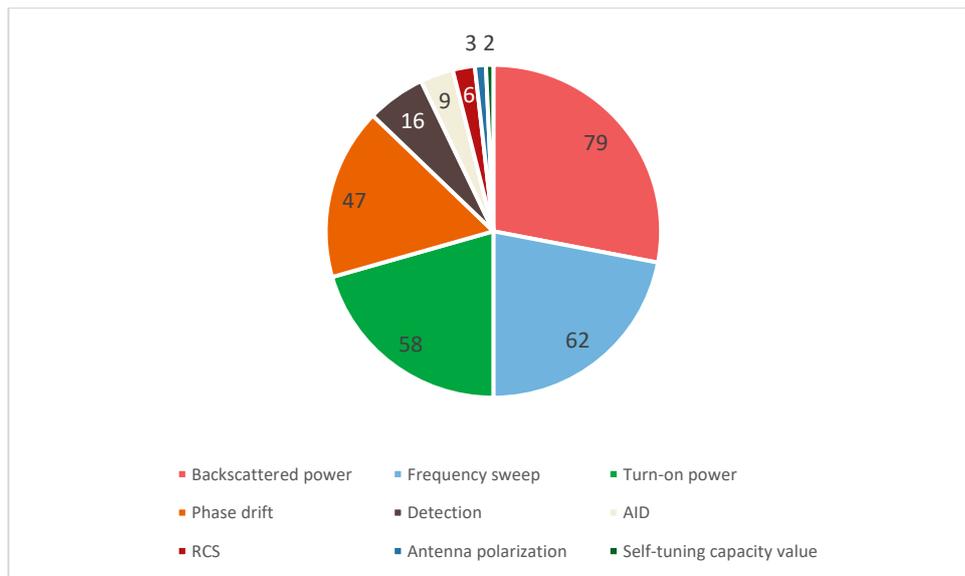


Figure 1-33 Modulations de transmission analogique

Parmi les transmissions analogiques, la modulation de la fréquence de résonance du tag est souvent utilisée. Ainsi, plus d'un quart des publications utilisent des balayages de fréquence. Cette méthode de détection nécessite une gamme de fréquences étendue et peut donc être limitée par les réglementations régionales. Lorsque le mesurande évolue et que la fréquence de lecture est fixe, le spectre du tag qui en résulte se déplace. Cela induit une augmentation ou une diminution du gain du tag, mais cette mesure peut être difficile à obtenir directement. La puissance rétro modulée du tag (ou plus simplement RSSI (Return Signal Strength Indicator)), plus facile à obtenir, est intégrée dans la plupart des lecteurs et constitue une alternative pour extraire une donnée capteur. Pour se débarrasser du bruit électromagnétique ambiant, de nouvelles techniques sont utilisées, principalement la puissance d'activation.

La modulation de fréquence et de phase sont des mesures d'angle. Mais comme la phase est principalement utilisée pour la localisation, seule la fréquence a sa propre section dans la suite de ce chapitre.

1.3.2.2.1. Commutation pour la détection de seuil

La détection d'un tag est une mesure à part entière car ce type d'événement apporte plusieurs données : l'horodatage de la détection, l'identifiant de l'objet, ...

Le premier document présentant la détection à l'aide de tags est le brevet de Toshiba [123], déposé en 2003. En utilisant la détection des tags par de nombreux lecteurs dans une structure restreinte, le système peut mesurer le temps passé par le détenteur d'un tag dans une zone spécifique.

La surveillance de la santé des bâtiments utilise souvent des « fissuromètre » qui nécessitent une vision directe pour être contrôlé. En 2014, Zhang et Bai ont publié une nouvelle solution de mesure de contrainte par seuil [124]. Le tag ne peut être détecté que lorsque le seuil de contrainte rompt la connexion qui crée un court-circuit avec le CI RAIN. La mise sous tension des tags peut constituer une alerte mais la détection des tags est sensible à de nombreuses conditions. Et même lorsque la déformation est supérieure à la valeur seuil, un autre événement peut éteindre le tag. La fragilisation d'une partie de l'antenne ferait disparaître le tag en cas de contrainte et constituerait une solution plus sûre.

Enable IPC est un fabricant de tags RFID qui utilise la perte du signal comme une détection. Dans la description de leur produit « RFID Fuse Tag », Enable IPC indique que si le tag est placé sous un matériau qui souffre d'érosion, le processus d'érosion peut atteindre le tag et l'endommager [53]. Tag CO. commercialise un tag nommé E-Seal qui agit comme un sceau de conteneur d'expédition [125]. Le tag ne peut répondre aux requêtes que lorsqu'il est scellé pour la première fois. Et si le sceau est brisé, l'antenne du tag l'est également.

Dans le domaine du sport, lorsque de nombreuses personnes franchissent la ligne d'arrivée en peu de temps, il est difficile d'enregistrer chacune d'entre elles. Les caméras sont une bonne solution mais, si l'identifiant des personnes n'est pas en ligne de mire directe, le chronométrage peut devenir difficile. Des solutions radio existaient mais n'étaient pas flexibles. Plusieurs sociétés ont breveté ou vendent maintenant des appareils RAIN [126]–[129]. Leur avantage est qu'ils ne sont pas spécifiques à cet usage et peuvent donc être moins chers. Les concurrents professionnels ont besoin d'une précision inférieure à la seconde, le tag doit donc être lu dans une zone fine, correspondant à la ligne d'arrivée. Par conséquent, la largeur du faisceau des antennes doit être faible et le taux de lecture doit être élevé.

Pour conserver la fonction d'identification quand le signal capteur est éteint plusieurs projets ajoutent un ou plusieurs circuits intégrés (ou un tag entier) pour concevoir leur tag-capteur. La commutation entre 2 ou plusieurs tags évite la perte totale de la communication RAIN. Ainsi, l'objet attaché reste traçable.

Une société de produits de soins personnels, Kimberly-Clark, a breveté un tag sensible au poids qui est associé à un tag classique [130]. Avec un simple interrupteur mécanique placé dans le circuit de l'antenne, le tag-capteur peut être activé par la gravité. Le principal exemple présenté dans le brevet est le contrôle de l'orientation et du soin de la manutention des colis.

Occhiuzzi et Marrocco ont travaillé sur le syndrome de la jambe sans repos. Ils commutent deux CIs qui font partie du même tag avec des commutateurs inertiels [131]. Lorsqu'un patient souffre du syndrome de la jambe sans repos, il bouge sa jambe avec des mouvements rapides et commute l'un des deux CIs pour indiquer que la jambe subit une accélération vers l'avant ou vers l'arrière.

Caizzone, Occhiuzzi et Marrocco ont créé un tag à détection de seuil de température [132]. Deux circuits intégrés utilisent la même antenne, mais lorsque la température ne dépasse pas le seuil, le deuxième circuit n'est pas entièrement connecté et ne peut pas répondre. Lorsque la température dépasse le seuil, des contacts en Nitinol se plient pour connecter le second CI. Cela indique au lecteur que le seuil a été dépassé.

1.3.2.2.2. Modulation de fréquence

Toutes les spécifications régionales de fréquences affectent les mesures à modulation de fréquence. En effet, les tags-capteurs doivent rester détectables dans la gamme de fréquence de la région. Ainsi, jusqu'à maintenant les techniques de modulation en fréquence pour transmettre la valeur captée étaient moins accessibles en Europe.

En fonction de son impédance complexe, une antenne résonne dans une gamme de fréquences spécifique et avec un gain spécifique. Ceci est quantifié par le facteur de qualité, ou Q , et est défini par l'Équation 1-3.

$$Q = \frac{f_r}{\Delta f}$$

f_r = fréquence de résonance, Δf = largeur de résonance à mi – hauteur

Équation 1-3 Facteur de qualité

Afin d'économiser des ressources et de fournir des tags RAIN conformes aux normes mondiales, les fabricants ciblent généralement la bande de fréquences mondiale (c'est-à-dire 850 - 950 MHz) et réduisent ainsi le facteur de qualité des tags. Seuls les lecteurs doivent se conformer avec la réglementation en vigueur dans le pays.

Avoir un petit facteur de qualité peut favoriser la détectabilité du mesurande en raison de la grande résonance, comme l'illustre la courbe 1 (rouge) de la Figure 1-34. Et comme les matériaux proches influencent le réglage du tag, le déplacement de la résonance a peu de conséquences sur la transmission. Cependant, un facteur de qualité élevé (courbe verte) est un avantage pour les tags-capteurs utilisant la modulation de fréquence. Ils sont plus sensibles aux fréquences et un plus faible décalage de fréquence pourra être détecté par les lecteurs.

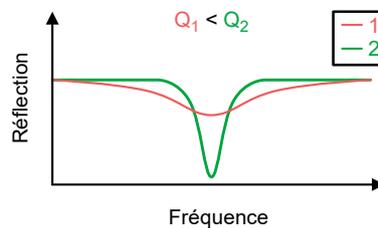


Figure 1-34 Facteur de qualité de l'antenne

La permittivité d'un matériau dépend de la fréquence et aussi, pour certains, des conditions environnementales. La conception de tags utilisant un matériau spécifique permet de créer des tags-capteurs utilisant la modulation de fréquence.

En 2013, Cook, Cooper et Tentzeris ont été les premiers à intégrer des systèmes micro fluidiques dans des tags [133]. L'antenne présente une capacité variable suivant les fluides qui la traversent. L'ajout de la détection ne dégrade pas les performances de l'antenne et le capteur résultant peut « détecter 1 % d'eau dans l'éthanol » avec des lecteurs RAIN de laboratoire.

Moradian et Abdolvand ont intégré un mince film piézoélectrique dans la conception du tag pour décaler ses réponses en fréquence [134]. À chaque respiration, l'humidité de l'air respiré se condense sur le film et peut être détectée par des instruments de laboratoire, ce qui permet de déterminer la fréquence respiratoire.

Pour assurer une bonne étanchéité du bouchon des bouteilles, Gonçalves *et al.* ont intégré un tag sensible à l'humidité dans le liège [135]. La perméabilité du liège réagit à l'humidité et peut donc accorder en fréquence les tags. Il en est de même pour le polyimide qui constitue le substrat des tags imprimés par jet d'encre réalisés par Virtanen *et al.* [136].

Vers 2010, l'utilisation de nanomatériaux à base de carbone a fait l'objet d'un engouement fort et de nombreux projets ont vu le jour autour de leurs utilisations. Ces matériaux sont principalement sensibles à l'environnement gazeux. En 2015, utilisant un tag avec une petite surface recouverte d'un mélange de platine et d'oxyde de graphène, Lee *et al.* ont pu détecter de petites concentrations d'hydrogène jusqu'à 1 ppm [137]. La même année, Gammoudi *et al.* utilisent une antenne composée de nanotubes de carbone pour fabriquer un tag mesurant la concentration d'ammoniac en utilisant également la modulation de fréquence [138].

Le réglage d'une antenne dépend également de sa conception (par exemple, la longueur du dipôle). La possibilité de la modifier dynamiquement est un élément clé pour construire des tags-capteurs utilisant la modulation en fréquence.

En 2015, Björninen et Yang [139], ont introduit un commutateur thermique dans la conception de l’antenne de leur tag. Lorsque la température dépasse un seuil de température défini par le composant électronique, une partie de l'antenne est shuntée. Cela entraîne un décalage de la fréquence de résonance de 876 MHz à 908 MHz. La gamme de fréquences est large mais pourrait être compatible avec la nouvelle réglementation ETSI.

En 2017, Shi *et al.* conçoivent un tag sensible à la température avec une antenne à cavité pour améliorer son facteur de qualité [140]. Il intègre un ressort composé de métaux à dilatation thermique, et donc sensible à la température. Ce mécanisme agit sur la conception de l'antenne circulaire et relie au CI plus ou moins de longueur de l'antenne.

Dans les conceptions avec plan de masse, la fréquence de résonance du tag dépend également de l'écart entre l'antenne et le plan de masse, comme l’explique la Figure 1-35.

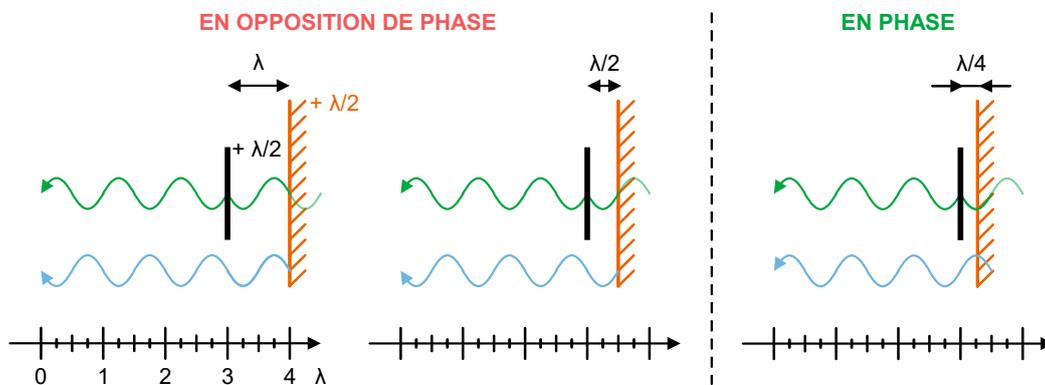


Figure 1-35 Théorie de l'image appliquée aux tags RFID

Si l'on considère que le tag est parallèle à son plan de masse, l'onde réfléchie par le tag se diffuse directement vers le plan de masse et vers le lecteur. Le plan réfléchit l'onde vers le lecteur et les 2 ondes interfèrent, comme écrit dans l'Équation 1-4.

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_{tag} + 2\pi \frac{d}{\lambda} + \Delta\varphi_{masse} + 2\pi \frac{d}{\lambda} = \pi \left(1 + 4 \frac{d}{\lambda} \right)$$

$$G = 1 + \cos(\Delta\varphi)$$

$$\Delta\varphi_{tag} = \Delta\varphi_{masse} = \frac{\pi}{2}, d = \text{distance entre le tag et plan de masse}, G = \text{gain}$$

Équation 1-4 Gain d'interférence du plan de masse

C'est ainsi que AutoID (équipe du MIT) a conçu un tag capteur de température non réversible pour les marchandises sensibles à la température [141]. Afin d’attester que la température dépasse un certain seuil, un polymère à mémoire de forme est utilisé pour maintenir en place le plan de masse. Lorsque la température dépasse la température de stockage correcte, le plan de masse se déplace et accorde l'antenne en conséquence de 920-925 MHz à 907-912 MHz (c'est-à-dire les extrémités de la bande FCC).

La corrosion dégrade la capacité des métaux à réfléchir les ondes électromagnétiques. Soodmand *et al.* utilisent ce phénomène pour détecter l'état de corrosion [142]. La plaque métallique à surveiller constitue le plan de masse du tag. Lorsqu'elle se corrode, l'écart avec le tag augmente et accorde le tag sur une fréquence plus basse.

1.3.2.2.3. Modulation d'amplitude

Indicateur d'intensité du signal de retour

Le RSSI est largement utilisé comme technique de transmission par modulation analogique. En effet, presque tous les lecteurs commercialisés mesurent le RSSI.

Afin de garantir l'intégrité des colis avec des solutions moins coûteuses, il faut parfois penser en dehors de l'électronique. En 2010, l'équipe d'Auto-ID Labs a présenté deux méthodes détectant le dépassement d'un seuil de température sans retour à l'état initial possible. Leur utilisation supposée serait dans le secteur agroalimentaire.

La première solution demande deux tags immergés dans une solution liquide dont le point de congélation est la température seuil [143]. Le système commence sous le point de congélation lorsqu'une plaque métallique empêche une bonne communication avec le premier tag. Lorsque la température augmente, le solide gelé fond et la plaque métallique tombe sur le second tag, empêchant sa bonne communication, tout en libérant le premier. Avec une différence d'environ 10 dBm entre le RSSI des deux tags, la détection du seuil de température est possible même avec des lecteurs RAIN bon marché.

Cette technique a été améliorée par Ziai et Batchelor qui utilisent un seul tag avec plusieurs seuils de puissance correspondant à des températures différentes [144]. Comme dans le projet précédent, les états commutent seulement à sens unique.

Cependant, la première méthode est sensible à la rotation, car la chute est entraînée par la gravité.

La deuxième méthode comprend un polymère à mémoire de forme qui est actionné lorsque la température atteint sa température de transition vitreuse et qui agit sur les tags de la même manière que précédemment [145].

Le signal rétro modulé peut également être modulé par une modification du circuit de l'antenne. Cremer *et al.* ont conçu un tag capable de détecter la progression dans l'actionnement du tiroir [146]. En plus d'une antenne classique, le CI est connecté à une ligne de transmission dont la longueur est égale à un quart de longueur d'onde. L'actionnement du tiroir entraîne le glissement d'un shunt sur cette ligne et agit sur le coefficient de réflexion du tag. Ainsi, le lecteur peut détecter la position du tiroir à travers plus de 10 dBm de variation du RSSI.

Comme on l'a vu dans la Modulation de fréquence, moduler la longueur d'antenne d'un tag revient à modifier sa fréquence de résonance. À une fréquence fixe, cette modulation apparaît comme une atténuation. Kalansuriya *et al.* utilisent ce phénomène pour la surveillance de la santé des bâtiments [147]. De nombreux tags sont fortement collés sur un mur et régulièrement espacés. Lorsque le mur se fissure, certaines antennes se fissurent également. Un lecteur conventionnel peut détecter cet événement en comparant le RSSI des tags. Avec l'utilisation croissante des cloisons sèches, la structure profonde du bâtiment est souvent cachée. Cette solution RFID résout le problème de surveillance sans utiliser de dispositifs sophistiqués.

Toujours dans le domaine de la surveillance de l'état des structures, Occhiuzzi *et al.* ont construit un tag-capteur pour détecter une déformation. Celui-ci utilise une antenne en fil de cuivre en forme de méandre [148]. La contrainte appliquée déforme l'antenne, modifie l'interaction entre les différentes lignes constituant le méandre et atténue le signal rétro modulé.

Dans le secteur médical, Bhattacharyya *et al.*, de Auto ID Labs, ont introduit une impédance sensible à l'anémie sanguine en parallèle de l'antenne [149]. Le substrat de l'élément sensible est en papier et est recouvert d'une couche de cuivre qui se comporte comme un plan de masse. Le canal micro fluide est créé dans le papier en faisant pénétrer de la cire hydrophobe. Enfin, pour détecter les impédances liées aux analytes, une électrode de cuivre est appliquée sur le dessus du canal.

L'utilisation d'un tag RFID pourrait permettre d'automatiser les analyses médicales, car chaque tag RAIN est identifié par un numéro unique et peut être associé à l'identification du patient.

Puissance d'activation

Étant donné que la puissance envoyée par les lecteurs peut changer et que les limites de puissance diffèrent selon les pays, les lecteurs peuvent se rabattre sur la puissance d'activation du tag comme référence et aussi envoyer moins de puissance. En effet, la puissance d'activation est la plus petite puissance émise par le lecteur qui lui permet d'obtenir une réponse du tag. Le fait de n'utiliser que les mesures de la puissance d'activation peut être un avantage pour l'amélioration du rapport signal/bruit mais aussi un inconvénient parce que le signal mesuré ignore la rétro modulation. De plus, les lecteurs utilisent, pour la plupart, la représentation en décibel pour les valeurs de puissance et une échelle de résolution uniformément répartie. La résolution en Watt n'est donc pas constante avec la valeur mais exponentielle. Comme les puissances d'activation sont plus élevées que les RSSIs, elles sont aussi moins définies (une différence en dB ne représente pas une valeur constante en fonction de la puissance).

Cette mesure est connue en laboratoire mais très peu de fabricants de lecteurs commerciaux la mettent en œuvre. Néanmoins, si la puissance du lecteur peut être réglée, cette fonctionnalité peut être facilement ajoutée en implémentant un algorithme simple. Le principal désavantage de cette méthode est qu'elle nécessite plus de temps que la mesure de RSSI.

Pour des lecteurs moins sensibles et/ou pour des distances grandes, la puissance d'activation peut ne pas correspondre à la puissance qui a pu activer la puce, mais à celle qui a permis sa détection au niveau du lecteur.

Sur la base de la variation de la permittivité d'un matériau, plus de 20 % des documents traitant de la puissance d'activation concerne la détection de l'humidité. En 2008, Jia *et al.* ont présenté un tag sur lequel était peint du polyimide [150]. Les polyimides modulent leur permittivité complexe en fonction de l'humidité et donc, la capacité de l'antenne à alimenter le CI.

Près de la moitié des articles traitant de la puissance d'activation reposent également sur la modulation de fréquence. Le déplacement de la réponse spectrale du tag affecte également la puissance d'activation. Dans de nombreux cas, la mesure de celle-ci est utilisée pour se conformer à la réglementation régionale en matière de fréquence, car la modulation de fréquence est étalée sur une trop grande plage.

Les projets de détection de l'humidité font également partie de ce groupe. Kim *et al.* ont intégré une capacité interdigitée dans le circuit d'antenne d'un tag [151]. L'enfouissement de la capacité dans le sol permet au tag de détecter l'humidité en désaccordant la fréquence de résonance. À 915 MHz, la variation de l'eau dans le sol de 0 à 20 % implique une variation d'un peu moins de 15 dBm.

Shuaib *et al.* ont testé l'effet de l'humidité sur un tag de leur conception. L'antenne est brodée sur un tissu, et c'est ce dernier qui va changer sa permittivité en fonction de la nature et la quantité de liquide absorbé. Il ont étudié la puissance d'activation nécessaire pour un balayage de fréquence afin de surveiller la sécrétion de fluides corporels (par exemple, le sueur) [152].

En 2013, Nguyen *et al.* était la première équipe à travailler sur la détection de la fraîcheur des aliments en utilisant la modulation analogique [153]. Ils étudiaient la permittivité complexe de la viande de bœuf au cours de sa durée de vie pour fixer un point au-delà duquel elle n'était plus fraîche. Ainsi, l'information sur sa fraîcheur pouvait être extraite de la puissance d'activation balayée en fréquence d'un tag proche.

En 2017, Belsey *et al.* ont publié un article pour la même application, la fraîcheur des aliments [154]. Le PDMS est utilisé comme corps d'épreuve de concentration en vapeurs de solvants organiques qui

sont produites par la dégradation des aliments (comme l'acétate d'éthyle ou l'acétaldéhyde). L'article suggère également que le prototype actuel n'est, pour le moment, pas capable de détecter les petites quantités de vapeurs libérées par la fermentation.

Identifiant analogique

Introduit par Gaetano Marrocco en 2011 dans un article de IEEE Transactions on Antennas and Propagation [155], et basé sur un article précédent [156], l'AID (Analog Identifier) est « *invariant par rapport à la distance et à l'orientation mutuelle entre le lecteur et l'étiquette* ». Dans un précédent article publié en 2006, Nikitin et Rao ont défini une métrique similaire, mais plus centrée sur le tag, appelée K [157]. Contrairement à cette dernière, l'AID est liée à des valeurs que le lecteur peut directement mesurer et est calculée assez facilement, comme décrit par l'Équation 1-5. Néanmoins, l'AID n'est valide qu'en champ lointain car la formule s'appuie sur l'équation de Friss.

$$AID = \frac{P_C(activation)}{2\sqrt{P_{R_{rx}}(activation) \cdot P_{R_{tx}}(activation)}} = \frac{R_C}{|Z_C + Z_A|}$$

R = résistance $[\Omega]$, Z = impédance $[\Omega]$, c = valeur pour la puce,
 A = valeur pour l'antenne du tag

Équation 1-5 Identificateur analogique

En outre, comme le décrit l'Équation 1-5, l'AID est lié à l'impédance de l'antenne du tag. En connaissant les composantes réelles et imaginaires de l'impédance du circuit intégré utilisé dans le tag, il est possible d'extraire la relation entre les composantes réelles et imaginaires de l'impédance de l'antenne.

La puissance d'activation du CI, $P_C(threshold)$ ou généralement appelée « sensibilité », est une valeur typique présente dans la fiche technique du CI. Si le CI n'est pas directement connu de l'utilisateur mais qu'il prend en charge le protocole GS1 EPC UHF Gen2 [41], il est facile de trouver les identifiants de son fabricant et de son modèle qui sont stockés dans sa mémoire.

L'acronyme AID apparaît pour la première fois dans un article de conférence publié par Occhiuzzi, Contri et Marrocco [158]. Ils utilisent le Nitinol (alliage nickel-titane) qui constitue les stents (tuteur vasculaire) pour créer des antennes. La composition de la paroi du vaisseau sanguin affecte les antennes et les signaux résultants, et peut être utilisée pour détecter une sténose du vaisseau. En raison des différences de morphologie entre les patients, les chercheurs ont choisi d'utiliser l'AID pour éviter que le signal ne soit affecté par la configuration du lecteur. Cependant, cet article ne fait part que du concept et ne contient aucune mesure.

Occhiuzzi *et al.* ont publié un article expérimental en utilisant l'AID [159]. L'antenne du tag est un dipôle couplé magnétiquement avec une boucle reliée au CI. Pour détecter l'ammoniac, des nanotubes de carbone sont placés entre les deux éléments de l'antenne, le dipôle et la boucle. Dans cet article, seule la détection de l'ammoniac est effectuée et non la quantification.

En 2014, Manzari *et al.* ont dévoilé un tag qui détecte un environnement gazeux [160]. Passant au crible de multiples polymères, ils ont recherché, pour chaque gaz, les plus sensibles. Les polymères sont placés de manière à shunter l'antenne. L'antenne est petite en raison de sa conception en « fente » avec un substrat en chlorure de polyvinyle expansé. Combinés aux lectures de l'AID, les signaux de détection sont récupérés de manière fiable. Cependant, une réponse spécifique associée à une seule concentration de gaz n'est pas possible.

En 2012, Caizzone et Marrocco ont présenté une grille de tags capables de détecter la déformation du matériau auquel ils sont attachés [161]. Les tags sont séparés par des distances régulières, et chacun d'entre eux affectent le gain des autres. Plus la contrainte est faible, plus les tags sont proches, et plus leur influence mutuelle est grande, et inversement.

Paggi, Occhiuzzi et Marrocco ont publié un article présentant la conception d'une antenne à fente pour la même application [162]. Le tag est fixé d'un côté de la fente et un triangle métallique est fixée de l'autre côté. En se dilatant, la fissure modifie l'accord du tag car elle déplace le triangle relativement à l'antenne. Avec la stabilité de l'AID, les tags obtenus peuvent détecter un déplacement jusqu'à 100 µm avec un lecteur commercial.

Toujours dans le but de ne pas prendre en compte l'atténuation due à l'environnement, Occhiuzzi *et al.* ont utilisé l'AID pour surveiller la cicatrisation des plaies grâce à un tag avec un substrat d'hydrogel [163]. L'hydrogel utilisé permet d'incorporer et de délivrer des médicaments. Lors de leur délivrance, la permittivité et la conductivité de l'hydrogel changent et modulent l'atténuation.

Section équivalente radar

Pour simplifier et correspondre au cas habituel, une seule antenne est utilisée pour émettre et recevoir des signaux (configuration mono-statique) pour le lecteur et le tag. Ainsi, dans l'Équation 1-6, les paramètres liés au tag sont combinés en un seul paramètre et la factorisation de l'Équation 1-2 est effectuée.

$$P_{R_{rx}} [W] = P_{R_{tx}} \cdot G_R^2 \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi \cdot d} \right)^4 \cdot PLF^2 \cdot G_T^2 \cdot K_{bs}$$

Équation 1-6 Échange de puissance lecteur-tag pour les configurations mono-statiques

Dans l'Équation 1-7, σ correspond à la RCS (en anglais, « surface équivalente radar »), à partir de la formule d'échange de puissance RFID, en mètre carré.

$$P_{R_{rx}} [W] = P_{R_{tx}} \cdot G_R^2 \cdot \frac{\lambda^2}{(4\pi)^3 \cdot d^4} \cdot PLF^2 \cdot \sigma$$

Équation 1-7 Équation radar pour la RFID

$$\sigma [m^2] = \frac{\lambda^2}{4\pi} \cdot G_T^2 \cdot K_{bs} = \frac{\lambda^2}{4\pi} \cdot \left(\frac{A_T}{A_{iso}} \right)^2 \cdot K_{bs} = \frac{A_T^2}{A_{iso}} \cdot K_{bs}$$

$$A = \text{ouverture de l'antenne}, A_{iso} = \text{ouverture théorique d'une antenne isotropique} = \frac{\lambda^2}{4\pi}$$

Équation 1-8 Section équivalente radar pour la RFID

Comme décrit dans Équation 1-8, la modification structurelle de l'antenne entraîne une modification de son gain, et ainsi de sa RCS. La mesure de cette dernière peut apporter une autre méthode pour retrouver le mesurande originel qui a entraîné la modification structurelle.

Dans les tags RAIN, la première utilisation de la RCS pour transmettre des informations de détection remonte à 2013, lorsque Jiang et Yang ont réussi à détecter un excès de température de cette manière [164]. La longueur électrique de l'antenne du tag est modifiée par des commutateurs thermiques et induit des changements d'ouverture d'antenne.

L'ouverture de l'antenne peut être modulée avec des valeurs continues en utilisant une conception d'antenne changeant de forme. Hasani *et al.* ont utilisé des fils conducteurs brodés pour construire

leur antenne [165]. Les fils sont flexibles, et donc aussi, l'antenne. Les tags équipés de ce type d'antenne peuvent détecter la contrainte appliquée en mesurant l'ouverture des antennes.

Les matériaux situés dans le faisceau entre le lecteur et le tag influencent la RCS. En 2015, Suwalak *et al.* ont présenté un appareil qui peut détecter la permittivité diélectrique d'un matériau proche en utilisant la RCS [166]. Ce projet vise le secteur du bâtiment et notamment la mesure du séchage du béton.

1.3.2.2.4. Estimation de la distance

Le lecteur peut estimer la distance du tag en utilisant les propriétés d'atténuation du canal. En supposant une directivité isotrope, une antenne localise un tag sur une sphère centrée sur l'antenne elle-même, comme le décrit la Figure 1-36 a. Sur la Figure 1-36 b., deux mêmes antennes localisent le tag à l'intersection de leurs deux sphères, ce qui donne un cercle. Enfin, l'intersection de trois sphères donne lieu à un point unique, comme l'indique la Figure 1-36 c.

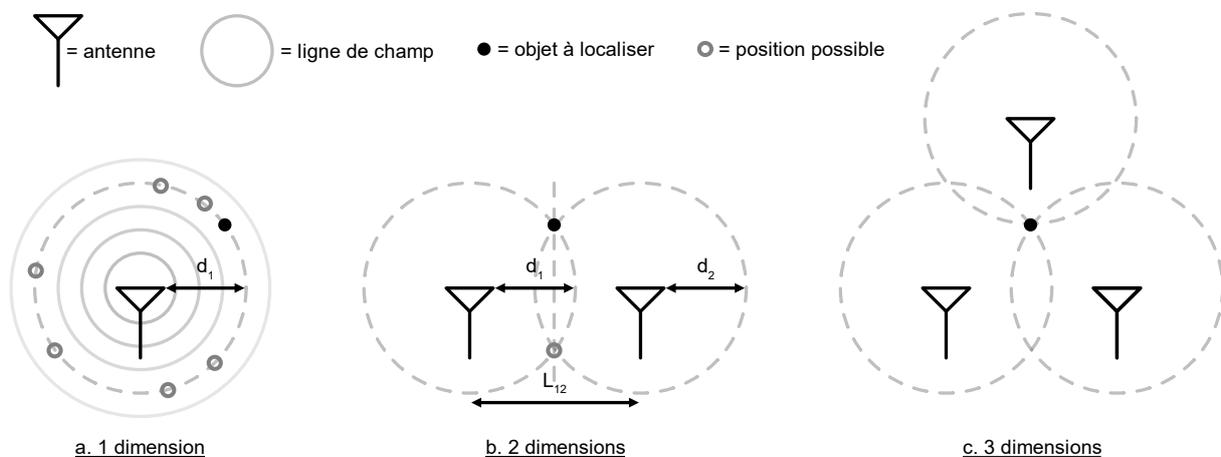


Figure 1-36 Multi-latérisation

L'ajout d'antennes supplémentaires augmente le nombre de dimensions de la mesure, jusqu'à 3 dimensions. Ensuite, la précision augmente avec les antennes supplémentaires. Ce concept est appelé multi-latérisation.

La distance est l'un des facteurs utilisés dans l'équation de Friis, régissant l'atténuation du signal dans le canal de communication. En connaissant les autres facteurs, on peut estimer la distance entre le lecteur et le tag en utilisant cette approche.

En utilisant une configuration bi-statique avec 3 antennes de réception réparties dans l'espace, Kharrat *et al.* localisent le tag en 3D [167]. Afin de localiser correctement, les 3 antennes doivent être éloignées les unes des autres. Néanmoins, en faisant cela, les câbles et les matériaux nécessaires sont beaucoup plus nombreux. De plus, le signal résultant est plus faible et noyé dans le bruit. Pour être précis et atteindre une erreur de seulement 11 cm, les auteurs proposent d'appliquer le même coefficient correcteur aux 3 RSSI obtenus, de sorte que les 3 distances calculées se rejoignent en un seul point.

L'étude des mouvements complexes est utile dans le cadre des soins aux personnes, notamment pour des raisons de confidentialité qui ne peuvent être satisfaites par des caméras. Une bibliothèque de gestes peut être enregistrée. Ensuite, les nouvelles lectures pourraient être comparées à celles-ci pour retrouver le geste correspondant.

Pour suivre les personnes atteintes de démence, Neuhaeuser *et al.* les équipent d'un lecteur qui estime les interactions avec les objets équipés de tag en utilisant le RSSI [168]. Similaire au projet précédent, un projet d'Amendola *et al.* se concentre sur le suivi des gestes de la main, sauf que les tags sont placés

sur le bout des doigts [169]. Chaque position de doigt correspond à une atténuation différente qui est récupéré pour identifier le geste correspondant.

Avec seulement 3 tags régulièrement espacés sur le verre et un lecteur, Jayatilaka *et al.* peuvent détecter la boisson du patient afin de surveiller son niveau d'hydratation [170].

Koblasz, du Georgia Institute of Technology, a breveté un système de lit médicalisé avec plusieurs lecteur [171]. Les tags sont portés par les habits du patient. Lorsque le RSSI change, le patient est en mouvement. Lorsque seuls les tags portés aux pieds sont à proximité de l'antenne visant le sol, le patient est debout. Lorsque les tags sur la poitrine sont également proches de cette antenne, le patient est tombé.

Avec deux ou plusieurs antennes unidirectionnelles, on peut créer une boussole focalisée sur un tag. À distance constante, un tag placé sur l'un des faisceaux d'antenne renvoie une amplitude maximale à cette antenne. L'amplitude diminue avec l'angle entre l'antenne lecteur et le tag, et en fonction de la largeur du faisceau d'antenne. Avec deux faisceaux d'antenne qui se chevauchent, Álvarez López *et al.* ont pu établir une fonction mathématique entre le rapport RSSI et l'angle relatif du tag [172].

Le lecteur peut également utiliser un réseau d'antennes déphasées pour modifier la directivité de l'antenne virtuelle formée. Ainsi, Bouzakis et Overmeyer mesurent l'angle où le tag renvoie le RSSI maximum [173]. Cremer *et al.* améliorent le système précédent et utilisent la puissance d'activation du tag [174]. Afin de localiser en deux dimension le tag, plusieurs stations de base sont utilisées. Pour éviter d'utiliser plus de circuits électroniques, Rzymowski *et al.* utilisent une seule antenne émettrice [175]. Le faisceau est formé par la commutation de réflecteurs autour de l'antenne.

Les tags peuvent également être utilisés comme points de repère pour que le lecteur puisse se localiser ou localiser d'autres tags.

En 2004, Samsung a présenté une preuve de concept se servant de l'auto-localisation des tags, le tag est fixe et contient dans sa mémoire sa position [176]. Le projet vise à restaurer un système de positionnement là où aucun autre n'est disponible (par exemple, dans les tunnels, les bâtiments, ...).

En 2006, un brevet a été déposé concernant les aveugles [177]. Grâce à de nombreux tags auto-localisés et à une antenne placée à l'extrémité de la canne blanche, les aveugles obtiennent des indications plus précises que le simple retour direct de l'environnement. De manière analogue, une société d'aspirateurs professionnels, Tennant, a déposé un brevet pour rendre ses aspirateurs autonomes [178]. En 2010, Park et Hashimoto publie un article concernant l'automatisation d'un fauteuil roulant [179].

En se basant sur plusieurs tags fixes et d'autres portés par le patient, Occhiuzzi *et al.* ont présenté un système de surveillance de lit médicalisé [180]. Pour positionner les personnes, les mesures RSSI des tags portés par le patient sont comparées à celles des points de repère. Un algorithme a été développé pour localiser et classer l'activité (chute, mouvement, repos) en fonction de la valeur et de l'évolution du RSSI.

L'estimation de la distance est possible en utilisant la mesure de la phase en fonction du balayage en fréquence. En supposant que tout le signal radiofréquence n'est pas réfléchi par l'environnement, l'Équation 1-9 est vraie.

$$d = \frac{1}{2} \cdot \frac{v}{f} \cdot \frac{\varphi}{2\pi}$$

$$\varphi = \text{phase}$$

Équation 1-9 Estimation de la distance par la phase totale

Si l'on considère que le milieu traversé est homogène et que la distance est fixe, la phase totale doit être linéaire par rapport à la fréquence.

Les lecteurs renvoient généralement la phase mais modulo π , appelée phase instantanée ou locale, et ne permettent pas d'utiliser l'Équation 1-9. Pour s'affranchir de ce problème, un algorithme de « déroulement de phase », comme décrit dans la Figure 1-37, est nécessaire pour obtenir des mesures de phase totale à partir de la phase instantanée.

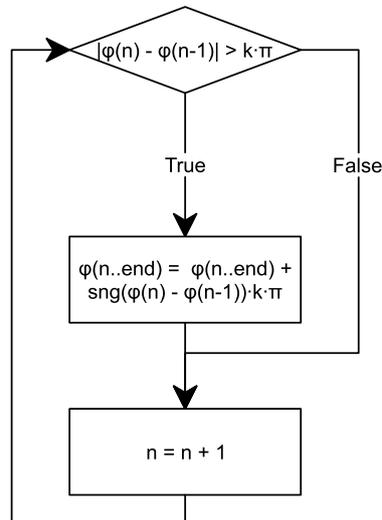


Figure 1-37 Algorithme de déroulement de phase

Basé sur un algorithme itératif commençant à partir de la première phase mesurée, le déroulement de phase restaure la linéarité entre la phase et la fréquence mais ne parvient pas à récupérer le point de phase d'origine. L'Équation 1-10 calcule la dérivée par rapport à la fréquence pour obtenir le terme constant lié à la distance. Cette méthode est souvent appelée FD-PDoA (Frequency Domain Phase Difference of Arrival).

$$\varphi(f) = 2 \cdot \frac{2\pi}{v} \cdot d \cdot f \Rightarrow \frac{\partial \varphi}{\partial f} = 2 \cdot \frac{2\pi}{v} \cdot d$$

∂ = partial differentiation

Équation 1-10 Estimation de la distance par la dérivée de la fréquence

Lorsque le tag est détecté, la phase mesurée est juste, quelle que soit la directivité de l'antenne. Par conséquent, cet estimateur ne dépend pas de l'angle entre le lecteur et le tag. Cependant, les mesures de phase nécessitent plus de composants, de matériel ou de logiciel supplémentaires. C'est pourquoi les lecteurs bas coût n'incluent pas cette fonction.

Sur la base de ce type de latéralisation, un brevet a été déposé dès septembre 2005 par Symbol Technologies (aujourd'hui propriété de Zebra Technologies), leader dans la conception de solutions RFID [181].

Jayawardana et Liyanapathirana utilisent cette technique pour la surveillance de la santé des structures métalliques dans le secteur du bâtiment [182]. Ils suivent des déplacements de moins de 1 mm, la structure métallique servant de plan de masse aux tags. Le principal inconvénient est le lecteur qui doit rester parfaitement fixe tout au long de la session de surveillance.

DiGiampaolo et Martinelli ont publié leurs travaux utilisant des tags comme balises pour l'auto-positionnement des robots [183]. Grâce à un filtre de Kalman, le robot s'est positionné avec une précision estimée à 10 cm, et ce, même dans un environnement de bureau classique. Des développements ultérieurs ont même permis de localiser des objets placés sur des étagères [184].

Une autre technique populaire est l'AoA (Angle d'Arrivée), ou SD-PDoA (Spatial Domain PDoA). Un lecteur en configuration mono-statique possède deux antennes, physiquement séparées. Comme le montrent la Figure 1-38 et l'Équation 1-11, la différence entre les phases lues par les deux antennes est liée à l'angle entre le tag et l'axe normal aux deux antennes. Cette technique rencontre des problèmes lorsque les atténuations des 2 signaux ne sont pas égaux. Un tag équidistant aux deux antennes peut remettre les chemins relatifs à zéro, puisque les deux chemins physiques sont égaux.

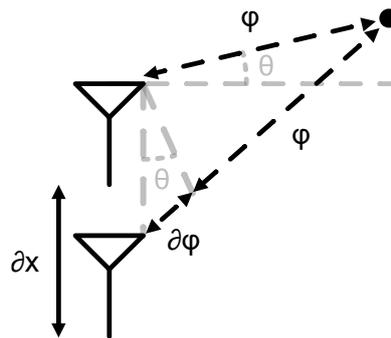


Figure 1-38 Angle d'arrivée

$$\theta = \arcsin\left(\frac{1}{2} \cdot \frac{v}{2\pi \cdot f} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial x}\right)$$

Équation 1-11 Angle d'arrivée

Les applications de cette technique sont utiles, notamment dans le secteur de la logistique où l'automatisation est la clé du succès. Elle est utilisée pour détecter la direction et la vitesse de déplacement d'un colis sur un tapis roulant [185]. En 2010, un brevet a été déposé par ThingMagic, l'un des leaders de la RFID, pour la même application [186].

En utilisant deux appareils AoA, El Abkari *et al.* ont réussi à localiser un tag en 2 dimensions sur une surface de 100 m² avec moins de 10 % d'erreur [187].

Pour obtenir une bonne localisation avec l'AoA uniquement, certains auteurs personnalisent les lecteurs. En 2010, Angerer *et al.* ont conçu une solution de lecteur avec une antenne de transmission et deux antennes de réception [188]. De cette façon, ils ont obtenu une erreur de 3,3 °. Un an plus tard, Azzouzi *et al.* ont développé, à l'aide de 3 lecteurs qui partagent le même générateur de signaux, un détecteur d'angle d'arrivée [189]. Combiné avec 2 appareils identiques, le système résultant a pu localiser un tag avec une erreur maximale de 2 cm.

En utilisant un lecteur qui balaie la zone de détection le long d'un axe, Miesen *et al.* ont pu localiser des tags avec une erreur de quelques centimètres [190]. Cette performance a été améliorée par l'expérience de Motroni *et al.* utilisant un robot et qui ont obtenu une erreur d'un centimètre [191]. Cette méthode permet d'éviter l'utilisation de plusieurs antennes de lecture typiquement requises par la technique AoA. De plus, elle augmente la précision puisqu'une seule antenne remplace une infinité d'antennes et supprime la différence d'atténuation par différentes antennes. Cependant, le principal inconvénient est que le tag localisé doit rester fixe par rapport à l'antenne mobile pendant la mesure.

Selon l'effet Doppler introduit dans l'Équation 1-12 et dans la Figure 1-39, la vitesse relative du tag depuis le lecteur est obtenue en comparant la phase du tag dans le temps. Cette troisième technique est appelée TD-PDoA (Time Domain PDoA).

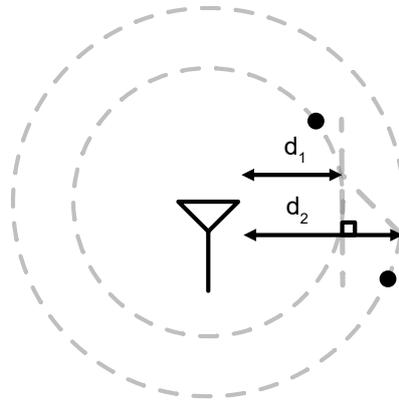


Figure 1-39 Effet Doppler

$$\frac{\partial d}{\partial t} = \frac{1}{2} \cdot \frac{v}{f} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial t}$$

$$t = \text{temps [s]}$$

Équation 1-12 Effet Doppler [192]

En 2010, Nikitin *et al.* ont réussi à identifier la direction de déplacement du tag lors du franchissement d'une barrière de lecture et le moment précis du franchissement [193]. L'équipe de recherche était employée par Intermec, qui fait maintenant partie de Honeywell, l'une des principales sociétés d'étiquetage RFID. Utilisant des approches similaires, le laboratoire Auto-ID a déposé un brevet pour protéger son projet en 2015 [194].

Pour localiser précisément des colis sur un tapis roulant, Buffi *et al.* simplifient cette technique [195]. Pour horodater la traversée du faisceau, ils ne détectent que le moment où la phase change très peu, c'est-à-dire, au plus proche du lecteur.

1.3.2.2.5. Autres techniques

Comme nous l'avons mentionné dans l'introduction, seulement quelques articles traitent de la modulation de phase sans concerner la localisation.

Caizzone, Di Giampaolo et Marrocco ont placé deux tags de chaque côté d'une fissure. Il ont pu ainsi détecter la largeur de la fissure grâce à la phase relative des deux tags [196]. Une limitation vient du fait que pour surveiller la largeur de la fissure, un lecteur fixe est nécessaire.

Pradhan *et al.* ont présenté un concept d'interface utilisateur sans fil et à faible coût [197]. En se basant sur la comparaison des mesures de phase dans le domaine temporel, ils ont pu surveiller le contact d'un utilisateur sur un tag. Comme la comparaison est basée sur le temps, la surveillance doit être constante et un mouvement de glissement sur le tag est plus approprié qu'un simple toucher.

À notre connaissance, seulement 3 projets concernent la modulation de polarisation.

Sajal *et al.* ont conçu un tag sensible à l'humidité avec une antenne en cuivre sur un substrat en papier [198]. La conception de l'antenne ne suit pas simplement un axe. En raison de l'humidité, les changements de la permittivité du papier entraînent des modifications du trajet des ondes électromagnétiques. Ainsi, les chercheurs observent des différences importantes dans un axe de polarisation spécifique lorsque le tag est humidifié. Des recherches supplémentaires pour l'utilisation de la modulation de polarisation sont encore nécessaires.

Encore une fois dans le but de garantir l'intégrité des colis, Krigslund *et al.* ont expérimenté un système de détection d'inclinaison utilisant l'atténuation due à la polarisation (ou PLF (Polarization Loss Factor)) [199]. Le lecteur utilisé dans cette expérience possède deux antennes à polarisation linéaire, séparées l'une de l'autre par un angle de 90°. Les chercheurs ont fixé deux tags dipôles, séparés l'un de l'autre par un angle de 90°. Avec cette configuration, ils peuvent détecter une inclinaison de 0° à 90°.

L'ajout d'un tag de référence est une aide à la mesure. L'atténuation du canal affecte les deux tags de la même manière, mais seul l'un d'entre eux peut moduler l'atténuation de son antenne grâce à la mesure. La « mesure relative » peut aider à éviter de nombreuses perturbations. Cependant, il est difficile et plus coûteux de concevoir deux tags identiques dont un seul est sensible au mesurande.

En se basant sur des mesures de puissance d'activation, Sidén *et al.* ont conçu un appareil avec deux tags identiques dont l'un est sensible à l'humidité [200]. De cette façon, les auteurs obtiennent une sensibilité d'environ 0,24 dB sur la puissance d'activation par pourcent d'humidité relative.

Kim *et al.* ont conçu un tag avec une antenne de type « méandre » et sensible au toucher [201]. Comme le corps humain contient beaucoup d'eau, approcher un doigt d'une ligne de transmission entraîne des conséquences sur la réflexion du tag. Les mesures relatives ont été effectuées en utilisant le RSSI.

Chen, Ukkonen et Björninen ont pu mesurer une contrainte mécanique en utilisant un couple de tags [202]. L'un des tags combine une antenne classique avec un textile conducteur (un tissu plaqué de cuivre). Avec la déformation, la taille de l'antenne change et, par conséquent, sa fréquence de résonance. La déformation détectée peut être extraite en comparant les fréquences de résonance des deux tags.

Pour éviter d'utiliser plus de matériel, Abdulhadi et Denidni travaillent sur une antenne patch intégrant deux Cis [203]. Les tags virtuels correspondants aux deux Cis sont indépendants l'un de l'autre mais partagent tout de même les atténuations dus à l'environnement. Ainsi, la puissance d'activation du tag de référence reste constante alors que le tag sensible a besoin de plus de puissance lorsque la résistance placée dans son circuit d'adaptation augmente. Ce travail n'est pas appliqué à une mesure en particulier et pourrait donc servir à de nombreux domaines.

Adhur Kutty, Björninen, Sydänheimo et Ukkonen conçoivent un tag sensible au dioxyde de carbone avec des nanotubes de carbone comme élément de détection [204]. Là encore, pour économiser des matériaux, les auteurs proposent d'activer ou de désactiver l'élément sensible. Lorsqu'il est désactivé, la puissance d'activation du tag est la même que sans CO₂. Le tag présenté montre une variation de la puissance d'activation de 2 dBm lorsque la concentration augmente de 2200 ppm par rapport à l'air ambiant.

Sans dévoiler le principe de fonctionnement, le tag Confidex Captura détecte si le mécanisme d'attache est verrouillé pour une atténuation du signal [52]. Les performances du tag sont décuplés lorsqu'il est en contact avec une barre d'une cage métallique, comme pour le tag Confidex Captura Flash [205].

1.4. CONCLUSION

1.4.1. Analyses

Comme le précise la table des matières de ce chapitre, deux grands types de tags-capteurs se distinguent par les types de transmission utilisés : analogique et numérique.

Pour que la conception corresponde à tous les principaux arguments de RAIN (bas coût et léger) et aux futures obligations environnementales, les futurs tags doivent nécessiter moins de matériaux.

Ils ne doivent pas être équipés de piles et doivent récupérer davantage d'énergie du lecteur. Ils peuvent alors choisir d'utiliser un circuit intégré plus efficace sur le plan énergétique ou une plus grande directivité de l'antenne du lecteur et du tag, ou encore, utiliser la récupération d'énergie à partir de sources existantes (solaire, thermique, mécanique, etc.).

Pour exiger moins d'énergie et moins de matériaux, les tags ne devraient pas utiliser des circuits supplémentaires pour gérer la mesure. Ils doivent donc utiliser les dernières avancées en matière de transmission analogique. L'utilisation de tags RAIN qui peuvent être interfacés avec un capteur par un protocole numérique (c'est-à-dire SPI, I²C, ...) est coûteuse. Elle doit être limitée aux preuves de concept en attendant la conception de circuits intégrés, ou aux concepts réutilisables.

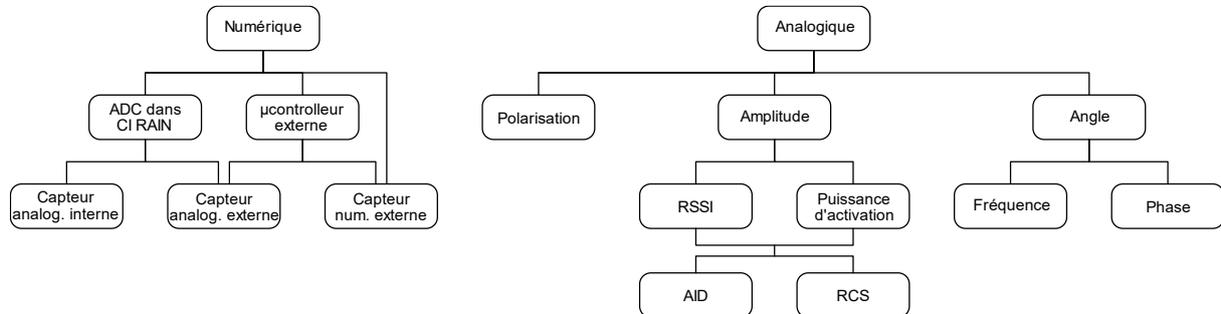


Figure 1-40 Types de modulation

Le document principal de la spécification RAIN compte plus de 150 pages et définit un nombre important de règles visant à rendre les appareils développés conformes et efficaces. Néanmoins, il est difficile de se conformer à toutes ces règles et d'implémenter tous les composants nécessaires à un circuit intégré. L'utilisation d'un circuit intégré déjà fabriqué semble être une meilleure idée pour la conception d'un tag-capteur RAIN. Et notamment parce que cela permet d'économiser beaucoup de temps et d'argent. L'étude des Cis présentée dans ce document aide à choisir le circuit intégré en fonction du gain qu'il peut apporter à notre conception. Plus le circuit intégré est sensible, plus le gain ajouté est important.

Comme il est difficile de concevoir un tag-capteur parfaitement reproductible, la mémoire utilisateur pourrait être utilisée pour stocker les paramètres d'étalonnage des mesures. De cette façon, les mesures ne nécessitent pas d'accès à une base de données externe et peuvent être effectuées dans des installations isolées.

Pour avoir une solution de détection fiable, la valeur détectée ne doit pas dépendre de l'environnement électromagnétique. Pour éviter cela, plusieurs options peuvent être mises en œuvre. Les tags à détection de seuil sont plus enclins à respecter la réglementation mais sont limités à des résultats binaires.

Pour obtenir des mesures précises avec une transmission analogique, il faut estimer l'atténuation du canal. Pour cela, la localisation du tag est importante, même si ce n'est pas la mesure visée.

Pour ne pas se préoccuper de l'atténuation du canal, on peut utiliser la modulation de fréquence. Mais les mesures se heurtent à des restrictions régionales en matière de fréquence, notamment dans la petite bande de fréquence ETSI basse. En outre, la modulation de fréquence est également sujette aux changements de l'environnement électromagnétique. En effet, le positionnement d'un matériau conducteur sur un tag modifie son spectre RF.

Lorsque les atténuations des transmissions lecteur-tag et tag-lecteur sont considérés comme égales, l'AID est la solution. Mais avec des tags entraînant une trop grande perte de puissance, cette technique n'est pas adaptée car les lecteurs risquent de ne pas détecter le signal rétro modulé. Surtout, s'ils ne sont pas équipés d'un circuit de détection de haute qualité.

La mesure différentielle, lorsqu'elle est disponible, est toujours un moyen d'obtenir de bonnes mesures. Cette méthode nécessite un investissement plus important car elle double les matériaux et nécessite d'isoler le second tag du mesurande souhaitée. Cependant, lorsqu'elle est réalisée avec succès, la valeur dépend uniquement du mesurande ciblé.

En outre, les champs électromagnétiques émis dans le cadre de la réglementation ne semblent pas dangereux pour la santé humaine [206], mais le principe de précaution est toujours nécessaire. La RFID UHF est conçue pour des inventaires rapides et non pour une surveillance constante. Par conséquent, il n'est pas recommandé de procéder à des lectures constantes du tag à proximité des personnes. En outre, les lectures constantes sont coûteuses en énergie, ce qui annule l'un des principaux avantages de la technologie RAIN.

Les innovations, tels que l'AID ou le WISP, ne font pas l'objet d'autres recherches ou de commercialisation. Les méthodes de mesure sont encore immatures et, pour la plupart, se limitent à la recherche en laboratoire. En effet, souvent, la réglementation pour les radiofréquences n'est pas bien respectée pour ces méthodes.

1.4.2. Axes de recherche étudiés dans cette thèse

Afin de concevoir un capteur RAIN simple, nous devons limiter les ressources nécessaires pour sa fabrication et son fonctionnement. Ainsi, nous dirigeons notre conception vers des processus déjà existant dans la fabrication de tag RFID : la conception coplanaire, qui empêche un assemblage mécanique complexe. La fabrication classique d'un tag RFID s'effectue sur des substrats fins et flexibles. Par la même, le tag ainsi constitué sera compatible avec la fixation par l'utilisation d'adhésifs. La fabrication conventionnelle apporte également la robustesse dans la conception des antennes. En effet, cette conception peut se baser sur des principes bien connus et vérifiés. La finesse des matériaux nous permettra aussi d'utiliser moins de ressources. Par la réduction des ressources au niveau de la conception et de la fabrication du capteur RAIN, le coût individuel de ce dernier est réduit. Pour que l'ajout d'une fonctionnalité capteur n'impacte pas de trop le coût, le circuit capteur sera intégré à l'antenne. Ainsi, le mesurande modulera les caractéristiques de réflexion de l'antenne.

