



HAL
open science

Etude et conception d'un capteur-RFID passif en bande UHF : application à l'agroalimentaire

Yassin Belaizi

► **To cite this version:**

Yassin Belaizi. Etude et conception d'un capteur-RFID passif en bande UHF : application à l'agroalimentaire. Electronique. Université Montpellier, 2018. Français. NNT : 2018MONTTS061 . tel-02134586

HAL Id: tel-02134586

<https://theses.hal.science/tel-02134586>

Submitted on 20 May 2019

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

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

THÈSE 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)

ETUDE ET CONCEPTION D'UN CAPTEUR-RFID PASSIF EN BANDE UHF APPLICATION A L'AGROALIMENTAIRE

Présentée par Yassin BELAIZI
Le 30 Novembre 2018

Sous la direction de
M. Brice SORLI et M. Arnaud VENA

Devant le jury composé de

Smaïl TEDJINI, Professeur des universités, LCIS, Grenoble-INP

Jean-Marc LAHEURTE, Professeur des universités, ESYCOM, Université Paris-Est

Jean François CHATEAUX, Maître de Conférences, INL, Université Claude Bernard

Fabien PASCAL, Professeur des universités, IES, Université de Montpellier

Valérie GUILLARD, Maître de Conférences, IATE, IUF, Université de Montpellier

Camille RAMADE, Ingénieur projet, société TAGEOS, Montpellier

Arnaud VENA, Maître de Conférences, IES, Université de Montpellier

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

Rapporteur

Rapporteur

Examineur

Président du jury

Invitée

Invité

Co-encadrant de thèse

Directeur de thèse



UNIVERSITÉ
DE MONTPELLIER

Remerciements

Ces travaux de thèse ont été réalisés au Laboratoire de l'Institut d'Électronique et des Systèmes (UMR 5214), rattaché à l'Université de Montpellier, en collaboration étroite avec la société TAGEOS SAS, avec notamment la création d'un Laboratoire commun (SPID Lab) en 2016 supporté par L'ANR.

La première personne à laquelle j'aimerais exprimer ma profonde reconnaissance, mes sincères remerciements et toute ma gratitude, tout naturellement, est mon directeur de thèse, Monsieur SORLI Brice, Maître de conférences à l'Université de Montpellier. Sa constante disponibilité (même durant les week-ends...), son engagement, ses encouragements, sa présence méticuleuse quant au déroulement des travaux de recherches, et son soutien psychologique m'ont été d'un grand réconfort dans les multiples moments de doute et d'impatience pour progresser quotidiennement dans mon travail. Je voudrais également le remercier d'avoir cru en mes capacités de mener à bien ce projet qu'il a toujours su superviser avec une très grande rigueur scientifique.

Je tiens également à remercier chaleureusement mon Co-encadrant de thèse, Monsieur VENA Arnaud, Maître de conférences à l'Université de Montpellier pour toute son attention, son suivi, et l'ensemble des discussions enrichissantes sur la RFID que nous avons partagées. Je le remercie également pour la liberté, les conseils avisés, et la confiance qu'il a su me donner en mettant toujours à ma disposition les moyens nécessaires pour mener à bien ce travail de thèse.

Un grand merci à Monsieur PASCAL Fabien, Professeur des Universités, à Montpellier pour m'avoir fait l'honneur de présider ce jury de thèse. Je remercie également, Monsieur TEDJINI Smail, Professeur au Laboratoire de Conception et d'Intégration des Systèmes (LCIS) à Valence et Monsieur LAHEURTE Jean-Marc, Directeur du laboratoire d'Électronique, Systèmes de Communication et Microsystèmes (ESYCOM) à Paris-Est, qui ont cordialement accepté d'être rapporteurs de ce travail.

Je remercie Madame GUILLARD Valérie, Maître de Conférences au Laboratoire d'Ingénierie des Agro-polymères et Technologies Émergentes (IATE), Monsieur CHATEAUX Jean François, Maître de Conférences à l'Institut des Nanotechnologies (INL) de Lyon, et RAMADE Camille, Ingénieur projet au sein de la société TAGEOS pour avoir accepté d'être membre du jury de ma thèse.

Je remercie également tous les membres du laboratoire, notamment Monsieur le Directeur et Professeur FOUCARAN Alain, qui m'a autorisé à dépasser la limitation de vitesse fixée à 5km/h dans les couloirs. Je joins à ces remerciements également l'équipe présente à l'atelier mécanique, dont Monsieur CANO Fabrice et COHEN Thomas, qui ont su trouver des solutions aux multiples problèmes mécaniques survenues sur mon fauteuil roulant, suite au non-respect des limitations de vitesse... Je remercie Monsieur GOSALBES Jean-Michel pour sa patience et son aide à l'élaboration de mes premiers échantillons de tag RFID.

Merci aux doctorants, stagiaires et Postdocs du laboratoire avec qui j'ai eu le plaisir d'échanger et de travailler, notamment SAGGIN Benjamin alias « Padawan », qui après avoir été un stagiaire remarquable est aujourd'hui un brillant doctorant. Que je remercie chaleureusement pour son aide sa gentillesse sa persévérance et sa qualité de travail. Je remercie également Dr KOCK Guillaume notamment pour sa fameuse « Gui-nip ». Un grand merci à mon voisin de bureau, doctorant et professeur d'anglais M. M-P Jayakrishnan alias « Sheikh Al'Jackie ». Je remercie également Mme MEGHIT Afaf alias

la « scotcheuse » de l'extrême, et Mme SANDOVAL Amandine aussi connue sous le pseudo de « Princesse du Gard ». Et pour finir, je tiens à remercier les inséparables, M. SABBANI Wail et M. BOUAYED Malik, pour tous nos moments d'échanges et de débat sur différents sujets allant de l'électronique à la politique. Je tiens à remercier plus particulièrement M. SABBANI Wail pour son expertise et toutes les connaissances qu'il m'a transmises notamment sur l'utilisation du logiciel de simulation électromagnétique CST MW studio.

Un grand merci à toute l'équipe de la startup BoneTag, notamment DUTRIEUX Sylvain alias le plongeur espagnol, Dr PIGEON Mélusine, CAHUSAC Stéphan, que je remercie pour nos échanges instructifs.

Merci à Monsieur ABDULHADI E. Abdulhadi, assistant-chercheur à l'université McGill au Canada pour m'avoir proposé une collaboration, qui m'a permis de voir d'autres aspects des capteurs RFID.

Je tiens également à remercier ma famille et mes proches, pour leur soutien et leur bienveillance, qui ont joué un rôle crucial dans la réussite de cette thèse. Je pense notamment à ma femme Houda qui a su m'encourager et m'épauler tout au long de ces années.

Merci à ma référente AFM (Association Française contre les Myopathies) Madame PERROT Sylvie, pour son accompagnement, sa présence et son aide dans l'amélioration de mon quotidien en fauteuil roulant. Je joins également à ces remerciements le Service Handiversité de l'université de Montpellier représenté par Madame DESBOIS Véronique et Madame PECQUENARD Isabelle, que je remercie pour leurs accompagnements dans mon parcours scolaire depuis mon arrivé à l'université de Montpellier, je tiens également à remercier mon Kinésithérapeute Monsieur SHUNY Steeve pour ses conseils, sa bienveillance et tous ces moments de « toundra » passés ensemble à débattre sur des sujets de médecine enrichissants.

Merci à tous ceux que j'oublie et qui m'ont soutenue et encouragée durant toutes ces années.



Table des matières

| | |
|---|-----------|
| Table des matières..... | a |
| Table des figures..... | d |
| Table des tableaux..... | g |
| Introduction générale..... | 1 |
| Chapitre 1 Technologie capteur-RFID : Définition, Positionnement et Innovation..... | 4 |
| 1.1 Introduction..... | 6 |
| 1.2 Technologie RFID : Contexte, Principes et Normes..... | 6 |
| 1.2.1 Moyens d'identification..... | 6 |
| 1.2.1.1 Codes-barres..... | 7 |
| 1.2.1.2 Autres technologies d'identification..... | 8 |
| 1.2.1.3 Identification par Radio Fréquence (RFID)..... | 9 |
| 1.2.2 Principe de fonctionnement de la RFID..... | 11 |
| 1.2.2.1 Composition d'un tag RFID..... | 12 |
| 1.2.2.2 Fréquence de fonctionnement..... | 15 |
| 1.2.2.3 Classes des tags RFID..... | 17 |
| 1.2.2.4 Architecture d'une puce RFID passive..... | 18 |
| 1.2.2.5 Types de couplages..... | 19 |
| 1.2.3 Normes RFID (EPC Gen 2)..... | 22 |
| 1.2.3.1 Introduction du code de produit électronique (EPC)..... | 22 |
| 1.2.3.2 Standard EPCGlobal..... | 23 |
| 1.2.3.3 Structure du code électronique du produit (EPC Gen2 V2) :..... | 24 |
| 1.2.4 Marché du RAIN RFID [19]..... | 25 |
| 1.3 État d'avancement technologique des capteurs-RFID..... | 26 |
| 1.3.1 Présentation..... | 26 |
| 1.3.2 Capteur RFID à communication numérique..... | 27 |
| 1.3.2.1 Capteur-RFID interne..... | 28 |
| 1.3.2.2 Capteur-RFID externe..... | 30 |
| 1.3.2.2.1 Capteur-RFID par l'ajout d'un microcontrôleur..... | 31 |
| 1.3.2.2.2 Capteur-RFID par l'ajout d'un composant externe..... | 32 |
| 1.3.2.2.3 Capteur-RFID par l'ajout d'un dépôt de matériau sensible sur une zone dédiée externe..... | 33 |
| 1.3.3 Capteur RFID à communication analogique (avec fonctionnalisation)..... | 35 |
| 1.3.3.1 Fonctionnalité capteur basé sur l'utilisation d'un simple tag-RFID..... | 37 |
| 1.3.3.2 Fonctionnalité capteur basé sur l'utilisation d'un substrat sensible..... | 39 |
| 1.3.3.3 Fonctionnalité capteur basé sur la sensibilité du matériau de l'antenne..... | 41 |
| 1.3.3.4 Fonctionnalité capteur basé sur le dépôt d'un matériau sensible sur l'antenne..... | 41 |
| 1.4 Analyse des problématiques et positionnement du sujet de thèse..... | 44 |
| 1.5 Conclusion..... | 47 |
| 1.6 Références..... | 48 |
| Chapitre 2 Design, conception et caractérisation du Capteurs-RFID UHF passif..... | 54 |
| 2.1 Stratégie de conception..... | 56 |
| 2.2 Notions Fondamentales..... | 57 |
| 2.2.1 Éléments de Théorie des antennes RFID..... | 57 |
| 2.2.1.1 Notion d'Adaptation/ Désadaptation d'impédance..... | 57 |
| 2.2.1.2 Notion de coefficient de Réflexion et de Transmission..... | 58 |
| 2.2.1.3 Notions de Gain et de directivité d'une antenne dipôle..... | 59 |
| 2.2.1.4 Notion de Polarisation..... | 59 |
| 2.2.1.5 Qu'est-ce que la distance théorique de lecture..... | 60 |
| 2.2.2 Notion de permittivité diélectriques..... | 62 |
| 2.2.2.1 Expérience de Faraday..... | 62 |
| 2.2.2.2 Polarisation..... | 63 |
| 2.2.2.3 Permittivité complexe..... | 65 |
| 2.2.2.4 Choix d'un bio-polymère comme matériau sensible..... | 67 |
| 2.3 Design, optimisation et simulation..... | 68 |

| | | |
|--|--|------------|
| 2.3.1 | Outils de simulation : CST Microwaves Studio | 69 |
| 2.3.2 | Présentation du design de l'antenne..... | 71 |
| 2.3.3 | Étude paramétrique et optimisation de l'antenne capteur-RFID | 72 |
| 2.3.3.1 | Étude paramétrique de la zone de dépôt..... | 72 |
| 2.3.3.2 | Dépôt du matériau sensible..... | 77 |
| 2.3.3.3 | Repliement de l'antenne dipôle | 79 |
| 2.3.3.4 | Caractéristiques de simulations de l'antenne du capteur-RFID aux dimensions optimales | 79 |
| 2.3.3.5 | Effet des variations de l'humidité relative sur les caractéristiques de simulations de l'antenne du capteur-RFID | 82 |
| 2.4 | Caractérisation & Validation..... | 84 |
| 2.4.1 | Méthodologies de caractérisation et d'étalonnages de l'antenne réalisée | 84 |
| 2.4.2 | Caractérisation et validation de l'antenne du capteur-RFID..... | 85 |
| 2.4.2.1 | Caractérisation de l'antenne au VNA (Étape 1)..... | 86 |
| 2.4.2.2 | Impact de l'environnement proche du capteur-RFID (Étape 2)..... | 87 |
| 2.4.2.3 | Impact du dépôt du gluten de blé (Étape 3) | 88 |
| 2.4.2.4 | Caractérisation du tag en chambre anéchoïque (Étape 4)..... | 88 |
| 2.5 | Conclusion | 90 |
| 2.6 | Références..... | 91 |
| Chapitre 3 Validation & Méthodologie d'extraction de l'information du capteur-RFID..... | | 94 |
| 3.1 | Introduction..... | 96 |
| 3.2 | Stratégie de récupération de l'information du capteur-RFID..... | 97 |
| 3.2.1 | Comment extraire une information capteur à partir de la fonctionnalisation d'une antenne RFID ? | 97 |
| 3.2.1.1 | La communication entre le lecteur RFID et le Tag RFID | 97 |
| 3.2.1.2 | Les paramètres clés pour l'extraction d'une information capteur..... | 98 |
| 3.2.2 | Comment fiabiliser l'information extraite ?..... | 100 |
| 3.2.2.1 | Identification des perturbations de communication RFID | 100 |
| 3.2.2.2 | Solutions pour s'affranchir des perturbations de communication RFID | 101 |
| 3.2.2.3 | Présentation de la solution utilisée..... | 102 |
| 3.2.3 | Modèle mathématique pour la récupération de l'information capteur | 102 |
| 3.2.3.1 | Modèle mathématique | 103 |
| 3.2.3.2 | Méthodologie utilisée pour la modélisation en bande nord-américaine | 105 |
| 3.3 | Mesures et caractérisations du capteur-RFID | 106 |
| 3.3.1 | Protocole et banc de mesure pour capteur-RFID | 106 |
| 3.3.1.1 | Description du banc de mesure expérimental | 106 |
| 3.3.1.2 | Protocole de mesure..... | 108 |
| 3.3.2 | Résultats de mesures du capteur-RFID en environnement contrôlé | 109 |
| 3.3.3 | Caractéristiques d'étalonnage du capteur-RFID | 110 |
| 3.3.3.1 | Répétabilité | 110 |
| 3.3.3.2 | Reproductibilité..... | 110 |
| 3.3.3.3 | Hystérésis | 111 |
| 3.3.3.4 | Sensibilité / robustesse..... | 112 |
| 3.3.4 | Les limites en température de notre capteur RFID | 114 |
| 3.4 | Validation des modèles analytiques pour l'extraction de l'humidité à l'aide d'un lecteur RFID standard | 115 |
| 3.4.1 | Construction du modèle analytique basé sur la technique de régression linéaire simple | 115 |
| 3.4.2 | Construction du modèle analytique basé sur la technique de régression multilinéaire | 116 |
| 3.4.3 | Utilisation des modèles analytiques pour l'estimation de valeurs d'humidités | 117 |
| 3.4.4 | Utilisation d'un lecteur RFID standard..... | 118 |
| 3.4.4.1 | Performances et limitations des lecteurs RFID standard..... | 118 |
| 3.4.4.2 | Mise en œuvre et validation d'un système de mesure de capteurs RFID à partir d'un lecteur standard..... | 120 |
| 3.5 | Conclusion | 124 |
| 3.6 | Références..... | 125 |
| Chapitre 4 Application du capteur-RFID UHF passif au domaine agroalimentaire | | 128 |
| 4.1 | Contexte et objectif | 130 |

| | | |
|--|--|------------|
| 4.2 | Moyens de détection de la qualité des aliments | 132 |
| 4.2.1 | Comment quantifier ou mesurer la qualité des aliments ? | 132 |
| 4.2.2 | Les moyens de détection en RFID | 133 |
| 4.2.2.1 | Capteur de qualité des aliments basé sur une variation de permittivité des aliments 134 | |
| 4.2.2.2 | Capteur de qualité des aliments basé sur la détection de gaz..... | 137 |
| 4.3 | Principe de détection basé sur l'utilisation des agro-polymères..... | 139 |
| 4.4 | Validation du capteur RFID à base d'agro-polymère : Mesures et analyses | 141 |
| 4.4.1 | Banc expérimental utilisant le capteur-RFID | 141 |
| 4.4.2 | Analyse des étapes de fermentation des aliments testés | 142 |
| 4.4.2.1 | Champignon avec emballage industriel | 142 |
| 4.4.2.2 | Salade avec emballage industriel | 144 |
| 4.4.2.3 | Fromage (Mozzarella) testé en cellule fermée hermétiquement | 145 |
| 4.5 | Conclusion | 148 |
| 4.6 | Références..... | 149 |
| Conclusion générale..... | | 151 |
| Perspectives..... | | 152 |
| Annexe A : Codage SGTIN (code-barres) vers un codage SGTIN-96 (EPC/RFID)..... | | 155 |
| Annexe B : Décodage du SGTIN-96 (EPC/RFID) pour l'identification du produit | | 156 |
| Annexe C : Capteurs-RFID par l'ajout d'un microcontrôleur, avec récupérateur d'énergie tirés de la littérature..... | | 157 |
| Annexe D : Interface logiciel du code d'automatisation LabView | | 159 |
| Annexe E : Programme d'automatisation du banc | | 160 |

Table des figures

| | |
|---|----|
| Figure 1-1: illustration de l'internet des objets..... | 7 |
| Figure 1-2: Les différents types de codes-barres ; unidimensionnel ou linéaires, linéaires empilés et à deux dimensions [3]. | 7 |
| Figure 1-3 : Prévisions mondiales sur le marché des éléments sécurisé (cartes à puce, passeport, carte vitale), en Millions d'unité vendues de 2010 à 2018 – Eurosmat [4]..... | 8 |
| Figure 1-4: Marché du sans contact en 2017 : ventes en millions d'unité [4] | 9 |
| Figure 1-5 : L'utilisation pendant la guerre du principe de rétro-diffusion pour communiquer avec un opérateur radar [7]..... | 10 |
| Figure 1-6: « The thing » l'objet conçu par Léon Theremin pendant la guerre pour l'espionnage..... | 11 |
| Figure 1-7: principe de fonctionnement RFID..... | 12 |
| Figure 1-8: Structures des étiquettes RFID passives HF (à gauche) et UHF (à droite)[8]..... | 12 |
| Figure 1-9 : Structure interne d'une puce RFID UHF NXP [10] | 14 |
| Figure 1-10 : Blocs mémoire d'une puce RFID..... | 14 |
| Figure 1-11: Exemple de codage binaire et modulation ASK..... | 15 |
| Figure 1-12: spectre électromagnétique des radiofréquences | 16 |
| Figure 1-13: Représentation schématique des différentes branches de fonctionnement d'un tag RFID passif [6].. | 19 |
| Figure 1-14: Classement des tags RFID en fonction de leur zone de fonctionnement [8] | 19 |
| Figure 1-15: Types de couplages RFID [11]..... | 20 |
| Figure 1-16: Différente forme de tag RFID HF (NFC)..... | 21 |
| Figure 1-17: Différente forme de tag RFID UHF..... | 21 |
| Figure 1-18 : GS1 international, organisme de normalisation des méthodes de codages et ses filiales [15]..... | 23 |
| Figure 1-19: représentation simplifiée d'un code EPC : code-barres + numéro unique de série | 24 |
| Figure 1-20: Exemple de décodage d'un EPC tiré d'une puce RFID, utilisant le codage SGTIN-96 (bit)..... | 25 |
| Figure 1-21: Répartition des différents types de capteur-RFID UHF passifs présents dans l'état de l'art..... | 27 |
| Figure 1-22: Famille des capteurs-RFID a communication numérique..... | 28 |
| Figure 1-23: a) système RadioFingertip de détection thermique, b) tag capteur interne [32]..... | 29 |
| Figure 1-24: Prototype du capteur de température RFID épidermique sur substrat souple et résultats de mesures de température sur le corps en état de repos et pendant une activité physique [33]..... | 29 |
| Figure 1-25: Différentes méthodes d'alimentation d'un tag composé : d'un microcontrôleur, d'un ou plusieurs capteurs et d'une puce RFID, à l'aide de : a) un circuit de récupération d'énergie, b) une batterie, ou c) de l'énergie récoltée par la puce RFID provenant du lecteur. | 31 |
| Figure 1-26: Tag RFID avec capteur de force externe pour le suivi de produit alimentaire [25]..... | 33 |
| Figure 1-27: a) capteur-RFID utilisant une zone fonctionnalisée externe à base d'oxyde de Graphene et b) résultats des variations de la résistance par rapport à la variation de l'humidité relative [22]..... | 33 |
| Figure 1-28: Famille des capteurs-RFID a communication analogique | 35 |
| Figure 1-29: Bio-capteur-RFID à détection de seuil : a) vue en coupe du capteur-RFID, b) vue par dessus, c) Effet irréversible du substrat de paraffine : évolution de la puissance minimum d'activation de la puce en fonction de la température [61]. | 39 |
| Figure 1-30: Exemple extrait de la littérature de capteur-RFID avec antenne sensible à gauche : antenne complètement en Graphene [47], à droite : antenne composée de fines parties en Graphene [72]. | 41 |
| Figure 1-31: Résultats tirés de [76] : a) propriétés électriques de l'eau distillée à 900 MHz b) puissance minimum d'activation du capteur-RFID, mesurées et moyennées pour différentes températures de l'air. | 43 |
| Figure 1-32: Résultats tirés de [48] : a) Diagramme schématique d'une étiquette de capteur d'identification par radiofréquence (RFID) fonctionnalisé par Pt_rGO. b) Photographies du capteur RFID flexible. c) résultats de mesure du capteurs-RFID en fonction de la concentration d'hydrogène. | 43 |
| Figure 2-1: Stratégie de détection par fonctionnalisation d'antenne du capteur-RFID UHF passif..... | 56 |
| Figure 2-2: Circuit électrique équivalent d'un tag RFID UHF passif [1]..... | 57 |
| Figure 2-3: Diagramme de rayonnement d'un dipôle comparé à celui d'un dipôle isotrope [5]..... | 59 |
| Figure 2-4: Polarisation d'une onde électromagnétique, a) polarisation verticale, b) polarisation horizontale et c) polarisation circulaire [6] | 60 |
| Figure 2-5: Illustration de la distance de lecture entre un lecteur RFID et un tag..... | 60 |
| Figure 2-6 : Matériaux en fonction de la résistivité [8]..... | 62 |
| Figure 2-7: Expérience de Faraday : diélectrique entre les armatures d'un condensateur [10]..... | 62 |
| Figure 2-8: Moment dipolaire induit par un champ électrique sur un atome [10]..... | 63 |
| Figure 2-9: Illustration schématique des phénomènes de polarisations [10]..... | 64 |
| Figure 2-10: Variations de la permittivité complexe en fonction de la fréquence [14]..... | 66 |
| Figure 2-11: Partie réelle et imaginaire de la permittivité complexe..... | 66 |
| Figure 2-12: Effet de la permittivité diélectrique et des pertes sur le coefficient de réflexion de l'antenne | 67 |
| Figure 2-13: Permittivité complexe du gluten de blé en fonction de l'humidité relative (HR) à 868 MHz, à 25°C [13]. | 68 |
| Figure 2-14: Illustration de la composition de l'antenne capteur proposée. | 69 |
| Figure 2-15: Maillage d'une sphère avec différentes méthodes: (a) forme géométrique de la sphère; utilisant (b) des tétraèdres (FEM), (c) des cellules orthogonales (FDTD), et (d) triangles (MoM)[21]. | 70 |

| | |
|---|-----|
| Figure 2-16: Design de l'antenne du capteur-RFID proposée avec dépôt du gluten de blé et dimensions..... | 71 |
| Figure 2-17: fractionnement tiré de l'étude [31] appliqué à notre capteur-RFID | 73 |
| Figure 2-18: Représentation CST du champ électrique maximale a) de l'antenne entière et b) des doigts interdigités avec dépôt du matériau sensible | 74 |
| Figure 2-19 : Vue en coupe de la capacité interdigitée : dimensions et épaisseurs optimale..... | 75 |
| Figure 2-20: Étude de l'effet des variations de l'espace à l'extrémité des doigts (Capacité Cend), simulation avec impédance de la puce (Z_{puce}) | 76 |
| Figure 2-21: Etude de l'effet des variations de l'espace interdigité (C_3 & C_n)..... | 77 |
| Figure 2-22 : Coefficient de réflexion de l'antenne adapté à l'impédance de la puce pour trois épaisseurs de gluten de blé différente ($60 \mu\text{m}$, $70 \mu\text{m}$ et $80 \mu\text{m}$)..... | 78 |
| Figure 2-23: Etude paramétrique sur la zone de dépôt | 78 |
| Figure 2-24: Etude paramétrique sur le repliement de l'antenne dipôle | 79 |
| Figure 2-25: Simulation CST MWS de l'antenne du capteur RFID avec dépôt et dimensions | 80 |
| Figure 2-26: Coefficient de réflexion de l'antenne adapté à l'impédance de la puce pour une épaisseur de dépôt de $70 \mu\text{m}$ | 80 |
| Figure 2-27: Distance de lecture théorique et Gain réalisé de l'antenne optimisée..... | 81 |
| Figure 2-28 : Diagramme de rayonnement 2D (a) Plan-H (b) Plan-E de l'antenne dipôle représentant la directivité | 81 |
| Figure 2-29 : Diagramme de rayonnement 2D (a) Plan-H (b) Plan-E de l'antenne dipôle représentant le gain réalisé..... | 82 |
| Figure 2-30 : Résultats de simulation adaptée à l'impédance de la puce RFID, montrant des variations du coefficient de réflexion en fonction de l'humidité relative, avec une épaisseur de gluten de $70 \mu\text{m}$ | 83 |
| Figure 2-31: Résultats de simulation montrant des variations, de la distance de lecture théorique (courbe du dessus), et du gain réalisé (courbe du dessous), en fonction de l'humidité relative, avec une épaisseur de gluten de $70 \mu\text{m}$ | 83 |
| Figure 2-32: Antenne tag RFID-capteur | 84 |
| Figure 2-33: Banc de caractérisation de l'antenne du capteur-RFID | 85 |
| Figure 2-34: Etapes de validations du capteur-RFID | 86 |
| Figure 2-35: Comparaison mesures au VNA et simulation CST, adapté à 50Ω sans dépôt..... | 87 |
| Figure 2-36: Comparaison mesures au VNA et simulation CST, 50Ω sans dépôt après masquage | 87 |
| Figure 2-37 : Comparaison des mesures au VNA et de la simulation CST, 50Ω , $50 \%HR$, avec dépôt et masquage | 88 |
| Figure 2-38: Méthode de mesure du capteur-RFID en chambre anéchoïque..... | 89 |
| Figure 2-39: Comparaison mesures en chambre anéchoïque et simulation CST du capteur-RFID | 89 |
| Figure 3-1: Illustration de la stratégie de récupération d'information capteur à l'aide d'un lecteur RFID du commerce | 96 |
| Figure 3-2: Diagramme des puissances échangées entre un lecteur et un tag RFID [3]..... | 97 |
| Figure 3-3: retromodulation en UHF passive, par changement de charge [4]..... | 100 |
| Figure 3-4: Sources d'interférences a) d'un canal de communication entre un lecteur et un tag RFID à des fins de détection, dues aux variations du gain $\{\delta G_R, \delta G_T\}$, de la polarisation $\{\delta P\}$, de la distance $\{\delta d\}$, de l'instrumentation et de l'environnement $\{\delta \xi\}$. b) de l'environnement proche du capteur-RFID [6]. | 101 |
| Figure 3-5: Illustration du concept de mesure différentielle [10] | 102 |
| Figure 3-6: Choix est composition du modèle pour l'extraction de l'humidité | 103 |
| Figure 3-7: Modèle schématique utilisé a fréquence fixe sous forme de régression linéaire simple | 104 |
| Figure 3-8 : Modèle schématique utilisé dans la bande US sous forme de régression linéaire multiple matricielle | 104 |
| Figure 3-9: Mise en forme du modèle analytique | 106 |
| Figure 3-10: Estimation de l'humidité..... | 106 |
| Figure 3-11: Banc de caractérisation du capteur-RFID en environnement contrôlé | 107 |
| Figure 3-12: Protocole de mesure | 108 |
| Figure 3-13: Variations de la puissance minimum d'activation de notre capteur-RFID en fonction de la fréquence, dans un environnement d'humidité variable de $30 \%HR$ à $90 \%HR$ | 109 |
| Figure 3-14: Résultats de mesures (sélection de 6 points en fréquences) sur 3 cycles de montés (représenté par les 3 courbe de même couleurs) en humidité en bande US pour 6 valeur d'humidité relative : a.1) et b.1) représente la puissance de transmission minimum d'activation du capteur-RFID pour le Tag 2 et 3 respectivement et a.2) et b.2) représente la puissance de réception d'activation du capteur-RFID pour le Tag 2 et 3 respectivement. | 111 |
| Figure 3-15: Courbe de réponse des capteurs-RFID en montée et décente d'humidité @ 930 Mhz pour : a) Tag 1 b) Tag 2 et c) Tag 3. | 112 |
| Figure 3-16: Essais en température, de $12 \text{ }^\circ\text{C}$ à $32 \text{ }^\circ\text{C}$ par pas de $5 \text{ }^\circ\text{C}$, pour des humidités fixes de $30 \%HR$, $50 \%HR$, $70 \%HR$ et $90 \%HR$ | 115 |
| Figure 3-17: Exemple de courbes de tendance tracée sur la courbe d'hystérésis du Tag 3 pour une fréquence de 930 Mhz | 116 |
| Figure 3-18 Démonstrateur du système de détection de l'humidité du capteur RFID UHF passif fonctionnalisé au gluten de blé | 120 |

| | |
|---|------------------------------------|
| Figure 3-19: Interface du logiciel d'implémentation du modèle mathématique en bande US | 121 |
| Figure 3-20: Premier test de mesure pour le suivi en humidité a l'intérieure de la cellule hermétique | 122 |
| Figure 3-21: Second test de mesure pour le suivi en humidité a l'intérieure de la cellule hermétique | 123 |
| Figure 4-1: Représentation de la fermentation des fruits tropicaux après récolte [3]..... | 132 |
| Figure 4-2 : Résultats de mesure de la caractérisation de la viande [7]..... | 135 |
| Figure 4-3 : résultats de mesure de deux tags déposés sur la viande de bœuf [7]..... | 135 |
| Figure 4-4 : a) Impédance du capteur après soustraction de l'impédance de l'antenne, b) Présentation du capteur LC composé d'un circuit LC connecté en série, imprimé sur un substrat en plastique.[8] | 136 |
| Figure 4-5 : Permittivité complexe au cours du temps dans deux échantillons de lait (lait contaminé et lait référence)[8] | 137 |
| Figure 4-6 : Vue de dessus du prototype de capteur RFID [9] | 137 |
| Figure 4-7 : Résultats de mesures de la puissance minimum d'activation sur plusieurs cycles d'exposition à l'éthanol à 940 MHz | 138 |
| Figure 4-8 : Capacité interdigitée utilisée pour les tests | 139 |
| Figure 4-9: Banc d'essai..... | 140 |
| Figure 4-10 : Résultats de mesure capacitive sur des fraises à 860 MHz en fonction des gaz présents dans la cellule..... | Erreur ! Signet non défini. |
| Figure 4-11 : Banc de mesures avec capteur-RFID et capteurs de gaz (CO ₂ , O ₂ , Éthanol) | 141 |
| Figure 4-12 : Expérience avec 200 g de champignon de Paris recouverts d'un film alimentaire : a) début de l'expérience, b) et c) fin de l'expérience. | 143 |
| Figure 4-13 : Résultats d'expériences sur des champignons de Paris contenus dans leur emballage alimentaire, à la fréquence de 820 MHz. | 143 |
| Figure 4-14 : Expérience avec 300 g de salade (Iceberg) dans une chambre anéchoïque utilisant deux tags, avec et sans dépôt de gluten. | 144 |
| Figure 4-15 : Résultats d'expériences sur la salade jusqu'à détérioration de l'aliment utilisant deux tags, avec et sans dépôt du gluten. | 144 |
| Figure 4-16 : Salade à la fin de l'expérience. | 145 |
| Figure 4-17 : Résultats d'expériences sur le fromage (mozzarella) pour deux fréquences (820 MHz et 860 MHz) sur lequel nous voyons apparaitre trois périodes bien distinctes : une période de stabilisation du gluten de blé a l'environnement, une zone de respiration, et une zone de fermentation du fromage. | 145 |
| Figure 4-18 : Réponse du capteur-RFID a la fréquence de 820 MHz, comparée aux courbes d'humidité relative et de température. Les résultats correspondent à la période de stabilisation du gluten de blé exposé à un environnement complexe présent à l'intérieure de la cellule. | 146 |
| Figure 4-19: Relation entre les données du capteur-RFID et l'aspect visuel du fromage. Le monitoring a été effectué pendant 5 jours. | 147 |

Table des tableaux

| | |
|--|-----|
| Tableau 1-1 : Tableau récapitulatif des gammes de tags RFID..... | 16 |
| Tableau 1-2: Classification des différentes technologies RFID suivant les critères, de haut en bas, actifs/passif, avec ou sans puce, imprimable / non imprimable, mode d'alimentation et technique de génération des données ou de l'identifiant [8]. | 17 |
| Tableau 1-3:Codage en SGTIN-96 | 25 |
| Tableau 1-4 : Prévisions par IDTechEx, des tag RAIN RFID vendus dans le monde [20] (valeurs en Millions de \$) 25 | 25 |
| Tableau 1-5: Puces RFID existantes avec capteur de température interne..... | 28 |
| Tableau 1-6 : Comparaison des puces RFID du commerce avec entrées capteurs externes et/ou avec protocole de communication..... | 30 |
| Tableau 1-7: Tag RFID UHF passif du commerce avec microcontrôleur intégrés et sans batterie..... | 31 |
| Tableau 1-8: Capteur-RFID, tiré de la littérature, augmenté par l'ajout d'un composant externe sous forme de zone fonctionnalisée. | 34 |
| Tableau 1-9: Puces RFID les plus utilisées dans la littérature en fonction de leurs sensibilité et des options telle que l'auto-tune ou la possibilité de connecter deux antennes. | 36 |
| Tableau 1-10: Capteur-RFID avec auto-tune vendu dans le commerce | 38 |
| Tableau 1-11: Etat de l'art des capteurs-RFID utilisant un substrat sensible comme méthode de détection..... | 40 |
| Tableau 1-12: Etat de l'art des capteurs-RFID utilisant le matériau composant l'antenne comme élément sensible | 41 |
| Tableau 1-13: Etat de l'art des capteurs-RFID utilisant un dépôt sur l'antenne comme élément sensible..... | 42 |
| Tableau 1-14:Etat de l'art des capteurs-RFID utilisant un dépôt sur l'antenne comme élément sensible axé sur les capteurs d'humidité relative..... | 44 |
| Tableau 2-1 : Comparaison des méthodes de caractérisation diélectrique utilisée [29]..... | 73 |
| Tableau 3-1: réglementation des canaux de la bande US, FCC section 15.247[12, p. 15]..... | 103 |
| Tableau 3-2 Résultat de mesure en moyenne de la puissance de transmission (dBm) du Tag N°2 sur 3 cycles successifs, de montée et descente en humidité | 110 |
| Tableau 3-3: Sensibilité [dB / %HR] en humidité montante et descendante pour 3 capteur-RFID et à fréquence fixe..... | 113 |
| Tableau 3-4: Résultats de performances de notre capteur-RFID comparé aux performances obtenus par d'autres études académiques concernant les capteur-RFID UHF passif avec antenne fonctionnalisée | 113 |
| Tableau 3-5: Erreur (en %) entre la valeur d'humidité réelle est la valeur estimée de nos modèle mathématique en puissance de transmission en linéaire (mW) ou en dBm | 117 |
| Tableau 3-6: Erreur en % entre la valeur d'humidité réelle est la valeur estimée de nos modèle mathématique en puissance de transmission et en puissance retro-modulé. | 117 |
| Tableau 3-7: Tests des deux modèles mathématiques du capteur-RFID en chambre climatique pour des valeurs d'humidités aléatoires avec parenthèse l'erreur d'estimation. | 118 |
| Tableau 3-8: lecteurs RFID standard et leur sensibilité en réception et en transmission, comparé par leurs résolutions à 930 MHz calculé à l'aide des résultats se sensibilité du capteur-RFID..... | 119 |
| Tableau 4-1 : Classement de certaines denrées alimentaires en fonction de leurs taux de respiration [3]..... | 133 |
| Tableau 4-2: Indicateur Temps-Température commerciale [6]..... | 134 |
| Tableau 4-3 : Sensibilité aux gaz de la puissance minimum d'activation de la puce RFID en [dB/% HR] [10]..... | 138 |
| Tableau 4-4: Taux de respiration, température de stockage et durée de vie des aliments sélectionnés pour l'expérimentation [3] | 142 |

Introduction générale

Depuis l'ère industrielle, notre société ne cesse de faire des avancées technologiques considérables afin de combler nos besoins et d'améliorer notre confort. A l'heure actuelle, il y a une volonté de tout contrôler ou dans une moindre mesure, de tout superviser de notre environnement proche. Pour y parvenir, le déploiement en masse de dispositifs dits « intelligents » capables d'acquérir, traiter et communiquer des données devient indispensable. Ceci est notamment rendu possible par la miniaturisation des composants électroniques, la diminution de leur consommation et l'augmentation de leurs performances de calculs. Nous nous dirigeons donc vers un monde entièrement connecté, jusqu'à l'entité de base : l'objet. On parle alors de l'internet des objets (IoT). Et, dans ce nouvel « Eldorado » pour dispositifs électroniques, l'identification par radiofréquence (RFID) apparaît comme une technologie ayant un rôle considérable à jouer.

Aujourd'hui la RFID n'est plus inconnue du grand public et cohabite désormais auprès d'autres technologies d'identification automatiques plus anciennes tels que le code-barres, et ce, dans de nombreux domaines différents. Un système RFID est composé d'un lecteur RFID et d'une « étiquette ou tag » RFID (qui lui-même est composé d'une antenne, et d'une puce RFID avec un identifiant unique). On trouve des technologies RFID variées qui se déclinent en fonction de la fréquence d'utilisation (Basses Fréquences : 125 kHz, Hautes Fréquences : 13,56 MHz, Ultras Hautes Fréquences : 860 – 960 MHz [UE], Supra Hautes Fréquences : 2,45 ou 5,8 GHz) ainsi que de leur mode d'alimentation (passif, semi-passif ou actif). Par exemple, les dispositifs RFID sont utilisés dans la logistique, la chaîne d'approvisionnement, le transport, la fabrication, les systèmes d'entreposage. Dans notre quotidien nous utilisons cette technologie dans le domaine du contrôle d'accès et du paiement dit « sans contact ».

En parallèle, plusieurs grandes industries notamment dans le domaine de la santé, de l'industrie pharmaceutique et de l'agro-alimentaire, exigent une utilisation accrue des systèmes d'identification automatique. Leur intérêt va au-delà même de la fonction principale d'un tag RFID qu'est l'identification automatique. Ces industries de pointes sont demandeuses de fonctionnalités supplémentaires pour s'assurer de la qualité des produits tout au long de leur cycle de vie et à moindre coût.

Fort de ce constat, nous nous intéressons dans le cadre de cette thèse à l'ajout de fonctionnalités supplémentaires à une étiquette RFID telle que la lecture d'un capteur afin de contribuer à l'adoption définitive de cette technologie dans les domaines très concurrentiels cités plus haut.

Pour assurer cette fonctionnalité deux choix d'architectures sont envisageables. La première solution, fait appel à l'utilisation de puces RFID semi-passives qui intègrent une interface capteur. Le capteur est contenu dans la puce RFID ou encore positionné en externe et connecté à celle-ci via une interface de communication série. L'information capteur est transmise de manière numérique par échange de données entre la puce et le lecteur RFID. La seconde approche, est totalement passive d'un point de vue de l'alimentation du dispositif, et consiste à transformer une étiquette RFID conventionnelle en un capteur-RFID par modification structurelle de son antenne ou du circuit d'adaptation entre l'antenne et la puce. Pour cela, un matériau sensible à un paramètre physique peut être déposé en fine couche sur l'antenne. Une autre idée consiste à utiliser l'antenne nue sur un substrat sensible jouant le rôle de capteur.

Cette thèse s'inscrit dans la continuité de la thématique Capteur-RFID et Electronique flexible initiée en 2012 à l'Institut d'Electronique et des Systèmes (IES) et de la collaboration étroite avec la société TAGEOS SAS avec notamment la création d'un

Laboratoire Commun (SPID Lab) en 2016 supporté par L'ANR. Nous pouvons associer à ce travail pour les applications agroalimentaires, l'unité de recherche Ingénieries des Agro-polymères et des Technologies Emergentes (IATE, UMR 1208).

Notre objectif commun est de rendre les emballages alimentaires plus intelligents par l'ajout de dispositifs RFID avec fonctionnalité capteur. Un premier travail de thèse financé dans le cadre de l'ANR NextGenPack s'est focalisé sur l'étude et la caractérisation des propriétés diélectriques de matériaux biocompatibles tels que les agro-polymères, depuis les basses fréquences jusqu'au GHz. Le but étant de les utiliser comme capteur.

Dans cette thèse, nous nous focalisons sur l'étude et le développement de capteur RFID passif fonctionnant en bande UHF. Cette orientation technologique est dictée par l'application visée, l'agro-alimentaire, qui requiert des coûts de fabrication les plus faibles possibles et une distance de lecture supérieure au mètre pour les aspects logistiques et inventaires. Pour l'élément sensible, nous utiliserons donc un bio-polymère, plus précisément le gluten de blé dont les propriétés diélectriques en fonction de l'humidité relative ont été étudiées précédemment. Nous nous attacherons plus précisément à traiter toutes les problématiques liées à la communication entre un lecteur et un capteur RFID passif. L'objectif ultime de cette thèse étant de récupérer une information capteur à l'aide d'un lecteur RFID conventionnel respectant les standards du domaine et les directives radio en vigueur dans les différentes régions du monde.

Le premier chapitre fait d'abord un rappel des principes de base de la technologie RFID avant de dresser un état de l'art sur le concept de capteur RFID. Du fait de l'état d'avancement de cette technologie et dans le contexte de l'application agro-alimentaire visée nous évoquerons les études à mener dans le cadre de ces travaux de thèse.

Dans le deuxième chapitre, nous proposons un design de capteur-RFID UHF passif sur substrat flexible. Ce capteur est conçu pour recevoir un dépôt d'agro-polymère en fine couche. Dans un premier temps nous présentons les résultats d'une étude paramétrique menée à l'aide un simulateur électromagnétique. Cette première phase permet de converger vers une géométrie optimisée qui sera validée par une série de mesure d'impédance et de performances radio (puissance d'activation) du capteur RFID en environnement contrôlé (température, humidité).

Le chapitre 3 concerne l'étude de méthodes d'extraction de données capteurs en tenant compte des limites d'émissions radio imposées par les autorités de régulation dans différentes régions du monde. Ce chapitre évoque donc dans un premier temps la stratégie de détection mise en place pour la récupération d'une information capteur fiable. Nous proposerons ensuite une méthode d'étalonnage sur ce type de capteur-RFID avant de valider le concept en présentant des résultats de mesures obtenus à l'aide d'un lecteur RFID conventionnel.

Dans le chapitre 4, nous mettons en œuvre le capteur RFID étudié dans les chapitres précédents pour réaliser un démonstrateur d'emballage « intelligent » permettant le suivi de la qualité des aliments. Dans cette étude nous confrontons les mesures radio du capteur RFID positionné dans l'emballage alimentaire avec l'évolution de l'aspect visuel des aliments qu'il contient. Nous terminons ce chapitre par une discussion sur la possibilité d'utiliser cette technologie pour détecter la maturité des aliments de différentes natures.

Pour conclure, nous discuterons les différentes solutions apportées dans cette thèse et définirons des perspectives quant aux recherches futures sur le thème des capteurs-RFID.

Chapitre 1

Technologie capteur-RFID : Définition, Positionnement et Innovation

Sommaire

Chapitre 1 Technologie capteur-RFID : Définition, Positionnement et Innovation

Erreur ! Signet non défini.

| | | | |
|------------|---|-------|------------------------------------|
| 1.1 | Introduction | | Erreur ! Signet non défini. |
| 1.2 | Technologie RFID : Contexte, Principes et Normes | | Erreur ! Signet non défini. |
| 1.2.1 | Moyens d'identification..... | | Erreur ! Signet non défini. |
| 1.2.1.1 | Codes-barres..... | | Erreur ! Signet non défini. |
| 1.2.1.2 | Autres technologies d'identification..... | | Erreur ! Signet non défini. |
| 1.2.1.3 | IDentification par Radio Fréquence (RFID)..... | | Erreur ! Signet non défini. |
| 1.2.2 | Principe de fonctionnement de la RFID..... | | Erreur ! Signet non défini. |
| 1.2.2.1 | Composition d'un tag RFID..... | | Erreur ! Signet non défini. |
| 1.2.2.2 | Fréquence de fonctionnement..... | | Erreur ! Signet non défini. |
| 1.2.2.3 | Classes des tags RFID..... | | Erreur ! Signet non défini. |
| 1.2.2.4 | Architecture d'une puce RFID passive..... | | Erreur ! Signet non défini. |
| 1.2.2.5 | Types de couplages..... | | Erreur ! Signet non défini. |
| 1.2.3 | Normes RFID (EPC Gen 2)..... | | Erreur ! Signet non défini. |
| 1.2.3.1 | Introduction du code de produit électronique (EPC) | | Erreur ! Signet non défini. |
| 1.2.3.2 | Standard EPCGlobal..... | | Erreur ! Signet non défini. |
| 1.2.3.3 | Structure du code électronique du produit (EPC Gen2 V2) | | Erreur ! Signet non défini. |
| 1.2.4 | Marché du RAIN RFID [19]..... | | Erreur ! Signet non défini. |
| 1.3 | Etat d'avancement technologique des capteurs-RFID | | Erreur ! Signet non défini. |
| 1.3.1 | Présentation..... | | Erreur ! Signet non défini. |
| 1.3.2 | Capteur RFID à communication numérique..... | | Erreur ! Signet non défini. |
| 1.3.2.1 | Capteur-RFID interne..... | | Erreur ! Signet non défini. |
| 1.3.2.2 | Capteur-RFID externe..... | | Erreur ! Signet non défini. |
| 1.3.2.2.1 | Capteur-RFID par l'ajout d'un microcontrôleur..... | | Erreur ! Signet non défini. |
| 1.3.2.2.2 | Capteur-RFID par l'ajout d'un composant externe | | Erreur ! Signet non défini. |
| 1.3.2.2.3 | Capteur-RFID par l'ajout d'un dépôt de matériau sensible sur une zone dédiée externe..... | | Erreur ! Signet non défini. |
| 1.3.3 | Capteur RFID à communication analogique (avec fonctionnalisation)... | | Erreur ! Signet non défini. |
| 1.3.3.1 | Fonctionnalité capteur basé sur l'utilisation d'un simple tag-RFID | | Erreur ! Signet non défini. |
| 1.3.3.2 | Fonctionnalité capteur basé sur l'utilisation d'un substrat sensible | | Erreur ! Signet non défini. |
| 1.3.3.3 | Fonctionnalité capteur basé sur la sensibilité du matériau de l'antenne.. | | Erreur ! Signet non défini. |
| 1.3.3.4 | Fonctionnalité capteur basé sur le dépôt d'un matériau sensible sur l'antenne | | Erreur ! Signet non défini. |
| 1.4 | Analyse des problématiques et positionnement du sujet de thèse | | Erreur ! Signet non défini. |
| 1.5 | Conclusion | | Erreur ! Signet non défini. |
| 1.6 | Références | | Erreur ! Signet non défini. |

1.1 Introduction

Ce chapitre a pour objectif de présenter la technologie RFID, avec un intérêt particulier aux technologies RFID UHF passives. En effet, la technologie RFID se différencie par la fréquence d'utilisation (LF, HF, UHF...), le type de fonctionnement (passif ou actif) et par l'application. Aujourd'hui, avec les avancées technologiques et la miniaturisation des composants électroniques, la RFID s'avère être particulièrement adaptée à l'acquisition des données issues de capteurs en plus de sa fonction première d'identification. La première partie de ce chapitre traite de la technologie RFID de manière générale. Avec son histoire, son principe de fonctionnement et ses normes et réglementations admises et utilisées au niveau international (ISO, EPC Gen 2 V2, RAIN RFID). La seconde partie de ce chapitre traite de l'état d'avancement technologique des Capteurs-RFID. Tout au long de cette partie, des dispositifs issus de la littérature sont présentés et comparés en fonction des performances et du mode de fonctionnement. Leurs caractéristiques seront comparées et constitueront des valeurs de référence pour le positionnement de notre étude, concernant la conception d'un capteur-RFID par fonctionnalisation.

1.2 Technologie RFID : Contexte, Principes et Normes

1.2.1 Moyens d'identification

Les moyens d'identification existent sous de nombreuses formes (ticket, carte à puce, carte magnétique et code-barres). Les codes-barres sont les moyens d'identification les plus répandus, principalement utilisé sous forme d'étiquettes papier pour l'identification de produits. L'identification permet d'attribuer un identifiant unique à un objet dans le but d'éviter toute confusion possible entre plusieurs objets. L'objectif de l'internet des objets est de créer un réseau mondial d'objet interconnectés et identifiables de manière unique qui communiquent grâce à un protocole standard. Comme illustré Figure 1-1, l'internet des objets couvre trois types de communications (d'objet à personne, d'objet à objet et de machine à machine (M2M)) qui peuvent être établies dans des zones restreintes (« Intranet des Objets ») ou publiques (« Internet des Objets ») [1]. L'arrivée des Smartphones s'est très vite accompagnée de la possibilité de se connecter sur internet dans un contexte mobile. Et c'est pour les mêmes raisons que l'internet des objets ne peut pas exister sans l'élaboration d'objets intelligents.

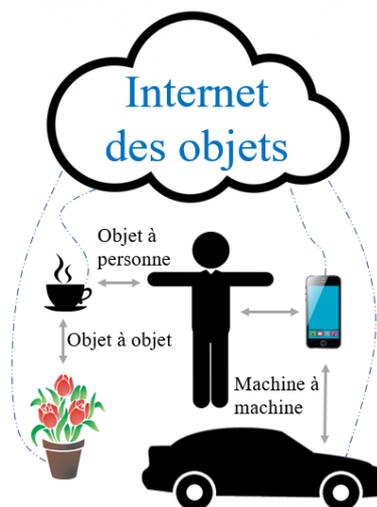


Figure 1-1: illustration de l'internet des objets

Afin de répondre aux défis actuels, tels que l'écologie, le vieillissement de la population et le suivi de produit sensible (médicaments, poches de sang, produits inflammables), l'identification simple d'un objet ne suffit plus. L'ajout de fonctionnalité capteur et/ou d'une mémoire pour le stockage de donnée, est devenu indispensable lors d'un suivi d'objet. Dans cette partie, nous allons examiner brièvement le fonctionnement des codes-barres et d'autres moyens d'identification, avant de s'attarder sur l'identification par radio fréquence (RFID).

1.2.1.1 Codes-barres

Chaque jour ce sont plus de 6 milliards de codes-barres qui sont enregistrés sur la planète [2]. Ils sont présents dans tous les produits alimentaires, dans la gestion de prêt de livres ou de DVD dans les bibliothèques, ou encore dans la gestion de stock industriel. Il en existe 3 types ; les codes-barres unidimensionnel ou linéaires, les codes-barres linéaires empilés et les codes-barres à deux dimensions, représentés Figure 1-2. Ils ont pour principale différence la capacité de caractères imprimable ; les codes-barres linéaires peuvent contenir 8-30 Octets, et certains codes-barres 2D peuvent contenir jusqu' à 7200 Octets [1].

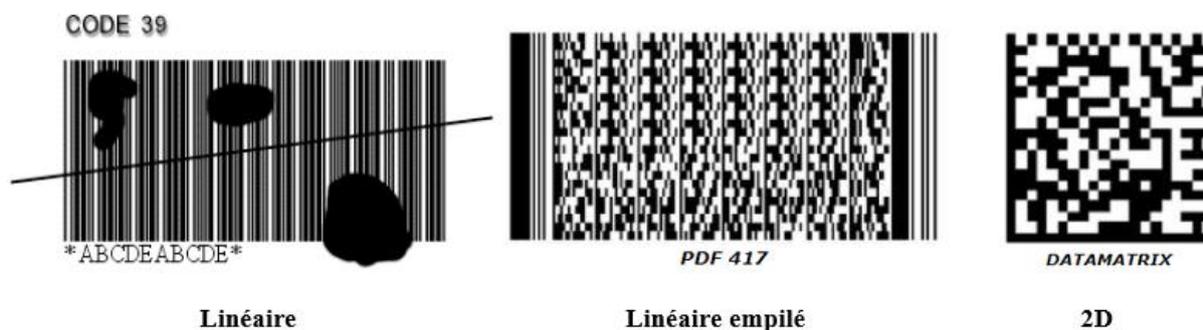


Figure 1-2: Les différents types de codes-barres ; unidimensionnel ou linéaires, linéaires empilés et à deux dimensions [3].

Ils ont pour avantages de pouvoir être imprimable et d'être le moyen d'identification le moins cher du marché, et pour inconvénients de devoir être en visibilité directe lors d'une

lecture, on ne peut donc scanner qu'un seul code-barres à la fois, de plus le code est fixe, non modifiable, et accessible par simple inspection visuelle.

Actuellement l'identification automatique repose très largement sur la technologie de code-barres. Cependant il existe d'autres technologies telles que le ticket, la carte à piste magnétique et la carte à puce. Cette dernière est aussi répandue que le code-barres, nommée ainsi afin de mieux faire ressortir le caractère électronique de l'objet.

1.2.1.2 Autres technologies d'identification

La première carte de voyage et de loisirs apparaît dans les années 50 en Amérique, équipée d'une piste magnétique, elle contient seulement les adresses des hôtels et restaurants acceptant cette carte. C'est en 1967 qu'apparaît, la première carte à puce sur support plastique, la concurrence française apparaît quant à elle en 1974 avec l'apparition du groupe Carte Bleu (CB). Puis, l'apparition de composant électronique plus performant et de plus en plus petit ont permis l'apparition de la CP8 utilisant la technologie MAM (Microprocesseur Auto-programmable Monolithique) fabriqué par Motorola, cette technologie est utilisée dans les cartes à puce en France. Enfin, depuis l'apparition des cartes SIM (Subscriber Identity Module), le marché du téléphone mobile devient le premier marché de la carte à puce (voir Figure 1-3). La carte à puce n'a cessé de s'améliorer avec une capacité de stockage encore plus grande, intégrant plus d'algorithmes de cryptographie et réalisant les traitements les plus complexes et plus rapidement. D'autres applications de ces cartes puissantes sont apparues au fil des ans dans le domaine bancaire, les télécommunications et l'e-gouvernement. Selon une étude de l'association EuroSmart, le nombre de cartes distribuées dans le monde en 2018 dépassera les 10 milliards, alors qu'on parlait d'une dizaine de milliers de cartes distribuées dans les années 80 [4].

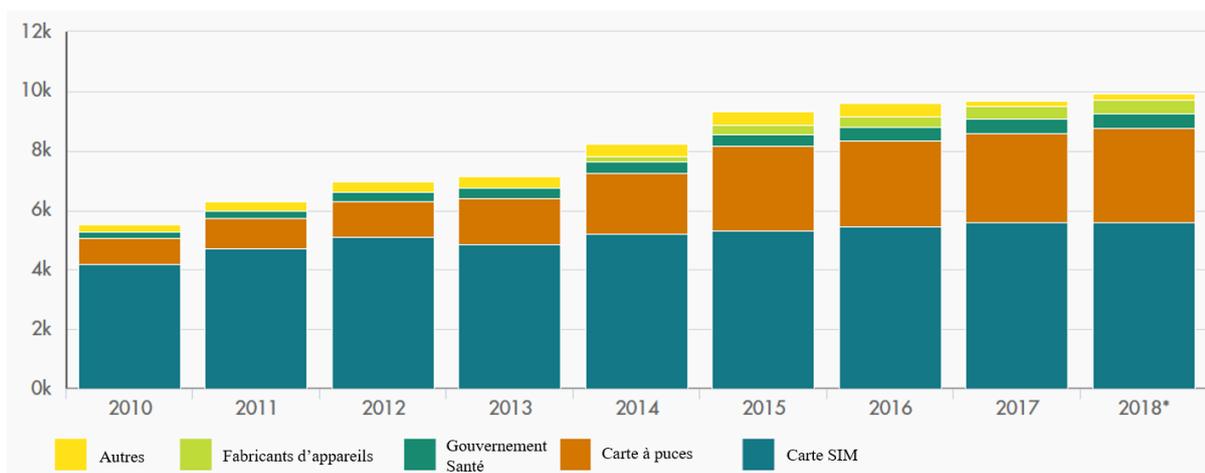


Figure 1-3 : Prévisions mondiales sur le marché des éléments sécurisés (cartes à puce, passeport, carte vitale), en Millions d'unités vendues de 2010 à 2018 – Eurosmart [4]

Ces cartes à puces étaient pourvues de contacts, permettant la communication avec le lecteur lors d'une authentification, par exemple, lors de transaction bancaire. Très rapidement, il est apparu souhaitable de disposer de carte permettant de réaliser une communication sans être en contact direct avec le lecteur. L'évolution du mode contact au mode sans contact a été motivée par la disponibilité, dans les années 80-90, de la technologie RFID. C'est à partir des années 90 [5] qu'apparaissent les premières cartes sans contacts appelées NFC (pour Near Field Communication), communiquant à proximité (quelques centimètres) d'un lecteur RFID.

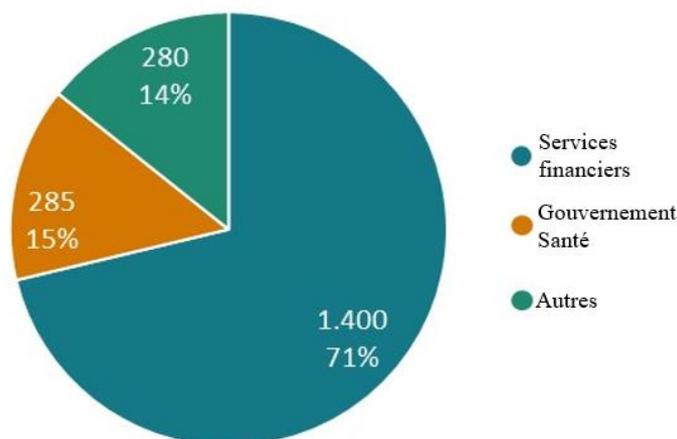


Figure 1-4: Marché du sans contact en 2017 : ventes en millions d'unité [4]

Le marché du « sans contact » a augmenté de 3,7 % en 2017. IDTechEx [6] prévoit qu'en 2022, le marché RFID total vaudra 14.9 millions de dollars. Cela inclut les étiquettes, les lecteurs et les logiciels / et services pour les étiquettes RFID, les cartes, les porte-clés et tous les autres formats, le tout, en RFID passive et active.

Le marché des cartes à puces et des puces sans contacts ne cesse de s'étendre surtout avec la demande croissante des états qui passent aux documents sécurisés. En plus des éléments d'identification, le marché comprend ; les cartes liées à la santé (carte vitale), les cartes bancaires et autres moyens de paiements, qui sont petit à petit remplacés par le paiement sans contact, basé sur la technologie RFID champ proche.

1.2.1.3 Identification par Radio Fréquence (RFID)

Les systèmes RFID sont étroitement liés aux cartes à puce décrites ci-dessus. Comme pour les systèmes de cartes à puce, les données sont stockées sur un transpondeur (puce équipée d'un moyen de transfert de données). Cependant, contrairement à la carte à puce, l'échange de données entre le transpondeur et le lecteur est sans-fil, dont le principe est basé sur l'utilisation des champs magnétiques ou électromagnétiques. L'abréviation RFID est synonyme d'identification par radiofréquence, et est définie comme étant une information véhiculée par des ondes électromagnétiques dans la bande des radiofréquences.

Pour de nombreuses raisons, l'identification par radiofréquence est l'une des meilleures technologies possibles pour l'identification sans fil à distance. Les étiquettes RFID ont été développées avec succès dans l'industrie en remplacement ou en complément des codes-barres traditionnels. Les cartes à puce sans contact sont utilisées, par exemple, comme titre de transports, ou encore comme badge d'accès.

C'est pendant la seconde guerre mondiale, qu'apparaît pour la première fois la notion de RFID (identification par radio fréquences) utilisée comme système de transpondeur radiofréquence permettant d'identifier les avions amis des avions ennemis IFF (Identification Friend and foe), représentation en Figure 1-5. Le problème de l'identification et de la détection d'avions ennemis a été un grand défi pour les deux clans pendant la seconde guerre mondiale.

L'armée de l'air allemande, a résolu ce problème en utilisant une manœuvre ingénieusement simple, afin de différencier les avions amis des ennemis. Lorsque ceux-ci voulaient rejoindre leur base terrestre, les avions allemands devaient réaliser des figures aériennes afin de retro-diffuser le signal émis par leur radar (illustration Figure 1-5). Cette

méthode est plus connue sous le terme anglais « *backscattering* ». Les signaux se réfléchissent sur l'écran radar et permettent aux opérateurs radar allemands d'identifier ces variations de signaux comme étant ceux des alliés. C'est le premier exemple connu de l'utilisation d'une liaison RFID passive [7].

Les Allemands, les Japonais, les Américains et les Britanniques utilisaient tous des radars pendant la guerre et cette manœuvre a permis aux britanniques de comprendre que ces agissements avaient une logique, et d'intégrer sur tous leurs avions un dispositif de transmission radio fréquence afin de différencier leurs avions de ceux des ennemis. Lorsque le transpondeur recevait le signal envoyé par le radar de la base au sol, il envoyait en réponse un signal de retour informant qu'il s'agissait d'un avion allié. Cette seconde anecdote représente cette fois, un premier exemple de liaison RFID active.

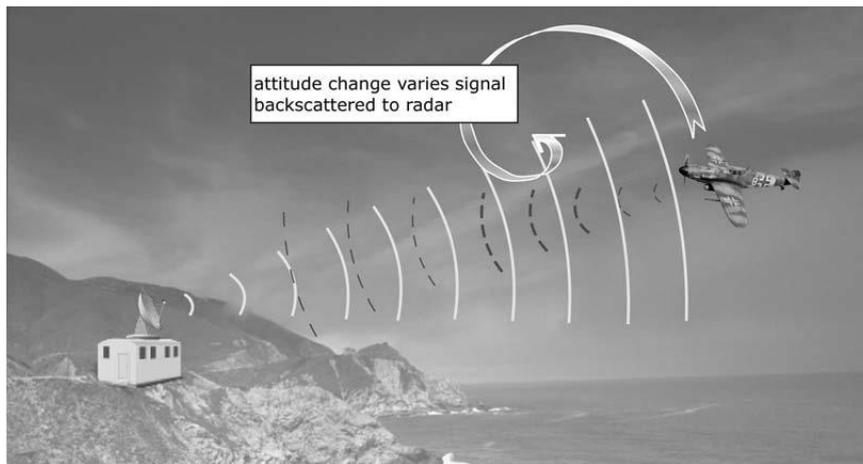


Figure 1-5 : L'utilisation pendant la guerre du principe de rétro-diffusion pour communiquer avec un opérateur radar [7].

Même en tant qu'alliés se battant pour mettre fin à la seconde guerre mondiale, la méfiance était grande entre les États-Unis et l'Union Soviétique. Le fameux « *Great Seal Bug* », également appelé « *The Thing* » (la chose), en est la preuve. En 1945, sans le savoir les États Unis accueillent dans leurs locaux, « *the thing* », un dispositif d'espionnage de l'Union Soviétique. Ce dispositif était caché à l'intérieur d'une sculpture en bois du sceau américain, comme on peut le voir sur la Figure 1-6. Ce n'est qu'en 1952 que ce dispositif a été découvert accidentellement par les américains. Le dispositif n'a été révélé au public qu'en 1960 suite à un incident diplomatique.

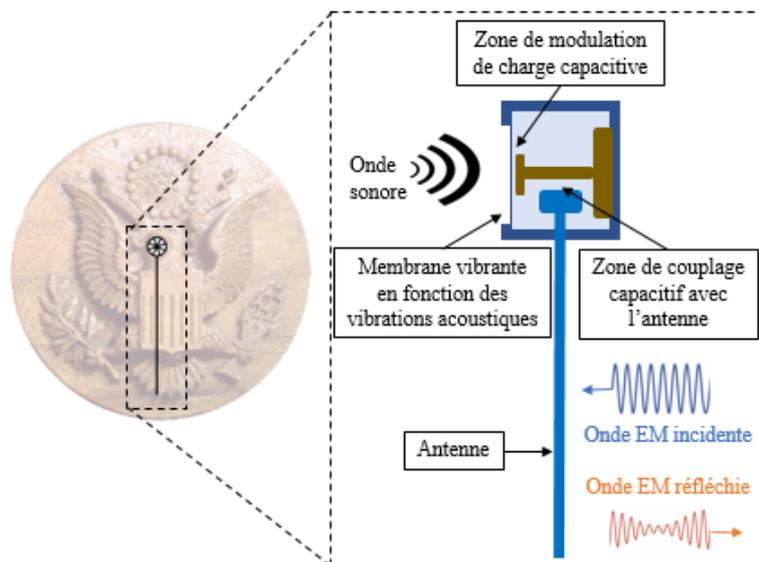


Figure 1-6: « The thing » l'objet conçu par Léon Theremin pendant la guerre pour l'espionnage

« The Thing » a été conçue par l'inventeur russe Léon Theremin, connu pour son invention du theremin, un instrument de musique électronique. Le principal composant de « The Thing » est un microphone à cavité résonante, dont la charge varie en fonction du signal sonore. Lors de l'écoute, une onde électromagnétique est envoyée, puis réfléchiée par le dispositif avec une modulation d'amplitude. La fréquence de résonance de l'antenne varie en fonction du changement de charges résultant du déplacement du diaphragme acoustique. Ce dispositif est un des premiers exemples d'utilisation du principe de « backscattering » sur lequel se base aujourd'hui la RFID passive.

Pour que la RFID atteigne le succès qu'elle a aujourd'hui, d'autres développements ont été nécessaires comme le transistor, le circuit intégré, le micro-processeur, le développement de circuits logiques CMOS et l'arrivée de l'EEPROM. Cette dernière a permis la fabrication à grande échelle de puces identiques qui peuvent être individualisés par programmation. Ces avancées ont conduit à la miniaturisation des puces et à l'augmentation de leurs fonctionnalités. Les activités commerciales débutent dans les années 1960 avec, pour les Etats Unis, un intérêt pour le transport, le contrôle d'accès aux personnes et dans une moindre mesure le suivi des animaux. Pour l'Europe, son intérêt se porte pour les systèmes à courte portée, les animaux et applications industrielles et commerciales. Aujourd'hui, la RFID est très largement utilisée, notamment dans des secteurs tels que la santé/pharmaceutique, l'automobile et l'industrie bancaire avec le paiement sans contact.

Depuis plusieurs années, les recherches et développements se sont orientées vers la possibilité de remplacer et améliorer les anciennes techniques d'identification par la RFID. En effet, cette technologie présente plusieurs avantages par rapport aux méthodes conventionnelles d'identification, telles qu'un moyen de stockage réinscriptible, la possibilité d'insérer des étiquettes RFID dans les objets, aucune exigence de visibilité directe et la possibilité de lire une grande quantité de tags simultanément.

1.2.2 Principe de fonctionnement de la RFID

De manière générale, la RFID utilise des ondes électromagnétiques pour transmettre et recevoir des informations stockées dans un tag (également appelé étiquette ou transpondeur) vers ou depuis un lecteur (appelé aussi base station).

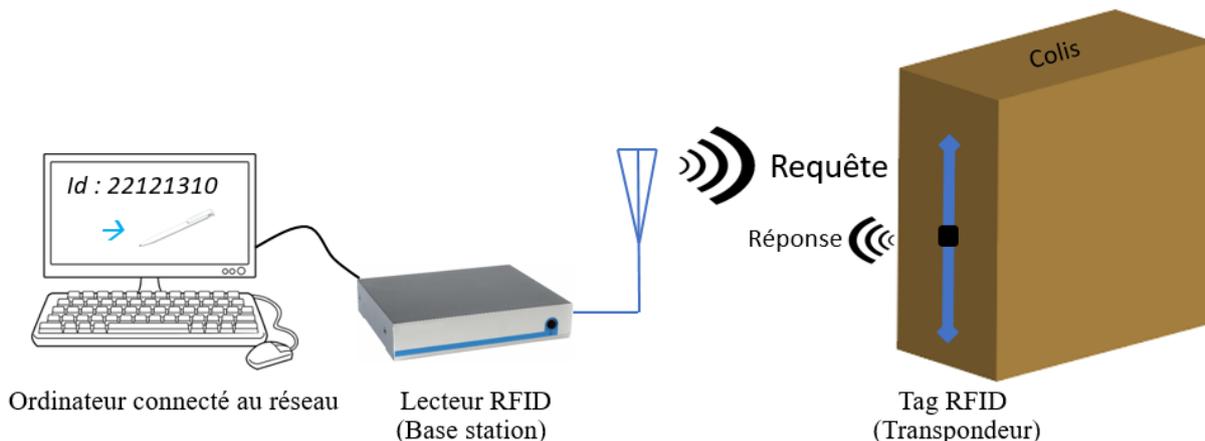


Figure 1-7: principe de fonctionnement RFID

Un système RFID est toujours constitué de trois composants (voir Figure 1-7):

- L'élément déporté, situé sur l'objet à identifier, appelé communément en français : étiquette ou transpondeur. En anglais : tag, label ou inlay ;
- L'élément fixe, qui, selon la conception et la technologie utilisée, peut être un dispositif de lecture ou d'écriture / lecture. Cet élément est appelé : interrogateur, lecteur RFID, modem ou station de base ;
- Et d'un ordinateur, dit hôte, permettant d'avoir plus d'informations sur l'objet scanné, à l'aide d'un logiciel (ou une application) dédié(e).

Dans cette thèse nous allons utiliser, les termes « tag » et « lecteur » pour désigner le « transpondeur RFID » et la « base station »

1.2.2.1 Composition d'un tag RFID

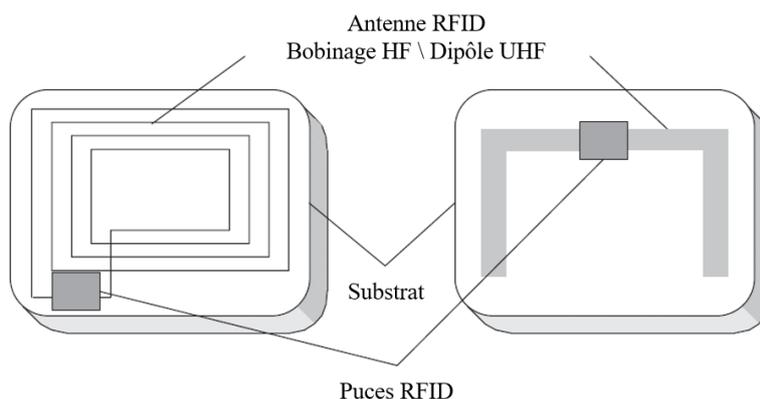


Figure 1-8: Structures des étiquettes RFID passives HF (à gauche) et UHF (à droite)[8]

Un tag est composé d'un substrat sur lequel est déposé une antenne connectée à une puce RFID comme illustré en Figure 1-8. Un tag permet de faire le lien entre l'onde électromagnétique provenant du lecteur et l'énergie transmise à la puce. Cela permet également de communiquer avec le lecteur.

- **Le substrat**

Le substrat est le support de l'antenne et de la puce RFID. Le substrat peut être rigide ou flexible en fonction de l'application et peut être fabriqué avec différents types de matériaux. Par exemple :

- Certaines applications automobiles utilisent des tags RFID intégrées à l'intérieur du pneu du véhicule afin de surveiller l'état des pneus de la voiture. Lorsque la voiture roule, l'intérieur du pneu chauffe à une température très élevée, sous haute pression. Cet environnement hostile impose plusieurs restrictions au substrat du tag [9].
- Les tags RFID utilisés en tant que solution antivol pour les documents, nécessitent un substrat flexible afin que les étiquettes RFID puissent se plier exactement comme le papier auquel ils sont attachés.
- Il est également possible d'utiliser un substrat organique tel qu'un substrat à base de papier, en raison de son caractère écologique et de son prix.

- **L'antenne**

L'antenne du tag est très facile à identifier, car c'est l'élément le plus imposant du tag et elle en détermine la taille finale. L'antenne est responsable de la transmission et de la réception des ondes RF, permettant la communication. Sa géométrie dépend du type de couplage (champ proche, champ lointain) et la fréquence de fonctionnement. Ces paramètres seront décrits plus précisément par la suite.

- **La puces RFID**

De nombreux fabricants proposent des puces avec des caractéristiques plus ou moins complexe. Les principaux fabricants sont : NXP, STMicroelectronics, Impinj, Electronic Arts. Les caractéristiques électriques des puces sont d'une grande importance pour la suite de notre étude, car ce sont elles qui déterminent une partie du design des antennes auxquelles elles sont couplées. Par exemple, l'impédance des puces varie suivant le modèle choisi, la valeur de cette impédance permet d'effectuer les calculs et simulations qui donneront lieu à la conception des antennes adaptées à celles-ci.

Les puces RFID sont composées de trois parties principales, représentées Figure 1-9 ;

- La première l'interface Radio Fréquence (RF), comprenant les blocs de redressement, de modulation/démodulation, de filtrage etc...
- Ensuite, la partie de contrôle numérique, comprenant des fonctionnalités telles que l'anticollision, le contrôle de lecture/écriture, le contrôle d'accès, le cryptage, la gestion mémoire et le contrôle RF.
- Enfin, la partie mémoire EEPROM permettant de stocker les informations, réparties en plusieurs blocs

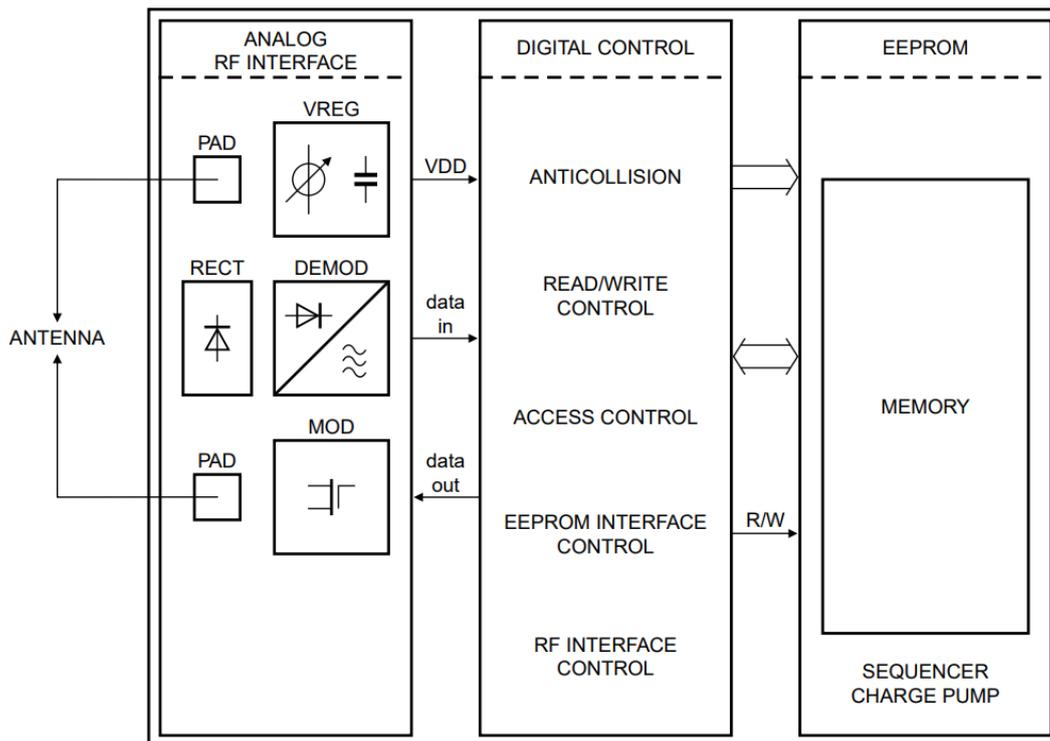


Figure 1-9 : Structure interne d'une puce RFID UHF NXP [10]

Les données échangées sont inscrites directement en mémoire dans une des quatre zones présentées en Figure 1-10.

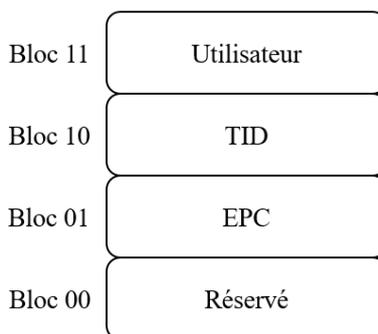


Figure 1-10 : Blocs mémoire d'une puce RFID

Ces zones sont :

La zone mémoire réservée qui doit contenir les mots de passe permettant soit d'effacer le tag soit d'accéder à la lecture du tag.

La zone mémoire EPC (*Electronic Product Code*) qui contient un code qui identifie l'objet auquel l'étiquette est, ou sera attachée, appelée dans la suite de cette thèse « code EPC ». Et si l'étiquette implémente le protocole XPC (*Extended Protocol Control*), c'est sur cette même zone mémoire qu'il sera inscrit.

La zone mémoire TID qui doit contenir un identificateur de provenance, liée au fabricant de la puce. Cette zone doit également contenir suffisamment d'informations d'identification pour qu'un lecteur identifie de manière unique les commandes personnalisées et / ou les fonctionnalités facultatives prises en charge par le tag.

La zone mémoire utilisateur qui est facultative. Si un tag implémente la mémoire utilisateur, il peut alors partitionner la mémoire utilisateur en un ou plusieurs fichiers. Permettant ainsi de pouvoir inscrire d'autres données dépendantes de l'application voulue par l'utilisateur.

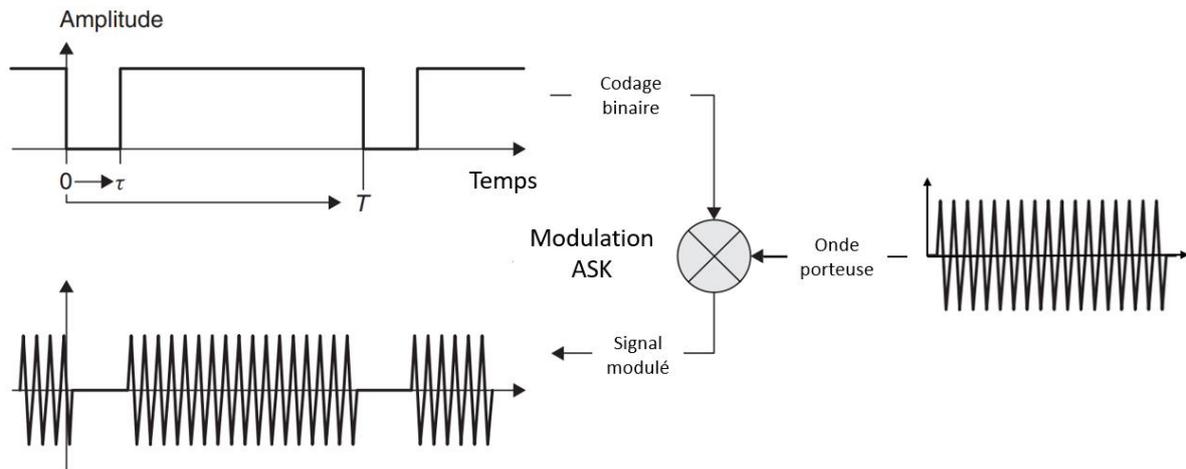


Figure 1-11: Exemple de codage binaire et modulation ASK

Les informations échangées entre un lecteur et un tag RFID, sont formées de trames de bits, construits à l'aide d'un type de codage spécifique. Le codage a un impact important sur l'énergie échangée, le spectre occupé et le débit. Ces données sont transmises par modulation de charges. Il existe plusieurs types de modulations en RFID, qui sont choisies en fonction des performances de propagation du signal pour une réception et une démodulation correcte. L'illustration d'un codage et d'une modulation est faite en Figure 1-11. Ces informations sont échangées sur une onde porteuse liée à la fréquence de fonctionnement du tag RFID.

1.2.2.2 Fréquence de fonctionnement

La communication entre le tag et son lecteur se fait sur des plages de fréquences différentes et en fonction de trois paramètres importants : la distance entre le lecteur et l'étiquette, les normalisations internationales et les lieux d'utilisations (hôpitaux, usines, centrales nucléaires, etc ...). Dans la partie haute de la Figure 1-12, une représentation générale des différentes bandes radiofréquences dont celle utilisée ou utilisable en RFID.

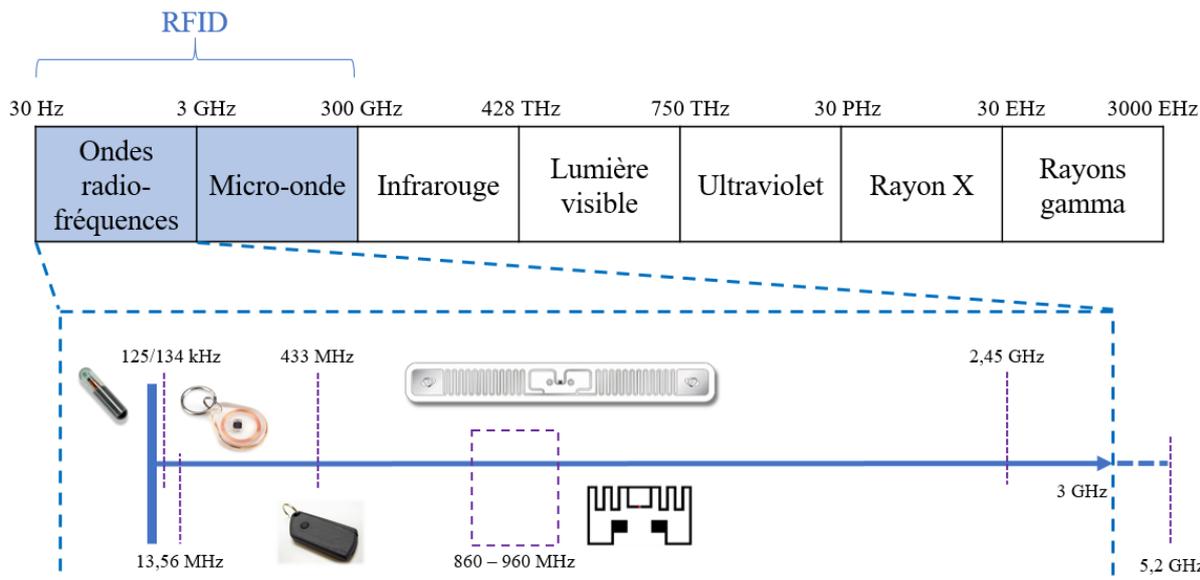


Figure 1-12: spectre électromagnétique des radiofréquences

Les fréquences ou bandes de fréquences les plus fréquemment rencontrées sont : 125/134 kHz, dans les basses fréquences (LF), 13,56 MHz, dans les hautes fréquences (HF), 860-960 MHz et 2,4-2,45 GHz, dans les ultras hautes fréquences (UHF). Ces fréquences sont représentées au bas de la Figure 1-12 et reprises dans le Tableau 1-1. La principale différence, outre la gamme de fréquence, réside dans le type de couplage utilisé pour la communication et l'alimentation des étiquettes.

Aujourd'hui la RFID se décline en deux grandes familles, comme illustré dans le Tableau 1-2 :

- La RFID active qui possède un émetteur RF et une batterie
- La RFID passive, sans batterie et sans émetteur RF, se déclinant à son tour en deux autres familles : avec puce et sans puce. La RFID Semi-Passive, qui est une sous partie de la RFID passive utilisant une batterie, soit pour aider à l'alimentation de la puce soit pour alimenter d'autres composants externes à la puce.

Tableau 1-1 : Tableau récapitulatif des gammes de tags RFID

| | Fréquences utilisées | Type de couplage | Types d'étiquettes |
|------------|----------------------|------------------|---------------------|
| LF | 125/134 kHz | Inductif | Passives |
| HF | 13,56 MHz | Inductif | Passives ou actives |
| UHF | 860-960 MHz | Radiatif | Passives ou actives |
| | 2,4-2,45 GHz | Radiatif | Actives |

Tableau 1-2: Classification des différentes technologies RFID suivant les critères, de haut en bas, actifs/passif, avec ou sans puce, imprimable / non imprimable, mode d'alimentation et technique de génération des données ou de l'identifiant [8].

| RFID Active | RFID Passive | | | |
|---------------|-------------------|--------------------------------|---------------------------|----------------|
| Avec puce | Avec puce | | | Sans puce |
| Silicium | Silicium | TFTC (électronique imprimé) | Non imprimable | Imprimable |
| Avec batterie | RFID Semi-Passive | Energie électromagnétique | Energie électromagnétique | Non applicable |
| | avec batterie | | | |

1.2.2.3 Classes des tags RFID

- RFID Active

Les étiquettes actives ont à la fois une source d'énergie locale et un émetteur RF elles sont donc configurées comme des dispositifs de communication radio bidirectionnels. La source d'énergie, peut être sous forme d'une batterie ou issue d'une source d'énergie alternative (solaire, chaleur, mouvement...). Le champ magnétique ou électromagnétique reçu par le lecteur n'est donc pas nécessaire à l'alimentation de la puce. Cela signifie que le champ peut être beaucoup plus faible que le champ requis pour faire fonctionner un transpondeur passif. Cette condition permet d'augmenter considérablement la portée de communication (plusieurs centaines de mètres).

Les grands inconvénients de ce type de tag sont : Les coûts supplémentaires, la taille et les exigences de maintenance d'une radio à part entière. Plus de composants impliquent une plus grande taille ou le coût d'une conception de puce radio personnalisée. De plus, un tag actif doit être certifié émetteur radio actif et doit donc répondre aux normes réglementaires de pureté spectrale, d'émissions hors bande et de précision de fréquence, inapplicables ou relativement moins strictes pour les étiquettes passives et semi-passives.

- RFID Passive

Les étiquettes passives n'ont pas d'émetteur RF ce qui réduit considérablement le coût de fabrication. De plus, du fait de l'absence de batterie, les étiquettes passives ne nécessitent aucun entretien et durent aussi longtemps que durent les matériaux qui les composent. Elles utilisent le principe de télé-alimentation pour récupérer l'énergie fournie par le lecteur lors d'une communication. D'un point de vue performances, les tags RFID passifs sont les candidats idéaux pour remplacer le code-barres. Ils ont beaucoup d'avantages comme la lecture à distance et le stockage d'information.

o RFID Semi-passive

Ce type de tag RFID, utilise une puce sans émetteur RF (passive) mais avec une source d'énergie (de type batterie ou récupération d'énergie). Il n'est pas capable de générer lui-même un signal à haute fréquence, mais peut seulement moduler le champ du lecteur pour transmettre des données au lecteur, de manière similaire aux tags passifs. Ainsi, l'énergie

provenant de l'alimentation propre du tag ne contribue pas à la transmission de données du tag vers le lecteur. Dans la littérature, ce type de transpondeur est souvent appelé « semi-passif » [12]. Dans certaines applications, la source d'énergie permet d'alimenter d'autres composant externe, par exemple [13] un microcontrôleur et plusieurs capteurs afin d'augmenter les capacités du tag.

Les étiquettes utilisées pour la gamme de fréquence 860-960 MHz et pour la fréquence 13,56 MHz sont classifiés selon les fonctions envisagées pour ceux-ci :

Classe 0 : Ce sont des étiquettes totalement passives, télé-alimentées, en écriture unique et lecture seule avec une taille de code EPC de 64 bits.

Classe I : Ce sont des étiquettes passives, en écriture unique et lecture seule, avec une taille de code EPC de 64 bits ou 96 bits.

En général ces deux premières classes sont considérées comme une seule classe de première génération.

Classe II : Ce sont des étiquettes passives. Le transpondeur a des fonctions supplémentaires, telles que le cryptage, et la présence du TID.

Classe III : Ce sont des étiquettes passives pilotés par batterie (c'est-à-dire étiquette de type « battery assisted »), réinscriptibles, avec capteur intégré.

Classe IV : Ce sont des étiquettes actives. Ces étiquettes sont de petits dispositifs radio et peuvent communiquer entre eux. Ils sont également réinscriptibles. Ils peuvent en plus, communiquer avec les étiquettes passives ou actives de classe I, II et III.

1.2.2.4 Architecture d'une puce RFID passive

Nous avons représenté en Figure 1-13, le schéma interne d'une puce RFID passive, représentant son fonctionnement interne. Nous pouvons le diviser en trois parties, la première partie concerne la fonction de récupération d'énergie, généralement assurée par un redresseur qui permet de récupérer une tension continue à partir de la porteuse radiofréquence reçue par l'antenne. C'est cette tension qui permet l'alimentation du tag. Le redresseur est suivi d'un régulateur ou d'un limiteur de tension afin de stabiliser la tension et de protéger la puce des risques de surtension. Une capacité réservoir en sortie du redresseur assure l'alimentation de la puce durant la phase de rétro-modulation. La deuxième partie concerne la récupération des données transmises par le lecteur. Cette partie est assurée par une chaîne de réception classique comprenant un démodulateur, un filtre en bande de base et un convertisseur analogique/numérique. Le décodage et le traitement de l'information sont réalisés par la partie logique. Généralement, la démodulation est réalisée par un détecteur d'enveloppe qui présente l'avantage d'être très simple (représenté par une diode et une capacité sur la branche centrale en Figure 1-13).

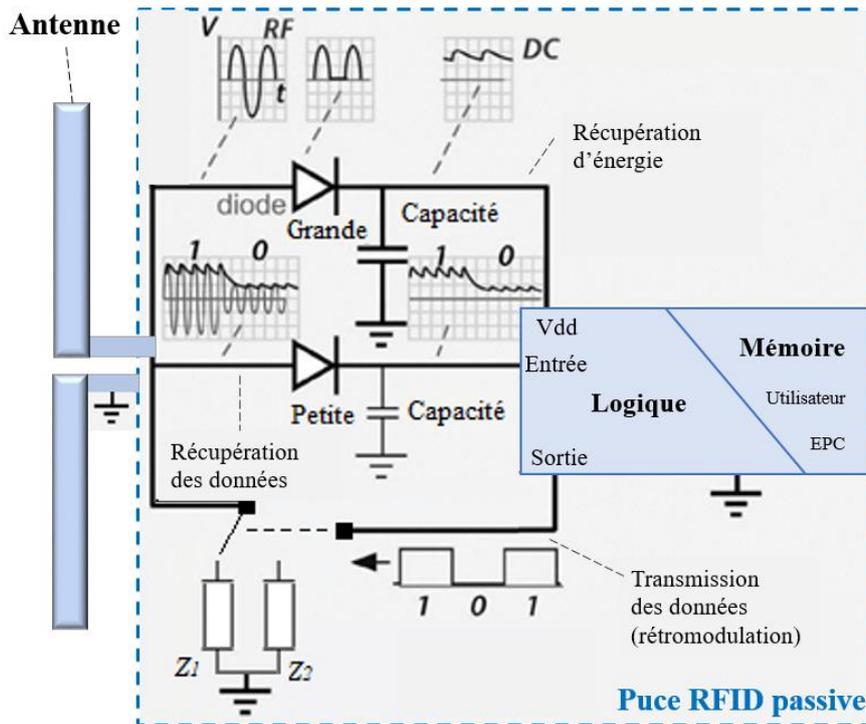


Figure 1-13: Représentation schématique des différentes branches de fonctionnement d'un tag RFID passif [6]

Et enfin, la troisième partie réalisant la fonction de rétro-modulation, celle-ci est assurée par un système de modulation de la charge à l'entrée de l'antenne. Cette dernière est commandée par la partie logique du tag. La modulation de charge (représenté par Z_1 et Z_2 dans la Figure 1-13) entraîne une variation du coefficient de réflexion au niveau de l'interface entre l'antenne du tag et la puce. En d'autres termes, elle consiste en une variation de l'impédance d'entrée de la puce. Il est possible de faire varier la partie réelle et/ou la partie imaginaire de cette impédance. Cette partie sur la rétro-modulation, sera détaillée dans le chapitre 2.

1.2.2.5 Types de couplages

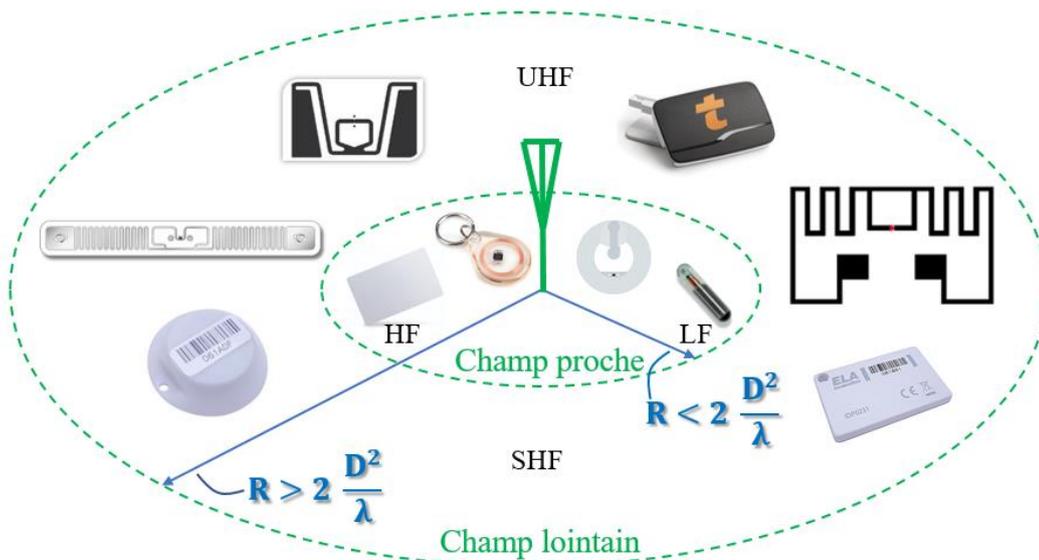


Figure 1-14: Classement des tags RFID en fonction de leur zone de fonctionnement [8]

Les ondes électromagnétiques sont générées par l'antenne représentée au centre dans la Figure 1-14. En fonction de la distance R , elles se comportent de manières différentes. Nous parlons de zone de champ proche lorsque la distance R est petite devant la longueur d'onde (λ) de zone de champ lointain si R devient significative devant λ . Cette distance est donnée dans la Figure 1-14, elle dépend de D la dimension de l'antenne émettrice et de λ la longueur d'onde associée à la fréquence de fonctionnement par :

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2.1)$$

Les ondes électromagnétiques voyagent dans le vide à la vitesse de la lumière (et presque aussi vite dans l'air), avec $c = 300000 \text{ km / s}$. À l'aide de la relation (2.1), on remarque simplement que si la fréquence est petite, la longueur d'onde est très grande, et donc pour que l'antenne rayonne de manière efficace en champ lointain, il faut que sa longueur physique soit proche de la longueur d'onde à la fréquence considérée.

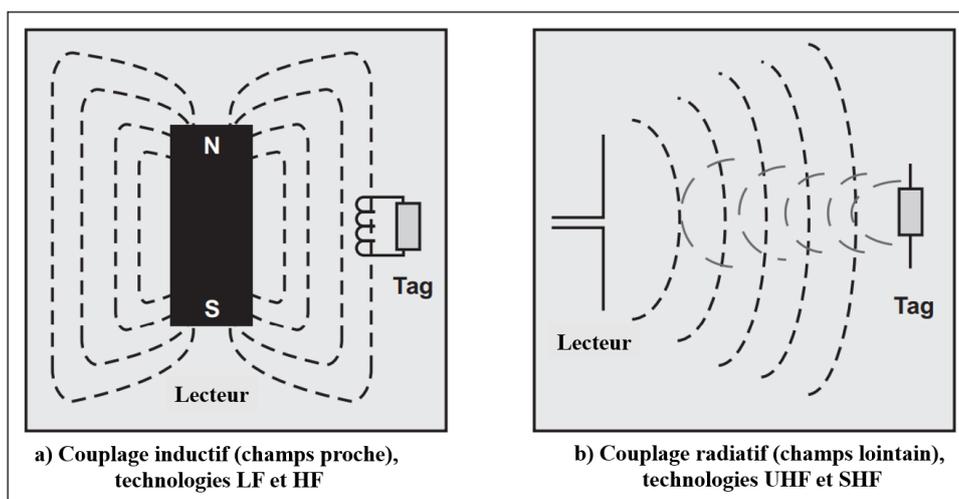


Figure 1-15:Types de couplages RFID [11]

Pour les fréquences basses (LF) et hautes (HF) en RFID, il est impossible d'avoir des antennes d'un ordre de grandeur d'un kilomètre ou même du mètre. C'est pourquoi les systèmes où la longueur d'onde est beaucoup plus grande que l'antenne sont généralement couplés par induction magnétique: presque toute l'énergie disponible est contenue dans une région proche de l'antenne du lecteur (voir Figure 1-15 a)). Dans cette région, la communication entre l'étiquette et le lecteur est effectivement instantanée puisque le temps de propagation vers l'étiquette est faible. Par contre, lorsque la fréquence est grande, la taille de l'antenne diminue en conséquence, par exemple pour les ultras hautes fréquences (UHF) la taille de l'antenne est de l'ordre de la dizaine de centimètres. Dans cette région d'espace le couplage est réalisé par radiation (voir Figure 1-15 b)) puisque l'antenne est de taille comparable à la longueur d'onde.

- **Couplage inductif ou champ proche**

Ce mode de fonctionnement est généralement défini comme ayant le même fonctionnement qu'un transformateur. De manière générale, le couplage inductif existe quand un champ magnétique créé par un courant électrique, induit un effet (mécanique ou électrique) sur autre chose. Par exemple : dans les moteurs, un effet mécanique du stator sur le rotor. Dans un transformateur, au niveau du primaire, un courant électrique circulant à travers un fil enroulé autour d'un noyau, crée un champ magnétique qui induit un courant dans l'enroulement du secondaire. Le même effet est utilisé en radio fréquence, lorsque l'antenne est bien accordée à l'impédance de la puce. Le champ

électromagnétique généré par le lecteur, induit un courant au niveau de l'antenne du tag, ce qui permet d'alimenter la puce. Ensuite, afin de générer une réponse en retour il suffit à la puce de moduler sa charge pour que le lecteur soit directement impacté par ces variations de courant et ainsi en déduire une réponse (voir Figure 1-15 a)).

L'antenne utilisée en couplage inductif est sous forme de boucle (voir Figure 1-16). Les bandes LF et HF sont principalement utilisées pour l'identification des animaux, le contrôle d'accès, les titres de transport et le paiement sans contacts. En NFC, les antennes présentent des formes très proches les unes des autres. Elles sont composées de boucles de conducteurs formant plusieurs enroulements afin d'obtenir une valeur d'inductance de quelques μH . Ce sont donc des selfs à air planaires facilement intégrables dans des objets tels que des tickets papier, des jetons ou des cartes de crédit.

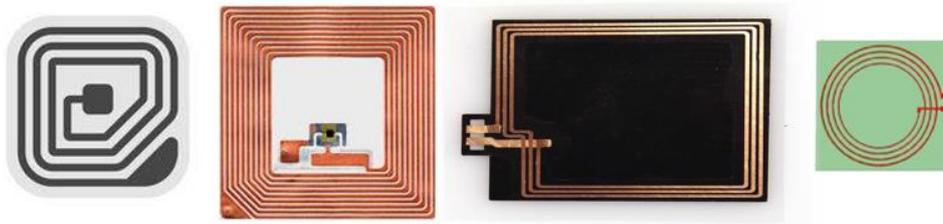


Figure 1-16: Différente forme de tag RFID HF (NFC)

- **Couplage radiatif ou champ lointain**

En bande UHF ou SHF, l'échange des données est basé sur la propagation d'onde électromagnétique (EM) (Figure 1-15 b)). Lorsqu'un signal haute fréquence est appliqué à l'antenne du lecteur, une onde EM est générée. De manière réciproque, si l'antenne du tag est placée dans le champ EM généré par le lecteur, une tension électrique apparaît à ses bornes. Cette tension est utilisée pour alimenter la puce du tag.

Les antennes des tags RFID UHF passifs en couplage radiatif se déclinent suivant une multitude de géométries différentes (voir Figure 1-17). Le choix d'une antenne RFID est en grande partie défini par l'application. La première contrainte est le prix de l'antenne, celui-ci comprend le substrat, le moyen de fixation de la puce et le matériau composant l'antenne (cuivre, encre conductrice, etc...). La seconde contrainte est la taille de l'antenne, puisqu'elle fixe la taille finale du tag. Cette dernière dépend fortement de l'application.

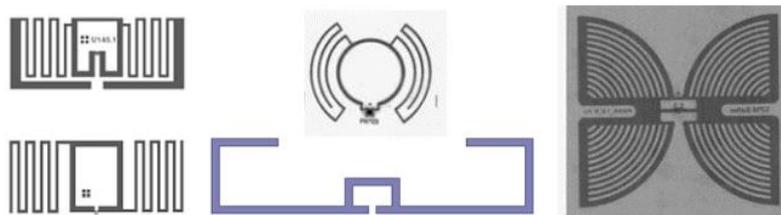


Figure 1-17: Différente forme de tag RFID UHF

On peut citer également : la polarisation de l'antenne (défini comme étant la direction privilégiée de l'onde émise/reçue par l'antenne) qui en modifie la forme, l'adaptation entre l'antenne et la puce RFID, permettant un bon transfert de puissance d'alimentation. Et également l'efficacité de rayonnement de l'antenne permettant d'avoir une communication correcte quelles que soient les propriétés diélectriques ou conductrices des objets sur lesquels elle est apposée (papier, plastique, métal, etc...). Le fonctionnement plus détaillé de ce type d'antenne est traité dans la première partie du chapitre 2.

1.2.3 Normes RFID (EPC Gen 2)

1.2.3.1 Introduction du code de produit électronique (EPC)

Plusieurs standards ont été définis par l'ISO/IEC dans les années 2000 pour caractériser les technologies RFID sans contact en fonction de leur portée, leurs fréquences, le protocole de transport (modulation, et techniques d'anticollisions).

Tout au long de sa vie une étiquette RFID subit plusieurs étapes de lecture et/ou écriture. Suivant le pays, la fréquence ou le débit de communication doit s'adapter aux normes en vigueur. Les normes sont indispensables et sont définies comme étant une référence commune permettant l'interopérabilité des équipements. Elles peuvent être nationales ou internationales et leur principal objectif est d'harmoniser une activité. Par exemple la norme Ethernet : *ISO/IEC 8802-3* et la norme WiFi : IEEE 803.11. Les principaux demandeurs de normes sont en général les industriels dont les produits sont en circulation mondiale.

Pour le moment seul le code-barres est le standard mondial pour le suivi de produit. Afin de le détrôner plusieurs organisations de normalisation ont vu le jour. En 1999, le MIT (Massachusetts Institute of Technology) a commencé à travailler sur les nouveaux débouchés liés à l'utilisation de la RFID. La collaboration du MIT avec l'Uniform Code Council (UCC), a alors donné naissance à un centre dédié baptisé l'AutoID Center (Identification automatique) ayant pour mission de développer le système EPC. En 2003, UCC-EAN International (le champion mondial du code-barres classique), qui, depuis 2005 s'appelle GS1, a décidé de se rapprocher de l'AutoID pour « adapter » la codification du code-barre de grande diffusion de l'EPC à la codification EAN (European Article Numbering) /UPC (code universel des produits) existante sur le support code-barre. Ce rapprochement AutoID Center/UCC – EAN International a été officialisé avec la création des réseaux EPCglobal et Auto-ID Labs [12].

- Les AutoIDLabs implantés sur les différents continents poursuivent le développement technologique des solutions.
- L'EPCglobal valide et commercialise sous la forme de standards techniques les spécifications développées par les AutoIDLabs,

En Figure 1-18, sont présentées les filiales du groupe GS1 international, en sachant que pour chaque pays partenaire il existe une organisation nationale. GS1 France [13, p. 1] (ancien Gencod EAN France) se charge de la normalisation française. En 2007 après le lancement de l'Internet des objets, GS1 France lance une collaboration avec Orange Business Services, qui aboutit en 2008 par le lancement du nouveau service du commerce mobile CodeOnline. Puis se concrétise en 2011 par la mise à disposition des consommateurs, par GS1, de l'application smartphone de référence sur l'information produit : Proxi Produit [14].



Figure 1-18 : GS1 international, organisme de normalisation des méthodes de codages et ses filiales [15]

1.2.3.2 Standard EPCGlobal

EPCGlobal, Inc. est une organisation neutre internationale à but non lucratif chargée depuis 2003 d'assurer le déploiement du système EPC (Electronic Product Code) à l'échelle mondiale pour automatiser l'identification des produits sur une chaîne d'approvisionnement, et faciliter les processus d'inventaire et de production. EPCGlobal Inc. travaille à définir plusieurs standards. Le but visé des spécifications de l'AutoID Center/EPCglobal couvre:

- Un code unique pour chaque produit EPC
- Un système ouvert, multisectoriel, global
- Une architecture informatique spécifique
- Une base de données plus large
- Un tag simple et peu coûteux

On remarque dans ces spécifications qu'elles sont équivalentes à celle de la norme ISO 18000 –6, à une différence près concernant l'identifiant unique (UID). Dans la norme ISO cet identifiant, appelé Identifiant Unique (UID), est gravé par le fabricant directement dans la puce de silicium, et n'a aucun lien avec le produit sur lequel il est apposé, alors que pour l'EPC il doit être lié à l'objet physique et de ce fait c'est le producteur de l'objet qui programme le code EPC dans l'étiquette. Le code EPC servira, par la suite, d'adresse permettant de retrouver les informations relatives à l'objet à l'aide d'une connexion réseau.

Depuis 2013, sur la base des demandes de la communauté d'utilisateurs du code EPC, demandant des fonctionnalités supplémentaires, EPCGlobal a publié un nouveau protocole pour la RFID passive UHF sous le nom de Gen2 V2 [16]. Ce nouveau protocole ajoute des caractéristiques aux étiquettes passives RFID UHF. De plus, les tags Gen2 V2 seront également compatibles avec toutes les autres versions des tags Gen2. Parmi les nouveautés de cette norme nous avons :

- Mesures anti-contrefaçon : Cette fonctionnalité garantit qu'aucune balise ne peut être falsifiée ou usurpée parce que chaque balise a la capacité de répondre en utilisant une clé secrète stockée.
- Sécurité : Modifier les informations de tag en toute sécurité. Les banques de mémoire utilisateur ne sont accessibles que par privilège.
- Gestion de fichiers : Créez des fichiers et attribuez des privilèges d'accès. Actuellement, toute la mémoire utilisateur d'un tag est dans un fichier. G2V2 permet à l'utilisateur de conserver plusieurs fichiers séparés les uns des autres dans la même banque de mémoire utilisateur.
- Non traçabilité : Masquer les données de tag pour protéger la confidentialité des consommateurs. Cela permet à l'utilisateur de masquer certaines banques de

mémoire ou certaines parties des banques de mémoire, ce qui est idéal pour les applications telles que la vente au détail, les cartes d'identité et les soins de santé.

- La prévention des pertes : cette fonctionnalité est spécifique pour les utilisateurs d'étiquette EAS (Electronic Article Surveillance), par exemple les magasins. En incluant un code « magasin » et « vendu » sur chaque étiquette RFID, l'établissement saura si l'article a effectivement été vendu ou a été volé lors de la lecture de l'étiquette.

1.2.3.3 Structure du code électronique du produit (EPC Gen2 V2) :

L'EPC est une sorte de plaque d'immatriculation avec un numéro unique qui permet d'identifier clairement et individuellement un objet marqué. La représentation simplifiée d'un code EPC est illustrée en Figure 1-19. L'EPC est constitué de numéro consécutif qui lui permet d'identifier chaque partie individuelle d'un article. Il est stocké dans l'étiquette sous la forme d'une chaîne de bits. En général, l'EPC se compose d'un entête de longueur variable et d'un certain nombre de champs de données dont la longueur, la structure et la fonction sont déterminées par la valeur de l'entête.

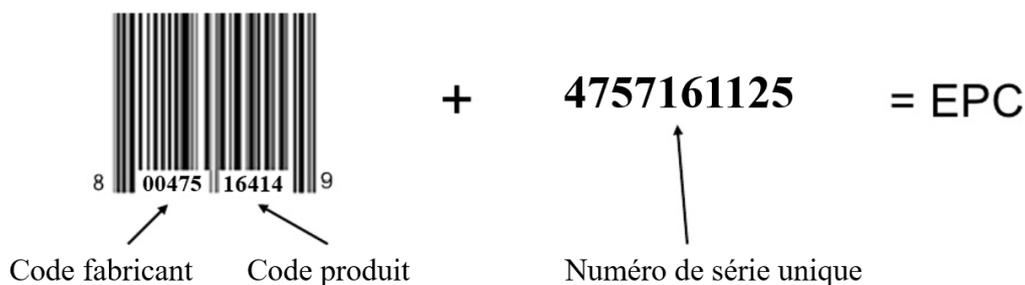


Figure 1-19: représentation simplifiée d'un code EPC : code-barres + numéro unique de série

Afin d'adapter la codification du code-barres au code EPC, l'organisation GS1 a décidé de se servir des codages déjà existant pour les codes-barres et de les modifier pour les programmer directement au sein d'une puce RFID. Actuellement, les EPC d'une longueur totale de 64 bits et 96 bits sont normés en utilisant le codage SGTIN (Serialized Global Trade Item Number) en version 64 bits et 96 bits. Ce type de codage est utilisé principalement pour la vente au détail. En plus du codage SGTIN utilisé par EPCglobal Network pour le marquage d'articles, EPC supporte également plusieurs autres schémas de codage tels que [17] :

- SSCC (Serial Shipping Container Code), unité logistique
- SGLN (Serial Global Location Number), ligne de production
- GRAI (Global ReturnableAsset Identifier), articles de transport réutilisables
- GIAI (Global IndividualAsset Identifier), machine, outils, équipement...
- GSRN (Global Service Relation Number), tickets, identifiant de patient
- GDTI (Global Document Type Identifier), documents physiques et informatiques

Actuellement, il existe plusieurs types d'encodages différents définis par EPCglobal dans [17]. Dans la Figure 1-20, nous présentons un exemple de décodage d'un EPC récupéré à l'aide d'un lecteur RFID, qui a été codé en SGTIN-96. Ce type de codage nous informe que l'article est vendu par pièce, et l'EPC nous informe ; de l'entreprise qui vend l'objet, de la nature de l'objet, et de son numéro de série unique.

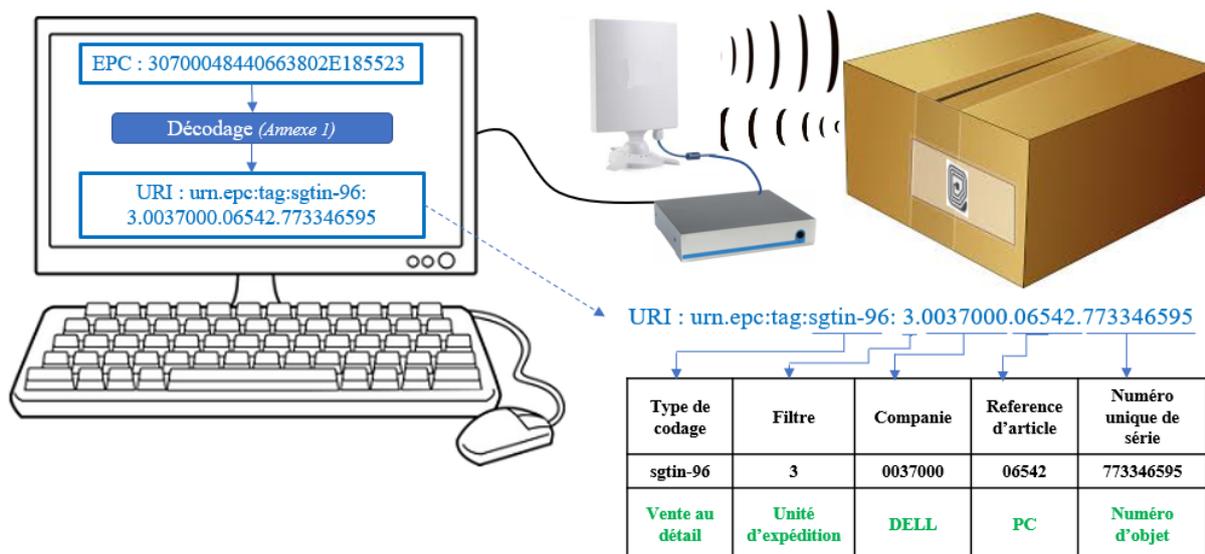


Figure 1-20: Exemple de décodage d'un EPC tiré d'une puce RFID, utilisant le codage SGTIN-96 (bit)

Pour plus de détail du codage et décodage en SGTIN-96, le document tiré de [18], est mis en annexe A et B. De manière plus générale, le codage en SGTIN-96, se compose comme présenté en Tableau 1-3.

Tableau 1-3: Codage en SGTIN-96

| Entête | Valeur du filtre | Partition | Préfixe de l'entreprise | Référence de l'article | Numéro de série |
|--------|------------------|-----------|-------------------------|------------------------|-----------------|
| 8 bit | 3 bit | 3 bit | 20 – 40 bit | 4 – 24 bit | 38 bit |

1.2.4 Marché du RAIN RFID [19]

Plusieurs entreprises ont décidé de se regrouper, afin de permettre aux utilisateurs de la technologie RFID UHF d'identifier, de localiser, d'authentifier et d'interagir avec les objets du quotidien. Tout comme l'appellation NFC pour la technologie RFID HF, l'appellation RAIN concerne la technologie RFID UHF passive normalisée par ISO/IEC 18000-63 et GS1 EPC UHF Gen 2. Lorsque l'appellation RAIN RFID est apposée sur un dispositif RFID, cela veut dire qu'il peut être utilisé en tant que Capteur-RFID connecté au réseau de l'internet des objets. On remarque sur le Tableau 1-4, que le marché des RAIN RFID est en constante augmentation, la valeur de 649 millions de dollars pour les tags en 2016 s'élevant à 1442 millions de dollars en 2022 d'après les prévisions d'IDTechEx [20].

Tableau 1-4 : Prévisions par IDTechEx, des tag RAIN RFID vendus dans le monde [20] (valeurs en Millions de \$)

| Années | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 |
|---------------|------|------|------|------|------|------|------|
| Million de \$ | 649 | 700 | 800 | 890 | 1050 | 1250 | 1442 |

Cela est devenu possible grâce aux nouvelles puces HF (NFC) et UHF (RAIN) dédiés au support de capteurs, et qui rendent les capteurs-RFID plus simples à réaliser et à moindre coût. Les études scientifiques ont également augmenté ces dernières années autour des capteurs-

RFID, notamment concernant les nouvelles technologies permettant de réaliser des capteurs imprimés et flexibles, par exemple à l'aide de films bio-sensibles [21] ou de polymère traditionnels [22].

1.3 État d'avancement technologique des capteurs-RFID

1.3.1 Présentation

Au cours de la dernière décennie, le grand intérêt porté aux systèmes RFID et à l'internet des objets (IoT), a stimulé l'industrie ainsi que la recherche scientifique et a débouché sur de nombreuses publications, preuves de concept, prototypes ou produits. Les dispositifs RFID se sont donc considérablement améliorés et de nouvelles applications ont été étudiées. Ces améliorations concernent, à la fois la puce RFID, l'étiquette et le lecteur RFID. Les étiquettes RFID passives ont été développées avec succès dans l'industrie en remplacement ou en complément des codes-barres [23]. La technologie RFID possède plusieurs avantages par rapport au code-barres : la lecture de plusieurs produits en parallèles, le suivi des stocks, une manutention moins importante, etc.... Pour certaines applications le coût est une notion importante. Donc pour que la RFID remplace entièrement les codes-barres, il est évident que l'électronique doit être imprimée de la même manière que l'est le code-barres aujourd'hui. Cependant, il reste encore des défis importants à surmonter avant de permettre la commercialisation des étiquettes RFID entièrement imprimées [24].

Aujourd'hui l'un des grands centres d'intérêt en RFID est l'adjonction de capteurs en plus des capacités d'identification automatique RFID de base [9]. En effet, la traçabilité ne suffit plus, il existe un réel besoin dans certaines applications d'obtenir une information capteur. Le capteur est généralement défini comme étant un dispositif qui reçoit et répond à un signal ou à un stimulus extérieur. Le stimulus est le paramètre physique à détecter (également appelé paramètre cible ou encore mesurande). Tout au long de cette thèse, il sera nommé mesurande. De manière générale, un capteur sans fil est un dispositif qui combine les capacités d'un capteur et d'un dispositif RF ou sans fil et est donc capable de détecter, de traiter des données, de transmettre et/ou de communiquer à d'autres dispositifs sans fil.

L'objectif des capteurs-RFID est donc de créer un système capable non seulement de suivre, mais aussi de surveiller (conditionner). La technologie RFID passive, en tant que technologie à faible coût et longue durée de vie, offre un grand potentiel de transmission de données capteur combiné avec l'EPC. Ceci est d'autant plus vrai pour les tags fonctionnant en bande UHF, la transmission de données peut se faire sur des distances relativement grandes (~dizaine de mètres) pour la grande majorité des applications. Par la suite, nous allons axer notre étude sur la technologie RFID UHF passive.

Pour ajouter une fonctionnalité de détection aux étiquettes RFID passives fonctionnant en bande UHF, il existe plusieurs approches, que nous avons divisées en deux grandes familles représentées en Figure 1-21. La première famille (nommée capteurs-RFID à communication numérique) dépend de la puce RFID choisie, en effet certaines puces RFID acceptent des capteurs externes via une entrée dédiée, ou intègrent directement un capteur en interne. La deuxième famille concerne les capteurs-RFID basés sur le principe de désadaptation d'antenne (nommée capteurs-RFID à communication analogique).

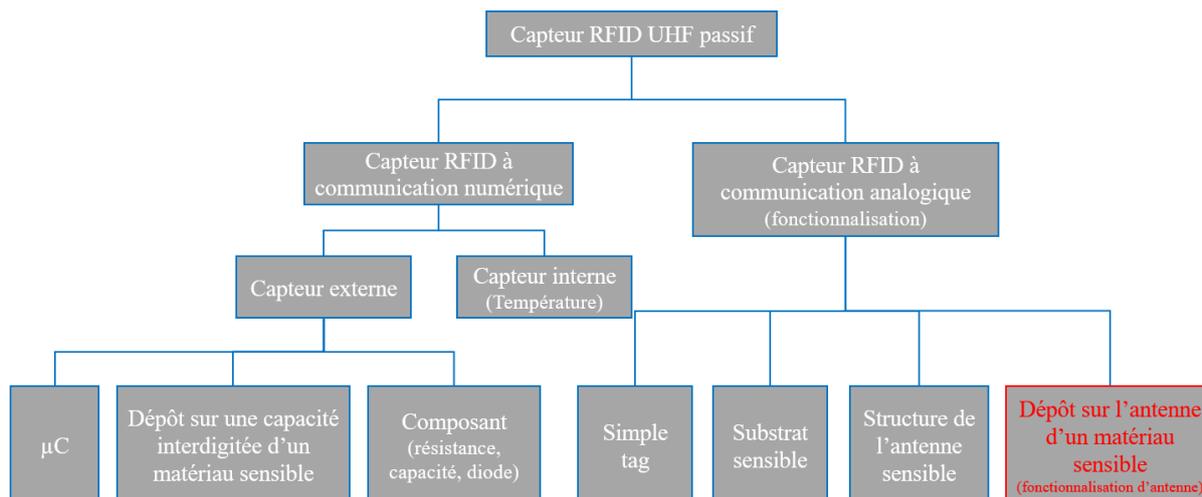


Figure 1-21: Répartition des différents types de capteur-RFID UHF passifs présents dans l'état de l'art

La Figure 1-21, représente les différents types de capteurs-RFID UHF passifs étudiés dans la littérature, permettant de positionner cette thèse. Nous nous sommes axés sur le dépôt d'un élément sensible sur l'antenne du capteur-RFID. Les étiquettes de capteurs RFID basées sur le principe de désadaptation d'antenne sont généralement des conceptions qui dépendent fortement des applications spécifiques.

1.3.2 Capteur RFID à communication numérique

La première famille, présentée en Figure 1-22, concerne les capteurs-RFID à communication numérique, nommées ainsi, car l'information capteur est remontée au lecteur sous forme numérique (lecture d'un registre). Les capteurs sont disposés soit en interne, dans le cas de certaines puces, soit en externe, par exemple en utilisant un capteur du commerce [25], ou un microcontrôleur [26]. Il existe également dans la littérature des études de capteur-RFID avec des composants directement imprimés sur le substrat, afin d'accueillir un dépôt sensible. Par exemple [27], une photodiode afin de détecter la luminosité.

La famille des capteurs-RFID à communication numérique peut être très coûteuse, car les puces utilisées sont les plus chères, elles embarquent plusieurs dispositifs électroniques (un ADC par exemple). En ajoutant des dispositifs externes (un capteur du commerce), alimentés par la puce, la consommation électrique peut très vite dégrader la sensibilité du capteur. C'est pourquoi des études ont été menées sur les moyens de récupérations et de stockages d'énergies efficaces. Ce qui permet ainsi d'avoir des dispositifs RFID dit semi-passifs garantissant une portée de détection plus importante et fiabilisant la récupération de la donnée capteur.

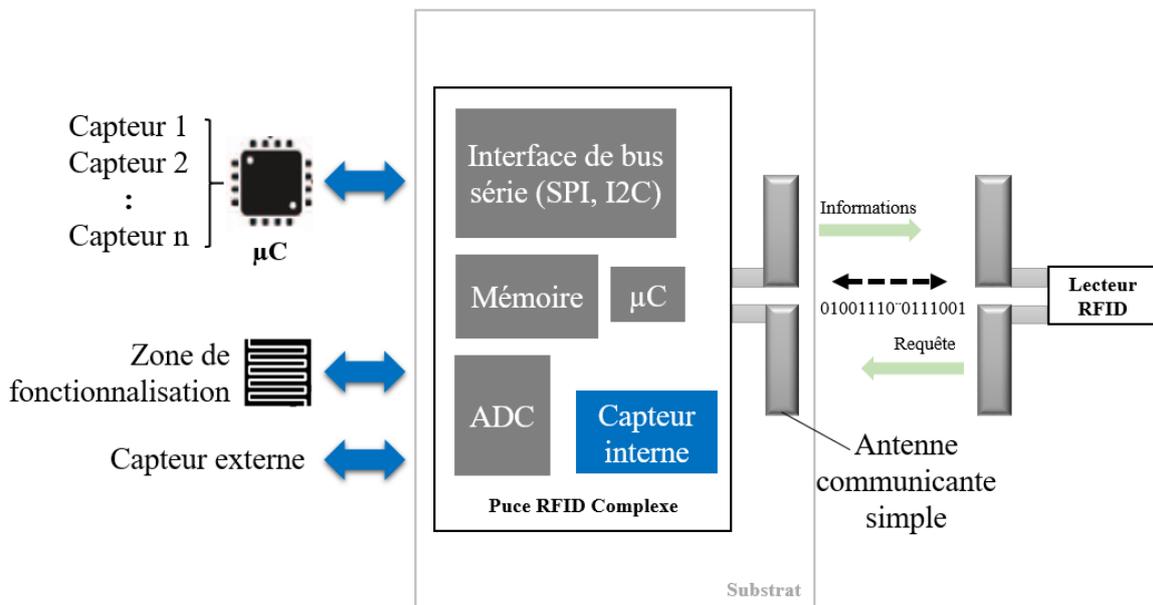


Figure 1-22: Famille des capteurs-RFID à communication numérique

C'est le choix de la puce qui détermine le type de capteur, nous avons reparti ces puces en deux sous-familles : les puces RFID avec capteur interne (Voir Tableau 1-5) et les puces RFID avec capteur externe (Voir Tableau 1-6). La puce SL900A [28], qui est présente dans les deux sous-familles car elle possède un capteur de température et deux entrées permettant l'ajout de capteurs en externe.

1.3.2.1 Capteur-RFID interne

Les fabricants de puces RFID ne sont pas nombreux à intégrer directement un capteur dans leur produit. Nous avons listé, dans le Tableau 1-5, les puces RFID qui embarquent un capteur de température interne.

Tableau 1-5: Puces RFID existantes avec capteur de température interne

| Référence | Fabricant | Puissance d'activation | Plage de détection | Résolution du capteur |
|----------------|--------------------------|------------------------|--------------------|-----------------------|
| SL900A [28] | AMS | -7 dBm | -29°C à 58°C | ± 1 °C |
| EM4325 [29] | EM Microelectronic | -8.3 dBm | -40°C à 64°C | ± 1 °C |
| Magnus S3 [30] | RFMicron | -16.6 dBm | -40°C à 85°C | --- |
| PE3001 [31] | Productivity Engineering | -6 dBm | -20°C à 50°C | ± 0.5 °C |

Un exemple d'application [32] concerne un système qui vise à fournir aux personnes souffrantes d'un manque de sensation thermique, une mesure en temps réel de la température détectée au bout des doigts. Le système « RadioFingertip », comprenant une antenne lecteur placée sur le poignet et un tag RFID placé au bout du doigt, est illustré en Figure 1-23 a).