Enfin, l'adoption par le milieu industriel sera facilitée par la réduction des ressources nécessaires aux niveaux des interrogateurs. Pour rendre possible l'utilisation de lecteurs conventionnels avec le principe de mesure choisi, il est nécessaire de prendre en compte le cadre réglementaire et les limites en résolution. En effet, les lecteurs seront contraints en fréquence et en puissance d'émission. Cela entraînera des conséquences sur les capacités des lecteurs à correctement estimer le mesurande d'origine. Afin de palier à cela, nous déterminerons une combinaison de techniques adéquate.

Par l'application de ces principes, notre solution de capteur-RAIN est compatible avec une fabrication à faible coût. Cela permettra son utilisation à grand volume, adaptée au secteur de la logistique.

REFERENCES

- [1] G. Marconi, « Transmitting electrical signals », US586193A, juill. 13, 1897 Consulté le: juill. 29, 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://patents.google.com/patent/US586193/en>
- [2] H. R. Hertz, « Über die Induction in rotirenden Kugeln », Friedrich-Wilhelms University of Berlin, Berlin, 1880. Consulté le: août 21, 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://edoc.hu-berlin.de/handle/18452/733>
- [3] R. A. Fessenden, « Perfectionnements à la téléphonie sans fil », FR324490A, avr. 02, 1903 Consulté le: juill. 29, 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/001374720/publication/FR324490A?q=FR324490A>
- [4] E. H. Armstrong, « A Method of Reducing Disturbances in Radio Signaling by a System of Frequency Modulation », *Proceedings of the Institute of Radio Engineers*, vol. 24, n° 5, p. 689-740, mai 1936, doi: 10.1109/JRPROC.1936.227383.
- [5] T. K. Sarkar et M. Salazar Palma, « A history of the evolution of RADAR », in *2014 44th European Microwave Conference*, oct. 2014, p. 734-737. doi: 10.1109/EuMC.2014.6986539.
- [6] R. C. Watson, *Radar Origins Worldwide: History of Its Evolution in 13 Nations Through World War II*. Trafford Publishing, 2009.
- [7] Lord Bowden, « The story of IFF (Identification Friend or Foe) », *IEE Proceedings A - Physical Science, Measurement and Instrumentation, Management and Education - Reviews*, vol. 132, n° 6, p. 435-437, oct. 1985, doi: 10.1049/ip-a-1.1985.0079.
- [8] G. Brooker et J. Gomez, « Lev Termen's Great Seal bug analyzed », *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, vol. 28, n° 11, p. 4-11, nov. 2013, doi: 10.1109/MAES.2013.6678486.
- [9] J. Bardeen et W. H. Brattain, « The Transistor, A Semi-Conductor Triode », *Phys. Rev.*, vol. 74, n° 2, p. 230-231, juill. 1948, doi: 10.1103/PhysRev.74.230.
- [10] M. M. Atalla, E. Tannenbaum, et E. J. Scheibner, « Stabilization of silicon surfaces by thermally grown oxides », *The Bell System Technical Journal*, vol. 38, n° 3, p. 749-783, mai 1959, doi: 10.1002/j.1538-7305.1959.tb03907.x.
- [11] J. A. Hoerni, « Method of manufacturing semiconductor devices », US3025589A, mars 20, 1962
- [12] J. T. Last, « Solid-state circuitry having discrete regions of semi-conductor material isolated by an insulating material », US3158788A, nov. 24, 1964 Consulté le: août 19, 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://patents.google.com/patent/US3158788A/en?q=Jay+Last+fairchild&after=priority:19590101&sort=old&page=1>
- [13] R. N. Noyce, « Semiconductor circuit complexes », US3117260A, janv. 07, 1964 Consulté le: août 19, 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://patents.google.com/patent/US3117260/en>
- [14] G. E. Moore, « Progress in digital integrated electronics [Technical literature, Copyright 1975 IEEE. Reprinted, with permission. Technical Digest. International Electron Devices Meeting, IEEE, 1975, pp. 11-13.] », *IEEE Solid-State Circuits Society Newsletter*, vol. 11, n° 3, p. 36-37, sept. 2006, doi: 10.1109/N-SSC.2006.4804410.
- [15] M. Roser et H. Ritchie, « Technological Progress », *Our World in Data*, mai 2013, Consulté le: août 19, 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://ourworldindata.org/technological-progress>
- [16] A. J. Minasy, « Method and apparatus for detecting the passage of prohibited articles by a checkpoint », FR1470762A, mars 05, 1966 Consulté le: nov. 13, 2019. [En ligne]. Disponible sur: <https://patents.google.com/patent/FR1470762A/en>
- [17] T. F. Thompson, « Detecting means for stolen goods », US2774060A, juin 15, 1953 Consulté le: nov. 12, 2019. [En ligne]. Disponible sur: <https://patents.google.com/patent/US2774060A/en>
- [18] A. J. Minasy, « Method and Apparatus for Article Theft Detection », US3500373 (A), mars 10, 1970 Consulté le: nov. 14, 2019. [En ligne]. Disponible sur: <https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?FT=D&date=19700310&DB=&local e=&CC=US&NR=3500373A&KC=A&ND=1>

- [19] M. Cardullo et W. Parks, « Transponder Apparatus and System », US3713148 (A), janv. 23, 1973 Consulté le: nov. 08, 2019. [En ligne]. Disponible sur: <https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/biblio?FT=D&date=19730123&DB=&local e=&CC=US&NR=3713148A&KC=A&ND=1>
- [20] M. Cardullo, « Genesis of the Versatile RFID Tag », *RFID Journal*, avr. 2003, Consulté le: nov. 08, 2019. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.rfidjournal.com/articles/view?392#back-from-modal>
- [21] « Q-Free's History », *Q-Free*. <https://www.q-free.com/about-us/q-frees-history/> (consulté le nov. 15, 2019).
- [22] V. P. Plessky et L. M. Reindl, « Review on SAW RFID tags », *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 57, n° 3, p. 654-668, mars 2010, doi: 10.1109/TUFFC.2010.1462.
- [23] S. Bernard et N. J. Woodland, « Classifying apparatus and method », US2612994A, oct. 07, 1952
- [24] GS1, « GS1 Company Prefix », *GS1 | The Global Language of Business*. <https://www.gs1.org/standards/id-keys/company-prefix> (consulté le août 11, 2021).
- [25] GS1, « GS1 identification keys », *GS1 | The Global Language of Business*. <https://www.gs1.org/standards/id-keys> (consulté le août 11, 2021).
- [26] C. Tetelin, « Systèmes et techniques RFID », p. 37, oct. 2020.
- [27] H. T. Friis, « A Note on a Simple Transmission Formula », *Proceedings of the IRE*, vol. 34, n° 5, p. 254-256, mai 1946, doi: 10.1109/JRPROC.1946.234568.
- [28] A. Vena, N. Samat, B. Sorli, et J. Podlecki, « Ultralow Power and Compact Backscatter Wireless Device and Its SDR-Based Reading System for Environment Monitoring in UHF Band », *IEEE Sensors Letters*, vol. 5, n° 5, p. 1-4, mai 2021, doi: 10.1109/LSENS.2021.3074187.
- [29] Invengo, « About Invengo's Bullet UCODE 8 (XC-TF8013-C107) », *Invengo*. <https://channel.invengo.com/rfid-product-line/tags-inlays-consumables/rain-rfid-uhf/bullet-ucode-8/> (consulté le oct. 17, 2021).
- [30] Invengo, « HF & NFC Tags & Inlays », *Invengo*. <https://channel.invengo.com/rfid-product-line/tags-inlays-consumables/nfc-hf/> (consulté le oct. 17, 2021).
- [31] GS1, « Regulatory status for using RFID in the EPC Gen2 (860 to 960 MHz) band of the UHF spectrum ». mars 13, 2021. [En ligne]. Disponible sur: https://www.gs1.org/sites/default/files/docs/epc/uhf_regulations.pdf
- [32] United States of America, *Operation within the bands 902-928 MHz, 2400-2483.5 MHz, and 5725-5850 MHz. - Content Details - CFR-2010-title47-vol1-sec15-247*, vol. 47 CFR 15.247. 2010. Consulté le: mai 07, 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.govinfo.gov/app/details/CFR-2010-title47-vol1/CFR-2010-title47-vol1-sec15-247/summary>
- [33] ETSI, « ETSI EN 302 208 ». août 2020. Consulté le: nov. 05, 2021. [En ligne]. Disponible sur: https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302200_302299/302208/03.03.01_60/en_302208v030301p.pdf
- [34] European commission, *Commission Implementing Decision (EU) 2018/1538 of 11 October 2018 on the harmonisation of radio spectrum for use by short-range devices within the 874-876 and 915-921 MHz frequency bands (notified under document C(2018) 6535) (Text with EEA relevance.)*, vol. 257. 2018. Consulté le: mai 06, 2021. [En ligne]. Disponible sur: http://data.europa.eu/eli/dec_impl/2018/1538/oj/eng
- [35] MIIT PRC, *关于发布800/900MHz频段射频识别 (RFID) 技术应用试行规定的通知*, vol. 205. 2007. Consulté le: mai 10, 2021. [En ligne]. Disponible sur: https://www.miit.gov.cn/jgsj/wgj/wjfb/art/2021/art_20a89cc5aba0447b846f84f790e21368.html
- [36] S. Sarma, « How Inexpensive RFID Is Revolutionizing the Supply Chain: (Innovations Case Narrative: The Electronic Product Code) », *Innovations: Technology, Governance, Globalization*, vol. 7, n° 3, p. 35-52, juill. 2012, doi: 10.1162/INOV_a_00138.

- [37] RAIN RFID, « FAQs - RAIN RFID », *RAIN RFID*. <https://rainrfid.org/about-rain/faqs/> (consulté le avr. 21, 2020).
- [38] R. Das, « The Rapid Rise of RFID: Markets, Trends, Outlook », présenté à IDTechEx Show! 2018, Estrel Hall B, Estrel Convention Center, Berlin, Germany, avr. 12, 2018. Consulté le: avr. 20, 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.idtechex.com/europe2018/show/en/full-agenda/11735/idtechex>
- [39] Decathlon, « Propagation of RFID processes in a retail company: Decathlon », févr. 23, 2016. [En ligne]. Disponible sur: <http://rainrfid.org/wp-content/uploads/2016/03/Rain-RFID-Decathlon.pdf>
- [40] Impinj, « McDonald's France Adopts Connected Table Service », *Impinj*, nov. 21, 2017. <https://www.impinj.com/library/videos/mcdonald's-france-adopts-connected-table-serv> (consulté le août 26, 2021).
- [41] GS1, « EPC UHF Gen2 Air Interface Protocol », *GS1 | The Global Language of Business*, déc. 15, 2015. <https://www.gs1.org/standards/epc-rfid/uhf-air-interface-protocol> (consulté le avr. 17, 2020).
- [42] J. Yin *et al.*, « A System-on-Chip EPC Gen-2 Passive UHF RFID Tag With Embedded Temperature Sensor », *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 45, n° 11, p. 2404-2420, nov. 2010, doi: 10.1109/JSSC.2010.2072631.
- [43] AMS, « SL900A », *AMS*. <http://ams.com/eng/Products/Wireless-Connectivity/Sensor-Tags-Interfaces/SL900A> (consulté le févr. 09, 2018).
- [44] GS1, « Tag Data Standard », *GS1 | The Global Language of Business*, nov. 2019. <https://www.gs1.org/standards/epcrfid-epcis-id-keys/epc-rfid-tds/1-13> (consulté le juill. 25, 2021).
- [45] GS1, « EPC MDID list », *GS1 | The Global Language of Business*, juill. 19, 2021. https://www.gs1.org/sites/gs1/files/docs/epc/mdid_list.json (consulté le août 10, 2021).
- [46] EM Microelectronic, « EM4325 », *EM Microelectronic*. <https://www.emmicroelectronic.com/product/epc-and-uhf-ics/em4325> (consulté le juin 02, 2021).
- [47] M. Philipose, J. R. Smith, B. Jiang, A. V. Mamishev, S. Roy, et K. Sundara-Rajan, « Battery-free wireless identification and sensing », *IEEE Pervasive Computing*, vol. 4, n° 1, p. 37-45, janv. 2005, doi: 10.1109/MPRV.2005.7.
- [48] R. A. Pease, « A new Fahrenheit temperature sensor », *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 19, n° 6, p. 971-977, déc. 1984, doi: 10.1109/JSSC.1984.1052253.
- [49] AXZON (formerly RfMicron), « Magnus S2 », *RfMicron*. <http://rfmicron.com/magnus-family/> (consulté le févr. 09, 2018).
- [50] RTEC, « RS MAGNUS », *RTEC*. <http://www.rfid.com/En/Home/ProductDetail/id/42> (consulté le févr. 12, 2018).
- [51] SMARTRAC, « SENSOR DOGBONE », *SMARTRAC*. <https://www.smartrac-group.com/sensor-dogbone.html> (consulté le févr. 12, 2018).
- [52] Confidex, « Captura », *Confidex*. <https://www.confidex.com/products/links-by-confidex/confidex-captura> (consulté le févr. 06, 2019).
- [53] Enable IPC, « RFID Fuse Tag », *Enable IPC*. <http://www.enableipc.com/rfidfuse.htm> (consulté le févr. 12, 2018).
- [54] S. Sarma, « How Inexpensive RFID Is Revolutionizing the Supply Chain: (Innovations Case Narrative: The Electronic Product Code) », *Innovations: Technology, Governance, Globalization*, vol. 7, n° 3, p. 35-52, juill. 2012, doi: 10.1162/INOV_a_00138.
- [55] U. Kaatze, « Complex permittivity of water as a function of frequency and temperature », *J. Chem. Eng. Data*, vol. 34, n° 4, p. 371-374, oct. 1989, doi: 10.1021/je00058a001.
- [56] S. Manzari, T. Musa, M. Randazzo, Z. Rinaldi, A. Meda, et G. Marrocco, « A passive temperature radio-sensor for concrete maturation monitoring », in *2014 IEEE RFID Technology and Applications Conference (RFID-TA)*, Tampere, Finland, sept. 2014, p. 121-126. doi: 10.1109/RFID-TA.2014.6934212.

- [57] S. Lopez-Soriano, I. P. Spassovsky, J. Parron, et G. Marrocco, « Electromagnetic feasibility of a passive wireless sensor network for temperature mapping inside a shielded enclosure », in *2017 11th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)*, Paris, France, mars 2017, p. 1995-1998. doi: 10.23919/EuCAP.2017.7928123.
- [58] S. Amendola, G. Bovesecchi, A. Palombi, P. Coppa, et G. Marrocco, « Design, Calibration and Experimentation of an Epidermal RFID Sensor for Remote Temperature Monitoring », *IEEE Sensors Journal*, vol. 16, n° 19, p. 7250-7257, oct. 2016, doi: 10.1109/JSEN.2016.2594582.
- [59] A. Rashee, E. Iranmanes, W. Li, X. Fen, A. S. Andrenk, et K. Wan, « Experimental study of human body effect on temperature sensor integrated RFID tag », in *2017 IEEE International Conference on RFID Technology Application (RFID-TA)*, Warsaw, Poland, sept. 2017, p. 243-247. doi: 10.1109/RFID-TA.2017.8098911.
- [60] V. Di Cecco, S. Amendola, P. P. Valentini, et G. Marrocco, « Finger-Augmented RFID system to restore peripheral thermal feeling », in *2017 IEEE International Conference on RFID (RFID)*, Phoenix, AZ, USA, mai 2017, p. 54-60. doi: 10.1109/RFID.2017.7945587.
- [61] Confidex, « TempLabel », *Eprin*. <https://www.rfidshop.cz/eshop-confidex-temperature-monitoring-label.html?lang=2> (consulté le févr. 12, 2018).
- [62] AMS, « SL900A », *AMS*. <http://ams.com/eng/Products/Wireless-Connectivity/Sensor-Tags-Interfaces/SL900A> (consulté le févr. 09, 2018).
- [63] A. Vena, B. Sorli, A. Foucaran, et Y. Belaizi, « A RFID-enabled sensor platform for pervasive monitoring », in *2014 9th International Symposium on Reconfigurable and Communication-Centric Systems-on-Chip (ReCoSoC)*, Montpellier, France, mai 2014, p. 1-4. doi: 10.1109/ReCoSoC.2014.6861358.
- [64] R. Vidal Aroca, R. Santos Inoue, L. M. Pedro, G. A. Paula Caurin, et D. Varela Magalhães, « Towards a battery-free wireless smart glove for rehabilitation applications based on RFID », in *2015 IEEE Brasil RFID*, Sao Paulo, Brazil, oct. 2015, p. 1-5. doi: 10.1109/BrasilRFID.2015.7523839.
- [65] A. Vena, B. Sorli, B. Charlot, et S. Naudi, « An RFID-based implant for identification and pressure sensing of orthopedic prosthesis », in *2015 1st URSI Atlantic Radio Science Conference (URSI AT-RASC)*, Las Palmas, Spain, mai 2015, p. 1-1. doi: 10.1109/URSI-AT-RASC.2015.7303024.
- [66] N. S. S. Marques Da Fonseca, R. C. S. Freire, A. Batista, G. Fontgalland, et S. Tedjini, « A passive capacitive soil moisture and environment temperature UHF RFID based sensor for low cost agricultural applications », in *2017 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*, Aguas de Lindoia, Brazil, août 2017, p. 1-4. doi: 10.1109/IMOC.2017.8121099.
- [67] S. F. Pichorim, N. J. Gomes, et J. C. Batchelor, « Two Solutions of Soil Moisture Sensing with RFID for Landslide Monitoring », *Sensors*, vol. 18, n° 2, p. 452, févr. 2018, doi: 10.3390/s18020452.
- [68] A. Rennane, A. Abdelnour, D. Kaddour, R. Touhami, et S. Tedjini, « Design of passive UHF RFID sensor on flexible foil for sports balls pressure monitoring », *Antennas Propagation IET Microwaves*, vol. 12, n° 14, p. 2154-2160, 2018, doi: 10.1049/iet-map.2018.5193.
- [69] N. Cho, S.-J. Song, J.-Y. Lee, S. Kim, S. Kim, et H.-J. Yoo, « A 8- μ W, 0.3-mm² RF-powered transponder with temperature sensor for wireless environmental monitoring », juin 2005, p. 4763-4766 Vol. 5. doi: 10.1109/ISCAS.2005.1465697.
- [70] D. Pardo *et al.*, « Design Criteria for Full Passive Long Range UHF RFID Sensor for Human Body Temperature Monitoring », in *2007 IEEE International Conference on RFID*, mars 2007, p. 141-148. doi: 10.1109/RFID.2007.346162.
- [71] A. Vaz *et al.*, « Full Passive UHF Tag With a Temperature Sensor Suitable for Human Body Temperature Monitoring », *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, vol. 57, n° 2, p. 95-99, févr. 2010, doi: 10.1109/TCSII.2010.2040314.
- [72] Q. Zhang, P. Feng, S. Zhou, Z. Geng, et N. Wu, « A novel RFID tag chip with temperature sensor in standard CMOS process », in *Proceedings of 2010 IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, mai 2010, p. 1109-1112. doi: 10.1109/ISCAS.2010.5537333.

- [73] J. Yin *et al.*, « A System-on-Chip EPC Gen-2 Passive UHF RFID Tag With Embedded Temperature Sensor », *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 45, n° 11, p. 2404-2420, nov. 2010, doi: 10.1109/JSSC.2010.2072631.
- [74] F. Peng, Z. Qi, et W. Nanjian, « A passive UHF RFID tag chip with a dual-resolution temperature sensor in a 0.18 μm standard CMOS process », *J. Semicond.*, vol. 32, n° 11, p. 115013, 2011, doi: 10.1088/1674-4926/32/11/115013.
- [75] J. Qian *et al.*, « A passive UHF tag for RFID-based train axle temperature measurement system », in *2011 IEEE Custom Integrated Circuits Conference (CICC)*, sept. 2011, p. 1-4. doi: 10.1109/CICC.2011.6055420.
- [76] Z. Qi, Y. Zhuang, X. Li, W. Liu, Y. Du, et B. Wang, « Full passive UHF RFID Tag with an ultra-low power, small area, high resolution temperature sensor suitable for environment monitoring », *Microelectronics Journal*, vol. 45, n° 1, p. 126-131, janv. 2014, doi: 10.1016/j.mejo.2013.10.010.
- [77] M. Zgaren, S. Mohamad, A. Amira, et M. Sawan, « EPC Gen-2 UHF RFID tags with low-power CMOS temperature sensor suitable for gas applications », in *2016 14th IEEE International New Circuits and Systems Conference (NEWCAS)*, juin 2016, p. 1-4. doi: 10.1109/NEWCAS.2016.7604818.
- [78] Y. Liu, F. Deng, H. Yigang, B. Li, Z. Liang, et S. Zhou, « Novel Concrete Temperature Monitoring Method Based on an Embedded Passive RFID Sensor Tag », *Sensors*, vol. 17, p. 1463, juin 2017, doi: 10.3390/s17071463.
- [79] T. Feldengut, A. M. Marzouk, S. Kolnsberg, et R. Kokozinski, « A Passive UHF Transponder with Readout Circuits for External Mechanical Switches », in *RFID SysTech 2011 7th European Workshop on Smart Objects: Systems, Technologies and Applications*, Dresden, Germany, mai 2011, p. 1-6. [En ligne]. Disponible sur: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6138702/>
- [80] N. Cho, S.-J. Song, S. Kim, S. Kim, et H.-J. Yoo, « A 5.1- μW UHF RFID tag chip integrated with sensors for wireless environmental monitoring », in *Proceedings of ESSCIRC 2005: 31st European Solid-State Circuits Conference*, oct. 2005, p. 279-282. doi: 10.1109/ESSCIR.2005.1541614.
- [81] S. Zhou et N.-J. Wu, « UHF RFID front-end with magnetic sensor », in *2006 8th International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology Proceedings*, Shanghai, China, oct. 2006, p. 554-556. doi: 10.1109/ICSICT.2006.306351.
- [82] A. Chulliat *et al.*, « The US/UK World Magnetic Model for 2015-2020: Technical Report », *National Geophysical Data Center*, 2015, doi: 10.7289/V5TB14V7.
- [83] D. Yeager, F. Zhang, A. Zarrasvand, N. George, T. Daniel, et B. P. Otis, « A 9 μA , Addressable Gen2 Sensor Tag for Biosignal Acquisition », *Solid-State Circuits, IEEE Journal of*, vol. 45, p. 2198-2209, nov. 2010, doi: 10.1109/JSSC.2010.2063930.
- [84] J. D. Hyde, J. Kuhn, T. Stanford, H. Heinrich, C. J. Diorio, et R. A. Oliver, « Self-tuning of RFID tags using nonuniform impedance steps », US9087282 B1, juill. 21, 2015 Consulté le: févr. 08, 2018. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.google.fr/patents/US9087282>
- [85] S. Srinivas, J. Kuhn, R. A. Oliver, J. D. Hyde, et C. J. Diorio, « Self tuning RFID tags », US8952792 B1, févr. 10, 2015 Consulté le: févr. 05, 2018. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.google.fr/patents/US8952792>
- [86] K. Zannas, H. El Matbouly, Y. Duroc, et S. Tedjini, « Self-Tuning RFID Tag: A New Approach for Temperature Sensing », *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 66, n° 12, p. 5885-5893, nov. 2018, doi: 10.1109/TMTT.2018.2878568.
- [87] Identiv, « DetectL Dry Inlay », *Identiv*. <https://www.identiv.com/products/rfid-nfc-inlays/uhf-tags/> (consulté le févr. 12, 2018).
- [88] B. Gladysz et C. Lysiak, « Light-responsive RFID Tags for Precise Locating of Objects in Manual Assembly Verification Workshops », *Procedia CIRP*, vol. 41, p. 951-956, janv. 2016, doi: 10.1016/j.procir.2015.12.095.
- [89] S. N. R. Kantareddy, R. Bhattacharyya, et S. E. Sarma, « UHF RFID tag IC power mode switching for wireless sensing of resistive and electrochemical transduction modalities », in *2018 IEEE International Conference on RFID (RFID)*, Orlando, FL, USA, avr. 2018, p. 1-8. doi: 10.1109/RFID.2018.8376201.

- [90] G. Andia Vera, S. D. Nawale, S. Tedjini, et Y. Duroc, « Passive UHF RFID backscattering for indoor lighting control », in *2014 Annual IEEE India Conference (INDICON)*, Pune, India, déc. 2014, p. 1-4. doi: 10.1109/INDICON.2014.7030472.
- [91] RFMicron, « RFM2100 », *RFMicron*. <http://rfmicron.com/rfm2100-wireless-flexible-moisture-sensor/> (consulté le févr. 12, 2018).
- [92] RFMicron, « RFM2110 », *RFMicron*. <http://rfmicron.com/rfm2110-wireless-moisture-intrusion-sensor/> (consulté le févr. 12, 2018).
- [93] RFMicron, « RFM2120 », *RFMicron*. <http://rfmicron.com/rfm2120-wireless-flexible-moisture-sensor/> (consulté le févr. 12, 2018).
- [94] RTEC, « ATOM MAGNUS », *RTEC*. <http://www.rfid.com/En/Home/ProductDetail/id/30> (consulté le févr. 12, 2018).
- [95] RTEC, « PROTON MAGNUS », *RTEC*. <http://www.rfid.com/En/Home/ProductDetail/id/38> (consulté le févr. 12, 2018).
- [96] SMARTRAC, « SENSOR PATCH », *SMARTRAC*. <https://www.smartrac-group.com/sensor-patch.html> (consulté le févr. 12, 2018).
- [97] SMARTRAC, « SENSOR TADPOLE », *SMARTRAC*. <https://www.smartrac-group.com/sensor-tadpole.html> (consulté le févr. 12, 2018).
- [98] RFMicron, « Chameleon », *RFMicron*. <http://rfmicron.com/positioning-proximity-sensor/> (consulté le févr. 12, 2018).
- [99] N. S. S. Marques Da Fonseca, R. C. S. Freire, G. Fontgalland, B. Arruda, et S. Tedjini, « A Fully Passive UHF RFID Soil Moisture Time-Domain Transmissometry Based Sensor », in *2018 3rd International Symposium on Instrumentation Systems, Circuits and Transducers (INSCIT)*, Bento Gonçalves, Brazil, août 2018, p. 1-6. doi: 10.1109/INSCIT.2018.8546707.
- [100] T. Unander, J. Sidén, et H.-E. Nilsson, « Designing of RFID-Based Sensor Solution for Packaging Surveillance Applications », *IEEE Sensors Journal*, vol. 11, n° 11, p. 3009-3018, nov. 2011, doi: 10.1109/JSEN.2011.2155055.
- [101] J. C. S. Dos Santos *et al.*, « Optimized ultra-low power sensor-enabled RFID data logger for Pharmaceutical Cold Chain », oct. 2015. doi: 10.1109/BrasilRFID.2015.7523835.
- [102] T. Wang, Y. He, Q. Luo, F. Deng, et C. Zhang, « Self-Powered RFID Sensor Tag for Fault Diagnosis and Prognosis of Transformer Winding », *IEEE Sensors Journal*, vol. 17, n° 19, p. 6418-6430, oct. 2017, doi: 10.1109/JSEN.2017.2738028.
- [103] Powercast Co., « RFID Sensor Tags », *Powercast Co.* <https://www.powercastco.com/products/rfid-sensor-tags/> (consulté le août 04, 2021).
- [104] R. Hildebrandt, M. Heiß, et N. A. Gay, « A platform for pervasive RFID-based sensors », in *2011 Semiconductor Conference Dresden*, sept. 2011, p. 1-4. doi: 10.1109/SCD.2011.6068758.
- [105] M. Heiß et R. Hildebrandt, « High-Temperature UHF RFID Sensor Measurements in a Full-Metal Environment », in *Smart SysTech 2013; European Conference on Smart Objects, Systems and Technologies*, Nuremberg, Germany, juin 2013, p. 1-5. [En ligne]. Disponible sur: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6525239/>
- [106] S. Sauer et W.-J. Fischer, « An Irreversible Single-Use Humidity-Threshold Monitoring Sensor Principle for Wireless Passive Sensor Solutions », *IEEE Sensors Journal*, vol. 16, n° 18, p. 6920-6930, sept. 2016, doi: 10.1109/JSEN.2016.2590837.
- [107] H. Solar, A. Beriain, I. Zalbide Agirrezabalaga, E. D'Entremont Jiménez, et R. J. Berenguer Pérez, « A robust, -40° to +150°C wireless rotor temperature monitoring system based on a fully passive UHF RFID sensor tag », in *2014 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS2014)*, Tampa, FL, USA, juin 2014, p. 1-3. doi: 10.1109/MWSYM.2014.6848480.
- [108] Farsens, « ANDY100 », *Farsens Wireless Sensors*. <http://www.farsens.com/en/products/andy100/> (consulté le févr. 09, 2018).
- [109] I. Zalbide Agirrezabalaga, E. D'Entremont Jiménez, A. Jiménez Irastorza, H. Solar, A. Beriain, et R. J. Berenguer Pérez, « Battery-free wireless sensors for industrial applications based on UHF RFID technology », in *IEEE SENSORS 2014 Proceedings*, Valencia, Spain, nov. 2014, p. 1499-1502. doi: 10.1109/ICSENS.2014.6985299.

- [110] I. Jauregi *et al.*, « UHF RFID Temperature Sensor Assisted With Body-Heat Dissipation Energy Harvesting », *IEEE Sensors Journal*, vol. 17, n° 5, p. 1471-1478, mars 2017, doi: 10.1109/JSEN.2016.2638473.
- [111] K. Oharada, B. Shizuki, et S. Takahashi, « AccelTag: A Passive Smart ID Tag with Acceleration Sensor for Interactive Applications », Québec City, Canada, oct. 2017, p. 63-64. doi: 10.1145/3131785.3131808.
- [112] Farsens, « Rocky100 », *Farsens Wireless Sensors*. <http://www.farsens.com/en/products/rocky100/> (consulté le févr. 09, 2018).
- [113] « Wireless Identification and Sensing Platform », *GitHub*. <https://github.com/wisp> (consulté le sept. 22, 2020).
- [114] A. P. Sample, D. Yeager, P. S. Powledge, et J. R. Smith, « Design of a Passively-Powered, Programmable Sensing Platform for UHF RFID Systems », avr. 2007, p. 149-156. doi: 10.1109/RFID.2007.346163.
- [115] « WISP Home », *WISP5*, sept. 22, 2018. <http://wisp5.wikispaces.com:80/WISP+Home> (consulté le sept. 22, 2020).
- [116] Texas Instruments, « MSP430FR5969 data sheet, product information and support | TI.com », *Texas Instruments*. <https://www.ti.com/product/MSP430FR5969> (consulté le oct. 07, 2020).
- [117] D. Yeager, P. S. Powledge, R. Prasad, D. Wetherall, et J. R. Smith, « Wirelessly-Charged UHF Tags for Sensor Data Collection », in *2008 IEEE International Conference on RFID (Frequency Identification)*, *IEEE RFID 2008*, mai 2008, p. 320-327. doi: 10.1109/RFID.2008.4519381.
- [118] A. P. Sample, D. J. Yeager, P. S. Powledge, A. V. Mamishev, et J. R. Smith, « Design of an RFID-Based Battery-Free Programmable Sensing Platform », *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on*, vol. 57, p. 2608-2615, déc. 2008, doi: 10.1109/TIM.2008.925019.
- [119] A. T. Hoang, K. Durham Coonley, F. Nekoogar, et M. S. Reynolds, « A battery-free RFID sensor tag with fiber-optic tamper detection », in *2016 IEEE SENSORS*, Orlando, FL, USA, oct. 2016, p. 1-3. doi: 10.1109/ICSENS.2016.7808809.
- [120] Y. Zhao et J. R. Smith, « A battery-free RFID-based indoor acoustic localization platform », in *2013 IEEE International Conference on RFID (RFID)*, Penang, Malaysia, avr. 2013, p. 110-117. doi: 10.1109/RFID.2013.6548143.
- [121] S. Naderiparizi, Y. Zhao, J. Youngquist, A. Sample, et J. R. Smith, « Self-localizing battery-free cameras », sept. 2015, p. 445-449. doi: 10.1145/2750858.2805846.
- [122] A. Dementyev et J. R. Smith, « A wearable UHF RFID-based EEG system », in *2013 IEEE International Conference on RFID (RFID)*, Penang, Malaysia, avr. 2013, p. 1-7. doi: 10.1109/RFID.2013.6548128.
- [123] T. Tanaka, T. Nishikawa, et N. Imasaki, « Method of and computer program product for monitoring person's movements », US20030197612 A1, oct. 23, 2003 Consulté le: févr. 08, 2018. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.google.fr/patents/US20030197612>
- [124] Y. Zhang et L. Bai, « Rapid structural condition assessment using radio frequency identification (RFID) based wireless strain sensor », *Automation in Construction*, vol. 54, p. 1-11, juin 2015, doi: 10.1016/j.autcon.2015.02.013.
- [125] Tag CO., « E-seal », *RFID Seal*. <http://www.rfidseal.com/products/e-seal.html> (consulté le févr. 12, 2018).
- [126] D. Howell, « Improved timing tag », WO2010138890A1, déc. 02, 2010 Consulté le: sept. 15, 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://patents.google.com/patent/WO2010138890A1/fr?assignee=chronotrack&oq=chronotrack&sort=old>
- [127] K. S. Hansen, « Automated timing systems and methods having multiple time event recorders and an integrated user time entry interface », WO2012016225A3, avr. 05, 2012 Consulté le: sept. 15, 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://patents.google.com/patent/WO2012016225A3/fr?assignee=Innovative+Timing+System%2c+Llc&oq=Innovative+Timing+Systems%2c+Llc&sort=old>

- [128] J. E. Van Rens Bas, J. W. Jeroen, et K. V. Adriaan, « A wearable sports timing tag assembly », WO2015051813A1, avr. 16, 2015 Consulté le: sept. 15, 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://patents.google.com/patent/WO2015051813A1/fr?inventor=Klaas+Verwoerd+Adriaan&sort=old>
- [129] RFID Race Timing Systems, « RFID Race Timing Systems – Most Advanced Open Tag Sports Timing System », *RFID Race Timing Systems*. <https://rfidtiming.com/> (consulté le sept. 15, 2020).
- [130] J. Lindsay, H. Velazquez, F.-J. Chen, et E. Wagner, « Deactivating a data tag for user privacy or tamper-evident packaging », US20050242957 A1, nov. 03, 2005 Consulté le: févr. 08, 2018. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.google.fr/patents/US20050242957>
- [131] C. Occhiuzzi et G. Marrocco, « The RFID Technology for Neurosciences: Feasibility of Limbs' Monitoring in Sleep Diseases », *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, vol. 14, n° 1, p. 37-43, janv. 2010, doi: 10.1109/TITB.2009.2028081.
- [132] S. Caizzone, C. Occhiuzzi, et G. Marrocco, « Multi-Chip RFID Antenna Integrating Shape-Memory Alloys for Detection of Thermal Thresholds », *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 59, n° 7, p. 2488-2494, juill. 2011, doi: 10.1109/TAP.2011.2152341.
- [133] B. S. Cook, J. R. Cooper, et M. M. Tentzeris, « An Inkjet-Printed Microfluidic RFID-Enabled Platform for Wireless Lab-on-Chip Applications », *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on*, vol. 61, p. 4714-4723, déc. 2013, doi: 10.1109/TMTT.2013.2287478.
- [134] S. Moradian et R. Abdolvand, « MEMS-based passive wireless respiration profile sensor », in *2016 IEEE SENSORS*, Orlando, FL, USA, oct. 2016, p. 1-3. doi: 10.1109/ICSENS.2016.7808422.
- [135] R. Gonçalves, J. Hester, N. Borges Carvalho, P. Pinho, et M. M. Tentzeris, « Passive sensors for food quality monitoring and counterfeiting », in *IEEE SENSORS 2014 Proceedings*, Valencia, Spain, nov. 2014, p. 1511-1514. doi: 10.1109/ICSENS.2014.6985302.
- [136] J. Virtanen, L. Ukkonen, T. Björninen, et L. Sydänheimo, « Printed humidity sensor for UHF RFID systems », in *2010 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS)*, Limerick, Ireland, févr. 2010, p. 269-272. doi: 10.1109/SAS.2010.5439426.
- [137] J. Soep Lee, J. Oh, J. Jun, et J. Jang, « Wireless Hydrogen Smart Sensor Based on Pt/Graphene-Immobilized Radio-Frequency Identification Tag », *ACS Nano*, vol. 9, n° 8, p. 7783-7790, août 2015, doi: 10.1021/acsnano.5b02024.
- [138] I. Gammoudi, B. Aïssa, M. Nedil, et M. M. Abdallah, « CNT-RFID passive tag antenna for gas sensing in underground mine », juill. 2015. doi: 10.1109/APS.2015.7305268.
- [139] T. Björninen et F. Yang, « Signal strength readout and miniaturised antenna for metal-mountable UHF RFID threshold temperature sensor tag », *Electronics Letters*, vol. 51, n° 22, p. 1734-1736, 2015, doi: 10.1049/el.2015.2661.
- [140] X. Shi, F. Yang, S. Xu, et M. Li, « A Passive Temperature-Sensing Antenna Based on a Bimetal Strip Coil », *Sensors*, vol. 17, n° 4, mars 2017, doi: 10.3390/s17040665.
- [141] R. Bhattacharyya, C. Floerkemeier, S. E. Sarma, et D. Deavours, « RFID tag antenna based temperature sensing in the frequency domain », Orlando, FL, USA, mai 2011, p. 70-77. doi: 10.1109/RFID.2011.5764639.
- [142] S. Soodmand, A. Zhao, et G. Y. Tian, « UHF RFID system for wirelessly detection of corrosion based on resonance frequency shift in forward interrogation power », *Antennas Propagation IET Microwaves*, vol. 12, n° 12, p. 1877-1884, 2018, doi: 10.1049/iet-map.2018.0143.
- [143] R. Bhattacharyya, C. Floerkemeier, et S. E. Sarma, « RFID tag antenna based temperature sensing », in *2010 IEEE International Conference on RFID (IEEE RFID 2010)*, Orlando, FL, USA, avr. 2010, p. 8-15. doi: 10.1109/RFID.2010.5467239.
- [144] M. A. Ziai et J. C. Batchelor, « Multi-State Logging Freeze Detection Passive RFID Tags », *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. Volume:PP, p. 1, sept. 2014, doi: 10.1109/TAP.2014.2359474.
- [145] R. Bhattacharyya, C. V. Di Leo, C. Floerkemeier, S. E. Sarma, et L. Anand, « RFID Tag Antenna Based Temperature Sensing Using Shape Memory Polymer Actuation », présenté à *SENSORS, 2010 IEEE*, Kona, HI, USA, nov. 2010. doi: 10.1109/ICSENS.2010.5690951.

- [146] M. Cremer, U. Dettmar, R. Kronberger, C. Hudasch, et V. Wienstroer, « Passive UHF RFID transponders for switching and controlling », in *2013 IEEE International Conference on RFID-Technologies and Applications (RFID-TA)*, Johor Bahru, Malaysia, sept. 2013, p. 1-4. doi: 10.1109/RFID-TA.2013.6694500.
- [147] P. Kalansuriya, R. Bhattacharyya, et S. E. Sarma, « RFID Tag Antenna-Based Sensing for Pervasive Surface Crack Detection », *IEEE Sensors Journal*, vol. 13, n° 5, p. 1564-1570, mai 2013, doi: 10.1109/JSEN.2013.2240155.
- [148] C. Occhiuzzi, C. Paggi, et G. Marrocco, « Passive RFID Strain-Sensor Based on Meander-Line Antennas », *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 59, n° 12, p. 4836-4840, déc. 2011, doi: 10.1109/TAP.2011.2165517.
- [149] R. Bhattacharyya *et al.*, « Towards low-cost, wireless blood anomaly sensing: An RFID-based anemia detection sensor », in *2015 IEEE International Conference on RFID (RFID)*, San Diego, CA, USA, avr. 2015, p. 189-196. doi: 10.1109/RFID.2015.7113091.
- [150] Y. Jia, M. Heiß, Q. Fu, et N. A. Gay, « A Prototype RFID Humidity Sensor for Built Environment Monitoring », in *2008 International Workshop on Education Technology and Training 2008 International Workshop on Geoscience and Remote Sensing*, déc. 2008, vol. 2, p. 496-499. doi: 10.1109/ETTandGRS.2008.35.
- [151] S. Kim, T. Le, M. M. Tentzeris, A. Harrabi, A. Collado, et A. Georgiadis, « An RFID-enabled inkjet-printed soil moisture sensor on paper for “smart” agricultural applications », in *Proceedings of IEEE Sensors*, Valencia, Spain, nov. 2014, vol. 2014, p. 1507-1510. doi: 10.1109/ICSENS.2014.6985301.
- [152] D. Shuaib, L. Ukkonen, J. Virkki, et S. Merilampi, « The possibilities of embroidered passive UHF RFID textile tags as wearable moisture sensors », in *2017 IEEE 5th International Conference on Serious Games and Applications for Health (SeGAH)*, Perth, WA, Australia, avr. 2017, p. 1-5. doi: 10.1109/SeGAH.2017.7939286.
- [153] S. D. Nguyen, T. T. Pham, E. Fribourg-Blanc, N. Nguyen Le, C. M. Dang, et S. Tedjini, « Approach for quality detection of food by RFID-based wireless sensor tag », *Electronics Letters*, vol. 49, n° 25, p. 1588-1589, déc. 2013, doi: 10.1049/el.2013.3328.
- [154] K. E. Belsey *et al.*, « Switchable disposable passive RFID vapour sensors from inkjet printed electronic components integrated with PDMS as a stimulus responsive material », *J. Mater. Chem. C*, vol. 5, n° 12, p. 3167-3175, mars 2017, doi: 10.1039/C6TC05509E.
- [155] G. Marrocco, « RFID Grids: Part I—Electromagnetic Theory », *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 59, n° 3, p. 1019-1026, mars 2011, doi: 10.1109/TAP.2010.2103019.
- [156] G. Marrocco et F. Amato, « Self-sensing passive RFID: From theory to tag design and experimentation », in *2009 European Microwave Conference (EuMC)*, Rome, Italy, sept. 2009, p. 001-004. doi: 10.23919/EUMC.2009.5296345.
- [157] P. V. Nikitin et K. V. S. Rao, « Theory and measurement of backscattering from RFID tags », *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 48, n° 6, p. 212-218, déc. 2006, doi: 10.1109/MAP.2006.323323.
- [158] C. Occhiuzzi, G. Contri, et G. Marrocco, « RFID STENTag for passive vascular monitoring », in *Proceedings of the 5th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)*, avr. 2011, p. 3476-3478.
- [159] C. Occhiuzzi, A. Rida, G. Marrocco, et M. M. Tentzeris, « RFID Passive Gas Sensor Integrating Carbon Nanotubes », *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on*, vol. 59, p. 2674-2684, nov. 2011, doi: 10.1109/TMTT.2011.2163416.
- [160] S. Manzari, A. Catini, G. Pomarico, C. Di Natale, et G. Marrocco, « Development of an UHF RFID Chemical Sensor Array for Battery-Less Ambient Sensing », *IEEE Sensors Journal*, vol. 14, n° 10, p. 3616-3623, oct. 2014, doi: 10.1109/JSEN.2014.2329268.
- [161] S. Caizzone et G. Marrocco, « RFID-Grids for deformation sensing », in *Proceedings of the 2012 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation*, Chicago, IL, USA, juill. 2012, p. 1-2. doi: 10.1109/APS.2012.6349253.

- [162] C. Paggi, C. Occhiuzzi, et G. Marrocco, « Sub-Millimeter Displacement Sensing by Passive UHF RFID Antennas », *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 62, n° 2, p. 905-912, févr. 2014, doi: 10.1109/TAP.2013.2292520.
- [163] C. Occhiuzzi, A. Ajovalasit, M. A. Sabatino, C. Dispenza, et G. Marrocco, « RFID epidermal sensor including hydrogel membranes for wound monitoring and healing », in *2015 IEEE International Conference on RFID (RFID)*, San Diego, CA, USA, avr. 2015, p. 182-188. doi: 10.1109/RFID.2015.7113090.
- [164] Z. Jiang et F. Yang, « Reconfigurable Sensing Antennas Integrated With Thermal Switches for Wireless Temperature Monitoring », *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 12, p. 914-917, 2013, doi: 10.1109/LAWP.2013.2271649.
- [165] M. Hasani, A. Vena, L. Sydänheimo, L. Ukkonen, et M. M. Tentzeris, « Implementation of a Dual-Interrogation-Mode Embroidered RFID-Enabled Strain Sensor », *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. PP, sept. 2013, doi: 10.1109/LAWP.2013.2283539.
- [166] R. Suwalak, C. Phongcharoenpanich, D. Torrungrueng, et P. Akkaraekthalin, « A radar-cross section of a passive tag on dielectric material in an RFID sensor application », in *2015 12th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*, juin 2015, p. 1-4. doi: 10.1109/ECTICon.2015.7207102.
- [167] I. Kharrat, Y. Duroc, M. Awad, S. Tedjini, et T. Aguilí, « New technique for indoor location based on RSSI method using UHF RFID systems », in *2011 Technical Symposium at ITU Telecom World (ITU WT)*, Geneva, Switzerland, oct. 2011, p. 1-4. [En ligne]. Disponible sur: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6481080/>
- [168] J. Neuhaeuser, S. Gaensler, J. F. Kreutzer, S. M. F. Reimer, T. C. Lueth, et L. Tancredi D'Angelo, « Recording proximity to everyday objects with a radio frequency identification logger while performing activities of daily living », in *2014 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO 2014)*, Bali, Indonesia, déc. 2014, p. 1856-1861. doi: 10.1109/ROBIO.2014.7090606.
- [169] S. Amendola, V. Di Cecco, et G. Marrocco, « Numerical and Experimental Characterization of Wrist-Fingers Communication Link for RFID-Based Finger Augmented Devices », *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 67, n° 1, p. 531-540, janv. 2019, doi: 10.1109/TAP.2018.2876703.
- [170] A. Jayatilaka et D. C. Ranasinghe, « Real-time fluid intake gesture recognition based on batteryless UHF RFID technology », *Pervasive and Mobile Computing*, vol. 34, p. 146-156, janv. 2017, doi: 10.1016/j.pmcj.2016.04.007.
- [171] A. Koblasz, « Using RFID to prevent or detect falls, wandering, bed egress and medication errors », US20070159332 A1, juill. 12, 2007 Consulté le: févr. 08, 2018. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.google.fr/patents/US20070159332>
- [172] Y. Álvarez López, M. E. de Cos Gómez, et F. Las-Heras Andrés, « A received signal strength RFID-based indoor location system », *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 255, p. 118-133, mars 2017, doi: 10.1016/j.sna.2017.01.007.
- [173] A. Bouzakis et L. Overmeyer, « Position Tracking for Passive UHF RFID Tags with the Aid of a Scanned Array », *Int J Wireless Inf Networks*, vol. 20, n° 4, p. 318-327, déc. 2013, doi: 10.1007/s10776-013-0210-z.
- [174] M. Cremer, U. Dettmar, C. Hudasch, R. Kronberger, R. Lerche, et A. Pervez, « Localization of Passive UHF RFID Tags Using the AoAct Transmitter Beamforming Technique », *IEEE Sensors Journal*, vol. 16, n° 6, p. 1762-1771, mars 2016, doi: 10.1109/JSEN.2015.2503640.
- [175] M. Rzymowski, D. Duraj, L. Kulas, K. Nyka, et P. Woznica, « UHF ESPAR antenna for simple Angle of Arrival estimation in UHF RFID applications », in *2016 21st International Conference on Microwave, Radar and Wireless Communications (MIKON)*, Krakow, Poland, mai 2016, p. 1-4. doi: 10.1109/MIKON.2016.7491984.
- [176] H. Don Chon, S. Jun, H. Jung, et W. An, « Using RFID for accurate positioning », *Journal of Global Positioning Systems*, vol. 3, p. 32-39, déc. 2004, doi: 10.5081/jgps.3.1.32.

- [177] L. Kates, « Management and navigation system for the blind », US20060129308 A1, juin 15, 2006 Consulté le: févr. 06, 2018. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.google.fr/patents/US20060129308>
- [178] E. C.-Y. Li et P. A. Swenson, « RFID Floor Tags for Machine Localization and Delivery of Visual Information », US20090267741 A1, oct. 29, 2009 Consulté le: févr. 08, 2018. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.google.fr/patents/US20090267741>
- [179] S. Park et S. Hashimoto, « An intelligent localization algorithm using read time of RFID system », *Advanced Engineering Informatics*, vol. 24, n° 4, p. 490-497, nov. 2010, doi: 10.1016/j.aei.2010.05.001.
- [180] C. Occhiuzzi, C. Vallese, S. Amendola, S. Manzari, et G. Marrocco, « Multi-channel processing of RFID backscattering for monitoring of overnight living », in *2014 XXXIth URSI General Assembly and Scientific Symposium (URSI GASS)*, Beijing, China, août 2014, p. 1-4. doi: 10.1109/URSIGASS.2014.6929327.
- [181] R. Bridgelall, M. Duron, et M. Strzelczyk, « Object location system and method using RFID », US20050190098 A1, sept. 01, 2005 Consulté le: févr. 08, 2018. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.google.fr/patents/US20050190098>
- [182] D. Jayawardana et R. Liyanapathirana, « RFID-based passive wireless displacement measurement of metal structures in infrastructure health monitoring », in *2018 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, Houston, TX, USA, mai 2018, p. 1-6. doi: 10.1109/I2MTC.2018.8409613.
- [183] E. DiGiampaolo et F. Martinelli, « Mobile Robot Localization Using the Phase of Passive UHF RFID Signals », *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, n° 1, p. 365-376, janv. 2014, doi: 10.1109/TIE.2013.2248333.
- [184] E. Di Giampaolo et F. Martinelli, « A Robotic System for Localization of Passive UHF-RFID Tagged Objects on Shelves », *IEEE Sensors Journal*, vol. 18, n° 20, p. 8558-8568, août 2018, doi: 10.1109/JSEN.2018.2865339.
- [185] Y. Zhang, M. G. Amin, et K. Shashank, « Localization and Tracking of Passive RFID Tags Based on Direction Estimation », *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2007, déc. 2007, doi: 10.1155/2007/17426.
- [186] J. C. Carrick, « Methods and Apparatuses For RFID Tag Range Determination », US20100109903 A1, mai 06, 2010 Consulté le: févr. 08, 2018. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.google.fr/patents/US20100109903>
- [187] S. El Abkari, A. Jilbab, et J. El Mhamdi, « Real time positioning over WSN and RFID network integration », in *2018 4th International Conference on Advanced Technologies for Signal and Image Processing (ATSIP)*, Sousse, Tunisia, mars 2018, p. 1-5. doi: 10.1109/ATSIP.2018.8364443.
- [188] C. Angerer, R. Langwieser, et M. Rupp, « Direction of arrival estimation by phased arrays in RFID », présenté à 3rd international EURASIP Workshop on RFID Technology, janv. 2010. [En ligne]. Disponible sur: https://www.researchgate.net/publication/228984499_Direction_of_arrival_estimation_by_phased_arrays_in_RFID
- [189] S. Azzouzi, M. Cremer, U. Dettmar, R. Kronberger, et T. Knie, « New measurement results for the localization of UHF RFID transponders using an Angle of Arrival (AoA) approach », in *2011 IEEE International Conference on RFID*, Orlando, FL, USA, avr. 2011, p. 91-97. doi: 10.1109/RFID.2011.5764607.
- [190] R. Miesen, F. Kirsch, et M. Vossiek, « Holographic localization of passive UHF RFID transponders », in *2011 IEEE International Conference on RFID*, Orlando, FL, USA, avr. 2011, p. 32-37. doi: 10.1109/RFID.2011.5764633.
- [191] A. Motroni *et al.*, « SAR-Based Indoor Localization of UHF-RFID Tags via Mobile Robot », in *2018 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, Nantes, France, sept. 2018, p. 1-8. doi: 10.1109/IPIN.2018.8533847.

- [192] H. Ding *et al.*, « FEMO: A Platform for Free-weight Exercise Monitoring with RFIDs », in *Proceedings of the 13th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, New York, NY, USA, 2015, p. 141-154. doi: 10.1145/2809695.2809708.
- [193] P. V. Nikitin, R. Martinez, S. Ramamurthy, H. Leland, G. Spiess, et K. V. S. Rao, « Phase based spatial identification of UHF RFID tags », in *2010 IEEE International Conference on RFID (IEEE RFID 2010)*, Orlando, FL, USA, avr. 2010, p. 102-109. doi: 10.1109/RFID.2010.5467253.
- [194] D. C. Ranasinghe, « System for monitoring subject movement », WO2015077829 A1, juin 04, 2015 Consulté le: févr. 07, 2018. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.google.fr/patents/WO2015077829A1>
- [195] A. Buffi, P. Nepa, et F. Lombardini, « A Phase-Based Technique for Localization of UHF-RFID Tags Moving on a Conveyor Belt: Performance Analysis and Test-Case Measurements », *IEEE Sensors Journal*, vol. 15, n° 1, p. 387-396, janv. 2015, doi: 10.1109/JSEN.2014.2344713.
- [196] S. Caizzone, E. Di Giampaolo, et G. Marrocco, « Wireless Crack Monitoring by Stationary Phase Measurements from Coupled RFID Tags », *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 62, n° 12, p. 6412-6419, déc. 2014, doi: 10.1109/TAP.2014.2360553.
- [197] S. Pradhan, E. Chai, K. Sundaresan, L. Qiu, M. A. Khojastepour, et S. Rangarajan, « RIO: A Pervasive RFID-based Touch Gesture Interface », oct. 2017, p. 261-274. doi: 10.1145/3117811.3117818.
- [198] S. Z. Sajal, Y. Atanasov, B. D. Braaten, V. Marinov, et O. F. Swenson, « A low cost flexible passive UHF RFID tag for sensing moisture based on antenna polarization », in *IEEE International Conference on Electro/Information Technology*, Milwaukee, WI, USA, juin 2014, p. 542-545. doi: 10.1109/EIT.2014.6871822.
- [199] R. Krigslund, P. Popovski, et G. F. Pedersen, « Orientation Sensing Using Multiple Passive RFID Tags », *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 11, p. 176-179, 2012, doi: 10.1109/LAWP.2012.2185918.
- [200] J. Sidén, J. Gao, et B. Neubauer, « Microstrip antennas for remote moisture sensing using passive RFID », in *2009 Asia Pacific Microwave Conference*, Singapore, Singapore, déc. 2009, p. 2375-2378. doi: 10.1109/APMC.2009.5385463.
- [201] S. Kim, Y. Kawahara, A. Georgiadis, A. Collado, et M. M. Tentzeris, « Low-cost inkjet-printed fully passive RFID tags using metamaterial-inspired antennas for capacitive sensing applications », in *IEEE MTT-S International Microwave Symposium digest. IEEE MTT-S International Microwave Symposium*, juin 2013, p. 1-4. doi: 10.1109/MWSYM.2013.6697644.
- [202] X. Chen, L. Ukkonen, et T. Björninen, « Passive E-Textile UHF RFID-Based Wireless Strain Sensors With Integrated References », *IEEE Sensors Journal*, vol. 16, n° 22, p. 7835-7836, nov. 2016, doi: 10.1109/JSEN.2016.2608659.
- [203] A. E. Abdulhadi et T. A. Denidni, « Self-Powered Multi-Port UHF RFID Tag-Based-Sensor », *IEEE Journal of Radio Frequency Identification*, vol. 1, n° 2, p. 115-123, août 2017, doi: 10.1109/JRFID.2017.2739202.
- [204] A. A. Kuty, T. Björninen, L. Sydänheimo, et L. Ukkonen, « A novel carbon nanotube loaded passive UHF RFID sensor tag with built-in reference for wireless gas sensing », in *2016 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS)*, San Francisco, CA, USA, mai 2016, p. 1-4. doi: 10.1109/MWSYM.2016.7540328.
- [205] Confidex, « Captura Flash », *Confidex*. <https://www.confidex.com/products/links-by-confidex/confidex-captura-flash> (consulté le févr. 06, 2019).
- [206] Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks (SCENIHR), « Opinion on potential health effects of exposure to electromagnetic fields (EMF) », *Publications Office of the European Union*, avr. 2016, doi: 10.2772/75635.