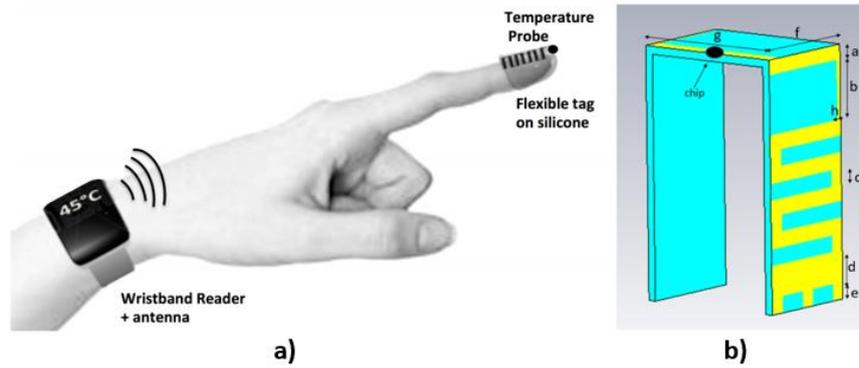


Figure 1-23: a) système RadioFingertip de détection thermique, b) tag capteur interne [32]

En Figure 1-23 b) est présenté le tag capteur-RFID, qui utilise le capteur de température de la puce EM4325. Le défi de cette étude, dans lequel les deux antennes sont mises en contact direct avec le corps humain avec pertes, consiste à établir une liaison de communication RFID robuste de sorte que la puissance fournie par le lecteur RFID positionné sur le poignet au tag RFID positionné sur le doigt soit suffisante pour son activation et pour renvoyer les informations de température collectées.

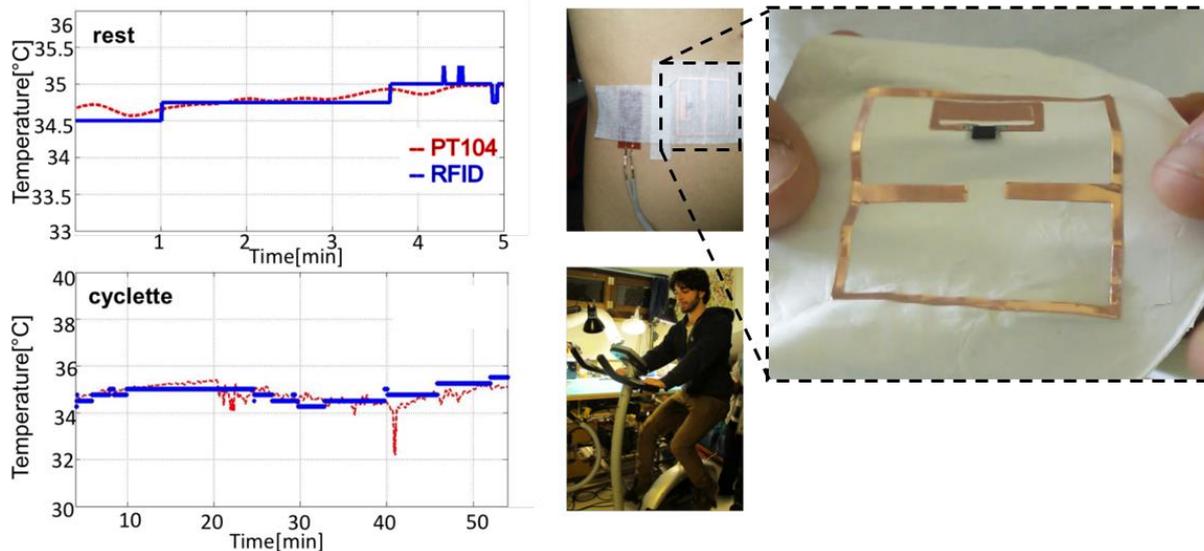


Figure 1-24: Prototype du capteur de température RFID épidermique sur substrat souple et résultats de mesures de température sur le corps en état de repos et pendant une activité physique [33]

Une autre étude [33] a également mis au point un capteur de température (en utilisant la puce EM4325), pour des applications médicales, tel que : l'infection des plaies après la chirurgie, l'évolution des épidémies, ainsi que le suivi des activités sportives. Ce capteur peut être lu jusqu'à 35 cm, dans des conditions statiques (représenté par la courbe Figure 1-24 en haut à gauche, au repos), et dynamiques (représenté par la courbe Figure 1-24 en bas à gauche, lors d'un effort à vélo), avec une précision d'environ 0,25 °C par rapport aux mesures de référence. Pour ne pas influencer la mesure de température, le substrat a été choisi comme étant biocompatible et imperméable.

1.3.2.2 Capteur-RFID externe

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

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

- La deuxième solution se base sur l'utilisation d'une interface de conversion analogique numérique (ADC). Par exemple la puce AMS SL900A dispose de deux entrées analogiques auxquelles il est possible de connecter des capteurs capacitifs, résistifs ou optiques (diodes).

Tableau 1-6 : Comparaison des puces RFID du commerce avec entrées capteurs externes et/ou avec protocole de communication

| Référence | Fabricant | Entrée capteur externe | Possibilité de connecter un μ contrôleur |
|----------------------------------|--------------------------|--|--|
| SL900A | AMS | 2 entrée dédiées aux capteurs externes de type résistif, capacitif ou optique (diode) | ✓ Protocole de communication SPI |
| EM4325 | EM Microelectronic | Pas d'entrée capteur mais possibilité de détection d'arrachement (entrée tout ou rien) | ✓ Protocole de communication SPI maître |
| PE3001 | Productivity Engineering | X | ✓ Protocole de communication SPI |
| WM72016-6 | Cypress | | |
| ANDY100 | Farsens | | |
| ROCKY100 | | | |
| MONZA X 2K Dura | Impinj | X | ✓ Protocole de communication I2C |
| MONZA X 8K Dura | | | |
| UCODE I2C | NXP | | |
| EM4324 | EM Microelectronic | Pas d'entrée capteur mais possibilité de détection d'arrachement (entrée tout ou rien) | X |
| UCODE G2iM, G2iM+ et G2iL | NXP | | |

Dans le Tableau 1-6, sont présentés les différentes puces RFID pour lesquelles il est possible de connecter un ou plusieurs capteurs en externe et/ou qui ont la possibilité de

connecter un microcontrôleur, à l'aide de leurs bus de communication série. La puce AMS SL900A dispose des fonctionnalités les plus complètes.

1.3.2.2.1 Capteur-RFID par l'ajout d'un microcontrôleur

L'un des grands défis de l'ajout d'un microcontrôleur à un tag RFID, est son alimentation. En Figure 1-25 sont illustrées les trois méthodes d'alimentation d'un tag avec microcontrôleur. Dans la littérature (Voir annexe C), les études sont principalement axées sur les tags RFID avec circuits de récupération d'énergie, avec par exemple la récupération de chaleur corporelle [34], ou encore d'énergie solaire [35]. Cependant, ces systèmes doivent encore être améliorés, car ils sont encombrants, alimentés par batterie [36], [36] et nécessitent donc une maintenance.

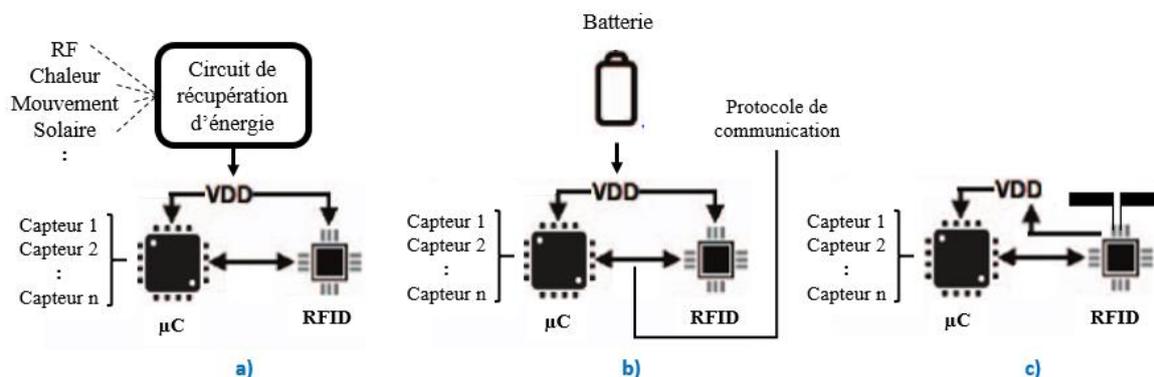


Figure 1-25: Différentes méthodes d'alimentation d'un tag composé : d'un microcontrôleur, d'un ou plusieurs capteurs et d'une puce RFID, à l'aide de : a) un circuit de récupération d'énergie, b) une batterie, ou c) de l'énergie récoltée par la puce RFID provenant du lecteur.

Par contre, les tags RFID sans batterie, représenté dans la Figure 1-25 c), ont une durée de vie illimitée et sont moins encombrant. Ces types de capteur font l'objet d'intenses recherches [37], [38], mais les fabricants proposent déjà de nombreux produits comme l'atteste le Tableau 1-7. Cependant leurs coûts restent encore élevés, ils se situent entre 40 € et 753 € par tag.

Tableau 1-7: Tag RFID UHF passif du commerce avec microcontrôleur intégrés et sans batterie

| Référence | Capteur embarqué | Plage de détection et puissance d'activation (P-A) | Puce utilisée | Prix |
|-----------------------------------|-------------------------------------|--|---------------|---------------------|
| Farsens Atlas-Q2000L | Pression (4 capteurs) | 0kg à 900kg (± 1 kg) P-A : -2 dBm | Andy100 | 753,06 € /10 unités |
| Farsens Cyclon-30BA | Pression (4 capteurs) & température | 0bar à 30bar (± 300 mbar) -30°C à 85°C (± 1 °C) P-A : -2 dBm | Andy100 | 90 € /10 unités |
| Farsens Electra-CT | Température | -30°C à 85°C (± 0.5 °C) P-A : -2 dBm | Andy100 | 53 € /10 unités |
| Farsens EVAL01-Fenix-Vartex-RM | Pression & température | 260 mbar à 1260 mbar (± 0.2 mbar) -30°C à 85°C (± 2 °C) | Rocky100 | 40 € / unité |

| | | | | |
|------------------------------|---------------------------------------|---|----------|----------------|
| | | Distance de lecture en mode passif : 5m | | |
| Farsens EVAL01-Hydro-RM | Humidité du sol | Par calcul (100 Ω à 10M Ω) Distance de lecture en mode passif : 5m | --- | 50 € / unité |
| Farsens EVAL01-Magneto-RM | Champs magnétique | ± 4 gauss où ± 6 gauss (± 146 μ gauss) Distance de lecture en mode passif : 5m | Rocky100 | 40 € / unité |
| Farsens EVAL01-Shadow-RM | Luminosité | Par calcul (10M Ω à 100 Ω) Distance de lecture en mode passif : 5m | Rocky100 | 50 € / unité |
| Phase IV Micro-T | Température | 0°C à 145°C (± 1 °C) | --- | 675 € / unité |
| Phase IV Cooking probe | Température | -20°C à 170°C | --- | --- |
| Phase IV SHM Strain | Pression (élongation) | ± 250 μ bar (± 2 μ bar) | --- | --- |
| Powercast PCT100-TLH | Température Humidité Luminosité | -40°C à 85°C (± 2 °C) 11% à 89% (± 8 %HR) 0lux a 1000lux (± 10 %) Distance de lecture en mode passif : 5m | --- | 69.29€ / unité |

1.3.2.2.2 Capteur-RFID par l'ajout d'un composant externe

Cette méthode pour réaliser un capteur-RFID est l'une des plus simples à mettre en œuvre, car il suffit de connecter un capteur du commerce en externe sur une puce RFID ayant un ADC, permettant ainsi de convertir l'information analogique en numérique avant de la transmettre au lecteur RFID. Dans le Tableau 1-6, on remarque que seule la puce RFID AMS SL900A possède deux entrées externes dédiées pour les capteurs. C'est donc à l'aide de cette puce RFID que dans la littérature est exposée : un capteur de luminosité dans [39], des capteurs-RFID pour des applications médicales. Par exemple l'étude référencée [40] porte sur un capteur flexible de mouvement des doigts pour le suivi de la réhabilitation après un AVC. Une autre étude [41] concerne un capteur de pression permettant de suivre l'adhésion entre l'os et une prothèse orthopédique de genou. Enfin dans [25] un travail de recherche porte sur le suivi de produit alimentaire, qui cumule : un capteur de pression pour détecter les chutes du produit, et un capteur d'ouverture (voir Figure 1-26). Dans cette étude l'ajout d'un capteur externe et le substrat en carton (à perte) dégrade fortement les performances de détection du capteur RFID avec une puissance d'activation de -2dBm.

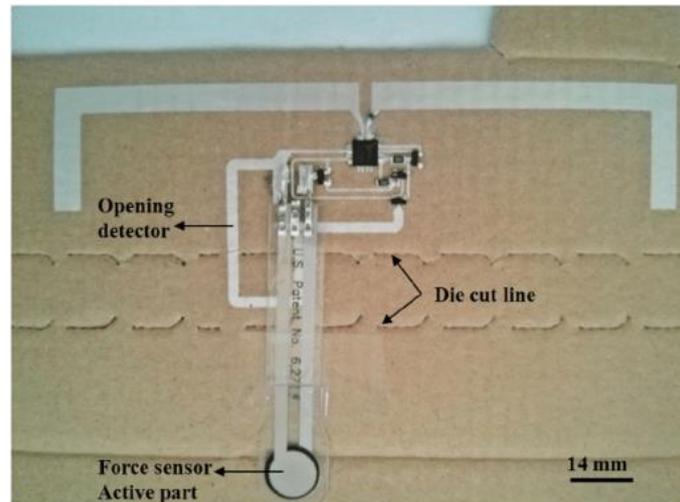


Figure 1-26: Tag RFID avec capteur de force externe pour le suivi de produit alimentaire [25]

1.3.2.2.3 Capteur-RFID par l'ajout d'un dépôt de matériau sensible sur une zone dédiée externe

Un exemple représentatif de ce type de capteur est rapporté dans [22]. Il s'agit d'un capteur-RFID basé sur une zone fonctionnalisée à l'aide du dépôt d'un matériau sensible. Dans cette étude, la caractérisation du dispositif en tant que capteur d'humidité est basée sur la variation de la résistance de l'oxyde de graphène (OG). Cette variation est due à l'adsorption et à la désorption de la vapeur d'eau sur la surface de l'OG (voir Figure 1-27 a). Afin de mesurer ces variations de résistance, le capteur a été exposé à des concentrations cycliques croissantes d'humidité. Le protocole de mesure consistait à faire circuler de l'air sec à travers le système pendant 1 heure pour établir une valeur de référence du système, puis faire circuler un mélange air sec/humide à différentes concentrations. L'étalonnage a été réalisé à l'aide d'un capteur d'humidité de référence.

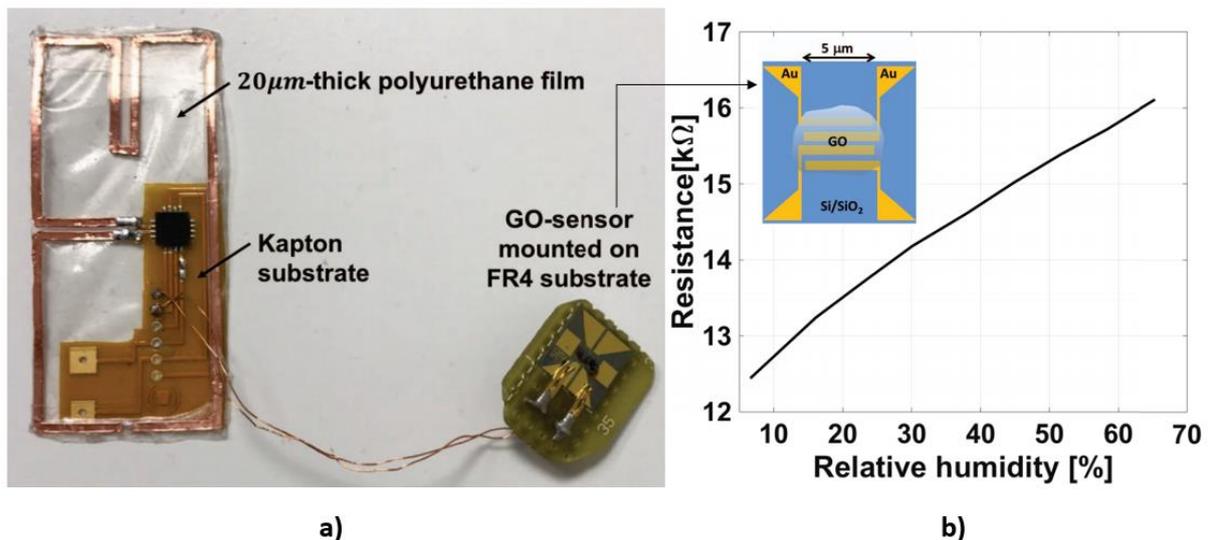


Figure 1-27: a) capteur-RFID utilisant une zone fonctionnalisée externe à base d'oxyde de Graphene et b) résultats des variations de la résistance par rapport à la variation de l'humidité relative [22]

La Figure 1-27 b) montre les résultats des variations de la résistance par rapport à la variation de l'humidité relative. Le profil apparaît presque linéaire par rapport aux niveaux d'humidité croissants et il est donc possible d'extraire la sensibilité du capteur :

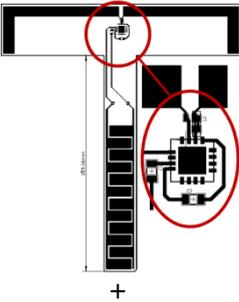
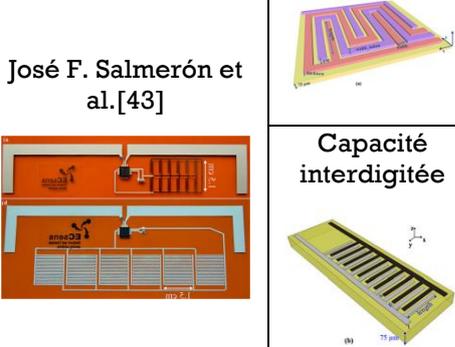
$$S[R] = 60\Omega/\%HR.$$

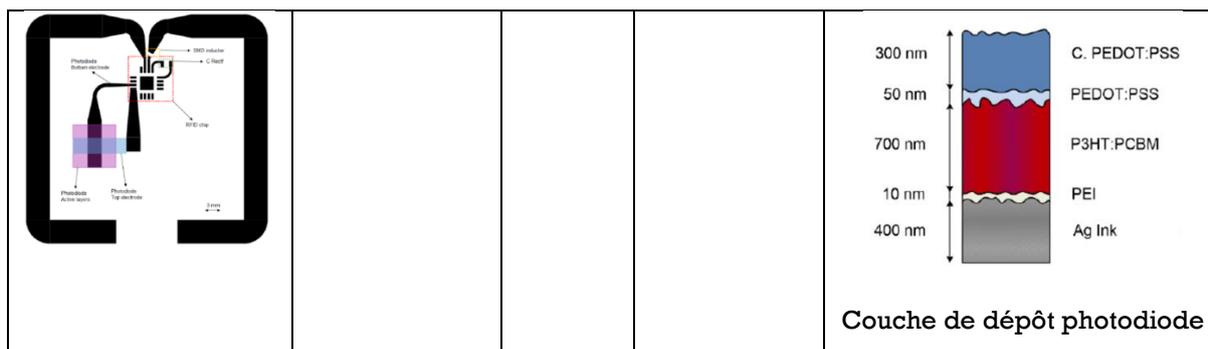
Nous avons listé dans le Tableau 1-8, d'autres capteurs-RFID tirés de la littérature montrant des dispositifs à base de capteur externe sous forme de zone fonctionnalisée. Tous ces capteurs utilisent la puce RFID SL900A. En termes de performance, la distance de lecture ne dépasse pas deux mètres et dépend de l'élément sensible utilisé et plus spécifiquement de la zone sensible sur laquelle est fait le dépôt. Par exemple, dans les travaux de José F. Salmerón et al. [43], deux dispositifs de capteur d'humidité, basés sur les variations de permittivité du substrat en polyimide en fonction de l'humidité relative, ont été étudiés. La formule est donnée par le fournisseur du substrat :

$$\epsilon_r = 3.05 + 0.008 \times RH (\%) \text{ à } 1 \text{ KHz, } 23 \text{ }^\circ\text{C}$$

Le premier capteur-RFID possède une zone en forme de serpent et le deuxième en forme de capacité interdigitée. Ces deux capteurs ont de bonnes performances de lecture liées à la plage de fonctionnement. La zone en forme de serpent est privilégiée pour les faibles humidités (37% HR - 70%HR) tandis que la zone en forme de capacité interdigitée est privilégiée pour les hautes humidités (60% HR - 90%HR).

Tableau 1-8: Capteur-RFID, tiré de la littérature, augmenté par l'ajout d'un composant externe sous forme de zone fonctionnalisée.

| Référence | Type de zone fonctionnalisée | Distance de lecture (m) | Sensibilité du capteur-RFID | Dispositif | Élément sensible |
|---|------------------------------|-------------------------|--|---|---|
| S. Tedjini et al. [42]  | Capacité interdigitée | 1.1 | 6.95 LSB/% de teneur en eau | Substrat FR4, antenne en cuivre | Humidité du sol |
| José F. Salmerón et al. [43]  | Serpentin | 1.6 | 750 points de mesures dans la gamme 37% HR - 70%HR | Substrat en polyimide (Kapton HN Dupont™) 75µm d'épaisseur, antenne en encre conductrice d'argent | Humidité ambiante à l'aide du substrat sensible |
| | Capacité interdigitée | | 370 points de mesures dans la gamme 60% HR - 90%HR | | |
| Falco et al. [27] | photodiode imprimée | 1.2 | --- | Capteur de luminosité | |



1.3.3 Capteur RFID à communication analogique (avec fonctionnalisation)

La deuxième famille est sans doute la plus étudiée, car elle apporte des solutions technologiques bas coût pour des applications spécifiques. Cette partie concerne les capteurs-RFID à communication analogique, nommée ainsi, car l'information capteur est contenue dans les paramètres analogiques de l'onde EM reçue par le lecteur. Dans ce type de capteurs, le paramètre physique à mesurer agit sur l'impédance de l'antenne ce qui a pour effet de faire varier la puissance re-rayonnée vers le lecteur. Comme illustré dans la Figure 1-28, quatre éléments sensibles à un paramètre peuvent être utilisés pour désadapter l'impédance de l'antenne :

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

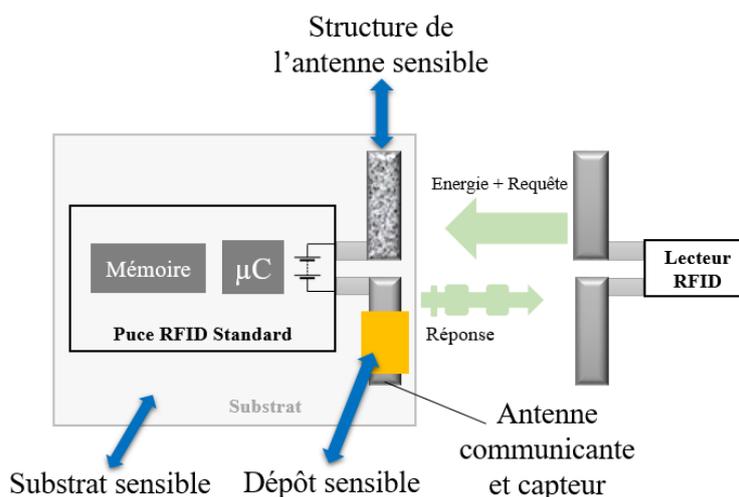


Figure 1-28: Famille des capteurs-RFID à communication analogique

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

Les capteurs-RFID avec fonctionnalisation suscitent l'intérêt de la communauté de chercheurs et d'industriels du secteur principalement par rapport à leur coût de fabrication très réduit en comparaison des solutions décrites précédemment. Aujourd'hui, il existe plusieurs types de capteurs-RFID qui se différencient en fonction du type de fonctionnalisation. Nous avons classé ce type de capteur-RFID suivant quatre principes qui dépendent de la position de l'élément sensible impactant l'adaptation d'impédance :

- Le premier principe se base simplement sur l'effet de l'environnement proche sur l'antenne du tag. Dans ce cas un simple tag RFID non modifié suffit. Par exemple, le masquage physique d'un tag RFID permet de détecter un passage [44]. Le taux d'hygrométrie du sol se mesure à l'aide d'un simple tag enterré [45].

- Le deuxième principe requiert de rendre le substrat sur lequel est posée l'antenne sensible à un paramètre physique. Par exemple un substrat papier voit sa constante diélectrique évoluer en fonction de l'humidité absorbée [46].

- Ensuite, l'élément sensible peut être l'antenne elle-même. La modification structurelle du dépôt conducteur réalisant l'antenne peut permettre la détection de l'humidité [47].

- Enfin transformer un tag en capteur RFID peut se faire via le dépôt d'un élément sensible sur l'antenne [48].

Tableau 1-9: Puces RFID les plus utilisées dans la littérature en fonction de leurs sensibilité et des options telle que l'auto-tune ou la possibilité de connecter deux antennes.

| Référence | Puissance d'activation (dBm) | Auto-tune | Double antenne | Référence | Sensibilité (dBm) | Auto-tune | Double antenne |
|-----------------------------|------------------------------|-----------|----------------|-------------------------------------|-------------------|-----------|----------------|
| HIGGS-EC | -22.5 | -- | -- | HIGGS 4 | -20.5 | -- | -- |
| SL900A | -7 | -- | -- | MAGNUS S2 | -16.1 | ✓ | |
| EM4325 | -8.3 | -- | -- | MAGNUS S3 | -16.6 | ✓ | |
| PE3001 | -6 | -- | -- | EM4324 | -8 | -- | -- |
| WM72016-6 | -6 | -- | -- | PE3001 | -6 | -- | -- |
| ANDY100 | -2 | -- | -- | ROCKY100 | -13 | -- | -- |
| MONZA X 2K (8K) Dura | -19 | -- | ✓ | MONZA (R6-A, R6-P, S6-C) | -22.1 | ✓ | -- |
| UCODE 8/8m | -23 | -- | -- | MONZA 4 | -17.4 | -- | ✓ |
| UCODE I2C | -18 | -- | ✓ | MONZA 5 | -17.8 | -- | -- |
| UCODE G2iL | -18 | -- | -- | UCODE G2XM, G2XL | -15 | -- | -- |
| UCODE G2iM, G2iM+ | -17.5 | -- | -- | MAGICSTRAP (LXMS31ACNA, 011) | -8 | -- | -- |

Quel que soit le type de fonctionnalisation, le choix de la puce RFID est très important. Ce choix se fait principalement sur le critère de la puissance d'activation, l'encombrement acceptable (SOT, MagicStrap...) et le prix. Mais également par l'ajout de fonction telle que l'auto-adaptation (*auto-tune* en anglais, dont le principe est défini plus bas) ou la possibilité d'ajouter une seconde antenne à la puce. Dans le Tableau 1-9, sont listées certaines puces RFID les plus utilisées dans la littérature pour les dispositifs RFID. Dans cette partie, nous avons fait un état de l'avancement technologique concernant les capteurs-RFID, pour chacun des quatre principes précédemment cité. Afin de positionner nos travaux.

1.3.3.1 Fonctionnalité capteur basé sur l'utilisation d'un simple tag-RFID

Dans la littérature, des applications de détections à l'aide d'un simple tag sont principalement axées sur la localisation [49] utilisant des algorithmes plus ou moins complexes [50], [51]. Ceci a permis de réaliser des robots d'intérieurs se déplaçant de manière autonome [52], [53] et manipulant des objets [54], [55]. Ensuite, viennent des applications de détection de mouvement [56] ou de présence [44] pour lesquelles la détection se fait par modification du signal retro-modulé par le tag (niveau du RSSI) lors du mouvement du tag ou lors du passage d'une personne à proximité du tag. Beaucoup ont exploité cette technique pour réaliser d'autres types de capteurs comme la détection de l'humidité du sol [45] ou le niveau d'un liquide (jauge [57]). Le principe est toujours le même, la modification du signal retro-modulé du tag par interaction avec son environnement proche pouvant être assimilé à un matériau dont la constante diélectrique effective varie.

Dans l'objectif de l'internet des objets, il existe dans la littérature des systèmes de détection, que l'on peut rattacher à la domotique, permettant d'automatiser la maison en fonction des objets manipulés. Dans cette étude [58], un simple tag RFID est utilisé pour détecter trois situations différentes :

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

Ce système de domotique permet par exemple d'allumer la lumière, sans avoir à se lever, par simple manipulation d'un livre. L'inconvénient est qu'il faut un lecteur RFID par pièce.

D'autres études [59], ont été menées sur la possibilité de positionner le dispositif de monitoring directement au poignet de la personne (par exemple, pour un suivi médical des personnes âgées), afin d'analyser le rapprochement avec un objet, pour en faire un suivi journalier. Le suivi de la qualité du sommeil avec un dispositif similaire est une autre application étudiée dans [60] montrant tout le potentiel de ce type d'approche simpliste de capteur-RFID.

Tableau 1-10: Capteur-RFID avec auto-tune vendu dans le commerce

| Référence | Type de capteur embarqué | Puce utilisée | Prix |
|--|--|-----------------|--------------------------|
| Enable IPC RFID Fuse Tags | Arrachement (3.6m) | Higgs 3 | ---- |
| Tag Co E-seal | Arrachement (6m, pour container) | Higgs 4 | ---- |
| RFmicron chameleon | Mouvement (positionnement du tag) | Magnus S2 | ---- |
| RFmicron - neumueller RFM2100 & RFM2120 | Niveau d'humidité (non utilisable sur du métal) | Magnus S2 | 1.60 € / 200 unités |
| RFmicron - neumueller RFM2110 | Niveau d'humidité (utilisable sur du métal) + Température pour la S3 | Magnus S2 ou S3 | 3.10 € / 200 unités |
| RFM3200-3240-3250-3254-3260 | Température | Magnus S3 | ---- |
| RTEC ATOM Magnus | Niveau d'humidité (6m, utilisable sur du métal) | Magnus S2 | ---- |
| RTEC Proton Magnus | Niveau d'humidité & Niveau de pression (3m) | Magnus S2 | ---- |
| RTEC RS Magnus | Niveau d'humidité (1m) | Magnus S2 | ---- |
| SMARTRAC DOGBONE | Niveau d'humidité (8m) | Magnus S2 | 1.8 € à 2 € / 500 unités |
| SMARTRAC PATCH | Niveau d'humidité (9m) | Magnus S2 | 1.8 € à 2 € / 500 unités |
| SMARTRAC TADPOLE | Niveau d'humidité (8m) | Magnus S2 | 1.8 € à 2 € / 500 unités |

Afin de compenser la perte de performance liée à l'environnement variable auquel sont soumis les tags RFID, les fabricants de puces RFID dont les principales références sont listées dans le Tableau 1-9, ont intégré une fonction d'auto-adaptation de l'antenne. Dans une étiquette RFID classique, il y a un décalage de fréquence et une perte de performance lorsque le tag est en présence d'eau ou d'éléments métalliques. Une capacité variable positionnée sur l'étage d'entrée de ces puces permet d'obtenir une adaptation d'impédance conjuguée complexe même si l'environnement proche de l'antenne varie. La valeur de la capacité variable qui a permis de compenser cette désadaptation est accessible via une requête côté lecteur RFID. Dans le cadre d'une application de type capteur RFID, cette information étant corrélée avec le niveau de désadaptation entre l'antenne et la puce, nous pouvons donc exploiter cette fonctionnalité pour récupérer la valeur d'un paramètre physique. L'intérêt de cette technique est que l'information capteur peut être directement lue via une commande de lecture d'un registre de la puce. Ce qui n'est pas le cas pour les scénarios décrit plus haut (basé sur le RSSI et la puissance d'activation).

Ces puces RFID sont vendues par des fabricants de tags RFID et permettent de détecter l'humidité la température ou encore la pression. Certains de ces tags sont présentés dans le Tableau 1-10.

1.3.3.2 Fonctionnalité capteur basé sur l'utilisation d'un substrat sensible

Dans la littérature, il existe plusieurs capteurs-RFID utilisant le substrat comme élément sensible. Par exemple, la conception d'un biocapteur [61] utilisant de la cire de paraffine en tant que matériau sensible à la température, comme substrat du tag (Figure 1-29). L'idée principale de ce type de capteur de température est basée sur l'affectation des performances globales du tag RFID. L'exposition de ce substrat à des températures élevées modifie les propriétés physiques et chimiques de la cire de paraffine et induit un décalage fréquentiel. Ce décalage de fréquence réduit les performances de l'étiquette du capteur RFID à une fréquence donnée, comme le montre les résultats présentés en Figure 1-29 c) pour une fréquence de 870 MHz. Ce capteur est appelé capteur de seuil de température, car, la modification des propriétés de la cire de paraffine après exposition à la chaleur est irréversible. Ce type de capteur peut être utilisé, par exemple, pour manipuler des produits thermosensibles.

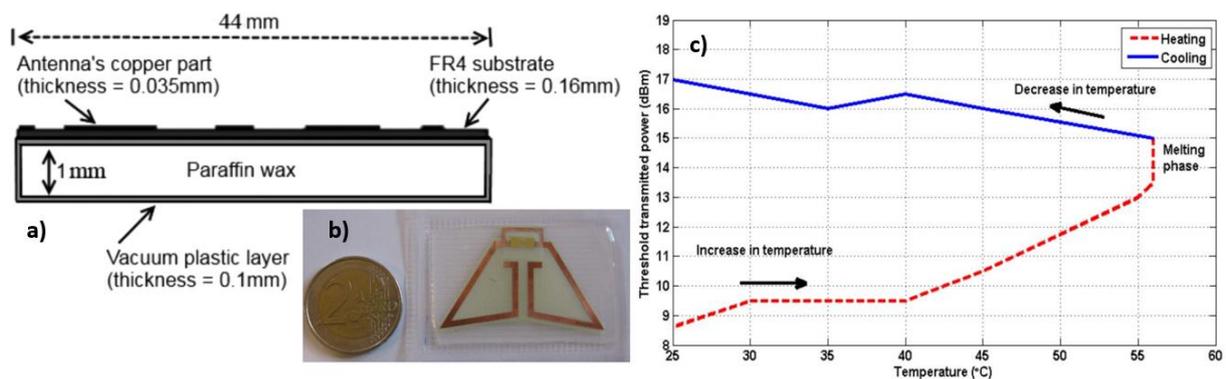


Figure 1-29: Bio-capteur-RFID à détection de seuil : a) vue en coupe du capteur-RFID, b) vue par dessus, c) Effet irréversible du substrat de paraffine : évolution de la puissance minimum d'activation de la puce en fonction de la température [61].

Dans le Tableau 1-11, les matériaux sensibles utilisés en tant que substrat de tag RFID sont classés en fonction de l'application. Par exemple, pour les biocapteurs, les membranes de nitrocellulose ou hydrogel sont utilisées pour leur qualité d'absorption d'un certain composé ciblé. Concernant les applications « typiques » de la RFID comme la détection de température, d'humidité ou de gaz, les substrats utilisés peuvent être composés de PDMS, de cire de paraffine ou encore du papier ou de bois. Quel que soit le type de substrat utilisé, c'est toujours la même méthode de désadaptation d'impédance de l'antenne qui permet de remonter à une information capteur.

Tableau 1-11: Etat de l'art des capteurs-RFID utilisant un substrat sensible comme méthode de détection

| Référence | Elément sensible | Variations exploitées | Substrat, antenne et puce RFID utilisée | Récupération de l'information capteur | Type de capteur |
|-----------|--|---|--|---|-------------------------------------|
| [62] | Membrane de nitrocellulose (papier poreux) | principe de capillarité de la membrane | Antenne : dipôle | puissance rétrodiffusée | détection de l'anémie |
| [63] | Hydrogel : polyvinylalcool / xyloglucan (PVA/XG) | Propriété diélectrique : ϵ_r de 4 à 32 pour 0 à 3 gramme d'eau | résonateur formé d'un microruban et un cercle | puissance minimum d'activation de la puce, puissance rétrodiffusée, distance de lecture | Suivi de plaies |
| [64] | Membrane hydrogel | Permittivité et conductivité | Antenne : boucle inductive, puce : EM4325 | puissance minimum d'activation de la puce, gain réalisé | |
| [65] | Encre d'argent | Propriété diélectrique | Antenne dipôle, substrat en tissu, puce : NXP UCODE | puissance minimum d'activation de la puce, puissance rétrodiffusée | Taux de sueur |
| [61] | Cire de paraffine | Propriété diélectrique et structure moléculaire | Antenne dipole, puce : Higgs 2 | puissance minimum d'activation de la puce, distance de lecture | Température |
| [66] | HDPE-BST | Propriété diélectrique | Antenne "slot loaded patch", puce : Higgs 3 | puissance minimum d'activation de la puce | |
| [67] | PDMS | propriété absorbante du PDMS | Substrat flexible PDMS, antenne "loop end loading" | puissance minimum d'activation de la puce | Oxyde de diéthyle, acétone, méthane |
| [46] | Papier | permittivité relative | Antenne dipole, puce : Higgs 2 | puissance minimum d'activation de la puce, | Taux d'humidité relative |
| [68] | Bois : contreplaqué de bouleau | Propriété absorbante | Antenne dipôle en encre d'argent déposé au pinceau, puce : NXP UCODE | puissance minimum d'activation de la puce | |
| [69] | Fil conducteur cousu sur du tissu | Propriété absorbante | Substrat en tissu, antenne T-match, puce NXP UCODE | puissance minimum d'activation de la puce | |

1.3.3.3 Fonctionnalité capteur basé sur la sensibilité du matériau de l'antenne

Tableau 1-12: Etat de l'art des capteurs-RFID utilisant le matériau composant l'antenne comme élément sensible

| Référence | Elément sensible | Variations exploitées | Substrat et puce RFID utilisée | Récupération de l'information capteur | Type de capteur |
|-----------|---|------------------------------------|--|---|--|
| [47] | Graphene | Conductivité | Substrat en papier ou carton, puce : NXP UCODE | puissance minimum d'activation de la puce, puissance rétrodiffusée, | HR |
| [70] | Nickel-Titanium (Nitinol) | Propriété structurale et mécanique | 2 ports par antenne puce : NXP | Commande numérique (ON/OFF) | Seuil de température |
| [71] | Textile en polyester plaqué cuivre | Elongation | Avec tag référence NXP UCODE | puissance minimum d'activation de la puce | Sensible a une élongation de 30 % |
| [72] | Oxyde de Graphene réduit | Conductivité | Substrat en papier, puce : Higgs 4 | puissance rétrodiffusée | Gaz toxiques |

Aujourd'hui, il existe de nouveaux types de capteurs-RFID, permettant de mesurer une variable environnementale à l'aide du matériau composant l'antenne elle-même (voir Tableau 1-12). C'est donc par interaction entre l'antenne et le milieu dans lequel elle est plongée, qu'est récupérée une information capteur. Les propriétés internes de l'antenne sont influencées par le milieu, par exemple (voir Figure 1-30) la conductivité du Graphene fonction de l'humidité relative [47] ou de gaz toxiques [72].

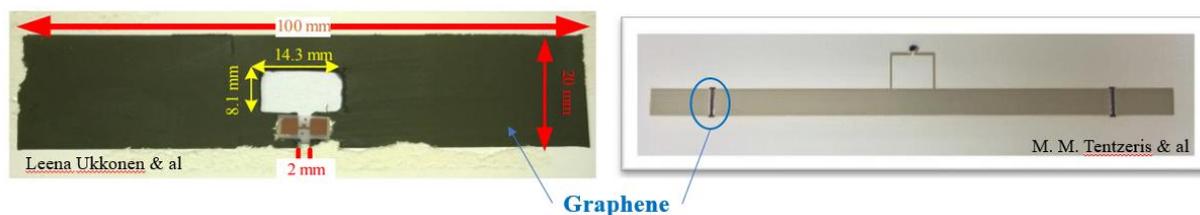


Figure 1-30: Exemple extrait de la littérature de capteur-RFID avec antenne sensible à gauche : antenne complètement en Graphene [47], à droite : antenne composée de fines parties en Graphene [72].

1.3.3.4 Fonctionnalité capteur basé sur le dépôt d'un matériau sensible sur l'antenne

La dernière méthode utilisée dans la littérature pour réaliser un capteur-RFID, est la méthode de fonctionnalisation d'antenne par dépôt. Elle consiste en un dépôt d'un matériau sensible sur l'antenne du tag RFID. Nous avons listé dans le Tableau 1-13 les principales recherches liées au capteur-RFID UHF passif avec fonctionnalisation d'antenne. Plusieurs éléments sensibles sont utilisés:

- Les nanotubes de carbone ou l'oxyde de Graphene pour la détection de gaz.

Le PTFE, le SnBiIn (Cf. Tableau 1-13) pour la température.

- Le polyimide, le PEDOT:PSS pour la détection de l'humidité relative.

Tableau 1-13: Etat de l'art des capteurs-RFID utilisant un dépôt sur l'antenne comme élément sensible

| Référence | Élément sensible | Variations exploitées | Substrat et puce RFID utilisée | Récupération de l'information capteur | Type de capteur |
|-----------|---|---|--|--|---------------------------------|
| [73] | Nanotube de carbone (SWCNT) | propriété diélectrique | Antenne boucle inductive, puce : NXP | puissance minimum d'activation de la puce | Gaz : ammoniac |
| [74] | Nanotube de carbone (CNT) | Conductivité | Antenne boucle, substrat : polymère a cristaux liquide, puce : Monza 3 | Coefficient de réflexion | |
| [48] | Pt-rGO (Platinum decorated reduced graphene oxide) | résistance électrique | Dépôt au dessus de l'antenne après plastification | variation de fréquence de résonance et phase de l'antenne | Gaz : hydrogène |
| [75] | Eau | propriété diélectrique en fonction de la température de l'eau | Antenne patch | Coefficient de réflexion : 4MHz/10 °C et gain réalisé | Température |
| [76] | Eau distillé | propriété diélectrique en fonction de la température de l'eau | substrat FR4, Puce Higgs 3 | puissance minimum d'activation de la puce | |
| [77] | PTFE | large expansion thermique (140 ppm/°C) | dépôt dans une antenne sous forme de cavité scellé à fente | Coefficient de réflexion : 30MHz/10 °C et distance de lecture | |
| [78] | Alliage SnBiIn | Passage de l'état solide à l'état liquide en fonction de la température | Substrat papier ou kapton, puce : Monza 3 | Coefficient de réflexion | |
| [79] | Polyimide (PI-2723) | propriété diélectrique | Antenne du commerce : KSW Microtec | puissance minimum d'activation de la puce | |
| [80] | PEDOT:PSS | Conductivité | substrat téflon, puce NXP UCODE | puissance minimum d'activation de la puce, puissance rétrodiffusée | Taux d'humidité relative |

L'étude [79] utilise une antenne du commerce en forme de dipôle utilisant une adaptation en T-match à méandre, sur laquelle est déposé du polyimide afin de réaliser un capteur RFID d'humidité. À l'aide d'une autre couche de papier absorbant apposée par-dessus (permettant de concentrer l'humidité sur l'antenne) les propriétés diélectriques de la couche sensible varient et influencent ainsi l'antenne du tag RFID. Toujours en utilisant le même principe, une autre étude [76] a permis de réaliser un capteur RFID en utilisant comme élément sensible de l'eau. Les propriétés diélectriques de l'eau varient fortement en fonction de la température, comme le montre les courbes présentées en Figure 1-31 a), ce qui en fait un candidat idéal pour la détection thermique. Les résultats liés à la variation de la puissance minimum d'activation de la puce en fonction de la température sont présentés en Figure 1-31 b).

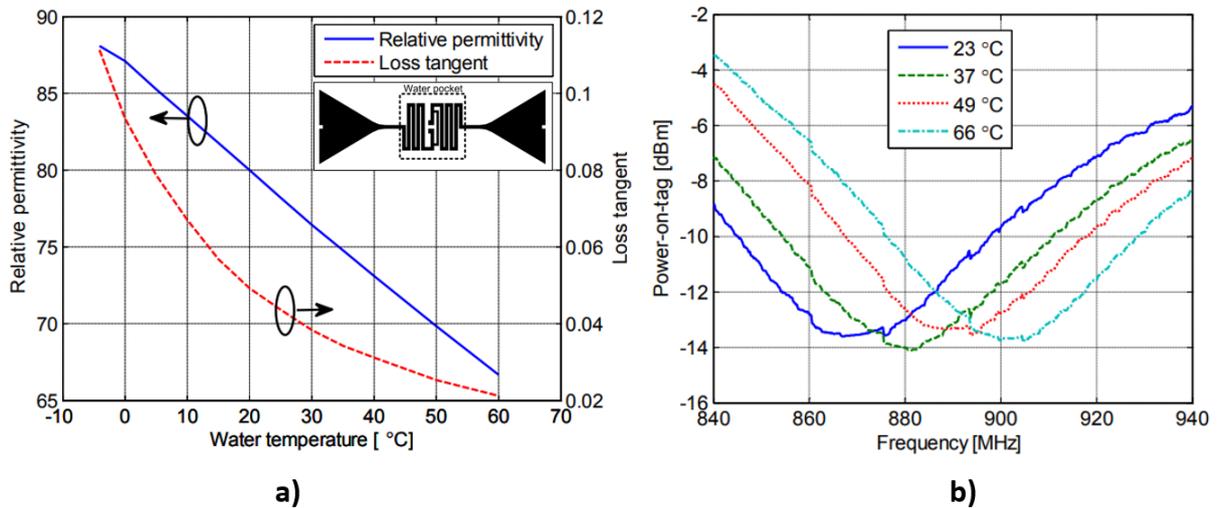


Figure 1-31: Résultats tirés de [76] : a) propriétés électriques de l'eau distillée à 900 MHz b) puissance minimum d'activation du capteur-RFID, mesurées et moyennées pour différentes températures de l'air.

On trouve également dans la littérature une étude [48] qui porte sur la réalisation d'un capteur-RFID d'hydrogène. Ce capteur présenté en Figure 1-32 a) et b) dispose d'une zone sensible basé sur le composé chimique Pt_rGO d'une surface de 3 X 6 mm sur l'antenne.

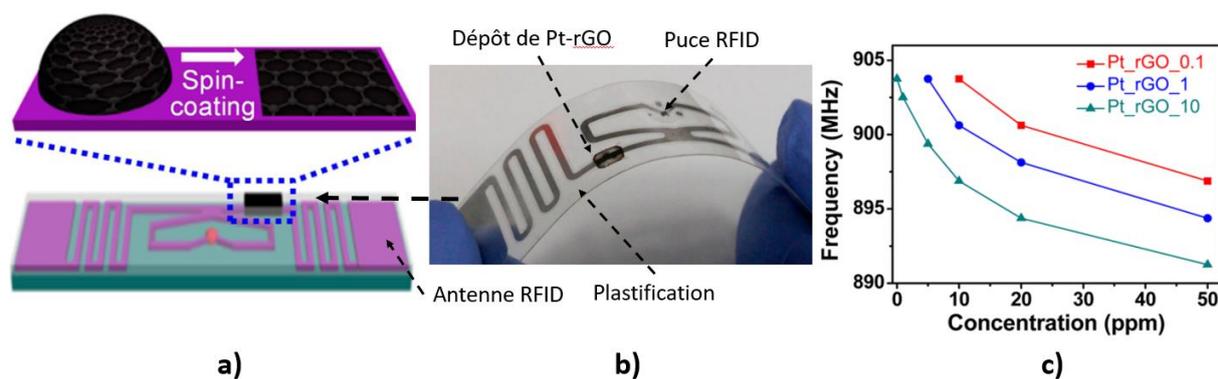


Figure 1-32: Résultats tirés de [48] : a) Diagramme schématique d'une étiquette de capteur d'identification par radiofréquence (RFID) fonctionnalisé par Pt_rGO. b) Photographies du capteur RFID flexible. c) résultats de mesure du capteurs-RFID en fonction de la concentration d'hydrogène.

Le principe de détection de ce capteur-RFID est composé d'une succession de réaction. Lorsque le capteur est exposé à l'hydrogène gazeux, des molécules d'hydrogènes sont adsorbés par les particules de Pt-rGO ce qui a pour effet de modifier leur conductivité. À l'échelle macroscopique la résistivité de l'antenne passe de $3,2 \Omega$ à $16,1 \Omega$ lorsque la

concentration d'hydrogène gazeux passe de 1ppm à 50 ppm. Comme le montre la Figure 1-32 c), la sensibilité du capteur d'hydrogène sans fil augmente avec la concentration, en particules de $PtCl_4$, de la solution aqueuse; Pt_rGO_10 pour 10 mmol ; Pt_rGO_1 pour 1 mmol; $Pt_rGO_0.1$ pour 0.1 mmol.

1.4 Analyse des problématiques et positionnement du sujet de thèse

Comme nous avons pu le remarquer dans les parties précédentes, les dispositifs RFID UHF passif destinés à la détection sont nombreux. Il ressort de cette étude que le choix d'un dispositif par rapport à un autre se fait principalement en fonction de l'application visée. L'objectif de cette thèse est de réaliser un capteur-RFID bas coût destiné au suivi de produit agro-alimentaire à l'aide d'un lecteur RFID du commerce. Pour des raisons de coût, l'utilisation d'un capteur-RFID à communication numérique avec microcontrôleur ou composant externe est non envisageable. L'autre alternative possible fait appel à des puces RFID contenant un capteur en interne ou une interface analogique/numérique pour y connecter un capteur externe. Le principal problème dans ce cas vient du fait que nous sommes limités par le type de capteur proposé et qu'aujourd'hui le choix de puces reste très limité. Le concept de capteur RFID dit « à communication analogique » (avec fonctionnalisation d'antenne) nous paraît être le candidat idéal du fait des performances qu'il propose et surtout concernant le coût qui est bien plus faible comparé au capteur à communication numérique. De plus avec ce type de capteur il est possible, en modifiant l'élément sensible, de modifier l'élément ciblé.

Dans la suite de cette thèse nous avons focalisé nos recherches sur ce type de capteur RFID passif potentiellement très bas coût, et compatible avec l'utilisation de toutes les puces RFID UHF. Parallèlement, des recherches antérieures au sein de l'équipe ont démontrés le potentiel des bio-polymères [81] pour la détection de paramètres physiques variés. Nous nous sommes donc positionnés sur l'utilisation de ces bio-polymères dans le but de les utiliser en tant qu'élément de fonctionnalisation, permettant principalement la détection de l'humidité relative. Pour atteindre cet objectif spécifique nous avons dressé un dernier tableau comparatif concernant les capteurs-RFID UHF passifs destiné à la détection d'humidité relative. Le Tableau 1-14 rassemble plusieurs de ces dispositifs en comparant les critères de performance telle que la sensibilité, la plage de détection et l'élément sensible utilisé pour la détection. Afin de positionner notre étude nous avons affiché en gras les dispositifs de capteur-RFID fonctionnalisés avec un dépôt sur l'antenne.

Tableau 1-14:Etat de l'art des capteurs-RFID utilisant un dépôt sur l'antenne comme élément sensible axé sur les capteurs d'humidité relative

| références | Sensibilité dB/%HR | | Matériau sensible | Plage de détection | Elément sensible | avec tag référence | commentaire |
|------------|-----------------------|--------------|--|-----------------------|------------------------------|-----------------------|-------------------------------|
| | Bas < 70 | Haut > 70 | | | | | |
| [82] | 0,13 | 0,3 | papier | 50 % HR à 90 % HR | Substrat | Oui | $\Delta = 10$ dB à 90 % HR |
| [83] | WORM 1 bit | | ligne d'encre d'argent déposée sur | 60 % HR 80 % HR | Structure de l'antenne | Oui | $\Delta = 13$ dB à 90 % HR |

| | | | | | | | |
|------|--|-----------------------|----------------------------------|--------------------|------------------------|-----|--|
| | | | du papier photo | | | | |
| [21] | 0,13 | 0,1 | PEDOT:PSS | 50 % HR à 100 % HR | Dépôt sur l'antenne | Non | --- |
| | 0,18 | 0,13 | | | | | |
| [84] | 171 khz/ %RH | | encre de nanoparticules d'argent | 0 à 100 % HR | Structure de l'antenne | Oui | --- |
| [46] | De 3m - sec à 12m - mouillé | | papier | 50 % HR à 100 % HR | Substrat | Non | Détection par changement de polarisation |
| [69] | De 3m - sec (-5bdm) à 7,5m - mouillé - sec à (-13 dbm) | | textile | 50 % HR à 100 % HR | Substrat | Non | --- |
| [85] | 11 à 15 db @ 915 | | liège | 60 % HR à 100 % HR | Substrat | Non | --- |
| [86] | < 60 % HR 0,85°/HR | > 60 % HR 0,4 °/HR | PEDOT:PSS | 40 % HR à 100 % HR | Dépôt sur l'antenne | Non | Détection par variation de phase |
| [87] | 16 dbm = 0 % HR dans le sol - 30 dbm = 20 % HR dans le sol | | Papier | 0 à 20 % HR | Substrat | Non | La détection ce fait à l'aide d'une capacité interdigité connecter sur l'antenne |
| [79] | 1 à 8 gouttes d'eau impliquent 4 à 18 dB de variation | | polyimide PI-2723 | --- | Dépôt sur l'antenne | Non | Utilisation d'une simple antenne du commerce |
| [88] | 0,13 | 0,09 | PEDOT:PSS | 50 % HR à 100 % HR | Dépôt sur l'antenne | Non | --- |
| | | | | | | Non | --- |
| [89] | 0,39 | 0,08 | PEDOT:PSS | 50 % HR à 100 % HR | Dépôt sur l'antenne | Non | --- |
| | | | | | | Non | --- |
| [68] | $\Delta = 6$ dB entre 940 et 970 mhz | | Bois : Contreplaqué de bouleau | 50 % HR à 100 % HR | Substrat | Non | --- |
| [47] | Distance de lecture variable de 2.7m à 3.2 m | | Graphene | 50 % HR à 100 % HR | Structure de l'antenne | Non | --- |

Les problématiques de réalisation de ce type de capteur sont nombreuses, du fait que les paramètres d'influence sont nombreux. Entre un lecteur RFID et un capteur-RFID avec fonctionnalisation, les perturbations peuvent provenir du canal de communication et de l'environnement proche du capteur-RFID. Étant donné que ce type de capteur utilise la désadaptation d'impédance comme technique de détection de variation, il est très facile de fausser la mesure. Par exemple dans le cas d'une lecture en dynamique, le mouvement du lecteur (ou le mouvement du capteur-RFID lui-même) peut être détecté comme variation du paramètre physique. D'autres perturbations peuvent intervenir lors d'une communication, telle qu'un objet métallique proche du capteur qui peut influencer la mesure de manière permanente. C'est pourquoi nous avons défini plusieurs limitations technologiques qui posent le cadre de notre étude :

- **Cahier des charges concernant la réalisation du capteur-RFID**
 - Afin de viser le marché de la grande consommation, le coût du capteur RFID est le premier critère qui influence nos orientations. C'est pourquoi nous nous positionnons sur l'utilisation des capteurs-RFID passif à communication analogique et faisant appel à une puce RFID UHF standard.
 - L'étude principale sera menée sur la conception et la réalisation de l'antenne du capteur-RFID. En effet, l'antenne doit être adaptée à la puce RFID choisie dans certaines conditions environnementales initiales. Les conditions initiales vont être définies par la suite suivant :
 - L'impédance de la puce
 - La fréquence de résonance
 - La quantité et la zone de dépôt du matériau sensible.
 - De plus, l'antenne doit être conçue avec une zone sensible sur laquelle sera fait le dépôt afin d'augmenter la sensibilité du capteur aux variations des paramètres du dépôt. Une étude paramétrique sera détaillée afin de valider la sensibilité de cette zone.
 - Le choix du substrat est à la fois dicté par le coût, et les propriétés diélectriques. En effet il doit être à faibles pertes afin de maximiser l'efficacité de rayonnement de l'antenne.
 - L'encombrement du dispositif est également un critère important. Nous nous limiterons donc au format carte de crédit ($85 \times 55 \text{ cm}^2$).
- **Cahier des charges concernant la lecture à l'aide d'un lecteur du commerce**
 - En présence d'un capteur-RFID à communication analogique l'information capteur se situe dans les paramètres de l'onde électromagnétique rétrodiffusée vers le lecteur. À partir de l'analyse des différentes méthodologies d'extraction du mesurande des capteur-RFID présentés précédemment, il ressort que les trois paramètres les plus utilisés sont : la distance de lecture, la puissance minimum d'activation de la puce RFID et le RSSI. Nous étudierons ces différentes méthodes et tâcherons de les appliquer aux données récoltées à l'aide d'un lecteur RFID UHF du commerce.
 - De cette première phase d'extraction et d'analyse des données, nous étudierons ensuite des méthodes plus avancées afin de s'affranchir des éventuelles perturbations liées au canal de communication.

1.5 Conclusion

Nous avons introduit dans ce chapitre le fonctionnement général de la technologie RFID. Ensuite, nous avons fait un état d'avancement technologique des capteur-RFID existant, d'un point de vue commercial et académique. Cette étude nous a permis de tracer un cadre à suivre pour mener à terme l'objectif de cette thèse. Le point central est de réaliser une antenne RFID fonctionnalisée et optimisée pour des critères de performances bien définies. Dans le chapitre suivant nous allons détailler le fonctionnement de l'antenne simulée (sous le logiciel de modélisation EM CST) et réalisée. Nous discuterons en détail de la zone sur laquelle se fera le dépôt du matériau sensible. Pour cela nous avons mis en place deux bancs de mesure : le premier nous permet de valider le fonctionnement de l'antenne en condition initiale, le second nous permet de valider le fonctionnement du Capteur-RFID en environnement contrôlé.

1.6 Références

- [1] A. McEwen et H. Cassimally, *Designing the Internet of things*, Reprinted with corrections. Chichester: Wiley, 2014.
- [2] « An Introduction to the Serial Shipping Container Code (SSCC) », p. 10, 2017.
- [3] admin, « GS1 barcodes », 14-janv-2015. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.gs1.org/standards/barcodes>.
- [4] « Facts & Figures ». [En ligne]. Disponible sur: <http://www.eurosmart.com/facts-figures.html>.
- [5] S. A. Ahson et M. Ilyas, *Near Field Communications Handbook*. CRC Press, 2011.
- [6] « RFID Forecasts, Players and Opportunities 2017-2027 », *IDTechEx*, 18-juill-2017. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.idtechex.com/research/reports/rfid-forecasts-players-and-opportunities-2017-2027-000546.asp>.
- [7] D. M. Dobkin, *The RF in RFID: passive UHF RFID in practice*. Amsterdam ; Boston: Elsevier / Newnes, 2008.
- [8] K. Finkenzeller, « RFID Handbook: Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards, Radio Frequency Identification and Near-Field Communication, Third Edition », p. 480.
- [9] A. Rida, L. Yang, et M. M. Tentzeris, *RFID-enabled sensor design and applications*. Boston: Artech House, 2010.
- [10] « SL3ICS1002/1202 UCODE G2XM and G2XL », vol. 2013, p. 48, 2013.
- [11] « RFID: A Guide to Radio Frequency Identification », *Wiley.com*. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.wiley.com/en-fr/RFID%3A+A+Guide+to+Radio+Frequency+Identification-p-9780470107645>.
- [12] K. Finkenzeller, « RFID Handbook: Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards, Radio Frequency Identification and Near-Field Communication, Third Edition », p. 480.
- [13] « GS1 - Bienvenue chez GS1 France ». [En ligne]. Disponible sur: <https://www.gs1.fr/>.
- [14] « GS1 - ProxiProduit, le service d'informations pro ». [En ligne]. Disponible sur: <https://www.gs1.fr/Institutionnel/Communiqués-de-presse/ProxiProduit-le-service-d-informations-produit-de-reference>.
- [15] healthcareisi, « Unique Health Identifiers - Siobhain Duggan », 05:42:21 UTC.
- [16] « Conformance Requirements », p. 96, 2015.
- [17] david.buckley, « Tag Data Standard », 05-oct-2017. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.gs1.org/standards/epcrfid-epcis-id-keys/epc-rfid-tds/1-11>.
- [18] diamondbybold-admin, « Interoperability of GS1 Barcodes, EPCIS & RFID », 12-déc-2016. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.gs1.org/standards/bc-epc-interop>.
- [19] « RAIN RFID », *RAIN RFID*. [En ligne]. Disponible sur: <https://rainrfid.org/>.
- [20] « RFID Sensors 2018-2028: Forecasts, Players, Opportunities », *IDTechEx*, 15-sept-2017. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.idtechex.com/research/reports/rfid-sensors-2018-2028-forecasts-players-opportunities-000556.asp>.
- [21] S. Manzari, C. Occhiuzzi, S. Nawale, A. Catini, C. D. Natale, et G. Marrocco, « Humidity Sensing by Polymer-Loaded UHF RFID Antennas », *IEEE Sens. J.*, vol. 12, n° 9, p. 2851- 2858, sept. 2012.
- [22] M. C. Caccami, C. Miozzi, M. Y. S. Mulla, C. D. Natale, et G. Marrocco, « An epidermal graphene oxide-based RFID sensor for the wireless analysis of human breath », in *2017 IEEE International Conference on RFID Technology Application (RFID-TA)*, 2017, p. 191- 195.
- [23] « Decathlon Sees Sales Rise and Shrinkage Drop, Aided by RFID - 2015-12-07 - Page 1 - RFID Journal ». [En ligne]. Disponible sur: <http://www.rfidjournal.com/articles/view?13815>.

- [24] J. Gao, *Antenna-based passive UHF RFID sensor tags Design and application*. Sundsvall: Mid Sweden University, 2013.
- [25] J. F. Salmerón, A. Rivadeneyra, F. Martínez Martí, L. F. Capitan-Vallvey, A. Palma, et M. Carvajal, « Passive UHF RFID tag with multiple sensing capabilities », *Sensors*, vol. 15, p. 26769- 26782, oct. 2015.
- [26] D. Jayawardana, S. Kharkovsky, R. Liyanapathirana, et X. Zhu, « Measurement System With Accelerometer Integrated RFID Tag for Infrastructure Health Monitoring », *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 65, n° 5, p. 1163- 1171, mai 2016.
- [27] A. Falco, J. F. Salmerón, F. Loghin, P. Lugli, et A. Rivadeneyra, « Fully Printed Flexible Single-Chip RFID Tag with Light Detection Capabilities », *Sensors*, vol. 17, p. 534, mars 2017.
- [28] « EPC sensor tag and data logger IC - ams SL900A - ams ». [En ligne]. Disponible sur: <https://ams.com/sl900a>.
- [29] « EM4325 | EM Microelectronic ». [En ligne]. Disponible sur: <http://www.emmicroelectronic.com/products/rf-identification-security/epc-and-uhf-ics/em4325>.
- [30] « Magnus® S Product Family », *RFMicron*. .
- [31] « ASICS › Productivity Engineering ». .
- [32] V. D. 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)*, 2017, p. 54- 60.
- [33] S. Milici, S. Amendola, A. Bianco, et G. Marrocco, « Epidermal RFID passive sensor for body temperature measurements », in *2014 IEEE RFID Technology and Applications Conference (RFID-TA)*, 2014, p. 140- 144.
- [34] I. Jauregi *et al.*, « UHF RFID Temperature Sensor Assisted With Body-Heat Dissipation Energy Harvesting », *IEEE Sens. J.*, vol. 17, n° 5, p. 1471- 1478, mars 2017.
- [35] A. E. Abdulhadi et R. Abhari, « Multiport UHF RFID-Tag Antenna for Enhanced Energy Harvesting of Self-Powered Wireless Sensors », *IEEE Trans. Ind. Inform.*, vol. 12, n° 2, p. 801- 808, avr. 2016.
- [36] M. M. Tentzeris, « Novel paper-based inkjet-printed antennas and wireless sensor modules », in *2008 IEEE International Conference on Microwaves, Communications, Antennas and Electronic Systems*, 2008, p. 1- 8.
- [37] P. Escobedo, A. Martínez Olmos, M. Carvajal, A. Palma, et J. F. Salmerón, « Passive UHF RFID tag for spectral fingerprint measurement », 2015, p. 1- 4.
- [38] J. Fernandez Salmeron *et al.*, « Design and Development of Sensing RFID Tags on Flexible Foil Compatible With EPC Gen 2 », *IEEE Sens. J.*, vol. 14, n° 12, p. 4361- 4371, déc. 2014.
- [39] J. F. Salmerón *et al.*, « Design and Development of Sensing RFID Tags on Flexible Foil Compatible With EPC Gen 2 », *IEEE Sens. J.*, vol. 14, n° 12, p. 4361- 4371, déc. 2014.
- [40] R. V. Aroca, R. S. Inoue, L. M. Pedro, G. A. P. Caurin, et D. V. Magalhaes, « Towards a battery-free wireless smart glove for rehabilitation applications based on RFID », in *2015 IEEE Brasil RFID*, 2015, p. 1- 5.
- [41] 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)*, 2015, p. 1- 1.
- [42] N. S. S. M. 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)*, 2017, p. 1- 4.
- [43] J. F. Salmerón *et al.*, « Printed single-chip UHF passive radio frequency identification tags with sensing capability », *Sens. Actuators Phys.*, vol. 220, p. 281- 289, déc. 2014.
- [44] G. A. Vera, A. Abdelnour, M. Sarkis, A. Georgiadis, D. Kaddour, et S. Tedjini, « Passive RFID-enabled proximity sensor », in *2016 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS)*, 2016, p. 1- 3.

- [45] R. V. Aroca, A. C. Hernandez, D. V. Magalhães, M. Becker, C. M. P. Vaz, et A. G. Calbo, « Application of Standard EPC/GEN2 UHF RFID Tags as Soil Moisture Sensors », *Proceedings*, vol. 1, n° 2, p. 10, nov. 2016.
- [46] S. Sajal, Y. Atanasov, B. D. Braaten, V. Marinov, et O. Swenson, « A low cost flexible passive UHF RFID tag for sensing moisture based on antenna polarization », in *IEEE International Conference on Electro/Information Technology*, 2014, p. 542- 545.
- [47] M. Akbari, J. Virkki, L. Sydänheimo, et L. Ukkonen, « The possibilities of graphene-based passive RFID tags in high humidity conditions », in *2016 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI)*, 2016, p. 1269- 1270.
- [48] J. S. Lee, J. Oh, J. Jun, et J. Jang, « Wireless Hydrogen Smart Sensor Based on Pt/Graphene-Immobilized Radio-Frequency Identification Tag », *ACS Nano*, vol. 9, n° 8, p. 7783- 7790, août 2015.
- [49] Y. Álvarez López, M. E. de Cos Gómez, et F. Las-Heras Andrés, « A received signal strength RFID-based indoor location system », *Sens. Actuators Phys.*, vol. 255, p. 118- 133, mars 2017.
- [50] S. Park et S. Hashimoto, « An intelligent localization algorithm using read time of RFID system », *Adv. Eng. Inform.*, vol. 24, n° 4, p. 490- 497, nov. 2010.
- [51] D. A. Tesch, E. L. Berz, et F. P. Hessel, « RFID indoor localization based on Doppler effect », in *Sixteenth International Symposium on Quality Electronic Design*, 2015, p. 556- 560.
- [52] E. DiGiampaolo et F. Martinelli, « Mobile Robot Localization Using the Phase of Passive UHF RFID Signals », *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 61, n° 1, p. 365- 376, janv. 2014.
- [53] A. Koch et A. Zell, « Mapping of passive UHF RFID tags with a mobile robot using outlier detection and negative information », in *2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2014, p. 1619- 1624.
- [54] R. Liu, G. Huski, et A. Zell, « Dynamic objects tracking with a mobile robot using passive UHF RFID tags », in *2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2014, p. 4247- 4252.
- [55] T. Deyle, C. J. Tralie, M. S. Reynolds, et C. C. Kemp, « In-hand radio frequency identification (RFID) for robotic manipulation », in *2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2013, p. 1234- 1241.
- [56] S. Amendola, L. Bianchi, et G. Marrocco, « Combined passive radiofrequency identification and machine learning technique to recognize human motion », in *2014 44th European Microwave Conference*, 2014, p. 1044- 1047.
- [57] A. Atojoko, R. A. Abd-Alhameed, Y. Tu, F. Elmegri, C. H. See, et M. B. Child, « Automatic liquid level indication and control using passive UHF RFID tags », in *2014 Loughborough Antennas and Propagation Conference (LAPC)*, 2014, p. 136- 140.
- [58] « IDSense: A Human Object Interaction Detection System Based on Passive UHF RFID », *Disney Research*. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.disneyresearch.com/publication/idsense-a-human-object-interaction-detection-system-based-on-passive-uhf-rfid/>.
- [59] J. Neuhaeuser, S. Gaensler, J. F. Kreutzer, S. M. F. Reimer, T. C. Lueth, et L. T. 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)*, 2014, p. 1856- 1861.
- [60] C. Occhiuzzi, C. Vallese, S. Amendola, S. Manzari, et G. Marrocco, « NIGHT-Care: A Passive RFID System for Remote Monitoring and Control of Overnight Living Environment », *Procedia Comput. Sci.*, vol. 32, p. 190- 197, janv. 2014.
- [61] A. A. Babar, S. Manzari, L. Sydänheimo, A. Z. Elsherbeni, et L. Ukkonen, « Passive UHF RFID Tag for Heat Sensing Applications », *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 60, n° 9, p. 4056- 4064, sept. 2012.

- [62] 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)*, 2015, p. 189- 196.
- [63] S. Amendola, C. Occhiuzzi, A. Ajovalasit, M. A. Sabatino, C. Dispenza, et G. Marrocco, « Dielectric characterization of biocompatible hydrogels for application to Epidermal RFID devices », in *2015 European Microwave Conference (EuMC)*, 2015, p. 379- 382.
- [64] 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)*, 2015, p. 182- 188.
- [65] S. Merilampi, H. He, L. Sydänheimo, L. Ukkonen, et J. Virkki, « The possibilities of passive UHF RFID textile tags as comfortable wearable sweat rate sensors », in *2016 Progress in Electromagnetic Research Symposium (PIERS)*, 2016, p. 3984- 3987.
- [66] Q. Qiao, L. Zhang, F. Yang, Z. Yue, et A. Z. Elsherbeni, « Reconfigurable Sensing Antenna With Novel HDPE-BST Material for Temperature Monitoring », *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 12, p. 1420- 1423, 2013.
- [67] 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.
- [68] E. Sipilä, J. Virkki, L. Sydänheimo, et L. Ukkonen, « Experimental Study on Brush-Painted Passive RFID-Based Humidity Sensors Embedded into Plywood Structures », *Int. J. Antennas Propag.*, vol. 2016, p. 1- 8, janv. 2016.
- [69] 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)*, 2017, p. 1- 5.
- [70] S. Caizzone, C. Occhiuzzi, et G. Marrocco, « Multi-Chip RFID Antenna Integrating Shape-Memory Alloys for Detection of Thermal Thresholds », *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 59, n° 7, p. 2488- 2494, juill. 2011.
- [71] X. Chen, L. Ukkonen, et T. Björninen, « Passive E-Textile UHF RFID-Based Wireless Strain Sensors With Integrated References », *IEEE Sens. J.*, vol. 16, n° 22, p. 7835- 7836, nov. 2016.
- [72] T. Le, Z. Lin, C. P. Wong, et M. Tentzeris, « Enhanced-performance wireless conformal “smart skins” utilizing inkjet-printed carbon-nanostructures », in *Proceedings - Electronic Components and Technology Conference*, 2014, p. 769- 774.
- [73] C. Occhiuzzi, A. Rida, G. Marrocco, et M. M. Tentzeris, « CNT-based RFID passive gas sensor », in *2011 IEEE MTT-S International Microwave Symposium*, 2011, p. 1- 4.
- [74] I. Gammoudi, B. Aïssa, M. Nedil, et M. M. Abdallah, « CNT-RFID passive tag antenna for gas sensing in underground mine », 2015.
- [75] Q. Qiao, F. Yang, et A. Z. Elsherbeni, « Read range and sensitivity study of RFID temperature sensors », in *Proceedings of the 2012 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation*, 2012, p. 1- 2.
- [76] J. Virtanen, L. Ukkonen, T. Björninen, L. Sydänheimo, et A. Z. Elsherbeni, « Temperature sensor tag for passive UHF RFID systems », in *2011 IEEE Sensors Applications Symposium*, 2011, p. 312- 317.
- [77] Q. Qiao, L. Zhang, F. Yang, Z. Yue, et A. Z. Elsherbeni, « A high sensitivity capacitively-loaded UHF RFID temperature sensor tag using PTFE material », in *2014 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI)*, 2014, p. 1310- 1311.
- [78] K. Janeczek, M. Jakubowska, G. Koziol, et P. Jankowski-Mihulowicz, « Passive UHF RFID-Enabled Sensor System For Detection Of Product'S Exposure To Elevated Temperature », *Metrol. Meas. Syst.*, vol. XX, p. 591- 600, déc. 2013.
- [79] 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*, 2008, vol. 2, p. 496- 499.
- [80] S. Manzari, C. Occhiuzzi, S. Nawale, A. Catini, C. D. Natale, et G. Marrocco, « UHF RFID humidity sensor tag based on hygroscopic polymeric load », in *2012 6th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)*, 2012, p. 3030- 3033.
- [81] F. Bibi, *Etude des propriétés diélectriques à haute fréquence d'un polymère végétal : le gluten de blé, et utilisation comme biocapteur de marqueurs environnementaux de la qualité des aliments dans des systèmes RFID passifs*. Montpellier, 2015.
- [82] J. Sidén, J. Gao, et B. Neubauer, « Microstrip antennas for remote moisture sensing using passive RFID », in *2009 Asia Pacific Microwave Conference*, 2009, p. 2375- 2378.
- [83] J. Gao, J. Siden, et H. E. Nilsson, « Printed Electromagnetic Coupler With an Embedded Moisture Sensor for Ordinary Passive RFID Tags », *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 32, n° 12, p. 1767- 1769, déc. 2011.
- [84] J. Virtanen, L. Ukkonen, T. Bjorninen, A. Z. Elsherbeni, et L. Sydänheimo, « Inkjet-Printed Humidity Sensor for Passive UHF RFID Systems », *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 60, n° 8, p. 2768- 2777, août 2011.
- [85] R. Gonçalves, P. Pinho, N. B. Carvalho, et M. M. Tentzeris, « Humidity passive sensors based on UHF RFID using cork dielectric slabs », in *2015 9th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, 2015, p. 1- 4.
- [86] M. C. Caccami, S. Manzari, et G. Marrocco, « Phase-oriented chemical sensing by passive UHF-RFID », in *2014 XXXIth URSI General Assembly and Scientific Symposium (URSI GASS)*, 2014, p. 1- 4.
- [87] 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 *IEEE SENSORS 2014 Proceedings*, 2014, p. 1507- 1510.
- [88] S. Manzari, A. Catini, G. Pomarico, C. D. Natale, et G. Marrocco, « Development of an UHF RFID Chemical Sensor Array for Battery-Less Ambient Sensing », *IEEE Sens. J.*, vol. 14, n° 10, p. 3616- 3623, oct. 2014.
- [89] S. Manzari et G. Marrocco, « Modeling and Applications of a Chemical-Loaded UHF RFID Sensing Antenna With Tuning Capability », *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 62, n° 1, p. 94- 101, janv. 2014.

Chapitre 2

Design, conception et caractérisation du Capteurs-RFID UHF passif

Sommaire

| | | |
|-------------------|--|-----------|
| Chapitre 2 | <i>Design, conception et caractérisation du Capteurs-RFID UHF passif</i> | 54 |
| 2.1 | Stratégie de conception | 56 |
| 2.2 | Notions Fondamentales | 57 |
| 2.2.1 | Éléments de Théorie des antennes RFID | 57 |
| 2.2.1.1 | Notion d'Adaptation/ Désadaptation d'impédance | 57 |
| 2.2.1.2 | Notion de coefficient de Réflexion et de Transmission | 58 |
| 2.2.1.3 | Notions de Gain et de directivité d'une antenne dipôle | 59 |
| 2.2.1.4 | Notion de Polarisation | 59 |
| 2.2.1.5 | Qu'est-ce que la distance théorique de lecture | 60 |
| 2.2.2 | Notion de permittivité diélectriques | 62 |
| 2.2.2.1 | Expérience de Faraday | 62 |
| 2.2.2.2 | Polarisation | 63 |
| 2.2.2.3 | Permittivité complexe | 65 |
| 2.2.2.4 | Choix d'un bio-polymère comme matériau sensible | 67 |
| 2.3 | Design, optimisation et simulation | 68 |
| 2.3.1 | Outils de simulation : CST Microwaves Studio | 69 |
| 2.3.2 | Présentation du design de l'antenne | 71 |
| 2.3.3 | Étude paramétrique et optimisation de l'antenne capteur-RFID | 72 |
| 2.3.3.1 | Étude paramétrique de la zone de dépôt | 72 |
| 2.3.3.2 | Dépôt du matériau sensible | 77 |
| 2.3.3.3 | Repliement de l'antenne dipôle | 79 |
| 2.3.3.4 | Caractéristiques de simulations de l'antenne du capteur-RFID aux dimensions optimales | 79 |
| 2.3.3.5 | Effet des variations de l'humidité relative sur les caractéristiques de simulations de l'antenne du capteur-RFID | 82 |
| 2.4 | Caractérisation & Validation | 84 |
| 2.4.1 | Méthodologies de caractérisation et d'étalonnages de l'antenne réalisée | 84 |
| 2.4.2 | Caractérisation et validation de l'antenne du capteur-RFID | 85 |
| 2.4.2.1 | Caractérisation de l'antenne au VNA (Étape 1) | 86 |
| 2.4.2.2 | Impact de l'environnement proche du capteur-RFID (Étape 2) | 87 |
| 2.4.2.3 | Impact du dépôt du gluten de blé (Étape 3) | 88 |
| 2.4.2.4 | Caractérisation du tag en chambre anéchoïque (Étape 4) | 88 |
| 2.5 | Conclusion | 90 |
| 2.6 | Références | 91 |

2.1 Stratégie de conception

Dans le chapitre précédent, nous avons défini ce qu'est un capteur-RFID et nous avons présenté les différentes façons de le faire et de l'utiliser. Puis l'objectif de ce travail de thèse a été présenté, en précisant notamment que l'effort principal se porterait d'une part sur la réalisation d'un capteur-RFID UHF passif, et d'autre part sur les moyens nécessaires pour obtenir une lecture fiable de l'information. Pour y parvenir, la stratégie de conception s'est basée sur l'exploitation de la variation de l'impédance de l'antenne du tag RFID au travers d'une fonctionnalisation et/ou d'une modification structurelle de celle-ci.

Pour comprendre, la figure 2-1 donne la schématisation d'un capteur-RFID UHF passif tel qu'il a été travaillé. Ce dernier est constitué d'une puce RFID et d'une antenne RF dont les parties colorisées en bleues symbolisent la fonctionnalisation à partir d'un dépôt de matériau sensible représentant la partie capteur. Dans le cas présent, la grandeur physique à mesurer est la variation d'humidité. Lorsque celle-ci évolue, cela entraîne une variation des propriétés diélectriques du matériau utilisé comme capteur, ce qui engendre une répercussion directe sur la réponse électromagnétique du capteur-RFID. Plus précisément, c'est la fréquence de résonance de l'antenne du capteur qui sera directement impactée. A cette fréquence, le maximum d'énergie est transféré de l'antenne à la puce. Comme on peut le voir sur les courbes à droite de la figure, la fréquence de résonance diminue lorsque l'humidité augmente.

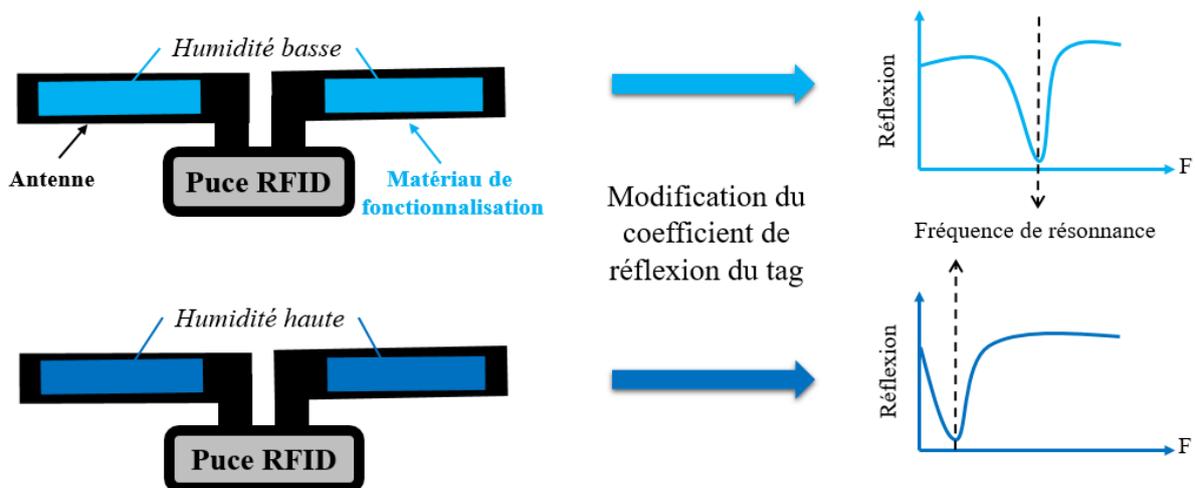


Figure 2-1: Stratégie de détection par fonctionnalisation d'antenne du capteur-RFID UHF passif

Nous allons donc dans une première partie présenter des notions fondamentales permettant de comprendre notre démarche. Tout d'abord, en exposant la théorie liée à l'adaptation/désadaptation de notre antenne RFID. Puis, nous traiterons l'utilisation de matériaux diélectriques en tant qu'élément fonctionnalisant de notre capteur-RFID. Enfin, nous argumenterons sur notre choix du gluten de blé comme diélectrique.

Par la suite, la deuxième partie, traitera des résultats de simulations qui ont permis de valider ce principe de détection. Nous apporterons également des précisions sur le design de l'antenne réalisée en prenant en compte l'effet du matériau sensible. Enfin, la troisième partie abordera la mise en œuvre du capteur-RFID, dans laquelle nous avons validé la réalisation du capteur-RFID à l'aide de banc de mesures.

2.2 Notions Fondamentales

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

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

2.2.1 Éléments de Théorie des antennes RFID

2.2.1.1 Notion d'Adaptation/ Désadaptation d'impédance

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

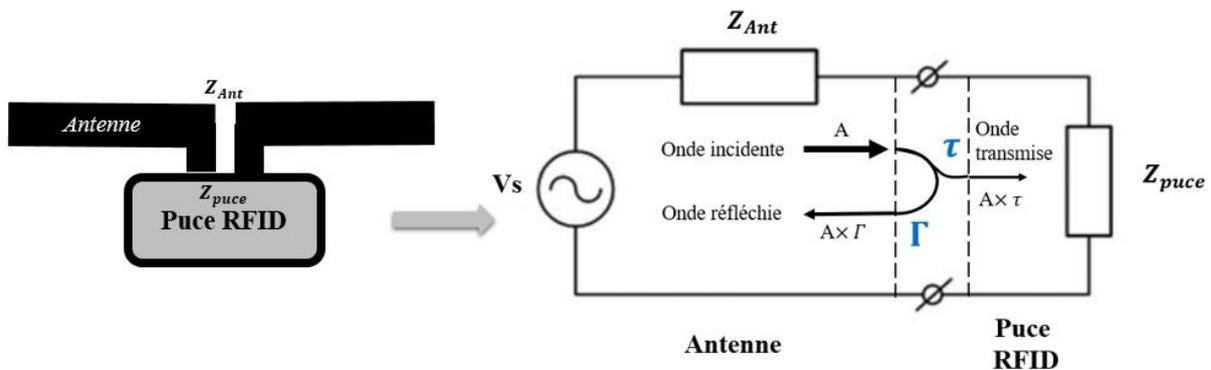


Figure 2-2: Circuit électrique équivalent d'un tag RFID UHF passif [1]

Le circuit équivalent de la charge de l'antenne, est donné **Figure 2-2**. Avec, V_s qui représente la tension alternative aux bornes de l'antenne, induite par l'onde électromagnétique (EM) provenant du lecteur (notée A sur la **Figure 2-2**). Z_{ant} (équation 2.1) représente l'impédance complexe de l'antenne. [Avec : $R_{ant} = R_{rayonnement} + R_{pertes}$], La résistance de charge R_{pertes} est utilisée pour représenter les pertes de conduction et de diélectrique associées à la structure de l'antenne, tandis que $R_{rayonnement}$, appelée résistance au rayonnement, est utilisée pour représenter les propriétés de rayonnement de l'antenne [1]. Z_{puce} (équation 2.2) représente l'impédance complexe de la puce RFID.

$$Z_{ant} = R_{ant} + jX_{ant} \quad (2.1)$$

$$Z_{puce} = R_{puce} + jX_{puce} \quad (2.2)$$

L'impédance de la puce RFID est spécifique à la conception du circuit intégré, elle dépend de la fréquence : Et est fournie par les constructeurs [2]. Afin de garantir un transfert de puissance maximal de l'antenne à la charge (puce), l'impédance d'entrée de l'antenne doit être égale à l'impédance complexe conjuguée du circuit intégré dans la fréquence de fonctionnement du tag [1].

$$R_{ant} = R_{puce} \quad \text{et} \quad X_{ant} = -X_{puce} \quad (2.3)$$

L'adaptation d'impédance peut être réalisée à l'aide de composants localisés ou distribués sous forme de circuit d'adaptation dédiée. La plupart des antennes utilisées pour les tags RFID UHF passifs sont basés sur des géométries de type dipôles gravés ou imprimés sur des substrats diélectriques de faible épaisseur. Les géométries variées que l'on peut observer répondent à des contraintes d'encombrement, de coût de fabrication et de garantie de fonctionnement pour un environnement particulier. Des alternatives existent, certains dispositifs utilisent des antennes patch, d'autres des antennes PIFA (en anglais : « Planar Inverted-F Antenna »). Les techniques d'adaptation d'impédance des antennes dipôles, se sont également multipliées avec entre autres, l'utilisation de « T-match », de « T-slot », ou encore de « loop », de « meander » et de « Tip-loading » [3]. Une puce RFID étant un élément non linéaire en puissance, l'adaptation doit être conçue pour un niveau de puissance d'entrée donnée.

2.2.1.2 Notion de coefficient de Réflexion et de Transmission

Le coefficient de Réflexion Γ (voir équation 2.4), illustré en Figure 2-2, est le rapport d'amplitude entre l'onde EM réfléchi en entrée de l'antenne et l'onde EM incidente. Il dépend de l'impédance d'entrée de l'antenne Z_{ant} et de l'impédance caractéristique de la puce RFID Z_{puce} .

$$\Gamma = \frac{Z_{puce} - Z_{ant}}{Z_{puce} + Z_{ant}} \quad (2.4)$$

Si l'adaptation n'est pas assurée, une partie de la puissance est renvoyée vers la source (re-rayonnée par l'antenne), appelée en anglais « mismatch loss » (pertes de désadaptation) [4].

Dans le cas particulier d'un capteur-RFID avec antenne fonctionnalisée, la désadaptation d'impédance subit par l'antenne lorsque la zone capteur de celle-ci est altérée par la variation du paramètre environnemental à détecter, impacte significativement le coefficient de réflexion. C'est donc un paramètre indispensable, et les résultats seront présentés avec celui-ci dans cette thèse.

Le coefficient de Transmission τ (voir Figure 2-2), également très utilisé en RFID, représente la fraction de puissance transmise de l'antenne du tag vers la puce, ou inversement de la puce vers l'antenne pour le re-rayonnement de l'onde, lors de la réponse du tag. Ce coefficient dépend également des impédances de l'antenne et la puce, et s'exprime suivant l'équation [4]:

$$\tau = 1 - |\Gamma^*|^2 = \frac{4R_{puce}R_{ant}}{|Z_{ant} + Z_{puce}|^2} \quad (2.5)$$

Γ^* est appelé coefficient d'adaptation-conjuguée de réflexion, le coefficient $|\Gamma^*|$, traduit l'état de l'adaptation du système.

2.2.1.3 Notions de Gain et de directivité d'une antenne dipôle

De manière générale, la directivité d'une antenne est définie comme étant le rapport de la densité de puissance rayonnée maximale dans une direction donnée divisée par la densité de puissance rayonnée d'une antenne isotrope [5], voir l'illustration en Figure 2-3. Le gain réalisé d'une antenne qui prend en compte tous les éléments de pertes est défini par l'équation (2.6). Ce gain est basé sur la directivité $D(\theta, \varphi)$, le coefficient de transmission τ et l'efficacité de rayonnement e de l'antenne. Il dépend également de l'angle d'ouverture de l'antenne θ et de l'angle de polarisation φ entre l'antenne d'émission et de réception. Dans le cas sans pertes, le rapport de l'efficacité de l'antenne multipliée par le coefficient de transmission est égal à 1, et donc le gain est égal à la directivité.

$$G(\theta, \varphi) = D(\theta, \varphi) \cdot e \cdot \tau \quad (2.6)$$

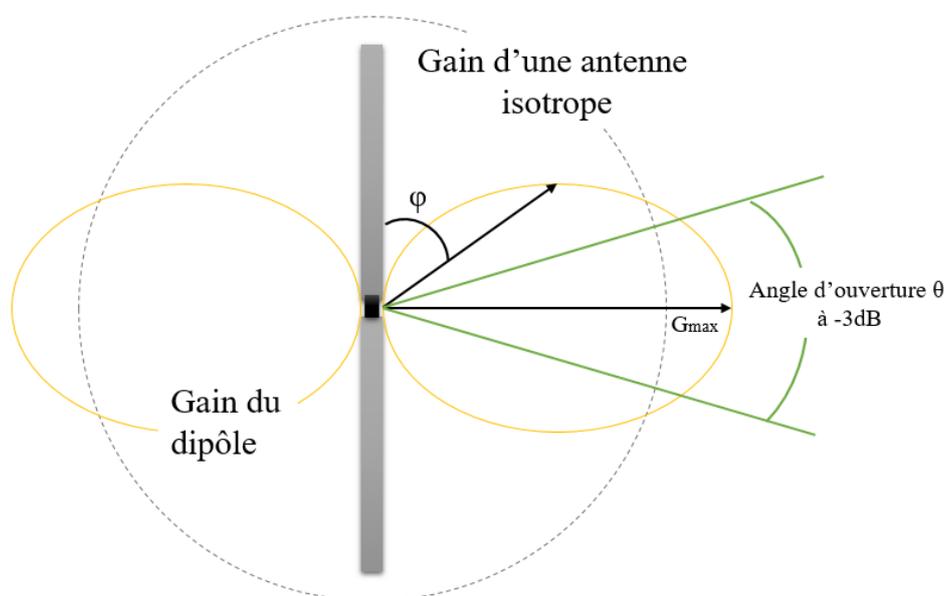


Figure 2-3: Diagramme de rayonnement d'un dipôle comparé à celui d'un dipôle isotrope [5]

2.2.1.4 Notion de Polarisation

La polarisation d'une onde électromagnétique est déterminée par l'orientation du champ électrique de l'onde. Il existe plusieurs types de polarisations dont la polarisation linéaire et la polarisation circulaire. En polarisation linéaire, si les lignes de champ électrique sont parallèles à la surface de la Terre alors la polarisation est dite horizontale, et si les lignes de champ électrique sont perpendiculaires à la surface de la Terre, la polarisation est dite verticale. Ainsi, comme illustrée dans la Figure 2-4 a) et b), l'antenne dipôle est une antenne polarisée linéairement dans laquelle les lignes de champ électrique sont parallèles à l'axe dipolaire. La transmission d'énergie entre deux antennes polarisées linéaires est optimale si les deux antennes ont la même direction de polarisation. D'autre part, la transmission d'énergie est à son point le plus bas lorsque les directions de polarisation des antennes d'émission et de réception sont disposées exactement à 90° ou

270 ° l'une par rapport à l'autre (par exemple une antenne horizontale et une antenne verticale).

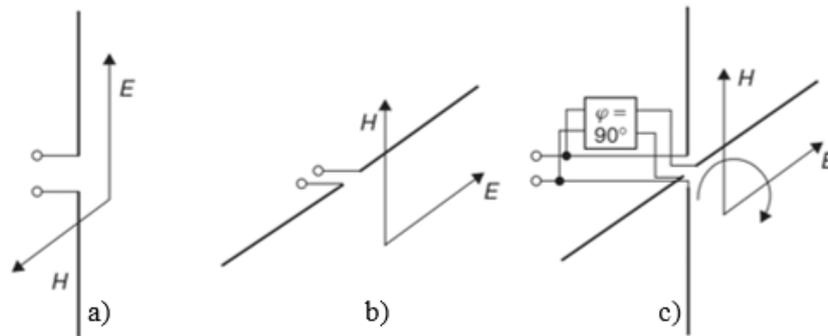


Figure 2-4: Polarisation d'une onde électromagnétique, a) polarisation verticale, b) polarisation horizontale et c) polarisation circulaire [6]

En polarisation circulaire, l'antenne émet un champ EM dont la norme ne varie pas lors d'un mouvement de rotation de l'antenne. Afin de générer une onde à polarisation circulaire, comme illustrée en Figure 2-4 c), il suffit de disposer deux dipôles perpendiculaires, et d'alimenter l'un des deux dipôles via une ligne à retard de 90°. La direction de polarisation du champ électromagnétique résultant tourne sur 360 ° chaque fois que le front d'onde avance d'une longueur d'onde [6].

Dans les systèmes RFID, utilisant principalement des antennes dipôles à polarisation linéaire, il n'y a généralement pas de relation fixe entre la position de l'antenne du tag et celle du lecteur. Plus particulièrement, pour des applications de logistique, cela peut conduire à des fluctuations dans la plage de lecture qui sont à la fois élevées et imprévisibles. Une solution permettant de s'affranchir de ces fluctuations est exposée dans le chapitre 3.

2.2.1.5 Qu'est-ce que la distance théorique de lecture

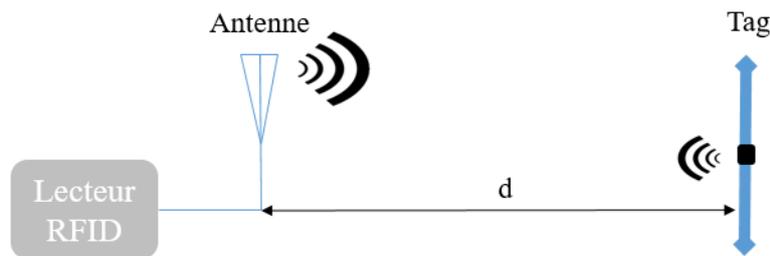


Figure 2-5: Illustration de la distance de lecture entre un lecteur RFID et un tag

La distance de lecture (Figure 2-5) est un paramètre très utilisé en RFID UHF passive, car elle regroupe en une seule formule plusieurs paramètres essentiels des performances du tag et du lecteur. Elle est tirée de l'équation de Friis (2.7) et est souvent mise sous la forme de l'équation (2.8).

$$\frac{P_r}{P_t} = \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 G_t(\theta, \varphi) G_r(\theta, \varphi) \tau \rho \quad (2.7)$$

Avec :

P_t (W) la puissance délivrée à l'antenne d'émission (antenne lecteur)

P_r (W) la puissance collectée sur l'antenne de réception (liée à la sensibilité de la puce RFID utilisée)

G_t est le gain de l'antenne d'émission (antenne lecteur)

G_r est le gain de l'antenne de réception (antenne du tag)

d (m) la distance théorique de lecture

λ (m) longueur d'onde

τ coefficient de transmission

ρ pertes de polarisation

$$d = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{G_t(\theta, \varphi)G_r(\theta, \varphi)(1 - |\Gamma^*|^2)P_t}{P_r}} \quad (2.8)$$

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

- La puissance isotrope rayonnée (PIR) ou *effective isotropically radiated power* (EIRP) en anglais définie par l'équation (2.9). Cette quantité est le produit de la puissance injectée dans l'antenne par le gain de l'antenne (lorsque la puissance et le gain sont en linéaires). Dans le cas d'une antenne hypothétique parfaitement isotrope (gain de 1) la puissance PIR est égale à la puissance injectée dans cette antenne. Le comité FCC impose dans le continent nord-américain une limite de 4W EIRP dans la bande RFID UHF.

$$P_{\text{EIRP}} = G_t \times P_t \quad (2.9)$$

- La puissance apparente rayonnée (PAR) ou *effective radiated power* (ERP) en anglais à une définition proche de la puissance PIR, mais dans ce cas la quantité exprimée correspond à une puissance injectée dans une antenne dipolaire demi-onde idéale (gain de 1.64). Cette quantité est définie par l'équation (2.10). En Europe, le comité ETSI impose une limite de 2W ERP (soit 3.28W EIRP) dans la bande RFID UHF.

$$P_{\text{ERP}} = \frac{G_t}{1.64} \times P_t \quad (2.10)$$

La relation entre la puissance ERP et EIRP est donnée par l'équation (2.11).

$$P_{\text{EIRP}} = 1.64 \times P_{\text{ERP}} \quad (2.11)$$

Dans le cas d'un capteur-RFID, l'environnement impacte plusieurs paramètres de l'antenne du tag dont le gain et le coefficient de transmission. Ceci est d'autant plus vrai pour les capteurs-RFID avec fonctionnalisation de l'antenne (décrit plus bas). Cette fonctionnalisation se fait à l'aide d'un dépôt d'un matériau sensible, dont la permittivité relative varie en fonction du paramètre à détecter. Dans la suite de cette partie, nous allons étudier l'impact de ces variations de permittivité sur les performances de l'antenne du capteur-RFID.

2.2.2 Notion de permittivité diélectriques

Les milieux diélectriques sont des matériaux qui ont la propriété de se polariser sous l'effet d'un champ électrique, ils peuvent également être considérés comme des isolants. Lorsque ces derniers sont parfaits, il n'y a pas de charges libres ou mobiles, mais dans la réalité les diélectriques contiennent un certain nombre de charges libres provenant des impuretés internes. Nous avons illustré certains matériaux en Figure 2-6, en fonction de leurs résistivités [4].

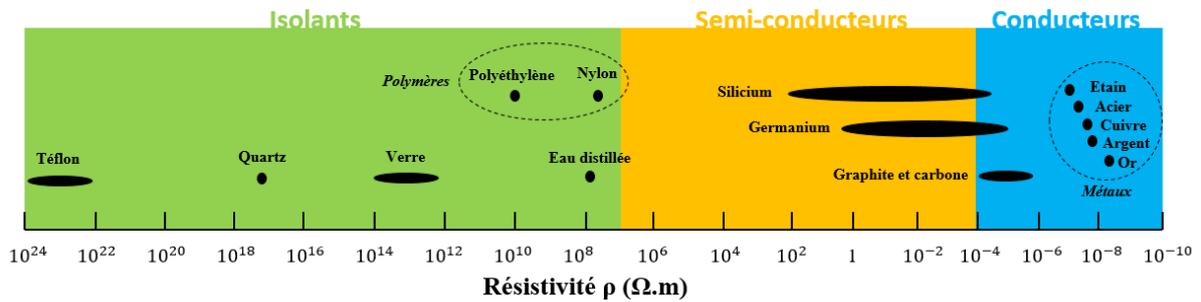


Figure 2-6 : Matériaux en fonction de la résistivité [8]

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

2.2.2.1 Expérience de Faraday

L'expérience de Faraday, permettant de confirmer la propriété de polarisation des diélectriques, elle consiste à introduire une matière diélectrique entre deux armatures d'un condensateur [9], comme illustré Figure 2-7.

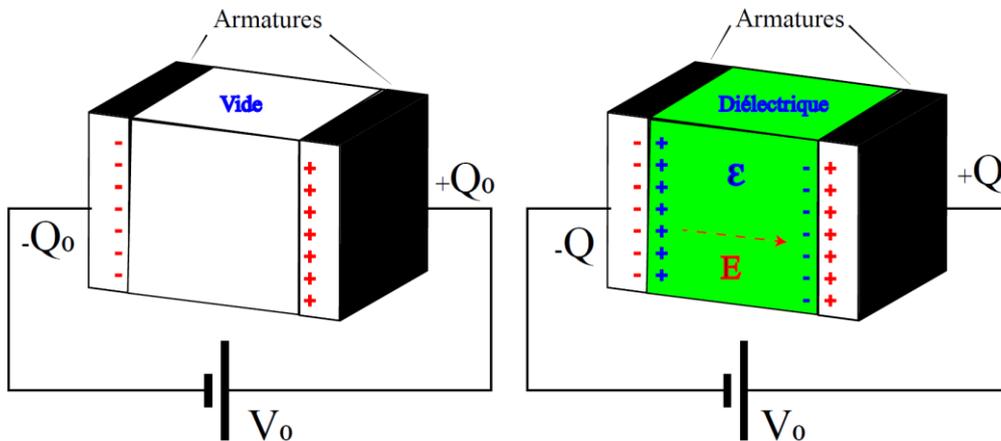


Figure 2-7: Expérience de Faraday : diélectrique entre les armatures d'un condensateur [10]

Ainsi, le condensateur formé avec un diélectrique, et alimenté par une tension constante V_0 , crée un champ électrique \vec{E} dans le matériau. Le champ électrique \vec{E}

appliqué, induit des charges de signes opposées sur les surfaces du diélectrique, appelées charges de polarisation. Il se crée par la suite un équilibre entre les charges produites par l'alimentation (représentées en rouge sur la Figure 2-7) et les charges de polarisation induite (représentées en bleu sur la Figure 2-7). Pour maintenir la tension V_0 constante, le générateur doit fournir plus de charges au niveau des armatures du condensateur avec diélectrique (notées Q) qu'au niveau du condensateur avec air (notées Q_0) :

$$V_0 = cte = \frac{Q_0}{C_0} = \frac{Q}{C} > 1 \rightarrow C > C_0 \quad (2.9)$$

Lors de la comparaison des deux condensateurs, l'un contenant du vide (C_0) et l'autre un diélectrique (C), on constate que la capacité C du condensateur avec diélectrique est augmentée, par un facteur qui dépend du matériau. Le rapport entre ces deux condensateurs est noté ϵ_r et est appelée permittivité relative ou constante diélectrique, et permet de caractériser un diélectrique. Lorsque ce dernier est parfait il est exprimé suivant :

$$\epsilon_r = \frac{C}{C_0} \quad (2.10)$$

La permittivité absolue ϵ est le produit de la permittivité relative ϵ_r par la permittivité du vide ϵ_0 qui vaut $8.85 \cdot 10^{-12} [F \cdot m^{-1}]$.

$$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0 \quad (2.11)$$

L'augmentation de la capacité (à stocker des charges) C du condensateur par introduction d'un diélectrique s'explique par le mécanisme de polarisation du matériau.

2.2.2.2 Polarisation

La polarisation est un paramètre qui quantifie l'effet d'un champ électrique sur le diélectrique. Dans le domaine microscopique, s'il n'y a pas de champ électrique ($\vec{E} = \vec{0}$) appliqué sur un atome ou une molécule, les électrons sont liés au noyau et les barycentres des charges positives q^+ et des charges négatives q^- coïncident (Figure 2-8).

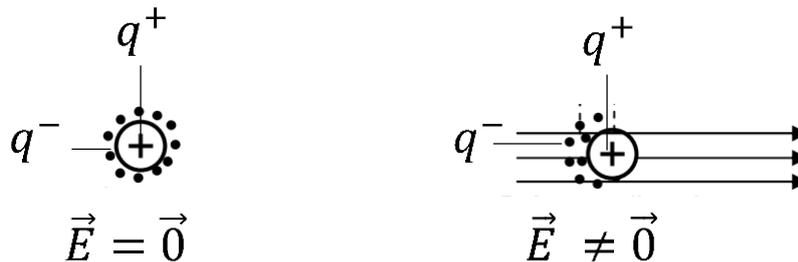


Figure 2-8: Moment dipolaire induit par un champ électrique sur un atome [10]

Maintenant, si un champ électrique ($\vec{E} \neq \vec{0}$) est appliqué sur l'atome, il se « déforme » et des pôles se créent, on a donc des charges positives et négatives qui s'éloignent d'une distance $a = \frac{q^-}{q^+}$. De ce fait, chaque atome (ou molécule) de charge q se comporte comme un dipôle électrique et acquiert un moment dipolaire \vec{p} suivant la loi :

$$\vec{p} = q\vec{a} \quad (2.12)$$

Et donc la polarisation (aussi appelée moment dipolaire par unité de volume) est liée au nombre de molécules par unité de volume par la relation :

$$\vec{P} = N\vec{p} \quad (2.13)$$

Dans le cas d'un diélectrique linéaire, homogène et isotrope, la polarisation \vec{P} est parallèle au champ électrique appliqué \vec{E} et suit l'expression suivante [11]:

$$\vec{P} = \chi\epsilon_0\vec{E} \quad (2.14)$$

Avec χ , la susceptibilité électrique du diélectrique (sans dimension) et ϵ_0 , la permittivité du vide. La polarisation d'un diélectrique est liée à la fréquence d'excitation et peut se produire de plusieurs manières, elles peuvent également coexister ou apparaître séparément. La polarisation d'un matériau est la somme de toutes les polarisations présentes [12] (Voir Figure 2-9).

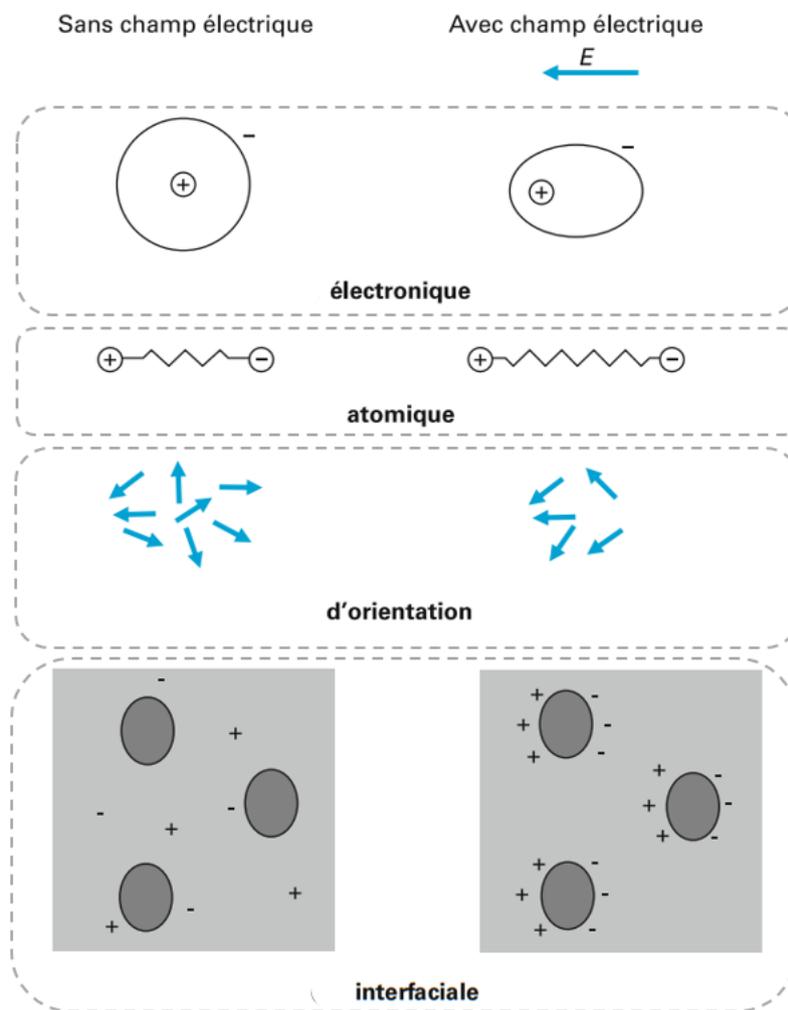


Figure 2-9: Illustration schématique des phénomènes de polarisations [10]

- La Polarisation électronique, intervient lors d'un déplacement de charge ou d'une déformation du nuage électronique. Cette polarisation est présente dans tous les matériaux, pour des fréquences de l'ordre de $10^{15} \sim 10^{18}$ Hz.

- La Polarisation atomique, est présente lors d'un déplacement du noyau à l'intérieur d'une molécule ou d'un déplacement des ions. Cette polarisation se manifeste pour des fréquences de l'ordre de $10^{12} \sim 10^{13}$ Hz.
- La Polarisation d'orientation, est présente dans le cas d'une molécule polaire (moment dipolaire permanent), le champ électrique provoque une orientation des dipôles dans la direction du champ. Du fait de leurs poids et du moment d'inertie, cette polarisation intervient à des fréquences de $10^6 \sim 10^{10}$ Hz.
- La Polarisation inter-faciale, intervient lors du déplacement des charges mobiles qui a pour effet l'accumulation des charges au voisinage des interfaces. Cette polarisation intervient pour des fréquences inférieure à 10^6 Hz.

Pour remonter au lien entre polarisation et permittivité il faut introduire le vecteur d'induction électrique noté \vec{D} , également appelé champ de déplacement électrique. L'induction électrique suit l'équation (2.16) lorsque l'on applique un champ électrique sur une charge placée dans le vide [12].

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} \quad (2.15)$$

Si cette charge se trouve dans un diélectrique il faut tenir compte du phénomène de polarisation d'où :

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P} \quad (2.16)$$

En appliquant la formule (2.15) à cette dernière (2.17), on obtient l'expression de la constante diélectrique :

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P} = \epsilon_0 (1 + \chi) \vec{E} = \epsilon_0 \epsilon_r \vec{E} = \epsilon \vec{E} \quad (2.17)$$

Avec $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$, la constante diélectrique absolu, et $\epsilon_r = (1 + \chi)$ la permittivité relative par rapport au vide.

Voici quelques valeurs de permittivité relative pour des matériaux basiques (testé à 2.5 GHz [13]):

- ϵ_r (verre) = 4 à 5 ;
- ϵ_r (eau) = 77 à 85, en fonction de la salinité de l'eau ;
- ϵ_r (carton) = 4 ;
- ϵ_r (teflon) = 2.

2.2.2.3 Permittivité complexe

La permittivité complexe d'un matériau peut être mise sous la forme :

$$\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (2.18)$$

Mise sous cette forme, on met en évidence le déphasage entre le champ électrique appliqué \vec{E} et l'induction électrique \vec{D} , lié à des freinages de l'orientation des dipôles (charges) sous l'action du champ électrique. En effet, pour un système réel, avec un diélectrique non parfait, la polarisation ne suit pas le champ d'une façon instantanée. Cette « relaxation » diélectrique induit une perte d'énergie. La notion de permittivité complexe permet de différencier entre la résistance réelle du matériau et la dissipation énergétique due à la somme des polarisations présente dans le matériau. Les variations de ϵ' et ϵ'' en

fonction de la fréquence caractérisent un matériau et son comportement comme illustré Figure 2-10. La partie réelle ϵ' est la permittivité relative à une fréquence et une température données ; ϵ'' est appelé indice de pertes, sa valeur est également fixée pour une fréquence et une température. Dans la suite de ce manuscrit, nous appellerons permittivité le terme ϵ' .

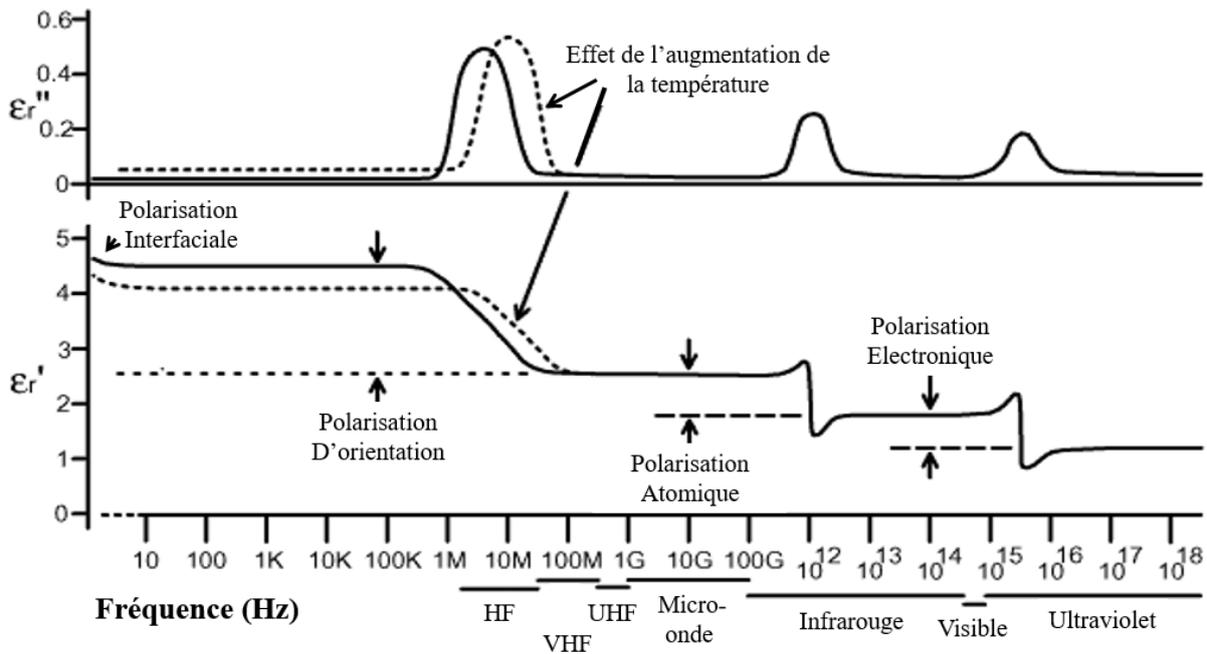


Figure 2-10: Variations de la permittivité complexe en fonction de la fréquence [14]

Les différentes polarisations sont présentées de manière schématique dans la Figure 2-10. Lors de l'application d'un champ électrique à basse fréquence, toutes les polarisations sont présentes, puisque toutes les charges électriques peuvent suivre le champ, même les plus lourdes. Plus cette fréquence est augmentée, plus on se rapproche de la fréquence dite de « relaxation » de chacune des polarisations. Lorsque les charges ne sont plus capables de suivre le champ alternatif, les processus contribuant à la polarisation globale disparaissent les uns après les autres [14].

Un autre paramètre très utilisé en ingénierie, dans l'étude de la permittivité, est le facteur de dissipation ou encore la tangente de l'angle de perte (Figure 2-11), généralement très faible. Exprimés en pourcentage suivant la relation :

$$\tan \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (2.19)$$

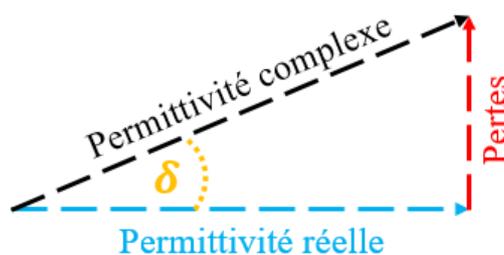


Figure 2-11: Partie réelle et imaginaire de la permittivité complexe

Dans le cadre de cette thèse, les capteurs RFID étudiés se basent sur la variation de permittivité complexe qui est fonction des paramètres environnementaux (humidité, température, gaz...). Le principe de détection recherché, illustré Figure 2-12, se traduit au niveau de l'antenne :

- Par une variation de la fréquence de résonance lors d'une variation de la permittivité réelle
- Qui peut s'accompagner d'une variation d'amplitude liée aux pertes diélectriques.

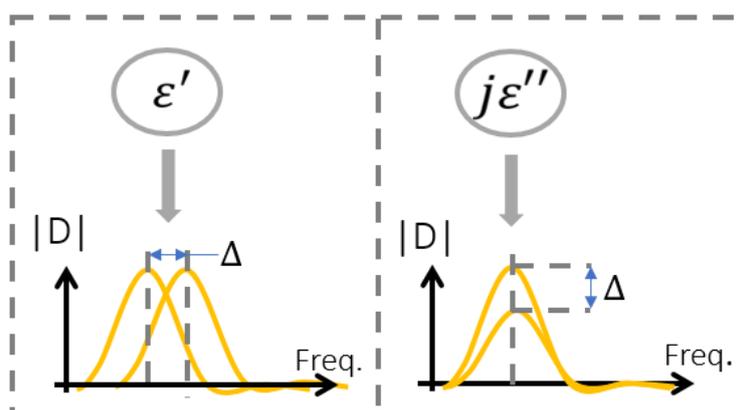


Figure 2-12: Effet de la permittivité diélectrique et des pertes sur le coefficient de réflexion de l'antenne

2.2.2.4 Choix d'un bio-polymère comme matériau sensible

Afin de fonctionnaliser notre capteur-RFID, nous avons décidé d'utiliser comme matériau sensible, le gluten de blé, un bio-polymère déjà étudié lors d'un précédent travail de thèse [15]. En effet, ce bio-polymère présente des propriétés intéressantes de transfert de gaz, et il est aussi un matériau polarisable lors d'une excitation par un champ électrique [16]. De plus, le film de gluten de blé est largement étudié comme matériau écologique pour les emballages alimentaires [17]. La capacité du gluten de blé à interagir avec les molécules d'eau a été caractérisée et évaluée en termes de propriétés électriques et diélectriques [18]. Pour cela une technique de mesure capacitive basée sur une électrode interdigitée a permis d'obtenir des valeurs de permittivité sur une large gamme de fréquences allant jusqu'à 1GHz. Le système a été soumis à une variation croissante puis décroissante d'humidité relative, l'impédance complexe de l'électrode interdigitée a été mesurée à l'aide d'un analyseur de réseau vectoriel. Puis, l'identification des propriétés diélectriques du gluten de blé a été réalisée par rétro simulation, la permittivité et les pertes diélectriques ont été obtenues en comparant les valeurs d'impédance simulées aux valeurs mesurées, notamment à la fréquence de 868 MHz.

Nous avons donc utilisé les résultats obtenus dans cette étude électrique, dont la synthèse se résume sur la Figure 2-13. Cette caractéristique est le point d'entrée pour la conception et la simulation de l'antenne du capteur-RFID qui sera présenté ultérieurement. Comme nous pouvons le voir, sur cette même figure, la permittivité (ϵ') et les pertes diélectriques ($\tan \delta$) du gluten de blé varient de 5.02 à 9.82 et de 0.022 à 0.081 respectivement, en fonction de l'humidité relative de l'environnement (20 % à 95 % HR). Nous avons utilisé ces valeurs lors de la simulation EM sous « CST MWS » de l'antenne pour connaître l'impact de l'humidité sur la désadaptation de l'antenne. Pour cela nous avons défini un matériau

sous CST dont les paramètres varient en fonction des propriétés diélectriques décrites dans la Figure 2-13 (Cf. paragraphe 2.3).

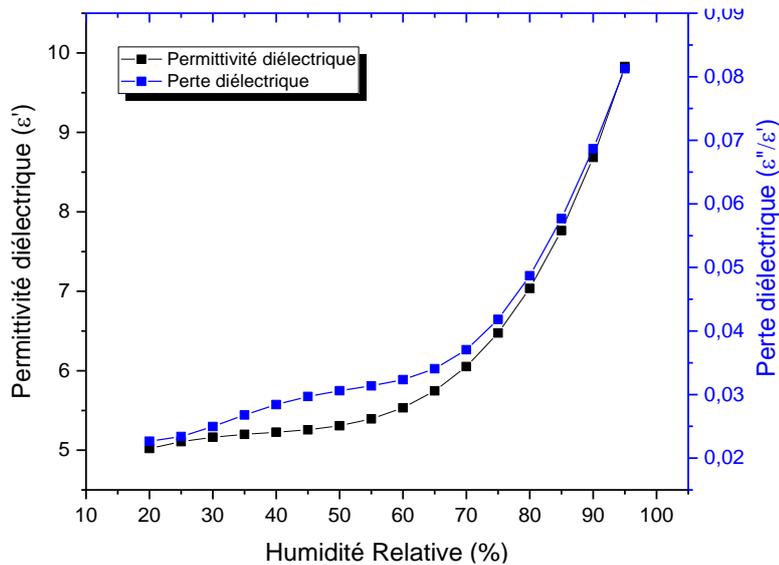


Figure 2-13: Permittivité complexe du gluten de blé en fonction de l'humidité relative (HR) à 868 MHz, à 25°C [13].

2.3 Design, optimisation et simulation

Dans cette partie, nous allons proposer une solution à notre problématique principale, à savoir comment concevoir une antenne rayonnante de manière efficace, tout en couplant sur cette même antenne une zone de dépôt permettant de sensibiliser l'antenne au paramètre cible à détecter. Pour y parvenir, nous avons divisé l'antenne de notre capteur-RFID en trois parties comme illustré sur la Figure 2-14 :

- **La zone de dépôt** : L'antenne doit posséder une zone sensible sur laquelle se fera le dépôt de notre gluten de blé. Nous avons donc utilisé une capacité interdigitée afin d'augmenter la sensibilité de l'antenne aux variations du paramètre physique [20].
- **La partie rayonnante** : Dans cet exemple, l'antenne est un dipôle. Une simple modification géométrique de ce dipôle permet de modifier la fréquence de résonance de l'antenne. Puis, par souci d'encombrements, le dipôle peut être replié.
- **Le substrat** : Le substrat doit être à faible perte, afin de ne pas détériorer l'efficacité de l'antenne. Pour se conformer à divers objets, le substrat est préférentiellement souple, notamment afin de le disposer sur des emballages alimentaires pour un suivi en humidité et en gaz. Dans le cadre de cette thèse nous avons utilisé un substrat souple en polyimide, un matériau couramment utilisé dans l'industrie électronique.

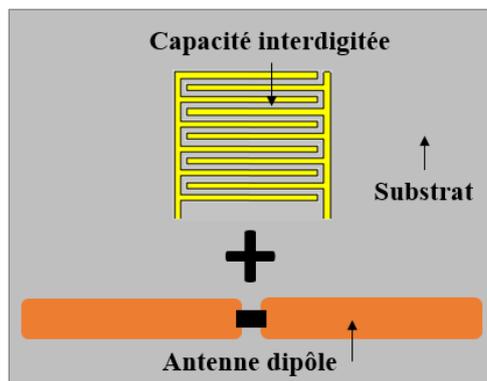


Figure 2-14: Illustration de la composition de l'antenne capteur proposée.

2.3.1 Outils de simulation : CST Microwaves Studio

Durant cette thèse, les simulations du capteur-RFID ont donc été réalisées à l'aide du logiciel CST Microwaves Studio. Ce logiciel permet la conception de l'antenne du capteur RFID en s'appuyant sur des études paramétriques pour converger vers un design optimal dans la bande de fréquence RFID UHF. Ce logiciel utilise les équations de Maxwell [1], [21], et utilise différentes méthodes numériques pour le calcul des champs électromagnétiques. Les méthodes les plus couramment utilisées sont la méthode FDTD (Finite-Difference Time-Domain), la méthode FEM (Finite Element Method) et la méthode des moments (MoM).

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

En ce qui concerne le prétraitement, il s'agit d'abord de créer la géométrie, définir les propriétés des matériaux, puis, l'application des conditions aux limites et des sources, et enfin, le choix et le paramétrage du solveur. Le processus de maillage (subdivision du domaine de calcul en éléments plus petits) peut être considéré comme faisant partie du prétraitement. Il affecte fortement le temps de calcul et la précision de la solution. Les outils de simulation modernes incluent des algorithmes sophistiqués de génération de maillage avec différents niveaux d'automatisation. Par exemple, il est possible d'augmenter la précision du maillage pour les régions où un fort champ est attendu. Ensuite, dans la partie résolution, le solveur détermine (en fonction de la méthode numérique utilisée) les champs électriques et magnétiques dans le domaine de calcul (temporel ou fréquentiel) ainsi que les densités de courant de surface sur les interfaces entre différents matériaux. Pendant le post-traitement, des quantités supplémentaires telles que les paramètres de circuit, de diffusion et le diagramme de champ lointain sont calculés à partir des champs électromagnétiques ou des densités de courant [21].

Les méthodes basées sur le volume comme FEM et FDTD nécessitent un maillage de tout le volume de calcul. Des méthodes intégrales comme MoM, maille seulement la surface des objets. La Figure 2-15 montre la discrétisation d'une sphère par différentes méthodes numériques. Le maillage FEM est constitué de tétraèdres très flexibles qui permettent une représentation homogène de la sphère. La maille en escalier du standard FDTD, est constituée de cellules orthogonales moins flexibles que les tétraèdres. Par conséquent,

plus de cellules sont nécessaires pour représenter la sphère. Le maillage MoM est un maillage surfacique où la surface de l'objet est approximée par des triangles et des quadrilatères.

Un concept intéressant et largement utilisé est le maillage adaptatif où le maillage est optimisé dans une séquence d'exécutions de simulation. D'abord, un maillage initial plutôt grossier est généré et les paramètres sont calculés pour une fréquence spécifiée. Sur la base de la première solution, le générateur affine le maillage dans des régions de grands gradients de champ et d'objets géométriques détaillés. Une nouvelle simulation avec le maillage raffiné est démarrée, et la différence entre les différentes simulations est évaluée. Ce processus adaptatif est itéré jusqu'à ce que la différence soit inférieure à un seuil défini par l'utilisateur ou qu'un nombre maximal d'exécutions de simulation ait été effectué. Dans notre cas, ce processus est utilisé pour la zone de dépôt qui concentre l'élément sensible (gluten de blé) et la capacité interdite. En effet, dans cette zone se crée un champ électrique important pour notre application de détection. Mailler de manière plus précise cette zone dès le départ nous permet d'optimiser le temps de calcul, en accélérant la convergence du maillage. Notre capteur-RFID a été conçu en suivant les trois étapes de modélisation et le maillage adaptatif.