ANNEXE 1-A ENQUETE SUR LES CARACTERISTIQUES DES CIRCUITS INTEGRES RAIN

Marque	Nom	Année de sortie	Mémoire (bits)			Impédance (Ω) ¹	Sensibilité (dBm)		Dimension (μm)		Surface (mm^2)
			EPC	TID	Utilisateur		Lecture	Écriture	Longueur	Largeur	
Alien Technology	Higgs-EC	2016	128	48	128	17,19-j206,6	-22,5	-19	490	479	0,235
Alien Technology	Higgs-3	2008	96	64	512	27,70-j202,0	-18	-13,5			
Alien Technology	Higgs-4	2012	128	64	128	19,05-j184,2	-19	-16			
Alien Technology	Higgs-9	2019	96	48	688	17,19-j206,6	-20	-18	566	453	0,256
AMS	SL900A	2013	144	80	8416	31-j320	-7		2755	2805	7,728
EM Microelectronic	aura-C	2018	416	48	2048		-18,5	-15,5			
EM Microelectronic	aura-sense	2020	480	96	2048	23,7-j270,4	-20	-13,5	1065	797	0,849
EM Microelectronic	echo	2015	128	96	2080	18,1-j248	-18	-13	853	800	0,682
EM Microelectronic	echo-T	2018	160	96	2080		-18	-13	970	800	0,776
EM Microelectronic	echo-V	2020	480	96	2048	17,6-j273	-20	-14,5	1117	797	0,890
EM Microelectronic	EM4124	2013	96	64	0	22-j261	-19	-8	556	502	0,279
EM Microelectronic	EM4126	2013	208	32	0	22-j261	-19	-8	556	502	0,279
EM Microelectronic	EM4325	2012	352	48	3072	15,2-j159	-8,3	-7	1582	1973	3,121
Impinj	Monza R6	2014	93	48	0	12,17+j120,2	-22,1	-17,3	464,1	400	0,186
Impinj	Monza R6-A	2017	96	96	0	12,17+j120,2	-20	-15,2	464,1	442	0,205
Impinj	Monza R6-B	2018	128	96	0	12,17+j120,2	-20	-15,2	464,1	442	0,205
Impinj	Monza R6-P	2015	128	48	64	12,17+j120,2	-22,1	-17,3	464,1	442	0,205
Impinj	Monza S6-C	2015	96	48	32	12,17+j120,2	-22,1	-17,3	464,1	442	0,205
Impinj	Monza X-2K	2012	128	96	2176	18,69+j171,9	-17	-12	1600	1600	2,560
Impinj	Monza X-8K	2012	128	96	8192	18,69+j171,9	-17	-12	2000	2000	4,000
Impinj	M730	2019	128	96	0	12,34-j170,6	-24	-21	396,7	286,7	0,1137
Impinj	M750	2019	96	96	32	12,34-j170,6	-24	-21	396,7	286,7	0,1137
Impinj	Monza 5	2011	128	48	32	14,7-j162,1	-20	-16	465	465	0,216

¹ La valeur d'impédance du CI est la plus proche de 915 MHz.

Impinj	Monza 4D	2010	128	96	32	11+j143	-19,9	-17,1	590	590	0,348
Impinj	Monza 4E	2010	496	96	128	11+j143	-19,9	-17,1	590	590	0,348
Impinj	Monza 4i	2010	256	96	480	11+j143	-19,9	-17,1	590	590	0,348
Impinj	Monza 4QT	2010	128	96	512	11+j143	-19,9	-17,1	590	590	0,348
NXP	UCODE G2iM/G2iM+	2011	448	96	112	24-j222	-17,5		615	475	0,292
NXP	UCODE G2iL/G2iL+	2010	128	64	0	23-j224	-18		485	435	0,211
NXP	UCODE 7	2013	128	96	0	12,5-j277	-21	-16	490	445	0,218
NXP	UCODE 8/8m	2016	128	96	32	14-j252	-23	-18	465	475	0,221
NXP	UCODE 7m	2014	128	96	32	12,5-j277	-21	-16	490	445	0,218
NXP	UCODE I2C	2011	160	96	3328	12,7-j199	-18	-11	1600	1600	2,560
NXP	UCODE DNA City	2017	224	96	1024		-19	-11			
NXP	UCODE DNA Track	2017	448	96	256	17-j274	-19	-11	585	645	0,377
NXP	UCODE 7xm-1k	2015	448	96	1024	17-j274	-19	-12	570	630	0,359
NXP	UCODE 7xm-2k	2015	448	96	2048	17-j274	-19	-12	570	630	0,359
NXP	UCODE 7xm+	2015	448	96	2048	17-j274	-19	-12	570	630	0,359
Valeur Médiane			128	96	192						
Valeur Moyenne						17-j205	-19	-15			0,873

Chapitre 2 : Conception du capteur RFID et de la solution de lecture associée

SOMMAIRE

Chapitre 2 : Conception du capteur RFID et de la solution de lecture associée.....	77
2.1. Introduction.....	79
2.1.1. Positionnement	79
2.1.2. Contexte	81
2.2. Méthodologie de conception du capteur RFID	82
2.2.1. Propriétés des matériaux	82
2.2.1.1. Permittivité diélectrique.....	83
2.2.1.2. Perméabilité magnétique	85
2.2.1.3. Impédance	86
2.2.1.4. Ligne de transmission.....	87
2.2.2. Corps d'épreuve biosourcé et biodégradable	90
2.2.2.1. Composition des matériaux.....	90
2.2.2.2. Propriétés diélectriques	92
2.2.3. Transducteur à électrodes interdigitées	94
2.2.3.1. Implémentation d'un modèle mathématique.....	94
2.2.3.2. Optimisation du capteur	99
2.2.4. Conception des antennes	99
2.2.4.1. Directivité	100
2.2.4.2. Types.....	102
2.2.4.3. Simulateurs électromagnétiques	103
2.2.5. Adaptation de la puce, de l'antennes et du capteur	110
2.2.6. Perspectives.....	112
2.3. Méthodologie de lecture du capteur RFID	114
2.3.1. Base logicielle	114
2.3.2. Compléments pour la mesure	114
2.4. Conclusion	116
Références.....	117
Annexe 2-A Technology Readiness level	121
Annexe 2-B Mesures des propriétés diélectriques de biopolymères	122

2.1. INTRODUCTION

2.1.1. Positionnement

Pour positionner notre solution par rapport à celles d'autres auteurs, nous présentons, dans le Tableau 2-1, plusieurs solutions de tags-capteurs RAIN pour la mesure de la dégradation ou de la maturation des aliments.

Les solutions capteur RFID utilisant le transfert numérique permettent une plus grande fiabilité de la mesure mais sont souvent plus chères. De plus, le transfert numérique est plus adapté à des solutions dont le capteur peut être réutilisé. C'est le cas pour le projet d'Abdelnour *et al.* qui vise à informer sur le degré de maturation d'un fromage par surveillance de la pression de l'emballage sous vide [1]. En effet, le capteur surveille l'augmentation de la pression fonction de la production de CO₂ par les bactéries. L'application, ici, est de longue durée et est réutilisable sur un autre fromage.

Les solutions numériques sont inadaptées à la mesure irréversible notamment dans le domaine de l'agroalimentaire dans lequel des solutions simples et faibles coûts sont requises.

Les solutions de mesures irréversibles sont quant à elles très intéressantes pour le secteur agro-alimentaire puisqu'elles gardent en mémoire les variations subies sans nécessiter de mesures continues faisant appel à une source d'alimentation constante (source externe ou lecture RFID constante). Comme étudié lors de nos expériences, la température est un facteur clé de la bonne conservation des aliments. La logistique est le secteur principal de la technologie RAIN. Or, au cours de son trajet, l'aliment peut difficilement être suivi sans des solutions coûteuses financièrement et environnementalement. Pour résoudre cela, les projets de Bhattacharyya *et al.* [2], Caizzone *et al.* [3], et Ali Ziai et Batchelor [4] présentent des détecteurs de dépassement de seuil de température irréversibles.

Les solutions nécessitant un contact direct avec l'aliment ou utilisant un corps d'épreuve à base de matériaux non compatibles avec le secteur alimentaire sont à proscrire. En effet, ils risquent de rentrer en conflit avec les normes de sécurité alimentaires. Par exemple, Gonçalves *et al.* utilise l'impression par jet d'encre de nanoparticule d'argent sur un substrat composé d'époxy [5]. Les solvants utilisés peuvent induire des irritations s'ils ne sont pas correctement éliminés. L'utilisation des nanoparticules est sujet à controverse [6] et on préférera faire autrement.

L'aliment peut être exposé à une augmentation d'humidité ou de température que sur un temps très court et ça n'impactera en rien la dégradation alimentaire. Pour mesurer uniquement cette dernière, peu de solutions font appel à des indicateurs plus directs. Seuls le font le projet de Nguyen *et al.* [7], qui lie la permittivité de la viande à son état de dégradation, et le projet européen FlexSMELL [8], qui cible les composés organiques volatiles libérés par l'activité chimique qui accompagne la décomposition [9].

Ainsi, le tag-capteur que nous allons concevoir devra combiner les arguments précédemment cités. Sa fabrication devra être peu coûteuse car il utilisera des éléments d'un tag RAIN conventionnel et son antenne sera fonctionnalisée, constituant un capteur RFID analogique (*cf.* Chapitre 1, 1.3.3. Fonctionnalisation de l'antenne en capteur). Le corps d'épreuve utilisé dans l'antenne devra être peu cher. Avec comme objectif de suivre la dégradation de l'aliment emballé, nous devons veiller à n'utiliser que des composés compatibles avec le contact alimentaire. Afin d'apporter l'information qu'un incident s'est produit en dehors du suivi continu, les mesures de notre tag-capteur devront, si possible, être irréversibles. Enfin, le corps d'épreuve devra cibler un indicateur de la dégradation alimentaire.

MESURANDE CIBLE	TECHNIQUE DE MESURE	CAPTEUR	APPLICATION DEMONTREE	CONTACT AVEC L'ALIMENT	REFERENCE
PRESSION	Transfert numérique	TE MS5837	Maturation du fromage	Oui	Abdelnour <i>et al.</i> [1]
TEMPERATURE	Commutation entre 2 tags	Polymère à mémoire de forme	Dépassement de température	Non	Bhattacharyya <i>et al.</i> [2]
TEMPERATURE	Commutation entre 2 puces	Métal à mémoire de forme	Dépassement de température	Non	Caizzone <i>et al.</i> [3]
TEMPERATURE	Puissance d'activation	Obturation de l'antenne par transition d'état solide/liquide	Dépassement de température	Non	Ali Ziai et Batchelor [4]
TEMPERATURE	Transfert numérique	Capteur de température à « bandgap » sur silicium	-	Non	Kay Law <i>et al.</i> [10]
HUMIDITE	Puissance d'activation	Antenne en nanoparticules d'argent sur liège	-	Oui	Gonçalves <i>et al.</i> [5]
PERMITTIVITE DE LA VIANDE	Puissance d'activation	Antenne sur viande	Dégradation de la viande	Oui	Nguyen <i>et al.</i> [7]
HUMIDITE, COMPOSES ORGANIQUES VOLATILES	Transfert numérique	-	-	Non ²	Projet européen FlexSMELL [8] Kapucu <i>et al.</i> [11]

Tableau 2-1 Comparaison des solutions RAIN pour le suivi des aliments

Afin de répondre aux objectifs multiples du projet GLOPACK, nous avons conçu un tag hybride, supportant les protocoles RAIN et NFC.

Le premier objectif était de satisfaire les besoins logistiques. Cet objectif est adressé par le protocole RAIN. Poussé par l'organisme GS1, l'EPC trouve de plus en plus d'application, en remplacement de l'ancien standard UPC. Contrairement aux anciens codes-barres standardisés par l'UPC, l'identification par EPC se veut plus descriptive allant jusqu'au numéro de série unique pour chaque produit vendu. Ainsi, dans le cadre de produits alimentaires, on pourra stocker des informations comme [12] : le fournisseur, le producteur, la date de production, la date d'expiration, ... Plus la quantité d'information stockée est grande, plus le code résultant va être grand, et plus il y a de risque de détérioration du code visuel. Après une certaine taille, le stockage d'information est plus sûr de façon électronique. Pour cela, GS1 participe à la standardisation de la communication RFID UHF pour l'adapter parfaitement aux besoins logistiques.

Le deuxième objectif est de rendre accessible au consommateur des informations sur le produit qu'il a acheté. À notre connaissance, aucun smartphone commercialisé actuellement et destiné au grand public ne possède de lecteur RAIN. Pour rajouter cette fonctionnalité, il faut ajouter un module externe souvent encombrant et cher. La lecture RAIN ne s'adresse donc pas au consommateur. Afin de lui rendre accessible des informations dynamiques sur le produit et toujours sans nécessiter de batterie, nous utilisons la technologie NFC. Pour simplifier l'encodage des informations, le tag nécessitera

² Le polymère sensible doit être à l'intérieur de l'emballage alimentaire

seulement une puce, la EM4423 de EM Microelectronics. Sa mémoire peut être rendue accessible depuis les 2 technologies de communication.

Enfin, le troisième objectif, et principal pour ce travail, était d'ajouter la capacité de suivre l'évolution d'un mesurande type de la dégradation d'un aliment dans un emballage fermé. Afin de promouvoir l'usage d'un tel tag, l'ajout de cette fonctionnalité devra induire un minimum de surcoût. Pour cela, nous utilisons des produits habituellement peu valorisés de l'industrie alimentaire. De plus, ceux-ci sont biosourcés et biodégradables. Afin de capter leur variation de permittivité en fonction de grandeurs environnementales, nous utilisons la capacité interdigitée. Toujours afin de réduire le coût, le tag n'a aucune fonction numérique pour présenter la mesure au lecteur. La capacité interdigitée est intégrée à l'antenne et sa valeur d'impédance contribue à l'atténuation de l'antenne. Nous récupérerons les mesures grâce aux variations de gain de l'antenne dues aux mesurandes.

2.1.2. Contexte

Comme étudié dans les travaux de thèse précédents [13], [14], l'ajout d'une fonction capteur aux tags RFID peut être réalisée sans ajouter des fonctionnalités de détection au circuit intégré, mais seulement avec une conception d'antenne originale. Cela réduit la consommation électrique du circuit intégré, donc, la puissance d'activation du tag complet, et augmente ainsi sa distance de lecture maximale. L'utilisation d'une modulation analogique réduit également le coût du transpondeur final. Cependant, l'ajout d'une fonction capteur dans le circuit de l'antenne peut avoir des inconvénients sur son efficacité à transmettre des informations numériques et à se conformer aux normes.

Pour résoudre cela, plusieurs travaux de thèse se sont succédé concernant la conception d'un capteur RFID.

Fabien Bibi commença par étudier les propriétés diélectriques du gluten de blé (biopolymère biosourcé) vis-à-vis de grandeurs physiques tels que la température, l'humidité, ou encore, la présence de composés organiques volatiles [13]. Comme illustré dans la Figure 2-1 (gauche), il enduit ensuite (en jaune) la zone sensible d'un tag RFID UHF fabriqué par Tagueos (aluminium sur papier). Ce dernier est modifié et comporte une antenne « à fente » dont une partie est composée d'une succession de connecteurs parallèles. Ces connecteurs se comportent entre eux comme des capacités, ils convertissent les propriétés diélectriques du gluten en propriétés électriques qui modulent l'atténuation de l'antenne.

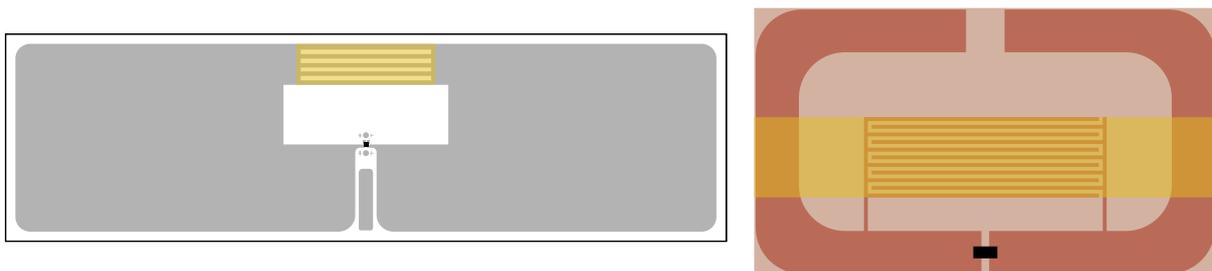


Figure 2-1 Évolution des prototypes de capteur RFID (taille réelle)

Par la suite, Yassin Belaizi améliore la conception en utilisant comme transducteur une capacité interdigitée connectée à l'antenne [14], comme l'indique la Figure 2-1 (droite). Séparer le transducteur du corps de l'antenne permettait d'optimiser plus facilement, à la fois, le gain de l'antenne et la sensibilité de la mesure. Pour ce travail de thèse, l'antenne du capteur RFID final est composée de cuivre sur un substrat de polyimide. L'atténuation de l'antenne dépend de l'épaisseur du corps d'épreuve et les dimensions de l'antenne. La stabilité de ces dernières valeurs est difficile et impacte la chaîne de mesure (Figure 2-2). Aussi, pour retrouver la valeur de l'humidité au niveau du lecteur RFID, Yassin Belaizi avait développé une nouvelle technique de calibration. Dans un environnement

stable (température contrôlée, distance entre lecteur et capteur fixe, ...), il stockait quelques points de puissance d'activation de manière compressée dans la mémoire du tag-capteur RFID. Lors de la mesure par un même appareillage, le lecteur comparait la nouvelle puissance d'activation avec les points de calibration. La mesure était donc indépendante des liaisons avec des bases de données externes.

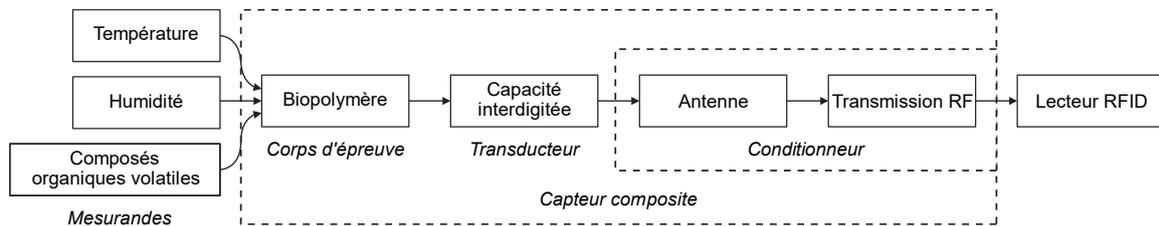


Figure 2-2 Chaîne de mesure

Pour économiser le temps et le coût de développement, un des objectifs de cette thèse est d'harmoniser les solutions autour de la meilleure solution. Pour concevoir le tag-capteur, nous suivons la chaîne de mesure présentée en Figure 2-2.

Afin de répondre aux besoins d'utiliser des matériaux peu coûteux et compatibles avec le secteur alimentaire, un matériau peu valorisé et issu de la transformation alimentaire est utilisé dans notre conception. Ainsi, dans ce travail de thèse, nous avons exploré les propriétés sensibles de plusieurs biopolymères.

Pour respecter le fonctionnement irréversible cité dans notre positionnement, les tags-capteurs sont la partie consommable de notre solution. Les solutions de mesure utilisant la transmission numérique sont donc à éviter, car elles introduiraient un coût récurrent et trop grand. Comme illustré dans la Figure 2-2, cela se fera en liant le transducteur, le circuit d'adaptation de l'antenne, et la puce de communication RAIN. Puisque les corps d'épreuve sont des biopolymères qui modulent principalement leurs propriétés diélectriques, le capteur doit être de type capacitif. Pour assurer une fabrication classique de tag RFID, il faut opter pour un design planaire. Pour cela, nous présenterons une conception adaptée.

Nous aborderons également une amélioration possible du capteur visant à séparer l'antenne du capteur. Le but étant d'assurer un fonctionnement indépendant des 2 parties : l'antenne principale permettant la communication numérique, et la boucle magnétique permettant la mesure.

Il est difficile de récupérer des mesures fiables à partir d'une transmission analogique. Quelques méthodes permettent d'y parvenir (balayage de fréquence, puissance d'allumage, AID et estimation de la distance). Pour faciliter le développement et suivre les changements futurs, une interface de programmation dédiée à la mesure RFID est construite, et les méthodes citées y sont intégrées.

Nous utilisons le TRL (cf. Annexe 2-A) pour définir le développement du tag-capteur RAIN. En considérant comme objectif le suivi des aliments par le capteur RFID, la thèse de Fabien Bibi, constitue un TRL de 2, et celle de Yassin Belaizi constitue un TRL de 4. Dans ce travail de thèse, un TRL de 7 est visé.

2.2. METHODOLOGIE DE CONCEPTION DU CAPTEUR RFID

2.2.1. Propriétés des matériaux

Pour concevoir une communication sans-fil efficace comme celle d'un capteur RFID, des bases théoriques sont essentielles. Le PEC (Conducteur Électrique Parfait) ou l'isolateur parfait ne font pas partie des matériaux du monde réel. Les matériaux réels sont définis par leur capacité à transmettre et à absorber les champs EMs (ÉlectroMagnétiques). Comme défini par l'Équations 2-1 a. et l'Équations 2-1 b., les champs EMs sont le résultat de changements dans les champs électriques ou magnétiques.

Ainsi, pour mieux comprendre la propagation des champs EM dans un milieu, nous présenterons les propriétés électriques et magnétiques des matériaux. Enfin, nous présenterons l'abstraction faite sur ces propriétés lors de la combinaison de plusieurs composants, l'impédance.

Nous avons toujours été fascinés par l'électricité grâce à des interactions macroscopiques mais invisibles, et ce, depuis la démonstration du phénomène électrostatique par Thalès (600 avant J.-C.) [15]. Pourtant, il a fallu plus de 24 siècles pour commencer à comprendre ces phénomènes et à les formuler sous la forme d'équations. Ces équations ont été formulées par Maxwell [2], en se basant sur les recherches scientifiques effectuées par des pairs comme Michel Faraday (Équations 2-1 a.), André-Marie Ampère (Équations 2-1 b.), Carl Friedrich Gauss (Équations 2-1 c.) et William Thomson (connu sous le nom de baron Kelvin) (Équations 2-1 d.)...

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \text{a.}$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad \text{b.}$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad \text{c.}$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad \text{d.}$$

∇ = nabra, \cdot = produit scalaire, \times = produit vectoriel, $\vec{}$ = vecteur,
 \vec{E} = champ électrique [V/m], \vec{B} = induction magnétique [T], \vec{H} = champ magnétique [A/m],
 \vec{j} = densité de courant [A/m], \vec{D} = induction électrique [C/m],
 ρ = densité de charge électrique [C/m³]

Équations 2-1 Équations de Maxwell

2.2.1.1. Permittivité diélectrique

Comme le montre l'Équation 2-2, lorsque le vecteur champ électrique est appliqué à une région spécifique de l'espace, il accélère toutes les charges électriques présentes. Tout d'abord, le champ électrique doit surmonter la polarisation des charges, si elle est présente.

$$\vec{D} = \varepsilon \cdot \vec{E} + \vec{P}$$

ε = permittivité complexe [F/m], \vec{P} = champ de polarisation [C/m²]

Équation 2-2 Champ de déplacement

La permittivité est appliquée comme un gain au champ électrique dans le champ de déplacement. Plus la permittivité est grande, plus le déplacement de la charge est important. La permittivité se compose d'une partie réelle et d'une partie imaginaire. La partie réelle est directement liée à l'action du champ de déplacement.

$$\varepsilon = \varepsilon' + j \cdot \varepsilon''$$

ε' = permittivité réelle (or permittivité dielectrique)

ε'' = permittivité imaginaire (ou perte diélectrique)

Équation 2-3 Permittivité complexe

La partie imaginaire est liée au retard de phase entre le champ électrique et le déplacement. Le déplacement des charges n'est pas immédiat et provoque le mouvement des structures. Ces mouvements produisent de la chaleur, et donc une perte d'énergie pour le déplacement. Cette perte est souvent nommée « tangente de perte » (cf. Équation 2-4).

$$\tan \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'}$$

Équation 2-4 Tangente de perte diélectrique

Comme le montre la Figure 2-3, plus la tangente de perte est grande, plus l'énergie est gaspillée.

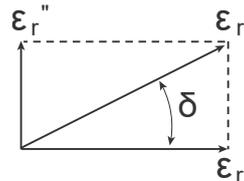


Figure 2-3 Permittivité diélectrique complexe [19].

En spectroscopie diélectrique, les propriétés diélectriques des matériaux sont étudiées en fonction de la fréquence du champ électrique. Différentes interactions se produisent dans l'échantillon avec la fréquence, comme le montre la Figure 2-4. En augmentant la fréquence de variation du champ électrique, celui-ci ne va pas mobiliser tout l'échantillon de manière synchrone. Cela est dû au déplacement de l'onde dans l'espace qui ne peut imposer la même polarisation que pour une petite partie de l'espace.

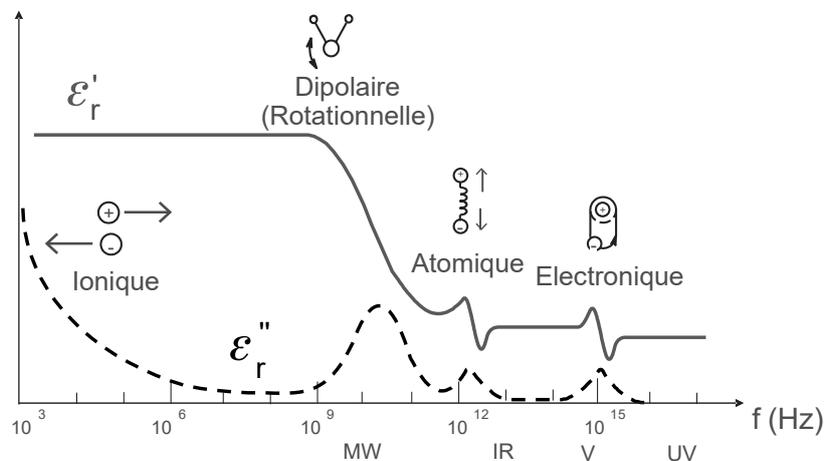


Figure 2-4 Spectroscopie diélectriques [19].

À basse fréquence jusqu'au mégahertz, les variations sinusoïdales du champ électrique sont suffisamment lentes pour mobiliser la polarisation ionique (ou interfaciale) [17]. Les charges se rassemblent autour des interfaces du milieu pour compenser le champ électrique, c'est-à-dire des charges négatives près de l'électrode positive et des charges positives près de l'électrode négative. Autour du mégahertz jusqu'au gigahertz, les champs électriques mobilisent le moment dipolaire des molécules. En fonction de leur structure, les molécules peuvent présenter un moment dipolaire. Un exemple est la molécule d'eau où un atome d'oxygène est lié à deux atomes d'hydrogène. En raison de la grande électronégativité de l'oxygène (c'est-à-dire qu'il attire les électrons) par rapport à l'hydrogène, le nuage électronique est décalé près de l'atome d'oxygène. Les charges dans la molécule

ne sont pas réparties de manière égale. Dans le cas d'un vecteur champ électrique appliqué à une molécule dipolaire, cette dernière tourne pour compenser le vecteur.

Avec l'augmentation de la fréquence, il s'ensuit la mobilisation atomique qui fait également intervenir l'électronégativité. Dans ce mécanisme, la liaison entre les atomes est étirée, suivant leur électronégativité, par la variation du champ électrique.

Les électrons forment un nuage autour des atomes. Pour compenser le déplacement des charges voisines dû au champ électrique, le nuage est déformé, et donc, la probabilité de présence des électrons est inclinée vers l'électrode positive.

Lorsque la fréquence est trop élevée pour l'interaction (par exemple, ionique, dipolaire, atomique ou électronique) ou lorsque l'interaction est retenue par d'autres objets immédiats, elle ne peut suivre le rythme des variations du champ électrique. Cela entraîne un déphasage continu croissant entre l'interaction et le champ électrique. Celui-ci est donc converti en mouvements aléatoires incomplets, c'est-à-dire en chaleur, et transféré à d'autres objets immédiats. C'est ce qu'on appelle la "perte" diélectrique et c'est la partie imaginaire de la permittivité complexe. Ce phénomène est utilisé quotidiennement dans les fours à micro-ondes. Le mécanisme dipolaire de l'eau est excité à 2,4 GHz où la perte présente un pic.

Comme les valeurs de permittivité et de perméabilité des matériaux sont souvent comparées à celles de l'espace libre, leurs équivalents relatifs sont utilisés (cf. Équations 2-5).

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_0} \quad \& \quad \mu = \frac{\mu_r}{\mu_0}$$

ε_r = valeur relative dans le matériau, μ_0 = valeur absolue pour le vide

Équations 2-5 Valeurs relatives de la permittivité et de la perméabilité

Pour un matériau classique, ε_r ne peut être inférieur à 1.

Lorsque plusieurs matériaux ayant des propriétés diélectriques différentes sont combinés, leur permittivité peut également être combinée pour construire un matériau virtuel avec une permittivité composite.

2.2.1.2. Perméabilité magnétique

Comme l'indique l'Équation 2-6, les vecteurs de champ magnétique ou d'aimantation rémanente provoquent dans la matière une induction magnétique qui est linéaire avec la perméabilité.

$$\vec{B} = \mu \cdot (\vec{H} + \vec{M})$$

μ = perméabilité complexe [H/m], \vec{M} = aimantation [A/m]

Équation 2-6 Flux magnétique

Comme la permittivité diélectrique, la perméabilité magnétique se compose d'une partie réelle et d'une partie imaginaire. Et la partie imaginaire est toujours liée aux pertes.

$$\mu = \mu' + j \cdot \mu''$$

μ' = perméabilité réelle (or perméabilité magnétique), μ'' = perméabilité imaginaire

Équation 2-7 Perméabilité complexe

Chaque milieu contient des dipôles magnétiques. La plupart des dipôles magnétiques peuvent être représentés comme une boucle de courant dans le matériau. Leur perméabilité magnétique décrit alors la facilité avec laquelle le flux magnétique oriente ces dipôles avec le champ magnétique.

La perméabilité magnétique d'un matériau peut être inférieure à la perméabilité du vide. Dans ce cas, le matériau est qualifié de diamagnétique et il repousse le flux magnétique, comme le montre la Figure 2-5. Au contraire, quand la perméabilité d'un matériau est supérieure à celle du vide, le matériau concentre le flux magnétique. Dans ce cas, le matériau est dit paramagnétique. Et, dans le cas d'une très forte perméabilité, on parle de matériaux ferromagnétiques.

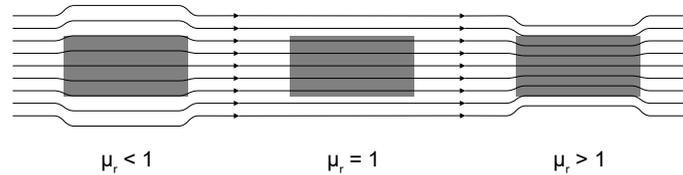


Figure 2-5 Perméabilité magnétique des matériaux

Pour améliorer les performances des antennes, on peut utiliser des milieux de perméabilité différentes. Ceux-ci forcent le champ magnétique incident à se concentrer sur une partie spécifique de l'antenne.

2.2.1.3. Impédance

En électronique, les vecteurs de champ EM sont remplacés par des vecteurs de tension et de courant. Ces deux grandeurs sont liées à l'impédance, et donc à la facilité de circulation des ondes électromagnétiques dans un milieu. Plus la tension est élevée et moins le courant est important, plus l'impédance est élevée.

$$Z = \frac{\vec{V}}{\vec{I}} = R + j \cdot X = \frac{1}{Y} = \frac{1}{G + j \cdot B}$$

Z = impédance [Ω], V = tension [V], I = courant [A], R = résistance, X = reactance,
 Y = admittance [S], G = conductance, B = susceptance

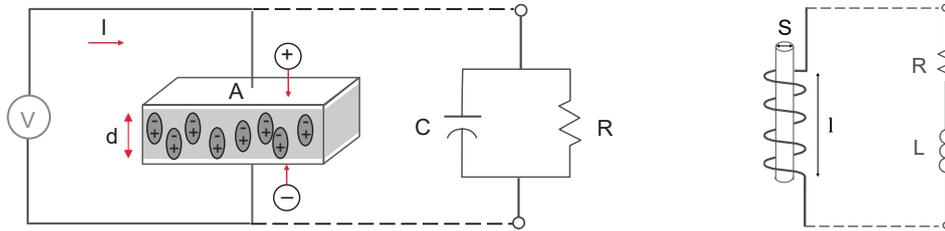
Équation 2-8 Impédance

En électronique, les impédances permettent d'abstraire les propriétés des matériaux. Les matériaux diélectriques sont remplacés par des condensateurs, et les matériaux magnétiques, par des inductances. Et les résistances sont liées aux pertes dans les matériaux. Un composant est toujours modélisé par plusieurs éléments de base. Si une contribution est négligeable (par exemple, l'induction magnétique), le composant électrique correspondant est supprimé du modèle (par exemple, l'inductance). Un composant linéaire est défini par une relation linéaire entre le courant et la puissance. Comme l'indique le Tableau 2-2, les composants simples sont linéaires car leur impédance est simplement définie par la permittivité diélectrique et la perméabilité magnétique (cf. Équations 2-9).

Composant	Impédance
Résistance	R
Inductance	$j \cdot L \cdot \omega$
Condensateur	$\frac{1}{j \cdot C \cdot \omega} = -\frac{j}{C \cdot \omega}$

Tableau 2-2 Impédance des composants passifs classiques

En fonction de leur géométrie, le condensateur et l'inductance sont modélisés à l'aide d'équations différentes. Un exemple classique est donné par les Équations 2-9 sur les composants présentés en Figures 2-6.



Figures 2-6 Condensateur (à gauche) et inductance (à droite) [19].

$$C = \frac{\epsilon \cdot A}{d} \quad L = \frac{\mu \cdot N^2 \cdot S}{l}$$

C = capacité [F], A = surface commune des électrodes, d = distance entre les électrodes,
 L = inductance [H], N = nombre de boucles, S = surface de base du coeur magnétique,
 l = longueur commune aux boucles et au coeur magnétique

Équations 2-9 Condensateur planaire (avec $d \ll A$, gauche) et bobine avec noyau magnétique (droite)

Un autre exemple est la ligne micro-ruban, bien adaptée à la fabrication coplanaire utilisée pour les étiquettes RFID. Il s'agit d'une piste de circuit électronique de base. Une ligne micro-ruban est un conducteur sur un substrat diélectrique recouvert d'un conducteur sur l'autre face, comme le décrit la Figure 2-7. Pour construire un circuit radiofréquence à partir de cette ligne, la permittivité diélectrique effective peut être calculée à l'aide de l'Équation 2-10 [18]. Sur la base de l'Équation 2-10, l'impédance de la ligne micro-ruban est calculée avec l'Équation 2-11.

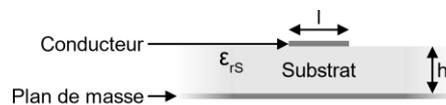


Figure 2-7 Ligne micro-ruban

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_{rs} + 1}{2} + \frac{\epsilon_{rs} - 1}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{1 + 12 \frac{h}{l}}} + 0,04 \left(1 - \frac{l}{h}\right)^2 \right)$$

ϵ_{eff} = permittivité effective relative, ϵ_{rs} = permittivité relative de substrat,
 h = épaisseur du substrat, l = largeur de la piste

Équation 2-10 Permittivité diélectrique effective de la ligne micro-ruban (pour $\frac{l}{h} < 1$)

$$Z = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \ln \left(\frac{8h}{l} + \frac{l}{4h} \right)$$

Équation 2-11 Impédance de la ligne micro-ruban [19]

2.2.1.4. Ligne de transmission

Un circuit électronique, tels que ceux utilisés pour modéliser la liaison entre l'émission RF à une antenne, fait appel à plusieurs composants possédant chacun une valeur d'impédance. Cells-ci peut être combinée pour représenter un élément du circuit (puce, câblage, antenne, ...). Un élément est

représenté sous forme de matrice afin de combiner toutes les caractéristiques de ses ports dans un objet mathématique. Un port est défini entre un connecteur et la masse. Ainsi, un composant électronique a un ou plusieurs ports, et les ports sont généralement nommés par des numéros. Chaque port est lié aux autres par un rapport de puissance transmise (ce rapport peut également être nul). Ce rapport est appelé « paramètre S » (Scattering, en anglais) et est désigné comme la lettre S. Par exemple, le rapport de la puissance transmise du port 1 au port 2 est désigné par S_{12} . Un autre exemple, pour désigner le coefficient de réflexion du port 1, comme les ports d'entrée et de sortie sont identiques, on note S_{11} . La matrice combinant tous les ports du composant est appelée « matrice S ».

$$\begin{bmatrix} S_{11} & \cdots & S_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{m1} & \cdots & S_{mn} \end{bmatrix}$$

Equation 2-12 Matrice S

Comme les paramètres S de la plupart des dispositifs résonnants se comportent de manière exponentielle avec la fréquence, ils sont souvent exprimés en décibels. Une conversion par une fonction logarithmique est alors nécessaire pour continuer à utiliser une échelle linéaire. Comme indiqué par l'Équation 2-13, un gain en puissance de 1000 correspond à 30 dB, par exemple.

$$x[dB] = 10 \cdot \log x$$

Équation 2-13 Conversion en décibels

Pour traiter les valeurs qui ont une unité, il existe des variantes du décibel (par exemple, le décibel-milliwatt (dBm) qui fait le ratio entre une valeur de puissance et 1 mW).

Lorsque deux ports connectés n'ont pas la même impédance, le signal électrique subit une réflexion. Cela s'explique par le théorème du transfert de puissance maximum, également appelé « loi de Jacobi ». Pour maximiser le transfert de puissance, cette loi stipule que la source doit avoir la même impédance que le composant connecté.

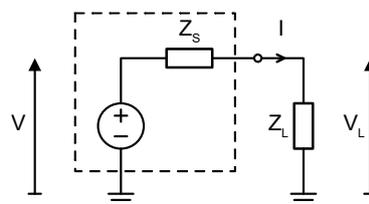


Figure 2-8 Générateur chargé

$$P_L = V_L \cdot I = \frac{Z_L}{Z_S + Z_L} \cdot \frac{V}{Z_S + Z_L} = \frac{Z_L}{(Z_S + Z_L)^2} V^2$$

P = puissance [w], V = tension [V], I = intensité [A],
 $_S$ = valeur pour la source, $_L$ = valeur pour la charge

Équation 2-14 Transfert de puissance maximale vers la charge

Comme le montrent la Figure 2-8 et l'Équation 2-14, la charge reçoit la puissance maximale lorsqu'elle est égale à l'impédance de la source. Plus l'impédance de la source et de la charge est petite, plus la puissance transférée est élevée. Mais il s'agit toujours d'une fraction de la puissance de la source (divisée par 2 au maximum).

Pour ce qui est de la compensation des composantes imaginaires d'impédance, l'adaptation « conjugué complexe » sera utilisée. En effet, les valeurs de ces composantes sont naturellement négatives ou positives. Par exemple, une inductance sera compensée par un condensateur ayant la même valeur absolue d'impédance.

L'IBIS Open Forum réunit des industriels de l'électronique pour standardiser les formats d'échanges. Ils ont créé le format de fichier « Touchstone » qui stocke les caractéristiques d'impédance des composants électroniques linéaires par fréquences [20]. Il s'agit d'un fichier texte brut qui doit respecter un format spécifique. Chaque valeur est séparée des autres par un espace. La première ligne doit être la « ligne d'option » qui commence par un caractère dièse et qui spécifie les unités. La première est l'unité de fréquence avec les valeurs autorisées sont : Hz, kHz, MHz et GHz. La deuxième est le type de paramètres utilisés. Pour notre besoin, seuls les paramètres de diffusion (S), d'admittance (Y) ou d'impédance (Z) sont utilisés. Le troisième spécifie le format des valeurs utilisées. Pour notre besoin, seuls les formats magnitude-angle (MA) et réel-imaginaire (RI) sont utilisés. Le dernier paramètre définit la résistance connectée au composant mesurée. Les lignes suivantes montrent les valeurs mesurées en fonction de l'ordre du format défini (par exemple, RI définit que la valeur réelle est suivie de la valeur imaginaire). La valeur de fréquence précède toujours les autres. Selon le nombre de ports définis dans l'extension du fichier (par exemple, S2P pour un composant à 2 ports), l'organisation des valeurs mesurées sera différente.

```

! UCODE_7
# MHz Z RI R 100
866 0.145 -2.93
915 0.125 -2.77
960 0.125 -2.67
    
```

Figure 2-9 Fichier Touchstone pour un port (par exemple, NXP UCODE 7)

Dans l'exemple de la Figure 2-9, l'impédance d'une puce est mesurée pour 3 fréquences adaptées à la communication RAIN. Pour la puce, l'appareil de mesure apparaît comme une résistance de 100 Ω.

Pour calculer le comportement d'un circuit électronique, on peut utiliser la « méthode des nœuds ». Elle est basée sur les lois de Kirchhoff qui stipulent que :

- La somme du courant des entrées et des sorties d'une jonction doit être égale à zéro,
- Et la somme des tensions d'une connexion en boucle doit être égale à zéro.

Comme dans l'Équation 2-15, le résultat est une équation matricielle combinant les admittances de tous les composants ainsi que leur tension et leur courant. Si aucun composant n'est lié à une tension et un courant spécifique, les admittances sont nulles.

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & \dots & Y_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_1 \\ \vdots \\ i_n \end{bmatrix}$$

Équation 2-15 Analyse des nœuds

L'implémentation logicielle la plus célèbre de l'analyse des nœuds est SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) et la plupart des simulateurs de circuits électroniques sont basés sur lui. En avril 1973, ce simulateur a été lancé par le département EECS (Electrical Engineering and Computer Sciences) de l'Université de Californie [21]. Aujourd'hui, toutes les solutions commerciales d'outils de simulation de circuits électroniques intègrent le support des fichiers Touchstone.

Des conversions entre les différentes matrices S, Y, et Z existent et sont devenues transparentes pour les logiciels de simulation [22]. Bien qu'ils soient compatibles avec une admittance complexe, ils ne sont pas appropriés à l'analyse du courant alternatif à hautes fréquences car ils ne prennent pas en

compte les interactions sans fil [23]. L'analyse des nœuds doit être utilisée uniquement dans le premier concept et le circuit résultant doit ensuite être modélisé à l'aide de simulateurs EM.

2.2.2. Corps d'épreuve biosourcé et biodégradable

Les propriétés diélectriques de certains matériaux peuvent alors être utilisées pour détecter des variables environnementales (par exemple, la température, l'humidité, le contenu gazeux, ...) avec des composants électroniques passifs [24].

Pour réduire le coût financier et environnemental, le tag-capteur utilise des matériaux biosourcés et biodégradables qui sont des sous-produits de l'industrie agro-alimentaire, peu souvent mis en valeur, donc peu cher. Les matériaux que nous avons sélectionnés utilisent peu de traitements chimiques dans leur production. Par cette nature, les matériaux utilisés sont intrinsèquement compatibles pour une utilisation dans l'emballage alimentaire.

Issus de l'association de protéines, les matériaux sélectionnés sont des « biopolymères ». Un polymère consiste en un motif répétitif de molécules. Et, ces matériaux créent des liaisons entre les différentes protéines qu'ils les composent.

Ainsi, le gluten, le caséinate de sodium, la gélatine et l'isolat de protéines de soja sont étudiées pour leurs sensibilités aux variables environnementales.

2.2.2.1. Composition des matériaux

Les 4 biopolymères choisis sont composés de protéines qui elles-mêmes sont composées d'acides aminés. Les acides aminés sont une base de la vie sur terre et sont partagés par tous les êtres vivants sur la planète. Ce sont des molécules organiques possédant un groupe carboxyle (-COOH) et un groupe amine (-NH₂ ou -NH-).

Les différentes protéines sont fabriquées par un « ribosome », présent dans les cellules, qui interprète un code ARN (acide ribonucléique) messenger. La suite spécifique du code va ainsi définir l'enchaînement des acides aminés le long de la chaîne protéique formant la structure primaire d'une protéine.

Suivant leur nature et leur ordre d'apparition, les acides aminés vont se structurer différemment pour former la structure secondaire et tertiaire de la protéine. Une liaison faible peut intervenir entre 2 atomes hydrogènes de 2 acides aminés. Un pont disulfure peut aussi apparaître entre 2 résidus de cystéine, grâce à l'oxydation des groupes thiols (-SH) qu'elles contiennent. Des interactions diélectriques peuvent aussi intervenir pour établir la structure finale de la protéine. De leur structure va dépendre les propriétés physiques du matériau résultant. En comparant les compositions en acides aminés dans le Tableau 2-3, on déduit que le gluten est beaucoup plus à même de former des ponts disulfures que les autres protéines utilisées.

ACIDE AMINE (%)	GLUTEN	PROTEINES DE SOJA ISOLEES	CASEINATE	GELATINE
ALANINE	1,8	2,8	2,6	9,5
ARGININE	2,4	4,8	2,9	8,5
ACIDE ASPARTIQUE	-	-	-	6,5
CYSTEINE	0,7	0,2	0,1	-
ACIDE GLUTAMIQUE	26,9	12,4	16	11,5
GLYCINE	2,4	2,7	1,5	28,5
HISTIDINE	1,4	1,5	2,2	0,9
ISOLEUCINE	2	1,9	3	1,7
LEUCINE	5	5	7,8	3,3
LYSINE	1,1	3,4	5,9	4,5
METHIONINE	0,7	0,3	2,2	0,9
PHENYLALANINE	3,7	3,2	4,2	2,5
PROLINE	8,8	3,3	8,7	16,5
SERINE	3,5	3,4	4,2	3,6
THREONINE	1,8	2,3	3,5	2,3

TYROSINE	2,4	2,2	4,4	0,6
VALINE	2,3	2,2	3,8	3

Tableau 2-3 Acides aminés composant les biopolymères de gluten, soja, caséinate [25], et gélatine [26]

Le gluten est insoluble dans l'eau, il peut donc être extrait de la farine de blé quand elle est lavée de ses autres composés avec de l'eau. Il représente un peu plus de 7 % de la farine [27] et est principalement composé de protéines ($\approx 80\%$, dépendamment du lavage), de lipides, et d'amidon ou d'autres saccharides [28]. Sous forme de gel, le gluten forme un réseau tridimensionnel, et apparait comme un hétéropolymère construit à partir de multiples protéines (ω -, α/β -, et γ -gliadine, et gluténines [28]) liées entre elles comme l'illustre la Figure 2-10. Les ratios entre ces protéines vont dépendre de la variété des blés dont est extrait le gluten et de leurs conditions de culture. Les longues chaînes que forment les gluténines rendent le matériau plus rigide. Les gliadines vont pouvoir plus facilement rompre leurs liaisons en cas de déformation du matériau et apporter de la plasticité au gluten. Ces variations dans la composition du gluten peuvent induire des variations dans les propriétés du matériau final pour notre application.

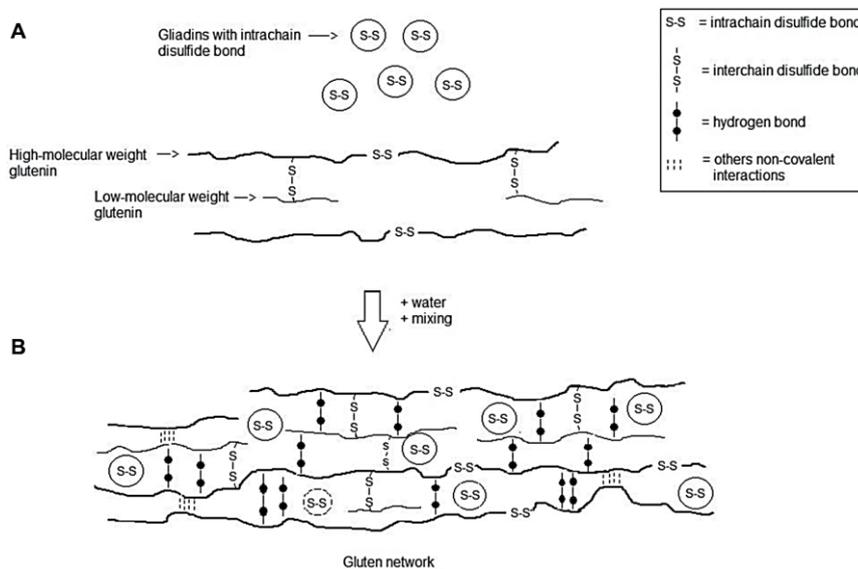


Figure 2-10 Formation d'un matériau tridimensionnel à partir du gluten [29]

Le soja est constitué de 38 % de protéines, 18 % d'huile, 14 % d'eau, et 15 % de saccharides (amidon, sucre, ...) [30]. Par un processus de lavage similaire au gluten, les protéines sont séparées avec les saccharides de la farine de soja. Par la suite, un abaissement du pH fait précipiter les protéines qui peuvent alors être séparées mécaniquement des saccharides [30]. L'isolat de protéines de soja ainsi obtenu est constitué à 90 % d'un mélange de glycinine et de β -conglycinine [31]. Suivant la variété du soja, la β -conglycinine peut former des ponts disulfures car elle contient quelques résidus cystéine. La glycinine quant à elle, est un complexe protéique formé par 6 unités, toutes liées par des ponts disulfures.

La gélatine est fabriquée à partir du collagène des tissus conjonctifs d'animaux, notamment la peau et les os. Aujourd'hui, elle est principalement extraite de peaux de porc [32]. Le processus complet d'extraction se compte en semaines [32]. Les tissus sont plongés dans un bain d'acide pour en séparer le collagène puis dans une solution basique pour neutraliser le pH. La dernière étape consiste en une hydrolyse à haute température ($< 100\text{ }^\circ\text{C}$) afin de dénaturer le collagène (séparer les différentes protéines) et rendre ainsi le produit plus souple. En fin de traitement, le collagène s'est séparé en plusieurs peptides (chaînes d'acides aminés) dont certains reste assembler grâce à des liaisons

covalentes [32]. Ainsi, l'origine du collagène et son extraction ont un impact sur la composition de la gélatine. La structure du matériau final est « thermoréversible » [32]. À haute température, les différentes protéines composant le matériau ont tendance à se séparer donnant une texture liquide. Tandis qu'à basse température, elles vont former des structures en hélices, et vont induire la formation d'un gel. La température de transition entre l'état liquide et solide est peu élevée (aux alentours de 36 °C, pour les gélatines à base de tissus de mammifères [32]), et va impliquer des plus forts changements dans la structure du matériaux avec la température. Les propriétés mécaniques du matériau à base de gélatine évoluent donc grandement avec la température.

La caséine est un mélange de protéines extraites du lait dont elle représente 2,7 % (pour un lait entier de vache) [33]. Elle est composée de plusieurs protéines α_{s1} , α_{s2} , β , et κ dans des proportions respectives 40:10:40:10 [33]. Comme décrit dans la Figure 2-11, les protéines formant la caséine s'agglomèrent autour des molécules de phosphate de calcium. En effet, elles sont composées de plusieurs enchaînements d'acides aminés qui se lient très facilement avec le phosphate de calcium. La structure est ensuite fermée par l'agglomération de κ -caséine qui interagit moins avec le phosphate de calcium. L'ensemble constitue une micelle transportant une majorité d'atomes de calcium et de phosphore tout en restant suffisamment légère pour rester en suspension dans l'eau et ainsi former le lait.

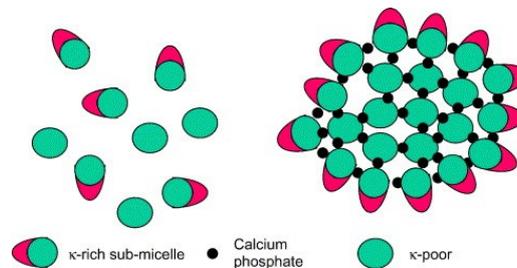


Figure 2-11 Formation de la micelle de caséine [34]

2.2.2.2. Propriétés diélectriques

Le gluten de blé a été choisi pour le travail présenté en raison des nombreux travaux précédents réalisés sur ce matériau. Le gluten est utilisé comme corps d'épreuve pour la concentration en CO_2 , dans les emballages, et en présence d'aliments. Néanmoins, il est mal assimilé par certaines personnes en cas d'ingestion, et donc, a mauvaise presse [35]. Pour pallier ce problème, d'autres matériaux ont été étudiés pour un remplacement. Dans le cadre de cette thèse, nous nous servons des conclusions sur le gluten étudié lors de la thèse de Fabien Bibi [13].

La valeur de la permittivité de ce matériau est sensible à la température. En effet, en augmentant cette dernière, cela entraîne une mobilité accrue des molécules. De plus, les biopolymères se rapprochent de leur température de transition vitreuse, et impacte le comportement ionique de la permittivité [36]. La sensibilité à la température s'explique aussi par la présence d'eau résiduelle due à la préparation du gel de biopolymère. En effet, la permittivité de l'eau est fortement dépendante de la température [37]. La présence d'eau ou de plastifiants entraîne un abaissement de la température de transition vitreuse, et mène à l'augmentation de la permittivité.

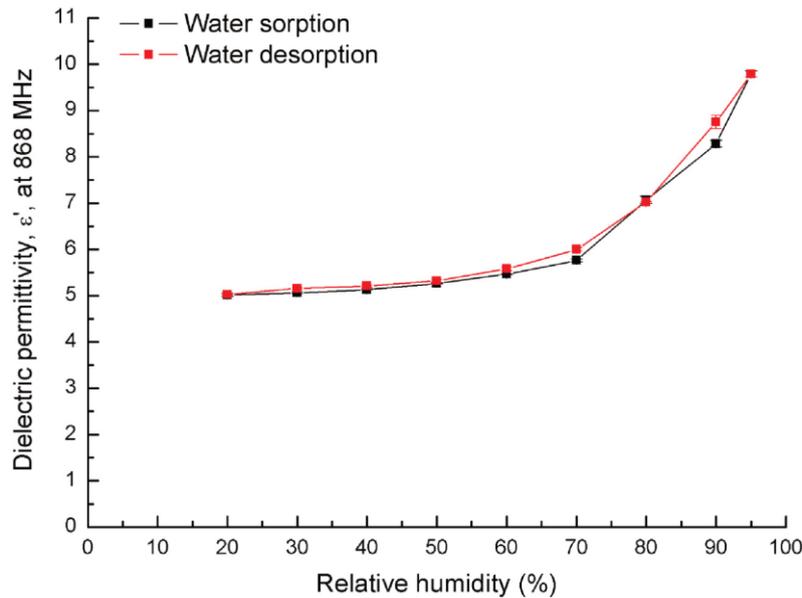


Figure 2-12 Permittivité réelle relative du gluten de blé à l'humidité [38]

La sensibilité de la permittivité des biopolymères à l'humidité est principalement due à la variation de la température de transition vitreuse, et à la variation de la mobilité des charges. Ici encore, la sensibilité en humidité de la permittivité des biopolymères va être due à cette présence d'eau. En de faible quantité, l'eau pourrait interagir plus fortement avec des sites de liaison disponibles du matériau [36], et ainsi être moins disponible pour des sollicitations diélectriques extérieures. À partir de 90 % HR, l'eau apportée par l'humidité ne va plus se lier avec le matériau, et va pouvoir restaurer son comportement habituel face aux champs électriques. Comme le montre la Figure 2-12, la sensibilité à l'humidité n'a pas un comportement linéaire.

Le gonflement du polymère en présence d'humidité permet également d'observer d'autres variables environnementales dont la présence de dioxyde de carbone (CO₂). Lorsque le CO₂ est dissout dans l'eau, il se retrouve à l'équilibre entre sa forme dissoute et l'ion bicarbonate (Équation 2-16). La libération du proton (noté H⁺) entraîne une acidification du milieu. En utilisant un matériau dont le point isoélectrique (pH_i) est plus élevé, on s'attend à une augmentation du pH du gel de biopolymère. Selon le principe de Le Chatelier, la dissolution du CO₂ puis sa transformation en carbonate sera favorisée par le caractère basique du gel qui viendra capter les protons formés. L'augmentation de la concentration en carbonate au sein du gel et la captation des protons formés devraient induire de plus grandes différences dans les mécanismes diélectriques et ioniques observés et permettre une augmentation de la sensibilité au CO₂.



Équation 2-16 Dissolution du dioxyde de carbone dans l'eau

La permittivité des biopolymères est aussi dépendante de la concentration en éthanol volatile [24]. En effet, l'éthanol, un élément chimique organique et un alcool, peut se lier aux biopolymères par la création de liaisons hydrogènes selon le même principe que l'eau. Comme indiqué dans la Figure 2-13, la sensibilité semble être plus élevée pour cet élément.

Les biopolymères étant constitués d'acides aminés, des interactions avec d'autres composés organiques formant des liaisons hydrogènes sont possibles.

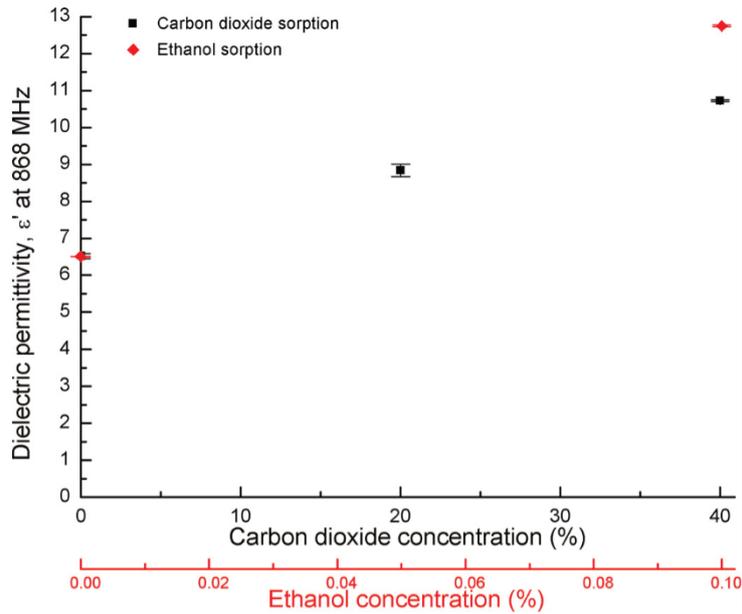


Figure 2-13 Permittivité réelle du gluten de blé au dioxyde de carbone et à l'éthanol, à 80 % HR et 25 °C [24]

Pour préparer de futures applications, deux stages ont été supervisés au cours de ce doctorat et avaient pour but de fournir des mesures de permittivité pour d'autres biopolymères que le gluten. Ces stages ont donc étudié les propriétés diélectriques de la gélatine, de la caséine et des protéines de soja. Kenza Alvarado, étudiante en 2^{ème} année d'IUT Génie Biologique, a étudié les propriétés diélectriques de la gélatine en comparaison avec du gluten. Et, Mikaël Della Seta, étudiant en 1^{ère} année à l'École Nationale Supérieure de l'Électronique et de ses Applications, a étudié les propriétés de l'isolat de protéines de soja et de la caséine. Les mesures des propriétés diélectriques de ces biopolymères ont été menées à l'aide d'un dispositif de mesure, la sonde diélectrique Keysight N1501A [39]. Les résultats de ces mesures se trouvent en Annexe 2-B.

2.2.3. Transducteur à électrodes interdigitées

2.2.3.1. Implémentation d'un modèle mathématique

Pour capter les variations de permittivité des biopolymères, nous avons alors choisi d'intégrer une capacité interdigitée, illustrée en Figure 2-14. Avec sa conception planaire, elle est parfaitement adaptée à la fabrication de tag RAIN. De plus, en multipliant les électrodes en regard les unes des autres, la sensibilité de ce composant peut être modulée sans ajouter trop d'encombrement.

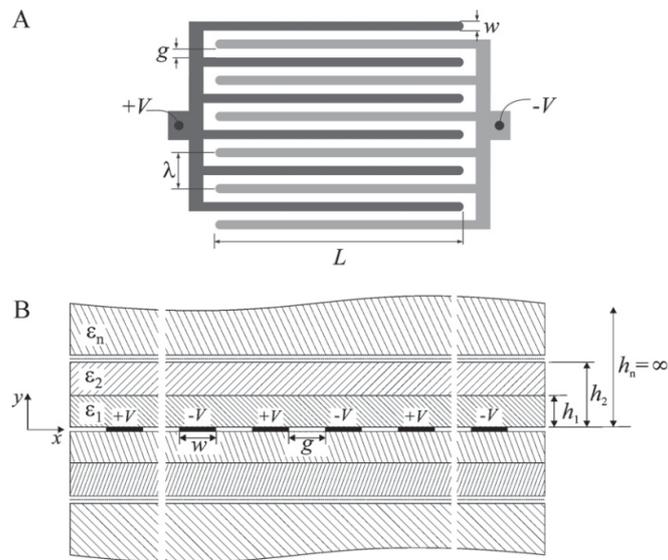


Figure 2-14 Modèle de capacité interdigitée [40]

Pour se protéger des champs électriques externes, les concepteurs ajoutent souvent un conducteur autour des électrodes et le relient à une tension fixe ou à la masse. Ce conducteur est alors appelé électrode de garde. De cette façon, les perturbations externes interagissent d'abord avec l'électrode de garde. Lorsque l'électrode de garde se trouve dans un plan parallèle aux électrodes interdigitées et couvre toute la surface, elle est appelée plan de masse. L'ajout d'un plan de masse peut protéger le signal du bruit provenant de l'arrière du plan de masse.

Dans le cadre du projet actuel, l'ajout d'une électrode de garde n'est pas nécessaire puisque la couche sensible est apposée sur l'électrode. Et, pour le moment, la couche sensible n'est pas assez épaisse pour contenir toutes les lignes de champ créées par les électrodes interdigitées. Ainsi, l'ajout d'un plan de masse ne protégerait que d'un seul côté.

Afin de ne pas faire appel à des calculs trop complexes pour obtenir l'impédance d'un composant électronique, on cherche à le modéliser mathématiquement, précisément, mais sans utiliser trop de variables. Pour concevoir plus facilement l'électrode interdigitée, nous nous servons d'un modèle mathématique simulant la valeur de la capacité en fonction de ses dimensions et des matériaux alentours. Basés sur des travaux précédents [41], le modèle d'Igreja et Dias est un des modèles de capacité interdigitées les plus récents [40]. Nous effectuons la validation de ce modèle par rapport à des simulations électromagnétiques. Ainsi, l'épaisseur du substrat est réglée à 50 μm , celle de la couche sensible à 14,6 μm . Les permittivités réelles relatives du substrat en PET (Polyéthylène Téréphtalate) et de la couche sensible sont, respectivement, 3,05 [42] et 5,020823. Le nombre de doigts est fixé à 10, et l'espacement entre les doigts (g) est égal à leur largeur (w), 125 μm . Le modèle d'Igreja et Diaz ne fait pas intervenir l'épaisseur du circuit. Aussi, afin de modéliser sous CST Design Studio dans les mêmes conditions, nous utilisons la fonction permettant de créer une couche infiniment fine. Il est possible que, pour des valeurs non négligeables d'épaisseur de circuit, les valeurs de capacités données par le modèle mathématique ne soit plus cohérente.

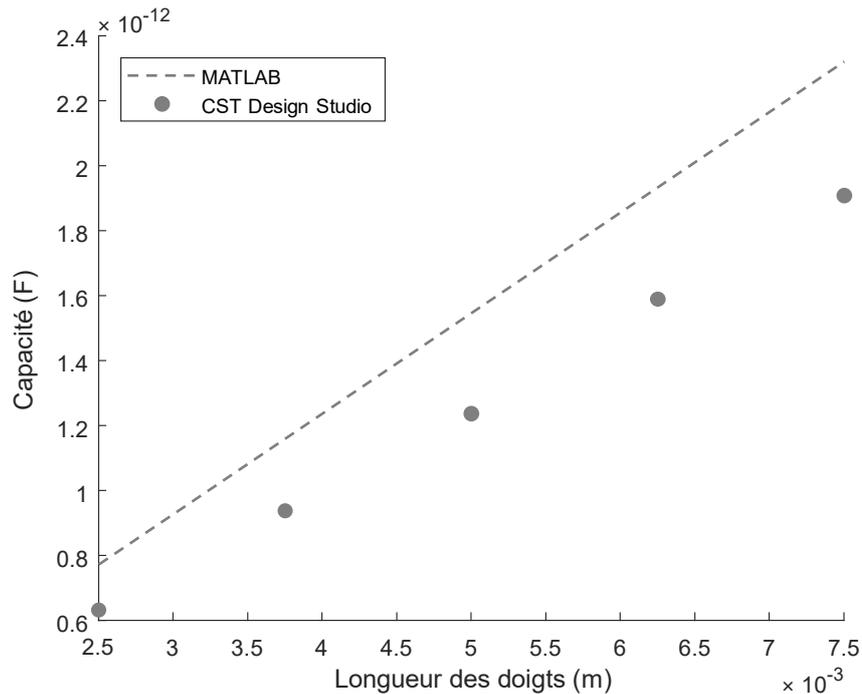


Figure 2-15 Capacité interdigitée modélisée avec MATLAB d'Igreja et Diaz et avec CST Design Studio pour différentes longueurs de doigts

Dans la Figure 2-15, nous remarquons un écart non négligeable entre les 2 modèles. Nous attribuons cet écart au fait que le modèle implémenté dans MATLAB n'inclus pas les pertes diélectriques. De plus, la modélisation sous CST Design Studio fait appel à la discrétisation du modèle 3D. A ces faibles dimensions, un nombre important de discrétisation est nécessaire. Néanmoins, un compromis entre discrétisation et temps de calcul doit être trouvé. Afin d'avoir une modélisation cohérente, nous avons choisi d'avoir au minimum de 3 divisions sur les axes x, y, et z par élément 3D.

Comme l'indique le Tableau 2-4, l'implémentation MATLAB est exécutée en moyenne en 1,2 ms sur un ordinateur portable et ancien, quand il faut plus d'un quart d'heure à CST Design Studio.

MODELE	TEMPS DE CALCUL	MACHINE UTILISEE
MATLAB	1,2 ms	Intel Core i7 M640 2.80 GHz RAM 8,00 Go Windows 10 Pro 21H1 x64 MathWorks MATLAB R2017b
CST DESIGN STUDIO	17 min	Intel Core i7-7700 3.60 GHz RAM 16,0 Go Windows 10 Pro 21H1 x64 SIMULIA CST Studio Suite 2019.07

Tableau 2-4 Comparaison de modèles de calcul de capacités interdigitées

Au vu du gain de temps du modèle mathématique, nous nous en servons dans les premières étapes du design pour estimer les dimensions que devrait avoir la capacité interdigitée en accord avec notre application.

Dans la Figure 2-16, nous avons fait varier plusieurs paramètres (longueur des doigts, nombre de doigts, largeur entre ceux-ci, et épaisseur de la couche sensible). Notre but étant d'observer la sensibilité d'une couche sensible en fonction des paramètres de la structure. Ainsi, à chaque étape du

balayage des paramètres, nous calculerons 2 valeurs de capacités correspondant aux minimum et maximum de permittivité réelle mesurées sur le gluten.

Comme observé dans la Figure 2-16, la sensibilité à la permittivité évolue linéairement avec longueur des doigts et avec leur nombre. Néanmoins, multiplier le nombre semble jouer plus rapidement sur la sensibilité. L'élargissement de l'espace entre les doigts fait décroître la sensibilité. Et, à l'inverse, l'augmentation de l'épaisseur de la couche sensible fait croître la sensibilité. Ces deux derniers balayages montrent un ralentissement de leur évolution avec l'augmentation des paramètres. Nous pouvons expliquer cela par un meilleur confinement des lignes de champs créées entre les électrodes.

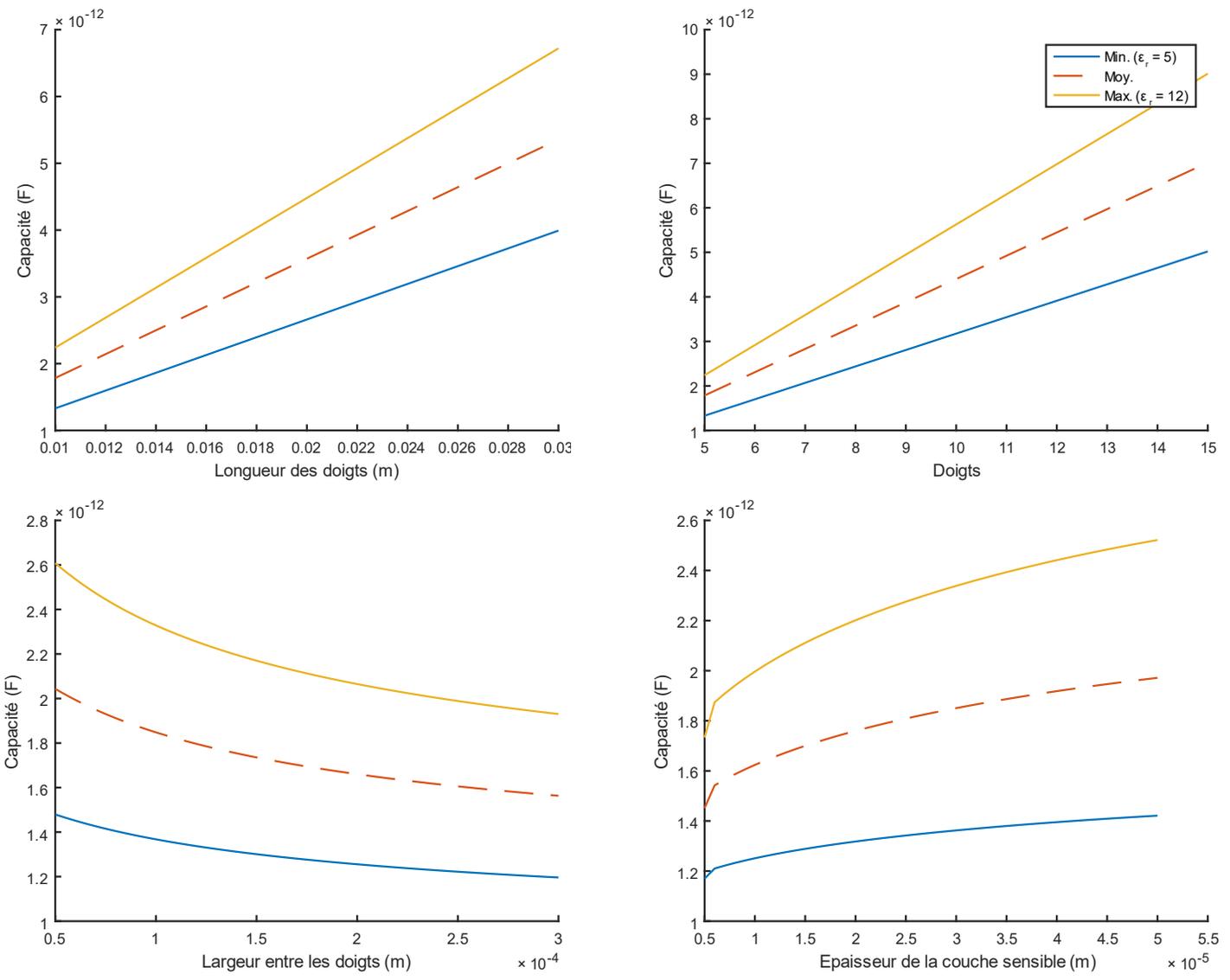


Figure 2-16 Balayage de paramètres du modèle d'Igreja et Diaz

2.2.3.2. Optimisation du capteur

Comme évoqué précédemment, le confinement des lignes de champ électrique dépend de l'espacement entre les électrodes constituant une capacité interdigitée et de l'épaisseur de la couche sensible. Afin de maximiser la sensibilité en englobant le maximum de lignes dans le matériau sensible, nous proposons de réduire au maximum l'écartement. De plus, cette modification dans la conception apportera une plus grande indépendance aux grandeurs d'influences. En effet, dans le cas où les lignes de champs ne sont pas confinées dans les matériaux prévus, celles-ci peuvent interagir avec d'autres à proximité.

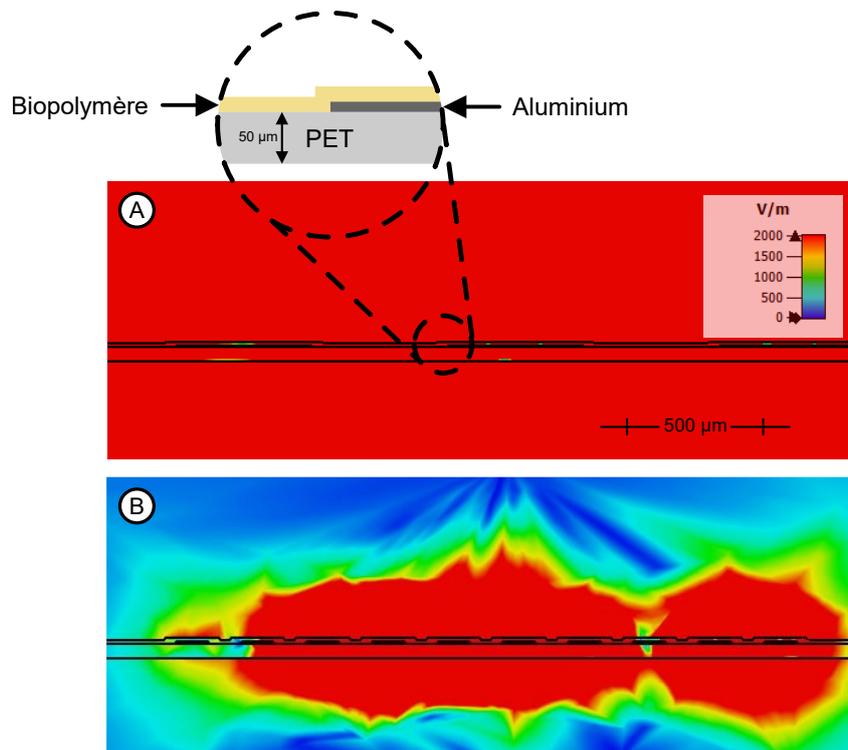


Figure 2-17 Champs électriques créés par les capacités interdigitées avec un gap de 500 µm (A) et 120 µm (B)

La largeur des électrodes de l'ancienne conception du capteur est de 500 µm, l'espacement entre les électrodes avait la même dimension. Cette dimension a été réduite à 120 µm dans cette nouvelle conception. Dans la Figure 2-17, deux vues en coupe des ancienne (A) et nouvelle (B) conceptions sont représentées avec leurs champs électriques respectifs. Utilisant la même échelle de couleur pour représenter les niveaux de champ électrique, on observe que l'ancienne conception (A) induit beaucoup de champ électrique en dehors de la couche sensible contrairement à la nouvelle conception (B). Bien qu'il y ait une amélioration dans le confinement du champ électrique, celui-ci dépasse les limites du modèle. En effet, nous sommes limités par la résolution de la technique de fabrication.

Comme observé dans la Figure 2-16, avec une largeur entre les doigts inférieure, le transducteur est plus adapté à la faible épaisseur du corps d'épreuve. Le capteur résultant sera donc plus sensible.

2.2.4. Conception des antennes

Lorsqu'une onde électromagnétique alternative parcourt un guide d'ondes, elle crée une tension et un courant alternatif le long de son parcours. D'après l'Équations 2-1 b., lorsque le champ électrique subit une discontinuité dans le guide d'ondes (par exemple, une terminaison ouverte), les électrons subissent une accélération et crée un champ magnétique. Comme le signal est sinusoïdal, la variation est entretenue et elle crée une variation du champ magnétique. Comme l'indique l'équation de

Maxwell-Faraday (Équations 2-1 a.), cela crée à nouveau un champ électrique variable. Ce processus récursif construit le champ EM. Selon le type de discontinuité dans le guide d'ondes, le champ électromagnétique produit se comporte différemment. L'antenne dipôle est le modèle le plus simple et le plus utilisé pour expliquer le détachement des lignes de champ électrique qui créent l'onde EM se propageant. Ce phénomène est illustré dans la Figure 2-18.

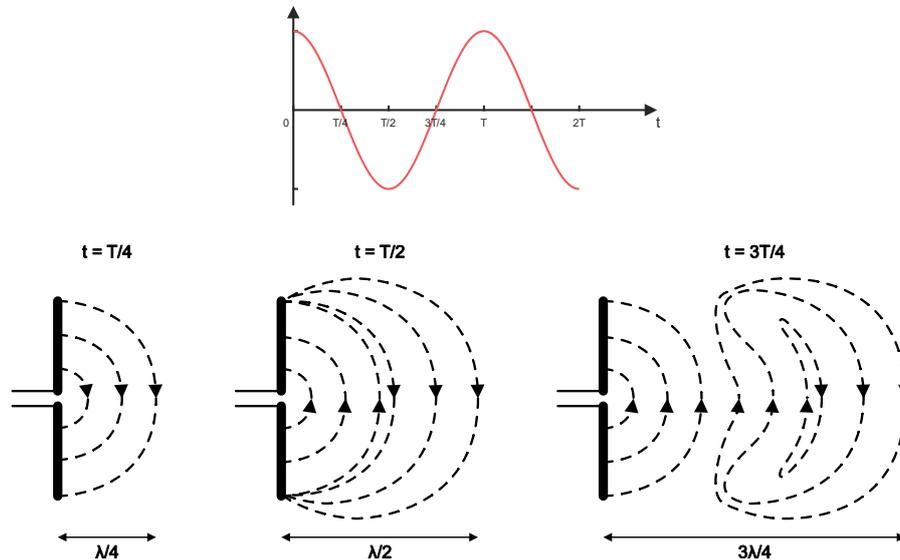


Figure 2-18 Détachement des champs électriques (antenne dipôle) [27].

Une antenne est, avant tout, un composant résonant. Comme le précise le Tableau 2-5, le modèle électrique de l'antenne va dépendre de sa résonance. Si l'antenne est trop courte, les deux conducteurs qui forment l'antenne vont se comporter comme un condensateur. Au contraire, si elle est trop longue, les conducteurs vont se comporter comme une inductance. Si la longueur ne correspond pas à la fréquence du signal, l'antenne peut être accordée en utilisant la technique d'adaptation conjuguée complexe. Dans la réalité, les inductances ou condensateurs ajoutés introduisent des résistances parasites dans le circuit, dégradant son facteur de qualité.

RESONANCE DE L'ANTENNE	MODELE ELECTRIQUE
Résonant	
Trop court	
Trop long	
Accordé	

Tableau 2-5 Résonances de l'antenne [44]

Même si le mécanisme de rayonnement a été expliqué avec une antenne dipôle dans la Figure 2-18, d'autres types d'antennes existent. Elles ont un mécanisme de rayonnement différent, et donc des polarisations, une directivité et une résistance différentes. Elles visent chacune une application spécifique.

2.2.4.1. Directivité

En fonction de leur conception, les antennes présentent différentes formes de faisceau. Une antenne qui rayonne de manière homogène dans toutes les directions est dite isotrope. Mais ce comportement est théorique et ne peut être qu'approximatif. Ceci est principalement dû au fait que les antennes

doivent être connectées à d'autres composants électroniques, cela crée donc une dissymétrie. Comme indiqué dans l'Équation 2-17, la directivité est généralement un rapport entre l'angle solide de l'antenne isotrope théorique et la forme du faisceau de l'antenne. Elle peut aussi être exprimée comme le rapport entre la valeur maximale d'intensité de radiation et l'intensité de radiation moyenne dans toutes les directions. Ce rapport peut être exprimé en décibel et son unité est alors le dBi (c'est-à-dire décibel-isotrope). Comme le faisceau de l'antenne n'est pas un simple angle solide, une intégration doit être faite sur la puissance du faisceau sur les angles solides concernés.

$$D = \frac{4\pi}{\Omega} = \frac{\max(U)}{\bar{U}}$$

Ω = angle solide du faisceau [sr], U = intensité de radiation [W/sr],

\bar{U} = intensité de radiation moyenne = $\frac{P}{4\pi}$,

P = puissance total émise par l'antenne [W] = $\int U(\Omega) \cdot d\Omega$

Équation 2-17 Directivité de l'antenne

Il existe également une valeur de directivité relative à un faisceau d'antenne dipôle et son unité est le dBd (décibel-dipôle). Dans ce cas, le rapport doit être divisé par 1,64 (le gain de l'antenne dipôle).

La Figure 2-19 représente les directivités d'un monopôle (à gauche) et d'un dipôle (à droite). Les deux antennes ont été simulées pour résonner à 915 MHz et cette figure montre leurs directivités pour un signal de 915 MHz.

L'antenne dipôle présente un diagramme "omnidirectionnel", ce qui signifie que le rayonnement est diffusé dans toutes les directions perpendiculaires aux connecteurs formant l'antenne.

Comme les ondes électromagnétiques se réfléchissent sur son plan de masse, le diagramme de rayonnement de l'antenne monopôle améliore la directivité de l'antenne vers son extrémité.

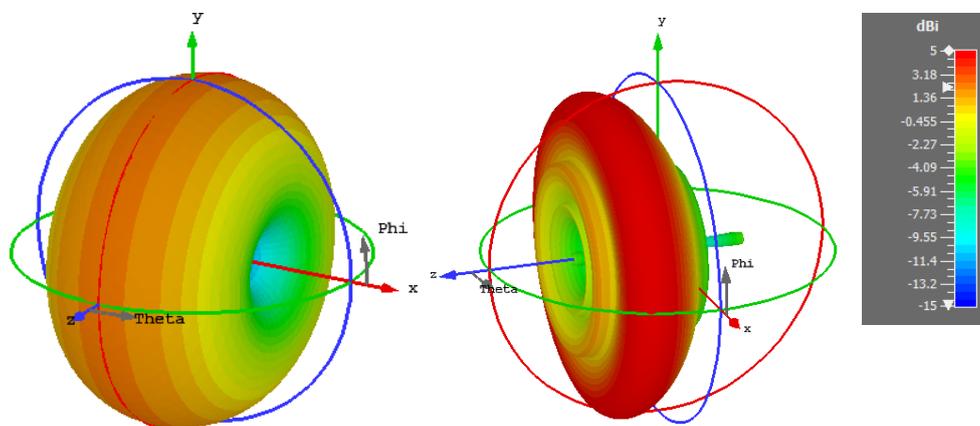


Figure 2-19 Directivité pour des antennes dipôle (gauche) et monopôle (droite) à 915 MHz

Une directivité élevée peut être un avantage ou un inconvénient pour un tag RFID en fonction de l'application. Comme indiqué précédemment, elle protège des perturbations provenant de certaines directions, mais le tag n'est pas en mesure de communiquer correctement dans ces directions. Par conséquent, elle peut dégrader la capacité de lecture à distance des tags.

2.2.4.2. Types

Il existe 3 principaux types d'antennes utilisées dans le domaine de la RFID UHF : l'antenne monopole, l'antenne dipôle et l'antenne boucle. Pour adapter les antennes avec leur domaine d'application (fréquence de résonance, directivité, électronique de conditionnement, ...), les chercheurs leur ajoutent des motifs, des réflecteurs, et appliquent de nombreuses astuces.

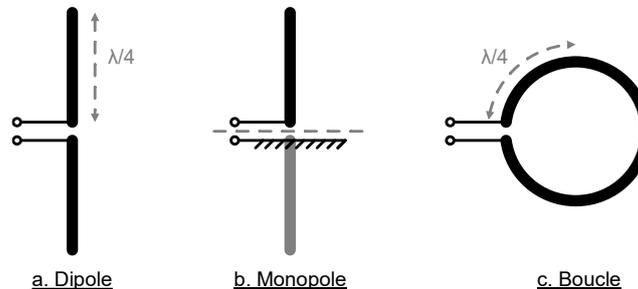


Figure 2-20 Principales antennes RFID

L'une des premières conceptions d'antenne étudiées est l'antenne dipôle (cf. Figure 2-20 a.), avec l'expérience de Hertz en 1887 [45]. Pour rester accordée en fréquence, l'antenne dipôle doit avoir une longueur multiple d'une demi-longueur d'onde. Pour la version de base mesurant une demi-onde (sur les deux bras), la résistance de rayonnement de l'antenne est de $73,0 \Omega$. Et son gain de directivité maximal est de 2,15 dBi.

Dix ans après l'expérience de Hertz, Marconi a découvert la « théorie de l'image ». Selon cette théorie, un courant qui circule devant un plan de masse (PM) crée son exact opposé virtuel dans le PM. C'est ainsi que Marconi a inventé l'antenne unipolaire (cf. Figure 2-20b.), constituée d'un bras d'un dipôle et d'un plan de masse (c'est-à-dire la terre) [46]. Héritant du dipôle, la longueur de l'antenne monopole doit suivre la même règle pour rester accordée en fréquence, mais la longueur résultante est divisée par deux, car elle n'a qu'un seul bras. En raison de la réflexion totale des ondes électromagnétiques par le PM, le gain de directivité augmente à 5,19 dBi (dans sa version de base rapportée en Figure 2-20 b.). Et la résistance de radiation est moindre que celle du dipôle, $36,5 \Omega$.

Les antennes boucles ont également été introduites par l'expérience de Hertz en 1887 comme antenne de réception. Lorsque son périmètre est égal à la longueur d'onde cible, son gain de directivité est de 3,48 dBi. En modifiant la circonférence du fil et le périmètre de l'antenne, le gain augmente jusqu'à environ 4,5 dBi. Étant donné que l'antenne relie ses deux ports d'antenne, le courant interfère avec lui-même. Ainsi, la résistance de rayonnement fluctue rapidement avec la configuration de l'antenne. Lorsque son périmètre est égal à la longueur d'onde, la résistance est d'environ 100Ω .

Dans le cas d'un design contraint en taille, les antennes précédentes ont chacune une version plus petite. Comme l'indique le Tableau 2-6, la résistance des antennes est modifiée en fonction du changement de longueur. Il en est de même pour la directivité. Pour ces petites antennes, l'accord en fréquence ne se fait qu'à l'aide d'un composant externe.

TYPE	LONGUEUR DU CONDUCTEUR x (M)	RESISTANCE (Ω)
MONOPOLE	$x < \frac{\lambda}{4}$	$40 \left(\frac{x}{\lambda} \pi \right)^2$
DIPOLE	$\frac{\lambda}{50} < x < \frac{\lambda}{10}$	$20 \left(\frac{x}{\lambda} \pi \right)^2$
BOUCLE	$x < \frac{\lambda}{3}$	$320 \left(\frac{x}{\lambda} \pi^2 \right)^2$

Tableau 2-6 Caractéristiques des petites antennes [43]

Les caractéristiques des antennes mentionnées sont théoriques. En réalité, l'ajout de câbles, de connexions mécaniques ou de matériaux isolants ajoutent des pertes à l'antenne. La résistance du circuit d'antenne est donc plus élevée ($R_{antenne} = R_{radiation} + R_{perte}$).

Indépendamment du type d'antenne, il existe différents motifs pour améliorer la conception. Afin d'obtenir une conception d'antenne à large bande, le facteur de qualité de l'antenne peut être réduit. L'augmentation de la largeur du circuit lui permettra de supporter plus de mode de rayonnement (de longueurs d'onde) dans l'antenne. Cela augmentera également la résistance de l'antenne.

Si la longueur du tag ciblé est trop limitée, il est difficile d'intégrer l'antenne dans la conception. Comme l'indique le Tableau 2-5, une antenne trop courte présentera une capacité. Pour compenser ce manque, le concepteur doit allonger virtuellement l'antenne. En plaçant des méandres dans le bras de l'antenne, cela apporte plus d'inductance et compense la capacité [47].

Pour que l'antenne cible l'application future et la puce RAIN choisi, il est important de connaître l'impédance du CI. La valeur moyenne est d'environ $16-j203 \Omega$ (cf. Annexe 1-A). Pour compenser l'impédance imaginaire négative, avoir une antenne qui cible à l'origine une plus grande longueur d'onde est un bon point. Comme indiqué par le Tableau 2-5, cela amène l'antenne à se comporter comme une inductance (une impédance imaginaire positive).

Adapter l'impédance de l'antenna au CI est parfois impossible, il est donc nécessaire de faire appel à une composant d'adaptation. Contrairement au balun, le modèle « T-match » nécessite beaucoup moins d'éléments mais a le même effet. Il lie directement l'élément rayonnant, l'antenne, à une boucle plus petite par induction magnétique [48]. Il existe deux types de T-match : un avec un conducteur partagé entre les deux éléments, et un qui garde les éléments déconnectés directement. Ayant publiés une étude sur ce type d'adaptation, Raihani *et al.* affirment que l'ajout de ce type de motif permet de ne pas entraîner "d'augmentation significative du coût et de la taille de l'étiquette".

Le principal avantage du PM est de protéger le tag contre les perturbations provenant de l'arrière (par exemple, le mouvement d'un matériau diélectrique). Le concepteur peut inclure un PM même si le tag a une épaisseur de substrat correcte pour être placé sur une surface métallique (cf. Équation 2-18, avec λ , la longueur d'onde dans le matériau du substrat).

$$d = |2n - 1| \frac{\lambda}{4}$$

Équation 2-18 Espacement idéal entre un tag et son plan de masse

En outre, la directivité est souvent plus élevée dans ces conceptions. Comme les ondes ne sont réfléchies que sur un seul côté du tag, l'angle solide du faisceau de l'antenne utilisant le PM est inférieur à 2π stéradian, alors le gain dû à la directivité est porté à, au moins, 2 (c'est-à-dire 3 dBi).

2.2.4.3. Simulateurs électromagnétiques

Toutes les illustrations des outils de simulation EM proviennent de la solution Dassault Systèmes SIMULIA CST Design Studio 2019.

Pour éviter une simplification excessive, la transformation des formes 3D en modèles mathématiques est limitée à un petit nombre de formes 3D lisses. Lorsqu'on utilise des formes plus complexes, la discrétisation est essentielle pour que les équations mathématiques restent simples et correctes lorsqu'elles sont appliquées à chaque élément 3D (ou cellule). Ceci est illustré dans la Figure 2-21.

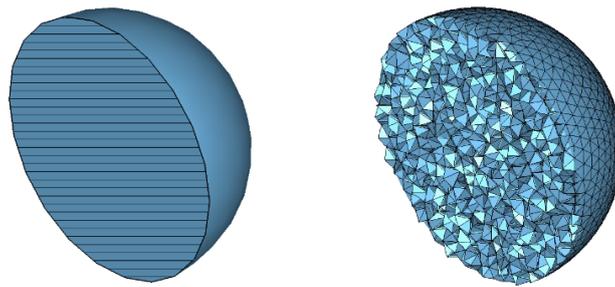


Figure 2-21 Sphère (avec vue en coupe) avant (gauche) et après (droite) l'opération de maillage

La Figure 2-22 représente un élément fini, c'est-à-dire une cellule, sur laquelle de nombreuses opérations mathématiques sont effectuées. Pour une meilleure compréhension et un dessin plus facile, le système de coordonnées rectangulaire est choisi, comme il le sera pour la première explication de nombreuses méthodes présentées ci-dessous.

Outre les systèmes de coordonnées rectangulaires, d'autres systèmes géométriques sont disponibles par le biais de transformations (par exemple, les systèmes hexaédriques et tétraédriques). Ces transformations peuvent également être appliquées lors de l'opération de maillage (par exemple, appliquer une courbure à une cellule pour mieux s'adapter à une géométrie courbe). Les systèmes géométriques ou transformations ne sont pas tous pris en charge par les méthodes, en fonction des hypothèses faites pour simplifier le calcul.

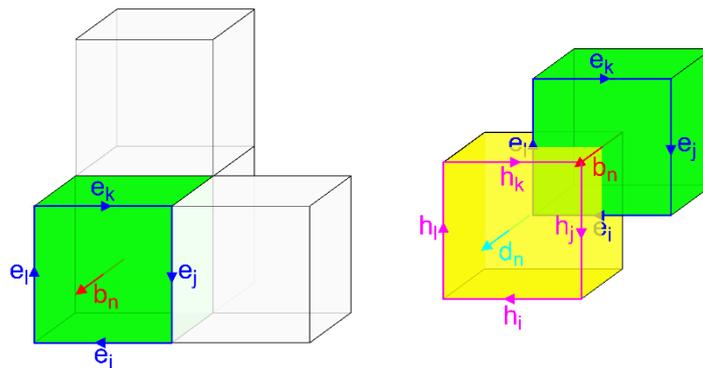


Figure 2-22 Cellule de grille primaire (verte) et secondaire (jaune) de Thomas Weiland pour la technique FIT

Les composantes de l'équation de Maxwell représentées sur la Figure 2-22 sont liées par des coefficients qui dépendent des propriétés EM des matériaux dans la cellule. Pour que la simulation puisse commencer, le modèle doit inclure au moins une source de perturbation EM connue. Comme les cellules se trouvent dans différents points de l'espace 3D, le modèle tient compte de la propagation temporelle. Ainsi, une distance spatiale pour l'onde implique une distance temporelle. Pour éviter les problèmes de repliement de spectre, le modèle doit échantillonner les ondes EM à une fréquence supérieure à la fréquence de Nyquist. Comme l'indique l'Équation 2-19, cela signifie qu'une cellule doit être plus petite que la moitié de la longueur d'onde étudiée maximale.

$$\begin{cases} \frac{\partial x}{\partial y} < \frac{v}{2f_{max}} \\ \frac{\partial y}{\partial z} \end{cases}$$

Équation 2-19 Limite minimale de taille de cellule pour respecter la fréquence de Nyquist

Sur la base de ces concepts, la technique FDTD (Finite-Differential Time-Domain) a été développée pour la première fois et est toujours utilisée dans les outils de simulation EM actuels. Cette méthode a été introduite par Kane Yee en 1966 [49]. Elle consiste à calculer alternativement les composantes

magnétiques et électriques sous forme de matrice pour construire un modèle de propagation 3D (+ temps). Cette méthode utilise les équations différentielles de Maxwell, comme elles sont notées dans les Équations 2-1.

La méthode TLM (Transmission-Line Matrix) a été introduite par Peter Bruce Johns en 1971 [50]. Elle simplifie grandement la méthode FDTD en remplaçant les équations de Maxwell par les « équations des télégraphistes ». Dans ces dernières, les propriétés matérielles de chaque maille sont remplacées par des impédances. Cette méthode est plus adaptée aux lignes de transmission, comme son nom l'indique.

Une autre technique de simulation, FIT (Finite Integration Technique), a été introduite par Thomas Weiland en 1977 [51]. En 1983, MAFIA (solution of Maxwell's Equations by the Finite Integration Algorithm) a été publié par l'Institut TEMF (institut des sciences des accélérateurs et des champs électromagnétiques de l'université technique de Darmstadt) [52]. L'Institut TEMF a commencé à distribuer le logiciel CST (Computer Simulation Technology) en 1992, qui a ensuite été racheté par Dassault Systèmes. La principale différence avec la méthode FDTD est l'utilisation de formes intégrales des équations de Maxwell [53]. La méthode FIT propose de plus avantageuses transformations géométriques.

La méthode FDTD peut être simplifiée si les vecteurs variant dans le temps (par exemple, le courant, le champ électrique ou magnétique) sont exprimés pour spécifier leur dépendance aux fréquences, comme dans l'Équation 2-20. Cette méthode est appelée FEM (Finite Element Method) [38] et n'exécute la simulation EM que pour une fréquence à la fois. De nombreux simulateurs utilisent la méthode FEM en raison de sa rapidité, et la méthode FEM est souvent appelée simulation en « domaine fréquentiel ». De la même manière, la méthode FIT peut exécuter des simulations dans le domaine fréquentiel [55]. Cependant, cette méthode ne doit être utilisée que pour des dispositifs résonnants. En effet, avec le même espacement de fréquence, plus la plage de fréquence est large, plus le nombre de simulations est grand. De plus, les résultats sont discrets, et l'interpolation doit être utilisée pour les rendre à nouveau continus. L'interpolation cause aussi des erreurs. Lorsqu'une analyse d'une large bande de fréquences est nécessaire, les solveurs privilégiés doivent être ceux du domaine temporel.

$$\vec{X} = \hat{X} \cdot e^{j\omega \cdot t}$$

$$\hat{\quad} = \text{phaseur}, e = \text{nombre d'Euler}, \omega = \text{vitesse angulaire} = 2\pi \cdot f$$

Équation 2-20 Vecteur variant sinusoïdalement dans le temps

Lorsque le modèle est très grand par rapport à la longueur d'onde concernée, les équations de Maxwell ne sont plus nécessaires et des approximations peuvent être utilisées pour faciliter les calculs. Le solveur « lanceur de rayons » (solveur « asymptotique » dans CST) représente directement les ondes EM sous forme de faisceaux et simule leur réflexion en utilisant les équations de Snell-Descartes (et Fresnel) sur la réfraction et l'équation de diffraction de Fresnel-Kirchhoff. Ainsi, avec cette méthode, une cellule peut simplement correspondre à des matériaux entiers et ne doit plus dépendre de la longueur d'onde. Cependant, cette méthode est dépendante de la fréquence, tout comme les équations sous-jacentes.

Comme le montre la Figure 2-23, le rapport entre la taille du modèle 3D et la longueur d'onde est critique. Si le modèle est petit par rapport à la longueur d'onde maximale étudiée, les cellules doivent s'adapter au modèle autant que possible. Si le modèle est grand, le modèle peut comporter des approximations.

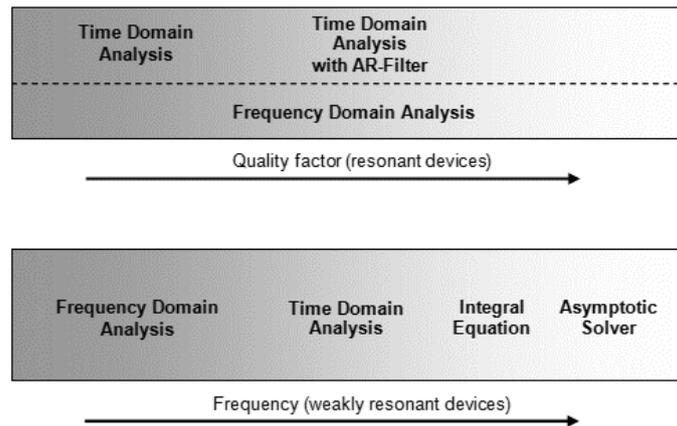


Figure 2-23 Comparaison des solveurs [56]

Les perturbations EM voyagent dans le temps et l'espace, sont réfléchies, s'atténuent ou sont complètement arrêtées. Comme chaque cellule est liée aux autres par des équations récursives, il est difficile de fixer des limites à l'espace simulé. La première méthode introduite consistait à entourer l'espace de PEC. Cependant, les frontières en PEC doivent être utilisées loin des sources d'ondes EM pour éviter les réflexions totales. Les simulations en espace ouvert avec des limites PEC nécessitent un espace supplémentaire et une puissance de calcul beaucoup plus importante. C'est pourquoi la frontière PML (Perfectly Matched Layer) a été introduite par Jean-Pierre Berenger en 1994 [57]. Il s'agit d'une couche située avant la frontière PEC, dont les conductivités électrique et magnétique sont non isotropes et satisfont des conditions spécifiques. Cela correspond aux conditions aux limites « open » pour le simulateur CST Design Studio.

Pour offrir les outils les plus complets, les simulateurs disposent généralement de fonctions de conception mécanique. Dès lors, des boucles de rétroaction entre la simulation EM et la conception mécanique peuvent être lancées. À cette fin, la plupart des simulateurs permettent de définir des valeurs en tant que paramètres. Les paramètres peuvent être des coordonnées spatiales (par exemple, la taille d'une ligne électrique), des propriétés matérielles (par exemple, la permittivité diélectrique) ou des nombres naturels décrivant des caractéristiques (par exemple, le nombre de lignes parallèles).

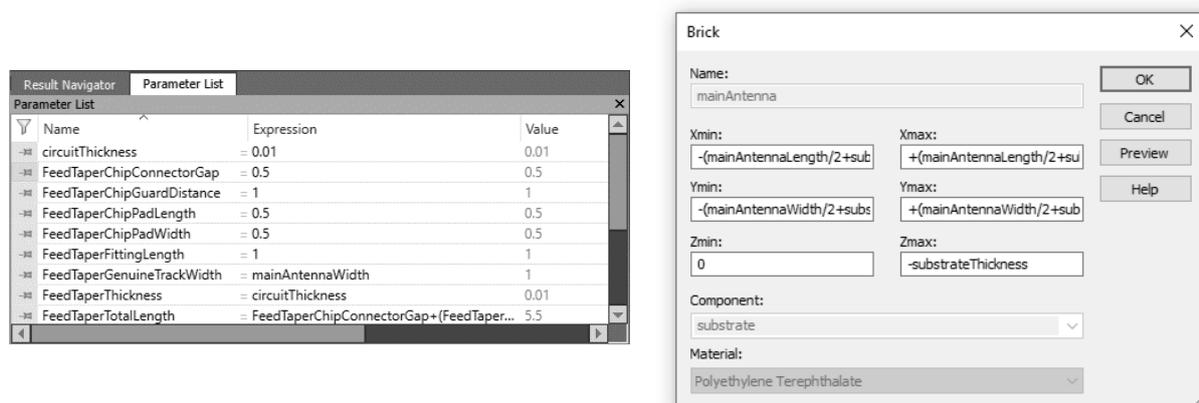


Figure 2-24 Paramètres de simulation (à gauche) et conception de blocs (à droite)

Comme l'ordinateur peut balayer les valeurs des paramètres avant la simulation, l'optimisation peut se produire. Construits comme des boucles de rétroaction, les processus d'optimisation peuvent utiliser différents algorithmes pour atteindre leurs objectifs, comme le montre la liste déroulante « Algorithm » de la Figure 2-25.

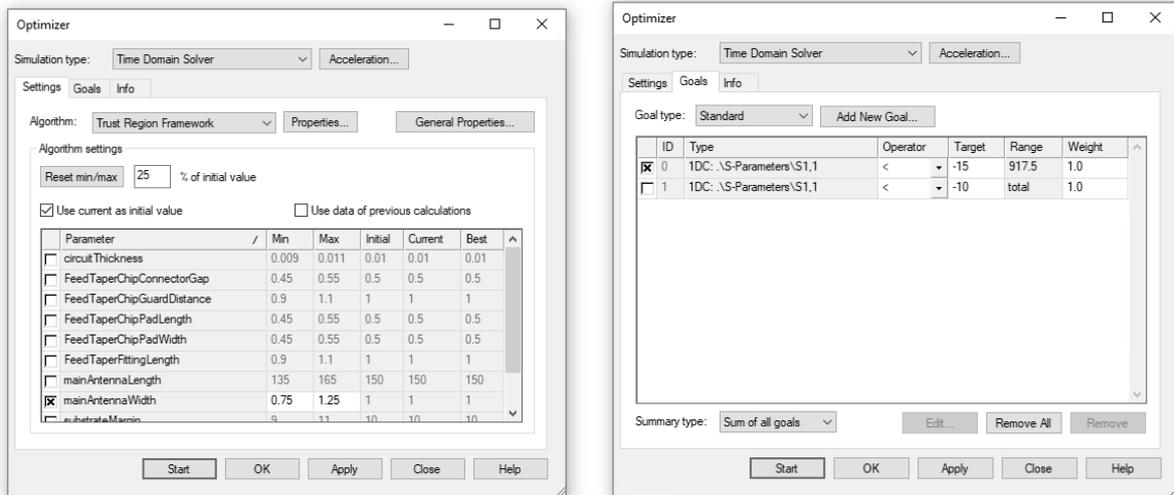


Figure 2-25 Paramètres d'optimisation (à gauche) et les objectifs (à droite)

Aujourd'hui, la plupart des simulateurs EM commerciaux intègrent également un simulateur de circuit électronique. Ainsi, ils permettent d'intégrer des circuits intégrés ou des composants externes dans le modèle et d'effectuer des simulations avec ces derniers.

Pour mieux expliquer les simulations EM, une antenne dipôle simple est conçue pour fonctionner dans la bande UHF, comme l'illustre la Figure 2-26. Pour les besoins de l'application visée, des matériaux réels et leurs propriétés sont utilisés. L'antenne est faite d'aluminium et utilise les propriétés du matériau par défaut de CST Design Studio. Un substrat PET est ajouté pour imiter le tag réel et une marge ($M = 1$ cm) est ajoutée à la longueur et à la largeur de l'antenne. Comme les propriétés du matériau PET ne sont pas intégrées dans le logiciel de simulation, il est nécessaire de les chercher dans des publications. Un article d'Erbulut et al. indique que la permittivité du PET est $\epsilon^* = 3,05 + j0,009$ à 2,45 GHz [42].

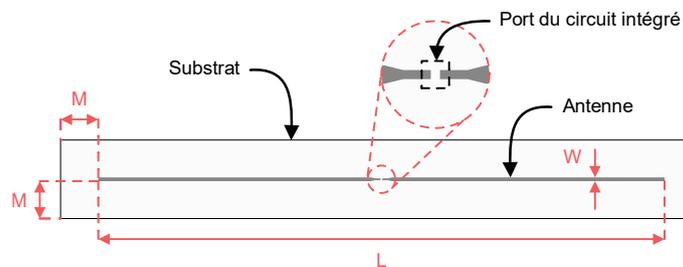


Figure 2-26 Conception d'une antenne dipôle

Toutes les dimensions affichées sur la Figure 2-26 (longueur et largeur de l'antenne, ainsi que la marge du substrat) et les épaisseurs de l'antenne et du substrat sont définies comme des paramètres.

La simulation est effectuée avec un solveur dans le domaine temporel (méthode FIT) et avec un type de maillage hexaédrique. Le solveur est réglé par défaut avec un critère d'arrêt de -40 dB. Ce qui signifie que la simulation s'arrêtera lorsque le facteur entre les puissances maximale et minimale enregistrées dans les ports ou au niveau des limites est inférieur à 0,0001.

Comme l'indiquent les figures suivantes, le modèle simulé correspond à la théorie de conception des antennes.

Comme le simule la Figure 2-27, avec $W = 1$ mm et avec $T = 50$ μm , la longueur de l'antenne agit principalement sur la fréquence accordée.

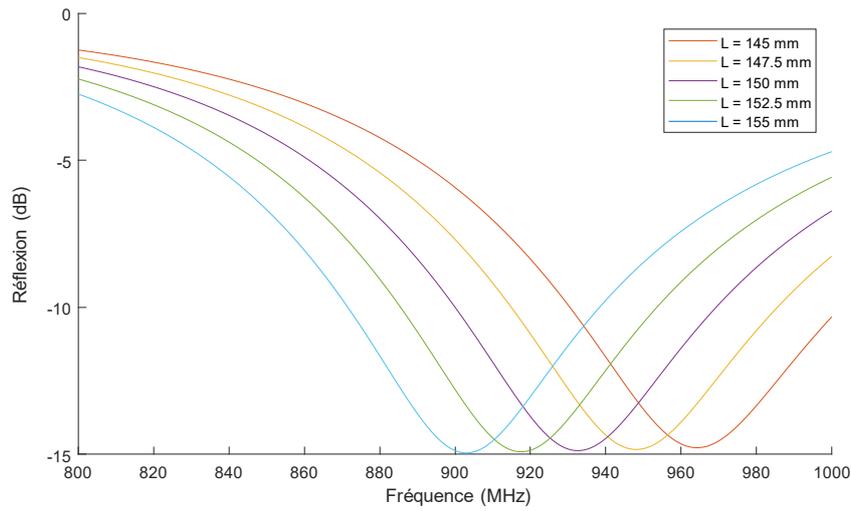


Figure 2-27 Balayage de la longueur de l'antenne

Dans la Figure 2-28, avec $L = 15$ cm, le facteur de qualité de l'antenne diminue avec la largeur du circuit de l'antenne. Cela est dû à la capacité de l'antenne à résonner à d'autres fréquences qui s'insèrent maintenant dans la surface de l'antenne.

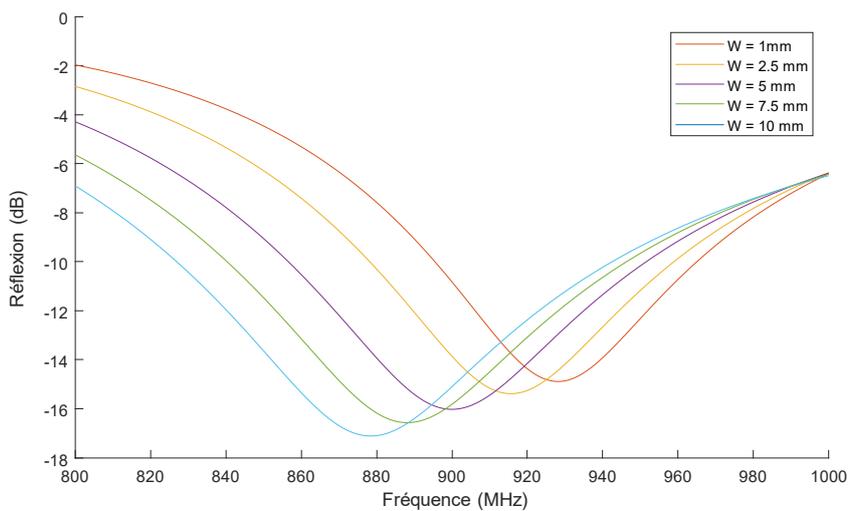


Figure 2-28 Balayage de la largeur de l'antenne

Enfin, en raison de l'épaisseur du substrat balayé dans la Figure 2-29, la permittivité diélectrique effective change autour de l'antenne et, par conséquent, son accord en fréquence.

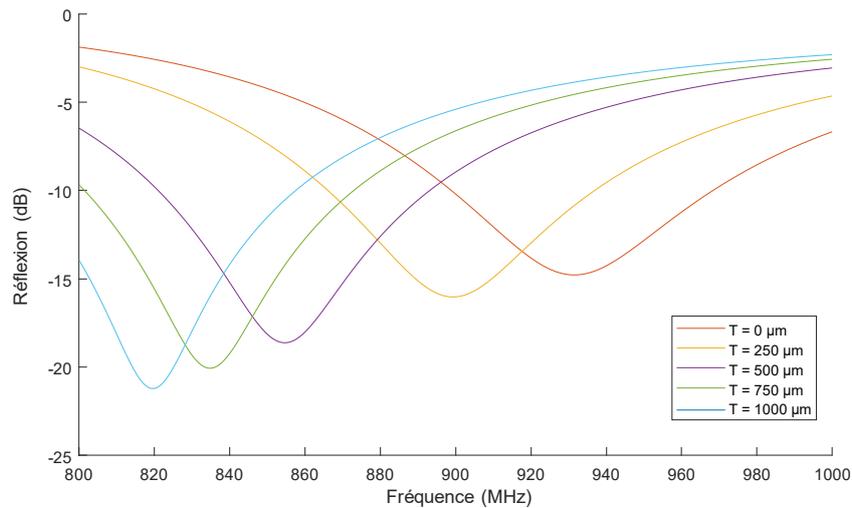


Figure 2-29 Balayage de l'épaisseur du substrat

Un plan de masse est ajouté derrière le substrat. Sa surface recouvre entièrement la face du substrat. Un processus d'optimisation est ensuite mis en place, avec pour objectif de fournir la puissance maximale au circuit intégré et, par conséquent, d'obtenir un coefficient de réflexion minimal pour cette antenne. Les gammes de fréquences réglementaires de la technologie RAIN étant centrées sur 915 MHz, la fréquence ciblée est choisie en conséquence. Avec le matériau PET qui s'intercale entre l'antenne et le plan de masse, l'épaisseur du substrat doit être de 45,934 mm ($\lambda/4$) pour atteindre la première interférence constructive. Comme cet ajout crée une ligne micro-ruban dont l'épsilon effectif est égal à 2,11, l'antenne dipôle demi-onde doit mesurer 93,868 mm de long.