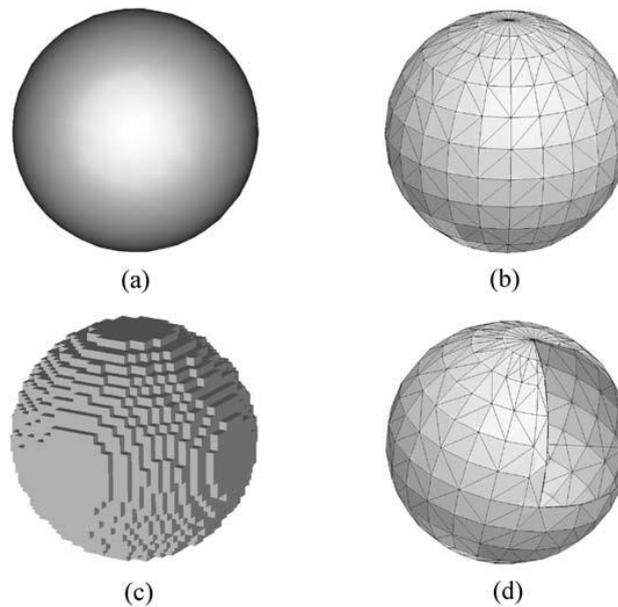


Figure 2-15: Maillage d'une sphère avec différentes méthodes: (a) forme géométrique de la sphère; utilisant (b) des tétraèdres (FEM), (c) des cellules orthogonales (FDTD), et (d) triangles (MoM)[21].

2.3.2 Présentation du design de l'antenne

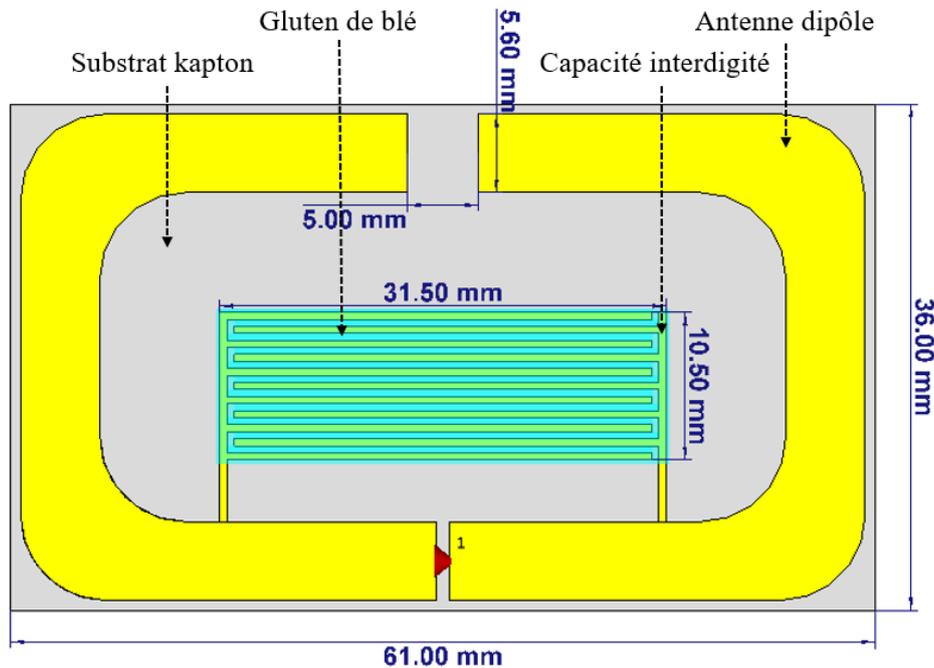


Figure 2-16: Design de l'antenne du capteur-RFID proposée avec dépôt du gluten de blé et dimensions

La géométrie de l'antenne du capteur-RFID, présenté en Figure 2-16, a été déterminée à la suite d'une étude paramétrique réalisée sur deux parties : le dipôle et la partie capacitive. Cette étude a montré que plusieurs paramètres de l'antenne influencent plus ou moins fortement la fréquence de résonance de l'ensemble. L'objectif se trouve donc dans la recherche du bon compromis entre plusieurs paramètres, afin d'optimiser l'antenne à la fréquence de résonance voulue. Nous avons fixé des conditions initiales de simulation :

- Sur le matériau sensible, qui est considéré dans l'état du plus faible niveau d'humidité détectable (20 % HR). Car d'après les résultats présentés en Figure 2-13, pour une humidité relative de 20 %, nous obtenons de faibles pertes ($\epsilon' = 5.22$ et $\epsilon'' = 0.022$).
- Sur la fréquence de résonance, qui doit être comprise dans la bande de fréquence FCC (de 902 MHz à 928 MHz), car elle offre un grand nombre de canaux (50), très utile pour la suite, notamment lors de l'utilisation d'un lecteur RFID du commerce. Plus précisément, la fréquence choisie est de 928 MHz, car les pertes induites par les variations de permittivité du dépôt impliquent un décalage fréquentiel vers les basses fréquences (de 928 MHz vers 902 MHz). Ainsi à l'aide d'un lecteur du commerce il sera plus facile de suivre les variations de la fréquence de résonance (Cf. Chapitre 3).
- Ensuite, sur la taille finale de notre antenne, pour rester dans un encombrement minimal (de taille inférieure à celui d'une carte à puce), nous utilisons une géométrie du type antenne dipôle repliée.
- Sur le substrat, ou nous avons utilisé un substrat en polyimide (Kapton), d'une épaisseur de $50 \mu\text{m}$ avec une constante diélectrique ϵ' de 3,5, et des pertes diélectriques ϵ'' de 0,01 (à 1 MHz) [22], [23]. Ce dernier est considéré comme ayant

de bonnes propriétés mécaniques, une stabilité chimique et thermique relativement bonne. Ces facteurs ont rendu le polyimide très populaire comme substrat flexible faible pertes [24], [25]. Afin d'éviter toute perturbation liée au potentiel de détection du Kapton [20], [26] nous nous attacherons à protéger le substrat de l'humidité par un film plastique, tout en laissant deux ouvertures, pour réaliser le dépôt du gluten de blé et pour fixer la puce RFID.

- La puce RFID utilisée est la MagicStrap Murata [26] (ref : LXMS31ACNA – 011) possédant un circuit de chez NXP dont la puissance d'activation est de -8dBm, et l'impédance à 915 MHz est de $25-j200 \Omega$. D'autres puces RFID existent dans le marché avec une puissance d'activation moins élevée, comme présentée dans le Tableau 1-9 dans le chapitre 1. Il est évident qu'en utilisant une puce avec une puissance d'activation plus faible les résultats en seraient améliorés. Nous estimons que les résultats obtenus avec la puce de chez NXP sont satisfaisants dans le cas de notre application.

2.3.3 Étude paramétrique et optimisation de l'antenne capteur-RFID

Cette étude a été réalisée dans le but de connaître l'influence de la variation des dimensions globales de l'antenne sur les paramètres de l'antenne (coefficient de réflexion, fréquence de résonance, gain, directivité ...etc.). Pour cela, nous sommes partis de conditions de base c'est-à-dire une antenne adaptée à l'impédance de la puce RFID, une zone interdigitée recouverte d'un dépôt de gluten de blé avec les propriétés diélectriques obtenues à 20 % d'humidité relative (HR). Cette étude nous permettra de comprendre quels sont les paramètres géométriques qui permettent d'ajuster la fréquence de résonance et modifient fortement l'adaptation.

L'étude a été divisée en trois parties : la première concerne la capacité interdigitée, sur laquelle est déposé le gluten de blé. La seconde partie concerne le dipôle de l'antenne et plus précisément le repliement afin de comprendre l'influence de cette zone. Et enfin, la troisième partie sur le dépôt du gluten de blé avec une variation des dimensions du dépôt. Cette dernière partie est sans doute plus critique puisque l'épaisseur et la surface de gluten de blé influencent fortement les paramètres de l'antenne. Afin de pallier aux aspérités de surface et de côté, lors du dépôt de gluten de blé, nous avons décidé d'étudier en détail cette partie afin de mieux comprendre et d'analyser un quelconque écart de correspondance entre simulations et mesures.

2.3.3.1 Étude paramétrique de la zone de dépôt

La méthode capacitive est une des méthodes utilisées pour la caractérisation de matériaux diélectriques [27]. Comparée à d'autres techniques [28] regroupées dans le Tableau 2-1, elle permet de manière simple et précise (<5%) de récupérer la permittivité relative d'un matériau.

Tableau 2-1 : Comparaison des méthodes de caractérisation diélectrique utilisée [29]

| Cellule de mesure | Paramètres mesurés | Grandeurs physiques | Types de bandes fréquentielles | Erreur relative | Tangente de perte |
|--------------------------------------|-------------------------|----------------------------|--------------------------------|--------------------------|-------------------|
| Espace libre (en chambre anechoïque) | S_{ii} et/ou S_{ij} | ϵ_r et/ou μ_r | Large bande ou étroite | -/- | $> 10^{-2}$ |
| Cavité résonante | S_{ii} ou S_{ij} | ϵ_r ou μ_r | Fréquence unique | $< 2\%$ sur ϵ_r | $< 10^{-3}$ |
| Capacité M.I.M | S_{ii} et S_{ij} | ϵ_r | Large bande | $< 5\%$ sur ϵ_r | -/- |
| Ligne de transmission | S_{ii} et S_{ij} | ϵ_r et/ou μ_r | Large bande | $< 5\%$ sur ϵ_r | $> 10^{-3}$ |
| Sonde coaxiale | S_{ii} | ϵ_r | Large bande | $< 5\%$ sur ϵ_r | $> 5.10^{-2}$ |

De plus, les capacités interdigitées ont pour principal avantage d'être facilement réalisables avec les techniques de fabrication électronique classique, plusieurs travaux ont permis de les modéliser de manière plus ou moins complexe [30]. Par exemple dans cette étude [31], la capacité interdigitée est divisée en 3 sous capacité, leurs formules sont relativement complexes, mais à l'aide d'un outil mathématique il est possible d'en extraire la permittivité diélectrique du matériau déposé, en fonction des différents paramètres géométriques et des permittivités connues. Nous nous aidons de cette représentation (Figure 2-17) pour mieux comprendre l'étude paramétrique. Et il ressort de ces différents travaux que la capacité totale (équation 2.21) est très sensible aux variations de paramètres géométriques, et plus particulièrement la zone entre les doigts interdigités.

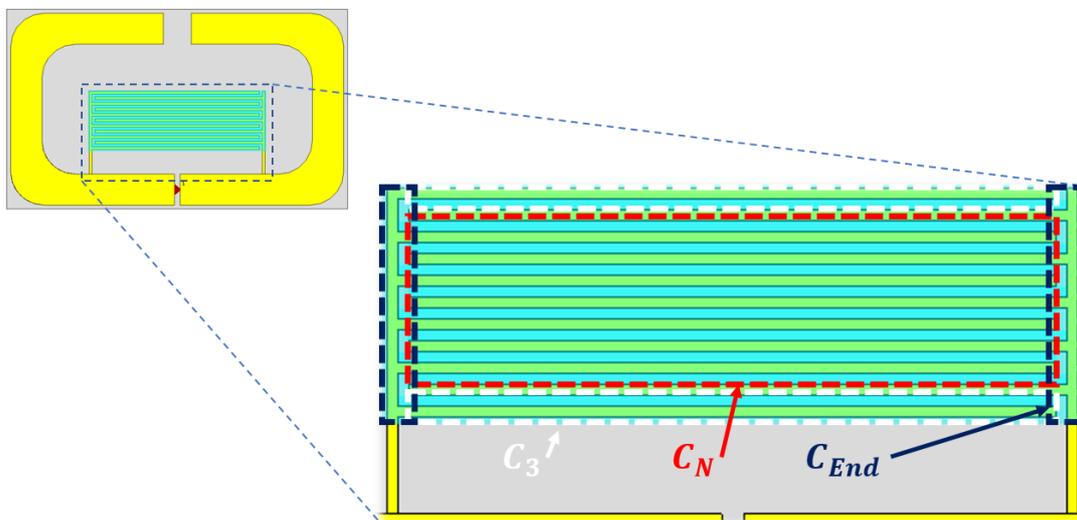


Figure 2-17: fractionnement tiré de l'étude [31] appliqué à notre capteur-RFID

Comme illustré Figure 2-17, C_3 représente la capacité formée par les deux doigts aux extrémités et le doigt voisin, C_N représente la capacité formée par le reste des doigts au centre de l'interdigité (c'est-à-dire n-3 doigts) et enfin, C_{End} représente la capacité formée par l'extrémité des doigts. Nous avons représenté en Figure 2-18a), le champ électrique maximal de l'antenne fonctionnalisée avec le dépôt du gluten de blé. Ceci nous a permis de confirmer la présence d'un fort champ électrique au niveau de la capacité interdigité. À l'aide de la vue en coupe en Figure 2-18b), nous remarquons que le champ électrique se concentre principalement autour des doigts interdigités, ce qui va permettre d'avoir une meilleure sensibilité aux variations des propriétés diélectriques du dépôt.

$$C_{total} = C_3 + C_N + C_{End} \quad (N : \text{nombre de doigts}) \quad (2.20)$$

Nous savons que la profondeur de pénétration des lignes de champ, d'un matériau se trouvant entre les électrodes, est lié à la distance qui les sépare. Plus l'écartement est grand, plus les lignes de champs sont susceptibles de sortir de la zone de dépôt et d'être influencées par l'environnement [20]. Autrement dit, lorsque la distance interdigité est égale à l'épaisseur du dépôt toutes les lignes de champs sont confinées dans le matériau. Dans notre cas, la distance interdigité et l'épaisseur du dépôt ont été imposés par la technologie de gravure utilisée et la méthode de dépôt du gluten. La distance interdigité (500 μm) est bien supérieure à l'épaisseur du dépôt (< 100 μm), de ce fait les lignes de champs dépassent fortement la couche de gluten comme on peut le voir sur la Figure 2-18 b).

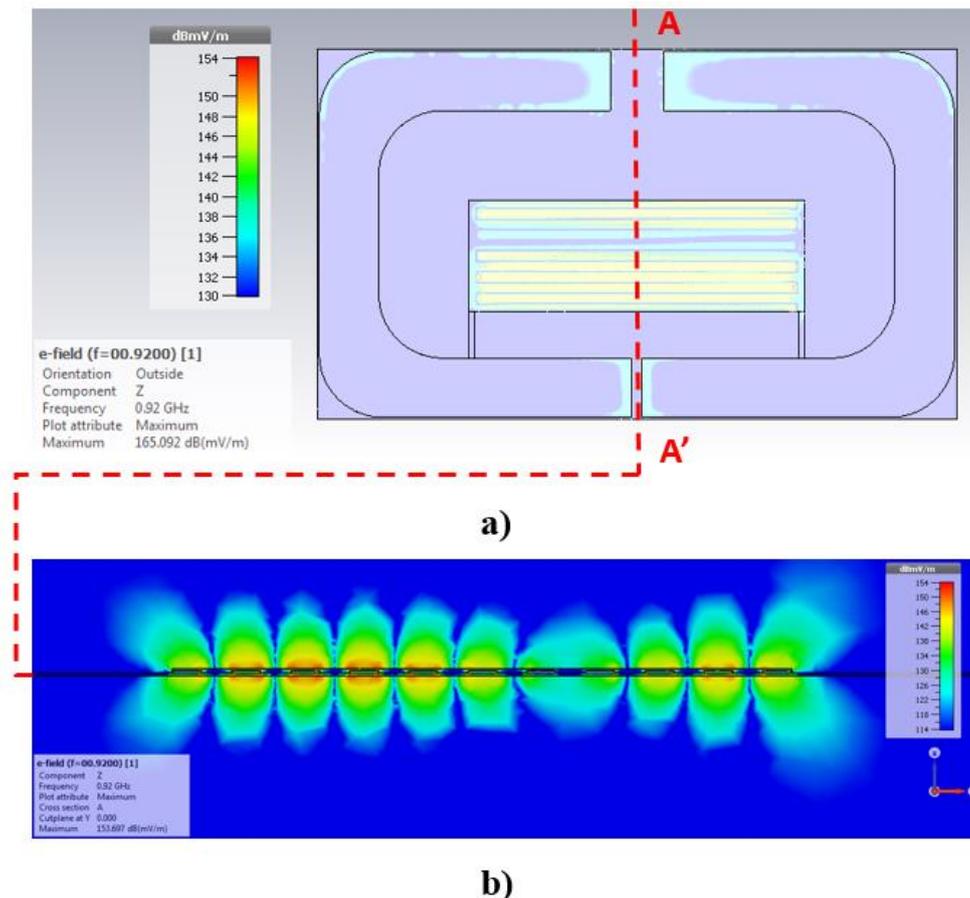


Figure 2-18: Représentation CST du champ électrique maximale a) de l'antenne entière et b) des doigts interdigités avec dépôt du matériau sensible

Afin de comprendre quels sont les paramètres géométriques les plus sensibles de notre capacité interdigitée totale (C_{total}), nous avons décidé de faire varier les trois « sous-capacités » (C_3, C_{end}, C_n) indépendamment et d'en observer la variation induite sur la fréquence de résonance de l'antenne. Nous avons donc choisi de faire varier la distance interdigitée (L_g), la longueur des doigts (L_d), leurs largeurs (l_d) et la distance aux extrémités des doigts (L_{end}), représentées sur la Figure 2-19. Afin de garder une dimension totale de la capacité fixe, nous avons instauré sous CST, une dépendance paramétrique entre certaines dimensions. Par exemple, entre la distance interdigitée et leurs largeurs, ce qui fait que lorsque nous augmentons la distance des interdigitées, leurs largeurs diminuent de la même valeur. Sur la Figure 2-19, nous avons également représenté deux épaisseurs fixes, car dépendantes du substrat (E_c) choisi et de l'épaisseur du cuivre (E_d). Initialement, le nombre de doigts interdigités (N) est de 11, les dimensions données en Figure 2-19 sont les dimensions pour lesquels le capteur-RFID a été optimisé.

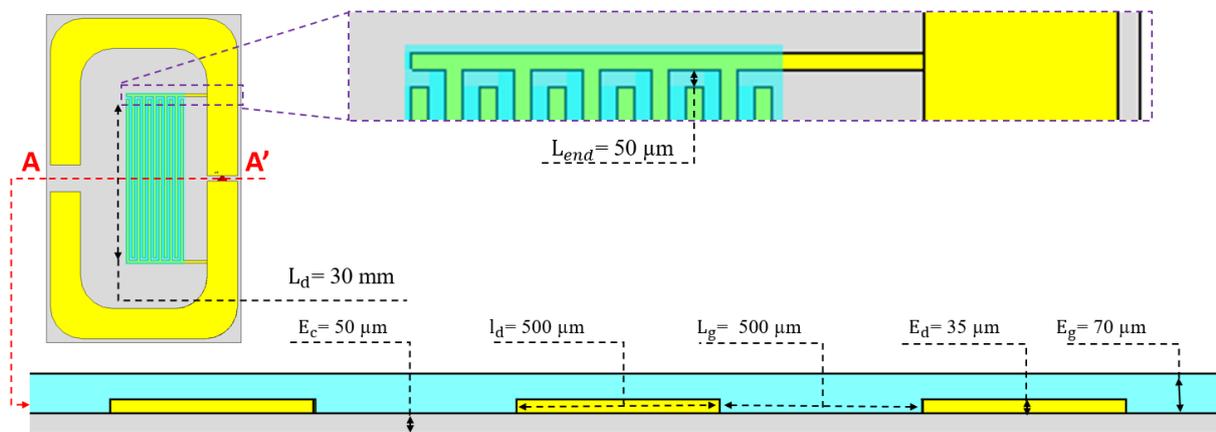


Figure 2-19 : Vue en coupe de la capacité interdigitée : dimensions et épaisseurs optimale

- Étude de l'effet des variations de l'espace à l'extrémité des doigts (Capacité C_{end})

Ensuite, nous avons fait varier l'espace se trouvant à l'extrémité des doigts, noté (L_{end}) sur la Figure 2-19. Les résultats de simulation sont représentés Figure 2-20, dont la courbe centrale (en rouge) représente les dimensions de l'espacement interdigitée de référence (valeur optimisée). Pour une variation de $\pm 100 \mu\text{m}$, on remarque une variation de la fréquence de résonance de $\pm 3 \text{ MHz}$.

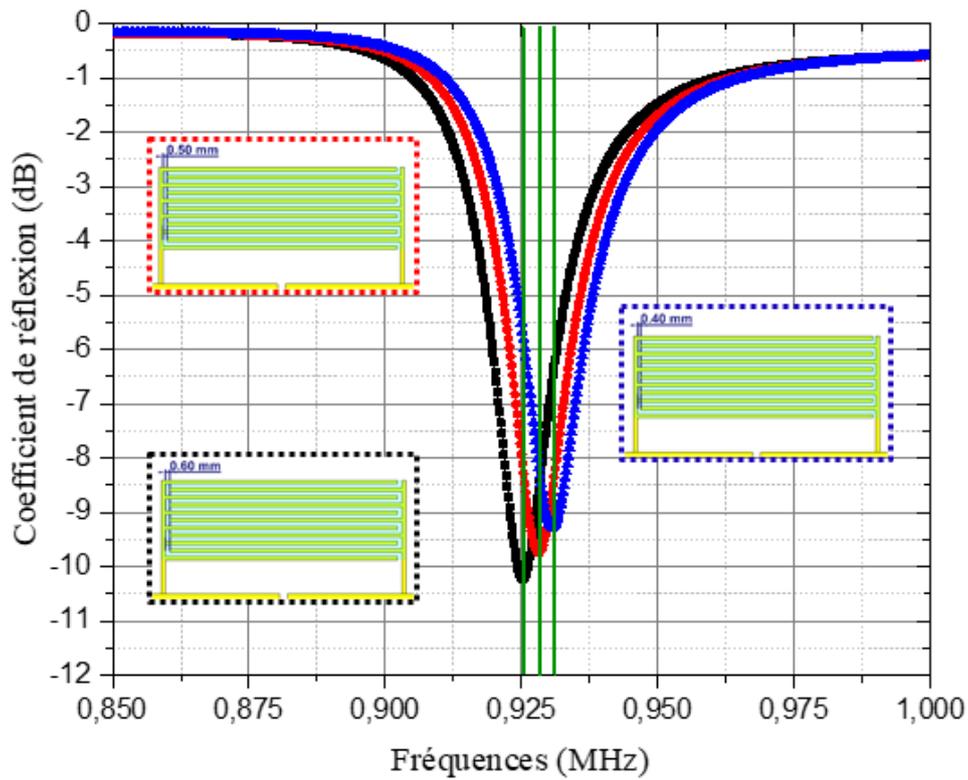


Figure 2-20: Étude de l'effet des variations de l'espace à l'extrémité des doigts (Capacité C_{end}), simulation avec impédance de la puce (Z_{puce})

- Étude de l'effet des variations de l'espace interdigité (Capacité C_3 & C_n)

Afin de confirmer que la capacité interdigitée est très sensible aux variations de la distance qui se trouve entre les doigts [20]. Nous avons réalisé des simulations présentées dans la Figure 2-21, dans laquelle nous remarquons que pour de faibles variations ($\pm 20 \mu m$) de l'espace interdigité (qui comprend la capacité ($C_3 + C_n$)) nous obtenons de grandes variations de la fréquence de résonance de $\Delta_1 = \Delta_2 = 8 MHz$. Sur la Figure 2-21, nous avons représenté sur la droite une légende sous forme de schémas, avec au centre celui représentant les dimensions de la capacité optimisée.

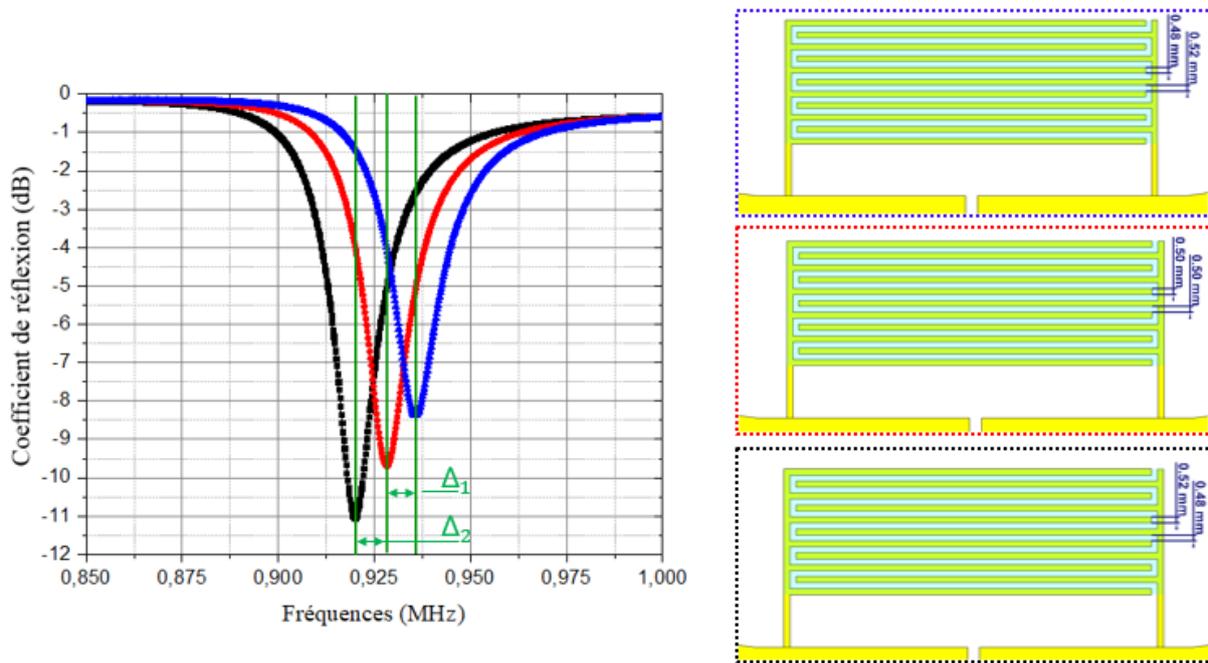


Figure 2-21: Etude de l'effet des variations de l'espace interdigité (C_3 & C_n)

Comparée à d'autres paramètres (seulement de la capacité interdigitée), la variation de l'espace interdigité et celui qui donne la plus forte variation de fréquence de résonance. C'est en grande partie ce paramètre qui nous a aidé à positionner notre design d'antenne. En effet, nous avons fait le choix de fixer les dimensions de la capacité interdigitée étant donné qu'elle sert de zone de dépôt. Les dimensions sont données en Figure 2-19.

2.3.3.2 Dépôt du matériau sensible

La fréquence de résonance de l'antenne est également très sensible aux variations des dimensions du dépôt. Plus précisément, ce sont les variations d'épaisseur du gluten qui influence le plus la fréquence de résonance. Comme on peut le voir dans la Figure 2-22, une variation de $10 \mu\text{m}$ de l'épaisseur du dépôt implique une variation de la fréquence de résonance de 13 MHz. Cette sensibilité est due en grande partie au fait que les lignes de champ électromagnétique produites par la capacité interdigitée dépassent largement l'épaisseur du dépôt du fait l'espace entre les électrodes.

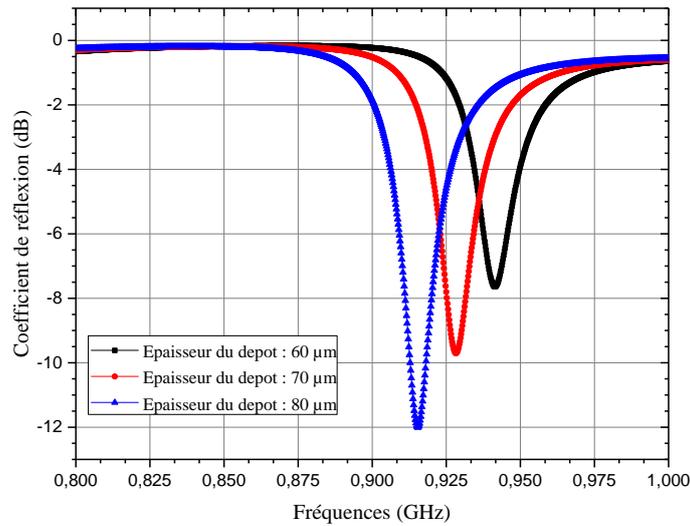


Figure 2-22 : Coefficient de réflexion de l'antenne adapté à l'impédance de la puce pour trois épaisseurs de gluten de blé différente (60 μm, 70 μm et 80 μm).

Nous avons également étudié l'influence du dépôt lorsque celui-ci s'étale au-delà de la zone de dépôt dédié. Les résultats présentés en Figure 2-23 nous confirment que la zone de dépôt est bien la zone la plus sensible de l'antenne. Une fois la capacité interdigitée totalement couverte, quel que soit l'étalement du dépôt, la fréquence de résonance varie très peu.

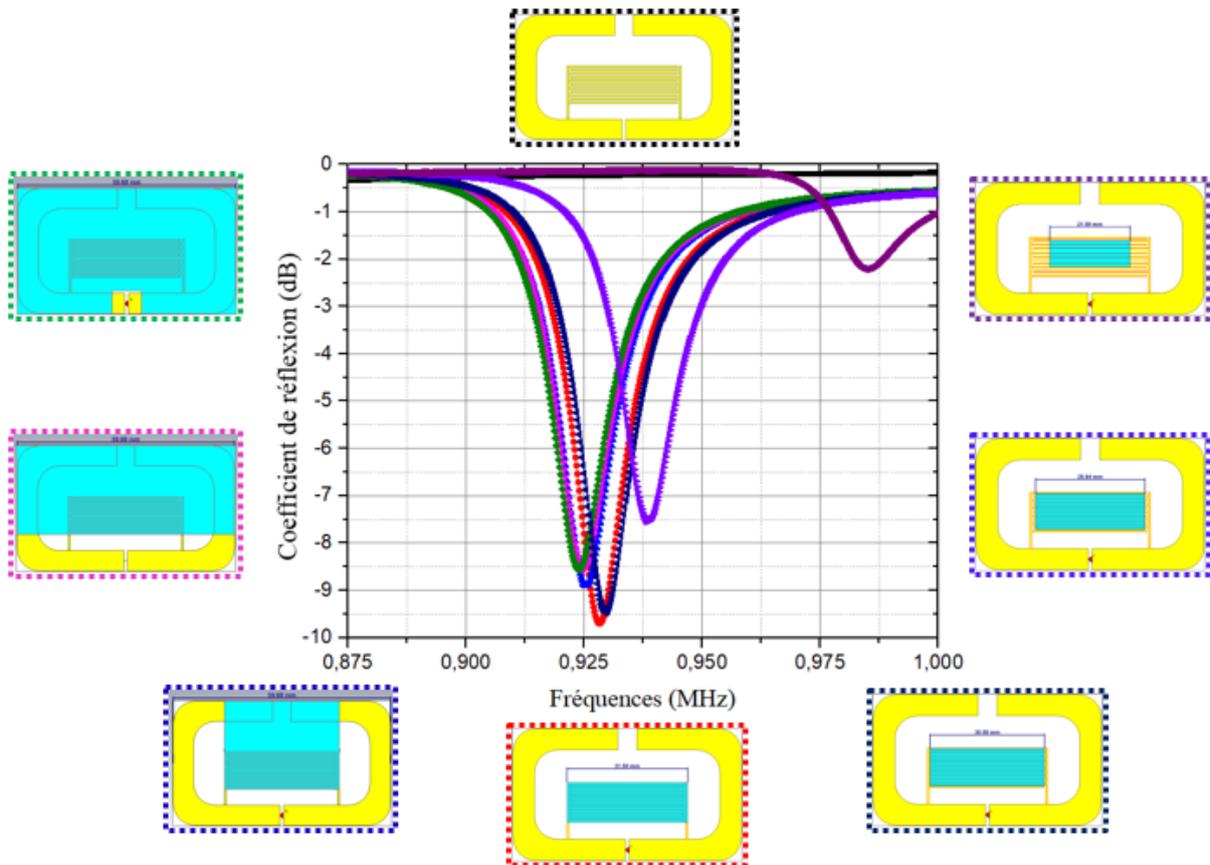


Figure 2-23: Etude paramétrique sur la zone de dépôt

Cette partie nous a permis de positionner les dimensions de la zone de dépôt et de l'antenne. Le dipôle par sa simplicité possède très peu de paramètres variables comparés à la capacité interdigitée, et a été fixé en suivant les critères d'encombrement cité au paragraphe 2.3.2, tout en préservant une bonne efficacité de rayonnement. Ceci étant, la zone au niveau du repliement de l'antenne est une zone très utile car elle permet d'ajuster la fréquence de résonance.

2.3.3.3 Repliement de l'antenne dipôle

Comme pour la partie précédente, nous allons maintenant voir l'effet sur le coefficient de réflexion lors de variations des dimensions du dipôle. Plus précisément, nous avons fait varier la longueur du dipôle au niveau du repliement. Les résultats de nos simulations sont présentés en Figure 2-24. Ceci a pour effet d'ajouter une capacité au niveau du repliement et permet également d'ajuster la fréquence de résonance.

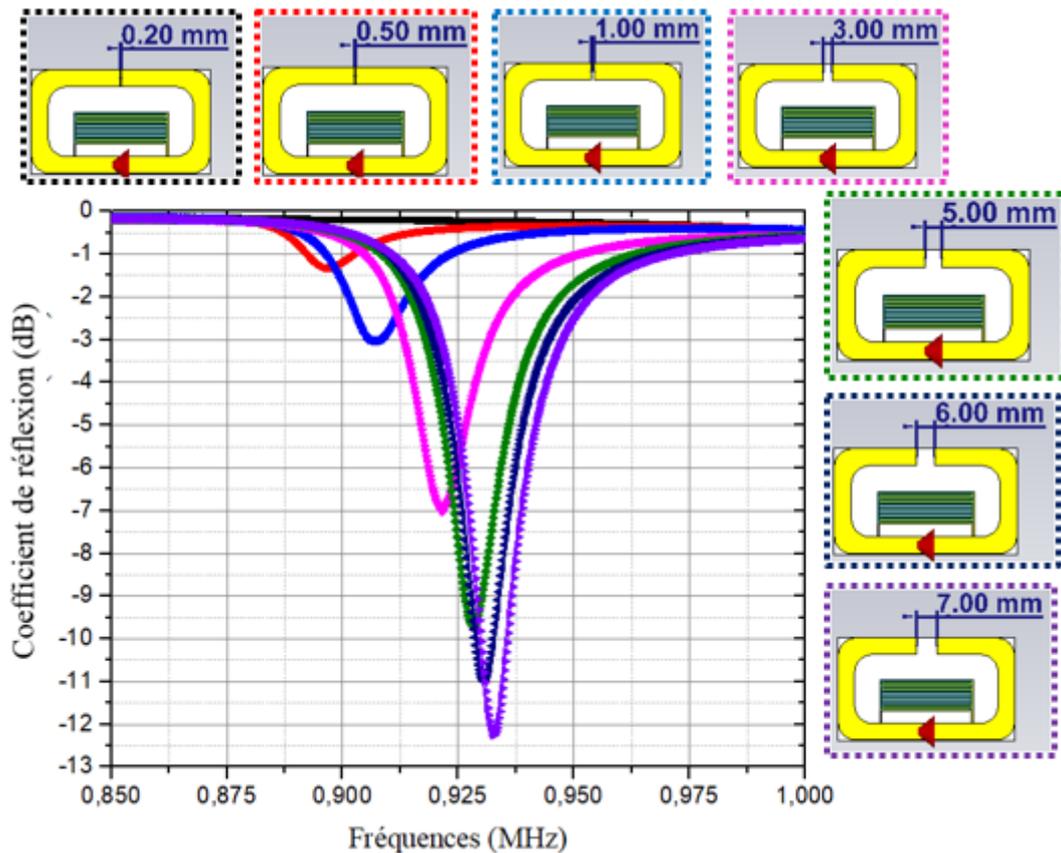


Figure 2-24: Etude paramétrique sur le repliement de l'antenne dipôle

2.3.3.4 Caractéristiques de simulations de l'antenne du capteur-RFID aux dimensions optimales

Au terme de l'étude paramétrique précédente, nous sommes arrivés à un design d'antenne satisfaisant par rapport aux critères de départ, dont les dimensions sont présentées en Figure 2-25. L'encombrement total est de 61 mm x 36 mm et inclus une capacité interdigitée positionnée en parallèle de la connexion avec la puce. La capacité est utilisée comme zone de dépôt du gluten de blé de surface 31.5 mm x 10.5 mm.

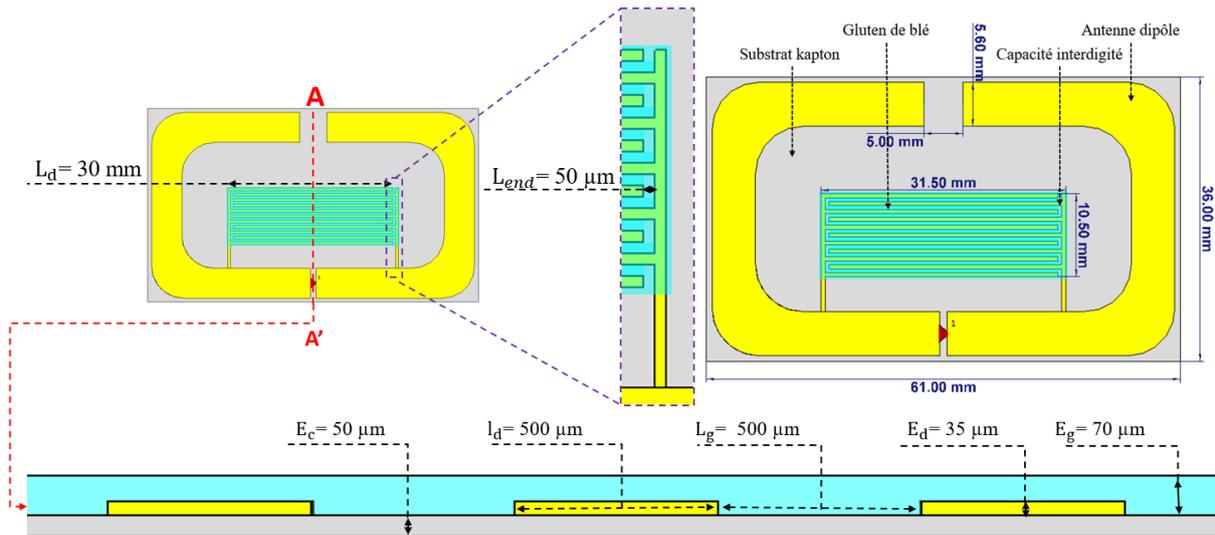


Figure 2-25: Simulation CST MWS de l'antenne du capteur RFID avec dépôt et dimensions

L'antenne du capteur-RFID a été optimisée pour assurer une adaptation complexe conjuguée avec l'impédance de la puce ($Z = 25 - j200 \Omega$, MAGICSTRAP [26]) pour la fréquence de 928 MHz, et ce pour le plus faible niveau d'humidité détectable ($RH=20\%$). La Figure 2-26 représente les coefficients de réflexion de l'antenne adaptée à la puce et à 50Ω (port 50Ω sous CST MWS) pour une épaisseur de dépôt de gluten de blé de $70 \mu\text{m}$. On note qu'un bon niveau d'adaptation est obtenu.

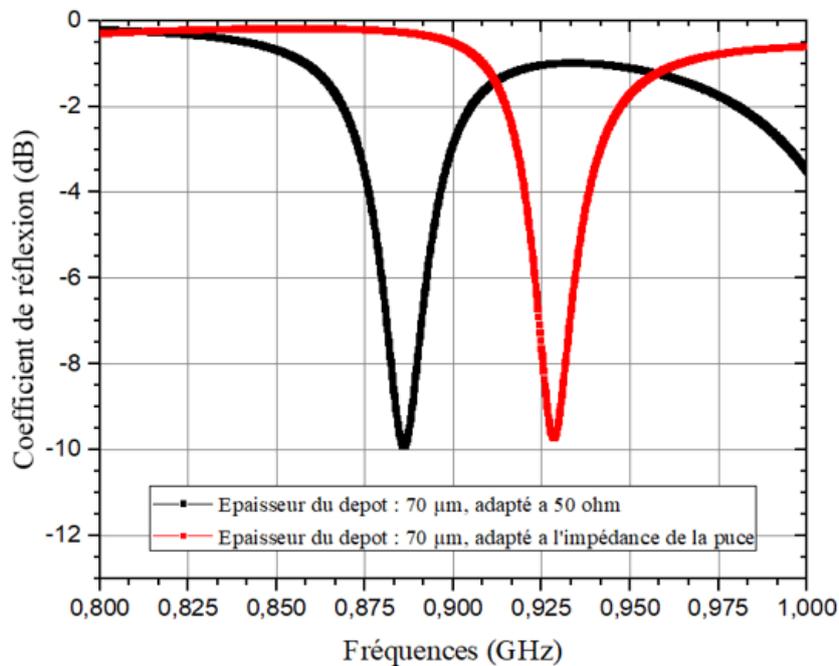


Figure 2-26: Coefficient de réflexion de l'antenne adapté à l'impédance de la puce pour une épaisseur de dépôt de $70 \mu\text{m}$

À la fréquence de résonance, le gain réalisé est de 0.8. Le module du gain réalisé en linéaire et la distance de lecture théorique sont présentés en Figure 2-27 pour toute la gamme de fréquences. Le calcul de la distance de lecture théorique a été effectué via une étape de « post-processing » dans le logiciel CST en se basant sur l'équation de Friis (voir équation 2.7).

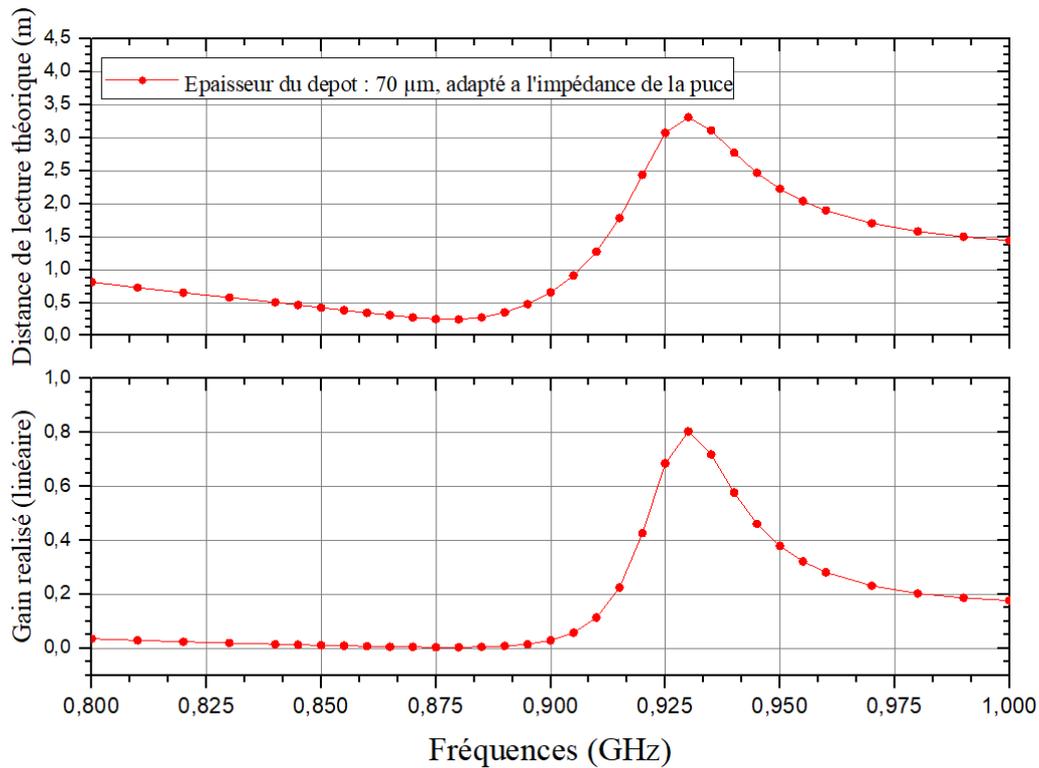


Figure 2-27: Distance de lecture théorique et Gain réalisé de l'antenne optimisée

Dans les conditions d'optimisations de départ cette antenne à une distance de lecture théorique d'environ 3.5m à 928 MHz.

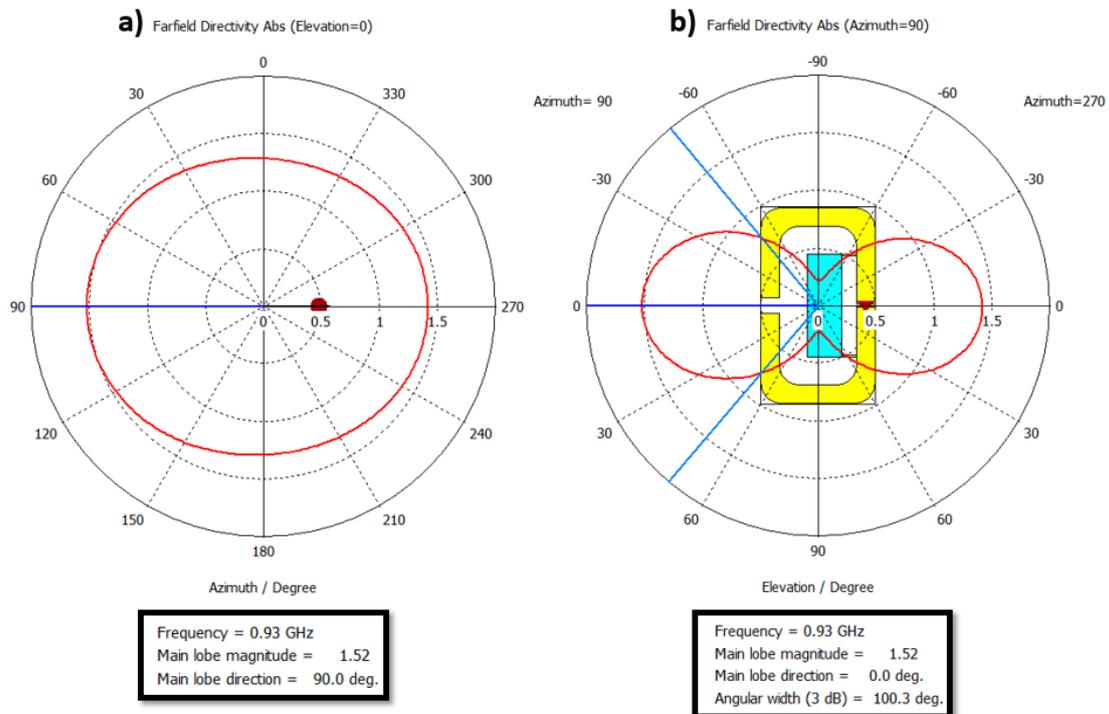


Figure 2-28 : Diagramme de rayonnement 2D (a) Plan-H (b) Plan-E de l'antenne dipôle représentant la directivité

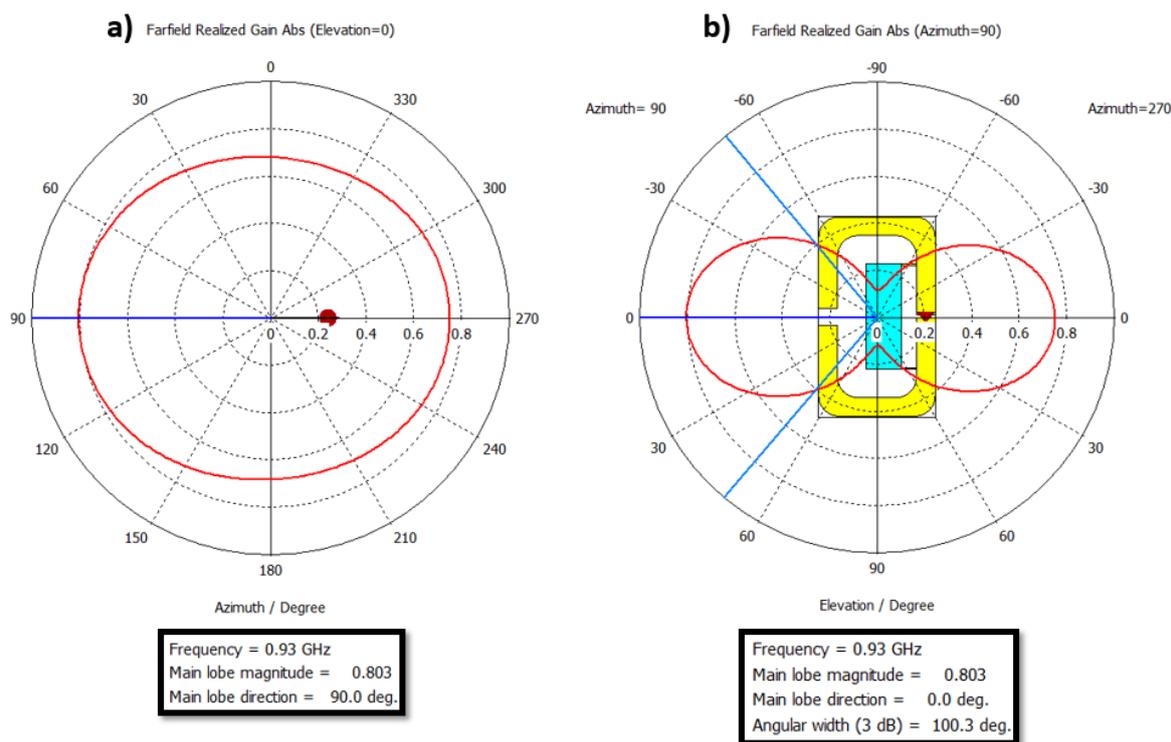


Figure 2-29 : Diagramme de rayonnement 2D (a) Plan-H (b) Plan-E de l'antenne dipôle représentant le gain réalisé

On peut voir sur la Figure 2-28 et la Figure 2-29 le diagramme de rayonnement en coordonnées polaires représentant la directivité et le gain réalisé respectivement dans le plan H (a) et E (b) de l'antenne du capteur-RFID. Le diagramme de rayonnement est semblable à celui d'un dipôle classique, en forme de tore, avec une légère dissymétrie dans le plan H due au repliement de l'antenne. Ceci permet de pouvoir détecter le capteur-RFID quel que soit l'angle de lecture, exactement comme pour un dipôle classique.

2.3.3.5 Effet des variations de l'humidité relative sur les caractéristiques de simulations de l'antenne du capteur-RFID

Afin de valider notre stratégie de détection, nous avons intégré les variations de permittivité et des pertes diélectriques tirées de l'étude [13] (présentée Figure 2-13) dans le modèle de simulation du capteur RFID sous CST MWS. Dans cette partie nous étudions donc l'effet de la désadaptation de l'antenne en fonction de l'humidité, sur le coefficient de réflexion, la distance de lecture théorique et le gain réalisé de l'antenne. La Figure 2-30 représente les variations du coefficient de réflexion en fonction de l'humidité relative, pour une épaisseur de gluten de 70 μm . On note, une variation très significative en fonction de l'évolution de l'humidité relative entre 20 et 90%. Ces variations vont de la même manière impacter la distance de lecture théorique et le gain réalisé de l'antenne comme on peut le voir sur la Figure 2-31. En fonction de la variation de l'humidité relative entre 20 % et 90 %, nous obtenons des variations de 2.5m à 3.5m pour la distance de lecture théorique et 0.5 à 0.8 pour le gain réalisé. Ces résultats de simulation sont la preuve que le biopolymère étudié dans le cadre de cette thèse a un impact suffisamment important sur l'impédance de l'antenne, et donc sur l'adaptation entre l'antenne et la puce RFID, pour qu'il soit détecté par un dispositif de lecture RFID.

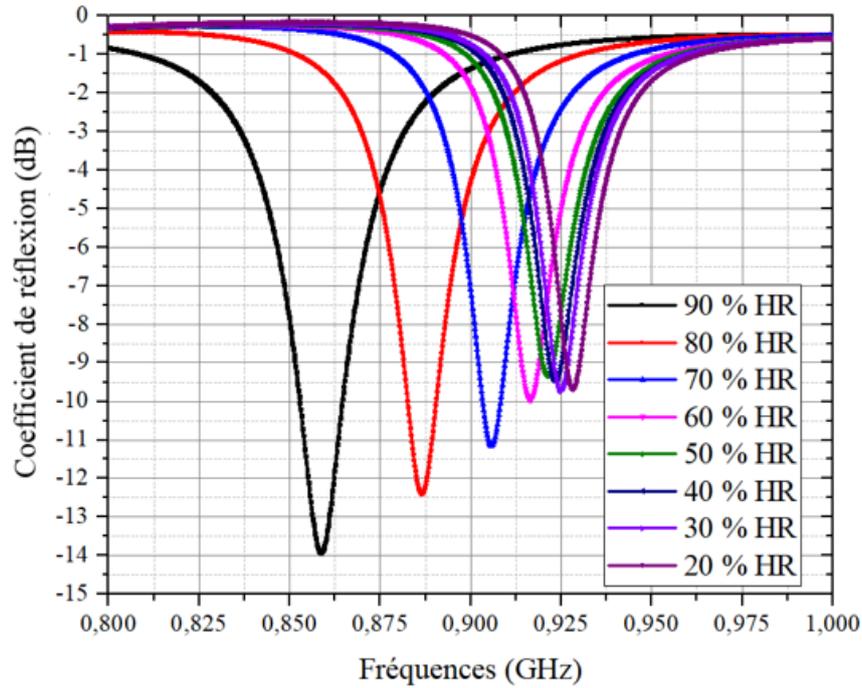


Figure 2-30 : Résultats de simulation adaptée à l'impédance de la puce RFID, montrant des variations du coefficient de réflexion en fonction de l'humidité relative, avec une épaisseur de gluten de 70 μm .

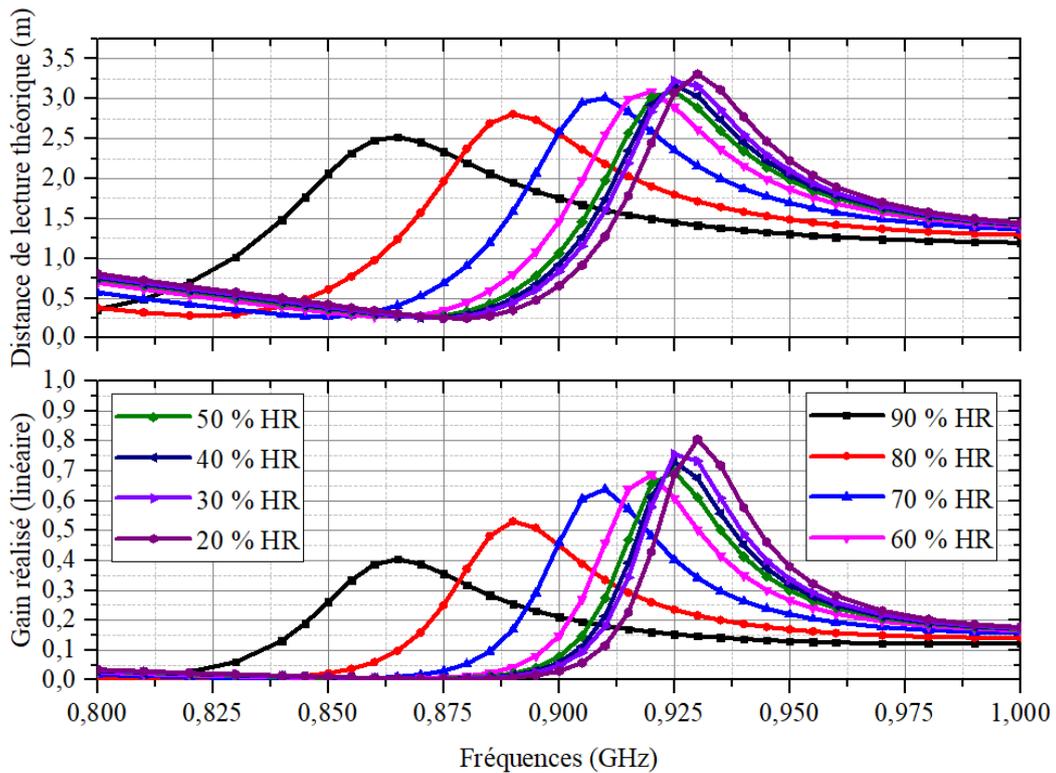


Figure 2-31: Résultats de simulation montrant des variations, de la distance de lecture théorique (courbe du dessus), et du gain réalisé (courbe du dessous), en fonction de l'humidité relative, avec une épaisseur de gluten de 70 μm .

Par la suite, nous allons comparer les résultats de simulation aux résultats de mesures. Pour cela nous allons utiliser le paramètre « distance de lecture théorique » qui est directement calculée par le dispositif de caractérisation de tags RFID Voyantic Tagformance dont nous disposons.

2.4 Caractérisation & Validation

Dans cette partie, nous détaillons les aspects réalisation et validation du capteur RFID. Nous commençons par détailler le fonctionnement le banc qui nous a permis de caractériser le capteur avant de présenter les résultats de mesure et de les comparer avec les résultats de simulation. Afin de lever des sources d'incertitude sur la fabrication du circuit imprimé constituant l'antenne et la zone capteur, nous avons fait appel à une société spécialisée dans la fabrication de circuit imprimés [32]. Cette étude a donc été menée à partir d'un lot d'échantillons réalisés de manière identique. Le circuit imprimé du capteur RFID proposé en Figure 2-32 a été réalisé en suivant certaines caractéristiques principales : substrat souple en kapton d'épaisseur 50 μm , antenne en cuivre d'épaisseur 35 μm (les dimensions sont données sur la Figure 2-25). Nous avons caractérisé dans un premier temps l'antenne RFID seule, à l'aide d'un analyseur de réseau vectoriel, puis dans un second temps le capteur RFID complet avec dépôt du matériau sensible, en chambre anéchoïque à l'aide du lecteur RFID Voyantic Tagformance Lite [33]. Ceci nous a permis de comparer les simulations précédemment obtenues avec nos mesures en conditions réelles (température et humidité ambiante). La validation du capteur-RFID en environnement contrôlé (température et humidité) sera effectuée dans le chapitre suivant.



Figure 2-32: Antenne tag RFID-capteur

2.4.1 Méthodologies de caractérisation et d'étalonnages de l'antenne réalisée

Dans cette partie, nous présentons le banc de mesure mis en place pour la caractérisation de nos capteurs-RFID. Nous avons mis en place deux bancs : le premier, permet de caractériser l'antenne seule avec ou sans le dépôt de matériaux sensible à l'aide d'un analyseur de réseau vectoriel (VNA), le second permet la caractérisation en chambre anéchoïque après le positionnement de la puce RFID, à l'aide du banc de mesure RFID Voyantic Tagformance.

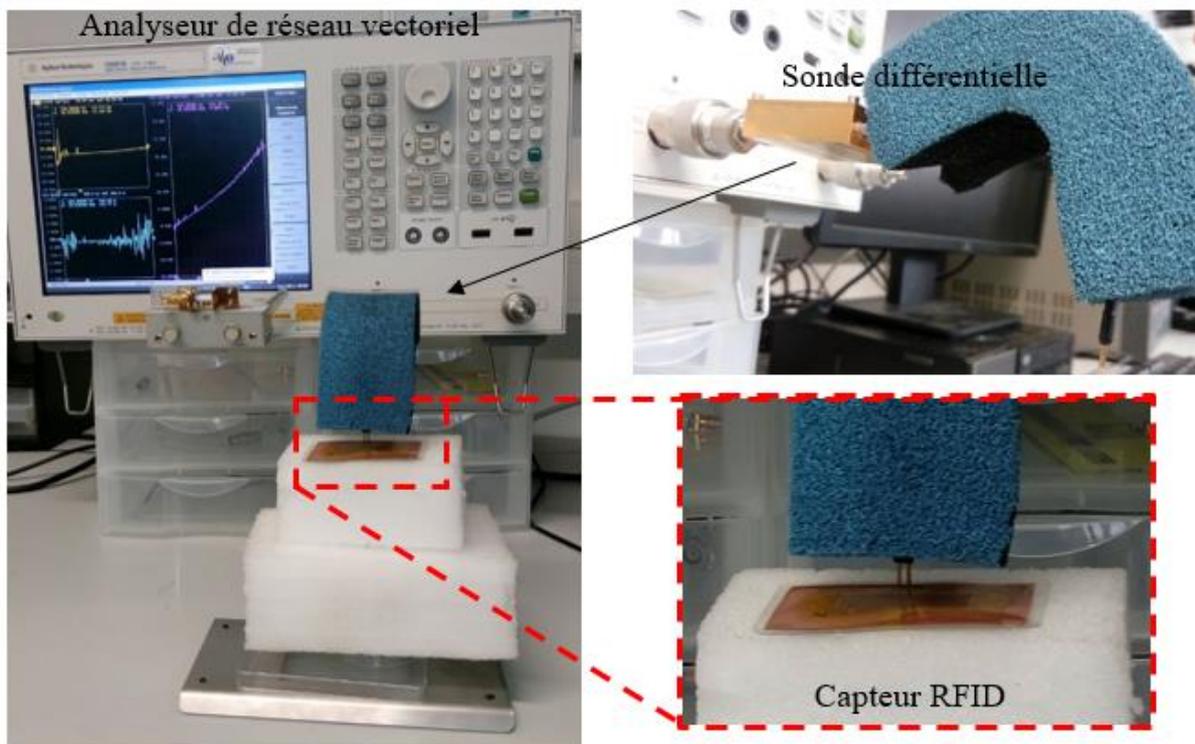


Figure 2-33: Banc de caractérisation de l'antenne du capteur-RFID

Le banc de mesures présenté Figure 2-33 permet de mesurer l'impédance des puces RFID et de caractériser les antennes RF. Il est composé :

- D'un analyseur de réseau vectoriel (VNA) : nous avons utilisé un VNA Agilent (E5061B), que nous avons calibré à l'aide du kit de calibration SOL (Short, Open, Load) pour lequel nous avons connecté successivement un court-circuit, un circuit ouvert et une charge 50Ω . Cette dernière correspond à l'impédance caractéristique du VNA en sortie du port.
- D'une sonde différentielle équipée d'un « balun » (Hyperlabs HL9402). En effet nous souhaitons mesurer une antenne dipôle (antenne symétrique) en mode différentiel, au port coaxial du VNA (asymétrique) [5]. La mesure est donc réalisée en différentiel afin de ne pas perturber la distribution des courants de surface sur l'antenne pendant la mesure.

2.4.2 Caractérisation et validation de l'antenne du capteur-RFID

Les étapes de validations et de mise en forme du capteur-RFID sont présentées Figure 2-34. Les étapes 1, 2 et 3 sont des étapes de mise en forme du capteur RFID, la caractérisation se fait donc à l'analyseur de réseau vectoriel connecté à une sonde différentielle (voir Figure 2-33). Après positionnement de la puce RFID, l'étape 4 est une caractérisation à l'aide du lecteur RFID Voyantic, en chambre anéchoïque des performances du capteur RFID en termes de distance théorique de lecture. Trois échantillons de capteur-RFID (Tag1, Tag2, Tag3), ont été caractérisés suivant le protocole défini précédemment que nous allons maintenant détailler. Les résultats de mesures avec dépôt (Étape 3 et 4) seront systématiquement comparés aux résultats de simulation obtenus plus haut pour une humidité relative ambiante de 50 %.

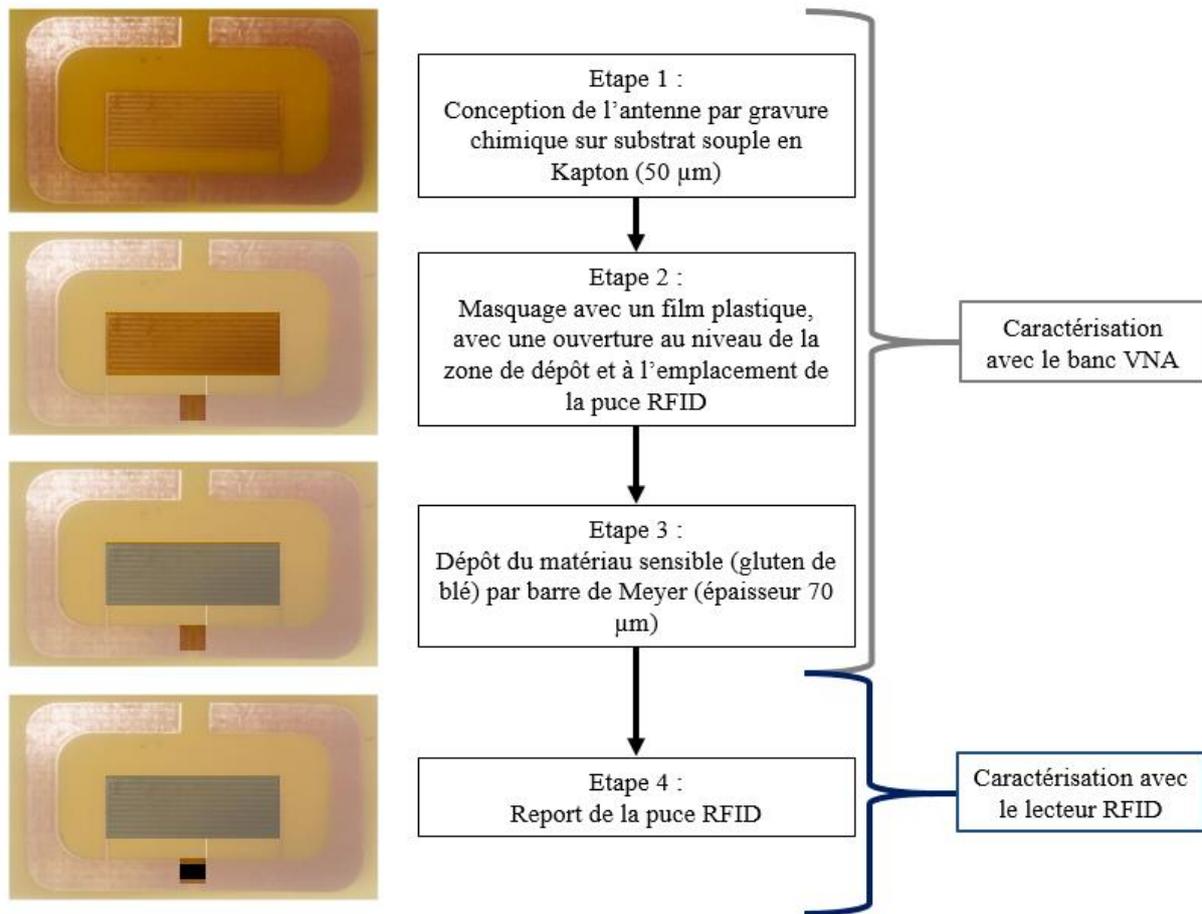


Figure 2-34: Étapes de validations du capteur-RFID

2.4.2.1 Caractérisation de l'antenne au VNA (Étape 1).

Nous commençons par la première caractérisation, qui se situe à l'étape 1 dans la Figure 2-34. Cette caractérisation de l'antenne du capteur-RFID est faite à l'aide du VNA (équipé de la sonde différentielle). Figure 2-35, on peut voir les résultats de mesures pour trois échantillons réalisés de manière identique et comparés à la simulation (50Ω) sans dépôt de gluten de blé. On peut noter que l'allure des résultats de mesure est relativement proche de celle obtenue en simulation à l'exception de deux points de fréquences présentant des niveaux d'adaptation meilleurs en simulation. Ces deux résonnances sont dues à l'antenne dipôle repliée et à la boucle formée par la capacité inter-digitée connectée en parallèle de la puce.

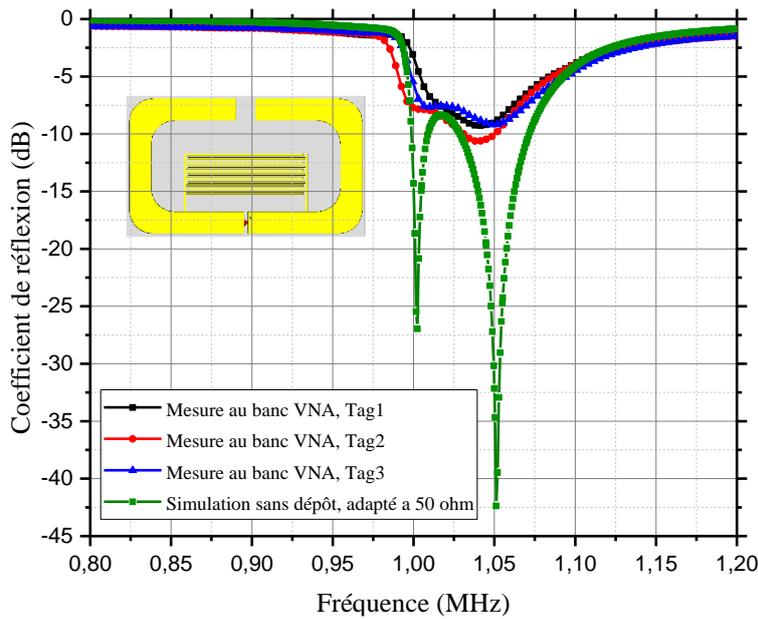


Figure 2-35: Comparaison mesures au VNA et simulation CST, adapté à 50 Ω sans dépôt

2.4.2.2 Impact de l'environnement proche du capteur-RFID (Étape 2)

Le substrat en kapton est sensible aux variations d'humidité relative. Afin de dé-corréler cet effet des variations engendrés par la présence du bio-polymère, nous avons masqué la totalité de notre capteur RFID à l'exception de la zone sensible et des pads de connexion de la puce RFID comme représentée Figure 2-34. Les résultats de mesures sont présentés Figure 2-36, on note une variation de la fréquence de résonance de 30 MHz, due à l'ajout de perte liée à la matière utilisée pour le masquage.

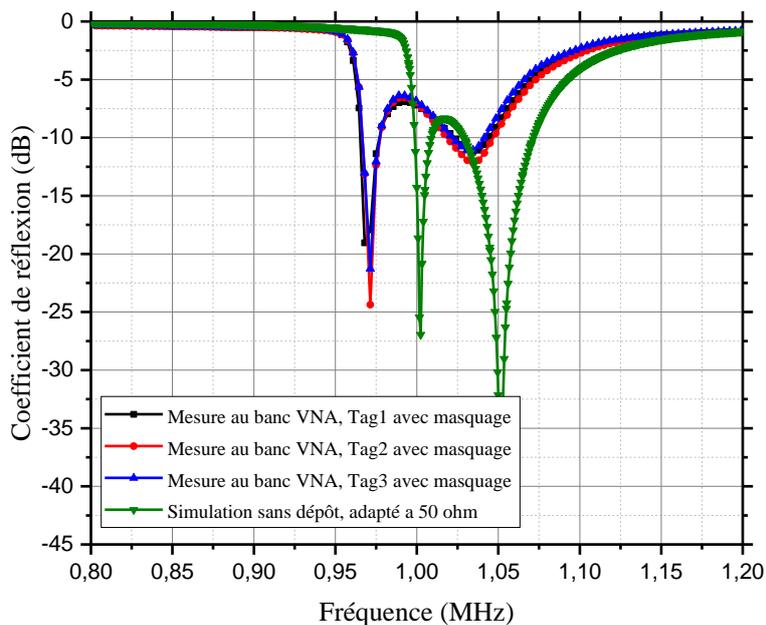


Figure 2-36: Comparaison mesures au VNA et simulation CST, 50 Ω sans dépôt après masquage

2.4.2.3 Impact du dépôt du gluten de blé (Étape 3)

Le dépôt du gluten de blé se fait par enduction en utilisant la technique de la barre de Meyer. 2ml de solution sont déposés, à une vitesse de 1mm/s pour obtenir une couche de 70 μm d'épaisseur, suivi d'un séchage à température ambiante. Après dépôt, nous avons caractérisé les 3 échantillons. Les résultats sont présentés Figure 2-37.

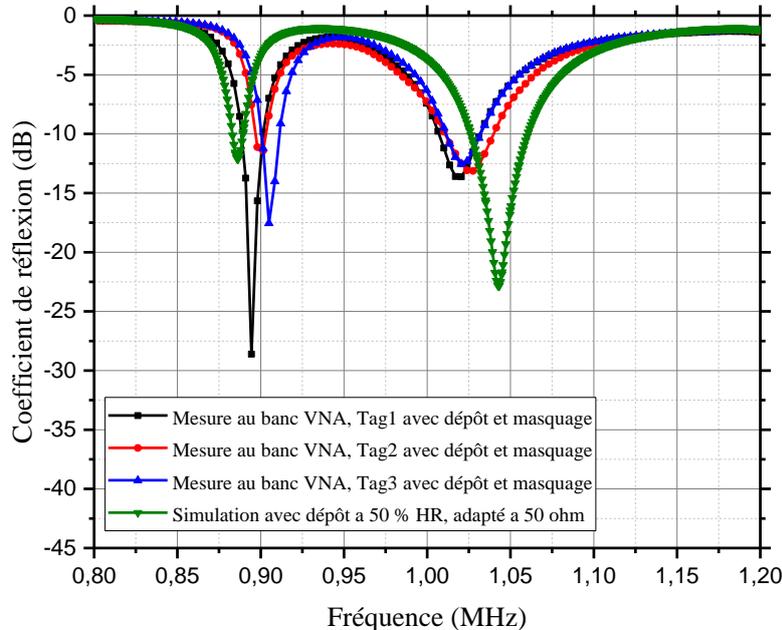


Figure 2-37 : Comparaison des mesures au VNA et de la simulation CST, 50 Ω , 50 %HR, avec dépôt et masquage

Ces résultats montrent une bonne corrélation entre simulation et mesures, on peut noter une erreur de 20 MHz, entre la fréquence de résonance du tag 3 (le plus éloigné) et celle obtenue en simulation. On remarque également que le décalage précédemment induit par l'étape du masquage a été comblé par l'étape de dépôt du gluten de blé pour certains échantillons. Ceci s'explique par le fait que l'épaisseur du dépôt est plus faible après séchage. L'épaisseur réelle est donc inférieure à celle utilisée en simulation.

2.4.2.4 Caractérisation du tag en chambre anéchoïque (Étape 4)

Nous avons ensuite caractérisé le capteur-RFID en chambre anéchoïque (avec dépôt et masquage) après report de la puce RFID. Ces mesures ont été réalisées en champ lointain à une distance de 40 cm de l'antenne du lecteur RFID Voyantic Tagformance. Une vue du banc de mesure est représentée Figure 2-38.

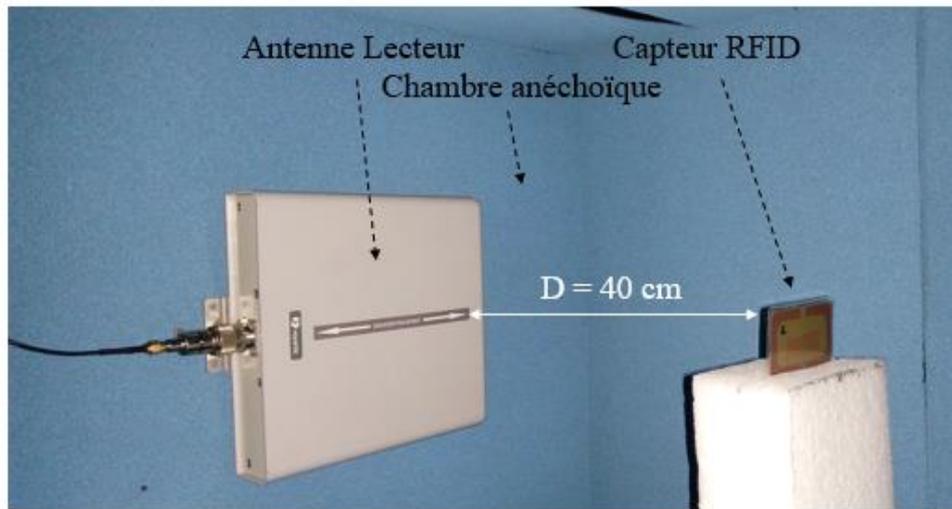


Figure 2-38: Méthode de mesure du capteur-RFID en chambre anéchoïque

Les résultats de la Figure 2-39, montrent une bonne similitude entre les courbes, représentant la distance de lecture théorique des 3 échantillons de capteur-RFID mesurés ainsi que celle issue de la simulation.

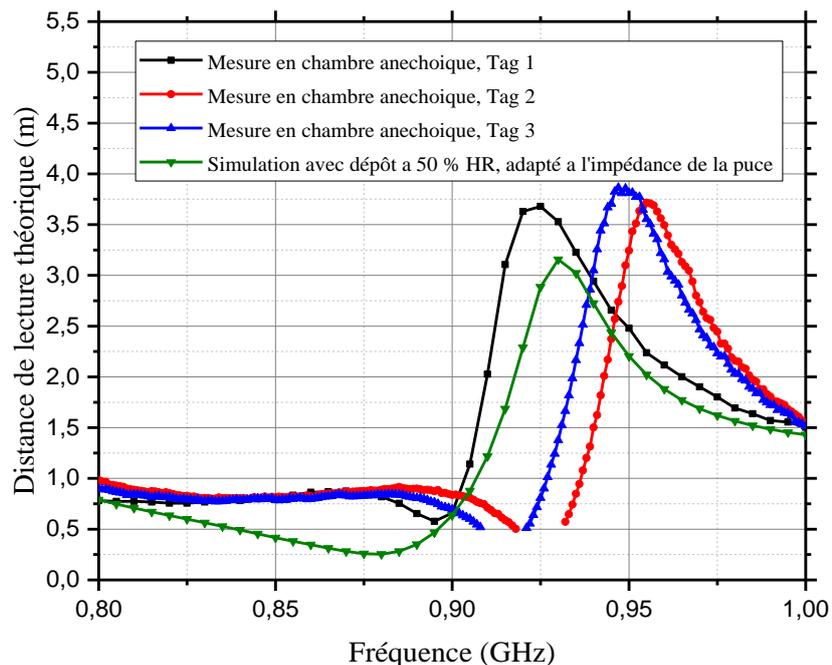


Figure 2-39: Comparaison mesures en chambre anéchoïque et simulation CST du capteur-RFID

Toutefois, on peut noter un écart significatif de fréquence de résonance entre la mesure réalisée avec le Tag 1 et celle réalisée sur le Tag 2. Ceci est principalement dû aux variations d'épaisseur du dépôt du gluten de blé. En effet, nous avons observé que le substrat flexible n'adhère pas correctement à la surface plane lors du dépôt avec la barre de Meyer et crée de légères aspérités qui ne permettent pas de conserver une bonne homogénéité du dépôt. Ceci n'est pas gênant pour notre application, puisque nous allons considérer que chaque tag est unique et calibré indépendamment. Les points manquants sur les courbes de mesures du Tag 2 et 3, sont dus à la limitation en puissance du lecteur utilisé [33] qui ne peut fournir plus de 28 dBm.

2.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit de manière détaillée la stratégie de détection basée sur la variation de permittivité du gluten de blé en fonction de l'humidité. Nous avons également mené une étude paramétrique pour mieux comprendre le design du capteur RFID, ce qui nous a permis de converger vers une géométrie optimale garantissant une bonne sensibilité. Les simulations liées aux variations d'humidité relative nous ont également permis de prédire le comportement (la désadaptation) du capteur-RFID. Pour des variations d'humidité de 20 % à 90%, nous observons une variation significative de la fréquence de résonance qui passe de 928 MHz à 860 MHz. Le capteur RFID a été conçu pour fonctionner en bande nord-américaine, dont la fréquence de détection peut varier de 902MHz à 928MHz. À faible humidité la fréquence de résonance est de 928MHz et le capteur présente un gain réalisé de 0.8 correspondant à une distance théorique de 3.5m ce qui est relativement performant dans le cadre de l'application visée. Dans le chapitre suivant, nous allons étalonner et valider l'utilisation du capteur-RFID en tant que capteur d'humidité à l'aide d'un banc de mesure en environnement contrôlé. Puis, nous exposerons le travail effectué pour rendre le gluten de blé notre capteur-RFID au moyen d'un lecteur RFID standard.

2.6 Références

- [1] C. A. Balanis, *Antenna theory: analysis and design*, 3rd ed. Hoboken, NJ: John Wiley, 2005.
- [2] « UCODE® | NXP ». [En ligne]. Disponible sur: https://www.nxp.com/products/identification-and-security/smart-label-and-tags/ucode:MC_50483.
- [3] G. Marrocco, « The art of UHF RFID antenna design: Impedance-matching and size-reduction techniques », *IEEE Antennas Propag. Mag.*, vol. 50, n° 1, 2008.
- [4] D. M. Dobkin, *The RF in RFID: passive UHF RFID in practice*. Amsterdam ; Boston: Elsevier / Newnes, 2008.
- [5] A. Rida, L. Yang, et M. M. Tentzeris, *RFID-enabled sensor design and applications*. Boston: Artech House, 2010.
- [6] K. Finkenzeller, « RFID Handbook: Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards, Radio Frequency Identification and Near-Field Communication, Third Edition », p. 480.
- [7] R. FOURNIÉ, « Bases théoriques ».
- [8] « Matériaux textiles fonctionnels et intelligents - Conduction électrique ». [En ligne]. Disponible sur: https://campus.mines-douai.fr/pluginfile.php/13739/mod_resource/content/0/CH1_fr_mai_2013/co/cours_ch1_1_1_fr.html.
- [9] S. Orłowska, « Conception et prédiction des caractéristiques diélectriques des matériaux composites à deux et trois phases par la modélisation et la validation expérimentale », Ecole Centrale de Lyon, 2003.
- [10] J.-M. Bureau, « Propriétés diélectriques des polymères », p. 25, 2016.
- [11] P. Lorrain, D. R. Corson, et F. Lorrain, *Les phénomènes électromagnétiques*. Dunod, 2002.
- [12] C. Liang, « Caractérisations électriques de polymères conducteurs intrinsèques Polyaniline/Polyuréthane dans une large gamme de fréquence (DC à 20 GHz) », 2010.
- [13] M. T. Grati, « Développement d'un système actif pour la mesure de la permittivité complexe des matériaux », p. 96.
- [14] J.-P. Manceau, « Etude du phénomène de relaxation diélectrique dans les capacités Métal-Isolant-Métal. », Université Joseph-Fourier-Grenoble I, 2008.
- [15] F. Bibi, *Etude des propriétés diélectriques à haute fréquence d'un polymère végétal : le gluten de blé, et utilisation comme biocapteur de marqueurs environnementaux de la qualité des aliments dans des systèmes RFID passifs*. Montpellier, 2015.
- [16] N. Gontard, R. Thibault, B. Cuq, et S. Guilbert, « Influence of relative humidity and film composition on oxygen and carbon dioxide permeabilities of edible films », *J. Agric. Food Chem.*, vol. 44, n° 4, p. 1064–1069, 1996.
- [17] « Euroquality | Deux nouveaux projets gagnés par Euroquality ces derniers jours ! » [En ligne]. Disponible sur: <http://euroquality.fr/fr/2018/07/10/two-new-energy-projects-won-by-euroquality-this-past-few-days/>.
- [18] 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 », *Sens. Actuators Phys.*, vol. 247, p. 355- 367, août 2016.
- [19] 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. Actuators B Chem.*, vol. 230, p. 212- 222, juill. 2016.
- [20] I. Bord, « Etude d'un capteur capacitif différentiel pour la détection de pluie », p. 209.

- [21] F. Gustrau et D. Manteuffel, *EM Modeling of Antennas and RF Components for Wireless Communication Systems*. Springer Science & Business Media, 2006.
- [22] S. Chisca, I. Sava, V. E. Musteata, et M. Bruma, « Dielectric and conduction properties of polyimide films », in *CAS 2011 Proceedings (2011 International Semiconductor Conference)*, 2011, vol. 2, p. 253- 256.
- [23] R. D. Rusu, M. D. Damaceanu, M. Bruma, et A. Müller, « Dielectric properties of thin polyimide films », in *CAS 2010 Proceedings (International Semiconductor Conference)*, 2010, vol. 02, p. 363- 366.
- [24] H. Huang, « Flexible Wireless Antenna Sensor: A Review », *IEEE Sens. J.*, vol. 13, n° 10, p. 3865- 3872, oct. 2013.
- [25] S. Y. Xiao, L. F. Che, X. X. Li, et Y. L. Wang, « A novel fabrication process of MEMS devices on polyimide flexible substrates », *Microelectron. Eng.*, vol. 85, n° 2, p. 452- 457, févr. 2008.
- [26] M. MAGICSTRAP, « MAGICSTRAP® Technical Data Sheet Murata part number : LXMS31ACNA / LXMS31ACMD », p. 8, 2012.
- [27] N. J. Kidner, Z. J. Homrighaus, T. O. Mason, et E. J. Garboczi, « Modeling interdigital electrode structures for the dielectric characterization of electroceramic thin films », *Thin Solid Films*, vol. 496, n° 2, p. 539- 545, févr. 2006.
- [28] D. K. Ghodgaonkar, V. V. Varadan, et V. K. Varadan, « Free-space measurement of complex permittivity and complex permeability of magnetic materials at microwave frequencies », *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 39, n° 2, p. 387- 394, avr. 1990.
- [29] F. Moukanda Mbango, « Contribution A La Caractérisation des Matériaux Utilisés en Micro'électronique RadioFréquence », JOSEPH FOURIER, Grenoble, 2008.
- [30] D. Dimos, M. V. Raymond, R. W. Schwartz, H. N. Al-Shareef, et C. H. Mueller, « Tunability and calculation of the dielectric constant of capacitor structures with interdigital electrodes », *J. Electroceramics*, vol. 1, n° 2, p. 145-153, 1997.
- [31] S. S. Gevorgian, T. Martinsson, P. L. Linner, et E. L. Kollberg, « CAD models for multilayered substrate interdigital capacitors », *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 44, n° 6, p. 896-904, 1996.
- [32] *Cibel*, 03-janv-2013. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.cibel.com/fr>.
- [33] « Tagformance Lite », *Voyantic*. [En ligne]. Disponible sur: <http://voyantic.com/products/tagformance-lite>.

Chapitre 3

Validation & Méthodologie d'extraction de l'information du capteur-RFID

Sommaire

| | | |
|-------------------|---|------------|
| Chapitre 3 | <i>Validation & Méthodologie d'extraction de l'information du capteur-RFID.....</i> | 94 |
| 3.1 | Introduction | 96 |
| 3.2 | Stratégie de récupération de l'information du capteur-RFID | 97 |
| 3.2.1 | Comment extraire une information capteur à partir de la fonctionnalisation d'une antenne RFID ?..... | 97 |
| 3.2.1.1 | La communication entre le lecteur RFID et le Tag RFID..... | 97 |
| 3.2.1.2 | Les paramètres clés pour l'extraction d'une information capteur | 98 |
| 3.2.2 | Comment fiabiliser l'information extraite ? | 100 |
| 3.2.2.1 | Identification des perturbations de communication RFID | 100 |
| 3.2.2.2 | Solutions pour s'affranchir des perturbations de communication RFID | 101 |
| 3.2.2.3 | Présentation de la solution utilisée | 102 |
| 3.2.3 | Modèle mathématique pour la récupération de l'information capteur | 102 |
| 3.2.3.1 | Modèle mathématique..... | 103 |
| 3.2.3.2 | Méthodologie utilisée pour la modélisation en bande nord-américaine | 105 |
| 3.3 | Mesures et caractérisations du capteur-RFID | 106 |
| 3.3.1 | Protocole et banc de mesure pour capteur-RFID | 106 |
| 3.3.1.1 | Description du banc de mesure expérimental | 106 |
| 3.3.1.2 | Protocole de mesure | 108 |
| 3.3.2 | Résultats de mesures du capteur-RFID en environnement contrôlé | 109 |
| 3.3.3 | Caractéristiques d'étalonnage du capteur-RFID | 110 |
| 3.3.3.1 | Répétabilité | 110 |
| 3.3.3.2 | Reproductibilité..... | 110 |
| 3.3.3.3 | Hystérésis | 111 |
| 3.3.3.4 | Sensibilité / robustesse | 112 |
| 3.3.4 | Les limites en température de notre capteur RFID | 114 |
| 3.4 | Validation des modèles analytiques pour l'extraction de l'humidité à l'aide d'un lecteur RFID standard | 115 |
| 3.4.1 | Construction du modèle analytique basé sur la technique de régression linéaire simple | 115 |
| 3.4.2 | Construction du modèle analytique basé sur la technique de régression multilinéaire | 116 |
| 3.4.3 | Utilisation des modèles analytiques pour l'estimation de valeurs d'humidités | 117 |
| 3.4.4 | Utilisation d'un lecteur RFID standard..... | 118 |
| 3.4.4.1 | Performances et limitations des lecteurs RFID standard | 118 |
| 3.4.4.2 | Mise en œuvre et validation d'un système de mesure de capteurs RFID à partir d'un lecteur standard | 120 |
| 3.5 | Conclusion | 124 |
| 3.6 | Références | 125 |

3.1 Introduction

Le véritable apport de notre système RFID ne vient pas de la simple lecture des étiquettes afin d'avoir un identifiant unique, mais de l'obtention d'une information capteur, liée à l'environnement de l'étiquette, et ce, dans un format exploitable. Nous avons réalisé notre antenne RFID avec un dépôt de gluten de blé positionné judicieusement. Des études précédentes ont montré que ce biopolymère est sensible à l'humidité [1]. Dans notre configuration les variations de l'humidité engendrent des variations des propriétés diélectriques du gluten de blé, ce qui a pour effet de désadapter l'antenne du tag RFID et d'en altérer sa réponse. L'enjeu principal de ce chapitre est donc de valider le capteur-RFID UHF passif dans un environnement climatique contrôlé avec une humidité variable entre 30 et 90 % et une température constante de 22°C notamment au moyen d'un lecteur RFID standard du commerce. Cette validation doit donc permettre l'extraction de l'information capteur tout en s'affranchissant des contraintes liées à l'environnement du tag telles que la propagation par trajets multiples, le masquage, la présence d'objets réflecteurs, les interférences liées aux autres appareils radio fonctionnant sur les mêmes fréquences.

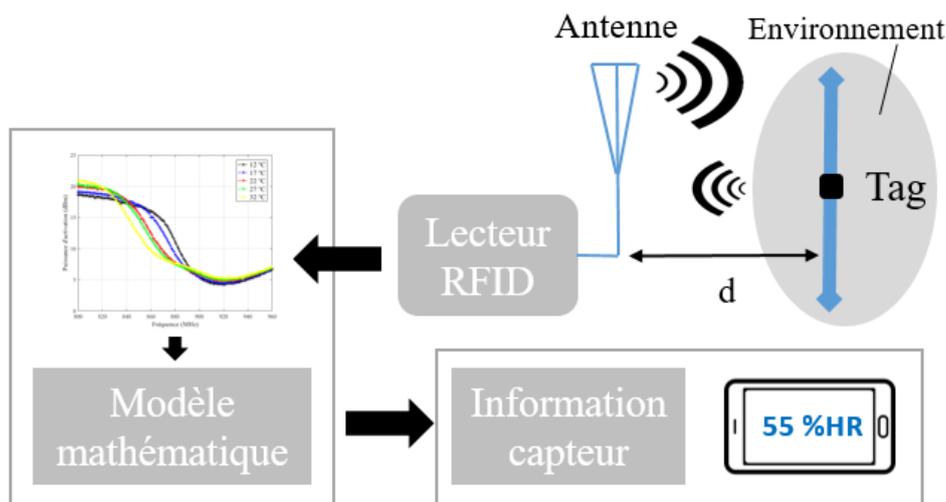


Figure 3-1: Illustration de la stratégie de récupération d'information capteur à l'aide d'un lecteur RFID du commerce

Dans la Figure 3-1 nous illustrons la stratégie de récupération de l'information capteur, provenant de notre capteur-RFID UHF passif avec antenne fonctionnalisée, exposé à un environnement contrôlé. Dans la première partie de ce chapitre, nous allons expliquer le principe de détection en commençant par : la mise en évidence des paramètres de l'antenne les plus affectés par le mesurande, puis nous allons présenter différentes techniques pour fiabiliser cette information (où comment s'affranchir de certains paramètres « parasites » qui influencent la mesure). Pour finir, nous discuterons sur le choix d'un modèle mathématique pour extraire le mesurande à partir des paramètres d'antenne affectés. Dans la seconde partie, nous entrons un peu plus dans le détail de la mise en forme du modèle en commençant par l'étalonnage du capteur-RFID à l'aide du banc de mesure. Nous traiterons ensuite de l'extraction et de la validation du modèle permettant d'obtenir une estimation de la valeur de l'humidité extraite à l'aide d'un lecteur RFID conventionnel.

3.2 Stratégie de récupération de l'information du capteur-RFID

3.2.1 Comment extraire une information capteur à partir de la fonctionnalisation d'une antenne RFID ?

3.2.1.1 La communication entre le lecteur RFID et le Tag RFID

Les données transmises du tag vers le lecteur sont codées numériquement et transportées par l'onde électromagnétique. Des perturbations dues à l'environnement du tag (mais aussi les objets proches, la distance de lecture et l'orientation des antennes) et au canal de communication (multiples trajets, réflexions...) influencent la rétro-modulation de manière analogique [2]. Il paraît donc possible en exploitant certains paramètres clés de la réponse du tag de remonter à une information capteur. Cette information peut être extraite à partir des différentes puissances mises en œuvre lors d'une communication entre un lecteur et un capteur-RFID comme illustrée Figure 3-2.

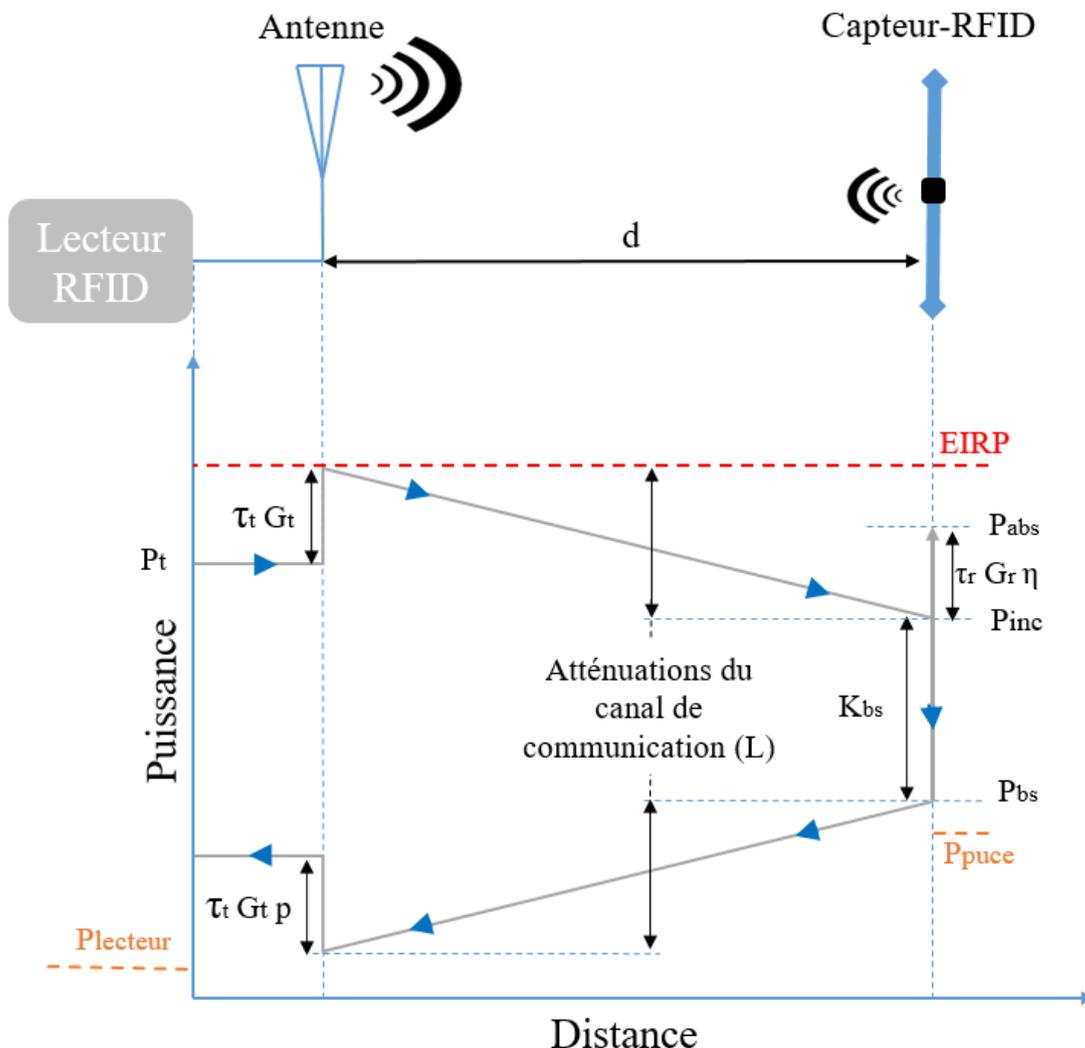


Figure 3-2: Diagramme des puissances échangées entre un lecteur et un tag RFID [3]

La puissance délivrée par le lecteur RFID est limitée par les autorités de régulations compétentes dans chaque région du globe. La puissance maximale rayonnée isotrope EIRP est de 4W en Amérique du nord et 3.28W en bande européenne. Pour rappel, la puissance EIRP est définie par l'équation (3. 2).

$$P_{EIRP} = P_t \cdot G_t \cdot \tau_t \quad (3. 2)$$

P_t : Puissance d'émission du lecteur vers son antenne

G_t : Gain de l'antenne

τ_t : Coefficient de transmission

C'est donc avec cette puissance rayonnée que le lecteur envoie sa requête, qui traverse le canal de transmission et subit une atténuation L , avant d'atteindre l'antenne du tag avec une puissance P_{inc} de (3. 3).

$$P_{inc} = P_{EIRP} \cdot L \quad , \text{avec} : L = \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (3. 3)$$

La puissance absorbée par le tag (P_{abs}) est utilisée dans un premier temps pour alimenter la puce RFID (3. 4) et dépend du gain de l'antenne G_r , des coefficients de polarisation η et de transmission τ_r . Dans le cas des tags RFID passifs, la puissance absorbée doit être supérieure ou égale au seuil d'activation de la puce. C'est donc cette équation qui nous permet de déduire la distance maximale de détection théorique.

$$P_{abs} = P_{inc} \cdot \eta \cdot G_r \cdot \tau_r \quad (3. 4)$$

Puis, dans un second temps l'onde est rétro-modulée (3. 5) afin de produire une réponse qui dépend du paramètre d'antenne nommé section équivalente radar (SER) ou « rada cross section » (RCS) en anglais. Dans l'équation (3.5), K_{bs} est le gain de rétrodiffusion qui détermine la puissance redirigée vers la source [3], [4]. Nous détaillerons son utilisation dans le paragraphe suivant.

$$P_{bs} = P_{inc} \cdot K_{bs} \quad (3. 5)$$

Par la suite, l'onde rétrodiffusée traverse le canal de communication (atténuation, polarisation) pour atteindre l'antenne du lecteur RFID. La puissance en réception doit être au-dessus du seuil de sensibilité du lecteur RFID (typiquement entre -50dBm et -70dBm).

$$P_{rec} = P_{bs} \cdot L \cdot \eta \cdot G_t \cdot \tau_t \quad (3. 6)$$

3.2.1.2 Les paramètres clés pour l'extraction d'une information capteur

La puissance de transmission du lecteur nécessaire à l'activation du tag notée $P_t^{activation}[\psi]$ ainsi que la puissance de rétro-modulation de la puce reçue par le lecteur lorsque celle-ci est activée $P_r^{activation}[\psi]$ sont deux paramètres accessibles côté lecteur RFID qui dépendent du gain de l'antenne du capteur et de l'adaptation avec la puce. Ces deux paramètres varient en fonction du mesurande noté ψ dans les équations qui suivent. Nous allons maintenant les détailler pour comprendre comment nous pouvons les utiliser pour en extraire une information capteur fiable [5].

- Puissance de transmission du lecteur pour l'activation de la puce RFID ($P_t^{activation}$)

En fonction des paramètres d'influences comme l'orientation (l'angle d'ouverture de l'antenne θ et l'angle de polarisation ϕ entre l'antenne d'émission et de réception) et la distance d , la puissance de transmission du lecteur pour l'activation de la puce est définie dans [5] de la manière suivante :

$$P_t^{activation}[\psi] = \left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2 \frac{P_{puce}}{G_{lecteur}(\theta, \phi)\eta_{pol}G_{capteur-RFID}(\theta, \phi)[\psi]\tau[\psi]} \quad (3.7)$$

Cette équation est tirée de l'équation de Friis. Elle est donnée en fonction de la longueur d'onde λ , du gain de l'antenne lecteur $G_{lecteur}(\theta, \phi)$, des pertes de polarisation η_{pol} et également du paramètre lié au mesurande ψ , qui influence à la fois le gain de l'antenne du tag $G_{capteur-RFID}(\theta, \phi)[\psi]$, et le coefficient de transmission de l'antenne vers la puce $\tau[\psi]$ (3.8).

$$\tau[\psi] = \frac{4R_{puce}R_{ant}[\psi]}{|Z_{puce} + Z_{ant}[\psi]|^2} \quad (3.8)$$

Le mesurande influence plusieurs paramètres de l'antenne du capteur-RFID dont le gain et l'impédance. Ces variations impactent directement la puissance $P_r^{activation}$. Cette dernière est accessible par le lecteur lors de la communication avec le capteur-RFID. Par la suite nous utiliserons principalement ce paramètre pour extraire la valeur du mesurande.

- Puissance rétrodiffusée reçu par le lecteur à l'activation du tag ($P_r^{activation}$)

Les variations du mesurande vont également influencer la valeur de la puissance rétrodiffusée reçu par le lecteur lors de la réponse du tag. Lorsque la puissance de transmission du lecteur correspond à $P_t^{activation}$ nous notons la puissance reçue par le lecteur $P_r^{activation}$ définie dans [5] par l'équation (3.9) :

$$P_r^{activation}[\psi] = \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^4 P_t^{activation}[\psi]G_{lecteur}^2(\theta, \phi)\eta_{pol}^2G_{capteur-RFID}^2(\theta, \phi)[\psi]p[\psi] \quad (3.9)$$

La puissance rétrodiffusée est souvent utilisée en tant qu'indicateur de l'intensité du signal reçu par le lecteur et est connue sous le terme anglais « Received Signal Strength Indication » (RSSI).

Dans l'équation (3.9) $p[\psi]$ représente un coefficient de réflexion en puissance fonction de la valeur de l'impédance $Z_{ant}[\psi]$ [4] définie par l'équation (3.10).

$$p[\psi] = \tau[\psi] \frac{R_{ant}[\psi]}{R_{puce}} \quad (3.10)$$

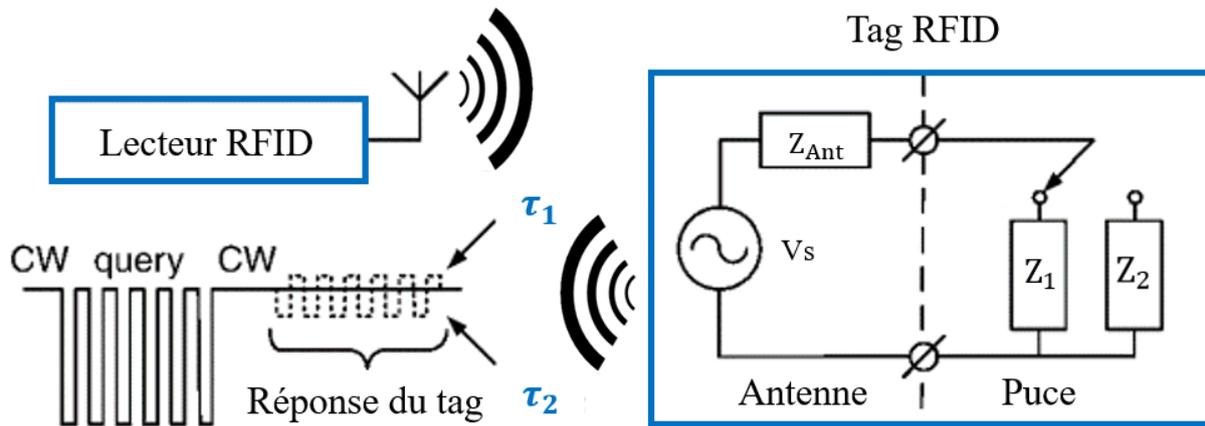


Figure 3-3: retromodulation en UHF passive, par changement de charge [4]

Pendant la communication du tag vers le lecteur, l'impédance de la puce est modulée suivant deux valeurs différentes Z_1 et Z_2 (voir Figure 4-3) ce qui a pour effet de moduler la puissance rétrodiffusée vers le lecteur. L'état Z_1 correspond à un état de faible impédance qui correspond à la valeur fournie dans les documentations constructeur, Z_2 est considéré comme un état haute impédance. L'indicateur RSSI est déterminé à partir de la puissance reçue lorsque la puce se trouve dans l'état de faible impédance Z_1 [5]. Dans un lecteur RFID conventionnel nous avons accès à ces deux paramètres de la manière suivante :

- La puissance de transmission est fixée par une commande logicielle. Il suffit de générer un balayage en puissance pour déterminer $P_t^{activation}[\psi]$
- L'indicateur RSSI est accessible sur la plupart des lecteurs à la suite d'une commande de type « inventory ». Lorsque $P_t^{activation}[\psi]$ est déterminée, le RSSI correspond à a valeur de puissance $P_r^{activation}[\psi]$

3.2.2 Comment fiabiliser l'information extraite ?

3.2.2.1 Identification des perturbations de communication RFID

L'un des grands enjeux de ce type de capteur-RFID UHF passif avec fonctionnalisation d'antenne, est de s'affranchir des interférences comme illustrées en Figure 3-4. Ces interférences peuvent être classées suivant deux catégories :

- Les sources d'interférences du canal de communication (Figure 3-4 a) entre un lecteur et un tag RFID : elles sont dues aux variations de gain $\{\delta G_R, \delta G_T\}$, de polarisation $\{\delta P\}$, de distance $\{\delta d\}$, de l'instrumentation et de l'environnement $\{\delta \xi\}$ [5].
- Les sources d'interférences liées à l'environnement proche du capteur-RFID (Figure 3-4 b) : elles sont dues aux objets posés à proximité du capteur-RFID ou liées à un paramètre physique ou chimique qui pourraient avoir une incidence directe (agissant sur l'antenne) ou indirecte (agissant sur le matériau sensible) sur la mesure.

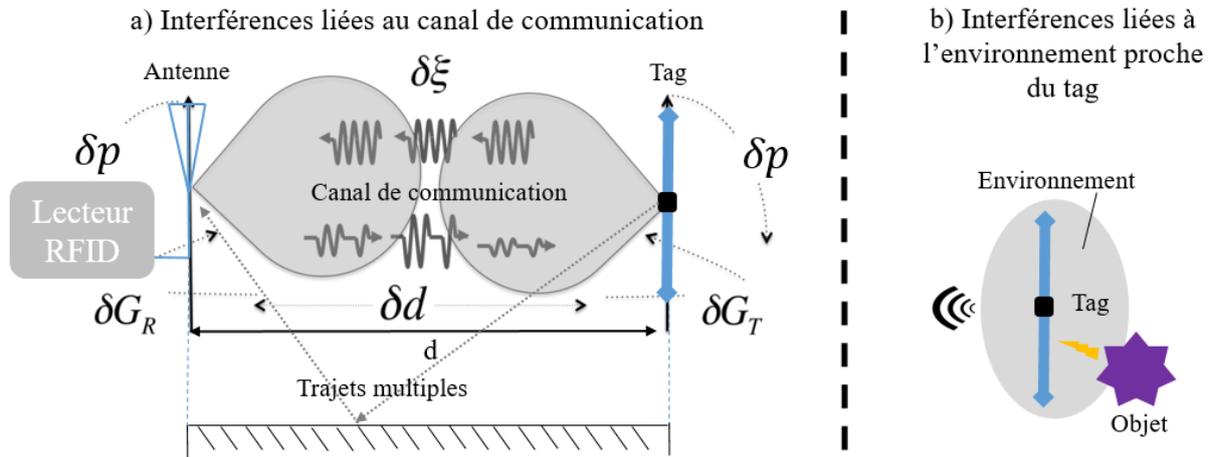


Figure 3-4: Sources d'interférences a) d'un canal de communication entre un lecteur et un tag RFID à des fins de détection, dues aux variations du gain $\{\delta G_R, \delta G_T\}$, de la polarisation $\{\delta P\}$, de la distance $\{\delta d\}$, de l'instrumentation et de l'environnement $\{\delta \xi\}$. b) de l'environnement proche du capteur-RFID [6].

3.2.2.2 Solutions pour s'affranchir des perturbations de communication RFID

- Technique de l'identifiant analogique (en anglais, *Analog Identifier (AID)*)

Le long d'un trajet de communication entre un lecteur et un tag RFID, le champ électromagnétique est affecté par son environnement notamment par masquage ou réflexion sur des objets, le sol, le plafond ou les murs, mais également par des mouvements du tag RFID ou de son lecteur (par exemple lors d'une lecture dynamique avec un lecteur portable).

Une étude rapportée dans [6], [7], a permis de développer une technique d'extraction des données de mesure de capteur RFID passif en se basant sur le concept d'identifiant analogique (AID). L'identifiant analogique présenté dans l'équation (3. 11), combine la puissance minimum d'activation de la puce et la puissance rétrodiffusée à l'activation, de manière à supprimer l'influence des variations de gain, de distance et de polarisation.

$$AID[\psi] = \frac{P_{puce}}{\sqrt{P_r^{activation} P_t^{activation}}} \rightarrow \frac{2R_{puce}}{|Z_{puce} + Z_{ant}[\psi]|} \quad (3. 11)$$

Comme on peut le voir sur la seconde partie de l'équation (3. 11), l'information de détection noté ψ , se retrouve seulement sur l'impédance de l'antenne ($Z_{ant}[\psi]$). Cet identifiant analogique nous permet donc de s'affranchir de toutes les influences liées au canal de communication.

Dans le cadre de cette thèse, nous n'avons pas eu à utiliser cet identifiant analogique puisque toutes nos expériences ont été effectuées à distance fixe entre l'antenne du lecteur et le capteur RFID.

- Technique de la lecture différentielle

Dans le cas d'un capteur-RFID passif, la technique de la lecture différentielle est très utile. En effet, ce type de capteur a plusieurs paramètres d'influences dont en particulier, l'antenne et le dépôt sensible éventuellement présent sur celle-ci. Dans certaines

situations une perturbation extérieure peut influencer l'antenne sans influencer le dépôt sensible. Par exemple lors du rapprochement d'un objet métallique, les propriétés diélectriques du dépôt ne varieront pas alors que l'impédance de l'antenne est fortement influencée. Pour s'affranchir de ce type de perturbations, il existe une technique nommée mesure différentielle [8], illustrée par la Figure 3-5.

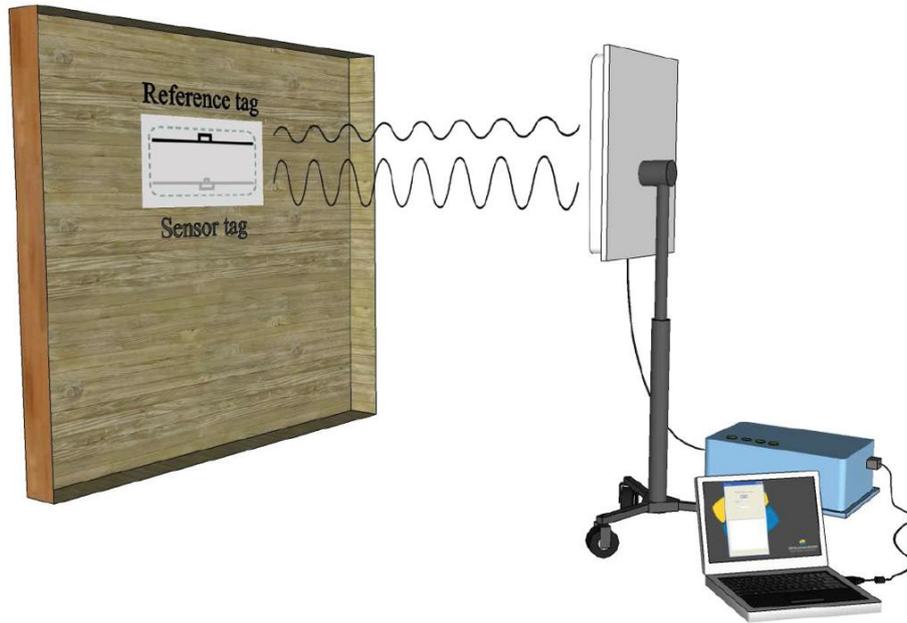


Figure 3-5: Illustration du concept de mesure différentielle [10]

Elle consiste à utiliser un tag RFID de référence dans l'environnement proche du capteur RFID. Dans ce cas, pour extraire une donnée capteur nous avons besoins de connaître $P_{t,capteur}^{activation}[\psi]$ et $P_{t,reference}^{activation}[\psi]$ qui sont respectivement la puissance de transmission nécessaire à l'activation du capteur et du tag de référence. À partir de ces deux valeurs nous pouvons obtenir une mesure relative de la puissance de transmission nécessaire à l'activation du capteur [9]–[11] nommée $P_{t,relative}^{activation}[\psi]$ et décrite par l'équation (3.11). Cette technique permet de compenser les perturbations liées à la fois à l'environnement proche du capteur, et au canal de communication.

$$P_{t,relative}^{activation}[\psi] = \frac{P_{t,capteur}^{activation}[\psi, \xi]}{P_{t,reference}^{activation}[\xi]} \quad (3.12)$$

Il est donc possible d'extraire une information capteur ψ plus fiable, Cependant, comme l'ensemble du système se compose de deux tags (tag capteur et tag référence) cela peut devenir problématique par son encombrement et son coût pour un déploiement industriel.

3.2.2.3 Présentation de la solution utilisée

3.2.3 Modèle mathématique pour la récupération de l'information capteur

Nous étudions ici une technique d'extraction de l'information capteur basée sur la construction d'un modèle mathématique (voir Figure 3-6) à partir des deux puissances $P_r^{activation}[\psi]$ et $P_t^{activation}[\psi]$ présentées dans le paragraphe 3.2.1.2. Pour cela nous avons

décidé de travailler sur la mesure de l'Humidité Relative (HR%). L'objectif est donc d'extraire la valeur de l'humidité via notre capteur-RFID, de manière la plus fiable possible, à l'aide d'un lecteur RFID conventionnel.

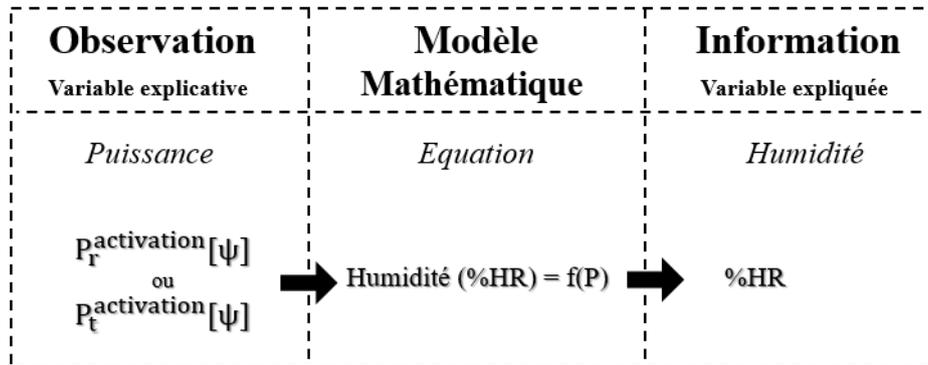


Figure 3-6: Choix est composition du modèle pour l'extraction de l'humidité

Le capteur-RFID décrit dans le chapitre précédent a été optimisé pour fonctionner dans la bande de fréquence nord-américaine, permettant de disposer de 50 canaux de communications contre seulement 4 pour la bande de fréquence européenne. Dans cette bande, c'est la « Federal Communication Commission » (FCC) qui est responsable de la mise à jour des réglementations concernant l'utilisation des canaux de communications radiofréquences. Les systèmes RFID fonctionnant dans la bande FCC, sont régulés selon la section 15 (15.1 à 15.717) [12, p. 15]. C'est dans la section 15.247 que nous avons une description détaillée de l'utilisation des canaux de communication présentée dans le Tableau 3-1. Nous avons 50 canaux, répartis dans la bande 902,5 MHz à 927,5 MHz chaque canal ayant une largeur de 500 kHz.

Tableau 3-1: réglementation des canaux de la bande US, FCC section 15.247[12, p. 15]

| FCC Part 15 (US) | | |
|------------------|------------|----------|
| Channel No. | Frequency | E.I.R.P. |
| 1 | 902.75 MHz | ≤ 4.00 W |
| 2 | 903.25 MHz | ≤ 4.00 W |
| 3 | 903.75 MHz | ≤ 4.00 W |
| 4 | 904.25 MHz | ≤ 4.00 W |
| ... | ... | ... |
| 47 | 925.75 MHz | ≤ 4.00 W |
| 48 | 926.25 MHz | ≤ 4.00 W |
| 49 | 926.75 MHz | ≤ 4.00 W |
| 50 | 927.25 MHz | ≤ 4.00 W |

3.2.3.1 Modèle mathématique

Il existe plusieurs types de modèles mathématiques, notamment la régression, ce terme regroupe un ensemble de méthodes statistiques permettant d'analyser la relation entre une variable par rapport à une ou plusieurs autres. La régression peut être linéaire ou polynomiale, (entre autres), dans le cas de la régression linéaire le modèle a pour objectif de chercher à établir une relation de type linéaire entre une variable dite expliquée (appelé régression linéaire simple) et une ou plusieurs variables dites explicatives (appelé régression linéaire multiple). Le modèle mathématique est également composé d'un estimateur, l'estimateur le plus connu en régression linéaire est appelé la méthode

des moindres carrés, mais nous pouvons également citer, le maximum de vraisemblance ou encore la table de correspondance (*lookup table* en anglais).

Le modèle mathématique utilisé dans cette étude est la régression linéaire, cette dernière est toujours composé d'une variable Y « variable expliquée », dans notre cas, la réponse estimée par notre modèle (valeur de l'humidité). Et d'une variable X , « variable explicative », qui dans notre cas est représentée par une des deux valeurs de puissances ($P_r^{activation}[\psi]$ ou $P_t^{activation}[\psi]$), pour chaque humidité extraite lors de l'étalonnage du capteur-RFID. Dans le cas de la récupération d'une information capteur a fréquence fixe (par exemple à 915 MHz) on souhaite établir une relation entre les deux variables suivantes : la puissance et l'humidité relative comme illustré Figure 3-7. L'utilisation de la régression linéaire simple (équation affine) s'avère suffisante.

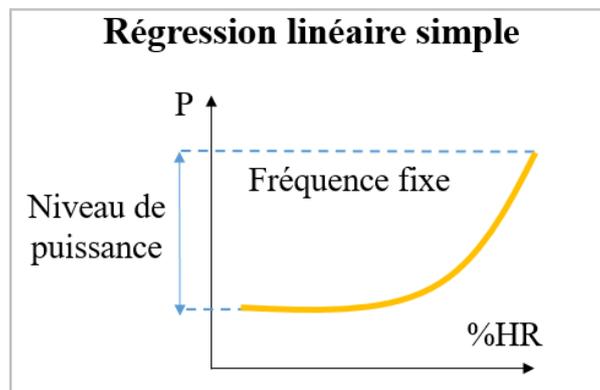


Figure 3-7: Modèle schématique utilisé a fréquence fixe sous forme de régression linéaire simple

Par contre, dans le cas de la récupération d'une information capteur sur toute une bande de fréquence (dans la bande de fréquence nord-américaine), nous souhaitons établir une relation entre deux variables comme pour le modèle mathématique a fréquence fixe, mais pour toute une bande de fréquence (voir Figure 3-8). Dans ce cas, pour N points de fréquences, la dimension de la variable d'entrée X est égale à N , tandis que la variable de sortie est de dimension 1. Nous utilisons donc dans ce cas précis la régression linéaire multiple [13].

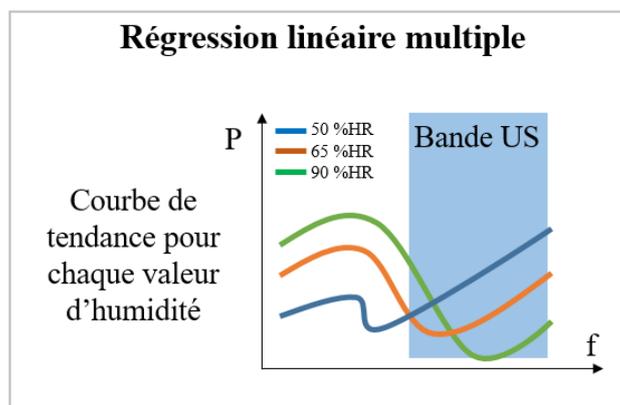


Figure 3-8 : Modèle schématique utilisé dans la bande US sous forme de régression linéaire multiple matricielle

3.2.3.2 Méthodologie utilisée pour la modélisation en bande nord-américaine

Les 50 canaux proposés dans la bande nord-américaine nous permettent de récupérer plusieurs points de mesure dans la bande de fonctionnements de notre capteur-RFID. Afin d'obtenir la valeur de l'humidité à l'aide d'un lecteur du commerce, nous avons sélectionné 6 points de mesures : 900 MHz, 905 MHz, 910 MHz, 915 MHz, 920 MHz, 925 MHz, et ce pour chacune des 6 valeurs d'humidités : 30%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90% (voir Figure 3-8). Le modèle considéré est le suivant [13]:

$$Y = aX + \varepsilon \quad (3.13)$$

La variable Y définie dans (3.13) est la valeur de l'humidité estimée. La matrice X définie dans (3.14) est liée à l'étalonnage du capteur, et est composée de nos 6 points de mesures en fréquence d'indice q et de n courbes de mesures en d'humidité.

$$X = \begin{bmatrix} 1 & X_1^1 & X_1^2 & \cdots & X_1^q \\ 1 & X_2^1 & X_2^2 & \cdots & X_2^q \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & X_n^q & X_n^q & \cdots & X_n^q \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Le résidu ε dans l'équation (3.15) est défini comme étant la différence entre la valeur observée Y et la valeur prédite \hat{Y} par le modèle. Par la suite nous utiliserons le résidu afin d'estimer le taux d'erreur.

$$\varepsilon = Y - \hat{Y} \quad (3.15)$$

Le vecteur A représenté par l'équation (3.16) contient les coefficients du modèle à estimer.

$$A = \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_q \end{bmatrix} = Y \times X^{-1} \quad (3.16)$$

Les étapes de conception et d'utilisation du modèle mathématique sont les suivantes :

1. Mise en forme du modèle analytique
 - Étalonnage du capteur-RFID dans la bande nord-américaine pour différentes valeurs d'humidité. Les différents cycles de mesures sont présentés dans la section suivante.
 - Extraction du vecteur A du modèle en utilisant les données de l'étalonnage. Le vecteur A peut être construit soit à partir de $P_t^{activation}[\psi]$ (en mW ou en dBm), soit à partir de $P_r^{activation}[\psi]$ (en mW ou en dBm), comme illustré en Figure 3-9.

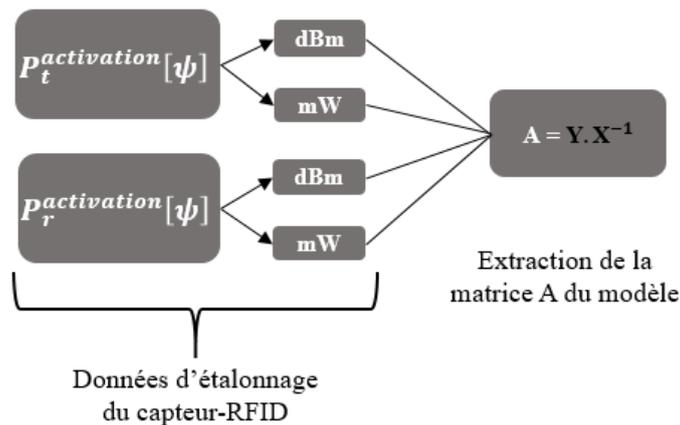


Figure 3-9: Mise en forme du modèle analytique

2. Estimation de l'humidité (illustré Figure 3-10)

- En se replaçant dans les mêmes conditions que lors de l'étalonnage du capteur-RFID, faire une mesure de la puissance dans la bande de fréquence nord-américaine pour une humidité aléatoire.
- Estimation de la valeur de l'humidité par le modèle mathématique (vecteur A précédemment calculé), avec comparaison et analyse de l'erreur.



Figure 3-10: Estimation de l'humidité

3.3 Mesures et caractérisations du capteur-RFID

Avant d'utiliser le modèle mathématique décrit plus haut, le capteur-RFID a été caractérisé dans un environnement contrôlé (humidité et température) afin, dans un premier temps de valider les résultats obtenus en simulation (présenté dans le chapitre 2). Cette caractérisation permet également d'évaluer les performances du capteur (sensibilité, hystérésis, reproductibilité, temps de réponse, limites en température) et sa courbe d'étalonnage. Nous utiliserons ces résultats de caractérisation dans la dernière partie de ce chapitre pour l'extraction de l'humidité à l'aide d'un lecteur RFID standard.

3.3.1 Protocole et banc de mesure pour capteur-RFID

3.3.1.1 Description du banc de mesure expérimental

Le banc de mesure représenté Figure 3 11 a été mis au point et automatisé à l'aide du logiciel LabVIEW, afin de caractériser notre capteur-RFID en fonction des variations de l'humidité relative pour une température constante. Le logiciel d'automatisation contrôle à la fois une enceinte climatique et un lecteur RFID pour lancer l'acquisition des données du capteur RFID à intervalles réguliers (période de 10min à 1h) pour différentes consignes d'humidité (30% à 90% d'humidité relative avec un pas de 10%).