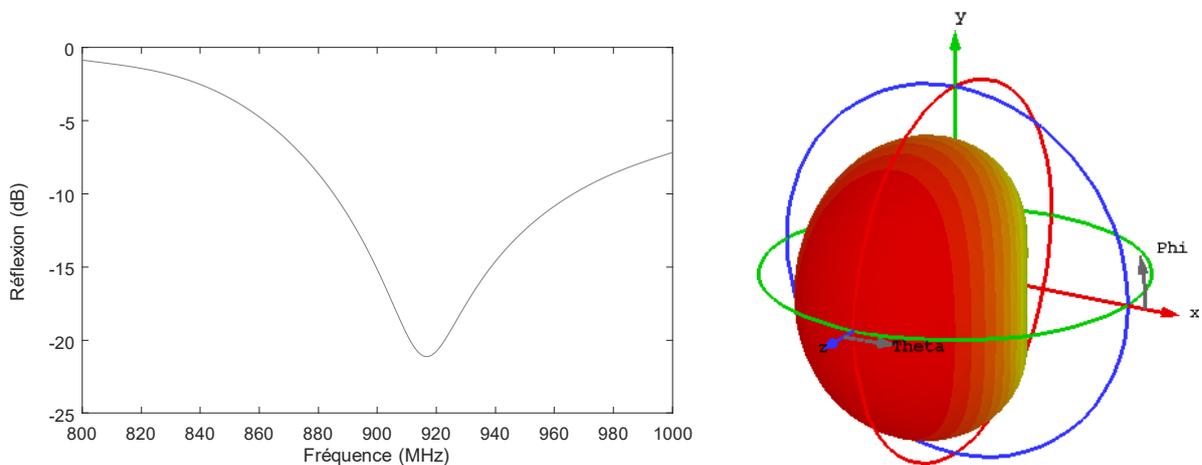


Figure 2-30 Réflexion (gauche) et directivité (droite) d'un exemple d'antenne dipôle avec plan de masse

L'optimisation de cette simulation s'arrête pour une longueur d'antenne de 103,63 mm. Sur la Figure 2-30, la directivité est tracée entre -15 et 5 dBi. Comme prévu avec l'ajout du plan de masse, la directivité a été grandement améliorée.

Pour compléter la conception du tag RAIN, une simulation électronique avec un circuit intégré est nécessaire. Un exemple (sans plan de masse) est donné en utilisant l'UCODE 7 de NXP qui a été utilisé précédemment pour montrer le format de fichier Touchstone dans la Figure 2-9.

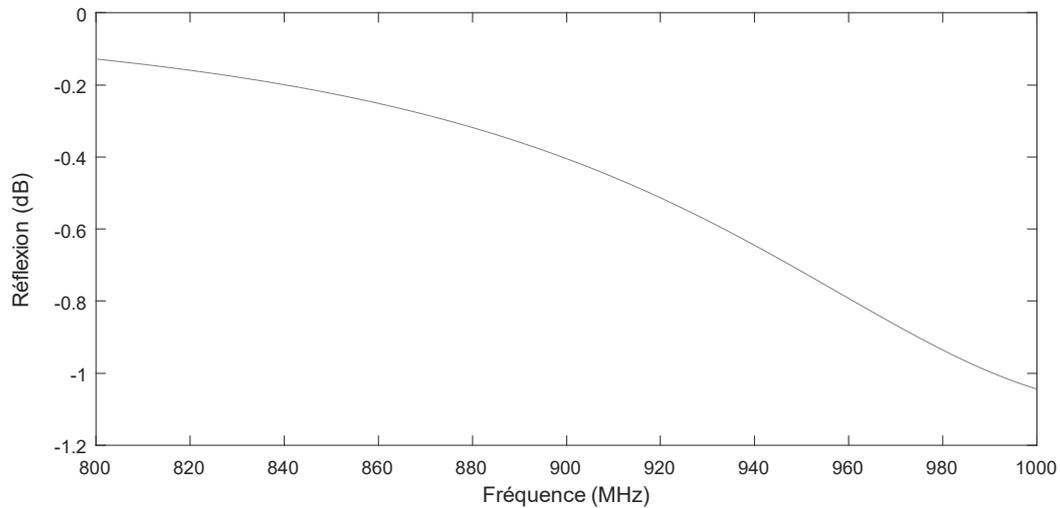


Figure 2-31 Simulation électrique de l'antenne avec CI

Comme le montre la Figure 2-31, des améliorations sont encore nécessaires pour régler correctement le tag avec CI. Mais le balayage des paramètres et le processus d'optimisation sont également souvent disponibles avec les simulateurs électroniques. C'est l'objet de la section suivante.

2.2.5. Adaptation de la puce, de l'antennes et du capteur

Pour le capteur RFID conçu lors de ce travail de thèse, illustré dans la Figure 2-32, le capteur est proche du circuit intégré pour obtenir une conception compacte et servir de structure T-match pour adapter l'antenne (cf. 2.2.4.2 Types). En effet, l'antenne, Z_D , doit d'adapter à l'entrée RAIN de la puce, capacitive, et au capteur, Z_C , capacitif lui aussi. Un balayage des dimensions de l'antenne a été effectué jusqu'à obtenir une valeur adéquate de coefficient de réflexion dans la bande de fréquence ciblée (ETSI basse, 866 – 868 MHz).

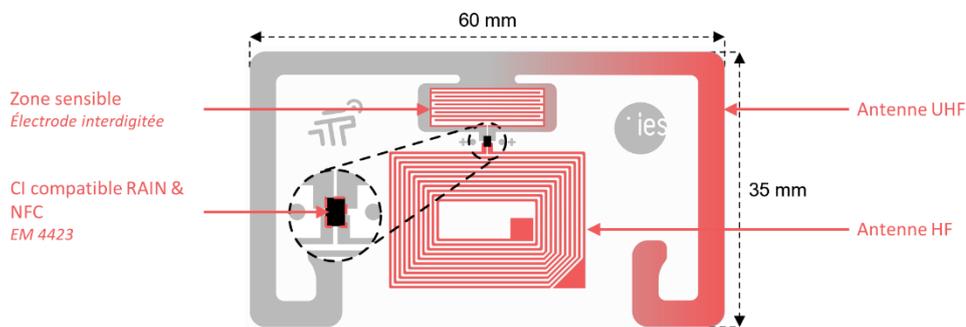


Figure 2-32 Schéma du tag-capteur

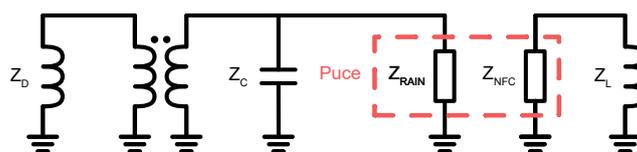


Figure 2-33 Schéma équivalent électrique du tag-capteur

Afin de ne pas court-circuiter le CI ou de ne pas le casser lors du processus d'enduction, la couche sensible est enduite sur le côté opposé au circuit, comme le montre la Figure 2-34.

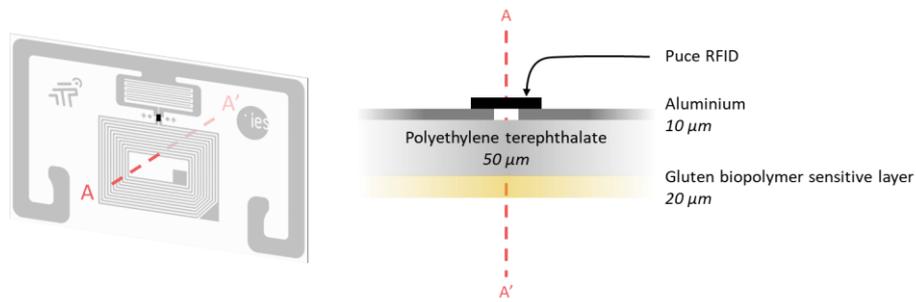


Figure 2-34 Vue en coupe du tag-capteur

La désadaptation de l'antenne due à la présence de la viande et du plastique séparant le tag-capteur de l'air ambiant est importante. En effet, le modèle du tag seul est adapté à une fréquence de plus de 1,1 GHz. Dans le modèle final avec le viande et l'emballage plastique, présenté dans la Figure 2-35, la fréquence de résonance se situe autour de 850 MHz.

Toutes les expériences, en laboratoire ou chez nos partenaires industriels, ont été faites avec des échantillons de viande (muscles) de bœuf de 100 grammes coupés en tranche de 1 cm. Dans la Figure 2-35, la viande est représentée en rouge et est simulée par un matériau ayant une permittivité de $\epsilon_r = 56 + j21$ pour une fréquence de 916 MHz [58].

Pour les expériences menées en laboratoire, les emballages plastiques utilisés étaient faits de PP (polypropylène). La contenance de ceux-ci est de 781 mL (156 × 143 × 35 mm) pour une épaisseur de 550 µm. Un film de PP transparent de 70 µm d'épaisseur est thermoscellé sur la barquette pour fermer l'emballage. Dans le modèle, le PP est simulé ayant une permittivité de $\epsilon_r = 2.26 + j7 \cdot 10^{-5}$ (à 9,4 GHz) [59].

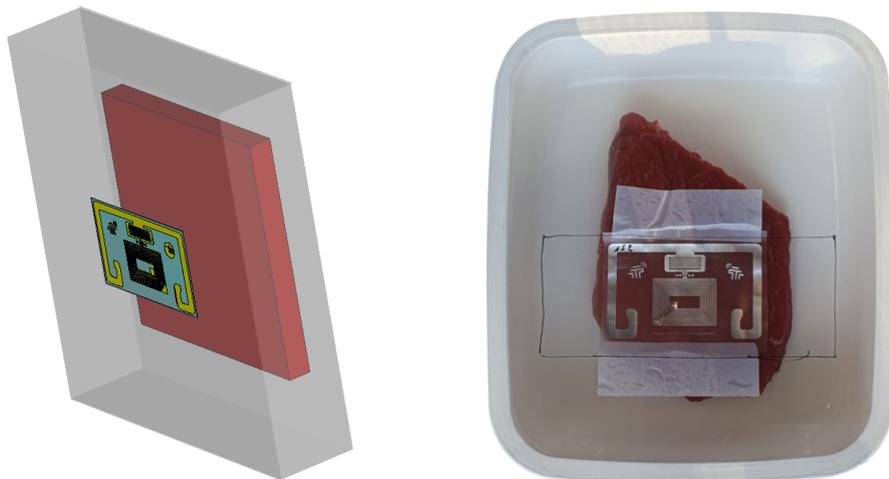


Figure 2-35 Modèle de simulation (gauche) et photographie (droite) du tag-capteur dans son environnement

Comme simulé dans la Figure 2-36, les variations de permittivité relative de la couche de gluten (ici, avec l'humidité) entraînent une variation du coefficient de réflexion en fréquence du tag. Ce résultat combine les simulations électromagnétique et électronique puisqu'il fait état de l'adaptation du tag simulé une fois l'impédance de la puce EM4423 ($Z = 18,1 + j248 \Omega$) connectée à son port.

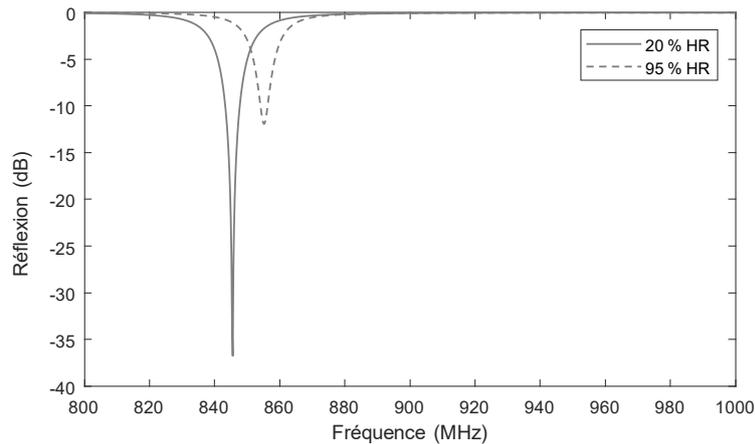


Figure 2-36 Coefficient de réflexion du tag-capteur

2.2.6. Perspectives

Avec le rapprochement de la bande européenne ETSI haute avec les bandes FCC et chinoise, cibler la bande 910 – 920 MHz représente une source d'économie future. En effet, dans le cas d'une exportation en dehors du continent européen, le tag serait également lisible en toute légalité. En outre, une nouvelle conception à double bande pourrait aider à construire une meilleure solution de transpondeur de détection. Comme nous l'avons vu précédemment, l'association d'un transpondeur de détection avec un autre transpondeur de référence est une excellente solution pour restaurer la sensibilité de la cible de détection face aux bruits provenant d'autres éléments (par exemple, déplacement de l'antenne vers le lecteur, modification de l'environnement immédiat, ...). Le coût d'un transpondeur est presque divisé par 2 s'il utilise deux bandes indépendantes, l'une pour la référence et l'autre pour la détection. Le coût supplémentaire restant est celui du développement plus difficile. Bien que l'idée d'une référence indépendante de la fréquence ait déjà été mentionnée, le travail de thèse de Floer a permis de concevoir le concept suivant [60].

Profitant de la mise à disposition d'un nouveau canal en Europe, nous proposons une nouvelle conception bi-bande. Pour obtenir deux bandes indépendantes, une petite boucle « défaut » est placée près d'une antenne UHF conventionnelle, et les deux agissent comme un transformateur. La bande de référence est fournie par l'antenne conventionnelle, et la bande du défaut détecte les changements environnementaux. Comme la conception d'un transpondeur de détection nécessite de rassembler plusieurs composants (antenne, circuit intégré et éléments de détection), plusieurs simulations sont nécessaires. La première étape consiste à concevoir l'antenne et à associer le circuit intégré correspondant. Ensuite, des éléments capteurs peuvent être ajoutés à l'antenne. Des optimisations sont nécessaires pour conserver toutes les caractéristiques souhaitées. Pour le moment, la conception obtenue n'a pas été compactée (ajout de lignes en méandre, d'une courbure au dipôle, ...). Comme le procédé Tageos est prévu pour la fabrication, les mêmes matériaux sont choisis pour la simulation (c'est-à-dire l'aluminium pour l'antenne et le PET pour le substrat). La puce NXP UCODE 7 a été choisie car, étant une des plus utilisées, son coût est réduit. De plus, avec son impédance imaginaire négative et forte, elle permet de réduire la taille de l'antenne (cf. 2.2.4.2 Types).

Afin d'évaluer les caractéristiques des composants utilisés, la conception a débuté par une simulation circuit avec le logiciel RFSim99. Dans la Figure 2-37 (gauche) est représenté le modèle électronique voulu pour notre conception. L'antenne dipôle est simulé par un port 75 Ω et son adaptation en fréquence l'est par l'association de 3 éléments : la bobine contenue dans l'élément transformateur, la résistance de 15 Ω , et le condensateur de 4,7 pF. Nous introduisons dans le modèle une autre

résonance avec un facteur de qualité plus grand, et donc avec moins de résistance. Afin de ne pas influencer la résonance principale de l’antenne, nous optons pour un couplage magnétique, représenté par un transformateur. De plus, dans le même but, son coefficient de couplage est faible.

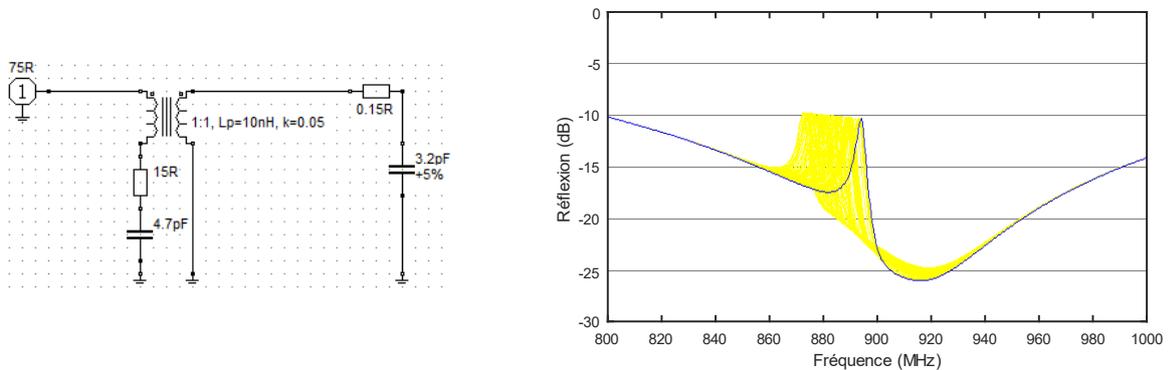


Figure 2-37 Modèle électronique de la nouvelle conception (gauche) et la simulation de la réflexion (droite)

Dans le Figure 2-37 (droite), on observe la simulation des paramètres S du modèle électronique. En bleu est représentée la courbe en fréquence des paramètres S avec le modèle de base. En jaune est représentée la variation de ses paramètres avec une variation de la valeur de capacité dans le circuit destinée à la mesure. Comme attendu, une variation de capacité du capteur de + 5% entraîne une forte évolution de la réflexion dans la bande située autour de la bande ETSI basse (866 – 868 MHz), et peu de variations autour de la bande ETSI haute.

Afin de convertir en modèle 3D l’antenne désirée, et surtout les composants modélisant le couplage magnétique, nous faisons appel à une simple boucle. Afin d’obtenir un très faible couplage, celle-ci est très petite par rapport à la taille et décalée vers un bras de l’antenne dipôle.

Pour la réalisation du tag, une conception planaire est plus simple. Nous créerons la capacité sensible à l’aide de plusieurs électrodes interdigitées. Ce dernier composant sera donc placé en série avec la boucle de couplage magnétique.

La conception finale est illustrée en Figure 2-38.

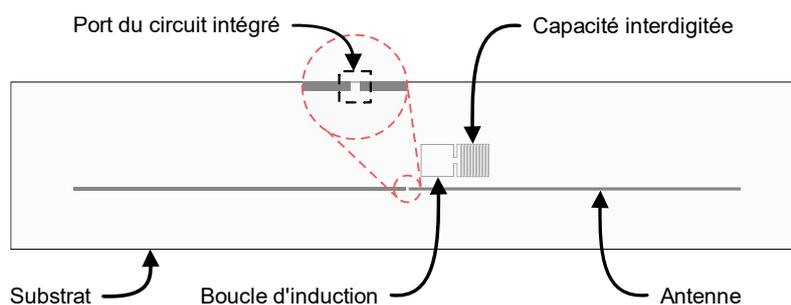


Figure 2-38 Conception du tag-capteur futur

Toutes les dimensions utilisées dans ce modèle sont définies en tant que paramètres. Ainsi, le processus d’optimisation automatique mais aussi de balayage des paramètres vont pouvoir être utilisés. Pour simplifier les étapes de conception 3D, nous avons créé des « macros ». Elles sont une suite d’opérations de conception 3D, parfois améliorées par l’appel aux fonctions internes de logiciel de conception. Par exemple, elles servent à créer les électrodes interdigitées, les réductions de connexion pour placer les puces, déposer un matériau pour correspondre aux formes, ... Les opérations de conceptions 3D sont, encore une fois, paramétrisées afin de permettre la modularité des objets 3D.

2.3. METHODOLOGIE DE LECTURE DU CAPTEUR RFID

2.3.1. Base logicielle

Pour obtenir des données à partir des transpondeurs, il faut un logiciel qui gère la communication RFID. Son objectif était d'abstraire un grand nombre d'opérations fastidieuses et de laisser le programmeur libre de concevoir des fonctionnalités avancées pour les transpondeurs. Sur la base du modèle OSI (Open Systems Interconnection), chaque couche est complétée par de nombreuses fonctions d'assistance pour aider le futur programmeur à accéder à la couche supérieure. Nous avons décidé de nous appuyer sur cette base pour développer un premier démonstrateur afin de tester les algorithmes de mesure. Cette architecture est construite autour du concept informatique « d'objet ». Un objet contient des propriétés et même d'autres objets. Plusieurs objets du même type peuvent être créés. L'architecture contient aussi beaucoup de définition d'objet « abstrait ». Ce type d'objet définit un type d'objet de base dont la création est impossible car incomplète. Ces définitions servent seulement à poser les bases communes à d'autres objets définis par la suite.

Le noyau de l'architecture intègre la gestion des tags et des lecteurs, en temps qu'objets. Ainsi, peu importe le modèle de tag et peu importe le moyen de détection. Une nouvelle détection d'un tag va déclencher l'inscription automatique dans une base de données commune au programme. S'il est de nouveau détecté par le même lecteur ou un autre, il va garder sa précédente définition et va juste mettre à jour sa source de détection. Cela permet de garder une trace du tag plus facilement dans le cadre d'une lecture se faisant sur plusieurs antennes ou, même, lecteurs.

Le noyau de l'architecture est prévu pour gérer toutes les opérations nécessaires pour rendre un lecteur RFID compatible avec les standards.

Pour notre application, nous nous servons de la couche gérant les protocoles RAIN. Profitant des définitions abstraites des tags et lecteurs, l'implémentation du protocole est plus simple. Finalement, en se servant de la librairie, un programme accède directement à des informations telles que le fabricant du tag, son modèle, son numéro de série, ... Ces informations sont précieuses dans le cadre d'une mesure RFID car l'atténuation du tag RFID dépend en partie de la puce utilisée. De plus, la mémoire utilisateur est accessible comme le serait n'importe quel stockage connecté à l'ordinateur exécutant le programme. Il sera donc aisé de stocker des points de calibration.

2.3.2. Compléments pour la mesure

Un des buts du travail présenté est de rendre fiable l'obtention de la valeur capteur par la lecture RFID. Pour atteindre l'autre objectif qui était de rendre cette mesure peu chère, nous avons fait le choix de transmettre la valeur capteur analogiquement. C'est-à-dire que la valeur sera numérisée qu'au niveau de la lecture RFID. D'autres solutions utilisent les capacités de conversion du signal analogique en signal numérique au niveau de la puce. La mesure est donc directement envoyée à l'aide du protocole RAIN. Ce choix de retarder la numérisation des valeurs entraîne une plus grande complexité pour rendre le signal fiable. En plus d'autres grandeurs d'influences sur le capteur vont se rajouter les erreurs dues à l'environnement EM. Afin de minimiser ces dernières, nous avons sélectionné 4 améliorations pour pouvoir rendre la mesure fiable.

Nous avons implémenté l'algorithme pour obtenir la puissance d'activation. Pour rappel, cet algorithme va chercher la puissance minimale que le lecteur doit envoyer pour obtenir une réponse du tag.

Cet algorithme a été entièrement testé et fonctionne, même en production. Il a été mis en œuvre dans l'application pour les partenaires commerciaux.

Si une variable exerce une influence sur la fréquence de résonance de l'antenne, cela implique qu'une mesure d'un paramètre d'amplitude à une fréquence fixe va aussi subir une variation. Comme décrit par la Figure 2-39, suivant si la position de la résonance, la variation peut changer de signe. Le paramètre mesuré n'a pas une variation monotone avec la variable cible.

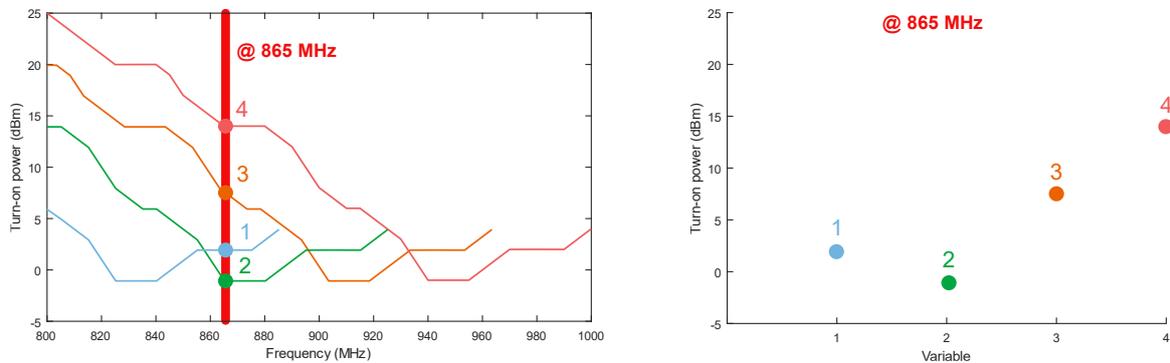


Figure 2-39 Décalage en fréquence due à une variable

Un balayage en fréquence peut aider pour corriger ce problème. En effet, une dérivée du paramètre d'amplitude par rapport à la fréquence peut aider à situer la variable. C'est pourquoi un algorithme de balayage en fréquence a été implémenté dans la librairie d'extension pour la mesure.

La largeur de la bande de fréquence sur laquelle le balayage se fait est importante. Plus la bande est petite, plus l'estimation de la variation sera difficile. Ce problème est plus présent sur des tags ciblant plusieurs bandes de fréquence (avec un facteur de qualité moindre) car la variation d'amplitude en fréquence va être faible. Actuellement, peu de pays européens ont mis en œuvre la bande de fréquence ETSI haute. Le calcul d'une dérivée en fréquence est alors compliqué.

La distance entre lecteur et tag constitue une grandeur d'influence pour une mesure prise de manière analogique. Afin d'annuler cet effet, il est nécessaire de pouvoir le quantifier à chaque instant. Pour cela, nous avons, dans un premier temps, implémenté la technique FD-PDoA (Frequency Domain Phase Difference of Arrival).

Contrairement aux méthodes d'estimation de la distance par atténuation du signal, elle n'est pas influencée par les atténuations du système et, notamment, par les directivités des antennes du lecteur et du tag.

La phase mesurée par le lecteur est simplement une comparaison entre le signal sortant du lecteur et le signal entrant. Ainsi, les contributions des câbles et de l'antenne doivent être prises en compte et la distance obtenue par la technique choisie intégrera ce parcours supplémentaire.

De plus, suivant la directivité de l'antenne lecteur, les ondes ne voyagent pas toutes en direction du tag ciblé. Les ondes incidentes sur l'antenne lecteur n'ont donc pas toutes subi un trajet simple entre lecteur et tag. Si elle est majoritaire, la contribution de ce « multi-trajet » fausse l'estimation de distance.

Même si l'estimation de la distance était plutôt correcte en chambre anéchoïque, ce dernier problème est prédominant dans l'environnement du laboratoire. Nous avons donc décidé de garder cette technique pour de futures améliorations.

2.4. CONCLUSION

La conception d'un tag-capteur RAIN doit tenir compte d'un grand nombre de paramètres.

Afin de minimiser les coûts et s'engager vers une conception plus respectueuse de l'environnement, le tag-capteur utilise comme corps d'épreuve un biopolymère : le gluten de blé. Il sert d'interface entre les mesurandes (température, humidité, concentration en CO₂ et autres composés organiques volatiles) et le circuit électronique. Les mesurandes jouent sur la permittivité du biopolymère. Pour pallier les controverses dues à l'utilisation du gluten, nous avons vu que d'autres biopolymères pourraient le remplacer avec les mêmes fonctions. Nous pouvons également moduler leurs réactions aux mesurandes par l'ajout d'éléments simples tels que des plastifiants ou des régulateurs alimentaires de pH.

Afin que la conception du transducteur s'intègre dans la conception du tag RFID flexible, nous optons pour une capacité interdigitée. En effet, une capacité est le composant électronique le mieux à même de convertir une variation de permittivité en variations d'impédance. Un outil de simulation a été testé et son bon fonctionnement nous permettra de plus facilement estimer la valeur de capacité en fonction des dimensions de la capacité interdigitée, et réciproquement. Contrairement à des capacités plus classiques, sa conception est planaire. Elle permet donc une fabrication avec le reste de l'antenne du tag RFID. Des outils de simulation ont été mis en œuvre pour maximiser la sensibilité du transducteur et l'adapter au circuit de l'antenne dans lequel il va prendre place.

Nous avons fait le choix d'une antenne dipôle courbée pour limiter l'encombrement, et donc la taille du tag. De plus, la lisibilité du tag peu importe l'orientation contraignait une directivité omnidirectionnelle. Afin de coupler le capteur avec l'antenne du tag, nous avons d'abord choisi de l'inclure dans le circuit de l'antenne. Ainsi, la capacité interdigitée s'intègre au montage T-match de l'antenne et va moduler son adaptation.

Dans un concept avancé, nous explorons une piste afin de créer un capteur-tag RFID combinant tag de référence et tag-capteur. Nous avons démontré qu'il était possible de concevoir un tag RFID simple dédié à une bande de fréquence et d'y coupler magnétiquement un résonateur prévu pour une autre bande. Le résonateur sera équipé d'un capteur jouant sur son adaptation en fréquence, et donc indépendant de la bande de fréquence principale du tag RFID.

Au cours de ce travail de conception, de nombreux outils informatiques ont été développés dans le but de faciliter la conception future de tag-capteur RFID et des solutions de lecture associées.

Pour ces dernières, une librairie logicielle a été proposée. En intégrant une grande partie du protocole de communication RAIN, la librairie propose directement des fonctions complexes sur les tags. Il nous est plus facile par la suite d'intégrer des algorithmes pour récupérer le mesurande qui a permis la modulation de la transmission.

REFERENCES

- [1] A. Abdelnour, N. Fonseca, A. Rennane, D. Kaddour, et S. Tedjini, « Design of RFID Sensor Tag for Cheese Quality Monitoring », in *2019 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS)*, juin 2019, p. 290-292. doi: 10.1109/MWSYM.2019.8700769.
- [2] R. Bhattacharyya, C. V. Di Leo, C. Floerkemeier, S. E. Sarma, et L. Anand, « RFID Tag Antenna Based Temperature Sensing Using Shape Memory Polymer Actuation », présenté à *SENSORS, 2010 IEEE*, Kona, HI, USA, nov. 2010. doi: 10.1109/ICSENS.2010.5690951.
- [3] S. Caizzone, C. Occhiuzzi, et G. Marrocco, « Multi-chip RFID antenna integrating shape-memory alloys for temperature sensing », in *Proceedings of the 5th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)*, Rome, Italy, avr. 2011, p. 2810-2813. [En ligne]. Disponible sur: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5782163/>
- [4] M. A. Ziai et J. C. Batchelor, « Multi-State Logging Freeze Detection Passive RFID Tags », *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. Volume:PP, p. 1, sept. 2014, doi: 10.1109/TAP.2014.2359474.
- [5] R. Gonçalves *et al.*, « RFID-Based Wireless Passive Sensors Utilizing Cork Materials », *IEEE Sensors Journal*, vol. 15, n° 12, p. 7242-7251, déc. 2015, doi: 10.1109/JSEN.2015.2472980.
- [6] National Institute for Occupational Safety and Health, « Approaches to safe nanotechnology managing the health and safety concerns associated with engineered nanomaterials. », mars 2009, doi: 10.26616/NIOSH PUB2009125.
- [7] S. D. Nguyen, N. Nguyen Le, P. T. Lam, E. Fribourg-Blanc, C. M. Dang, et S. Tedjini, « A wireless sensor for food quality detection by UHF RFID passive tags », in *2015 International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC)*, Ho Chi Minh City, Vietnam, oct. 2015, p. 258-263. doi: 10.1109/ATC.2015.7388330.
- [8] FlexSmell, « FlexSMELL - FP7 Marie Curie ITN Project », *FlexSmell*, août 31, 2015. <https://web.archive.org/web/20150831134703/http://www.flexsmell.eu:80/> (consulté le oct. 05, 2021).
- [9] O. Erkmén et T. F. Bozoglu, Éd., « Principles of Food Spoilage », in *Food Microbiology: Principles into Practice*, John Wiley & Sons, Ltd, 2016, p. 269-278. doi: 10.1002/9781119237860.ch15.
- [10] M.-K. Law, A. Bermak, et H. Cam Luong, « A Sub- μ W Embedded CMOS Temperature Sensor for RFID Food Monitoring Application », *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 45, n° 6, p. 1246-1255, juin 2010, doi: 10.1109/JSSC.2010.2047456.
- [11] K. Kapucu, J. L. Merino Panadés, et C. Dehollain, « Design of a passive UHF RFID tag for capacitive sensor applications », in *Proceedings of the 2013 9th Conference on Ph.D. Research in Microelectronics and Electronics (PRIME)*, juin 2013, p. 213-216. doi: 10.1109/PRIME.2013.6603157.
- [12] GS1, « GS1 General Specifications ». janv. 2021. Consulté le: sept. 19, 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.gs1.org/standards/barcodes-epcrfid-id-keys/gs1-general-specifications>
- [13] F. Bibi, « Study of dielectric properties at high frequency of plant polymer: the case study of wheat gluten proteins to be used as sensing materials of environmental markers of food quality in passive RFID systems », Thesis, University of Montpellier, Montpellier, France, 2015. Consulté le: janv. 24, 2019. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.theses.fr/2015MONT069>
- [14] Y. Belaizi, « Study and design of the passive RFID-sensor in the UHF band: application to agrifood diagnosis », Thesis, University of Montpellier, Montpellier, France, 2018. Consulté le: sept. 22, 2019. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.theses.fr/2018MONT061>
- [15] F. Gardiol, *Électromagnétisme*. Lausanne: Presses polytechniques et universitaires romandes, 2002.
- [16] J. Clerk Maxwell, *A Treatise on Electricity and Magnetism*. Oxford, England: Nature, 1873.
- [17] Keysight Technologies, « Basics of Measuring the Dielectric Properties of Materials ». [En ligne]. Disponible sur: <https://www.keysight.com/fr/en/assets/7018-01284/application-notes/5989-2589.pdf>

- [18] I. Bahl, P. Bhartia, et S. Stuchly, « Design of microstrip antennas covered with a dielectric layer », *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 30, n° 2, p. 314-318, mars 1982, doi: 10.1109/TAP.1982.1142766.
- [19] F. Mohammed Ali, « Estimate Microstrip Substrate Relative Dielectric Constant », *Microwaves & RF*, déc. 2007, Consulté le: sept. 07, 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.mwrf.com/technologies/components/article/21846559/estimate-microstrip-substrate-relative-dielectric-constant>
- [20] IBIS Open Forum, « Specifications - Touchstone 2.0 », *IBIS Open Forum*, avr. 24, 2009. <https://ibis.org/specs/#Touchstone> (consulté le août 26, 2021).
- [21] L. W. Nagel et D. O. Pederson, « SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) », EECS Department, University of California, Berkeley, UCB/ERL M382, avr. 1973. [En ligne]. Disponible sur: <http://www2.eecs.berkeley.edu/Pubs/TechRpts/1973/22871.html>
- [22] S. Jahn, M. Margraf, V. Habchi, et R. Jacob, « Qucs - Technical papers », *Qucs*, 2007. <http://qucs.sourceforge.net/tech/> (consulté le oct. 31, 2021).
- [23] C. Warwick, « In a Nutshell: How SPICE Works », *IEEE EMC Society Newsletter online*, juin 2009. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.emcs.org/acstrial/newsletters/summer09/HowSpiceWorks.pdf>
- [24] F. Bibi, C. Guillaume, B. Sorli, et N. Gontard, « Plant polymer as sensing material: Exploring environmental sensitivity of dielectric properties using interdigital capacitors at ultra high frequency », *Sens. Actuator B-Chem.*, vol. 230, p. 212-222, juill. 2016, doi: 10.1016/j.snb.2016.02.021.
- [25] S. H. M. Gorissen *et al.*, « Protein content and amino acid composition of commercially available plant-based protein isolates », *Amino Acids*, vol. 50, n° 12, p. 1685-1695, déc. 2018, doi: 10.1007/s00726-018-2640-5.
- [26] J. Poppe, « Gelatin », in *Thickening and Gelling Agents for Food*, A. P. Imeson, Éd. Boston, MA: Springer US, 1997, p. 144-168. doi: 10.1007/978-1-4615-2197-6_7.
- [27] W. Seilmeier, H.-D. Belitz, et H. Wieser, « Separation and quantitative determination of high-molecular-weight subunits of glutenin from different wheat varieties and genetic variants of the variety Sicco », *Z Lebensm Unters Forsch*, vol. 192, n° 2, p. 124-129, févr. 1991, doi: 10.1007/BF01202625.
- [28] H. Wieser, « Chemistry of gluten proteins », *Food Microbiology*, vol. 24, n° 2, p. 115-119, avr. 2007, doi: 10.1016/j.fm.2006.07.004.
- [29] F. Ortolan et C. J. Steel, « Protein Characteristics that Affect the Quality of Vital Wheat Gluten to be Used in Baking: A Review », *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, vol. 16, n° 3, p. 369-381, 2017, doi: <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12259>.
- [30] P. Singh, R. Kumar, S. N. Sabapathy, et A. S. Bawa, « Functional and Edible Uses of Soy Protein Products », *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, vol. 7, n° 1, p. 14-28, 2008, doi: 10.1111/j.1541-4337.2007.00025.x.
- [31] D. Fukushima, « Soy proteins », in *Handbook of Food Proteins*, G. O. Phillips et P. A. Williams, Éd. Woodhead Publishing, 2011, p. 210-232. doi: 10.1533/9780857093639.210.
- [32] I. J. Haug et K. I. Draget, « Gelatin », in *Handbook of Food Proteins*, G. O. Phillips et P. A. Williams, Éd. Woodhead Publishing, 2011, p. 92-115. doi: 10.1533/9780857093639.92.
- [33] B. T. O’Kennedy, « Caseins », in *Handbook of Food Proteins*, G. O. Phillips et P. A. Williams, Éd. Elsevier Science, 2011, p. 13-29. doi: 10.1533/9780857093639.13.
- [34] D. S. Horne, « Casein micelle structure: Models and muddles », *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, vol. 11, n° 2, p. 148-153, juin 2006, doi: 10.1016/j.cocis.2005.11.004.
- [35] B. Lebwohl, J. F. Ludvigsson, et P. H. R. Green, « Celiac disease and non-celiac gluten sensitivity », *BMJ*, vol. 351, p. h4347, oct. 2015, doi: 10.1136/bmj.h4347.
- [36] F. Bibi, M. Villain, C. Guillaume, B. Sorli, et N. Gontard, « A Review: Origins of the Dielectric Properties of Proteins and Potential Development as Bio-Sensors », *Sensors*, vol. 16, p. 1232, août 2016, doi: 10.3390/s16081232.

- [37] U. Kaatze, « Complex permittivity of water as a function of frequency and temperature », *J. Chem. Eng. Data*, vol. 34, n° 4, p. 371-374, oct. 1989, doi: 10.1021/je00058a001.
- [38] F. Bibi, C. Guillaume, A. Vena, N. Gontard, et B. Sorli, « Wheat gluten, a bio-polymer layer to monitor relative humidity in food packaging: Electric and dielectric characterization », *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 247, p. 355-367, août 2016, doi: 10.1016/j.sna.2016.06.017.
- [39] Keysight, « N1501A Dielectric Probe Kit », *Keysight*. <https://www.keysight.com/fr/en/product/N1501A/dielectric-probe-kit.html> (consulté le juin 15, 2021).
- [40] R. Igreja et C. J. Dias, « Extension to the analytical model of the interdigital electrodes capacitance for a multi-layered structure », *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 172, n° 2, p. 392-399, déc. 2011, doi: 10.1016/j.sna.2011.09.033.
- [41] R. Igreja et C. J. Dias, « Analytical evaluation of the interdigital electrodes capacitance for a multi-layered structure », *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 112, n° 2, p. 291-301, mai 2004, doi: 10.1016/j.sna.2004.01.040.
- [42] D. U. Erbulut, S. H. Masood, V. N. Tran, et I. Sbarski, « A novel approach of measuring the dielectric properties of PET preforms for stretch blow moulding », *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 109, n° 5, p. 3196-3203, 2008, doi: 10.1002/app.28378.
- [43] C. A. Balanis, *Antenna theory: analysis and design*, Fourth edition. Hoboken, New Jersey: Wiley, 2015.
- [44] K. N. Sterba, « Non-Resonant vs. Resonant Antennas », *Palomar Engineers*[®]. <https://palomar-engineers.com/non-resonant-vs-resonant-antennas> (consulté le août 23, 2021).
- [45] H. R. Hertz, *Electric Waves: Being Researches on the Propagation of Electric Action with Finite Velocity through Space*. Macmillan, 1893. Consulté le: août 21, 2020. [En ligne]. Disponible sur: <http://archive.org/details/electricwavesbe00jonegoog>
- [46] G. Marconi, « Transmitting electrical signals », US586193A, juill. 13, 1897 Consulté le: juill. 29, 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://patents.google.com/patent/US586193/en>
- [47] T. Endo, Y. Sunahara, S. Satoh, et T. Katagi, « Resonant frequency and radiation efficiency of meander line antennas », *Electronics and Communications in Japan (Part II: Electronics)*, vol. 83, n° 1, p. 52-58, 2000, doi: 10.1002/(SICI)1520-6432(200001)83:1<52::AID-ECJB7>3.0.CO;2-7.
- [48] H. Raihani, A. Benbassou, M. El Ghzaoui, et J. Belkadid, « Performance evaluation of a passive UHF RFID tag antenna using the embedded T-Match structure », in *2017 International Conference on Wireless Technologies, Embedded and Intelligent Systems (WITS)*, avr. 2017, p. 1-6. doi: 10.1109/WITS.2017.7934636.
- [49] Kane Yee, « Numerical solution of initial boundary value problems involving maxwell's equations in isotropic media », *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 14, n° 3, p. 302-307, mai 1966, doi: 10.1109/TAP.1966.1138693.
- [50] P. B. Johns et R. L. Beurle, « Numerical solution of 2-dimensional scattering problems using a transmission-line matrix », *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, vol. 118, n° 9, p. 1203-1208, sept. 1971, doi: 10.1049/piee.1971.0217.
- [51] T. Weiland, « A discretization model for the solution of Maxwell's equations for six-component fields », *Archiv Elektronik und Uebertragungstechnik*, vol. 31, p. 116-120, avr. 1977, Consulté le: avr. 01, 2021. [En ligne]. Disponible sur: <http://adsabs.harvard.edu/abs/1977ArEIU..31..116W>
- [52] T. U. of Darmstadt, « FIT / MAFIA », *Technical University of Darmstadt*. https://www.temf.tu-darmstadt.de/forschung_5/fitmafia/fit.en.jsp (consulté le avr. 01, 2021).
- [53] T. Barts et al., « Maxwell's grid equations », *Frequenz*, vol. 44, n° 1, Art. n° 1, janv. 1990, Consulté le: juin 03, 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://eref.uni-bayreuth.de/31143/>
- [54] M. G. Larson et F. Bengzon, « Electromagnetics », in *The Finite Element Method: Theory, Implementation, and Applications*, M. G. Larson et F. Bengzon, Éd. Berlin, Heidelberg: Springer, 2013, p. 327-354. doi: 10.1007/978-3-642-33287-6_13.
- [55] I. Munteanu et T. Weiland, « RF & Microwave Simulation with the Finite Integration Technique – From Component to System Design », in *Scientific Computing in Electrical Engineering*, G.

- Ciuprina et D. Ioan, Éd. Berlin, Heidelberg: Springer, 2007, p. 247-260. doi: 10.1007/978-3-540-71980-9_26.
- [56] Dassault Systèmes, « CST STUDIO SUITE Help ». 2019.
- [57] J.-P. Berenger, « A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves », *Journal of Computational Physics*, vol. 114, n° 2, p. 185-200, oct. 1994, doi: 10.1006/jcph.1994.1159.
- [58] K. W. Farag, J. G. Lyng, D. J. Morgan, et D. A. Cronin, « Dielectric and thermophysical properties of different beef meat blends over a temperature range of -18 to $+10^{\circ}\text{C}$ », *Meat Science*, vol. 79, n° 4, p. 740-747, août 2008, doi: 10.1016/j.meatsci.2007.11.005.
- [59] B. Riddle, J. Baker-Jarvis, et J. Krupka, « Complex permittivity measurements of common plastics over variable temperatures », *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 51, n° 3, p. 727-733, mars 2003, doi: 10.1109/TMTT.2003.808730.
- [60] C. Floer, « Capteurs à ondes élastiques confinées, sans fil et étirables : application à l'électronique imperceptible sur peau », These de doctorat, Université de Lorraine, 2019. Consulté le: août 18, 2021. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.theses.fr/2019LORR0188>
- [61] European Cooperation for Space Standardization, « Technology readiness level (TRL) guidelines ». European Cooperation for Space Standardization, janv. 03, 2017. Consulté le: août 14, 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://ecss.nl/home/ecss-e-hb-11a-technology-readiness-level-trl-guidelines-1-march-2017/>

ANNEXE 2-A TECHNOLOGY READINESS LEVEL

Dans les années 1970, la National Aeronautics and Space Administration (NASA) aux États-Unis a introduit le « Technology Readiness Level » (TRL) pour déterminer si une technologie est sur le point d'être commercialisée. En 2013, pour parler le même langage, la Coopération européenne pour la normalisation spatiale (ECSS) s'est jointe à l'Organisation internationale de normalisation (ISO) pour publier la norme ISO 16290 [61]. Destiné à l'origine à coordonner le développement de dispositifs spatiaux, le TRL peut être facilement appliqué au développement de divers dispositifs.

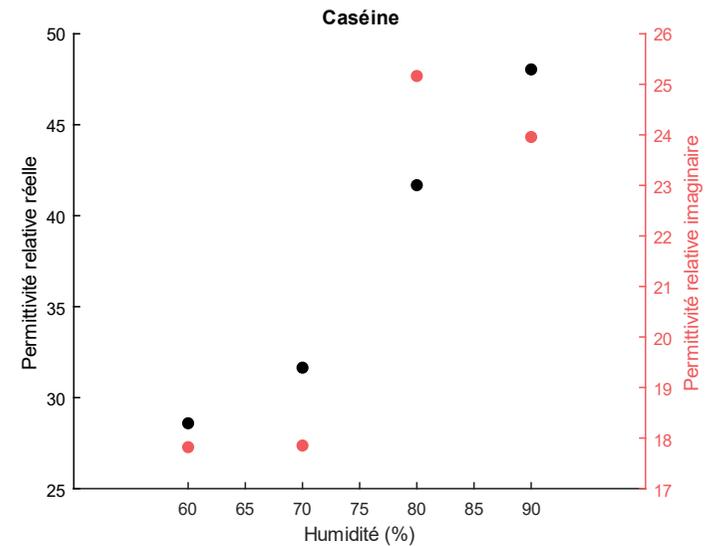
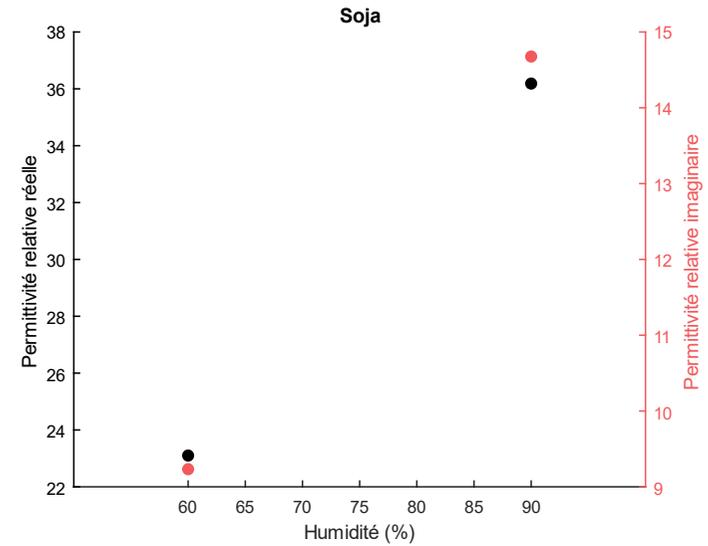
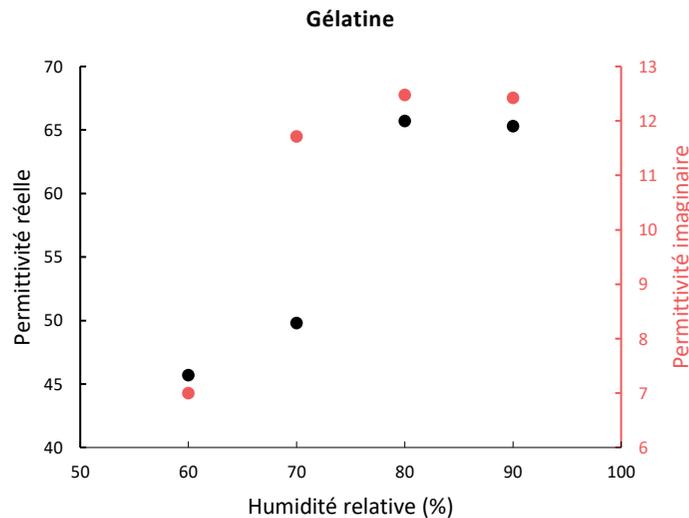
TRL	Définition de la norme ISO 16290
1	Principes de base observés et rapportés
2	Formulation d'un concept technologique et/ou d'une application
3	Fonction critique analytique et expérimentale et/ou preuve de concept caractéristique
4	Vérification fonctionnelle des composants et/ou des cartes d'interconnexion dans un environnement de laboratoire
5	Fonction critique du composant et/ou du tableau d'essai dans un environnement pertinent
6	Modèle démontrant les fonctions critiques de l'élément dans un environnement pertinent.
7	Modèle démontrant la performance de l'élément pour l'environnement opérationnel
8	Système réel achevé et accepté pour le vol (« qualifié pour le vol »)
9	Système réel « éprouvé en vol » par des opérations de mission réussies

ANNEXE 2-B MESURES DES PROPRIETES DIELECTRIQUES DE BIOPOLYMERES

Sensibilité à l'humidité

Nous avons utilisé pour ces expériences la chambre climatique HPP110 de Memmert. Toutes les expériences présentées ici ont été menées à 20 °C. Bien que la mesure soit faite sur une large gamme de fréquence, nous représentons ici seulement le point pris pour 866 MHz, car l'évolution du mesurande entraîne un gain uniforme sur toute la gamme.

La stabilisation a été un problème dans les expériences présentées ici. En effet, l'expérience devait être menée sur un échantillon épais (> 5 mm) pour que les lignes de champ créées par la sonde diélectrique n'interfèrent pas avec un autre matériau. L'absorption de l'humidité par le gel de biopolymère était donc plus longue.

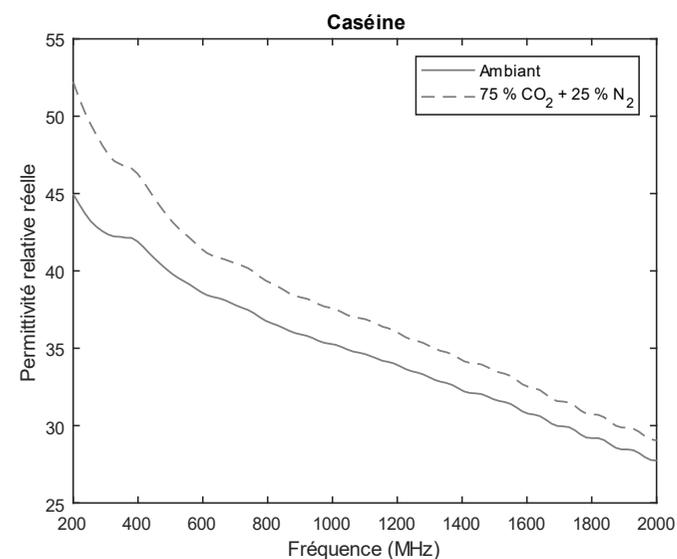
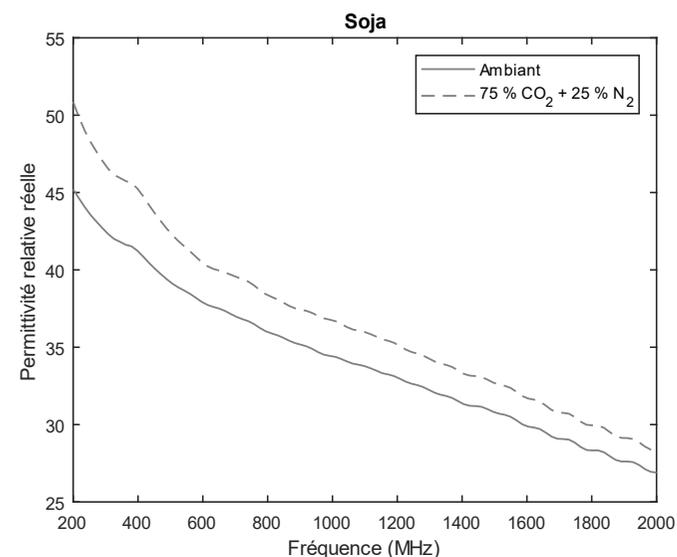
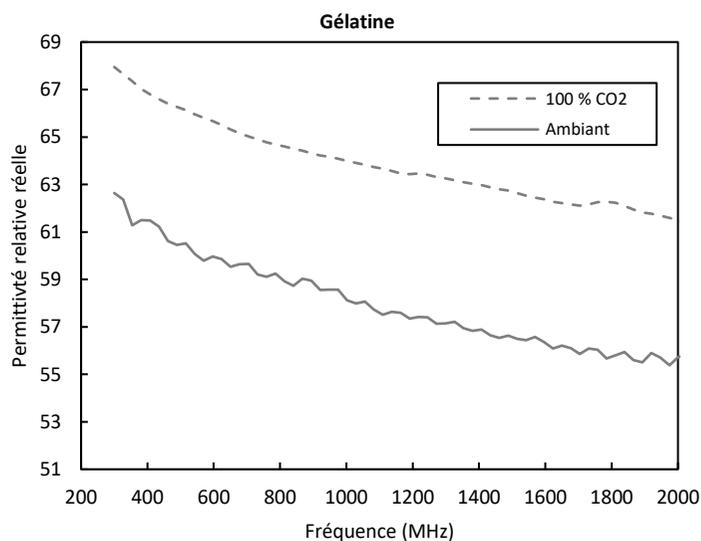


Sensibilité au dioxyde de carbone

Toutes les études sur la sensibilité au CO₂ ont été menées à saturation en humidité. Pour cela, les échantillons de gel de biopolymère ont été placés dans une cellule hermétique avec un récipient d'eau. La cellule est placée dans un environnement à 20 °C.

Dans un premier temps, nous caractérisons juste la réaction des biopolymères à un échelon important en concentration de CO₂.

Les échantillons de gélatine ont subi une variation entre l'air ambiant et une atmosphère composée exclusivement de CO₂. Pour ce dernier palier, nous injectons directement le contenu d'une bouteille de CO₂ compressé. Pour la seconde série de mesures impliquant un gel d'isolat de protéines de soja et un de caséine, nous avons choisi de ne plus imposer de changement aussi brusque et choisissons d'injecter un mélange permis par l'IGA-001 de Hiden Isochema, 75 % de CO₂ et 25 % de N₂.



Chapitre 3 : Essais et validation du capteur RFID

SOMMAIRE

Chapitre 3 : Essais et validation du capteur RFID.....	124
2.1. Contexte	127
2.2. Fabrication du capteur RFID	128
2.2.1. Réalisation de capteur RFID	128
2.2.2. Dépôt du biopolymère	129
2.3. Contrôle du capteur RFID	132
2.3.1. Adaptation de l'antenne.....	132
2.3.2. Fonctionnement complet.....	134
2.4. Tests en humidité	136
2.4.1. Banc de mesures et méthodes	136
2.4.1.1. Chambre climatique	136
2.4.1.2. Lecture RFID dans la chambre climatique	138
2.4.2. Résultats	139
2.5. Essais et validation du capteur RFID au dioxyde de carbone.....	142
2.5.1. Banc de mesures et méthodes	142
2.5.1.1. Cellule de mesures sous environnement gazeux	142
2.5.1.2. Chambre thermostatique et contrôle des paramètres environnementaux	144
2.5.1.3. Banc de mesures avec automatisation de la lecture RFID	146
2.5.2. Résultats	147
2.6. Conclusion	150
Références.....	152

3.1. CONTEXTE

Pour rappel, le but de cette thèse est de démontrer que le concept de capteur RFID UHF passif est possible à fabriquer industriellement, mais aussi que son utilisation en milieu opérationnel est validée. Après une étude poussée sur le concept présentée dans le chapitre 2, nous avons adapté notre design aux contraintes d'une part du projet H2020 Glopack à savoir qu'en plus d'une utilisation pour de la gestion logistique, les consommateurs doivent pouvoir accéder à des informations utiles ; d'autre part nous nous sommes alignés sur les techniques industrielles de fabrication des étiquettes RFID en grand volume. C'est donc notre partenaire TAGEOS SAS qui a fabriqué les préséries des capteurs RFID, présentées dans la Figure 3-1.