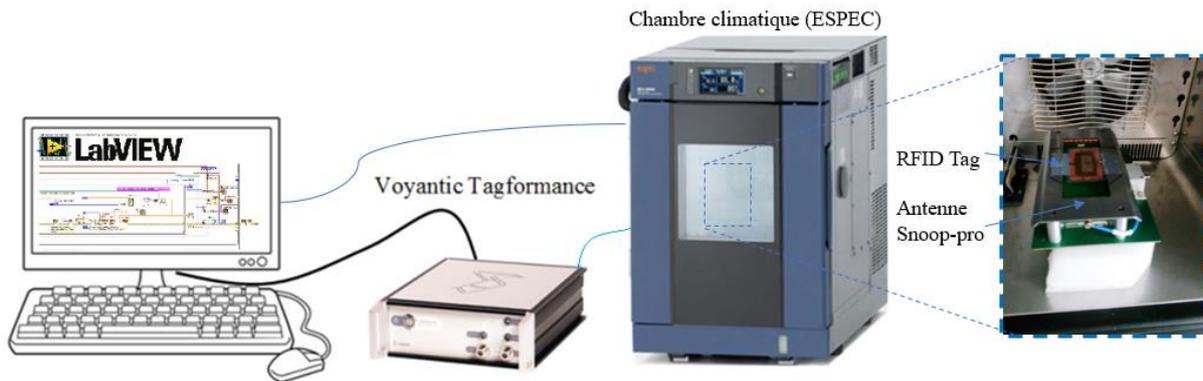


Figure 3-11: Banc de caractérisation du capteur-RFID en environnement contrôlé

Ce banc est composé :

- D'une chambre climatique (ESPEC SH-242 [14]) avec une plage de température réglable entre -40 °C et 150 °C, et une humidité relative réglable entre 30% et 95% ($\pm 3\%$). Cette chambre climatique nous permet de programmer un cycle de contrôle de l'environnement, c'est-à-dire une succession de paliers (de valeurs choisies) d'humidité et de température pendant une durée également choisie.
- D'un lecteur RFID : le lecteur RFID Voyantic TagFormance Lite [15] est un dispositif de caractérisation des performances de détection de tags RFID UHF. La puissance d'émission peut être fixée entre 0 dBm et 27 dBm, avec un pas minimum de 0.1 dB. Ce lecteur permet également de faire un balayage fréquentiel allant de 700 MHz à 1200 MHz, avec un pas réglable de 0.1MHz à 100 MHz. De plus, ce lecteur possède une sensibilité en réception de -75dBm. Lors d'une communication avec un tag RFID, le logiciel Voyantic Tagformance renvoie plusieurs données, dont la puissance de transmission et la puissance reçue rétrodiffusée par le lecteur (en dBm) en fonction de la fréquence. Puis à l'aide de l'équation de Friis (2.8), le logiciel calcule également la distance de lecture théorique. Le protocole standard pris en charge par le logiciel est l'EPC Class1 Gen2 (ISO 18000-6C). Cependant, d'autres protocoles sont également proposés en tant qu'options supplémentaires.
- D'une antenne champs proche : étant donné que la chambre climatique est composée de parois métalliques qui interfèrent fortement avec les étiquettes RFID, nous avons relié le système de lecture à une antenne snoop-pro™ [16] de Voyantic. Cette antenne fonctionne en champ proche et permet d'extraire une courbe de la puissance de transmission nécessaire à l'activation ($P_t^{activation}$) de la puce RFID en fonction de la fréquence. Ces valeurs de puissances ne permettent pas de remonter à la portée théorique de détection. Toutefois, elles donnent une image fidèle de l'évolution du coefficient d'adaptation de l'antenne qui pourrait être obtenue en champ lointain.

Pendant la mesure, le système de lecture RFID est contrôlé à l'aide du logiciel LabVIEW [17] pour effectuer des cycles de mesure, tout en suivant les cycles de montée et descente préconfigurés de la chambre climatique. Le code permettant d'automatiser l'ensemble de ce banc de mesure, a été réalisé à l'aide du standard EPC (L'interface du code est présentée en annexe D et le descriptif en annexe E).

3.3.1.2 Protocole de mesure

Avant toute chose, il est bon de rappeler qu'il faut synchroniser l'acquisition des mesures du capteur RFID avec le cycle de variation de la chambre climatique. En effet, la chambre climatique n'est pas contrôlée par le code, mais plutôt par un programme interne détaillé à la fin de l'annexe E. Le protocole de mesure est illustré Figure 3-12. Le programme commence par fixer la première fréquence basse, puis incrémente la valeur de la puissance de transmission jusqu'à ce que le tag RFID réponde, la puissance à laquelle le tag répond est la puissance minimum d'activation (reçu coté lecteur) de notre capteur RFID. Lorsque le tag a répondu, le logiciel passe à la fréquence suivante (en fonction du pas fréquentiel prédéfini) et continue ainsi jusqu'à la limite de fréquence haute. Si le tag ne répond pas, pour une puissance de transmission maximale on passe automatiquement à la fréquence suivante. Ensuite, chaque balayage fréquentiel est inscrit dans un cycle de mesure périodique. Les paramètres $P_t^{activation}$ et $P_r^{activation}$ sont enregistré dans un fichier (.txt) pour chaque mesure périodique.

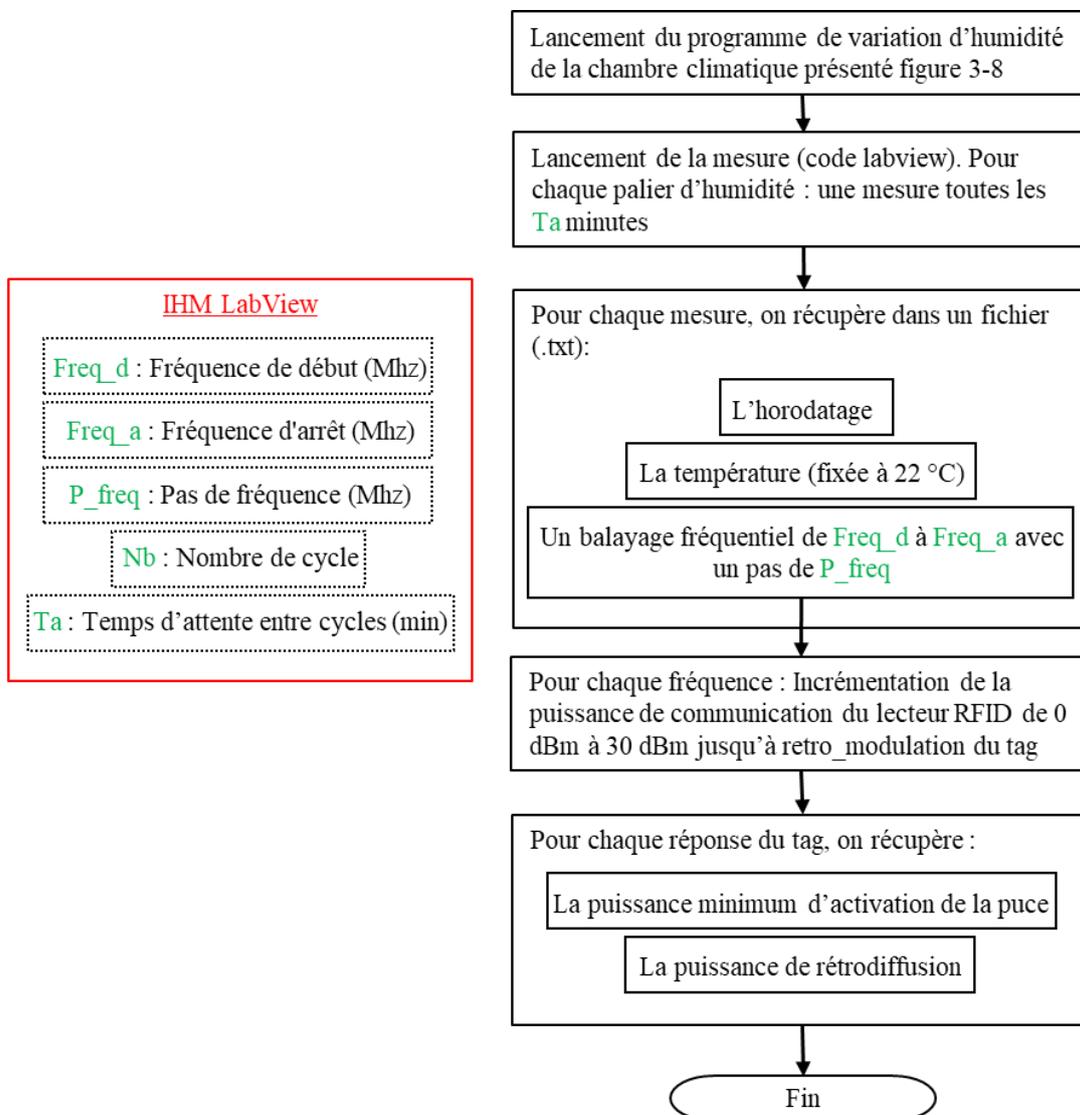


Figure 3-12: Protocole de mesure

3.3.2 Résultats de mesures du capteur-RFID en environnement contrôlé

À partir du banc de mesure et du protocole décrit précédemment nous pouvons obtenir des résultats de mesures comme celles présentées Figure 3-13. Nos échantillons de capteur-RFID ont été optimisés pour la bande de fréquence nord-américaine, et ont été caractérisés sur la bande de fréquence de 800 MHz à 1000 MHz. Sur le graphe (Figure 3-13) il y a 12 courbes de puissances $P_t^{activation}$ dont six ont été enregistrées lors de la phase de montée d'humidité (de 30 % HR à 90 %HR). Les six autres ont été enregistrées pendant la phase de descente d'humidité (de 90 % HR à 30 %HR). L'acquisition de chaque courbe représentée dans ce graphe a été effectuée après stabilisation du palier d'humidité. On peut donc voir l'effet de décalage fréquentiel, de la montée et la descente de l'humidité, pour une température fixée à 22°C.

Nous observons, un fort décalage de la fréquence de résonance liée aux variations d'humidités. En accord avec nos simulations présentées dans le chapitre précédent. Nous avons choisi d'étudier les données récupérées à l'aide du banc de mesure, sur la bande nord-américaine (de 902 Mhz à 928 Mhz) mais également pour une fréquence fixe à 930 Mhz. L'objectif final est de pouvoir se rapprocher de l'application finale dans laquelle un lecteur RFID standard fonctionnant uniquement dans les canaux de fréquences autorisées sera utilisé.

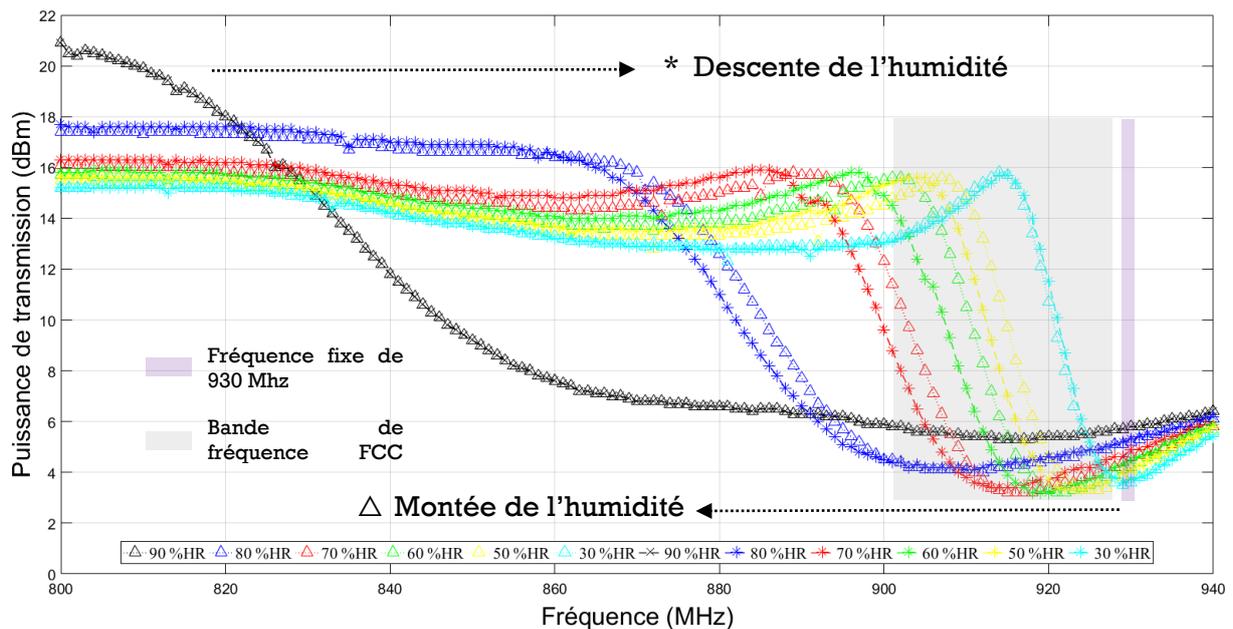


Figure 3-13: Variations de la puissance minimum d'activation de notre capteur-RFID en fonction de la fréquence, dans un environnement d'humidité variable de 30 %HR à 90 %HR.

Ce graphe nous permet de confirmer nos simulations, car nous remarquons une fréquence de résonance qui se dirige vers les basses fréquences quand l'humidité augmente. De plus, le caractère « exponentiel » des variations de permittivité du gluten de blé, décrite dans le chapitre 2, se confirme également.

On peut noter la présence d'une hystérésis pour les valeurs d'humidité relative 50%, 60%, 70%, 80% qui s'explique par le temps d'attente pour chaque palier qui n'est pas suffisant au gluten pour qu'il évacue les molécules d'eau adsorbées. Cette hypothèse se confirme pour le dernier palier de descente, à 30% HR, pour lequel nous avons augmenté la durée et dont les courbes de montée et descente sont confondues.

3.3.3 Caractéristiques d'étalonnage du capteur-RFID

3.3.3.1 Répétabilité

Pour évaluer la répétabilité sur le même échantillon de capteur-RFID étudié dans cette thèse, nous avons effectués 3 cycles de mesures sans interruption composés d'une montée et d'une descente d'humidité. Le Tableau 3-2 rassemble les valeurs de puissance $P_t^{activation}$ obtenues pour un seul point de fréquence à 930MHz sur 3 cycles différents pour le même échantillon.

Tableau 3-2 Résultat de mesure en moyenne de la puissance de transmission (dBm) du Tag N°2 sur 3 cycles successifs, de montée et descente en humidité

| 930 Mhz | Cycle N° 1 | Cycle N° 2 | Cycle N° 3 |
|---------|------------|------------|------------|
| 30 %HR | 3,78 dBm | 3,66 dBm | 3,64 dBm |
| 90 %HR | 5,78 dBm | 5,74 dBm | 5,78 dBm |
| 30 %HR | 3,67 dBm | 3,65 dBm | 3,69 dBm |

Nous nous intéressons aux valeurs extrêmes de chaque cycle, c'est-à-dire celles obtenues pour 30% et 90% d'humidité relative. On remarque une très bonne reproductibilité des mesures à la fois en montée et en descente.

3.3.3.2 Reproductibilité

Nous souhaitons maintenant évaluer la reproductibilité des mesures obtenues sur les deux échantillons différents réalisés de manière identique. Ces échantillons ont été mesurés dans la bande de fréquence nord-américaine comme présentés en Figure 3-14 a) et b) suivant 3 cycles de montée / descente d'humidité. Dans cette figure, chaque palier d'humidité est représenté par trois courbes de même couleur montrant trois cycles de montée en humidité.

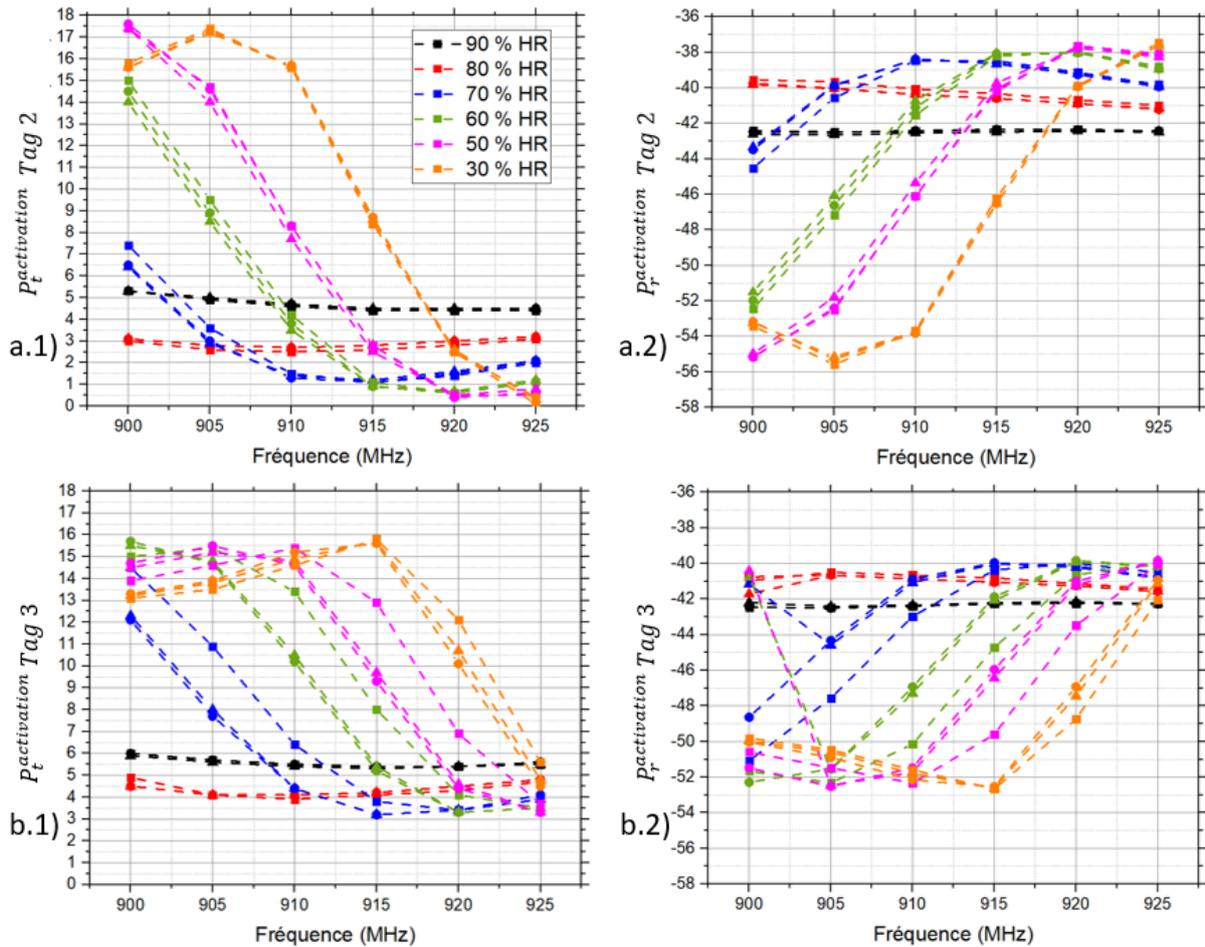


Figure 3-14: Résultats de mesures (sélection de 6 points en fréquences) sur 3 cycles de montés (représenté par les 3 courbe de même couleurs) en humidité en bande US pour 6 valeur d'humidité relative : a.1) et b.1) représente la puissance de transmission minimum d'activation du capteur-RFID pour le Tag 2 et 3 respectivement et a.2) et b.2) représente la puissance de réception d'activation du capteur-RFID pour le Tag 2 et 3 respectivement.

Nous observons que l'allure des courbes est très similaire, ce qui prouve que le comportement du capteur est reproductible à minima pour deux échantillons différents. Toutefois on remarque un décalage fréquentiel entre les deux capteurs probablement lié à une variation sur l'épaisseur du dépôt de gluten. Un procédé de dépôt industriel pourrait permettre de s'affranchir de ce problème. Dans l'attente de vérifier cette hypothèse, nous pouvons envisager la mise en place d'une phase de calibration individuelle pour chaque capteur afin de remonter à la valeur de l'humidité en fonction des variations de puissances observées.

3.3.3.3 Hystérésis

Comme nous l'avons remarqué précédemment il existe un effet d'hystérésis pour quelques valeurs d'humidités. Afin de quantifier cette hystérésis, nous avons tracé les courbes par palier d'humidité pour nos trois échantillons de capteurs-RFID. Nous nous intéressons aux valeurs de $P_t^{activation}$ obtenues à la fréquence de 930MHz de chaque échantillon. Les Figure 3-15 a), b) et c), respectivement pour le Tag1, le Tag 2 et le Tag 3, présentent la relation entre $P_t^{activation}$ mesurée à 930MHz et l'humidité relative pour 3 échantillons différents.

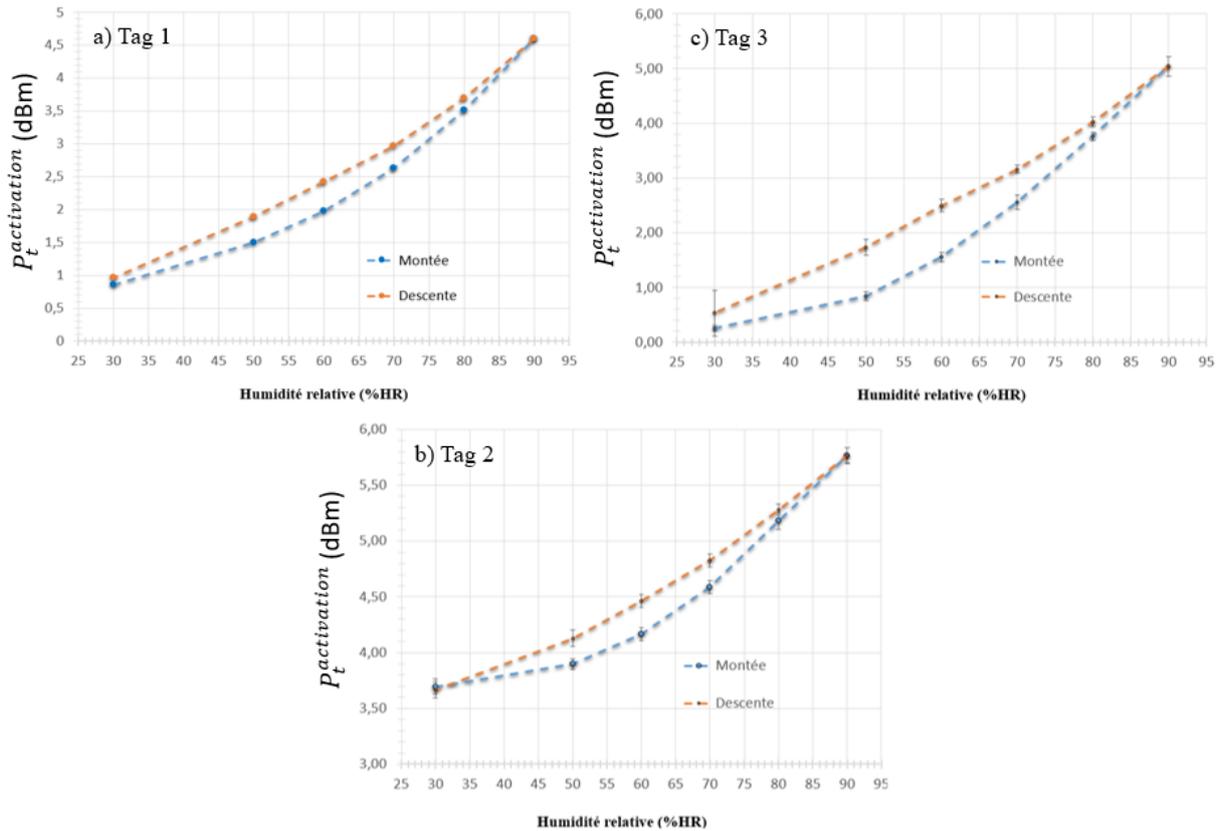


Figure 3-15: Courbe de réponse des capteurs-RFID en montée et décente d'humidité @ 930 Mhz pour : a) Tag 1 b) Tag 2 et c) Tag 3.

Nous observons que l'hystérésis ne concerne que les valeurs d'humidités comprises entre 50 et 70 %HR, et il varie de 0.3 dB jusqu'à 1 dB. Ces variations peuvent induire des erreurs sur l'extraction de la valeur d'humidité. Pour pallier à ce problème, nous pouvons minimiser l'erreur moyenne d'estimation en construisant un modèle mathématique qui prend en compte les valeurs mesurées pendant la phase de montée et de descente en humidité. Dans cette étude (décrit plus bas), nous avons réalisé un modèle mathématique basé seulement sur la montée en humidité et les résultats obtenus sont déjà satisfaisants.

3.3.3.4 Sensibilité / robustesse

Parmi les paramètres des capteurs, la sensibilité est le paramètre le plus critique. La sensibilité indique à quel point la sortie du capteur ($P_t^{activation}$) change lorsque la quantité mesurée (l'humidité relative) change. Par exemple, si la puissance $P_t^{activation}$ varie de 1 dB lorsque l'humidité change de 1 % HR, la sensibilité est de 1 dB / %HR. Les capteurs qui mesurent de très petits changements doivent avoir des sensibilités très élevées.

Le Tableau 3-3 présente la sensibilité mesurée pour les 3 échantillons de capteur-RFID étudiés. Les valeurs sont données pour la phase de montée et de descente en humidité.

Tableau 3-3: Sensibilité [dB / %HR] en humidité montante et descendante pour 3 capteur-RFID et à fréquence fixe

| Sensibilités Humidités (%HR) | | $P_t^{activation}$ Sensibilité en [P(dB) /%HR] à 930 Mhz | | |
|------------------------------------|---------|---|-------|-------|
| | | Tag 1 | Tag 2 | Tag 3 |
| Monté | 30 → 70 | 0,04 | 0,05 | 0,02 |
| | 70 → 90 | 0,10 | 0,12 | 0,06 |
| Descente | 90 → 70 | 0,08 | 0,10 | 0,05 |
| | 70 → 30 | 0,05 | 0,06 | 0,03 |

Nous remarquons une différence claire entre la sensibilité en humidité basse et haute. En effet, la permittivité du gluten de blé n'est pas assez sensible en basse humidité pour pouvoir détecter une variation d'un pourcentage d'humidité relative. De plus, dans le cadre de cette thèse, nous utilisons un équipement de caractérisation RFID Voyantic Tagformance Lite, qui possède un pas de mesure en puissance minimum de 0.1dB. Par exemple, à 930 MHz, pour la plage de variation de 30 %HR à 70 %HR nous avons une sensibilité minimum de 0.02dB/%HR (on se place dans le cas le plus défavorable). Il est donc possible de détecter une variation minimum de 5 %HR. Concernant la variation d'humidité haute, de 70 %HR à 90 %HR, le capteur a une sensibilité minimum de 0.06 dB/%HR. Dans cette plage, on peut détecter une variation minimum de 1.5 %HR.

Tableau 3-4: Résultats de performances de notre capteur-RFID comparé aux performances obtenus par d'autres études académiques concernant les capteur-RFID UHF passif avec antenne fonctionnalisée

| Références | Surface du capteur [cm ²] | Gain réalisé [dB] | Sensibilité de $P_t^{activation}$ en [P(dB) /%HR] | | Matériau sensible |
|----------------------|---------------------------------------|-------------------|---|-----------------|-------------------|
| | | | [40 – 80 % HR] | [80 – 100 % HR] | |
| Virtanen et al. [18] | 42 | -3 | 0.02 | 0.02 | Kapton |
| Marrocco et al. [19] | 52 | -3 | 0.13 | 0.1 | PEDOT PSS |
| Marrocco et al. [20] | 22 | -1.5 | 0.39 | 0.08 | PEDOT PSS |
| Notre étude | 21.96 | -0.97 | [30 – 70 % HR] | [70 – 95 % HR] | Gluten de blé |
| | | | 0.06 | 0.12 | |

La sensibilité maximale de notre capteur-RFID, pour la plage de variation de 30 % HR à 70 % HR est de 0.06 dB/%HR, et de 70 % HR à 90 % HR, est de 0.12 dB/%HR. On peut donc détecter une variation de 1.5 % HR et de 0.83 % HR respectivement en basse et haute

humidité. Ces performances ont été comparées aux performances obtenues dans d'autres études académiques, rassemblées dans le Tableau 3-4.

Nous avons sélectionné dans le Tableau 3-4 les études se rapprochant le plus de notre travail [20]. Nous remarquons dans un premier temps que l'encombrement de notre capteur-RFID est parmi les plus faible tout en garantissant un gain relativement bon (-1dB). Concernant la sensibilité, à basse humidité nous obtenons un résultat en dessous des performances obtenues dans [19], [20] lié à la faible sensibilité du gluten de blé aux basses humidités. La tendance s'inverse pour les hautes humidités car notre dispositif présente la meilleure sensibilité entre 70% HR et 95% HR. En parallèle des critères de performances strictes nous tenons à repreciser que le principal avantage de notre capteur-RFID se trouve dans l'utilisation d'un biopolymère comme élément sensible. C'est un matériau respectueux de l'environnement, et qui répond au critère de l'industrie agroalimentaire en termes de sécurité sanitaire.

3.3.4 Les limites en température de notre capteur RFID

Jusque-là, nos mesures étaient réalisées en atmosphère contrôlée, en humidité et en température (fixée à 22°C) ou à température ambiante. Toutefois ce capteur peut potentiellement être destiné à une utilisation en environnement extérieur. C'est pourquoi nous avons étudié les limites technologiques de notre capteur en température.

Les résultats présentés en Figure 3-16, ont été obtenus à l'aide du banc de mesure, pour une température variant de 12°C à 32°C par pas de 5°C. Nous avons fixé l'humidité dans un premier temps à 30%HR (Figure 3-16 b)). Puis, nous avons réitéré l'expérience pour des valeurs d'humidité de 50%HR (Figure 3-16 a)), de 70%HR (Figure 3-16 c)) et de 90%HR (Figure 3-16 d)). En comparant les résultats à basses et hautes humidités, nous remarquons que la température a un plus grand impact sur les mesures lorsque l'humidité est haute. La solution pour pallier à ces variations, qui dans notre cas sont considérées comme étant des perturbations extérieures, serait de réaliser une compensation en température du capteur-RFID. Pour cela la technique différentielle, décrite plus haut pourrait être utilisée avec comme capteur référence un capteur identique au notre avec la zone de dépôt masquée. Le gluten de blé serait ainsi rendu insensible aux variations d'humidité, mais toujours exposé aux variations induites par la température. À l'aide d'une lecture différentielle, nous pourrions ainsi récupérer seulement les variations liées aux variations de l'humidité relative.

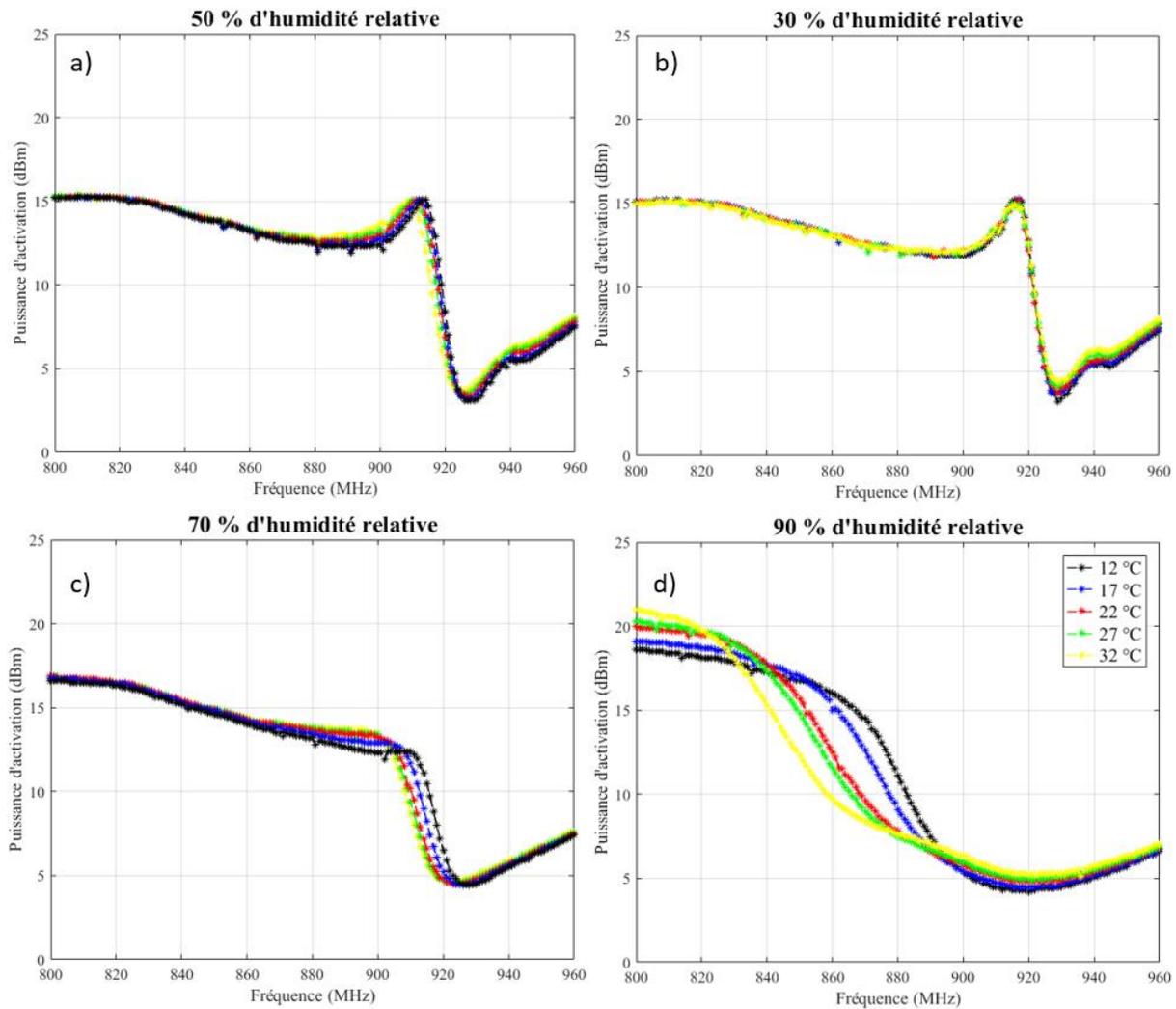


Figure 3-16: Essais en température, de 12 °C à 32 °C par pas de 5 °C, pour des humidités fixes de 30 %HR, 50 %HR, 70 %HR et 90 %HR

3.4 Validation des modèles analytiques pour l'extraction de l'humidité à l'aide d'un lecteur RFID standard

3.4.1 Construction du modèle analytique basé sur la technique de régression linéaire simple

Dans cette partie, nous mettons en œuvre le modèle de régression linéaire simple, ou approximation polynomiale discutée dans la section 3.2.3. Ce modèle est construit à partir de valeurs de $P_t^{activation}$ ou $P_r^{activation}$ effectuées pour différentes valeurs d'humidité entre 30% et 90% et pour la fréquence fixe de 930MHz. Ce choix se justifie par le fait que l'adaptation d'impédance du capteur-RFID est optimale pour cette valeur à basse humidité. La Figure 3-17 présente les résultats de mesure de $P_t^{activation}$ en fonction de l'humidité relative. Cette courbe peut être approximée avec le polynôme du second d'ordre de l'équation (3.16). Les coefficients ont été calculés avec un intervalle de confiance de 95 % ; $p_1 = 0.0006429$, $p_2 = -0.01686$, $p_3 = 0.8657$.

$$y_{dBm} = p_1 \times x_{\%HR}^2 + p_2 \times x_{\%HR} + p_3 \quad (3.17)$$

La courbe estimée par ce polynôme est également présentée sur la Figure 3-17. Nous pouvons observer que la courbe estimée minimise l'erreur entre les points de mesure enregistrés lors de la montée et de la descente d'humidité.

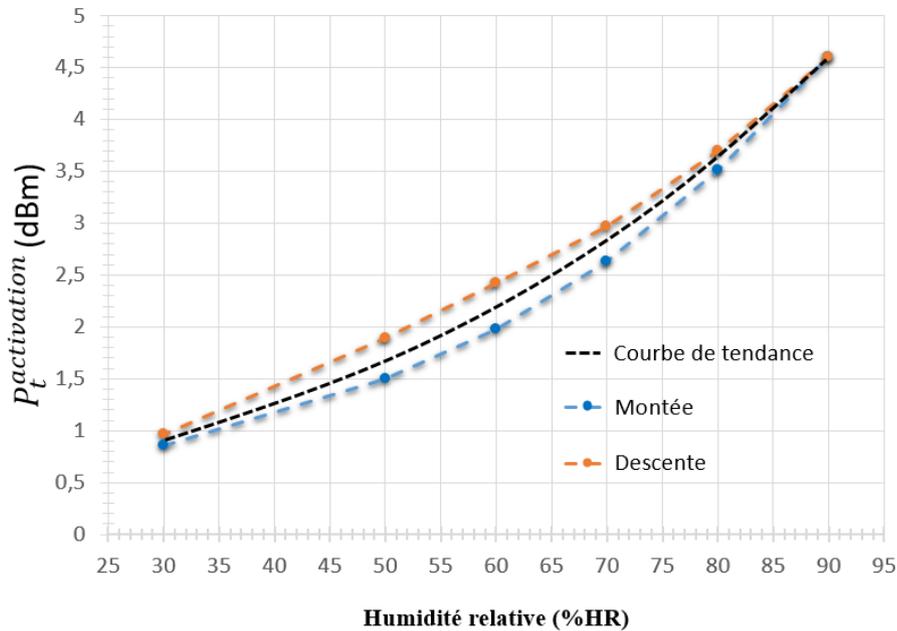


Figure 3-17: Exemple de courbes de tendance tracée sur la courbe d'hystérésis du Tag 3 pour une fréquence de 930 Mhz

3.4.2 Construction du modèle analytique basé sur la technique de régression multilinéaire

Nous appliquons maintenant la méthode de modélisation décrite dans la section 3.2.3. Les données d'entrées notées X dans le modèle sont composées des puissances $P_t^{activation}$ mesurées pour 6 points de fréquences (voir les figures 4.14 a.1) et b.1)). Chaque échantillon de capteur-RFID a été mesuré suivant 3 cycles composés de 6 valeurs d'humidité différentes (12 au total pour la montée et la descente). Le modèle mathématique a été construit en se basant uniquement sur les valeurs obtenues pendant les phases de montée en humidité. La matrice d'entrée X est donc de taille $q=6$ colonnes par $n=6*3 = 18$ lignes pour chaque échantillon.

Le Tableau 5 présente les erreurs d'estimations calculées lorsque le modèle est testé avec les valeurs obtenues pour le premier cycle de montée en humidité. Les erreurs sont calculées dans le cas d'un modèle construit à partir des valeurs de puissance en mW ou en dBm. Nous remarquons que l'erreur moyenne d'estimation est inférieure à 4%, ce qui est suffisant dans le cadre de l'application visée.

Le modèle peut être également construit à partir des valeurs de puissances rétrodiffusées mesurées en réception $P_r^{activation}$. Le

Tableau 3-6 permet de comparer la qualité du modèle estimé en fonctions du type de donnée d'entrée ($P_t^{activation}$ ou $P_r^{activation}$).

Tableau 3-5: Erreur (en %) entre la valeur d'humidité réelle est la valeur estimée de nos modèle mathématique en puissance de transmission en linéaire (mW) ou en dBm

| $p_t^{activation}$ | Tag 2 | | | | Tag 3 | | | |
|---------------------------|-------------------|-------------|-------------------|-------------|-------------------|-------------|-------------------|-------------|
| | mW | | dBm | | mW | | dBm | |
| Humidité réel (%HR) | Estimation (% HR) | Erreur (%) |
| 90 | 90,17 | 0,17 | 91,58 | 1,58 | 86,78 | 3,22 | 90,87 | 0,87 |
| 80 | 84,84 | 4,84 | 83,75 | 3,75 | 81 | 1 | 78,95 | 1,05 |
| 70 | 75,66 | 5,66 | 74,32 | 4,32 | 72,77 | 2,77 | 77,97 | 7,97 |
| 60 | 64,2 | 4,2 | 64,63 | 4,63 | 62,68 | 2,68 | 58,5 | 1,5 |
| 50 | 48,67 | 1,33 | 48,66 | 1,34 | 52,36 | 2,36 | 48,15 | 1,85 |
| 30 | 35,78 | 5,78 | 32,52 | 2,52 | 33,35 | 3,35 | 35,13 | 5,13 |
| Erreur Moyenne (%) | | 3,66 | | 3,02 | | 2,56 | | 3,06 |

Tableau 3-6: Erreur en % entre la valeur d'humidité réelle est la valeur estimée de nos modèle mathématique en puissance de transmission et en puissance retro-modulé.

| | | Tag 2 | | Tag 3 | |
|---|----------------------|-------|------|-------|------|
| | | mW | dBm | mW | dBm |
| Modèle construit à partir de $p_t^{activation}$ | Erreur (en %) | 3,61 | 2,43 | 3,12 | 3,24 |
| Modèle construit à partir de $p_r^{activation}$ | | 0,54 | 1,63 | 0,24 | 3,76 |

Lorsque le modèle est construit à partir des valeurs en dBm, les erreurs d'estimations sont du même ordre de grandeur, quel que soit le paramètre d'entrée $p_t^{activation}$ ou $p_r^{activation}$. Toutefois on peut remarquer que le modèle mathématique utilisant la puissance rétrodiffusée $p_r^{activation}$ en mW est plus précis que celui utilisant la puissance de transmission. Cela s'explique par le fait qu'en réception, nous avons une résolution de mesure en puissance d'un dB. Pour des puissances reçues de l'ordre de -50dBm, une variation d'un dB équivaut à une variation de l'ordre du μ W, ce qui est bien plus faible que l'équivalent en valeur linéaire pour un dB à 20dBm.

3.4.3 Utilisation des modèles analytiques pour l'estimation de valeurs d'humidités

Afin de valider les deux modèles analytiques décrits plus haut, nous avons fait des tests en chambre climatique pour des consignes d'humidités fixées aléatoirement. Tout d'abord, nous avons réalisé deux nouveaux échantillons de capteur-RFID, notés Ech1 et Ech2 dans le Tableau 3-7. Ces capteurs ont été étalonnés pendant un cycle de montée en humidité de 30 %HR à 90 %HR. De cet étalonnage nous en avons extrait nos modèles analytiques. Puis, nous avons placé à nouveau ce tag dans la chambre climatique dans la même position que celle utilisée lors de la phase d'étalonnage. Nous avons ensuite effectué une série de

mesure de $p_t^{activation}$ et $p_r^{activation}$ pour différentes consignes en humidité fixées aléatoirement. Les deux capteurs-RFID, Ech1 et Ech2, ont été testés deux fois et trois fois respectivement. Entre chaque test le capteur-RFID a été ressorti de la chambre climatique pendant au minimum deux heures. Ceci nous permet de faire des tests identiques et seulement en montée d'humidité, c'est pourquoi nos mesures sont toutes supérieures à la valeur d'humidité ambiante (50 %HR).

Tableau 3-7: Tests des deux modèles mathématiques du capteur-RFID en chambre climatique pour des valeurs d'humidités aléatoires avec entre parenthèse l'erreur d'estimation.

| | | Régression multilinéaire (bande de fréquence nord-américaine) | | Régression linéaire simple (fréquence fixe de 930 MHz) | |
|--------------|----------------------------|--|--|---|--|
| | | Estimation (% HR) | | | |
| | Consigne en humidité (%HR) | Modèle analytique : $p_r^{activation}$ (dBm) | Modèle analytique : $p_t^{activation}$ (dBm) | Modèle analytique : $p_r^{activation}$ (dBm) | Modèle analytique : $p_t^{activation}$ (dBm) |
| Ech 1 | 65 | 65 (0 %) | 64 (1 %) | 69 (4 %) | 68 (3 %) |
| | 55 | 54 (1 %) | 51 (4 %) | 66 (11 %) | 66 (11 %) |
| Ech 2 | 66 | 59 (7 %) | 60 (6 %) | 59 (7 %) | 60 (6 %) |
| | 77 | 71 (6 %) | 84 (7 %) | 72 (5 %) | 74 (3 %) |
| | 82 | 75 (7 %) | 85 (3 %) | 78 (4 %) | 79 (3 %) |

On obtient les résultats présentés Tableau 3-7, les valeurs estimées sont proches de la valeur de consigne : l'erreur d'estimation est inférieure à 7 % pour le modèle multilinéaire et inférieur à 11 % pour le modèle simple et ceci quel que soient les données de construction du modèle utilisé ($p_t^{activation}$ ou $p_r^{activation}$). Ces deux modèles étudiés dans ce travail peuvent donc être utilisés pour la détection de l'humidité provenant du capteur-RFID par fonctionnalisation d'antenne. Nous allons maintenant étudier les performances de détection de l'ensemble (capteur-RFID / modèle analytique) à l'aide d'un lecteur RFID standard. Il est à noter ici que l'utilisation d'un lecteur RFID standard est contrainte par les canaux de fréquences alloués pour les applications RFID. Par exemple la détection de la réponse du capteur pour une fréquence fixe de 930MHz comme évoqué précédemment n'est pas possible. Nous allons donc implémenter le modèle de régression multilinéaire décrit plus haut à partir de l'utilisation de plusieurs canaux adjacents appartenant à la bande nord-Américaine.

3.4.4 Utilisation d'un lecteur RFID standard

3.4.4.1 Performances et limitations des lecteurs RFID standard

Dans l'objectif d'une utilisation avec un lecteur RFID standard, nous avons comparé certains modèles en fonction des critères de performances les plus critiques pour une application capteur-RFID. Le Tableau 3-8 présente ces caractéristiques pour 7 modèles différents issus de deux grands fabricants de lecteurs RFID.

Tableau 3-8: lecteurs RFID standard et leur sensibilité en réception et en transmission, comparé par leurs résolutions à 930 MHz calculé à l'aide des résultats de sensibilité du capteur-RFID

| | | ThingMagic | | | | Impinj | | Voyantic |
|---|----------------|-------------|--------------------------|-------------|----------|---------------|---------------|------------------|
| | | M6e | Micro | M5e | Compact | Speedway R420 | Speedway R220 | Tagformance Lite |
| Puissance en sortie (dBm) | | 5 -31,5 | -5 →30 | 5 →30 | 10 →23 | 10 →31,5 | 10 →31,5 | -5 →30 |
| Pas de puissance de transmission ΔP_{tx} (dB) | | $\pm 0,5$ | $\pm 0,5$ (± 1) | ± 1 | ± 1 | $\pm 0,25$ | $\pm 0,25$ | $\pm 0,1$ |
| Sensibilité FCC (dBm) | | -82 → 66 | -80 → 67 | -80 → 63 | -85 →-69 | -84 | -84 | -70 |
| Sensibilité EU (dBm) | | -85 → 66 | -83 → 64 | -83 → 62 | -85 →-70 | -84 | -84 | -70 |
| Pas de puissance de réception (dB) | | ± 1 | ± 1 | ± 1 | ± 1 | ± 1 | ± 1 | ± 1 |
| Résolution à 930 MHz à partir de ΔP_{tx} (% HR) | De 30 à 70 %HR | 25 | 25 | 50 | 50 | 13 | 13 | 5 |
| | De 70 à 90 %HR | 8 | 8 | 16 | 16 | 4 | 4 | 1.5 |

Le fournisseur de lecteur RFID ThingMagic [21], propose des valeurs de sensibilité sous forme de courbes. En effet, il est difficile de donner une sensibilité précise en raison de la grande diversité des méthodologies de mesure qui dépendent :

- Du mode de transmission du tag,
- De la distance entre le tag et le lecteur,
- Du débit de donnée lors de la mesure (la sensibilité de réception est la meilleure au débit le plus bas),
- De la fréquence RF à laquelle la mesure est prise.

Ce qui nous intéresse dans le Tableau 3-8 c'est le pas de la puissance de transmission ΔP_{tx} (pour $P_t^{activation}$) et le pas de puissance en réception (pour $P_r^{activation}$). Le pas de la puissance de transmission varie en fonction du lecteur RFID utilisé, et il est généralement fourni par le constructeur. Nous avons également affiché dans la dernière colonne du Tableau 3-8 les performances de l'équipement de caractérisation RFID utilisé durant cette étude (le Voyantic TagFormance Lite). Le pas de puissance en réception est plus difficile à trouver, mais de manière générale il est estimé à environ ± 1 dB [22], [23]. Cette valeur est spécifique aux lecteurs utilisant le protocole de « bas niveau » (en anglais LLRP « Low Level Reader Protocol ») établi par EPCglobal [24] en avril 2007. Ce standard a été édité afin de gérer plus efficacement les différents protocoles des lecteurs RFID.

Afin de comparer les performances des différents lecteurs RFID pour une utilisation avec notre capteur-RFID, nous avons comparé les différentes résolutions en %HR pour une fréquence fixe de 930MHz que nous pouvons obtenir pour chacun des lecteurs RFID. Pour ce calcul nous utilisons simplement les résultats de sensibilités obtenus précédemment (dans le cas le plus défavorable : 0.02dB/%HR de 30 %HR à 70 %HR et 0.06 dB/%HR de 70 %HR à 90 %HR) en faisant le ratio entre la sensibilité du capteur et le pas en puissance de transmission ΔP_{tx} , nous obtenons la résolution en %HR de chacun des lecteurs RFID.

3.4.4.2 Mise en œuvre et validation d'un système de mesure de capteurs RFID à partir d'un lecteur standard

D'après le Tableau 3-8, les lecteurs RFID standard offrant la meilleure résolution concernant la valeur de la puissance de sortie sont les lecteurs RFID Impinj [25]. Mais par souci de disponibilité, nous avons choisi de faire cette étude avec le lecteur RFID M6e de chez ThingMagic [21], (voir colonne verte dans le Tableau 3-8).

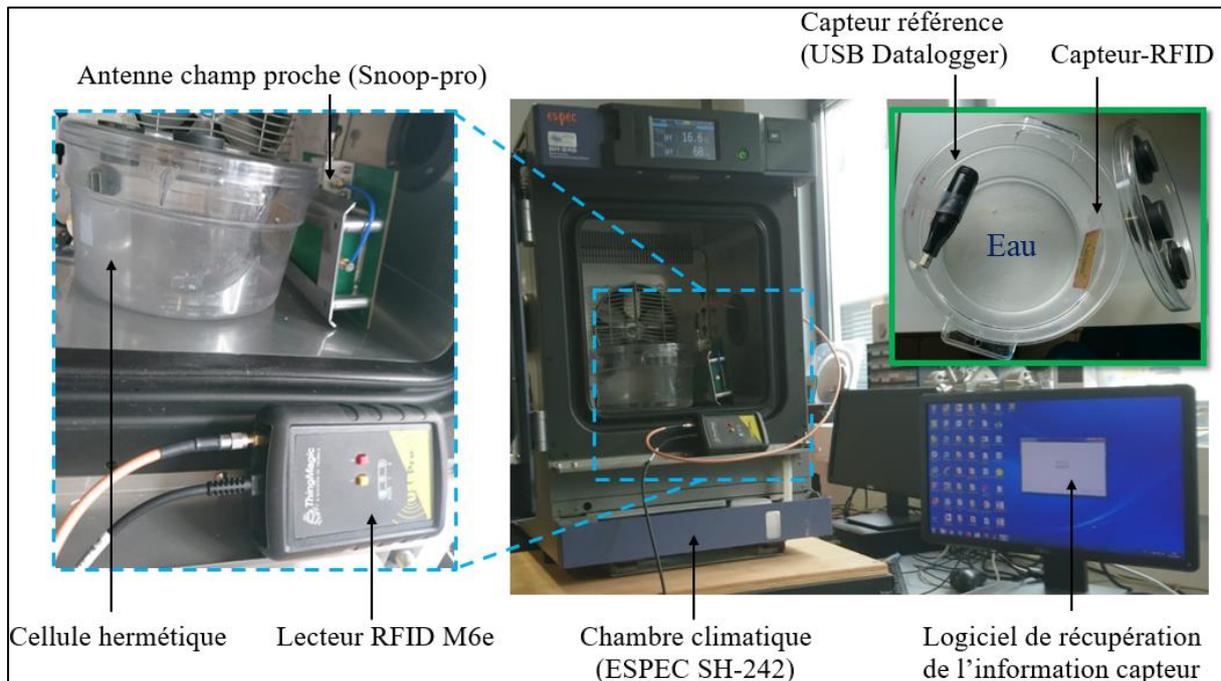


Figure 3-18 Démonstrateur du système de détection de l'humidité du capteur RFID UHF passif fonctionnalisé au gluten de blé

Le démonstrateur du système de détection d'un capteur RFID UHF passif est présenté Figure 3-18. Il se compose des éléments suivants :

- Du lecteur RFID M6e de chez ThingMagic.
- D'une cellule hermétiquement fermée contenant de l'eau. Après fermeture de la cellule, l'humidité augmente en partant de la valeur de l'humidité ambiante (entre 50 et 60 % HR) jusqu'à atteindre une valeur de 98% HR. La vitesse d'augmentation de cette humidité est liée à la quantité d'eau dans la cellule.
- De notre capteur-RFID UHF passif avec fonctionnalisation au gluten de blé.
- D'un capteur d'humidité programmable par USB, utilisé comme capteur de référence (étalon)
- De l'antenne champ proche, le choix de cette antenne est imposé par la calibration du capteur-RFID. En effet, la calibration est effectuée dans la chambre climatique avec une antenne champ proche, pour éviter les perturbations liées aux parois métalliques et s'affranchir de la problématique de la distance de détection qui peut être variable.
- De la chambre climatique, nous avons vu dans le paragraphe 3.4.4, que la température était une source de perturbation à haute humidité. Donc pour nous affranchir de toutes perturbations extérieures nous avons disposé notre dispositif à l'intérieur de la chambre climatique dans laquelle la température est maintenue à une valeur fixe.
- Du logiciel de contrôle du lecteur RFID et de traitement des données de mesure. Il permet l'extraction de l'information capteur, dont le fonctionnement est détaillé dans la partie suivante.

Le logiciel de contrôle du lecteur RFID et d'extraction des données capteurs a été développé en langage C# et fonctionne dans un environnement « Windows ». Comme on peut le voir sur la Figure 3-19, l'interface graphique présente trois écrans permettant l'affichage de l'identifiant du tag RFID, l'étalonnage du capteur permettant la construction du modèle de régression multilinéaire, l'affichage de l'humidité relative calculée à partir du modèle.

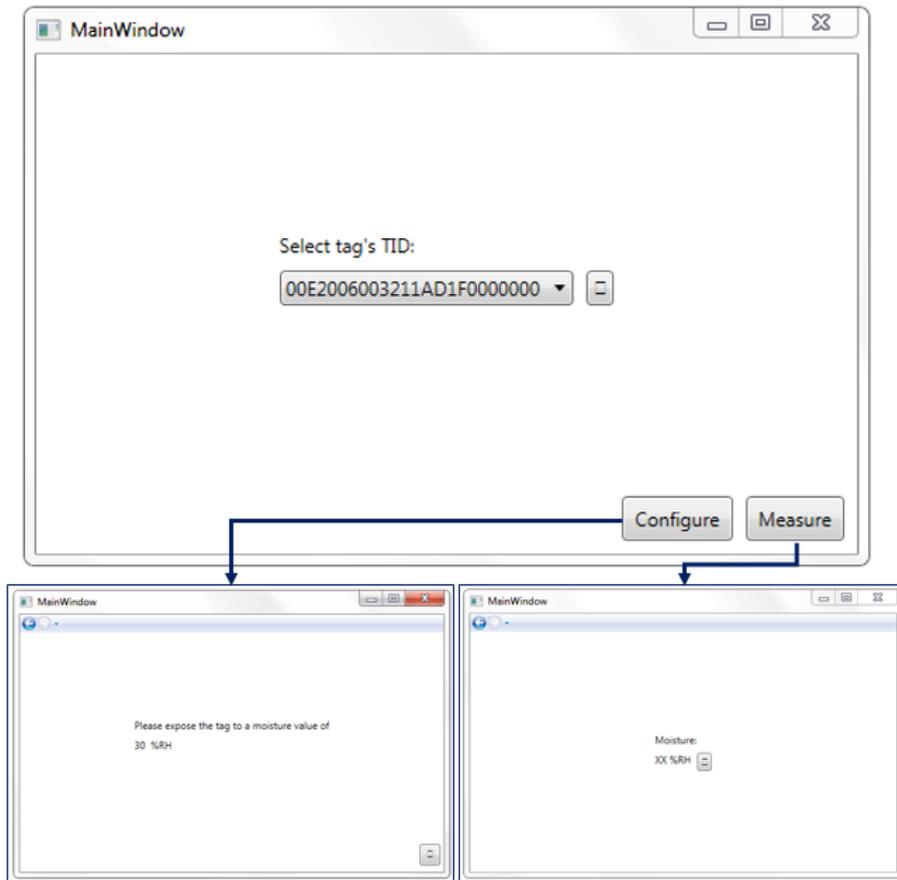


Figure 3-19: Interface du logiciel d'implémentation du modèle mathématique en bande US

L'étalonnage du capteur-RFID doit être effectué avant sa première utilisation. Cela consiste à mesurer $P_t^{activation}$ ou $P_r^{activation}$ pour différents paliers d'humidité. A partir de là l'extraction du modèle de régression multilinéaire est possible pour N points de fréquences et pour chacune des N valeur d'humidité. Dans notre cas, nous avons choisi d'utiliser N = 5 canaux de fréquences (902MHz, 907MHz, 912MHz, 917MHz, 922MHz] et nous avons étalonné le capteur pour les valeurs d'humidité suivantes : 30% HR, 50% HR, 70% HR, 80% HR, 90% HR. Dans l'hypothèse que chaque capteur est unique et donc comporte des caractéristiques différentes, il semble indispensable de conserver les paramètres d'étalonnage de chaque capteur. Une solution que nous avons implémentée ici consiste à enregistrer les coefficients du modèle dans la mémoire utilisateur de la puce RFID. Cette information devient donc disponible à tout moment lors de l'utilisation du capteur RFID et évite de stocker ces informations de manière centralisée dans le logiciel de chaque lecteur RFID susceptible de détecter le capteur.

Une fois le capteur étalonné, la phase de mesure du paramètre physique (ici l'humidité) se décompose en trois étapes. :

- Mesure des N points de fréquences et construction du vecteur d'entrée X

- Récupération du vecteur des paramètres A : lecture mémoire des paramètres du modèle mathématique préenregistrée dans la partie configuration.
- Application du modèle, et estimation de l'humidité relative (matrice Y).

En suivant les étapes décrites précédemment, nous avons lancé deux expériences de suivi d'humidité. La première expérience a duré 1 h. Nous remarquons sur la Figure 3-20, deux phases : une première phase de stabilisation des mesures au début de l'expérience qui dure 10 minutes, suivi d'une phase de stabilité qui dure 50 minutes. Durant la deuxième phase, l'erreur de mesure est en moyenne de l'ordre de 2 % sur 10 points de mesures. Dans cette figure, la courbe rouge représente l'humidité relative estimée à partir de la mesure $p_t^{activation}$ pour 5 points de fréquences. La courbe noire représente le suivi en humidité donné par le capteur de référence (datalogger USB) positionné à côté de notre capteur-RFID dans la cellule.

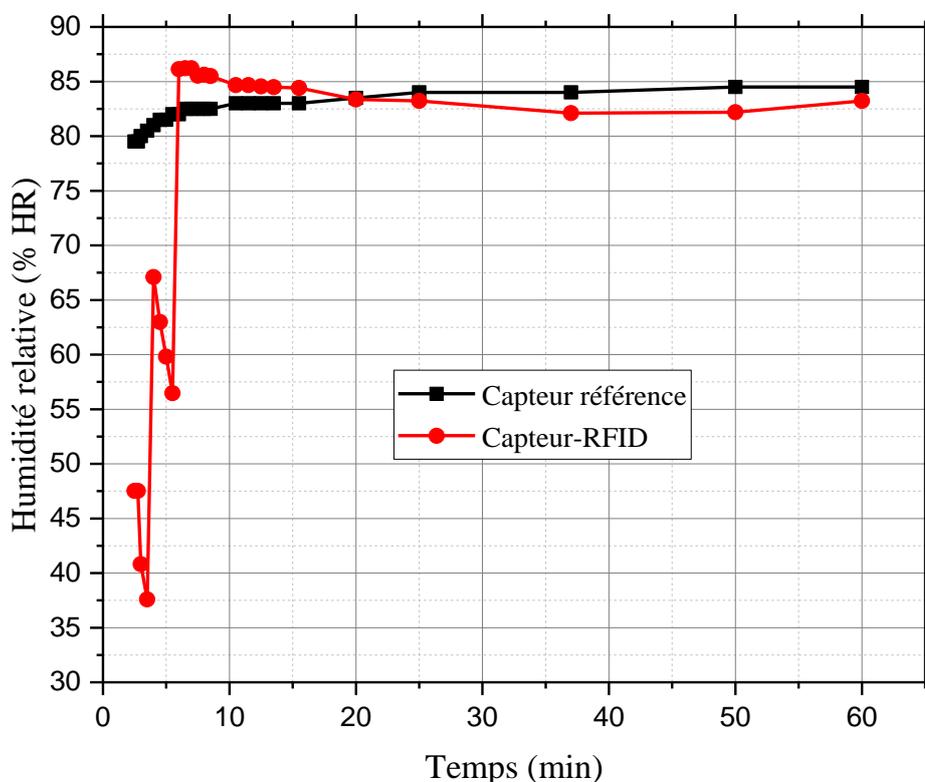


Figure 3-20: Premier test de mesure pour le suivi en humidité à l'intérieure de la cellule hermétique

La seconde expérience (voir Figure 3-21) n'a duré que 7 minutes à cause d'un souci technique, durant ces 7 minutes nous pouvons voir que l'évolution de l'humidité estimée par notre dispositif suit celle du capteur référence. Dans cette deuxième expérience, le capteur-RFID n'a pas eu le temps de se stabiliser en humidité. Les erreurs de mesure en début d'expériences (dans les trois premières minutes) sont en moyenne de 11 %. Au-delà des trois premières minutes, l'erreur est bien diminuée.

Ces deux expériences nous montrent que l'extraction des données capteur est possible à l'aide d'un lecteur RFID du commerce. Nous obtenons ici des résultats prometteurs qui prouvent qu'un système de lecture RFID standard peut être utilisé tel quel pour extraire les données de mesures d'un capteur RFID.