Donc vis-à-vis des travaux antérieurs [1], cela a entraîné des modifications de matériaux utilisés. En effet, le polyimide composant le substrat a été remplacé par du PET (Polyéthylène Téréphtalate), et le cuivre qui composait l'antenne a été remplacé par de l'aluminium. Par ailleurs, la puce Murata MagicStrap, basée sur NXP UCODE G2XM, a été remplacé par la puce EM4423 de EM Microelectronics. Le processus de dépôt de la puce a été modifié également, passant d'une soudure manuelle à un collage semi-automatisé avec une colle conductrice anisotropique déjà utilisée industriellement.

Dû aux besoins du projet GLOPACK de communiquer avec le consommateur, l'ajout d'une communication NFC a entraîné l'ajout d'une antenne dédiée. Cela a induit une modification de la conception du circuit de l'antenne RAIN et un repositionnement du capteur. Celui-ci est inclus dans le modèle T-match d'adaptation de l'antenne RAIN avec la puce. Nous avons profité de ce changement pour modifier également le capteur. En effet, la capacité interdigitée utilise maintenant la résolution maximale du processus de fabrication, dans le but de réduire l'influence d'éléments extérieurs proches.

Ces changements importants induisent une nouvelle étape de validation.

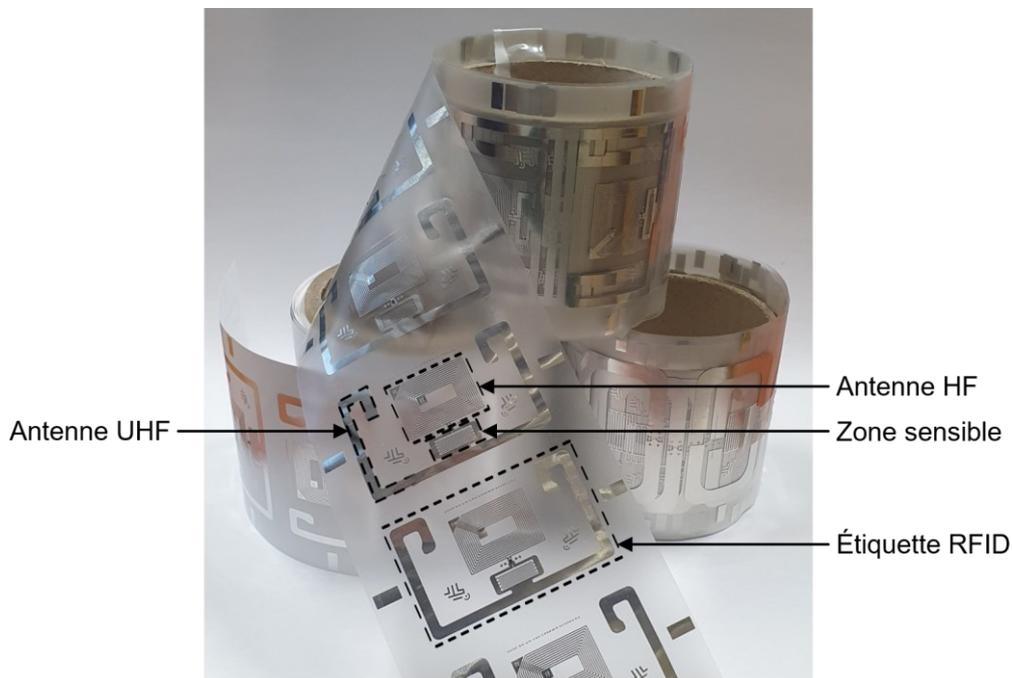


Figure 3-1 Pré-industrialisation du tag-capteur

Dans ce chapitre, nous allons détailler les différentes étapes de fabrication de notre capteur RFID ainsi que le bon fonctionnement du tag en tant que capteur d'humidité et de dioxyde de carbone (CO₂). Pour cela, nous étudions les méthodes de fabrication utilisées par Tageos. Nous étudierons également les méthodes d'application de la couche sensible de biopolymère afin de choisir celle adaptée au

processus d'enduction en laboratoire, pour le moment, et au processus industriel, pour la suite. Pour attester de la bonne maîtrise de la modélisation EM, nous comparerons les valeurs d'impédance de l'antenne obtenues par simulation et par mesure effectuée à l'analyseur de réseau vectoriel. Pour confirmer le choix de la puce et sa bonne association avec l'antenne, nous mesurerons également la puissance d'activation d'une série de tag-capteur.

La concentration en dioxyde de carbone est le mesurande choisi comme cible pour notre application agro-alimentaire. En effet, la diffusion de CO₂ est un des signes de la présence de micro-organismes, et donc de dégradation alimentaire. Dans un emballage hermétiquement fermé tel que celui visé par l'application, le CO₂ va s'accumuler. Mais, pour notre tag-capteur, l'évaluation de la sensibilité en humidité est essentielle car elle va de pair avec celle du CO₂. En effet, le CO₂ se dissout dans l'eau (apportée par l'humidité) et entraîne la libération d'un proton. Ce dernier va participer aux phénomènes diélectriques et constituer la sensibilité au CO₂ du capteur final. De plus, pour les aliments peu transformés, l'eau contenue va se vaporiser dans l'emballage pour saturer l'atmosphère en humidité. Dans le cas d'une brèche importante dans l'emballage, l'humidité va retomber à la valeur ambiante. Ici, l'évaluation de la sensibilité du tag-capteur à l'humidité peut être cruciale pour détecter une rupture.

Au cours de mon travail de thèse, plusieurs étapes de conception en collaboration avec Tageos se sont déroulées. Ainsi, trois générations de tags-capteurs et plusieurs modèles se sont succédé. Je présenterai dans ce chapitre uniquement les expériences menées sur le tag-capteur final.

3.2. FABRICATION DU CAPTEUR RFID

3.2.1. Réalisation de capteur RFID

Pour l'application industrielle du projet H2020 GLOPACK, Tageos a été choisi pour assurer la fabrication du tag-capteur RFID. Tageos est une société basée à Montpellier, créée en 2007 [2]. Tageos a connu l'essor de la technologie RFID en offrant à ses clients une technologie de fabrication innovante et économique en termes de coût et de matériaux utilisés. En effet, utilisant une technique de dépôt par arc électrique, ils sont capables de déposer l'aluminium qui constituera le circuit de l'antenne directement sur du papier. Le motif du circuit est le négatif du masque placé devant le papier au moment du dépôt. Cette méthode n'utilise pas de procédés de dépôts ou de gravure chimique et permet donc de réduire les étapes de fabrication et le matériel utilisé.

Pour notre application, le dépôt sur papier ne sera pas utilisé dans un premier temps. En effet, la permittivité du papier est sensible à l'humidité [3]. Ainsi, la sensibilité de notre capteur ne serait pas seulement due au biopolymère déposé mais également au substrat papier. Pour simplifier la conception de notre capteur, nous utiliserons dans un premier temps un substrat PET, communément utilisé pour la fabrication de tags RFID. En effet, l'humidité a très peu d'impact sur la permittivité du PET [4].

Utiliser le substrat papier pour augmenter la sensibilité du capteur sera une perspective de notre projet. De plus, le papier est un matériau biodégradable contrairement aux matériaux plastiques (PET compris).

Une fois les antennes déposées sur le substrat souple de PET, le collage de la puce sur l'antenne est effectué par un banc de production automatique (Muelbauer FCM10K), présenté dans la Figure 3-2. Ce dernier contrôle le bon placement des contacts de l'antenne de manière optique. Il dépose ensuite dessus une petite quantité de colle conductrice anisotropique (DELO MONOPOX AC245) et la puce EM Microelectronic EM4423. Une pression de 1 Newton et une température de 180 °C sont ensuite

appliquées pendant 7 secondes. Cette étape de traitement thermique permet à la colle de sécher pour assurer une bonne fixation et conductivité.



Figure 3-2 Banc de production automatique Muelbauer FCM10K

3.2.2. Dépôt du biopolymère

Afin de correctement concevoir le tag-capteur, le dépôt du biopolymère doit être d'épaisseur précise. Une solution semi-automatique est choisie. Comme indiqué dans le Tableau 3-1, de nombreuses méthodes de dépôt existent mais leur utilisation dépend de plusieurs paramètres du matériau déposé : viscosité, épaisseur finale, précision et vitesse maximale de dépôt.

PROCESSUS	VISCOSITE (mPa.s)	ÉPAISSEUR HUMIDE (µm)	PRECISION SUR L'ÉPAISSEUR DEPOSEE (%)	VITESSE MAXIMALE (m/min)
ROULEAU ENGRAVE	20 - 1000	5 - 50	10	250
TREMPAGE	20 - 1000	5 - 100	10	150
ROULEAU	20 - 1000	10 - 200	8	150
ROULEAU INVERSE	100 - 50000	5 - 400	5	400
COUTEAU D'AIR	5 - 500	2 - 40	5	500
COUTEAU SUR ROULEAU	100 - 50000	25 - 750	10	150
LAME	500 - 40000	25 - 750	7	1500
FENTE	5 - 20000	15 - 250	2	500
EXTRUSION	50000 - 5000000	15 - 750	5	700
TOBOGAN	5 - 500	15 - 250	2	300
RIDEAU	5 - 500	2 - 500	2	300
HELIOGRAVURE	1 - 5000	1 - 25	2	700
HELIOGRAVURE AVEC OFFSET	100 - 50000	5 - 400	5	300
MICROGRAVURE	1 - 4000	1 - 40	2	100

Tableau 3-1 Méthodes d'enduction [10]

Pour enduire la couche sensible sur les tags-capteurs, il est nécessaire de préparer une solution liquide de gluten de blé selon le protocole suivant [6]. Une solution de sulfite de sodium (0,06 g/50 mL d'eau) est mélangée à une solution de poudre de gluten (30 g/50 mL de sulfite de sodium) et on attendra pendant 30 minutes. Après un ajustement du pH à 4 avec un ajout d'acide acétique (3,4 mL à 50/50 v/v), de l'eau distillée est rajoutée pour obtenir un volume final de 130 mL. La solution doit être suffisamment bien mélangée afin d'être homogène.

Dans la solution préparée avec le protocole précédent, la concentration massique de gluten est de 23 %. Afin de comparer les propriétés des autres biopolymères envisagés, nous ajustons les

concentrations massiques de soja et de caséine pour leurs préparations à 20 %. De plus, cela permettra d'anticiper leurs futurs usages.

Les mesures de viscosité, présentées dans la

Figure 3-3, sont effectuées à l'aide du rhéomètre RheolabQC d'Anton Paar [7]. Les analytes étant plus visqueux que l'eau, le gobelet de mesure C-DG42 et la tête CC17 ont été choisis pour cette expérience.

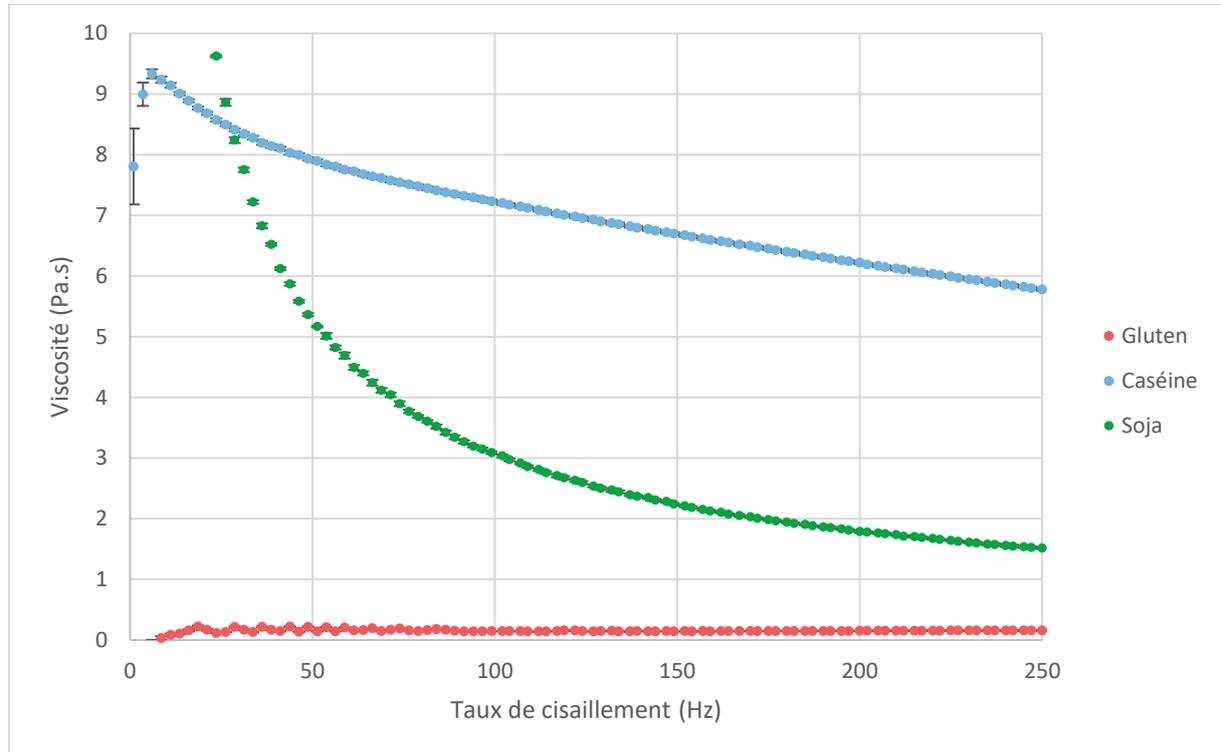


Figure 3-3 Viscosité en fonction du taux de cisaillement des solutions de biopolymère

L'objectif ici est d'obtenir une fine couche de biopolymère d'une dizaine de micromètres. La viscosité de la solution de gluten est d'environ 1,5 Pa.s, comme le montre la

Figure 3-3. Par conséquent, la solution de rouleau engravé, ou « barre de Mayer » [8], est choisie pour le dépôt en laboratoire.

Comme décrit dans la Figure 3-4, la solution de rouleau engravé consiste à :

1. Appliquer une couche épaisse de solution sur le substrat
2. Racler la solution jusqu'au substrat avec le rouleau engravé
3. Laisser la couche de solution restante s'étirer
4. Laisser sécher

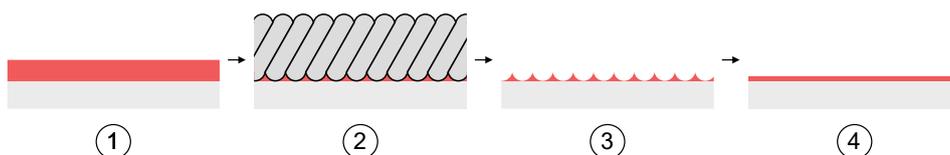


Figure 3-4 Étapes de l'enduction avec un rouleau engravé

L'épaisseur de la couche résultante est liée au rayon du fil qui s'enroule autour de la tige et peut être obtenue avec l'Équation 3-1 en relation avec les dimensions évoquées dans la Figure 3-5.

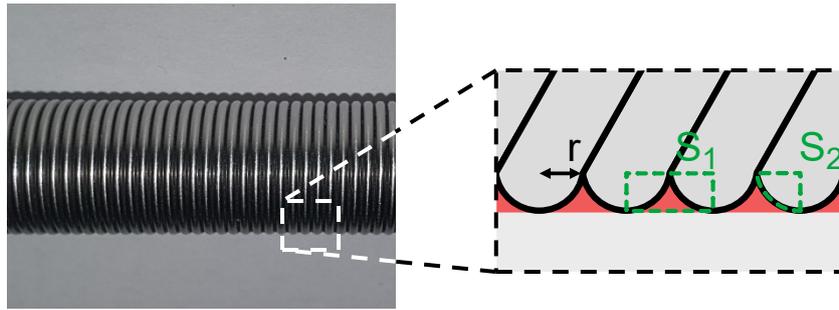


Figure 3-5 Épaisseur du revêtement en fonction du rayon du fil de la barre de Mayer

$$t = \frac{S_1 - 2S_2}{2r} = \frac{2r \cdot r - 2 \cdot \left(\frac{\pi \cdot r^2}{4}\right)}{2r} = r \cdot \left(1 - \frac{\pi}{4}\right) \approx 21,5 \% \cdot r$$

Équation 3-1 Épaisseur du revêtement en fonction du rayon du fil de la barre de Mayer

Pour déposer une couche d'épaisseur spécifique, nous utilisons une machine de dépôt semi-automatique « K Control Coater » de « RK Print Coat Instruments » avec les tiges K101 [9].

Pour le procédé industriel de dépôt de la couche sensible, Tageos utilisera une technique déjà bien maîtrisée, la flexographie. Similaire à l'héliogravure avec « offset », présentée dans la Figure 3-6, elle diffère sur l'emplacement du motif qui se trouve le rouleau « offset ». Également compatible avec les matériaux utilisés, cette méthode permet d'augmenter la précision sur l'épaisseur ainsi que la vitesse de dépôt, comme décrit par le Tableau 3-1.

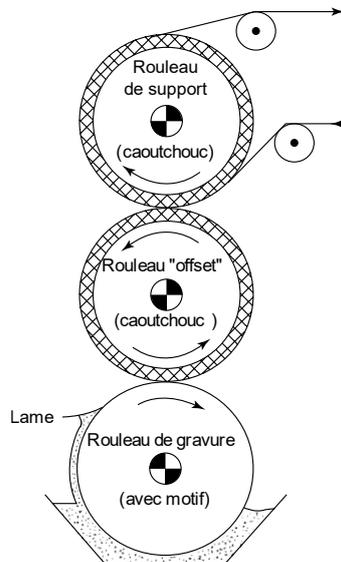


Figure 3-6 Héliogravure avec « offset » [5]

Pour mieux connaître l'évolution du rapport entre la couche humide et la couche sèche, plusieurs couches humides de 80 µm d'épaisseur sont appliquées sur du PET (polyéthylène téréphtalate) et séchées pendant 1 jour à température et humidité ambiantes.

Comme le montre la Figure 3-7, les mesures ont été réalisées avec un profilomètre optique Photomap 3D de Fogale Nanotech. Par interférométrie, l'appareil mesure la hauteur de l'échantillon sur toute une surface. Ainsi, il permet d'obtenir des informations sur les déformations du matériau flexible. Ces informations permettent de corriger physiquement les mesures par l'ajustement de l'échantillon. De

plus, avec le logiciel Gwyddion, il a été possible de corriger numériquement cette déformation et d'obtenir des mesures plus précises et exactes.

Sur 8 mesures effectuées sur la limite de la couche de gluten et sur 0,561 mm², la hauteur du pas est, en moyenne, de 14,6 µm. Cette mesure a été intégrée dans notre modèle de tag-capteur afin d'obtenir des résultats plus réalistes.

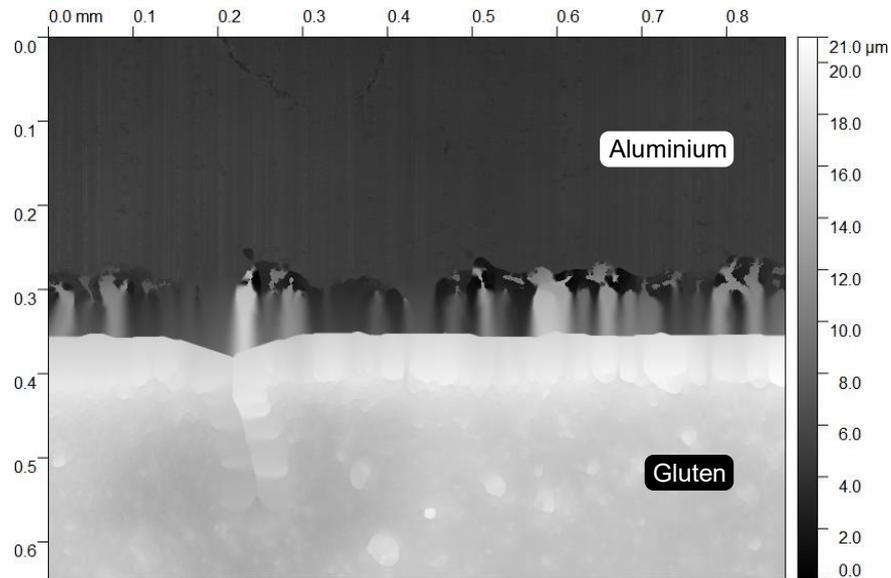


Figure 3-7 Topographie du dépôt de biopolymère sur de l'aluminium

Comme observé précédemment dans la section 2.2.3.1, la sensibilité de la capacité interdigitée est croissante avec l'épaisseur de la couche sensible, mais son augmentation diminue. Aussi, nous avons comme perspective d'améliorer la sensibilité de cette manière. Comme indiqué dans le Tableau 3-1, nous avons employé la méthode du rouleau engravé en dehors des épaisseurs recommandées. Ainsi, il faudra attendre l'industrialisation complète du tag-capteur pour que la méthode de flexographie permette de déposer une couche plus épaisse.

3.3. CONTROLE DU CAPTEUR RFID

3.3.1. Adaptation de l'antenne

A la réception de l'antenne réalisée par Tageos, nous souhaitons vérifier son bon accord avec les caractéristiques de la puce. Pour cela, nous réalisons des mesures de paramètres S sur l'antenne.

Un VNA (analyseur de réseau vectoriel, en français) peut mesurer l'impédance en fonction de la fréquence et obtenir les paramètres S d'une ligne de transmission. Il peut être utilisé avec plusieurs ports mais la configuration habituelle de ces appareils utilise 2 ports. Le VNA génère un signal RF sur l'un de ces ports grâce à un oscillateur commandé par tension. Le signal traverse le dispositif à mesurer, une partie est réfléchi et une autre est transmise aux autres ports. Ces signaux sont mesurés pour obtenir le rapport de puissance par rapport au signal envoyé en fonction de la fréquence.

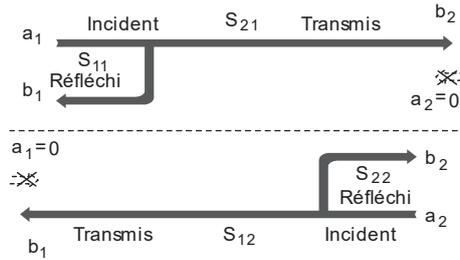


Figure 3-8 Mesure des paramètres S dans un VNA à 2 ports [26].

Comme défini par le théorème du transfert de puissance maximum, l'impédance des ports du VNA affecte les paramètres S. Lorsque les impédances du VNA et de la ligne mesurée sont très différentes, la plupart de la puissance envoyée par le VNA est réfléchi et les mesures sont moins précises.

Un circuit à tester est rarement connecté directement au VNA. Il l'est à travers de câbles ou d'adaptateurs. Pour compenser leur effet, le VNA dispose d'une fonction de calibration. Pour calibrer le VNA, 3 conditions de connexion sont à définir : un circuit ouvert, un court-circuit, et un circuit présentant la même impédance que l'entrée/sortie du VNA.

Nous avons donc réalisé un kit de calibration adapté à la configuration du circuit cible. En effet, celui-ci utilise une couche d'aluminium de 10 µm sur un substrat en PET de 50 µm d'épaisseur. La puce RAIN sera reliée au circuit par de la colle conductrice DELO MONOPOX AC365. Aussi, pour réaliser notre kit de calibration, nous relierons, de la même façon, une résistance de 50 Ω à un morceau de circuit.

Nous mesurerons les paramètres S des antennes-capteurs avant et après l'application de la couche de biopolymère. Et nous comparons les mesures aux paramètres S obtenus lors de la simulation du même modèle.

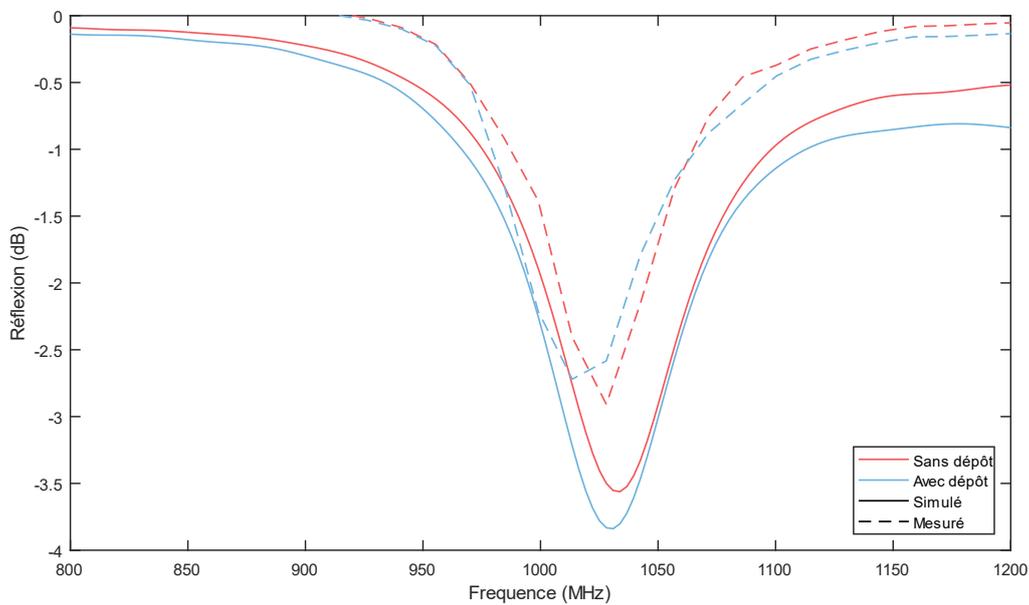


Figure 3-9 Comparaison de la réflexion entre le tag-capteur simulé et réel

Dans la Figure 3-9, on observe un décalage en ratio de puissance entre les valeurs simulés et mesurés. On attribue cela à un défaut de calibration, puisque, avant 900 MHz, certaines valeurs sont supérieures à 0 dB, ce qui est physiquement impossible pour notre antenne-capteur.

Pour ce qui est du comportement en fréquence, les courbes mesurées correspondent aux courbes simulées. Dans la Figure 3-9, on observe un décalage moyen de 8,7 MHz entre les mesures avec et sans le dépôt, et ce dans les valeurs simulées et mesurées.

Cette observation valide à la fois :

- L'antenne-capteur réelle, parce qu'elle correspond aux simulations qui ont permises d'associer la puce RAIN,
- La technique de simulation, parce qu'on observe une bonne corrélation avec les résultats réels,
- Et, la permittivité et l'épaisseur du dépôt du biopolymère car le décalage induit par celui-ci est le même entre courbes mesurées et simulées.

3.3.2. Fonctionnement complet

Afin de valider la bonne adaptation des antennes-capteurs avec la puce EM4423, nous souhaitons mesurer la puissance d'activation des tags-capteurs avec dépôt à différentes fréquences. La mesure de la puissance d'activation permet d'attester que le tag-capteur ainsi formé peut communiquer aux fréquences désirées. Plus basse est la valeur de puissance d'activation, meilleure est la communication entre le lecteur et le tag-capteur. Ces mesures seront effectuées pour toute la bande de fréquences concernée, c'est-à-dire la bande ETSI basse appliquée en France actuellement, 865,7 - 867,5 MHz. Comme le tag-capteur n'est pas dans son environnement cible, c'est-à-dire un emballage alimentaire très humide, nous étudierons celui-ci sur une gamme plus grande et adapterons cette gamme à l'instrument utilisé pour la mesure et à la configuration de la mesure.

Pour cette mesure, nous disposons de bancs de caractérisation de tags RFID Voyantic TagFormance. Ils permettent de balayer toutes les valeurs de puissance et de fréquence et de mesurer pour chacune d'entre elle le RSSI. La résolution du balayage dépend de l'appareil utilisé. L'appareil le plus performant à notre disposition est le modèle TagFormance Pro. Dans la bande Ultra-Hautes Fréquences et avec la licence que nous possédons, il peut balayer des fréquences allant de 800 à 1000 MHz, par pas de 0,1 MHz. Pour ce qui est de la puissance d'émission, il peut balayer de -20 à 30 dBm, par pas de 0,1 dBm. Mais la justesse est seulement de ± 1 dBm.

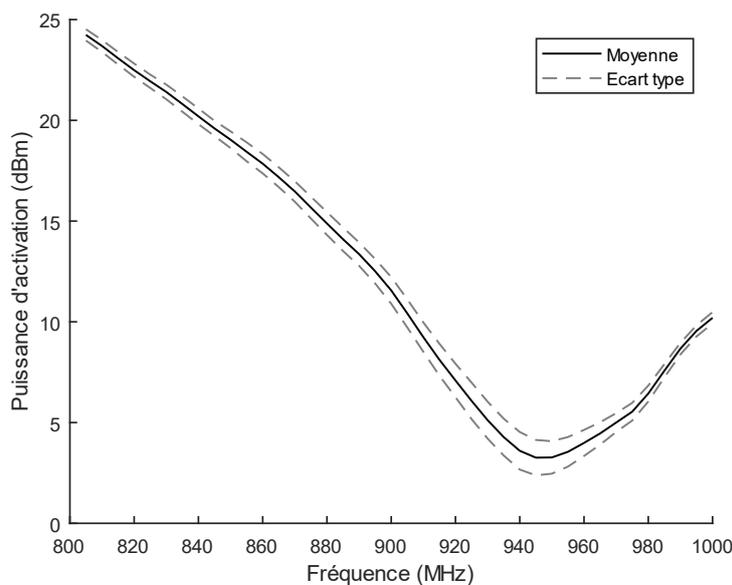


Figure 3-10 Puissance d'activation sur 10 tags-capteurs

Dans la Figure 3-10, on reporte les mesures de puissance d’activation effectuées sur 10 échantillons de plusieurs séries de fabrication. La mesure est faite dans une chambre anéchoïque Voyantic C50 en face de l’antenne à 50 cm, comme photographiée en Figure 3-12.

Nous observons le minimum de la puissance d’activation, 3,3 dBm, à la fréquence de 945 MHz. Un décalage supplémentaire en fréquence est nécessaire pour atteindre la bande ETSI basse (865,7 - 867,5 MHz). Ce décalage sera obtenu par le positionnement du capteur dans son environnement de détection (emballage alimentaire humide). Connaissant l’atténuation du signal jusqu’à l’emplacement du tag grâce à une calibration préalable et avec la mesure de la puissance d’activation, le système Voyantic permet d’estimer la distance de lecture possible. Pour notre tag-capteur, elle d’un peu moins de 10 m (cf. Figure 3-11) pour la fréquence de 945 MHz, classique pour un tag RAIN.

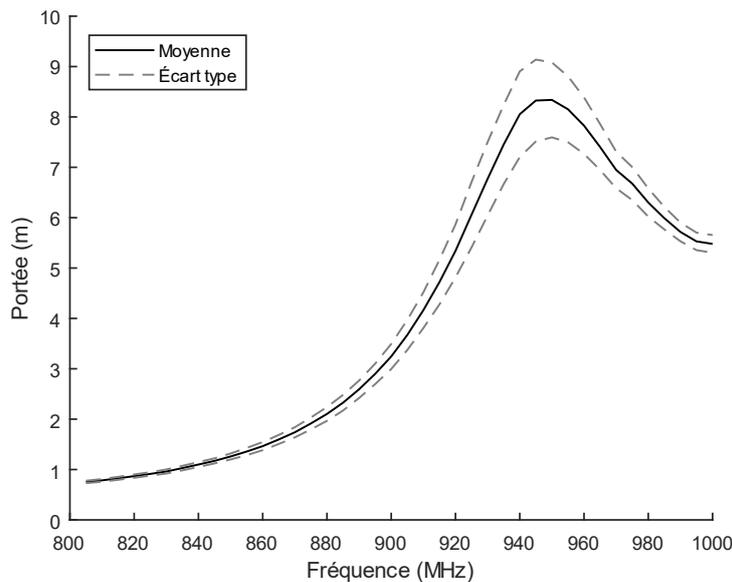


Figure 3-11 Portée sur 10 tags-capteurs

On mesure un écart-type maximal de 0,93 dBm à la fréquence de 940 MHz. Pour une puissance d’activation maximale de 24,2 dBm à 805 MHz, l’écart-type est de 0,27 dBm. L’augmentation de l’écart-type avec la diminution de la puissance s’explique par l’affichage en décibels-milliwatt qui fait appel à une fonction logarithme.

De plus, la valeur d’incertitude de $\pm 1,86$ dBm, pour l’écart-type maximal, est proche de l’erreur de justesse de l’instrument.

L’erreur restante peut être due aux variations de l’épaisseur du dépôt de biopolymère, à des variations dans le collage de la puce sur l’antenne, ou au positionnement des tags-capteurs dans la chambre anéchoïque. En effet, ce dernier point est dû à une déformation du tag-capteur après le séchage de la couche de biopolymère, ce qui ajoute une variabilité concernant son positionnement vis-à-vis de l’antenne lecteur.

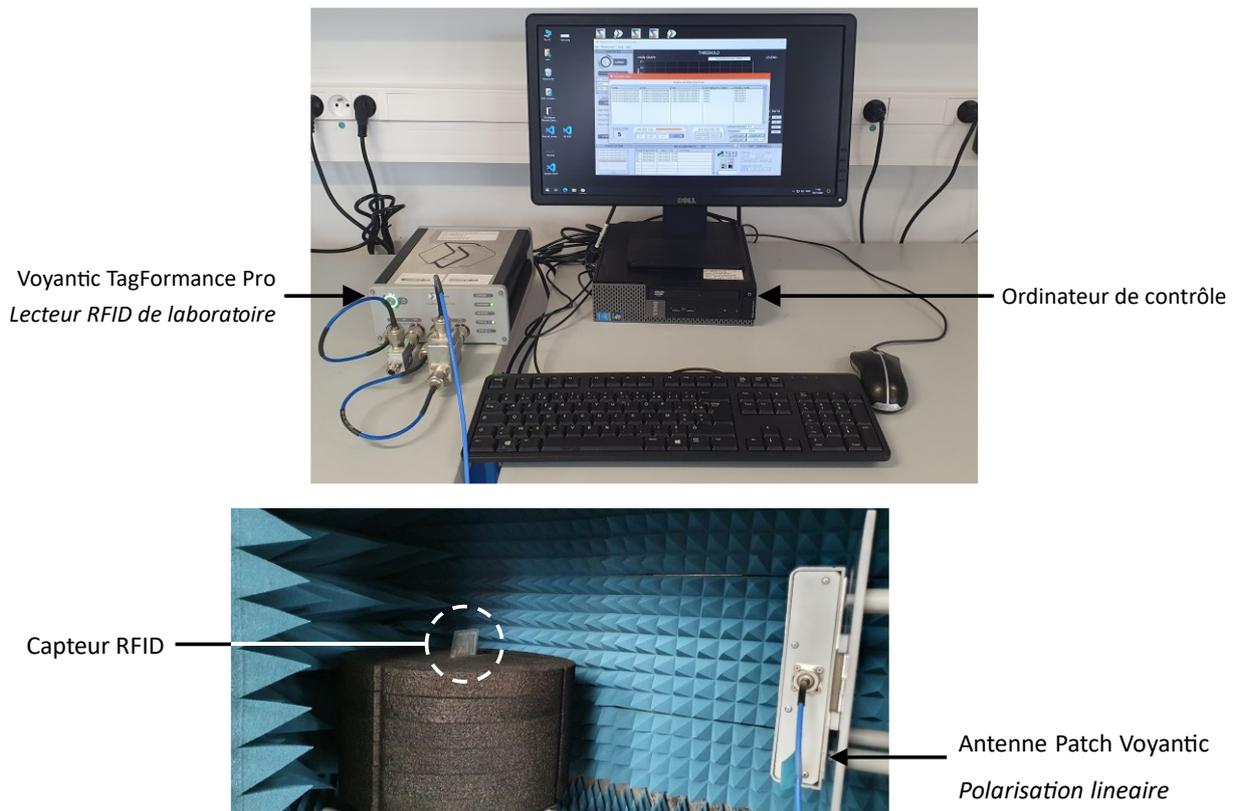


Figure 3-12 Solution de lecture RFID de laboratoire (haut) et Intérieur de la chambre anéchoïque Voyantic C50 (bas)

3.4. TESTS EN HUMIDITE

3.4.1. Banc de mesures et méthodes

3.4.1.1. Chambre climatique

Sachant que le biopolymère utilisé dans la fabrication est sensible à l'humidité, le contrôle de l'humidité doit être rigoureux. L'utilisation d'une mesure fiable est nécessaire pour caractériser correctement le capteur conçu. Afin de déterminer leur sensibilité, le réglage en humidité doit être plus précis et plus juste que les capteurs conçus.

Le tag-capteur doit être placé dans un environnement contrôlé en humidité et en température. Pour cela, nous utilisons la chambre climatique SH-242 de Espec. Sa contenance est de 22 litres, ce qui est suffisant pour installer les instruments de mesures. De plus, elle dispose d'un passe-câble pour ne pas mettre les parties les plus sensibles de l'instrumentation dans un environnement dépassant leurs conditions limites. Sa plage d'utilisation en température, en tant que chambre climatique, s'étend de 15 à 85 °C (Figure 3-13). Sa plage d'humidité possible s'étend de 30 à 95 % HR. Néanmoins, il faut considérer que les valeurs faibles d'humidité sont difficilement atteignables pour de faibles valeurs de température.

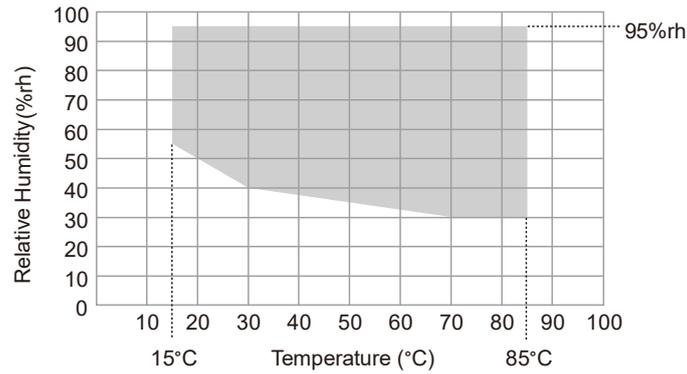


Figure 3-13 Gamme d’humidité et de température pour Espec SH-242 [11]

Pour que les mesures respectent un programme bien défini, la chambre climatique est pilotable à distance et automatisable. Une fois connectée à un réseau Ethernet, le programme de celle-ci est accessible depuis un ordinateur connecté lui-aussi à ce réseau. Pour garder une trace des incidents survenus lors de l’expérience (panne d’électricité, ouverture/fermeture de la porte, ...), un logiciel est disponible pour télécharger l’enregistrement des conditions de la chambre climatique.

L’humidité peut être exprimée soit de manière absolue, soit de manière relative. Bien que l’humidité soit généralement définie pour la quantité d’eau dans l’air, elle peut l’être avec tout autres mélanges de gaz.

L’humidité en eau absolue correspond à une masse d’eau dans un volume d’air, et est noté ρ .

Comme défini par la Figure 3-14, pour un volume d’air donné, plus la température augmente, plus l’eau peut se vaporiser. Si le volume est fermé, ce processus s’arrête quand la pression a atteint la pression de vapeur saturante. Si le volume (si la pression augmente) ou que la température diminue, l’excès de vapeur d’eau va se condenser. Le diagramme psychrométrique en Figure 3-14 n’est valable que pour la pression atmosphérique standard et l’air ambiant.

Pour définir l’état du processus d’évaporation, on utilise l’humidité relative, noté φ , ou parfois désignée par son acronyme « HR ». Comme le montre l’Équation 3-2, l’humidité relative est définie comme un rapport volumique (ou massique ou de pression) entre l’air ambiant et l’air saturé en eau.

$$\varphi = \frac{P_{vapeur}}{P_{saturation}} = \frac{\rho}{\rho_{saturation}} = \frac{\frac{m_{vapeur}}{V}}{\frac{m_{saturation}}{V}} = \frac{m_{vapeur}}{m_{saturation}}$$

P = pression, ρ = humidité $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$, m = masse [kg], V = volume $[\text{m}^3]$

vapeur = valeur pour la vapeur, *saturation* = valeur pour la vapeur saturante

Équation 3-2 Humidité relative

Quand le volume fermé atteint la saturation, l’ajout d’eau au volume fermé est liquide. Pour un capteur en contact avec l’air, l’ajout d’eau est alors invisible. Les capteurs indiquent donc principalement l’humidité relative.

WATER-AIR SYSTEM

1.00 atm pressure

Enthalpy datum : liquid water 0.01°C, 0.00603 atm
 dry air 0.00°C, 1.00 atm

To obtain true enthalpy add enthalpy deviation to enthalpy at saturation

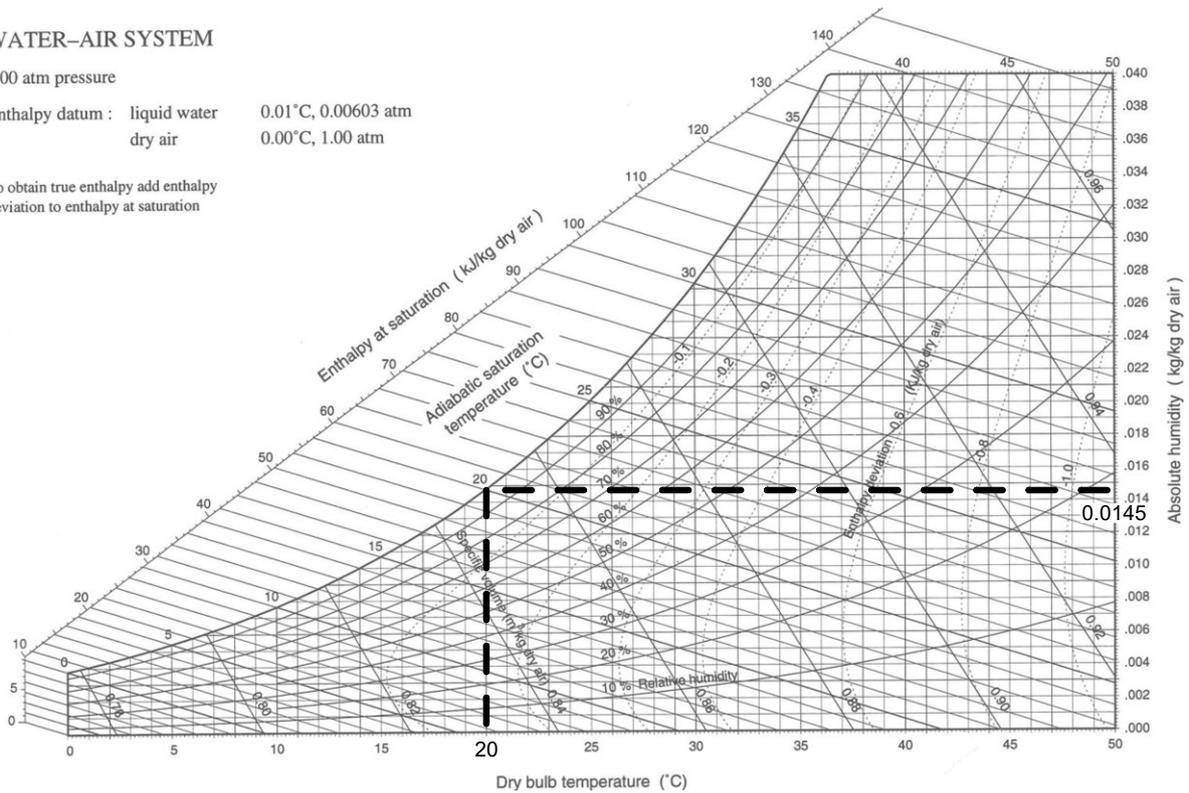


Figure 3-14 Diagramme psychrométrique pour l'air ambiant [12]

3.4.1.2. Lecture RFID dans la chambre climatique

La lecture RFID est assurée par le lecteur de laboratoire, le Voyantic TagFormance Pro.

Les données brutes sont stockées sous forme de fichier texte. Pour un balayage sur la gamme complète de mesure, 2000 mesures en fréquence pour 500 mesures en puissance sont possibles. Plusieurs balayages complets peuvent être enregistrés dans un seul fichier.

Pour mener cette première étape de traitement des données, nous avons choisi de nous appuyer sur la solution MATLAB de MathWorks. Pour importer les données issus du logiciel Voyantic TagFormance qui contrôle le lecteur RAIN, une bibliothèque logicielle a dû être construite [13]. En plus de l'importation des données, cette dernière permet facilement de filtrer les données en fonction des fréquences ou des puissances, et de reconstruire le signal de puissance d'activation en fonction de la fréquence.

Les parois à l'intérieur de la chambre climatique sont en métal. Afin de simuler au mieux un environnement dégagé et ainsi supprimer les problèmes de multi-trajet du faisceau, nous utilisons une antenne dédiée à la caractérisation en champ proche. Avec une conception particulière, l'antenne Voyantic Snoop Pro permet de lire comme en champ lointain à une distance correspondante au champ proche [14]. Ainsi, grâce à la faible distance de lecture, la puissance réfléchie sur les parois est moindre et est non détectable par le lecteur.

Pour mener cette expérience, l'antenne Snoop Pro et un câble coaxial vont devoir être placés dans une enceinte. Ainsi, nous devons nous assurer que cette configuration n'induit pas une grandeur d'influence pour notre système capteur. Pour cela, nous avons placé un tag commercial imperméable à l'eau et soumis l'installation à un échelon d'humidité.

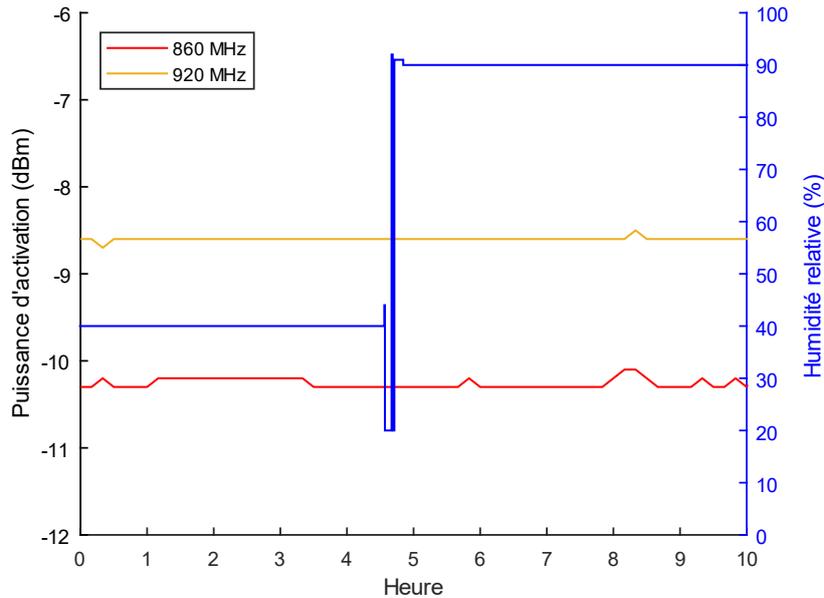


Figure 3-15 Test de la configuration de lecture RFID UHF dans un environnement humide

Comme démontré dans la Figure 3-15, malgré un changement brutal d'humidité de 40 à 90 %, le lecteur RFID de laboratoire ne voit pas de changement de puissance d'activation du tag commercial. Ainsi, l'installation n'introduit aucune grandeur d'influence dans la chaîne de mesure avec des variations d'humidité.

3.4.2. Résultats

La chambre est programmée pour alterner entre des paliers à 40 et 90 % RH, toutes les 6 heures, et à 20 °C. Avec la chambre climatique Espec SH-242, il est possible d'atteindre une humidité plus faible que normalement possible, 40 % RH, à la température de 20 °C.

Pour la lecture RFID, un balayage est réalisé toutes les 10 minutes sur plus de 40 heures pour suivre précisément l'expérience. Comme évoqué précédemment, le capteur RFID est sensible à de nombreux paramètres. Le fait de suivre précisément l'expérience nous permet de connaître la survenue d'incident.

Nous avons choisi d'observer la réponse en heure car l'application finale, la dégradation alimentaire, est un processus lent, dont les évolutions vont être comptées en jour.

Le résultat de l'expérience pour l'échantillon « TGS06035-EM4423-005-12.2019 001 » est tracé en Figure 3-16. Les résultats de lecture RFID sont filtrés pour des fréquences proches des deux principales gammes (ETSI basse et ETSI haute).

Dans la Figure 3-16, les données du lecteur RFID sont également filtrées pour afficher la puissance d'activation. En effet, un algorithme recherche la première valeur de puissance pour laquelle une réponse du tag est reçu, et ce, pour chaque fréquence.

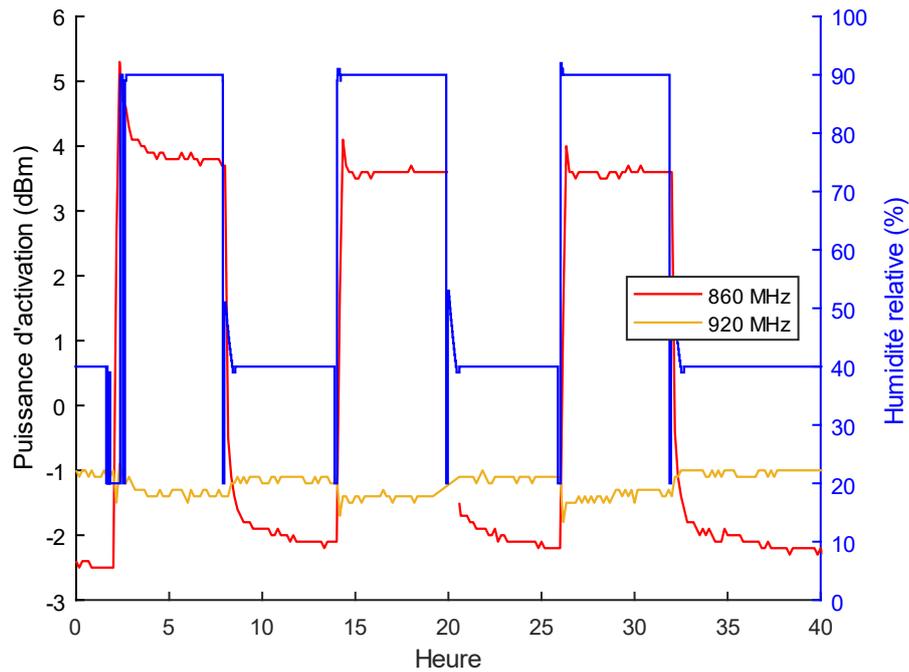


Figure 3-16 Mesures de la puissance d'activation du tag-capteur en fonction de l'humidité

Afin d'observer, sur la durée, la puissance d'activation sur toute la plage de fréquence, nous traçons un « spectrogramme » en Figure 3-17. Dans cette représentation, nous voyons peu de contraste pour une fréquence de 920 MHz (représenté en orange) contrairement à la valeur proche de la gamme ETSI basse (en rouge). La sensibilité sera donc plus forte dans la gamme ETSI basse. Ceci est à notre avantage puisque nous devons nous conformer à la réglementation ETSI et à son application actuelle dans la plupart des pays européens de l'ouest.

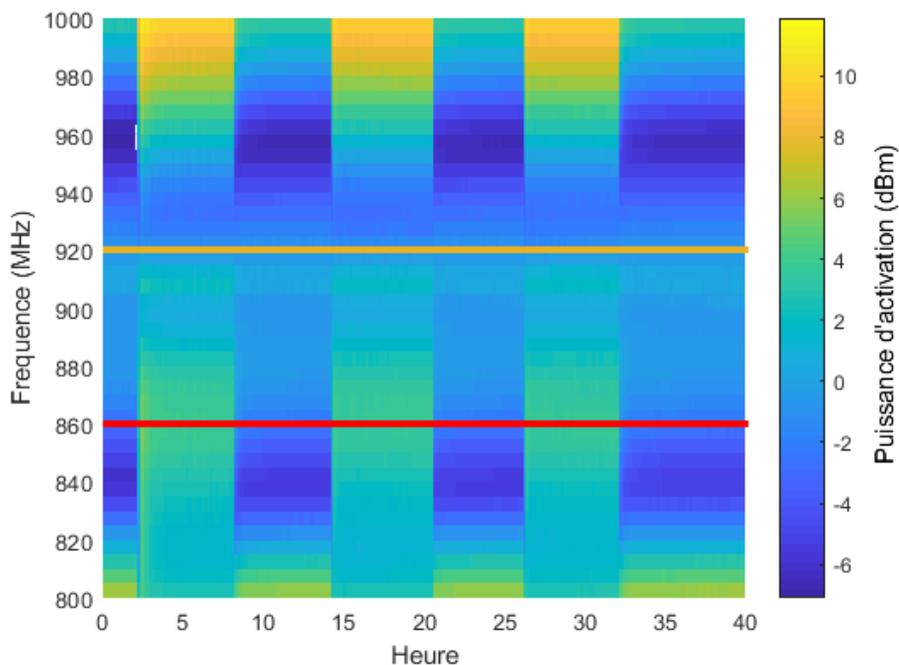


Figure 3-17 Spectrogramme du tag-capteur en fonction de l'humidité

Bien que l'application visée soit le suivi de la dégradation d'un aliment dans un emballage fermé, le tag-capteur réagit à plusieurs paramètres, dont l'humidité. Il est donc important de déterminer le temps de réponse à cette dernière grandeur pour ne pas la prendre en compte.

Suivant l'exemple donné en Figure 3-18, nous avons pu calculer les temps de montée moyens du tag-capteur à 13 minutes. Nous avons procédé de la même façon pour le temps de descente et obtenons 37 minutes. Le temps de descente est beaucoup plus grand. Cela est attribué aux liaisons entre le biopolymère et l'eau qui sont plus facilement créées que supprimées [15].

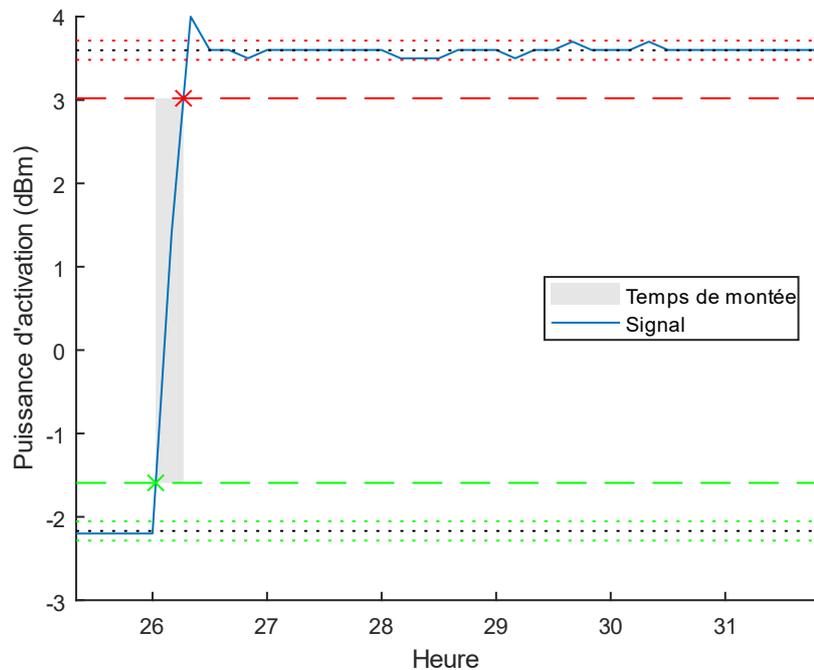


Figure 3-18 Temps de montée pour un pallier de 40 à 90 % HR

Pour attester du gain de sensibilité apporté par la couche de biopolymère, une expérience avec un tag-capteur sans dépôt a été menée. D'après l'expérience avec l'échantillon « PET06035-EM4423-001-GT.04.2020 356 » présentée dans la Figure 3-19, le tag-capteur sans dépôts de biopolymère a une sensibilité à l'humidité moins importante. En effet, pour une même variation du mesurande (40 – 90 % HR), la puissance d'activation du tag-capteur sans dépôt varie de 2,5 dB au maximum alors qu'elle est de 6 dB avec le dépôt.

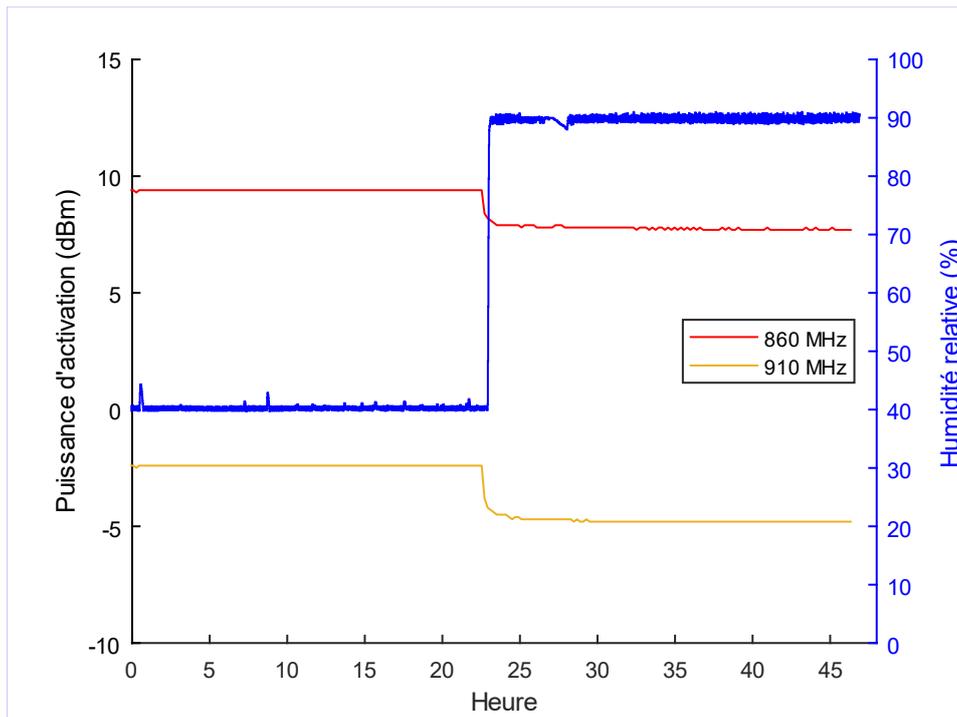


Figure 3-19 Mesures de la puissance d'activation du tag-capteur sans dépôt en fonction de l'humidité

3.5. ESSAIS ET VALIDATION DU CAPTEUR RFID AU DIOXYDE DE CARBONE

3.5.1. Banc de mesures et méthodes

3.5.1.1. Cellule de mesures sous environnement gazeux

La caractérisation de notre capteur RFID sous un environnement gazeux s'est faite avec une cellule hermétique permettant de positionner les instruments nécessaires à la validation de l'expérience. Nous avons fait réaliser une cellule de faible volume (\emptyset 100 par 100 mm) en POM (polyoxyméthylène) ($\epsilon_r = 2,73$ à T° ambiante et à 11 GHz) [16], présentée dans la Figure 3-20. La cellule est fermée par des couvercles en PTFE (polytétrafluoroéthylène) ($\epsilon_r = 2,02$ à T° ambiante et à 10,4 GHz) ou PMMA (polyméthylmethacrylate) ($\epsilon_r = 2,61$ à T° ambiante et à 11 GHz). Pour assurer une bonne étanchéité, un joint torique est ajouté et une gorge est creusée dans la cellule et, en regard, dans le couvercle. Le tout sera fermé par des vis. Afin d'injecter les gaz de manière fiable, des connecteurs pneumatiques rapides sont fixés dans le corps de la cellule.

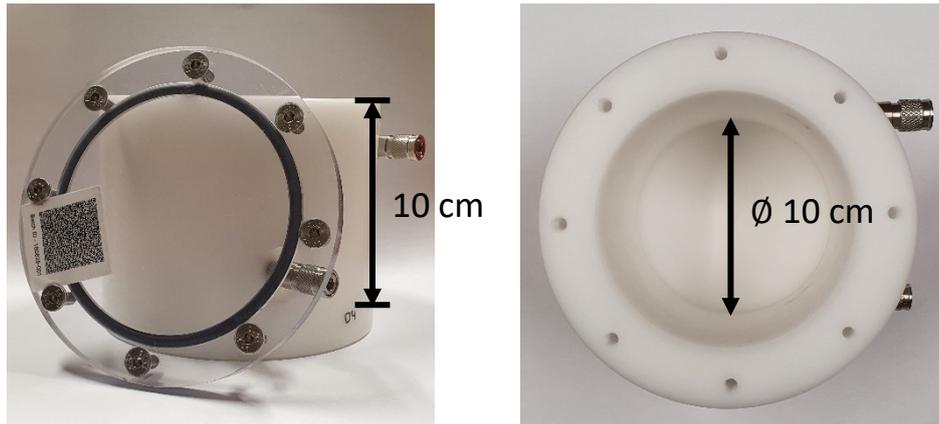


Figure 3-20 Cellule hermétique vue de face (avec couvercle PMMA, à gauche) et de dessus (droite)

Afin d’injecter dans la cellule hermétique les bonnes proportions de dioxyde de carbone, nous utilisons un instrument appelé, l’IGA (Intelligent Gravimetry Analyzer) de Hiden Isochema. À l’origine, celui-ci injectait un mélange du gaz à un échantillon et ce dernier était pesé pour connaître la masse absorbée durant l’opération. Pour notre application, nous utiliserons seulement la partie qui permet un mélange des gaz. L’appareil utilisant des « régulateurs de débit massique » pour délivrer la bonne proportion de gaz, il lui faut connaître la masse molaire des gaz utilisé, mesurer la pression et la température, comme le montre l’Équation 3-3.

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \frac{\frac{\partial n}{\partial t} \cdot R \cdot T}{P} = \frac{\frac{\partial m}{\partial t} \cdot R \cdot T}{M \cdot P}$$

V = volume [m^3], n = quantité de matière [mol]

R = constante universelle des gaz parfait [$\frac{\text{J}}{\text{K} \cdot \text{mol}}$], T = température [K], P = pression [Pa]

m = masse [kg], M = masse molaire [$\frac{\text{kg}}{\text{mol}}$]

Équation 3-3 Relation entre débit massique et débit volumique

Afin de ne pas assécher trop fortement l’environnement autour de l’échantillon, nous utilisons un « bulleur » que nous connectons à la sortie de l’IGA. Ce bulleur sera placé à l’extérieur de la chambre climatique, de sorte que sa température soit supérieure à la chambre. Ainsi, quand le tuyau entrera dans la chambre climatique, l’humidité relative du gaz à l’intérieur va augmenter. La quantité d’eau dans les gaz est aussi fonction de la pression des gaz. Quand le gaz se détend en entrant dans le contenant final, il serait capable de contenir plus de vapeur d’eau. Pour cela, nous sursaturons en eau en faisant le mélange à température ambiante. De plus, nous ajoutons un volume d’eau dans la cellule.

Pour analyser la composition du mélange de gaz, 2 méthodes peuvent être employées :

- Une méthode destructrice, qui consiste à prélever un petit échantillon de l’atmosphère. Néanmoins, comme la mesure se fait en continu afin de surveiller l’évolution de l’atmosphère, le volume prélevé deviendrait conséquent. Ce volume supprimé de la cellule créerait une dépression qui serait rapidement compensée par l’entrée d’air extérieur. Ainsi, la composition originellement injectée serait changée.
- L’autre méthode, non-destructrice cette fois, consiste à introduire des capteurs sensibles aux différents gaz qui composent l’atmosphère. Il s’avère très difficile de trouver des capteurs se logeant dans de petits espaces comme la cellule hermétique. Et, encore plus, si on veut ne pas compromettre l’intégrité de la cellule et avoir des capteurs sans-fil. Une solution est trouvée

avec la solution de PreSens [17]. Elle consiste à introduire une petite pastille en regard d'une partie transparente de la cellule, et de positionner une fibre optique, depuis l'extérieur, en regard de la pastille. La fibre est connectée à un émetteur/récepteur de lumière. Sans présence du mesurande, les molécules composant la pastille réémettent la lumière reçue. Avec présence du mesurande, les molécules vont être modifiées par le contact du mesurande et vont changer leur comportement vis-à-vis de la lumière incidente. La température agissant sur les interactions entre les molécules, elle est une très importante grandeur d'influence. C'est pour cela que les capteurs PreSens sont équipés de sonde de température. Nous avons choisi de ne suivre que la concentration de dioxygène dans la cellule car la mesure est la plus adaptée. En effet, contrairement aux autres mesures proposées (pH et CO₂), la mesure de dioxygène ne nécessite pas un environnement liquide.

3.5.1.2. Chambre thermostatique et contrôle des paramètres environnementaux

Les gels de biopolymère qui composent le corps d'épreuve de notre capteur ne sont pas simplement sensibles au mesurande cible, le CO₂. Leur nature les rend sensible à des variables environnementales telles que la température et l'humidité. Afin de contrôler ces grandeurs, nous devons utiliser une chambre climatique afin d'avoir des paramètres environnementaux stables.

Le modèle HPP110 de Memmert permet de conserver des conditions environnementales stables dans volume de plus de 100 litres [18]. Comme l'atteste sa plage de fonctionnement présentée par la Figure 3-21, elle couvre les conditions de stockage en température (5 – 70 °C) et les humidités étudiées classiquement (10 – 90 % HR). Les précisions sur les conditions environnementales contrôlées (0,1 °C et 0,5 % HR) dépassent celles attendues par nos « tag-capteur ».

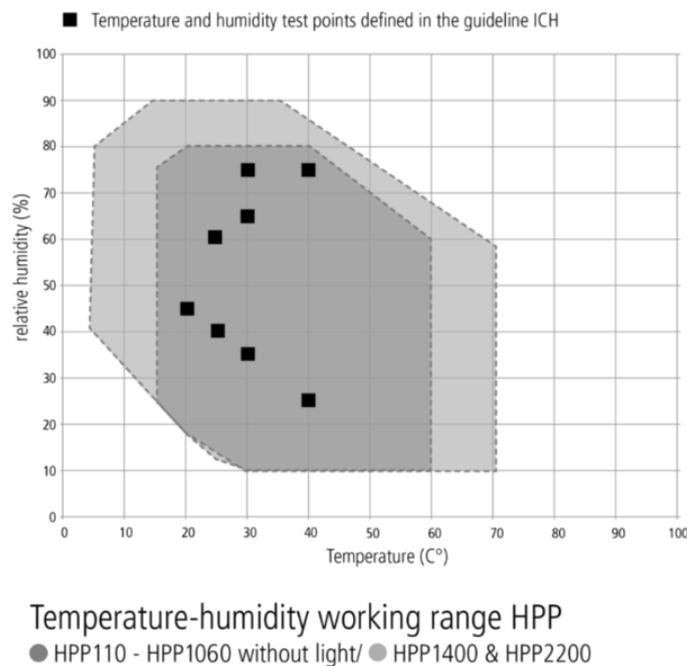


Figure 3-21 Gamme d'humidité et de température pour Memmert HPP100 [18]

Bien que contenu dans la chambre climatique pour profiter de la stabilisation en température, la cellule hermétique ne partagera pas le même environnement gazeux que la chambre. Le contrôle de l'humidité pourra donc être désactivé. Idéalement, le tag-capteur mesure le CO₂ dans un environnement saturé en humidité. Afin de simuler la présence d'un aliment dans la cellule et, ainsi,

présenter un environnement adapté à notre tag-capteur, nous plaçons un récipient d'eau dans la cellule. Le petit volume de la cellule va permettre d'atteindre plus rapidement la saturation en humidité.

Dans la Figure 3-22, une cellule a subi 3 paliers de concentration différents. Une perte en dioxygène est observable, surtout dans le premier palier. Cette perte est estimée à un peu plus de 0,6 % par jour, quand la différence de concentration est maximale avec l'environnement ambiant.

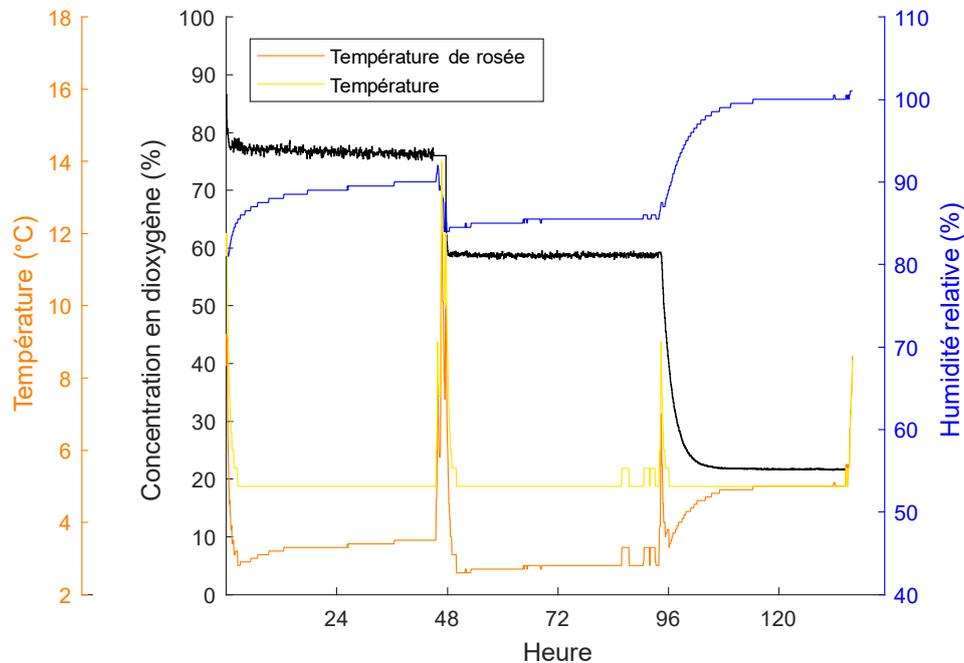


Figure 3-22 Condition environnementale pour l'échantillon 122

L'humidité compose une grandeur d'influence qui doit être surveillée pour nos expériences. Afin de préserver l'étanchéité de la cellule, nous avons choisi le capteur autonome EL-USB-2 de Lascar Electronics. En effet, celui-ci est capable de stocker « plus de 16000 points de température et d'humidité de - 35 à 80 °C et de 0 à 100 % HR avec une résolution de 0,5 °C » dans un encombrement minimum (Ø 25 par 108 mm) [19]. La résolution en humidité, 3 % HR, est un peu haute pour des valeurs de température proche de 0 °C. Encore une fois, pour suivre les incidents, nous réglons la prise de mesure toutes les 5 minutes, ce qui permet d'enregistrer pendant plus de 50 jours. L'autonomie du capteur est annoncée à un an pour des mesures toutes les minutes, donc bien suffisant pour notre application.

Lors de précédents essais dans des environnements saturés en humidité avec différents mélanges de gaz, nous nous sommes aperçus d'une dérive du capteur en fonction du mélange de gaz. Dans les données de surveillance environnementale sur un échantillon présenté dans la Figure 3-22, nous pouvons observer des paliers d'humidité différents pour les 3 environnements testés. Les valeurs d'humidité reportées sont donc faussées de plus de 10 % HR.

Dans l'atmosphère modifiée de notre application, le taux de CO₂ est important, comparé aux valeurs ambiantes normales. Or, l'enregistreur est conçu pour enregistrer l'humidité dans l'environnement ambiant. En effet, il utilise un capteur SHT21 de Sensirion. La documentation technique de ce composant indique que c'est un capteur de type capacitif, sans préciser la nature du corps d'épreuve (à air, polymère, ...) [20]. Le capteur possède, peut-être, un traducteur sensible aussi au CO₂ mais sans que la documentation technique précise cette sensibilité ni les variations observables dans de telles conditions.

3.5.1.3. Banc de mesures avec lecture RFID automatique

Pour fixer la position de l'antenne sur la cellule, nous avons dû la personnaliser en faisant fabriquer un nouveau capot permettant une fixation par vis.

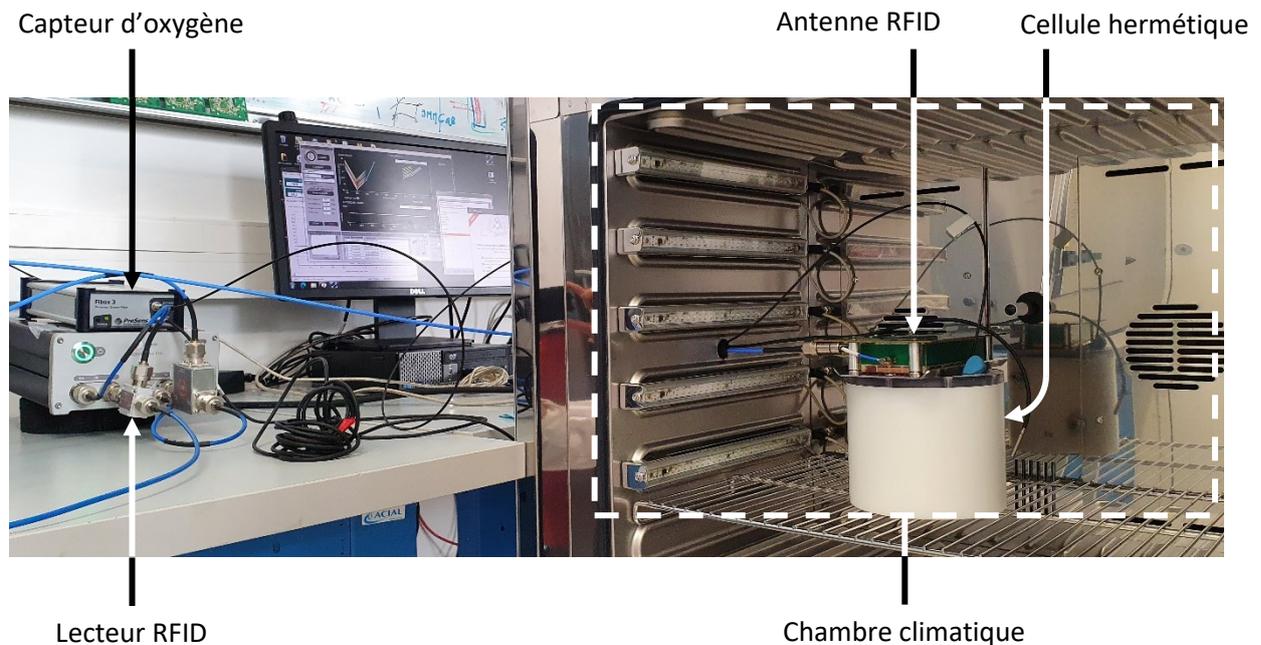


Figure 3-23 Expérience du capteur RFID en présence de gaz

Le temps de montée de notre tag-capteur est estimé en heures. Le fichier final créé par la solution Voyantic est alors très lourd pour le stockage, ou pour l'importation. De ce fait, nous n'utiliserons pas les résolutions extrêmes pour le balayage.

De plus, au cours des nombreuses expériences menées, nous nous sommes aperçus d'un problème lorsque l'appareil de mesure était trop sollicité et pendant longtemps.

En effet, lorsque les résolutions en fréquence et en puissance sont très petites, le balayage nécessite plus de temps. Et, lorsque les balayages sont répétés avec des périodes très petites, l'appareil voit son temps de pause entre chaque balayage réduit. Si un nouveau balayage est demandé alors que le précédent n'est pas terminé, une erreur dans l'automatisation de mesure peut se produire et stopper l'enregistrement.

Aussi, l'appareil chauffe quand il émet un champ EM. Cela est dû aux pertes dans le circuit de génération du signal qui mène jusqu'à l'antenne. En cas de chauffe excessive, l'appareil arrête ces opérations. L'automatisation des mesures est, là aussi, arrêtée.

Pour assurer l'automatisation des mesures, un temps de pause est nécessaire pour l'appareil. Aussi, un équilibre doit être trouvé entre la période entre les balayages, et les résolutions en fréquence et en puissance.

Un équilibre est trouvé avec des mesures toutes les 30 minutes, afin de suivre d'éventuels incidents. La résolution en puissance est choisie à 0,5 dBm, pour émuler les caractéristiques de lecture d'un

lecteur conventionnel. Et, afin de suivre l'évolution de toute la bande UHF, une résolution de 10 MHz est choisie.

Dans le cadre des expériences avec l'équipement de laboratoire, le post-traitement des mesures effectuées sur une large bande de fréquences et des puissances nous permet de choisir avec attention le ou les futurs algorithmes appliqués pour la future solution commerciale.

3.5.2. Résultats

Nous injectons plusieurs mélanges de gaz correspondant aux valeurs rencontrées dans les emballages alimentaires. Ainsi, la première composition de gaz à être injectée est le mélange 30 % CO₂ et 70 % O₂. Ce mélange a été défini pour les emballages contenant de la viande rouge, par notre partenaire dans le projet H2020, la société Coopbox. Pour le pallier suivant, des valeurs extrêmes, 50 % CO₂ et 50 % O₂, ont été définies pour les emballages ayant subi une forte croissance microbienne. Enfin, pour simuler la rupture de l'emballage et la perte de l'atmosphère modifiée, nous injectons un mélange de 21 % de diazote et 79 % O₂, simulant ainsi un retour à une atmosphère ambiante.

La consigne de température de la chambre climatique sera réglée à 20 °C. Et, enfin, afin de résoudre le problème de mesure de l'humidité, nous disposons un récipient d'eau dans la cellule pour saturer l'atmosphère à l'intérieur de celle-ci.

Dans la Figure 3-24, nous présentons l'évolution de la puissance d'activation en fonction du temps pour l'échantillon « PET06035-EM4423-001-GT.04.2020 329 ». Encore une fois, nous présentons 2 fréquences centrales de 2 bandes spectrales (ETSI basse et ETSI haute). En effet, ce seront les seules bandes acceptables en Europe. Une troisième fréquence, 900 MHz, est présentée pour montrer que la sensibilité du tag-capteur à un mesurande est dépendante de la fréquence sélectionnée.

Lors du premier changement d'environnement où la concentration de CO₂ passe de 30 à 50 %, nous pouvons observer une variation de la puissance d'activation. Néanmoins, celle-ci dépend de la fréquence : + 1,5 dBm à 860 MHz, + 3,0 dBm à 900 MHz, et +3,0 dBm à 920 MHz. Nous voyons ici que se placer dans des fréquences plus hautes serait plus avantageux.

Lors du deuxième changement d'atmosphère, la fréquence la plus sensible serait alors 900 MHz avec +2,5 dBm de différence. Néanmoins, le signal reste quand même distinguable pour la fréquence de 860 MHz avec + 1,5 dBm de différence.

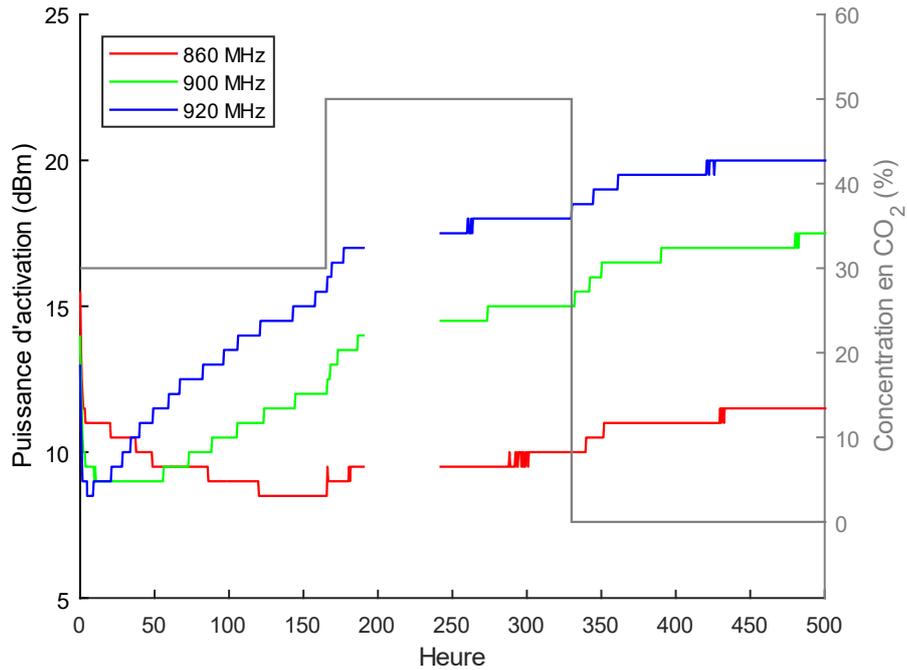


Figure 3-24 Mesure de puissance d'activation du tag-capteur en fonction de la concentration en CO₂

La transition du second est contraire à l'intuition première. En effet, une baisse massive du taux de CO₂ devrait entraîner une baisse de la puissance d'activation. Or, ce n'est pas le cas. Nous attribuons cette élévation du signal au changement de l'environnement gazeux qui entraîne une humidité plus forte. En effet, lors du changement d'atmosphère, l'humidité absolue change dans la cellule, comme l'atteste la Figure 3-25. Pour des environnements saturés en humidité, moins d'eau sera contenu dans l'environnement avec du CO₂ que l'air ambiant. Lors de la rupture d'opercule simulée, il y a donc d'avantage d'eau comprise dans l'air que précédemment, et l'excès d'eau réagit donc d'avantage avec le biopolymère.

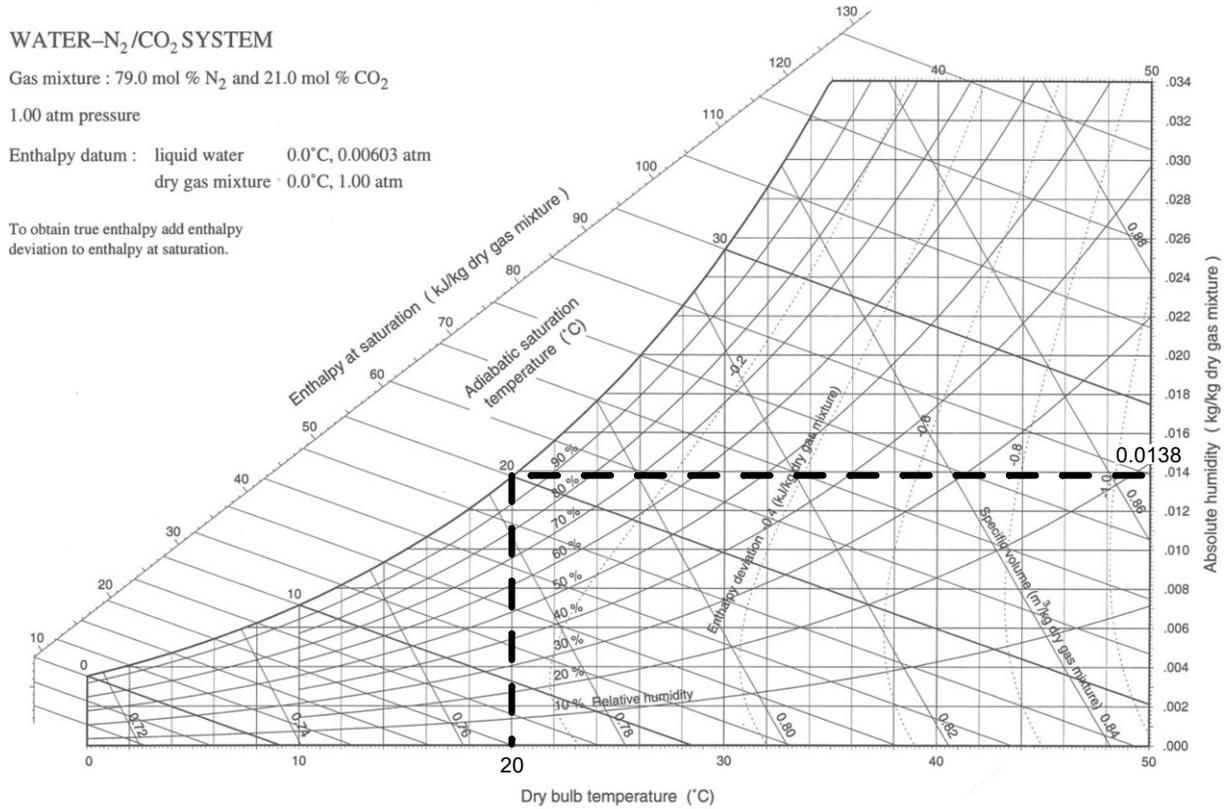


Figure 3-25 Diagramme psychrométrique pour l'O₂ remplacé par le CO₂ dans l'air ambiant [12]

Dans la Figure 3-26, nous représentons l'évolution du signal par un spectrogramme. Celui-ci permet d'observer, pour chaque palier de concentration, le décalage en fréquence de la puissance d'activation du tag-capteur. Ce graphique atteste de l'évolution importante de la puissance d'activation du tag-capteur.

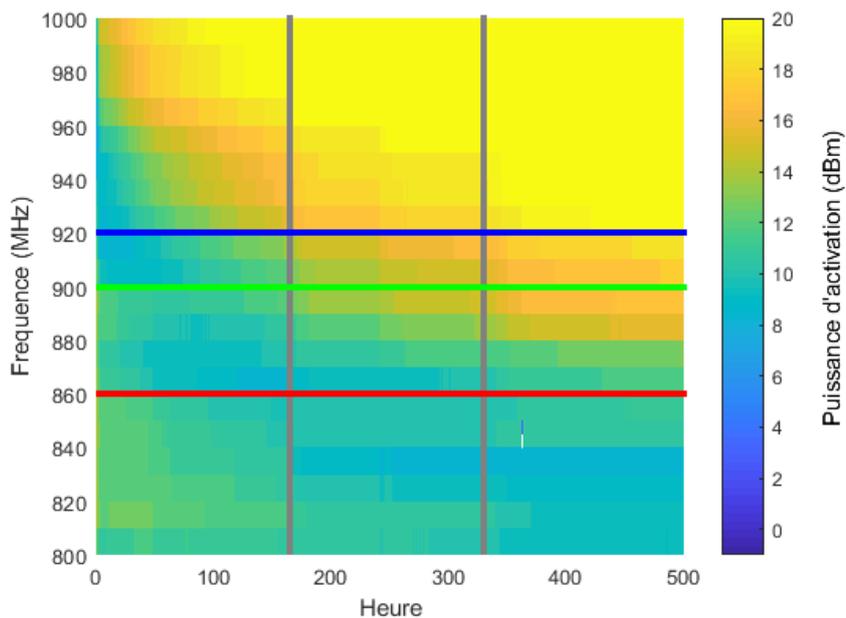


Figure 3-26 Spectrogramme du tag-capteur en fonction de la concentration en CO₂

La Figure 3-27 présente l'évolution du RSSI du tag-capteur pour certaines fréquences d'intérêt. La sensibilité du RSSI est plus grande que celle de la puissance d'activation du fait de sa plus faible valeur et de l'application du logarithme qui permet de présenter le résultat en décibels.

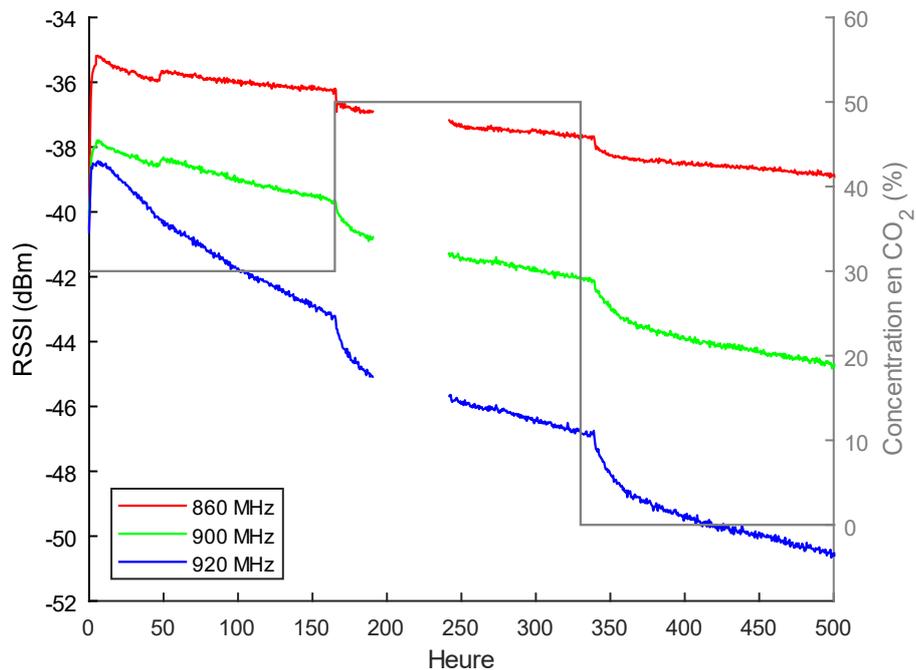


Figure 3-27 Mesure du RSSI du tag-capteur en fonction de la concentration en CO₂

Nous voyons que le signal est continuellement décroissant pour la durée des paliers. Nous attribuons ce comportement à l'absorption continue et lente d'eau dans le biopolymère. En effet, la saturation de l'humidité dans l'air est constamment renouvelée par la présence d'eau liquide dans la cellule. Or, le biopolymère absorbe cette l'eau de l'humidité.

3.6. CONCLUSION

À la suite des améliorations apportées au capteur ainsi que les modifications dues au changement de procédés de fabrication, des caractérisations additionnelles ont dû être menées.

La comparaison entre antenne simulée et mesurée prouve que les techniques de simulation utilisées sont correctes. De plus, la comparaison a permis de vérifier que la puce était correctement adaptée à l'antenne conçue. La comparaison entre le modèle avec et sans dépôt de biopolymère nous a permis de conclure que l'épaisseur et la valeur de permittivité du dépôt étaient correctement simulée.

Nous avons procédé ensuite à la mesure de la puissance d'activation des tag-capteurs en condition ambiante. Cette analyse a été menée sur une dizaine d'échantillons venant de plusieurs campagnes de dépôts de biopolymère. Avec une dispersion des résultats faible, nous pouvons conclure à un dépôt fiable en termes d'épaisseur et d'homogénéité de la préparation de biopolymère.

Les résultats d'expériences menées sur nos tags-capteurs ont permis de démontrer une forte sensibilité à l'humidité. Ce qui est en accord avec les précédents résultats obtenus lors de travaux de thèse précédents. Ces expériences ont été menées dans un environnement contrôlé en humidité bien que pour l'application visée, ce ne soit pas le cas.

D'autres expériences ont ensuite concerné le suivi de la concentration en CO₂. Ici, nous ne pouvions pas contrôler l'humidité. Puisque la première application visait des aliments humides, nous avons pris la décision de saturer l'environnement en humidité. Nous avons pu vérifier que les tags-capteurs mesurent correctement une variation de 30 à 50 % de CO₂ (complété par de l'O₂).

Au cours de ces expériences, nous avons également testé la sensibilité des tags-capteurs à un changement radical d'atmosphère pour retourner aux conditions d'air ambiant, et ainsi simuler une rupture de confinement de l'emballage. Dans le cas où un tag-capteur resterait soumis à une humidité saturante, il présenterait principalement une variation positive d'humidité dû aux changements des conditions atmosphériques. Dans le cas où un tag-capteur serait soumis à l'air ambiant et, généralement, non saturé en humidité, il présenterait une variation négative d'humidité.

Pour notre capteur, la sensibilité à l'humidité prime sur celle en dioxyde de carbone. Néanmoins, comme vérifié, la sensibilité au CO₂ existe bien.

Pour l'application du tag-capteur, nous avons choisi, dans un premier temps, de suivre la puissance d'activation car elle permet une plus grande stabilité.

REFERENCES

- [1] Y. Belaïzi, « Study and design of the passive RFID-sensor in the UHF band: application to agrifood diagnosis », Thesis, University of Montpellier, Montpellier, France, 2018. Consulté le: sept. 22, 2019. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.theses.fr/2018MONTSO61>
- [2] Tageos, « Home », *Tageos*. <https://www.tageos.com/en/> (consulté le nov. 04, 2021).
- [3] K. Alkin *et al.*, « Paper-based printed impedance sensors for water sorption and humidity analysis », *Flex. Print. Electron.*, vol. 2, n° 1, p. 014005, mars 2017, doi: 10.1088/2058-8585/aa5eeb.
- [4] S. Lightfoot et G. Xu, « The Effect of Humidity on the Dielectric Properties of Polyethylene Terephthalate Films », *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, vol. 32, n° 1-2, p. 21-31, janv. 1993, doi: 10.1080/03602559308020153.
- [5] E. D. Cohen et E. B. Guttoff, « Coating Methods, Survey », in *Encyclopedia of Polymer Science and Technology*, John Wiley & Sons, Inc, 2001. doi: 10.1002/0471440264.pst061.
- [6] F. Bibi, « Study of dielectric properties at high frequency of plant polymer: the case study of wheat gluten proteins to be used as sensing materials of environmental markers of food quality in passive RFID systems », Thesis, University of Montpellier, Montpellier, France, 2015. Consulté le: janv. 24, 2019. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.theses.fr/2015MONTSO69>
- [7] Anton Paar, « Rotational Rheometer: RheolabQC », *Anton Paar*. <https://www.anton-paar.com/corp-en/products/details/rotational-rheometer-rheolabqc/> (consulté le juill. 21, 2021).
- [8] RD Specialties, « Coating Rod Types », *RD Specialties*. <https://www.rdspecialties.com/pages/rod-types> (consulté le oct. 31, 2021).
- [9] RK Print Coat Instruments, « K Control Coater », *RK Print Coat Instruments*. <https://www.rkprint.com/products/k-control-coater/> (consulté le mai 21, 2021).
- [10] Keysight Technologies, « Understanding the Fundamental Principles of Vector Network Analysis ». juill. 07, 2020. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.keysight.com/fr/en/assets/7018-06841/application-notes/5965-7707.pdf>
- [11] Espec, « SH-242 », *Espec*. https://espec.com/na/products/model/sh_242 (consulté le sept. 14, 2021).
- [12] D. C. Shallcross, « The Psychrometric Charts », in *Handbook of Psychrometric Charts: Humidity diagrams for engineers*, D. C. Shallcross, Éd. Dordrecht: Springer Netherlands, 1997, p. 34-309. doi: 10.1007/978-94-009-0027-1_4.
- [13] B. Saggin, *MATLABVoyanticTagformanceScripts*. 2020. Consulté le: sept. 14, 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://github.com/Ben3094/MATLABVoyanticTagformanceScripts>
- [14] Voyantic, « Snoop Pro », *Voyantic*. <https://voyantic.com/products/tagsurance-uhf/accessories/snoop-pro> (consulté le oct. 02, 2021).
- [15] F. Bibi, C. Guillaume, A. Vena, N. Gontard, et B. Sorli, « Wheat gluten, a bio-polymer layer to monitor relative humidity in food packaging: Electric and dielectric characterization », *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 247, p. 355-367, août 2016, doi: 10.1016/j.sna.2016.06.017.
- [16] B. Riddle, J. Baker-Jarvis, et J. Krupka, « Complex permittivity measurements of common plastics over variable temperatures », *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 51, n° 3, p. 727-733, mars 2003, doi: 10.1109/TMTT.2003.808730.
- [17] PreSens, « Sensor Basics: Measurement Principle of Optical Sensors », *PreSens*. <https://www.presens.de/knowledge/basics/detail/measurement-principle-of-chemical-optical-sensors-901> (consulté le sept. 23, 2020).
- [18] Memmert, « Constant climate chamber HPP110 », *Memmert*, avr. 22, 2021. <https://www.memmert.com/products/archive/constant-climate-chamber-1/HPP110/> (consulté le sept. 14, 2021).
- [19] Lascar Electronics, « EL-USB-2 Temperature and Humidity Data Logger », *Lascar Electronics*. <https://www.lascarelectronics.com/easylog-el-usb-2> (consulté le sept. 15, 2021).

- [20] Sensirion, « Digital Humidity Sensor SHT2x », *Sensirion*.
<https://www.sensirion.com/en/environmental-sensors/humidity-sensors/humidity-temperature-sensor-sht2x-digital-i2c-accurate/> (consulté le sept. 15, 2021).

Chapitre 4 : Emballage agro-alimentaire intelligent et validation industrielle du capteur-RFID

SOMMAIRE

Chapitre 4 : Emballage agro-alimentaire intelligent et validation industrielle du capteur-RFID....	155
2.1. Contexte et objectifs	157
2.2. Détection de la dégradation de la viande	158
2.2.1. Matériels et méthodes	158
2.2.1.1. Perméation des emballages	158
2.2.1.2. Préparation des échantillons.....	158
2.2.1.3. Dégradation de la viande	159
2.2.2. Résultats	160
2.3. Mesures RFID-capteur avec un lecteur conventionnel.....	166
2.3.1. Développement de la solution	166
2.3.2. Validation de la solution.....	169
2.4. Evaluation dans des conditions industrielles	169
2.5. Conclusion	173
Références.....	174

4.1. CONTEXTE ET OBJECTIFS

En 2015, les Nations Unies ont adopté les « objectifs de développement durable » qui ciblent de réduire l'indice de gaspillage alimentaire. Le marché alimentaire doit alors utiliser une gestion logistique solide et prolonger la durée de conservation des produits. L'Organisation Mondiale de la Santé a estimé que plus de 600 millions de cas de maladies d'origine alimentaire ont été déclarés en 2010 et qu'elles ont provoqué de nombreux décès ou handicaps [1]. Aux États-Unis d'Amérique, malgré de nombreuses années d'amélioration de la réglementation en matière de salubrité des aliments n'ont pas, les risques n'ont pas été considérablement réduits [2]. Entre 1993 et 1997, 37 % des maladies d'origine alimentaire sont dues à une mauvaise température de stockage. Cela a conduit au succès de l'indicateur temps-température (TTI). Parmi les autres cas, seulement 11 % des maladies d'origine alimentaire sont dues à une mauvaise cuisson. Les aliments avariés doivent être jetés avant la cuisson, et la surveillance doit cibler d'autres variables, y compris la concentration de gaz dans les emballages alimentaires. L'utilisation des tags-capteurs est suggérée pour ce besoin [3].

Le projet GLOPACK cible les EAM (Emballage à Atmosphère Modifiée, ou MAP en anglais) afin de prolonger la date d'expiration. En plus de l'utilisation des EAM, le projet a comme objectif de surveiller l'atmosphère entourant l'aliment dans le contenant. Pour cela, un capteur devra être placé dans l'espace de tête (l'espace libre du contenant alimentaire). Le projet GLOPACK a choisi la technologie RFID afin de faire transiter les informations du capteur sans fil. Ainsi, il ne sera pas nécessaire d'endommager le film protecteur pour récupérer les informations, et compromettre l'EAM.

Afin d'atteindre les objectifs de ce projet, à savoir un TRL 7, le capteur RFID doit être testé dans les conditions réelles de l'application. Pour y parvenir, nous avons validé la solution avec de la viande rouge dans un premier temps en laboratoire avec des emballages alimentaires scellés par un opercule, sous d'atmosphère modifiée. L'expérience renouvelée plusieurs fois à une température de 5°C, s'est déroulée sur une dizaine de jours à chaque fois. Un protocole strict a été établi avec nos partenaires de l'UMR IATE de l'INRAe. En effet, afin de valider correctement notre objectif, à savoir une corrélation entre le signal du tag-capteur et la dégradation des aliments dans le temps, un certain nombre de mesures ont été effectuées sur des triplicatas (puissance d'activation du tag, concentration des gaz de l'emballage, contamination bactérienne et colorimétrie des aliments). Au cours de ces expériences, nous avons validé une solution de lecture RFID industrielle en la comparant avec les résultats de lecture RFID de laboratoire. Comme évoqué, plusieurs expériences dans l'environnement de laboratoire ont été menées. Nous présenterons uniquement la dernière expérience.

Finalement, des expériences en environnement industriel ont été menées avec la participation de la société Coopbox et de l'université de Modène (Italie), toutes deux partenaires du projet GLOPACK. Ces expériences ont été menées dans des conditions matérielles différentes (emballages, injection de gaz, stockage, ...) par des opérateurs différents. Pour se rapprocher de l'application industrielle, les expériences ont été menées, non plus avec un lecteur de laboratoire, mais avec une solution de lecture RFID conventionnelle, validée préalablement. Ces dernières expériences valident la reproductibilité de la mesure.

4.2. DETECTION DE LA DEGRADATION DE LA VIANDE

4.2.1. Matériels et méthodes

4.2.1.1. Perméation des emballages

Les plastiques sont perméables aux gaz et la viande absorbe ou désorbe les gaz en fonction de processus biochimiques (oxydation de l'hémoglobine, absorption du CO₂ et acidification de l'eau, ...) [4]. Aussi, l'IATE a mis à notre disposition un outil de simulation de l'évolution de la composition des gaz dans un emballage alimentaire.

Afin de simuler la perméation des emballages, il est nécessaire de connaître les dimensions de l'emballage ainsi que les perméabilités aux différents gaz de ceux-ci. Dans les expériences menées à Montpellier, nous utiliserons des emballages faits de 550 µm de PP (Polypropylène). Leur contenance est de 781 mL (156 × 143 × 35 mm). L'opercule, constitué aussi de PP, mesure 70 µm d'épaisseur.

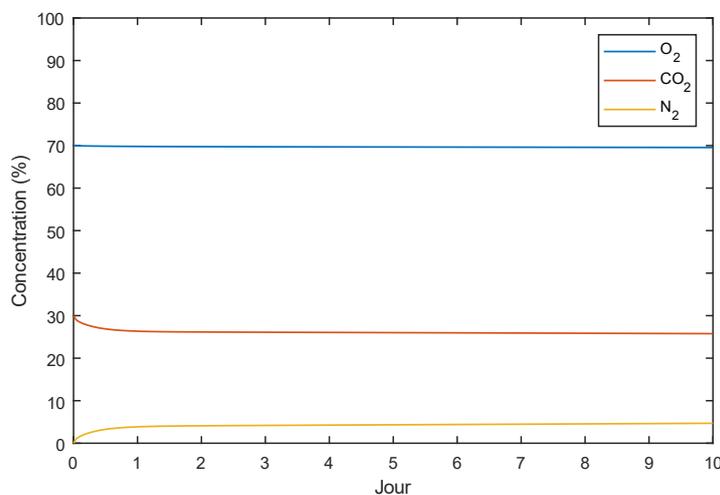


Figure 4-1 Simulation de l'emballage en PP avec la viande de bœuf et sans micro-organismes

À partir de la simulation de l'IATE en Figure 4-1, nous observons peu de changement à partir du premier jour. Le plastique PP protège bien les contenants. Par exemple, sur toute la durée de la simulation, l'oxygène perd moins de 0,5 point. Les perméabilités de l'emballage aux gaz n'influencent donc pas beaucoup sur les concentrations observées.

La viande, quant à elle, réagit plus vite à l'environnement gazeux. En effet, au cours de la première journée, elle rejette le diazote et capte le dioxyde de carbone. De cette façon, un équilibre se crée entre l'espace de tête et la viande. Le dioxygène n'entre pas dans cet équilibre car il a déjà été absorbé par l'hémoglobine de la viande.

4.2.1.2. Préparation des échantillons

Pour mener l'expérience avec un nombre significatif d'échantillon, une étape de préparation manuelle est à prévoir. Dans un premier temps, les emballages vides sont scellés à leur opercule à basse température (160 °C) par rapport à la température recommandée par une machine à thermosceller réglable (Reepack Reetray 20 VGT). La zone de lecture RFID est repérée à l'aide d'un masque. L'emballage est ensuite réouvert partiellement pour adhérer les tags-capteurs en regard de la zone de lecture.

Appliquée sur plus d'une vingtaine d'échantillon de viande, l'étape de préparation nécessite une bonne organisation et dure plus de 2 heures, sans l'étape de préparation des instruments présentée

précédemment (≈ 1 heure). Afin d'obtenir une plus faible variabilité des échantillons lors des expériences, les échantillons sont extraits à partir d'une pièce de viande (3kg de bœuf pour steak) issue d'une seule carcasse. Nous stockons la viande le plus de temps possible à la température minimale de l'expérience, 5 °C.

Enfin, l'emballage est une dernière fois ouvert sur une zone 1 cm² afin d'injecter le mélange initial de gaz, 70 % d'O₂ et 30 % de CO₂. Pour cela, nous utilisons la machine Hiden Isochema IGA-001. La contenance des emballages représentant 781 mL et l'IGA-001 ne pouvant délivrer que jusqu'à 500 mL par minute, le remplissage total dure 1 minute et 33 secondes. Parce que l'emballage contenait de l'air ambiant et pour être sûr de l'avoir chassé entièrement, nous attendons le triple du temps calculé. L'opercule est scellé définitivement sur l'emballage en réglant la machine à thermosceller à une température adaptée aux emballages PP, 170 °C. Le résultat final de la préparation d'échantillon est présenté en Figure 4-2.

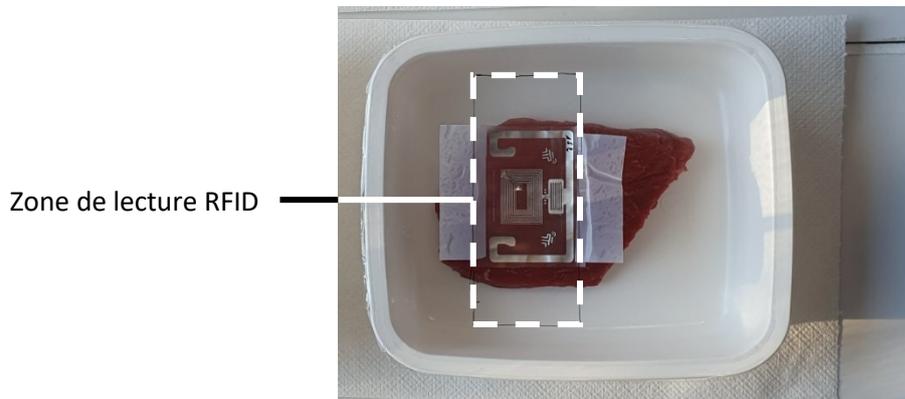


Figure 4-2 Échantillon de viande emballé

Parmi ces échantillons, au moins 3 ne sont pas équipés de tags-capteurs et sont destinés aux tests destructifs initiaux. Et, au moins 3 emballages sont équipés d'un suivi en temps réel des conditions climatiques (température, humidité) et du taux de dioxygène. Ces 3 couples d'emballages spéciaux sont répartis sur la durée de l'étape d'initialisation (au début, au milieu, et à la fin). Cela permet d'enregistrer les différences subies entre les échantillons durant les 2 heures de l'étape de préparation des échantillons. Ces échantillons sont nommés « J0 ».

Dans des conditions stériles, les échantillons de viande sont placés dans l'emballage et scellés à nouveau à basse température.

4.2.1.3. Dégradation de la viande

Chaque jour, entre 2 et 3 échantillons sont sélectionnés pour procéder aux tests destructifs qui permettraient d'attester de l'état de dégradation de la viande. Pour cela, un couple d'échantillons montrant un comportement proche pour la mesure RFID est sélectionné, et l'un d'eux est sacrifié. Pendant les tests destructifs, les échantillons subissent 4 opérations : photographie, mesure de concentration gazeuse, microbiologie, et colorimétrie.

Les caractéristiques du signal RFID des tags sont mesurées à l'aide de la solution Voyantic TagFormance (version 7) et du lecteur RFID de laboratoire Voyantic TagFormance Lite. Le signal RFID est aussi comparé aux mesures venant de la solution RFID conventionnelle ; les résultats sont présentés dans la section 4.3.2 Validation de la solution.

Une photographie des échantillons est d'abord réalisée. Afin d'obtenir un rendu de couleur uniforme entre les échantillons, la photographie est prise dans une boîte à fond blanc. Un éclairage de

laboratoire est utilisé et la caméra professionnelle garde les mêmes paramètres tout au long des expériences (6000 × 4000 pixels, exposition de 1/30 s, f/3.5 18 mm, et ISO 100).

Afin de connaître véritablement les concentrations de dioxygène et dioxyde de carbone, une méthode destructrice a été mise en œuvre. Pour cela, un Oxybaby M+ O₂/CO₂ V2 de Witt-gasetechnik a été utilisé. Une aiguille est plantée à travers le film de l'emballage sacrifié. Une fois l'opération d'analyse déclenchée, l'appareil pompe un échantillon de 10 mL de l'environnement intérieur [5]. Les concentrations de l'échantillon sont mesurées par une cellule électrochimique pour l'O₂ et par absorption infrarouge pour le CO₂.

L'analyse microbiologique de type « Miles et Misra » de l'échantillon est alors réalisée [6]. Afin de ne pas contaminer la viande lors de l'ouverture de l'emballage, les expériences ont été réalisées sous une hotte adaptée à la microbiologie et tous les instruments utilisés pour extraire environ 10 grammes de viande ont été préalablement désinfectés. La viande est diluée par un facteur 10 dans un milieu de culture (eau peptonée tamponnée) et broyée à l'aide d'un « masticateur » pendant 60 secondes. On constitue une échelle de dilution par 10 jusqu'à 10⁶ avec la solution obtenue. On procède à l'étalement des solutions dans des boîtes de Petri sur un gel de culture. On place ensuite les boîtes dans un incubateur à 30 °C. Afin de connaître le nombre de bactéries vivantes, celles qui ont été à même de former une colonie sont comptées. Au bout de 72 heures, elles sont visibles à l'œil nu. Quand les dilutions sont faibles, les colonies peuvent être en trop grand nombre pour permettre un comptage. On compte de 2 dilutions voisines et seulement les dilutions dont le nombre de colonies est inférieur à 300 et supérieur à 15.

$$N[UFC/g] = \frac{C_1 + C_2}{1,1 \cdot d_2 \cdot v} \rho$$

C = comptage [UFC], d = facteur de dilution, v = volume étalé [mL], ρ = concentration massique [g/mL]

Équation 4-1 Contamination microbienne

Une fois le prélèvement pour la microbiologie effectué, il est alors possible de déplacer la viande avec moins de précautions. L'emballage ouvert de l'échantillon permet alors de positionner un colorimètre CM-2600d de Minolta au-dessus du morceau de viande.

4.2.2. Résultats

Pour cette expérience, les échantillons sont conservés dans la chambre climatique Memmert HPP110 à sa température minimale de 5 °C, proche de la température idéale de stockage de la viande, 4 °C [7].

La mesure RFID avec le système Voyantic TagFormance est réalisée 2 fois par jour : le matin et en fin d'après-midi. La mesure dans le réfrigérateur n'était pas possible car les échantillons étaient trop proches les uns des autres. L'automatisation n'est pas non plus possible car l'antenne devait être positionnée manuellement sur les échantillons. Les résultats, ci-dessous, sont présentés pour une fréquence de 865 MHz.

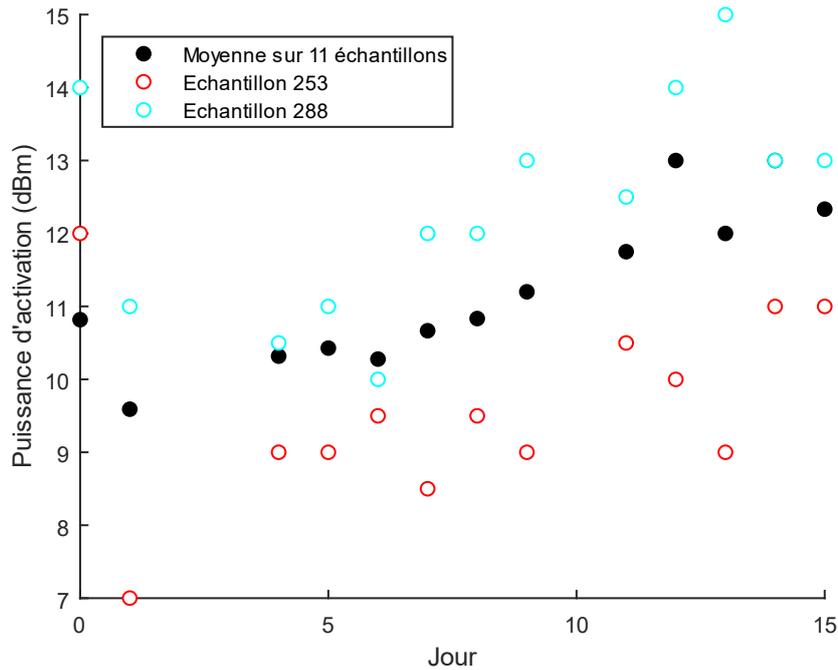


Figure 4-3 Expérience avec la viande dans les laboratoires de Montpellier

Les échantillons montraient tous une croissance de leur puissance d'activation avec le temps. Néanmoins, leur évolution était décalée en puissance. Dans la Figure 4-3, le signal moyen sur toute la série d'échantillon est présenté. Aussi, pour montrer la variabilité individuelle des échantillons, deux signaux sont affichés pour les échantillons 253 et 288. Ces échantillons sont ceux qui ont subi les tests destructifs le dernier jour, donc ceux présents tout le long de l'expérience.

L'évolution décrite entre le premier et le deuxième jour correspond à la mise en équilibre de l'atmosphère des emballages. Les échanges gazeux avec la viande, simulés en Figure 4-1, font baisser la concentration en CO₂ et augmenter le N₂ dans l'espace de tête de l'emballage. Les concentrations se rapprochent donc du mélange de l'air ambiant et font ainsi baisser le taux d'humidité relative.

Ensuite, la puissance d'activation des échantillons reste stable jusqu'au 7^{ème} jour, en moyenne. En plus des incertitudes de mesures, les morceaux de viande présentent tous une certaine variabilité en fonction de paramètres divers (temps en contact avec l'air ambiant, contact avec un contaminant, ...). Ainsi, pour l'échantillon 253, le signal reste stable pendant 9 jours.

Après ce palier, la puissance d'activation augmente avec les jours. Parmi les échantillons, ce signal croissant semble suivre le même rythme, mais décalé dans le temps par la durée du précédent palier.

Dans le graphique A de la Figure 4-5, la ligne rouge verticale représente la date d'expiration telle qu'annoncée par le fabricant. La ligne rouge horizontale représente, quant à elle, la limite de comptage bactérien définie par les autorités. En France, pour la viande de boeuf transformée en boucherie, la Fédération du Commerce et de la Distribution définit une limite de 10⁷ UFC/g [8]. Cette limite est dépassée au 14^{ème} jour, 6 jours après la date limite d'expiration. Cette marge permet aux fabricants de protéger le consommateur d'éventuelles contaminations, et ainsi de prévenir toutes poursuites judiciaires associées.

On observe un développement exponentiel des micro-organismes, comme attendu [9]. En effet, cela est confirmé par une bonne adéquation entre les mesures et une régression exponentielle (ligne diagonale en pointillé rouge).

Les 3 derniers échantillons ont été analysés deux fois pour estimer l'incertitude sur une mesure de colonies viables. L'incertitude semble faible et constante sur les 3 échantillons.

Comme prédit par nos tags-capteurs dans la Figure 4-3, l'échantillon 288 est plus contaminé que l'échantillon 253.

La couleur de la viande est l'un des critères principaux d'achat pour un consommateur [10]. Bien que reliée à la durée et à la qualité de conservation, la couleur de la viande peut être influencée par d'autres facteurs (régime et activité de l'animal, génétique). Et, bien que les EAM permettent une meilleure conservation, ils servent aussi à mieux promouvoir la viande. En effet, le dioxygène introduit dans les emballages de viande rouge rend la viande plus rouge grâce à son action sur la myoglobine. Cette protéine a la faculté de stocker une molécule de dioxygène qu'elle va pouvoir fournir aux muscles pour leur bon fonctionnement. Sa liaison avec la molécule de dioxygène est faite grâce à un cofacteur (composé non protéique mais essentiel à l'activité de la protéine), l'hème b. Ce dernier contient un atome de fer qui va pouvoir s'oxyder. La couleur de la protéine complète va alors être dépendante de l'état d'oxydation de cet atome de fer : mauve sans dioxygène, cerise avec dioxygène, et enfin marron avec dioxygène, la présence d'eau, et le temps [10].

Comme affiché dans le graphique B de la Figure 4-5, après un pallier, où la viande est rouge, jusqu'au 9^{ème} jour, l'indice de coloration de la viande se dégrade pour devenir marron. Cette différence de couleur est visible sur les photographies présentées en Figure 4-4.

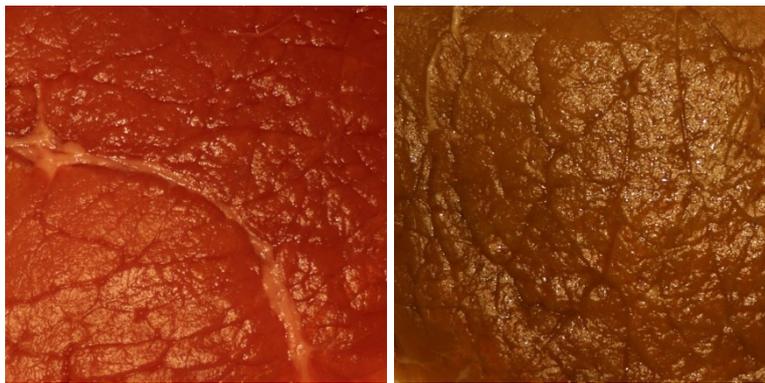


Figure 4-4 Photographies des échantillons 245 (photographie à J+6, gauche) et 288 (photographie à J+21, droite)

Deux graphiques font état des concentrations en oxygène et en dioxyde de carbone, respectivement C et D dans la Figure 4-5. On observe des changements de concentrations au cours du temps très faibles. La sensibilité en puissance d'activation des tags à la dégradation nous fait nous interroger sur la présence d'autres grandeurs d'influence. En effet, d'autres éléments organiques volatiles peuvent être dégagés par la viande lors de sa dégradation.

Dans la dégradation de la viande bovine et dans le temps de l'expérience, trois processus suscitent notre intérêt :

- Croissance microbienne avec la respiration cellulaire associée
- Mort des cellules avec la dégradation des protéines associées qui libère des amines
- Dégradation de l'acide lactique présente dans les muscles en acides iso-valérique ou isobutyrique, par les bactéries du genre *Lactobacillus*

Les produits de ces réactions peuvent interagir avec le biopolymère malgré la séparation de l'espace de tête. En effet, ces processus biologiques libèrent des composés organiques volatiles aux températures étudiées.

Pour vérifier la présence de composés volatiles pouvant être absorbés par le biopolymère, une analyse par spectroscopie FTIR (Fourier-Transform Infrared) est menée. Celle-ci est faite en réflexion sur les

tags après leur exposition à l'environnement gazeux. La lumière IR traverse alors le gluten et le PET, et va « rebondir » sur l'antenne en aluminium. Comme le signal passe deux fois par le biopolymère, la sensibilité de l'analyse est augmentée.

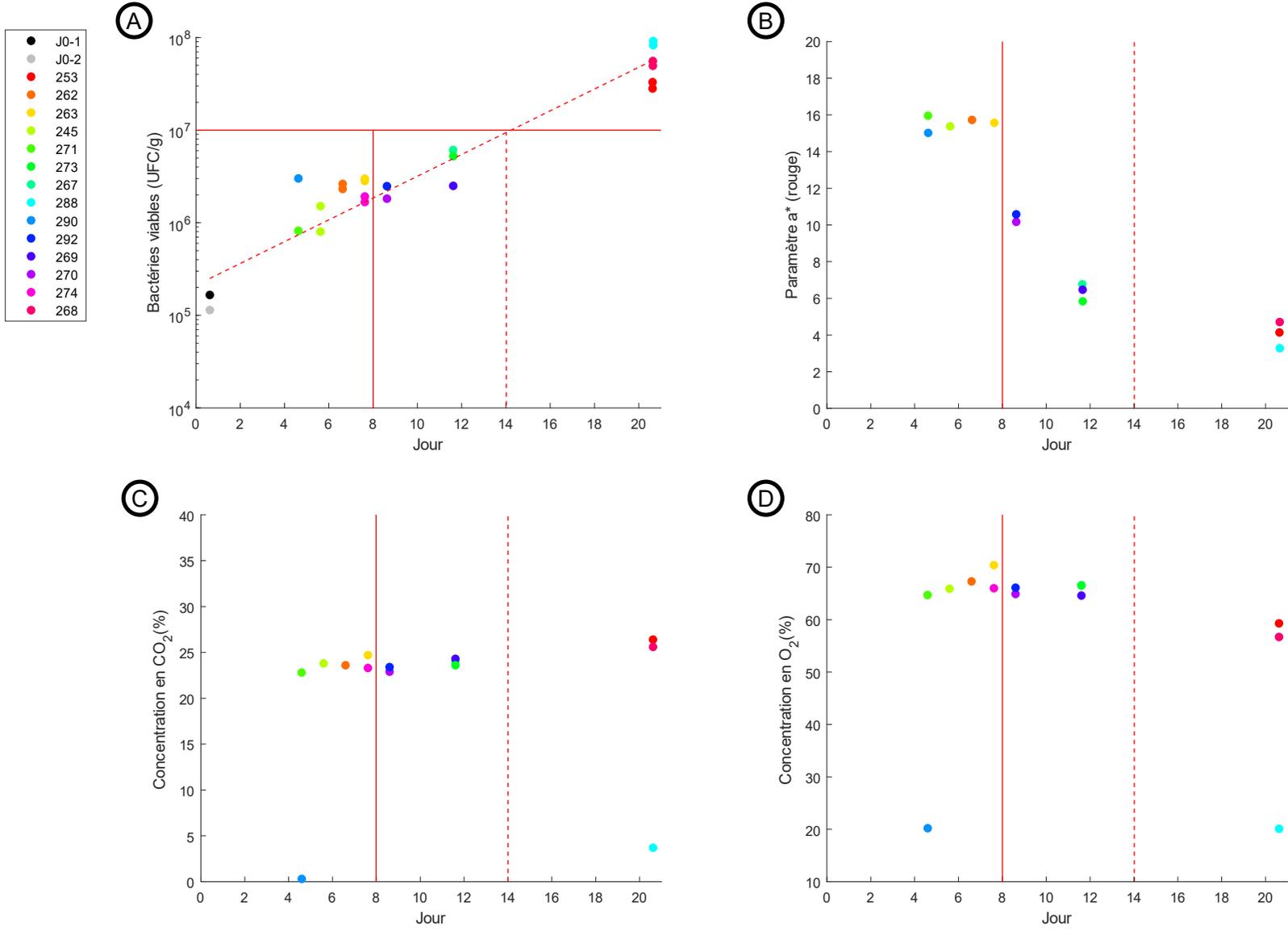


Figure 4-5 Suivi de la dégradation de la viande par tests destructifs dans les laboratoires de Montpellier

Chaque composé chimique possède une signature spectrale FTIR spécifique, et les composés cibles pour cette application présentent des absorptions dans le domaine infrarouge étudié, comme présenté dans le Tableau 4-1.

Composé	Nombre d'onde (cm ⁻¹)	Signification
Dioxyde de carbone	2349 [11]	Respiration aérobie
Amines (liaisons N-H)	3350 [11]	Décomposition des acides aminés
Acide iso-valérique et isobutyrique	2875 et 2965 [12], [13]	Dégradation de l'acide lactique par les <i>Lactobacillus</i>

Tableau 4-1 Bandes FTIR remarquables pour notre application

Les analyses FTIR de l'échantillon n° 253 en sortie de l'emballage et deux jours après sont présentées dans la Figure 4-6. Une calibration a d'abord été faite avec un tag-capteur non-utilisé. L'appareil affiche seulement la différence de signal par rapport à cette calibration.

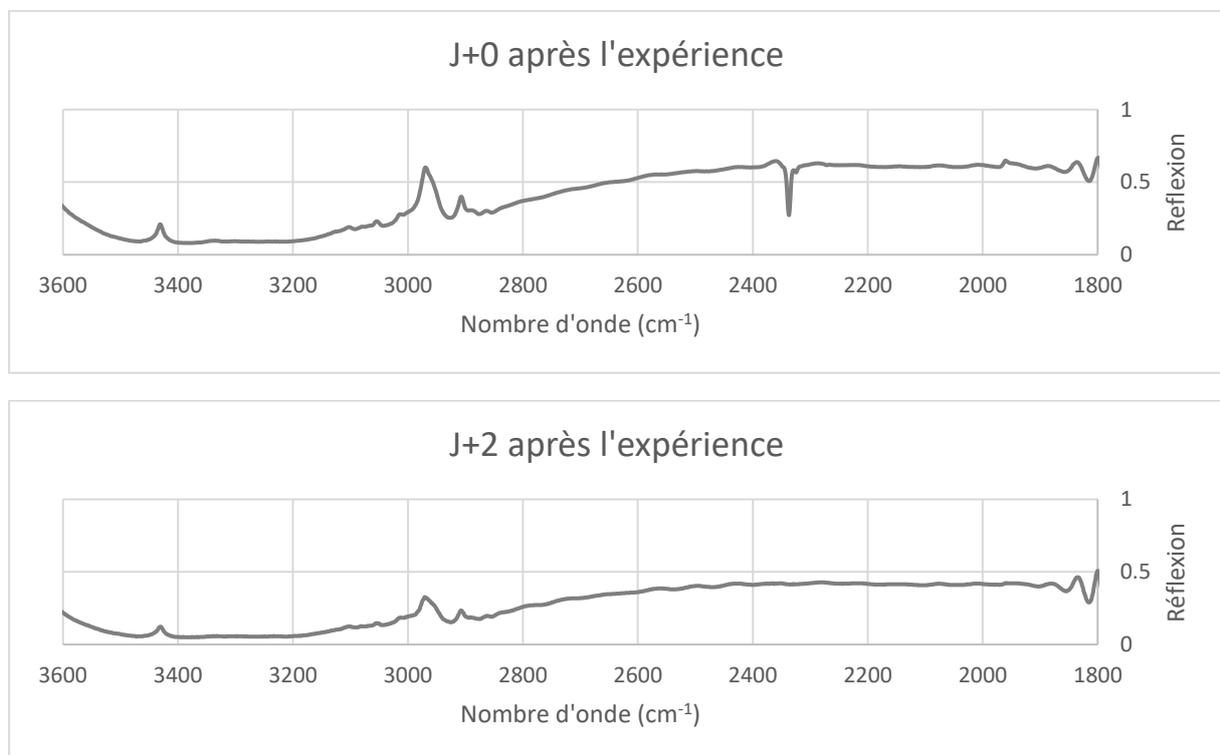


Figure 4-6 Analyse FTIR en réflexion

À 2349 cm⁻¹, l'empreinte du CO₂ sur le spectre FTIR est présente le jour de sa sortie de l'emballage. Il semblerait donc que le CO₂ était bien présent sur le biopolymère lors de sa sortie de l'emballage. En effectuant cette analyse deux jours plus tard, l'empreinte disparaît. Le biopolymère peut, soit avoir désorbé le CO₂, soit avoir réagi avec lui et formé ainsi une autre espèce chimique.

À 3350 cm⁻¹, l'action des amines est invisible sur le biopolymère. Il est possible que la bande spectrale des amines soit masquée par la réponse globale du biopolymère. En effet, après le passage dans l'emballage, le biopolymère absorbe l'ensemble de la lumière de la bande 3200-3400 cm⁻¹.

On note une différence d'amplitude autour de 2900 cm⁻¹ entre les deux analyses. Il est possible que le biopolymère ait absorbé de l'acide iso-valérique ou isobutyrique et les désorbent lentement.

Sur certains tags, la présence d'eau est observée. Aussi, les variations peuvent notamment venir d'un surplus de condensation. Ceci peut s'expliquer par la régulation en température de la chambre climatique qui n'est jamais parfaite, et l'opération de lecture de tag qui se fait à l'extérieur de la

chambre climatique et qui peut réchauffer l’emballage, comme l’atteste la Figure 4-7. Aussi, la température à l’intérieur de l’emballage augmente et l’eau contenue dans la viande peut se vaporiser dans l’espace de tête. Quand la température redescend, l’espace est à saturation et l’eau condense. Dans ce cas, le tag peut se comporter comme un capteur d’humidité irréversible. Il pourrait alors indiquer des expositions à une température excessive.

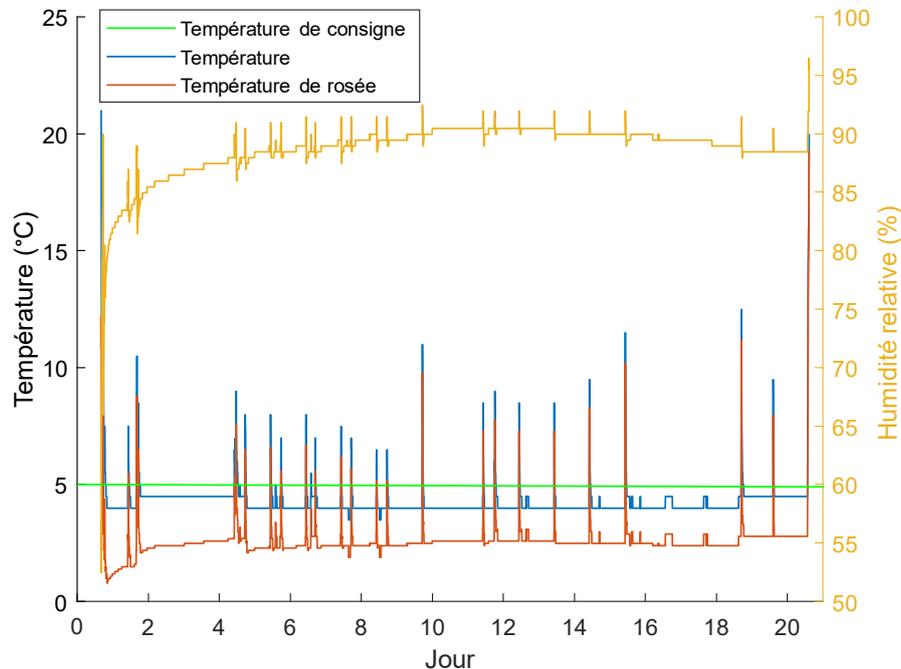


Figure 4-7 Suivi de température et d'humidité pour l'expérience de laboratoire et l'échantillon 268

Cette expérience a été répétée deux fois avec les mêmes résultats, attestant de la répétabilité de la mesure de l'état de la viande.

4.3. MESURES RFID-CAPTEUR AVEC UN LECTEUR CONVENTIONNEL

4.3.1. Développement de la solution

Pour combler l'application industrielle de ce travail de thèse, le choix d'un lecteur RAIN plus conventionnel était nécessaire. Et, ayant fait le choix de s'appuyer sur la puissance d'activation pour le développement du programme de lecture associé, un algorithme efficace doit ainsi être fourni. Pour rappel, la puissance d'activation est la plus petite puissance émise par le lecteur qui lui permet d'obtenir une réponse du lecteur.

Comme le montre la Figure 4-8, un algorithme optimisé a été construit. De plus, il va commencer sa recherche de limite à la moitié de sa puissance. Pour certaines mesures de balayage (par exemple, balayage de fréquence ou de distance), cet algorithme peut être encore plus rapide en fixant la puissance de départ au résultat précédent de la mesure. En effet, les résultats dont les paramètres sont proches sont souvent semblables.

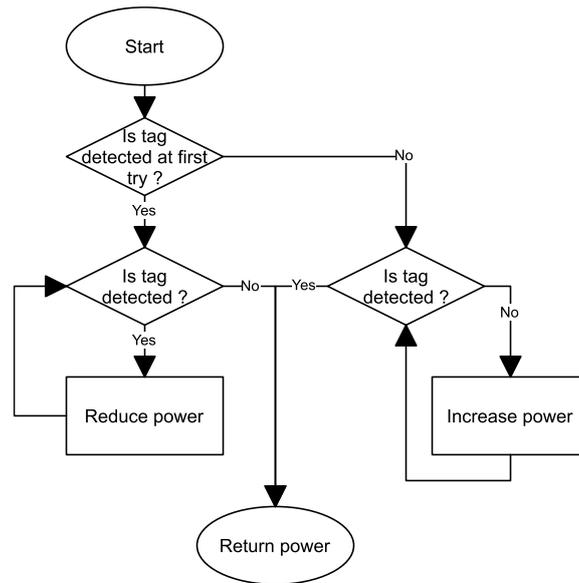


Figure 4-8 Algorithme de mesure de la puissance d'activation

Tageos a été chargée de développer le logiciel de lecture de tags-capteurs suivant notre cahier des charges. Aujourd'hui, l'implémentation de la technologie RFID NFC est très bien avancée, et ce, jusqu'aux applications utilisées tous les jours (par exemple, le paiement sans contact sur mobile). Contrairement à la technologie NFC, il existe peu d'implémentation simple et, surtout, universelle, qui permettrait de se servir de plusieurs modèles de lecteur RAIN.

Tageos a donc fait le choix de construire une solution propriétaire. Cette solution devait être portable et simple. Celle-ci repose sur un smartphone accueillant le programme réalisé par Fréquentiel et un lecteur RAIN couplé au smartphone par liaison Bluetooth. Ce dernier est le modèle RFD800 de Zebra, il fonctionne sur batterie et son encombrement minimal (430 grammes) le rend portable.

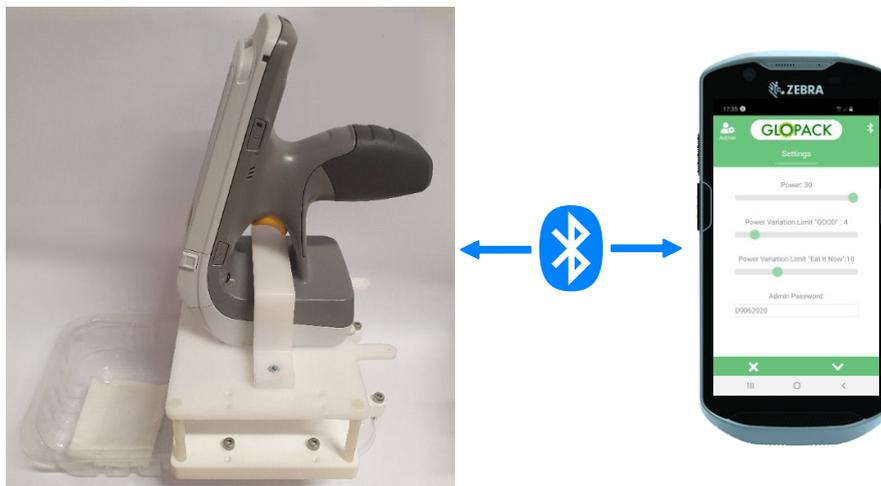


Figure 4-9 Lecteur RAIN Zebra RFD800 avec l'adaptateur aux emballages Coopbox

En septembre 2021, le système Android de Google est installé sur plus de 70 % des smartphones en circulation [14]. Pour faciliter l'installation du programme développé, Fréquentiel a donc choisi cette plateforme logicielle pour développer son programme. Le programme implémente l'algorithme de détection de la puissance d'activation, présenté précédemment.

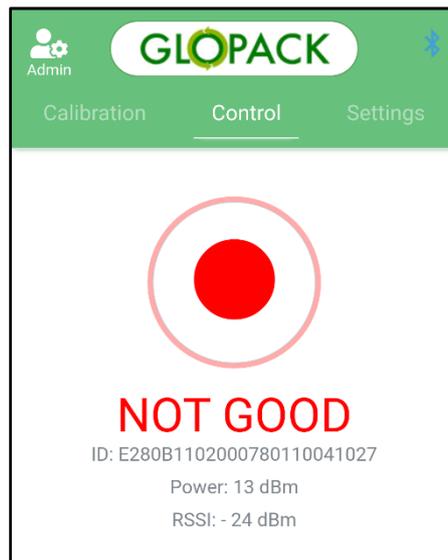


Figure 4-10 Interface utilisateur du programme de Fréquentiel

L'interface utilisateur du programme présente trois affichages principaux pour : contrôler la dégradation, calibrer le capteur RFID, et accéder aux réglages.

Au démarrage, l'application affiche directement l'onglet « control » qui permet de mesurer la puissance d'activation d'un tag RAIN, comme le montre la Figure 4-10. En cliquant sur le cercle central, une nouvelle mesure est déclenchée. Le programme affiche alors le TID de la puce contenue dans le tag RAIN, sa puissance d'activation (issue de l'algorithme présente précédemment), ainsi que la valeur de RSSI lors de l'activation. Par un code couleur simple (vert, orange, rouge) et des indications textuelles correspondantes (bon, prêt à consommer, pas bon), l'application estime aussi la dégradation de l'aliment qui partage le contenant avec le tag-capteur RAIN pour l'utilisateur final (industrie agro-alimentaire ou consommateur).

Cette estimation est faite à partir de données de calibration que nous proposons de stocker dans la mémoire utilisateur de la puce. Le logiciel n'a donc pas besoin d'une connectivité à une base de données pour déterminer la dégradation de l'aliment. En effet, la puissance d'activation est mesurée au moment de stabilisation du signal en début de suivi et constitue la calibration.

Le troisième affichage est l'onglet « settings ». Il permet de régler la première puissance envoyée par le lecteur lors de la recherche de la puissance d'activation. Comme abordé précédemment, ce réglage permet d'accélérer la recherche. L'onglet permet aussi de régler des valeurs de seuil relatifs à la valeur de calibration. Ils conditionnent ainsi l'affichage des trois états de dégradation des aliments. En effet, lors de la lecture d'un tag-capteur, sa valeur de puissance d'activation va être comparée à celle de calibration. La différence entre les deux est ensuite comparée aux valeurs de seuil. Par exemple, si elle est supérieure au seuil « pas bon », le cercle central de l'onglet « control » s'affichera en rouge.

Les affichages permettant la calibration et les réglages ne sont accessibles qu'aux utilisateurs disposant d'un mot de passe. Cela permet de séparer 3 types d'utilisateurs :

- Celui qui va mettre le tag-capteur RAIN dans l'emballage avec l'aliment. Il va devoir déterminer, en fonction de l'aliment, les puissances minimale et maximale de lecture, et les niveaux relatif de transition.
- Celui qui va faire la calibration des tag-capteurs
- L'utilisateur final (sans mot de passe)

Visible dans la Figure 4-9, la lecture du tag-capteur dans l'emballage est effectuée avec un guide fixé au lecteur RAIN. Ceci permet de conserver une même distance entre lecteur et tag afin de ne pas perturber la mesure.

4.3.2. Validation de la solution

Le fonctionnement de la solution de lecture conventionnelle avec la lecture de laboratoire a été ensuite comparé. Pour cela, une expérience a été menée en parallèle avec une expérience similaire à celle présentée plus haut. Elle consistait en la mesure des échantillons avec la solution conventionnelle. Ces mesures ont été ensuite comparées avec celles de la solution de laboratoire.

La Figure 4-11 présente les résultats moyens obtenus par les deux instruments et par jour. Les deux techniques de mesure montrent une augmentation des signaux. La différence entre ces signaux est tracée en vert dans la Figure 4-11.

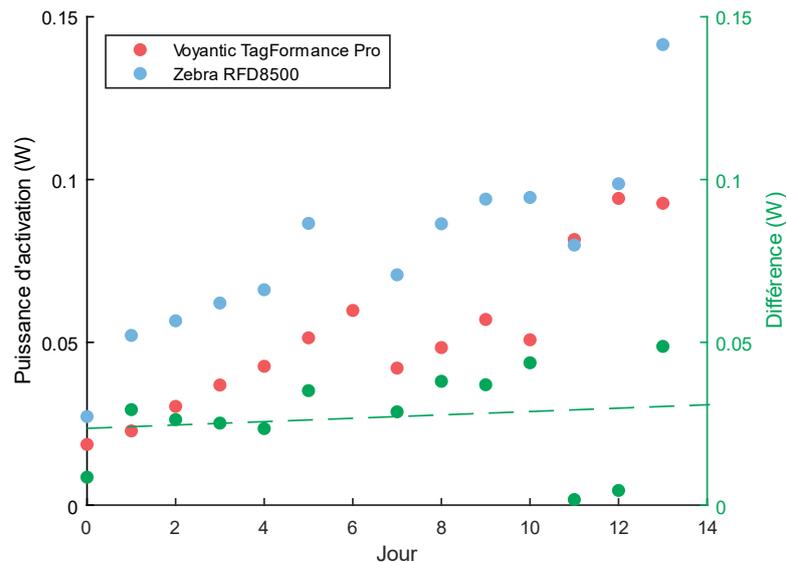


Figure 4-11 Comparaison des solutions de laboratoire et conventionnelle

Bien que la différence entre les signaux des deux instruments ne soit pas négligeable, elle reste, en moyenne, constante. Une légère déviation de 518 μ W par jour est observée. Les résultats étant de l'ordre de la dizaine de milliwatt, cela occasionnera une différence de 0,219 dB au maximum. Cette différence est au-dessous des 0,5 dBm de résolution en puissance habituels pour les lecteurs conventionnels, et n'engendrera pas des différences trop importantes entre les deux signaux.

4.4. EVALUATION DANS DES CONDITIONS INDUSTRIELLES

Pour tester la reproductibilité des mesures effectuées, nous avons envoyé notre solution complète à un partenaire industriel italien, Coopbox, membre du consortium GLOPACK. Ce partenaire est spécialisé dans la fabrication d'emballages alimentaires plastiques. Ainsi, les emballages sélectionnés pour l'expérience sont composés de 400 μ m de PET (Polyéthylène Téréphtalate). Leur contenance est de 1,2 litre (230 \times 145 \times 36 mm). L'opercule en PET mesure 30 μ m d'épaisseur. La perméance des gaz a été modélisée et le résultat est similaire au résultat pour l'emballage PP, représenté en Figure 4-1. Les mesures de contamination bactérienne s'effectuèrent en collaboration avec l'université de Modène. L'expérience dura 12 jours. Ensuite, nos partenaires nous ont transmis les données pour leur traitement.

Afin que cette nouvelle expérience apporte une nouvelle information, celle-ci a été menée à deux températures : une, classique pour le stockage de la viande (6 °C), et l'autre à 4 °C supplémentaires (10 °C), qui simule un stockage défaillant.

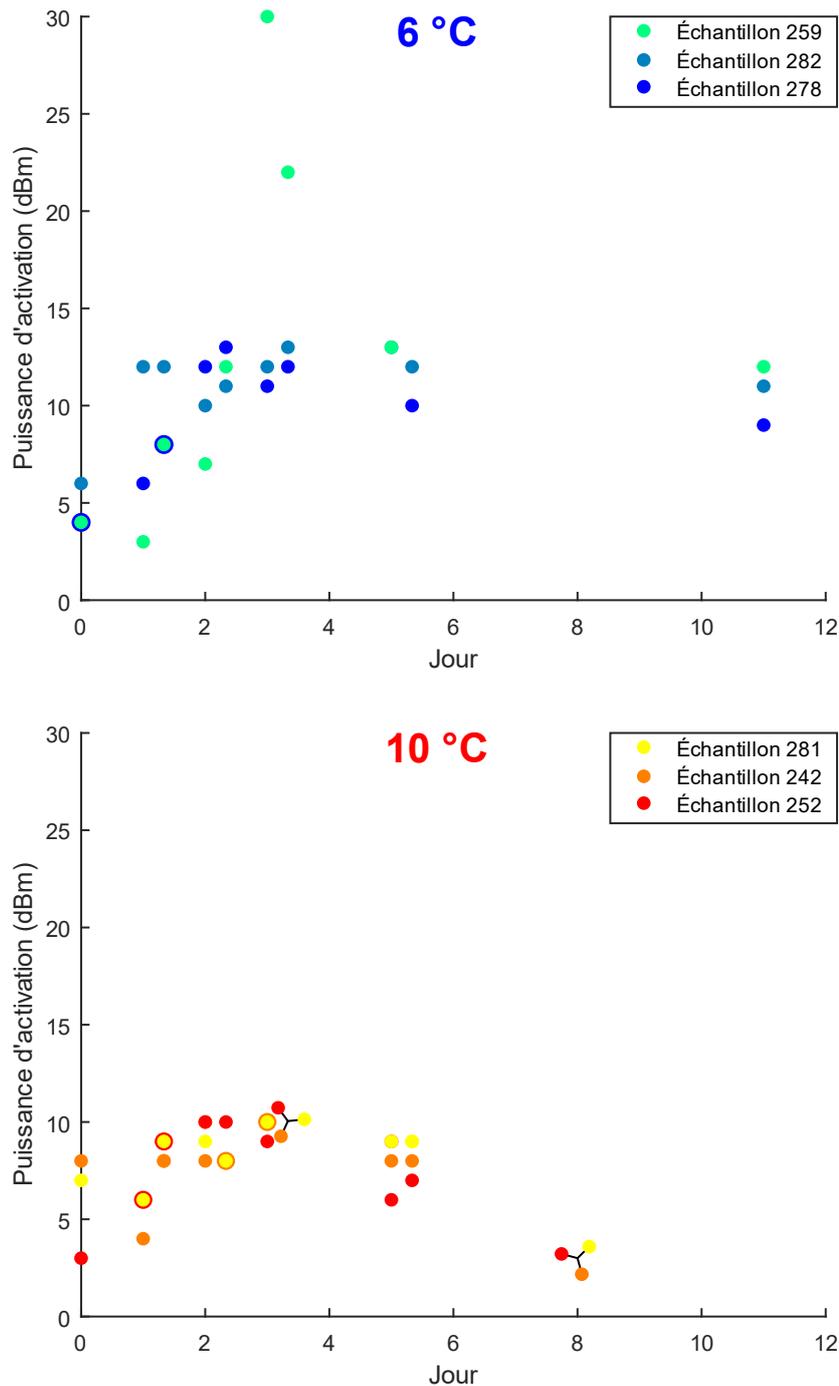


Figure 4-12 Expérience avec la viande dans les laboratoires de Modène

Les puissances d'activation de 6 tags-capteurs en fonction du temps sont reportés dans la Figure 4-12. Comme pour l'expérience de laboratoire, on observe, sur l'ensemble des signaux, la mise à l'équilibre de l'humidité au cours du premier jour. Pendant les 3 premiers jours, on note la présence du pallier, et cela pour les 2 séries de température de stockage. Au 3^{ème} jour, il semblerait néanmoins qu'une erreur se soit produite avec l'échantillon 259 car celui-ci montre une évolution anormale de sa puissance d'activation. À partir du 5^{ème} jour, les deux séries commencent à diverger pour finir avec plus de 5 dBm de différence entre les mesures des deux séries.

On note que l'évolution est contraire à l'expérience précédente. En effet, pour l'expérience en milieu industriel, la puissance d'activation baisse avec la dégradation alimentaire. Ceci est dû au changement

de matériaux à proximité du système lecteur et tag-capteur. Pour la lecture avec le lecteur RFID conventionnel, une entretoise en PTFE (polytétrafluoroéthylène) a été placée pour conserver la distance. Comme présentée dans la Figure 4-13, elle influence grandement le tag-capteur par rapport à la configuration de laboratoire (basée sur du plastique PP).

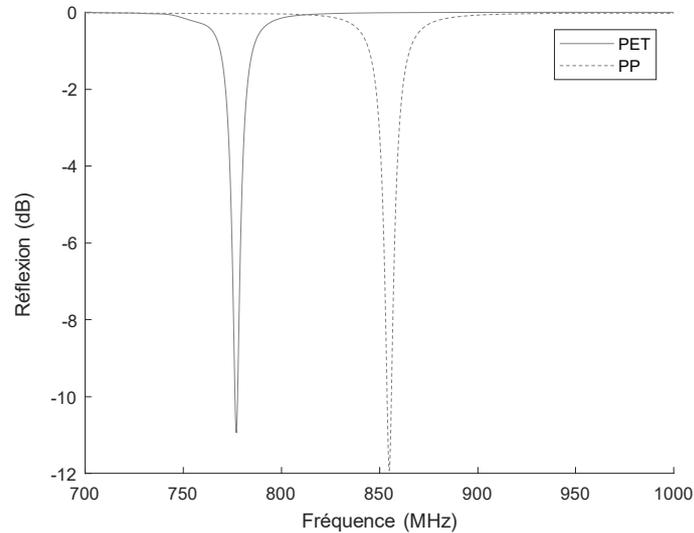


Figure 4-13 Fréquence de résonance du tag-capteur sans humidité (20 % HR) dans 2 configurations

Dans le graphique A de la Figure 4-14, nous traçons une régression exponentielle pour les échantillons soumis aux deux températures. Le dépassement de la limite de consommabilité intervient beaucoup plus tôt pour la viande mal stockée à une température plus haute. Ce dépassement commençait à être visible sur les mesures de puissance d'activation du 5^{ème} jour, mais celles-ci ne montraient pas encore de variation significative provoquant une alerte. Les données concernant les échantillons conservés à une température adéquate montrent le même comportement. En effet, au 11^{ème} jour, la limite de consommabilité est dépassée et les puissances d'activations montrent un léger décalage vers de plus faibles valeurs, mais toujours sans être alarmantes.

Cette dégradation est aussi notable dans le graphique C et D de la Figure 4-14, représentant respectivement les mesures d'oxygène et de dioxyde de carbone dans les emballages au moment de leur destruction. En effet, les échantillons stockés à 10 °C montre une variation plus rapide dans leur espace de tête, l'O₂ diminue au profit du CO₂. Pour les échantillons stockés à une température adéquate, à 6 °C, la variation est beaucoup plus faible.

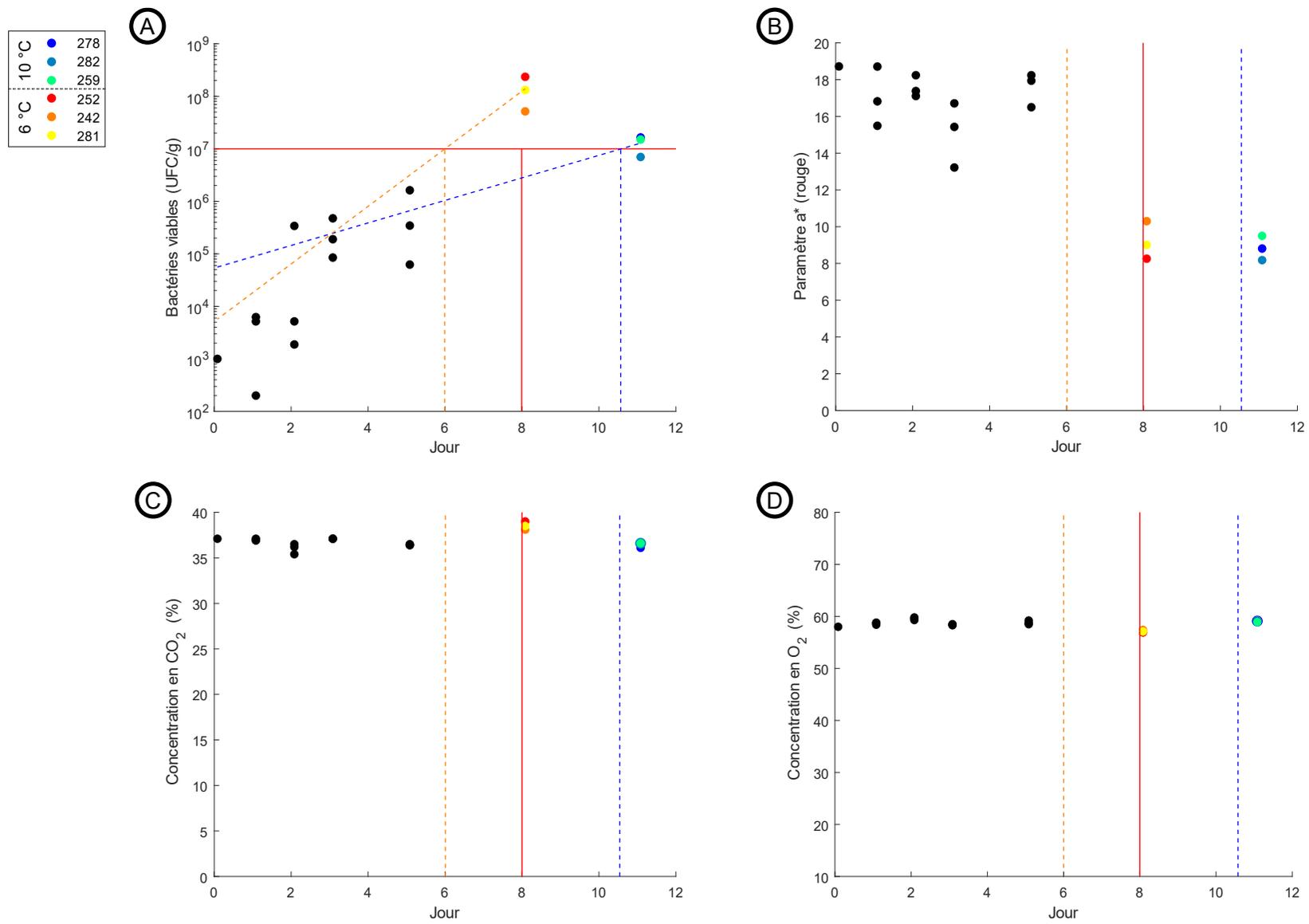


Figure 4-14 Suivi de la dégradation de la viande par tests destructifs dans les laboratoires de Modène

4.5. CONCLUSION

Au cours de ce chapitre, la solution de tag-capteur a été expérimentée dans un environnement se rapprochant le plus de son utilisation finale supposée.

Les actions des différents acteurs dans la logistique des aliments emballés ont ainsi pu être mieux définis.

L'installation du tag-capteur dans l'emballage sera à la charge du producteur de la viande emballée. En même temps qu'il définit l'EPC (Electronic Product Code) afin d'étiqueter le produit, il encodera le tag avec les mêmes informations pour faciliter l'inventaire tout au long de la chaîne logistique.

Un délai d'un jour est nécessaire pour que le tag-capteur soit pleinement opérationnel et est atteint une stabilité. Une fois ce délai passé, il faut que l'acteur en charge des emballages à cet instant initie la calibration.

Ensuite, les acteurs suivants dans la chaîne logistique auront accès à la mesure de la puissance d'activation et à l'estimation de l'état de l'aliment.

Comme nous avons pu le remarquer, une marge existe entre date d'expiration inscrite sur le produit et date réelle de non consommabilité. Notre projet a pour objectif de suivre la dégradation alimentaire afin de réduire le gaspillage alimentaire. La dégradation est fonction des conditions climatiques et de la contamination intrinsèque du produit alimentaire. Avec l'expérience menée dans des conditions industrielles, il a été observé, qu'en cas de stockage ne respectant pas les conditions de température optimale, la marge prise par les producteurs n'était même pas suffisante. Dans ce cas précis, notre tag-capteur peut ainsi informer l'utilisateur de cette mauvaise condition de stockage.

En comparant l'expérience de laboratoire avec celle menée dans des conditions industrielles, nous avons vu qu'un changement de conditions expérimentales peut entraîner des variations de signes opposés. Puisque le programme fourni avec le lecteur conventionnel se base sur la simple différence de puissance d'activation, il est alors possible de spécifier un nombre en valeur absolue. Et, ainsi, notre solution peut fonctionner normalement.

Pour le moment, le tag-capteur est capable d'informer le consommateur du dépassement de la limite de consommabilité. Avec les pistes d'améliorations sur la transduction par le biopolymère évoquées dans le chapitre 2, il serait alors possible de prédire la date de dépassement. Ainsi, la gestion des stocks dans les magasins serait améliorée en promouvant les produits ayant subis des incidents. Le gaspillage alimentaire se verrait aussi réduire.

REFERENCES

- [1] World Health Organization et Foodborne Disease Burden Epidemiology Reference Group, *WHO estimates of the global burden of foodborne diseases*. 2015. Consulté le: janv. 20, 2021. [En ligne]. Disponible sur: <http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/199350/1/9789241565165%5Feng.pdf?ua=1>
- [2] F. Yiannas, « Looking Back to Shape the Future », in *Food Safety Culture: Creating a Behavior-Based Food Safety Management System*, F. Yiannas, Éd. New York, NY: Springer, 2009, p. 1-10. doi: 10.1007/978-0-387-72867-4_1.
- [3] F. Bibi, M. Villain, C. Guillaume, B. Sorli, et N. Gontard, « A Review: Origins of the Dielectric Properties of Proteins and Potential Development as Bio-Sensors », *Sensors*, vol. 16, p. 1232, août 2016, doi: 10.3390/s16081232.
- [4] O. Erkmén et T. F. Bozoglu, Éd., « Spoilage of Meat and Meat Products », in *Food Microbiology: Principles into Practice*, John Wiley & Sons, Ltd, 2016, p. 279-295. doi: 10.1002/9781119237860.ch16.
- [5] WITT-Gasetechnik, « Gas Analyser OXYBABY M+ », *WITT-Gasetechnik*. <https://www.wittgas.com/products/gas-analysers/mobile-analysers/gasanalyseroxybabymplus/> (consulté le sept. 15, 2021).
- [6] « Microorganismes aérobies M-147 ». Institut national de recherche et de sécurité, nov. 2015. Consulté le: févr. 25, 2021. [En ligne]. Disponible sur: https://www.inrs.fr/publications/bdd/metropol/fiche.html?refINRS=METROPOL_147
- [7] European Parliament et Council of the European Union, *Regulation 883/2004 of the European Parliament and of the Council of 29 April 2004*. 2004. Consulté le: oct. 21, 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX%3A32004R0853>
- [8] Fédération du Commerce et de la Distribution, « Critères microbiologiques applicables à partir de 2021 aux activités de fabrication, préparation, découpe ou simple manipulation de denrées nues en rayon « à la coupe » et en atelier magasin ». Fédération du Commerce et de la Distribution, sept. 10, 2020. [En ligne]. Disponible sur: http://www.fcd.fr/media/filer_public/2d/53/2d53c9bb-5ff8-4ec3-bcf5-e202d15dcd08/fcd_criteres_microbiologiques_2021_ateliers_rayons_coupe_091020208_vdef.pdf
- [9] O. Erkmén et T. F. Bozoglu, Éd., « Microbial Metabolism of Food Components », in *Food Microbiology: Principles into Practice*, vol. 3, 3 vol., John Wiley & Sons, Ltd, 2016, p. 217-227. doi: 10.1002/9781119237860.ch38.
- [10] R. A. Mancini, « 4 - Meat color », in *Improving the Sensory and Nutritional Quality of Fresh Meat*, J. P. Kerry et D. Ledward, Éd. Woodhead Publishing, 2009, p. 89-110. doi: 10.1533/9781845695439.1.89.
- [11] I. Fleming et D. Williams, « Infrared and Raman Spectra », in *Spectroscopic Methods in Organic Chemistry*, Springer, Cham, 2019, p. 85-121. Consulté le: févr. 02, 2021. [En ligne]. Disponible sur: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-18252-6_3
- [12] « Isovaleric acid - FTIR - Spectrum - SpectraBase ». <https://spectrabase.com/spectrum/LoUkKXipnJm> (consulté le oct. 07, 2021).
- [13] « Isobutyric acid - FTIR - Spectrum - SpectraBase ». <https://spectrabase.com/spectrum/2c94KjcLBPe> (consulté le oct. 07, 2021).
- [14] StatCounter, « Mobile Operating System Market Share Worldwide », *StatCounter Global Stats*, sept. 14, 2021. <https://gs.statcounter.com/os-market-share/mobile/worldwide> (consulté le sept. 14, 2021).

CONCLUSION GÉNÉRALE

Pour le tag-capteur réalisé lors de ce travail de thèse, trois qualités étaient recherchées : la simplicité, la fiabilité, et l'efficacité.

Un état de l'art exhaustif nous a permis d'avoir un positionnement clair dans le développement de solutions de tags-capteurs RAIN. Une architecture de tag-capteur a pu émerger de ces conclusions pour une industrialisation simple. Ainsi, l'antenne du tag réalisé est couplée avec une capacité interdigitée qui va servir de capteur. Cet élément est directement utilisé par le circuit d'adaptation entre l'antenne et la puce. Cela permet à l'adaptation de varier avec le mesurande et de ne pas complexifier plus le circuit de l'antenne. La capacité interdigitée crée un champ électrique qui rayonne en dehors du plan de celle-ci. Sa valeur d'impédance va alors être fonction des éléments alentours. Il est alors très simple de déposer une couche sensible pour rendre le tout capteur. La conception coplanaire permet l'utilisation d'un processus de fabrication déjà utilisée pour les étiquettes RFID classiques.

Le tag-capteur sera donc compatible avec les procédés de fabrication industriels.

Les éléments transducteurs de notre tag-capteur sont des dépôts composés de biopolymères qui sont encore des sous-produits de l'industrie agro-alimentaire, donc peu cher. Ainsi, nous avons étudié les propriétés diélectriques du gluten, de la caséine, de l'isolat de protéine de soja, et de la gélatine. Pour la mise en application de cette thèse, nous avons choisi le gluten car ses propriétés diélectriques sont mieux connues.

Les propriétés diélectriques des biopolymères changent par leur conformation. Ainsi, ils sont sensibles à la température qui va introduire de l'agitation dans les molécules. L'humidité apportant de l'eau aux biopolymères, leur conformation va aussi être modifiée par les interactions faibles entre les molécules d'eau et les biopolymères. Le réseau 3D des biopolymères offre aussi de l'espace pour l'eau ou pour d'autres éléments. Ainsi, quand l'eau a saturé les sites d'interaction des biopolymères, l'eau va s'imprégner dans la structure et va imposer ses propriétés diélectriques. La première utilisation pratique du tag-capteur pour mesurer l'humidité relative a été validé dans cette thèse.

Lorsqu'un aliment se dégrade, plusieurs processus biologiques se déclenchent. La plupart dégagent des composés chimiques organiques et volatiles. Si l'aliment est conservé dans un environnement fermé, les composés vont s'accumuler dans l'espace de tête de l'emballage. Ces éléments vont pouvoir interagir avec le biopolymère et modifier son comportement diélectrique. Pour cela, nous avons caractériser la réaction du tag-capteur à des variations de concentration en dioxyde de carbone, dégagé lors de la respiration aérobie de certains micro-organismes.

La caractérisation du tag-capteur a été menée jusqu'à son terme, c'est-à-dire, jusqu'à un cas d'application réel. Nous avons, tout d'abord, expérimenté le système dans nos locaux afin de nous assurer de la précision, justesse et répétabilité des mesures. Par la suite, nous avons collaboré et envoyé notre système à nos partenaires européens pour tester la reproductibilité de la mesure. Et enfin, malgré un comportement différent entre le système de laboratoire et celui plus conventionnel, la mesure de la dégradation alimentaire reste cohérente. Un accident de stockage a été simulé et les tags-capteurs sont à même de détecter l'instant où l'aliment dépasse la limite de contamination.

La fiabilité du tag-capteur est donc validée pour une utilisation dans des conditions industrielles.

La conception presque conventionnelle du tag-capteur permet une meilleure conformité avec les règles établies par les régulations radio.

De plus, le travail bibliographique a aussi permis de nous familiariser avec les types de mesures accessibles aux lecteurs RAIN et de prévoir les exigences ou faiblesses de ces mesures. Des méthodes de mesures compatibles avec des lecteurs conventionnels sont implémentés. De plus, ces méthodes

sont intégrées dans une architecture logicielle qui permet une possible compatibilité avec n'importe lequel lecteur RAIN.

En ne dégradant pas les caractéristiques classiques d'un tag RAIN tout en rajoutant le suivi de la dégradation alimentaire, l'efficacité de la solution proposée ici est augmentée.

Le travail bibliographique nous a aussi permis de comparer notre travail avec d'autres solutions de tags-capteurs RAIN (cf. Tableau 2-1).

Contrairement à d'autres solutions, le contact avec l'aliment surveillé est limité et ne peut intervenir qu'en cas de retournement. En effet, la mesure de la dégradation de l'aliment n'est pas directe. La mesure se concentre sur l'environnement gazeux et de sa perturbation apportée par la dégradation. L'environnement doit donc être fermé.

L'environnement gazeux de base injecté dans l'emballage est différent de l'air ambiant. Ainsi, en cas de rupture franche de l'opercule, une grande variation de l'environnement gazeux va pouvoir être détecté par le tag-capteur. Seules les solutions mesurant les caractéristiques de l'environnement gazeux ont accès à ce signalement.

Les phénomènes de condensation de l'humidité et le faible temps de désorption du CO₂ implique une forte hystérésis de la part de notre capteur RFID et le place en limite des capteurs irréversibles. L'avantage est ici d'indiquer une modification de l'environnement délétère pour l'aliment même si l'incident a été résolu et sans nécessiter une alimentation du tag-capteur constante (par la lecture ou par alimentation externe).

PERSPECTIVES

Une perspective à cette solution serait d'utiliser les deux bandes de fréquence bientôt disponibles en Europe pour accéder à une mesure différentielle. En effet, comme démontré dans le chapitre 2, un tag RFID peut montrer deux résonnances indépendantes. L'une constituera une réponse de référence pour le tag-capteur, et l'autre variera avec le mesurande. Ainsi, considérant qu'une perturbation de la propagation affecte l'une comme l'autre, nous pourrions supprimer cette perturbation en ne considérant que leur différence.

Bien que l'ensemble des composants du tag-capteur soit sans danger, le biopolymère peut être le seul élément potentiellement en contact avec l'aliment (en cas de retournement de l'emballage). En effet, le biopolymère serait appliqué à l'intérieur de l'emballage et serait séparé du tag-capteur par l'opercule. Comme nous l'avons vu au chapitre 2, le champ électrique produit par la capacité interdigitée peut être modulé pour pouvoir capter les variations de permittivité du biopolymère.

Des pistes d'amélioration de la détection des composés volatiles ont aussi été évoquées. Celles-ci permettront d'améliorer la sensibilité du tag-capteur et ainsi, de non plus seulement informer sur le dépassement de la limite de contamination, mais prédire cet instant. Néanmoins pour cela, comme la croissance microbienne est un processus qui est exponentiel, l'amélioration de la sensibilité devra être grande. Pour cibler spécifiquement la sensibilité au CO₂, l'augmentation du pH du gel de biopolymère est fortement envisagée.

CAPTEUR RFID UHF SIMPLE, FIABLE ET EFFICACE APPLICATION À L'EMBALLAGE ALIMENTAIRE INTELLIGENT

Capteur, Fiabilité, RFID, Flexible, Dioxyde de carbone, Agro-alimentaire

L'utilisation de la technologie d'identification par radiofréquence (RFID) gagne en popularité. Le paiement sans contact, les cartes de transports, ou encore les alarmes anti-vols sont des exemples avec une utilisation quasiment journalière. Ces solutions de stockage d'information d'identification sans fil trouvent même leurs applications pour remplacer le code-barre par une étiquette RFID. En effet, pour une utilisation industrielle, le coût de ces étiquettes dites passives est réduit par l'absence de batterie. Elles utilisent généralement le protocole EPC de génération 2 qui fonctionne en bande UHF (Ultra-Hautes Fréquences). Pour apporter plus d'information sur le produit étiqueté, ce protocole de communication autorise les concepteurs d'étiquette à y adjoindre une fonction capteur. Ainsi, la lecture peut remonter des informations sur l'état du produit. Aujourd'hui encore, beaucoup de solutions d'étiquettes-capteurs conçus par le milieu académique dépassent les limites imposées par les gouvernements en termes de puissance et/ou de fréquence. Notre but est de proposer une solution adaptée au terrain des professionnels. Pour cela, nous avons conçu une étiquette-capteur dont le processus de mesure est conforme aux directives gouvernementales et proposons un conditionnement du signal compatible avec les lecteurs RFID UHF conventionnel et standard. Dans ce travail, l'application cible le domaine de la logistique agro-alimentaire. En effet, l'étiquette-capteur mesure une combinaison d'éléments volatiles libérés dans l'emballage alimentaire fermé donnant alors un état de la dégradation de l'aliment. De concert avec un partenaire industriel, une validation a été menée dans un environnement opérationnel.

SIMPLE, RELIABLE AND EFFICIENT UHF RFID-SENSOR APPLICATION TO FOOD SMART-PACKAGING

Sensor, Reliability, RFID, Flexible, Carbon dioxide, Agri-food

The use of radio frequency identification (RFID) technology is gaining in popularity. Contactless payment, transportation cards, or even anti-shop-lifting alarms are daily used examples of this technology. These wireless solutions that store identification data even find their application to replace the barcode label. An RFID tag is placed on an object and store more data than just its model identifier like its serial number, producer, expiry date, ... In industrial field, the cost of these so-called passive tags is reduced by the absence of battery. They generally use the EPC (Electronic Product Code) protocol of generation 2, branded as "RAIN", which works in UHF band (Ultra High Frequencies). To provide more information on the tagged product, this communication protocol allows tag designers to add several sensing features. Thus, the reading can bring back more information on the state of the spoiling product. Today, many sensing tag solutions designed by academics still exceed regulatory limits imposed by governments in terms of power and/or frequency. Our goal is to propose a solution that is suited to industrial partners needs. To do so, we design a sensing tag whose measurement process is compliant with governmental guidelines and propose a signal conditioning compatible with conventional and standard-compliant UHF RFID readers. In this work, the application targets the field of agri-food logistics. Indeed, the sensor-tag measures a combination of volatile elements released in the closed food packaging and gives indications of the degradation of the food. In collaboration with multiple industrial partners, several validations were conducted in an operational environment.