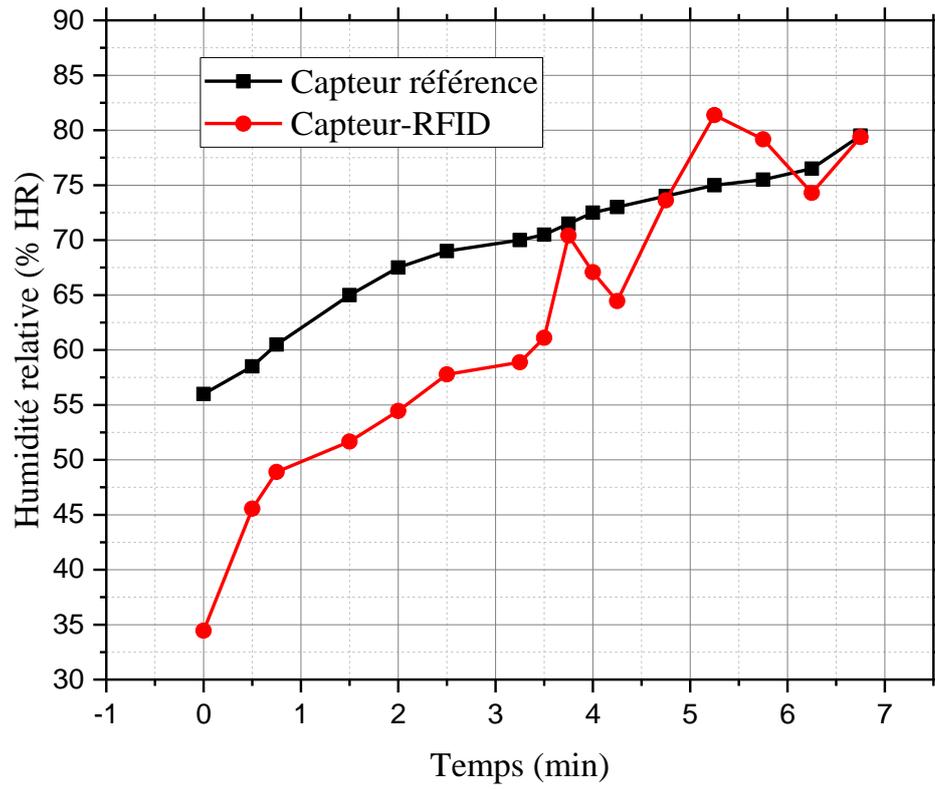


Figure 3-21: Second test de mesure pour le suivi en humidité à l'intérieure de la cellule hermétique

3.5 Conclusion

Ce chapitre a traité de la mise en œuvre de modèles mathématiques permettant l'extraction d'une information capteur-RFID fiable avec un lecteur RFID standard. Dans une première partie, nous avons détaillé notre stratégie d'extraction et de fiabilisation de l'information capteur. Le principe utilisé concerne l'extraction d'une information basée sur l'utilisation de deux paramètres clés que sont la puissance minimum transmise par le lecteur permettant l'activation de la puce RFID notée $P_t^{activation}[\psi]$ et la puissance rétro-modulée par la puce RFID lors de son activation et reçue au niveau de l'antenne du lecteur RFID notée $P_r^{activation}[\psi]$. A partir de ces deux paramètres nous avons étudiés et mis en œuvre deux modèles mathématiques de régression linéaire :

- Le premier basé sur l'utilisation d'un seul canal de communication (régression linéaire simple)
- Le second basé sur l'utilisation de plusieurs canaux de communications appartenant à la bande de fréquences nord-Américaine (régression linéaire multiple).

Dans un second temps nous avons évalué les performances de plusieurs échantillons de capteurs-RFID réalisés de manière identiques. Cette étude a démontré que les mesures sont répétables et que le comportement des différents capteurs réalisés reste identique à condition de s'assurer que l'épaisseur du dépôt de la couche sensible soit bien maîtrisée.

Pour finir, afin de valider le principe d'un système de détection de capteur RFID UHF passif, nous avons mis au point un programme de suivi d'une information capteur et d'étalonnage, et nous l'avons implémenté dans un lecteur RFID standard respectant les différentes normes en vigueur concernant l'utilisation des canaux du spectre radio. Avec ce démonstrateur, nous avons obtenu de très bons résultats de suivi de la montée en humidité lors d'un essai à l'intérieur d'une cellule fermée contenant de l'eau.

3.6 Références

- [1] F. Bibi, Etude des propriétés diélectriques à haute fréquence d'un polymère végétal : le gluten de blé, et utilisation comme biocapteur de marqueurs environnementaux de la qualité des aliments dans des systèmes RFID passifs. Montpellier, 2015.
- [2] C. Occhiuzzi et G. Marrocco, « Electromagnetic optimization of passive RFID sensor nodes », 2012, p. 53- 56.
- [3] P. Nikitin, K. Rao, et S. Lam, « UHF RFID TAG CHARACTERIZATION: OVERVIEW AND STATE-OF-THE-ART », p. 6.
- [4] P. V. Nikitin, K. V. S. Rao, et R. D. Martinez, « Differential RCS of RFID tag », *Electron. Lett.*, vol. 43, n° 8, p. 431–432, 2007.
- [5] C. Occhiuzzi et G. Marrocco, « Constrained-design of passive UHF RFID sensor antennas », *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 61, n° 6, p. 2972–2980, 2013.
- [6] C. Occhiuzzi et G. Marrocco, « Precision and Accuracy in UHF-RFID Power Measurements for Passive Sensing », *IEEE Sens. J.*, vol. 16, n° 9, p. 3091- 3098, mai 2016.
- [7] G. Marrocco et D. Scarana, « Permittivity Passive RFID Sensor for Non-Cooperating Objects », in *The Second European Conference on Antennas and Propagation, EuCAP 2007*, 2007, p. 1- 4.
- [8] J. Gao, « Antenna-based passive UHF RFID sensor tags: design and application », Department of Electronics Design, Mid Sweden University, Sundsvall, 2013.
- [9] J. Virtanen, L. Ukkonen, T. Bjorninen, A. Z. Elsherbeni, et L. Sydänheimo, « Inkjet-Printed Humidity Sensor for Passive UHF RFID Systems », *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 60, n° 8, p. 2768- 2777, août 2011.
- [10] J. Siden, X. Zeng, T. Unander, A. Koptyug, et H.-E. Nilsson, « Remote moisture sensing utilizing ordinary RFID tags », in *Sensors, 2007 IEEE*, 2007, p. 308–311.
- [11] J. Gao, J. Siden, et H.-E. Nilsson, « Printed Electromagnetic Coupler With an Embedded Moisture Sensor for Ordinary Passive RFID Tags », *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 32, n° 12, p. 1767- 1769, déc. 2011.
- [12] B. Subpart et U. Radiators, « PART 15-RADIO FREQUENCY DEVICES ».
- [13] J.-P. Benzécri, *L'analyse des données*, vol. 2. Dunod Paris, 1973.
- [14] « Environmental Test Chambers | ESPEC North America ». [En ligne]. Disponible sur: <https://www.espec.com/>.
- [15] « Tagformance Lite », Voyantic. [En ligne]. Disponible sur: <http://voyantic.com/products/tagformance-lite>.
- [16] « Snoop Pro », Voyantic. [En ligne]. Disponible sur: <http://voyantic.com/products/tagsurance-uhf/accessories/snoop-pro>.
- [17] « LabVIEW - National Instruments ». [En ligne]. Disponible sur: <http://www.ni.com/fr-fr/shop/select/labview>.
- [18] J. Virtanen, L. Ukkonen, T. Bjorninen, A. Z. Elsherbeni, et L. Sydänheimo, « Inkjet-Printed Humidity Sensor for Passive UHF RFID Systems », *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 60, n° 8, p. 2768- 2777, août 2011.
- [19] S. Manzari, C. Occhiuzzi, S. Nawale, A. Catini, C. Di Natale, et G. Marrocco, « Humidity Sensing by Polymer-Loaded UHF RFID Antennas », *IEEE Sens. J.*, vol. 12, n° 9, p. 2851- 2858, sept. 2012.
- [20] S. Manzari et G. Marrocco, « Modeling and Applications of a Chemical-Loaded UHF RFID Sensing Antenna With Tuning Capability », *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 62, n° 1, p. 94- 101, janv. 2014.
- [21] « M6E ThingMagic, a JADAK brand | RF/IF et RFID | DigiKey ». [En ligne]. Disponible sur: <https://www.digikey.fr/product-detail/fr/thingmagic-a-jadak-brand/M6E/1523-1002-ND/4842686>.
- [22] « Setting Receive Sensitivity and Transmit Power on Revolution Reader using LLRP », Impinj Support Portal. [En ligne]. Disponible sur: <http://support.impinj.com/hc/en->

us/articles/202756358-Setting-Receive-Sensitivity-and-Transmit-Power-on-Revolution-Reader-using-LLRP.

[23] Impinj, « Five Factors for Success UHF Gen 2 RFID Readers ». 2007.

[24] R. Standard, « Low Level Reader Protocol (LLRP) 2 Version 1.1 3 », nature, vol. 18, p. 19, 2005.

[25] « Speedway R420 RAIN RFID Reader | Impinj ». [En ligne]. Disponible sur: <https://www.impinj.com/platform/connectivity/speedway-r420/>.

Chapitre 4

Application du capteur-RFID UHF passif au domaine agroalimentaire

Sommaire

| | | |
|-------------------|---|------------|
| Chapitre 4 | <i>Application du capteur-RFID UHF passif au domaine agroalimentaire</i> | 128 |
| 4.1 | Contexte et objectif | 130 |
| 4.2 | Moyens de détection de la qualité des aliments | 132 |
| 4.2.1 | Comment quantifier ou mesurer la qualité des aliments ? | 132 |
| 4.2.2 | Les moyens de détection en RFID | 133 |
| 4.2.2.1 | Capteur de qualité des aliments basé sur une variation de permittivité des aliments | 134 |
| 4.2.2.2 | Capteur de qualité des aliments basé sur la détection de gaz | 137 |
| 4.3 | Principe de détection basé sur l'utilisation des agro-polymères | 139 |
| 4.4 | Validation du capteur RFID à base d'agro-polymère : Mesures et analyses | 141 |
| 4.4.1 | Banc expérimental utilisant le capteur-RFID | 141 |
| 4.4.2 | Analyse des étapes de fermentation des aliments testés | 142 |
| 4.4.2.1 | Champignon avec emballage industriel | 142 |
| 4.4.2.2 | Salade avec emballage industriel | 144 |
| 4.4.2.3 | Fromage (Mozzarella) testé en cellule fermée hermétiquement | 145 |
| 4.5 | Conclusion | 148 |
| 4.6 | Références | 149 |

4.1 Contexte et objectif

Le capteur RFID à base de bio-polymère présenté dans les chapitres précédents peut être considéré comme un moyen efficace et à faible coût pour collecter une quantité importante de données utiles afin d'améliorer le contrôle de la qualité des moyens de production et des produits dans l'industrie alimentaire. Il s'agit donc de gérer au mieux le flux logistique et d'éviter à terme le gaspillage alimentaire. Comme je l'ai déjà évoqué lors de l'introduction générale, ce travail s'appuie d'une part sur le laboratoire commun SPID Lab entre l'institut d'Electronique et des Systèmes (IES) et la société TAGEOS S.A.S ainsi que sur une collaboration avec l'équipe spécialisée dans l'emballage alimentaire issue du laboratoire Ingénierie des Agropolymères et des Technologies Emergentes (IATE, UMR 1208) Montpellier. Nous avons ensemble débuté cette thématique à travers l'ANR NextGenPAck, dont l'objectif était de rendre les emballages alimentaires « intelligents » (en anglais « *Smart packaging* ») en leur ajoutant un dispositif électronique pour l'évaluation de la maturité des produits [1]. Ce dispositif est un indicateur de la fraîcheur des aliments intégré dans l'emballage alimentaire et utilise le capteur-RFID. Comme décrit dans les chapitres précédents, l'antenne de notre capteur-RFID est adaptée pour recevoir un matériau sensible comme un biopolymère (gluten de blé, gélatine, caséine...). Pour rappel, ce bio-polymère subit des changements de propriétés diélectriques mesurables lorsqu'il est exposé à des molécules cibles (eau et/ou gaz). La couche de gluten de blé, développée en collaboration avec le laboratoire IATE, possède également des propriétés diélectriques variables en fonction de la présence de gaz, dont le CO₂, l'O₂ et l'éthanol (C₂H₅OH).

Avant toute chose, je vais donner la définition des trois formes d'emballages alimentaires :

- L'emballage dit « passif », qui protège le contenu contre les altérations de l'environnement, sans modifier la composition et les propriétés des produits emballés. En fonction du produit à emballer, ce type d'emballage peut être en : Papier ou carton, en plastique (PE, PET, PVC, PP, PS), en verre, en métal (fer acier aluminium), en composite (ou multicouches, exemple : brick de lait) ou en bois.
- L'emballage dit « actif », qui modifie les conditions d'un produit alimentaire conditionné en vue d'étendre sa durée de conservation ou d'améliorer les aspects de sécurité alimentaire, sans dénaturer la qualité du produit. Par exemple les absorbeurs, utilisés pour modifier l'atmosphère de conditionnement du produit afin d'assurer une meilleure conservation de ce dernier. Ou encore, les emballages à barrière, ces derniers empêchent ou ralentissent la perméabilité d'une composante volatile ou gazeuse (exemple : barrière à l'oxygène, à l'humidité, aux arômes, etc.).
- L'emballage dit « intelligent », qui surveille et contrôle l'évolution des conditions dans lesquelles le produit alimentaire a été emballé, en donnant des informations sur la qualité du produit pendant toutes les étapes de transport et stockage précédant sa consommation. Les emballages intelligents sont encore peu développés en raison de leur coût, des législations en vigueur et de certaines difficultés d'acceptation.

L'objectif de ce chapitre est de montrer que nous arrivons à voir l'évolution de la maturité des produits alimentaires à l'aide de notre Capteur-RFID. Pour cela, nous allons nous appuyer sur les résultats obtenus lors de l'ANR NextGenPAck [2]. Les tests réalisés en fonction de l'humidité et de différents gaz (CO₂, O₂ et C₂H₅OH) vont nous aider à analyser les résultats obtenus en milieux complexes. En effet, lorsque les aliments sont confinés

dans un emballage, ils « respirent » c'est-à-dire qu'il modifie leur environnement proche par rejet ou absorption de gaz. Il se crée alors un milieu très complexe dans lequel l'humidité tend à être maximale, l'oxygène (O_2) diminue, le CO_2 augmente et l'éthanol augmente également après fermentation. Ce chapitre commence par un bref état de l'art des capteurs RFID UHF passifs dédiés à la détection de la qualité des aliments. Nous présentons ensuite notre stratégie de détection axée sur le capteur RFID à base de gluten de blé présenté dans les chapitres précédents, avant de finir avec la validation de l'utilisation du capteur-RFID étudié dans cette thèse, en tant que détecteur de niveau de maturité des aliments.

4.2 Moyens de détection de la qualité des aliments

4.2.1 Comment quantifier ou mesurer la qualité des aliments ?

Tout au long de son cycle de vie, un aliment continue de respirer et de transpirer. Il consomme du dioxygène (O_2), rejette du dioxyde de carbone (voir Figure 4-1) et de l'eau, ainsi que d'autres composés volatiles divers (de l'éthanol, de l'ammoniac, des arômes ...).

Par exemple le cycle de vie des fruits se répartit principalement en trois étapes : le développement, la récolte et la sénescence. Il existe deux catégories de fruits, représenté par les deux courbes Figure 4-1, en fonction de la façon dont ils mûrissent :

- Les fruits climactériques : ce sont les fruits qui continuent à mûrir même après avoir été cueillis. Il s'agit de l'Abricot, Avocat, Banane, Figue, Fruit de la passion, Goyave, Kiwi, Mangue, Melon, Nectarine, Papaye, Pêche, Poire, Pomme, Prune et Tomates.
- Les fruits non climactériques : à l'inverse, eux ne mûrissent plus après la cueillette. Il s'agit des Agrumes (Citron, Mandarine, Orange, Pamplemousse), Ananas, Cerises, Concombres, Fraises, Litchis, Pastèques, Salades et Raisins.

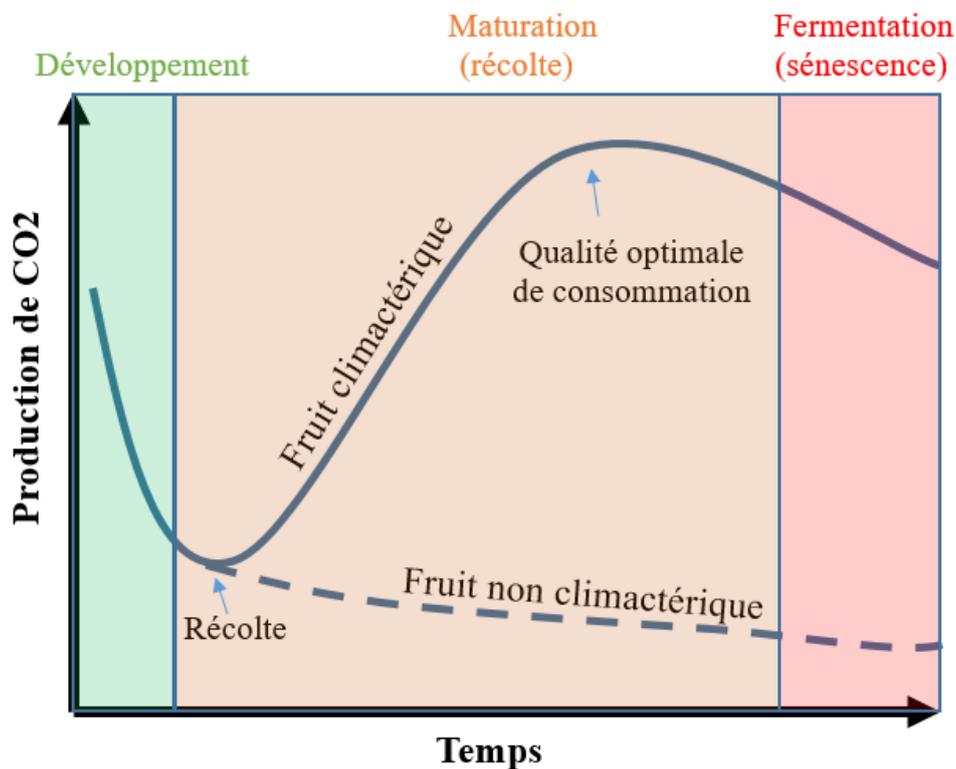


Figure 4-1: Représentation de la fermentation des fruits tropicaux après récolte [3]

Le processus de respiration est l'une des caractéristiques principales d'un aliment. Les produits ayant des taux de respiration plus élevés tendent à avoir une durée de conservation plus courte que ceux dont les taux de respiration sont plus faibles. Certains d'entre eux sont classés dans le Tableau 4-1, en fonction du taux de respiration.

Tableau 4-1 : Classement de certaines denrées alimentaires en fonction de leurs taux de respiration [3]

| Respiration | Taux de respiration à 5°C (mg CO₂/kg.h) | Aliments |
|--------------------|---|--|
| Très basse | < 5 | Noisettes, dates |
| Basse | 5 - 10 | Pomme, citron, raisin, kiwi, oignon, patate |
| Moyenne | 10 – 20 | Abricot, banane, cerise, pêche, nectarine, poire, prune, figue, tomate, carotte, laitue, chou, poivron |
| Modéré | 20 – 40 | Fraise, mûre, framboise, chou-fleur, haricot, avocat |
| Haute | 40 – 60 | Artichaut, haricot vert, choux de Bruxelles, fleurs comestibles |
| Très haute | > 60 | Maïs sucré, épinards, pois, asperges, brocoli, champignons |

Au cours de leurs transports et commercialisation, les aliments sont soumis à différentes contraintes environnementales qui peuvent accélérer leur vieillissement. Pour limiter ce phénomène il existe des films alimentaires « actifs » qui permettent de maintenir une atmosphère viable pour le produit. Parmi la multitude de matériaux étudiés pour leurs qualités de perméabilité [4], on note que le gluten de blé [1], induit une atmosphère pauvre en O₂ ainsi qu'en CO₂ et évite les phénomènes de condensation pour permettre une conservation pendant 4 jours à 20°C [5]. Nous savons également que les échanges respiratoires augmentent considérablement avec la température, entre 3 et 12°C [3]. La vitesse d'une réaction biologique augmente de 2 à 3 fois pour chaque augmentation de température de 10°C, la durée de vie diminue donc en conséquence.

Les paramètres qui affectent la qualité des aliments sont :

- La température : ce paramètre dépend du mode de transport des aliments (chaîne du froid) ;
- La vapeur d'eau : liée à la transpiration des aliments, ce paramètre est important à maîtriser pour éviter le développement des pourritures / moisissures ;
- La composition gazeuse : ce paramètre affecte la respiration des aliments. Une atmosphère modifiée ou protectrice permet de retarder le vieillissement de l'aliment.

La question qui se pose maintenant est : quels sont les moyens qu'il est possible de mettre en place afin d'indiquer à l'utilisateur final que son produit est sain et qu'il a été acheminé sans rupture de la chaîne du froid. Pour répondre à cette problématique, nous proposons d'intégrer le capteur RFID présenté dans le chapitre 2 dans un emballage alimentaire afin de créer un emballage intelligent permettant ainsi de suivre la maturité du produit.

4.2.2 Les moyens de détection en RFID

Comme nous l'avons vu précédemment, à l'intérieur d'un emballage alimentaire se crée une atmosphère complexe. Afin de détecter certains composés chimiques, il existe dans le commerce des indicateurs de fraîcheur des aliments, une liste non exhaustive de certains d'entre eux est présentée dans le Tableau 4-2. Ces indicateurs sont utilisés pour le suivi de la chaîne du froid depuis l'étape de fabrication jusqu'à la consommation chez le

client final. Pour ce suivi, l'indicateur n'est pas directement en contact avec l'aliment en question, c'est ce que l'on appelle un « indicateur indirect » de la qualité des aliments [1].

Tableau 4-2: Indicateur Temps-Température commerciale [6]

| | |
|-----------------------------|-------------------------|
| Vitsab International | hydrolyse enzymatique |
| Traceo-Cryolog | dégradation microbienne |
| Fresh-Check | polymérisation monomère |
| 3M MonitorMark | indicateur chimique |
| Innolabel | indicateur chimique |
| CoolVu Food | indicateur chimique |
| CheckPoint | réaction enzymatique |

Une alternative aux solutions commerciales citées plus haut fait appel à la technologie RFID. Nous présentons donc dans la section suivante un état de l'art des capteurs-RFID appliqués au domaine de l'agroalimentaire afin de positionner notre contribution. Nous présenterons plus tard dans ce chapitre les expériences de suivi de la détérioration des aliments avec le capteur-RFID développé durant cette thèse.

4.2.2.1 Capteur de qualité des aliments basé sur une variation de permittivité des aliments

Ce type de capteur RFID UHF [7] utilise la variation de la permittivité de l'objet, sur lequel il est « apposé », comme paramètre physique à mesurer. En connaissant la variation de la permittivité en fonction du temps, on peut déduire la contamination des aliments. Le degré de contamination est détecté par le lecteur RFID lors d'une variation de la « distance maximale théorique de lecture », calculée à l'aide de l'équation de Friis.

Plus précisément, ce capteur est utilisé pour détecter la qualité du fromage et de la viande. Ces produits sont considérés comme contaminés, si les normes physico-chimiques telles que le pH, l'humidité relative et la concentration d'ammoniaque (NH₃) dépassent les seuils autorisés. Plusieurs mesures de pH ont déterminé qu'à 120h (voir Figure 4-2) la viande est considérée comme contaminée, ce qui est également confirmé par les odeurs et la viscosité des échantillons.

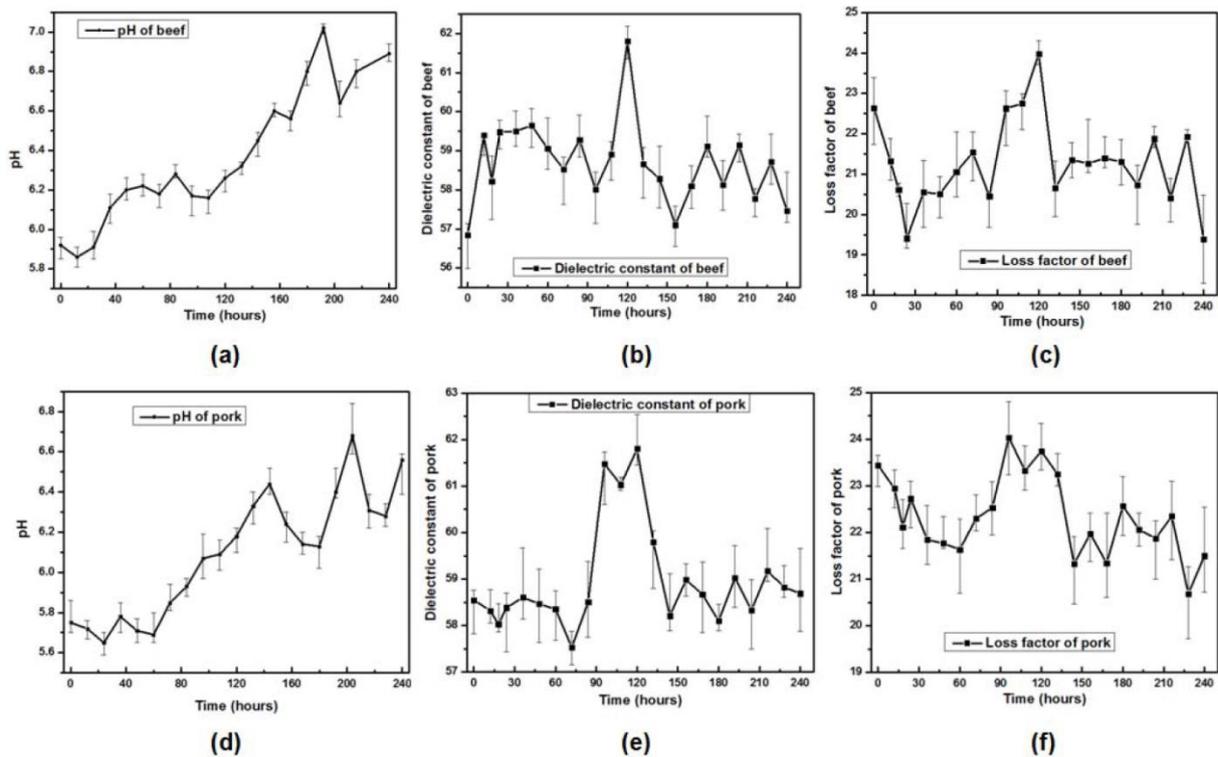


Figure 4-2 : Résultats de mesure de la caractérisation de la viande [7]

- (a) pH du bœuf (b) constante diélectrique du bœuf (c) perte du bœuf
 (d) pH du porc (e) constante diélectrique du porc (f) perte du porc

Ce capteur est utilisé en tant que capteur de seuil de contamination dont les résultats sont présentés Figure 4-3. La contamination apparaît à partir de 120 h comme l'atteste les variations significatives de « read range ». Dans cette étude, l'ajout d'un second tag a permis d'augmenter la fiabilité de la mesure. Par respect pour les normes et l'hygiène, il y a un film alimentaire entre le capteur et l'aliment.

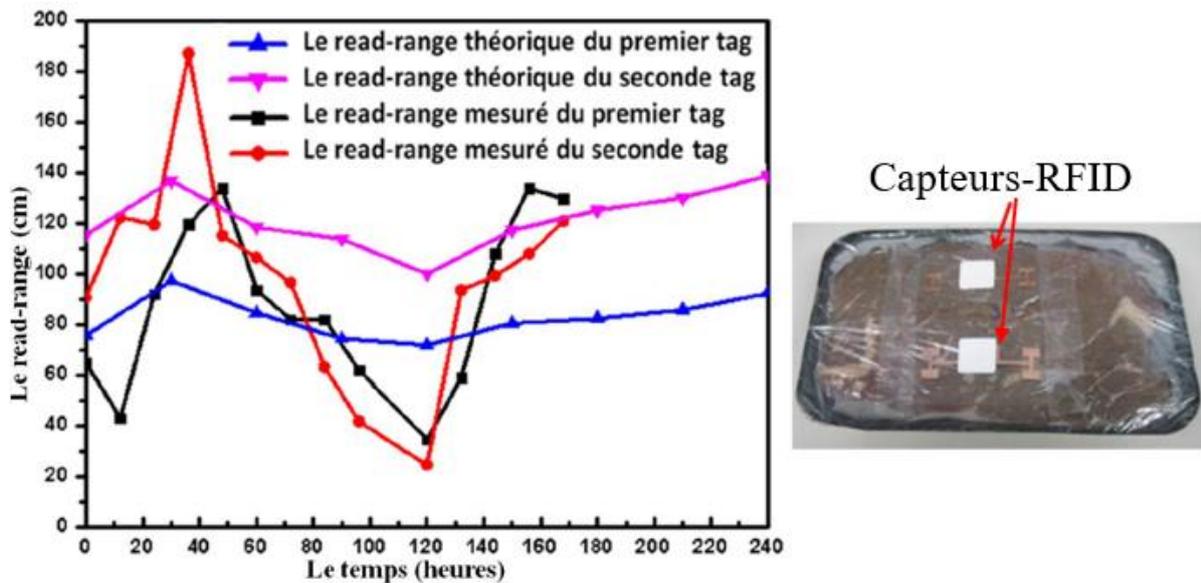


Figure 4-3 : résultats de mesure de deux tags déposés sur la viande de bœuf [7]

Toujours avec le même principe de détection, d'autres capteurs ont été réalisés. Par exemple dans [8], le capteur fonctionne à l'aide d'un résonateur LC placé dans le milieu biologique à étudier, ici l'huile d'olive. La détection se fait par variation de fréquence de résonance. Le résonateur LC est facilement intégrable sur un tag RFID et permet la détection de concentration de bactérie présente dans le lait, la viande et la bière. La fréquence du résonateur varie en fonction des variations de permittivité de l'échantillon qui elle-même varie en fonction de la concentration des bactéries.

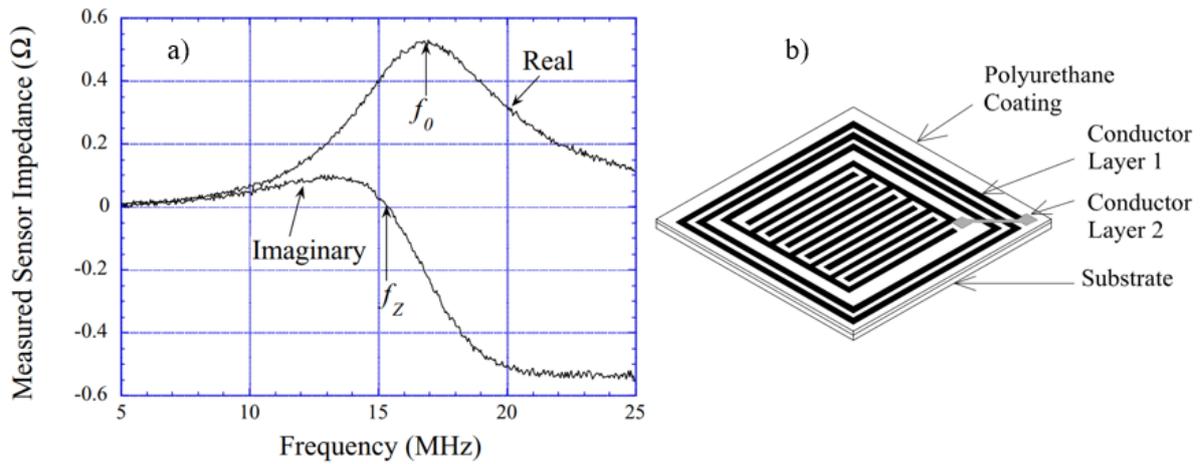


Figure 4-4 : a) Impédance du capteur après soustraction de l'impédance de l'antenne, b) Présentation du capteur LC composé d'un circuit LC connecté en série, imprimé sur un substrat en plastique.[8]

Comme on peut le voir sur la Figure 4-4 b), le capteur est recouvert d'une couche de polyuréthane pour empêcher le milieu biologique conducteur de court-circuiter le condensateur et d'amortir la résonance. Le principe de détection est également basé sur la variation de la permittivité complexe du milieu biologique. La permittivité du milieu augmente avec la concentration de bactérie, provoquant une variation de la capacité interdigitée qui décale à son tour la fréquence centrale f_0 et la réactance nulle f_z . (Voir Figure 4-4 a)) Ces variations de fréquence sont utilisées pour calculer ϵ'_{eff} et ϵ''_{eff} (équation 4.1) afin de déterminer la concentration de bactérie dans le milieu biologique.

$$\epsilon'_{eff} = \frac{1}{(2\pi f_0)^2 L k \epsilon_0} - \epsilon_s \quad \text{et} \quad \epsilon''_{eff} = \frac{\sqrt{f_0^2 - f_z^2}}{4\pi^2 f_0^3 L k \epsilon_0} \quad (4.21)$$

Où ϵ_0 est la permittivité du vide ($\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ Farads / mètre), ϵ_s est la permittivité relative du substrat sans perte électrique ($\epsilon_s = \epsilon'_s$), k est la constante de cellule de la capacité interdigitée, et L est l'inductance de la spirale. La constante de cellule κ et l'inductance L sont calculées à partir de la géométrie du capteur.

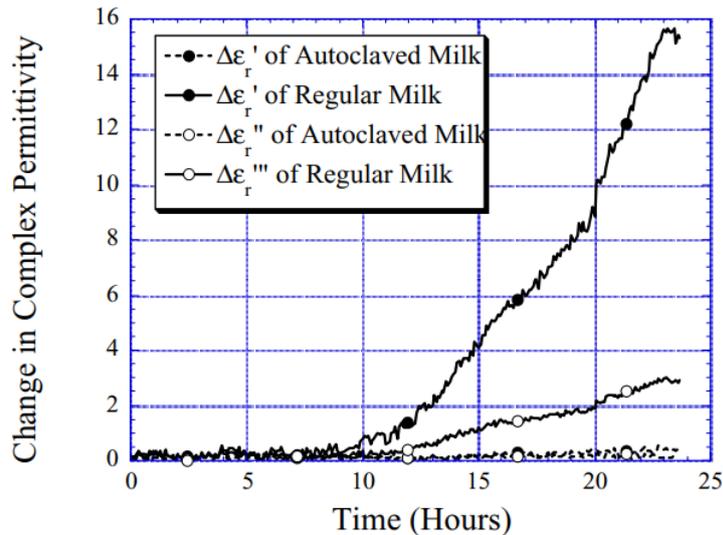


Figure 4-5 : Permittivité complexe au cours du temps dans deux échantillons de lait (lait contaminé et lait référence)[8]

Les résultats sont présentés en Figure 4-5, où l'on voit les variations de la permittivité complexe au cours du temps dans deux échantillons de lait : contaminé (nommé « *regular milk* » sur la Figure 4-5) et référence (nommé « *autoclaved milk* » sur la Figure 4-5). On remarque clairement que la permittivité est un bon indicateur de la qualité du lait. La permittivité complexe du capteur immergé dans le lait référence augmente à mesure que le nombre de bactéries augmente, alors que la permittivité complexe du capteur immergé dans le lait référence sans bactéries (car pasteurisé) reste constante au fil du temps.

4.2.2.2 Capteur de qualité des aliments basé sur la détection de gaz

Lorsque le sucre fermente à l'abri de l'air, il produit de l'éthanol (C_2H_5OH). C'est le principe de transformation qui se produit quand on laisse fermenter le jus de raisin, pour donner du vin. L'éthanol est un alcool naturel issu de la fermentation par la levure de sucres contenue dans les fruits. Il peut potentiellement être utilisé pour localiser les fruits mûrs, voire périmés. De plus, la maturation des fruits peut également être associée à des changements importants de couleur, de résistance à la perforation. Cette étude [9], présente un capteur RFID avec antenne fonctionnalisée, qui se rapproche le plus de notre dispositif et permet de détecter la quantité d'éthanol présent. Le capteur est présenté Figure 4-6.

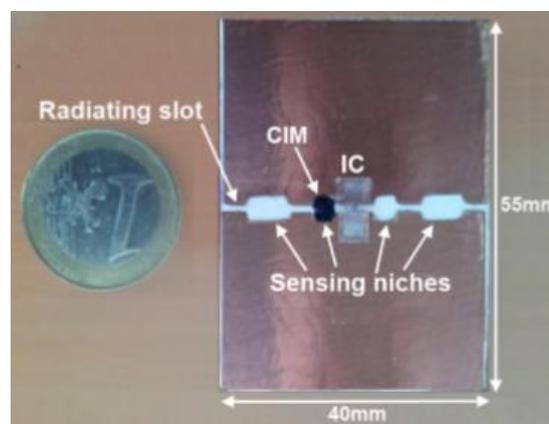


Figure 4-6 : Vue de dessus du prototype de capteur RFID [9]

C'est une antenne planaire repliée autour du substrat pour former un plan de masse. De dimensions inférieures à celle d'une carte de crédit, elle est munie d'une fente centrale

dans laquelle la puce RFID est placée. Les parties supérieures de l'antenne sont reliées au plan de masse au moyen de deux fines bandes situées aux coins opposés dans le but d'allonger le trajet du courant. C'est à l'intérieur de la fente qu'est placé le matériau sensible, le PEDOT-PSS (zone noire sur la Figure 4-6). Ce capteur fonctionne dans la bande UHF, l'antenne est connectée à une puce NXP ayant pour impédance $25-j237\Omega$, et une sensibilité de -18dBm . La détection est basée sur le suivi de la puissance minimale nécessaire au lecteur pour activer la puce P_{in}^{to} .

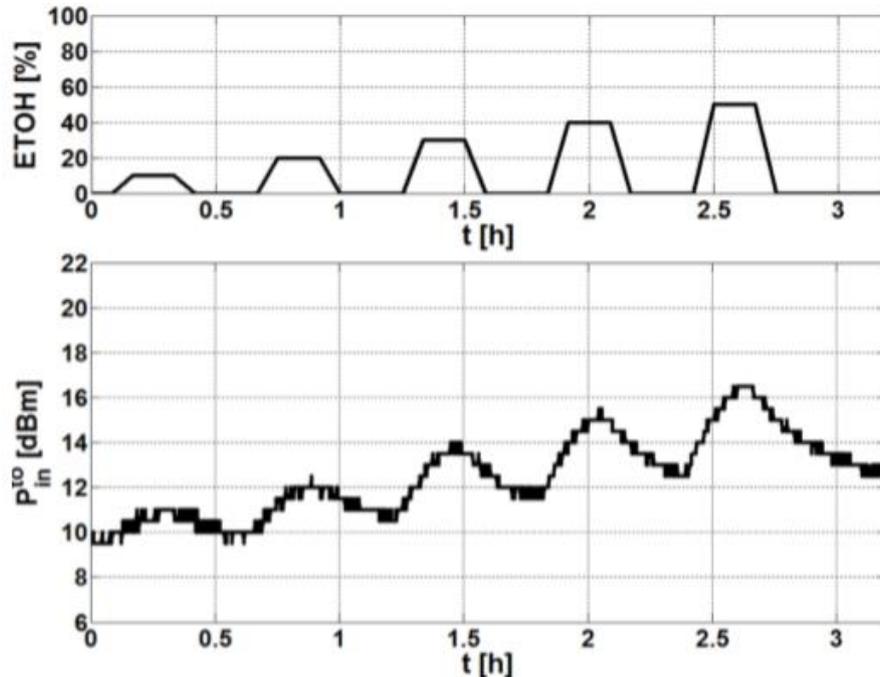


Figure 4-7 : Résultats de mesures de la puissance minimum d'activation sur plusieurs cycles d'exposition à l'éthanol à 940 MHz

Comme on peut le voir sur les résultats présentés en Figure 4-7, l'étiquette a été exposée à des concentrations croissantes d'éthanol. Dans ce test, la molécule à détecter a été vaporisée avec des concentrations précisément dosées par un contrôleur de débit massique, et une chambre étanche à l'air, dans laquelle le capteur-RFID a été placé. Le résultat obtenu est visible sur la courbe du dessous dans la Figure 4-7. Lorsque l'étiquette a été soumise à plusieurs cycles d'exposition et de récupération (15 min et 20 min, respectivement) pour des concentrations différentes d'éthanol. Nous remarquons que le capteur n'est pas totalement réversible, puisque un offset croissant apparaît sur le paramètre P_{in}^{to} .

Suite à cela, d'autres matériaux sensibles (PDAC, Doped PSS, SWCNT) en plus du PEDOT-PSS ont été testés avec d'autres gaz tels que l'ammoniac (NH_3) et l'octane [10]. Les différentes sensibilités en termes de puissance minimum d'activation sont présentées dans le Tableau 4-3.

Tableau 4-3 : Sensibilité aux gaz de la puissance minimum d'activation de la puce RFID en $[\text{dB}/\% \text{HR}]$ [10]

| | Sensibilité de la puissance minimum d'activation de la puce RFID en $[\text{dB} / \% \text{HR}]$ | | |
|------------------|--|--------------------------|------------------------|
| | Ethanol (50 – 100 %) | Ammoniac (50 – 100 %) | Octane (50 – 100 %) |
| PDAC | 0.02 | 0.10 | 0.09 |
| Doped PSS | 0.35 | 0 | 0 |
| SWCNT | 0 | 0.04 | 0 |
| Pedot PSS | 0.04 | 0 | 0 |

4.3 Principe de détection basé sur l'utilisation des agro-polymères

L'objectif d'explorer les polymères végétaux comme matériau de détection, n'est pas de concurrencer les matériaux sophistiqués, mais de proposer des capteurs fiables, sûrs et durables voir biocompatible, avec la sensibilité minimale nécessaire, compatibles avec les exigences sanitaires du domaine de l'emballage alimentaire.

La permittivité du gluten de blé a été mesurée et étudiée pour différents environnements, en humidité variable et en présence de différent gaz (la sensibilité pour chacun est donnée plus bas). Cependant, le gluten de blé n'a pas été testé en environnement réel/ complexe plongé dans un emballage alimentaire. La problématique de ce type d'expérimentation est qu'il sera difficile de trouver le paramètre le plus influent puisque tous les paramètres (gaz, humidité relative et température) sont influents. Notre stratégie s'inscrit donc dans l'objectif de réaliser un emballage intelligent à l'aide de notre capteur-RFID. Pour cela nous nous sommes basés sur les études et diverses expérimentations RF, réalisées sur le gluten de blé en collaboration avec le IATE [11]. Ces études ont permis de confirmer le comportement du gluten de blé, en tant qu'élément sensible aux gaz dégagés par les fruits en fermentation.

Ce qui nous intéresse c'est justement la composition complexe de l'échange gazeux entre l'air et l'aliment en maturation dans une cellule hermétiquement fermée. L'air est constitué de 21 % de dioxygène, de 78 % de diazote. Après fermeture de la cellule (on admet donc qu'il y a 0 % de CO₂ et 0 % d'éthanol), l'atmosphère se charge en humidité et peut atteindre une valeur de 95 % d'humidité relative. On observe ensuite une augmentation du CO₂, qui va de pair avec la diminution de l'O₂, liée à la respiration du produit. Et enfin, lors de la fermentation le produit dégage de l'éthanol. Ces observations ont été vérifiées lors de travaux précédents qui ont permis d'obtenir une caractérisation électrique du gluten de blé, déposé en fine couche sur une capacité interdigitée (7.4 mm × 12.4 mm) présentée Figure 4-8. La mesure d'impédance de cette capacité interdigitée a été effectuée en environnement contrôlée (humidité, gaz) et pour plusieurs fréquences.

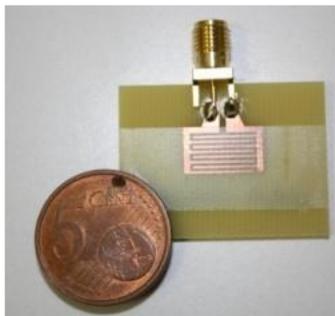


Figure 4-8 : Capacité interdigitée utilisée pour les tests

Le banc d'essai présenté Figure 4-9, est composé d'un analyseur de réseaux auquel est connecté la capacité interdigitée afin d'en récupérer les variations d'impédance. Cette capacité interdigitée est mise dans une cellule hermétique dans laquelle se trouve le produit en maturation. Pour le suivi de l'environnement, il y a également un capteur de CO₂, un capteur d'O₂ et un capteur d'éthanol (Vernier Software & Technology [12]). Deux de ces capteurs de gaz présentent quelques caractéristiques techniques qu'il est important de mentionner :

- Le capteur de CO₂ sature à 10 %. Il est donc impossible de déterminer le taux de CO₂ si celui-ci dépasse le seuil de 10 %.

- Le capteur d'éthanol ne peut mesurer une concentration inférieure à 0,007%.

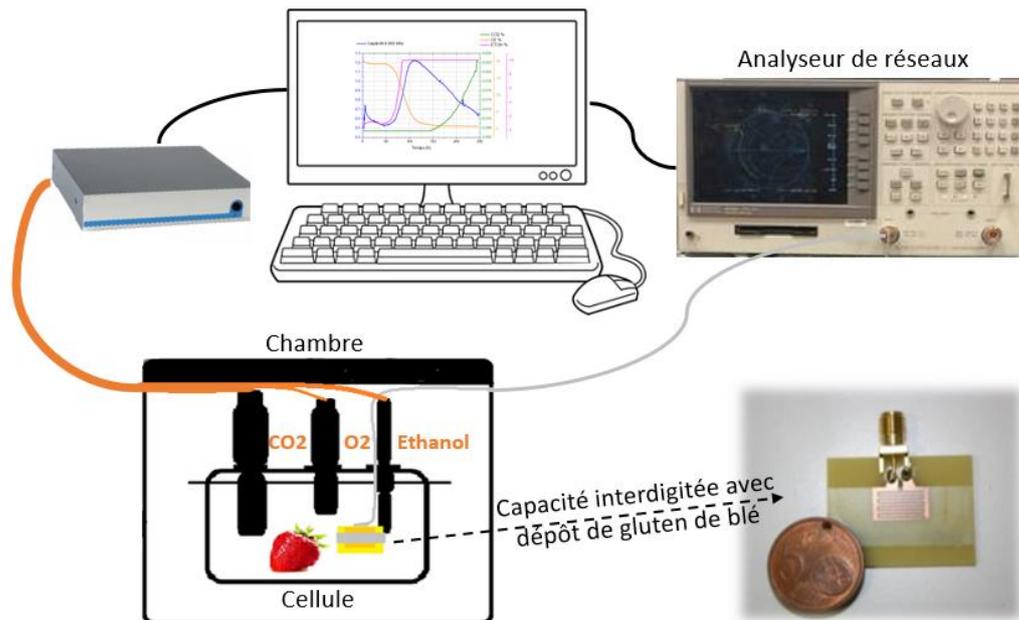


Figure 4-9: Banc d'essai

Le capteur a préalablement été testé en présence de chacun de ces gaz séparément et également en fonction de l'humidité. Les valeurs de sensibilité de la capacité interdigitée avec le dépôt de gluten de blé sont :

- En fonction de l'humidité : $10 \pm 0,43 \text{ fF}/\% \text{ HR}$, calculée entre 20 % et 80 % d'humidité relative, dans un environnement ambiant (CO₂ à 20 % et éthanol à 0%)
- En fonction du CO₂ : $31,38 \pm 0,06 \text{ fF}/\% \text{ de CO}_2$ pour une humidité relative de 90 %.
- En fonction de l'éthanol : $25,50 \pm 0,05 \text{ pF}/\% \text{ d'éthanol}$ [13], pour une humidité relative de 90 %.

Plus grande est la sensibilité, meilleure sera la détection, car elle permet de mesurer la plus petite variation du paramètre physique. Comme illustré en Figure 4-9, l'analyseur de réseaux et l'ensemble des capteurs de gaz sont connectés à un PC afin d'enregistrer en temps réel l'évolution de l'environnement complexe à l'intérieur de la cellule ainsi que la réaction du capteur à base de gluten de blé.

Le résultat de l'expérimentation est présenté en **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**, dans lequel on observe l'évolution de l'intensité de respiration d'un fruit (ici des fraises). Lorsque le fruit se trouve dans la période de maturation (entre 0 h et 120 h) on remarque bien que le CO₂ augmente et l'oxygène (O₂) diminue. Au-delà de 125h le fruit passe dans sa période de fermentation que l'on remarque par le dégagement de l'éthanol. Ces résultats ne nous permettent pas de corréler les différentes informations, car plusieurs paramètres interagissent avec le dépôt de gluten de blé. Ceci étant, nous remarquons que la valeur de la capacité atteint un maximum lorsque l'oxygène commence à disparaître (lorsque le dioxyde de carbone a atteint sa valeur maximale). La forte variation de la capacité, représentée par la courbe bleue dans la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**, nous permet de valider l'utilisation du gluten de blé en tant qu'indicateur de début de fermentation du fruit.

Nous allons donc réaliser un indicateur de qualité des aliments à l'aide de notre capteur-RFID. Tous nos essais en milieu complexe avec le Capteur-RFID feront l'objet d'une

évaluation visuelle des aliments afin de corrélérer la réponse du capteur avec un seuil d'acceptation.

4.4 Validation du capteur RFID à base d'agro-polymère : Mesures et analyses

Dans cette partie, nous allons présenter, les résultats de notre étude sur la détection de la qualité des aliments en commençant par la présentation du banc de mesure utilisant le capteur-RFID avec dépôt de gluten de blé.

4.4.1 Banc expérimental utilisant le capteur-RFID

Nous avons mis en place un banc de mesure, présenté en Figure 4-10. Ce banc utilise le lecteur RFID Voyantic TagFormance Lite piloté par un code LabView permettant l'automatisation des mesures (Cf. chapitre 3). Pour cette expérience, nous avons ajouté une cellule que l'on peut fermer hermétiquement, dans laquelle nous déposons le produit à analyser. Autour de ce produit nous avons disposé trois capteurs de gaz : un capteur de CO₂, un capteur d'oxygène et un capteur d'éthanol auxquels s'ajoutent un capteur d'humidité relative et de température, pour un suivi d'étalonnage. Notre capteur-RFID est lui aussi disposé à l'intérieur de la cellule. Chaque expérience dure de 4 à 6 jours en fonction du produit et de son cycle de fermentation.

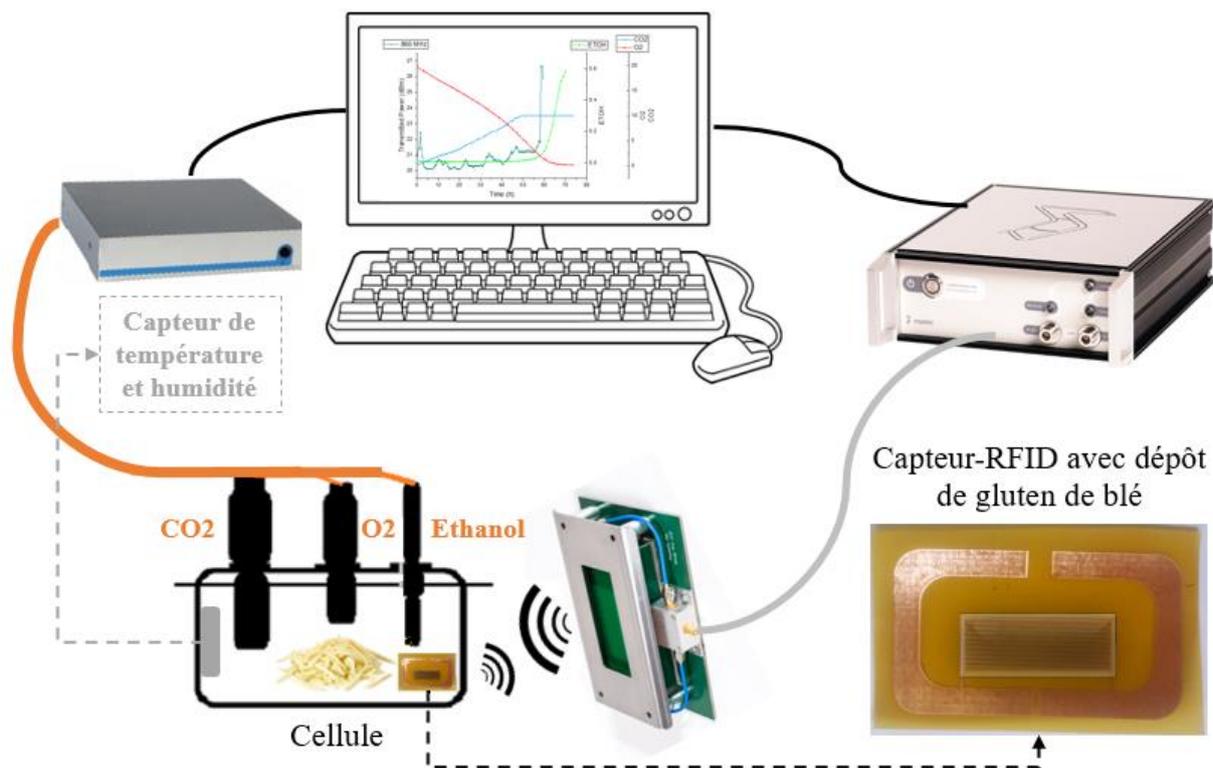


Figure 4-10 : Banc de mesures avec capteur-RFID et capteurs de gaz (CO₂, O₂, Éthanol)

Durant toute la période des expériences, nous avons recueilli, les puissances de communication entre le capteur-RFID et le lecteur (Voyantic Tagformance Lite) toutes les 30 minutes pour une fréquence comprise entre 800 MHz et 1000 MHz avec un pas de 1 MHz. Afin de suivre la stabilisation en humidité correctement, la période de mesure est fixée à 5 minutes en début d'expérience. Pour tous les autres capteurs (CO₂, O₂, Éthanol, humidité et température) les mesures sont prises de manière autonome toutes les 20 minutes. Le traitement des données a été réalisé à l'aide d'un algorithme mis au point sur Matlab, nous permettant d'identifier les étapes de fermentation des aliments.

4.4.2 Analyse des étapes de fermentation des aliments testés

Nous avons réalisé nos expériences à température ambiante (à 22°C) afin d'augmenter le taux de respiration. Les produits sélectionnés pour les tests sont présentés dans le Tableau 4-4.

Tableau 4-4: Taux de respiration, température de stockage et durée de vie des aliments sélectionnés pour l'expérimentation [3]

| Produits testés | Taux de respiration (mg CO ₂ /kg.h) | Température de stockage | Durée de vie |
|----------------------|--|-------------------------|--------------|
| Salade (laitue) | 10-20 Modéré | 0-4°C | 10 jours |
| Champignon | > 60 très élevé | 1-4°C | 7-10 jours |
| Fromage (Mozzarella) | -- | 4-8°C | 1 mois |

Nous avons sélectionné ces produits en fonction de leurs taux de respiration ; modéré pour la salade et très élevé pour le champignon. Concernant le fromage râpé (mozzarella), nous nous sommes basés sur une étude réalisée par M.Sicard et al. [14], afin d'en déduire que le taux de respiration du fromage peut être considéré comme très élevé. Cette importante respiration est principalement due au microorganisme présent à sa surface.

Pour tester les performances de détection du capteur RFID réalisé dans le cadre de cette thèse, et juger de son aptitude à détecter des aliments de différentes natures nous avons réalisés les expériences suivantes :

- Suivi de la fermentation de champignon de Paris. Les mesures ont été effectuées avec un dispositif champ proche.
- Suivi de la fermentation de la salade. Dans cette expérience nous avons souhaité également tester si la détection était possible avec un système de mesure en champ lointain.
- Suivi de la fermentation du fromage avec un dispositif champ proche. Pour mieux comprendre les différents mécanismes mis en jeux lors de la fermentation des aliments, cette dernière expérience a été réalisée en utilisant le banc présenté en Figure 4-10, avec un suivi en gaz (CO₂, O₂ et Éthanol), en température et en humidité.

4.4.2.1 Champignon avec emballage industriel

Nous avons commencé nos mesures sur des champignons, présentés en Figure 4-11 a) en début d'expérience. La barquette recouverte d'un film alimentaire contient 200 g de champignon de Paris. Le capteur-RFID est fixé sur la paroi de la barquette pour être au plus près de l'antenne champ proche du lecteur RFID, comme présenté Figure 4-12 b). Dans cette première expérience nous avons voulu suivre l'évolution de la fermentation afin de voir si le capteur-RFID ainsi utilisé, été assez sensible aux variations de gaz en milieu complexe. Nous avons réalisé deux expériences qui ont duré 3 et 4 jours, les résultats obtenus sont présentés en Figure 4-12.

4.4.2.2 Salade avec emballage industriel

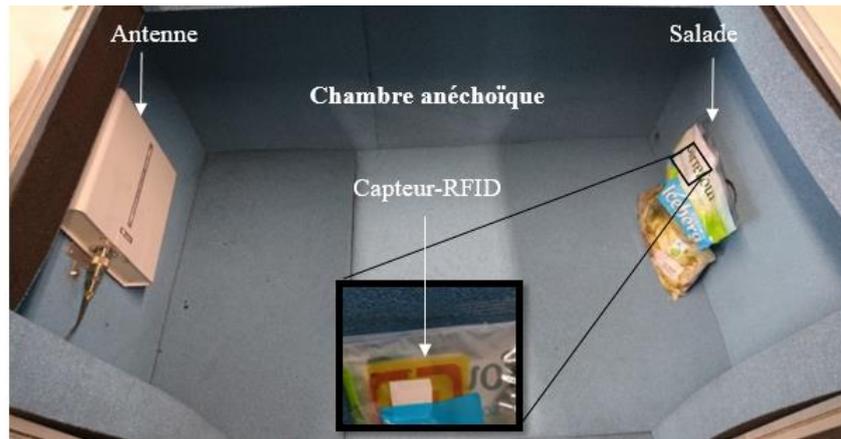


Figure 4-13 : Expérience avec 300 g de salade (Iceberg) dans une chambre anéchoïque utilisant deux tags, avec et sans dépôt de gluten.

Pour cette deuxième expérience, nous avons utilisé 300 g de salade en sachet (Iceberg) comme présenté sur la Figure 4-13. Le capteur-RFID est fixé sur la paroi du sachet, et est mis à l'intérieur de la chambre anéchoïque. Nous avons placé le sachet avec le capteur-RFID à une distance suffisamment grande pour respecter l'approximation du champ lointain. Ce qui nous a permis de comparer les résultats avec la précédente expérience (en champ proche) et de suivre l'évolution de la fermentation de la salade. Les résultats obtenus sont présentés en Figure 4-14, pour deux fréquences (820 MHz et 860 MHz).

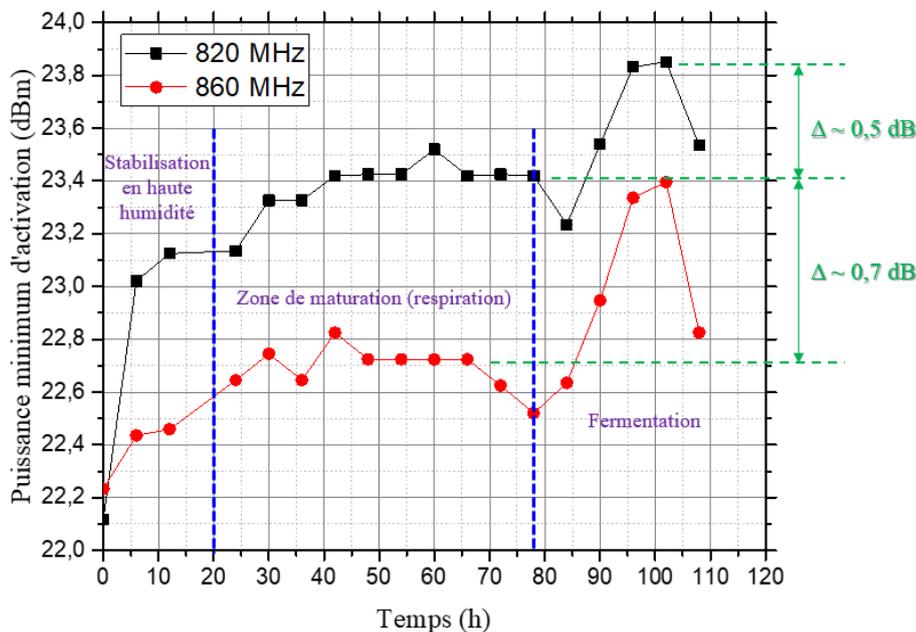


Figure 4-14 : Résultats d'expériences sur la salade jusqu'à détérioration de l'aliment utilisant deux tags, avec et sans dépôt du gluten.

Nos points de mesure ont été pris toutes les 6 heures. Nous remarquons clairement les étapes de stabilité, maturation et fermentation de la salade comme pour les champignons. Nous remarquons également que, lors de la dernière étape (au-delà de 80 h) liée à la fermentation de la salade, une forte variation de la puissance minimum d'activation est détectée. À la fréquence de 820 MHz, la variation est de 0,5 dB, à la fréquence de 860 MHz la variation est de 0,7 dB.



Figure 4-15 : Salade à la fin de l'expérience.

En Figure 4-15, nous avons présenté l'état de la salade à la fin de l'expérience à gauche de l'image. À droite nous avons l'état du capteur-RFID avec dépôt du gluten de blé qui s'est légèrement verdi à cause des germes qui se sont déposés dessus.

4.4.2.3 Fromage (Mozzarella) testé en cellule fermée hermétiquement

Cette expérience a été réalisée en utilisant le banc présenté en Figure 4-10. Pour nous affranchir de toute variation de température (perturbation extérieure), nous avons positionné la cellule à l'intérieur d'une chambre climatique. Ce qui nous a permis de fixer la température de l'environnement extérieure à la cellule à 22°C.

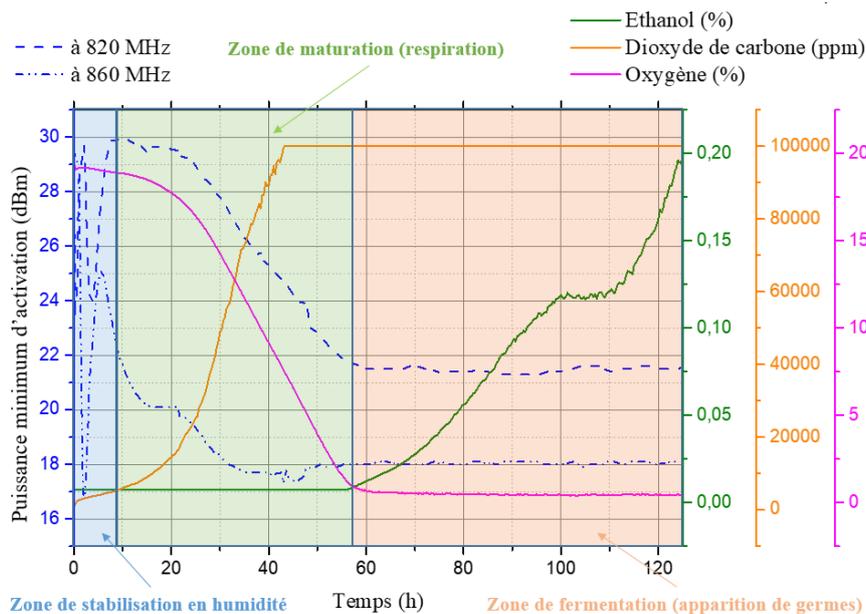


Figure 4-16 : Résultats d'expériences sur le fromage (mozzarella) pour deux fréquences (820 MHz et 860 MHz) sur lequel nous voyons apparaître trois périodes bien distinctes : une période de stabilisation du gluten de blé à l'environnement, une zone de respiration, et une zone de fermentation du fromage.

Les résultats sont présentés en Figure 4-16, les deux courbes bleues sont les résultats de détection du capteur-RFID pour deux fréquences, 820 MHz et 860 MHz. On note, la respiration du fromage avec la montée du CO₂ (courbe en orange), et la descente de l'oxygène (courbe en rose). Puis le dégagement de l'éthanol lors de la fermentation (courbe en vert). Sur ces résultats, on remarque principalement trois zones bien distinctes : la zone de stabilisation en humidité, qui intervient après la fermeture de la cellule. Vient ensuite la zone de maturation de l'aliment, période pendant laquelle l'aliment respire, et enfin, la zone de fermentation pendant laquelle l'aliment dépérit.

Afin d'observer plus de détails en début de cycle nous avons affiché en Figure 4-17 les 15 premières mesures. Nous confirmons que la zone de fluctuation au début de l'expérience est bien due à la stabilisation. Celle-ci dure 2h30 pour la température, et 2h50 pour l'humidité. La réponse du capteur-RFID se stabilise lors de cette première étape après 7h30. Le milieu complexe dans lequel se trouve le capteur-RFID explique ce temps de stabilisation élevé.

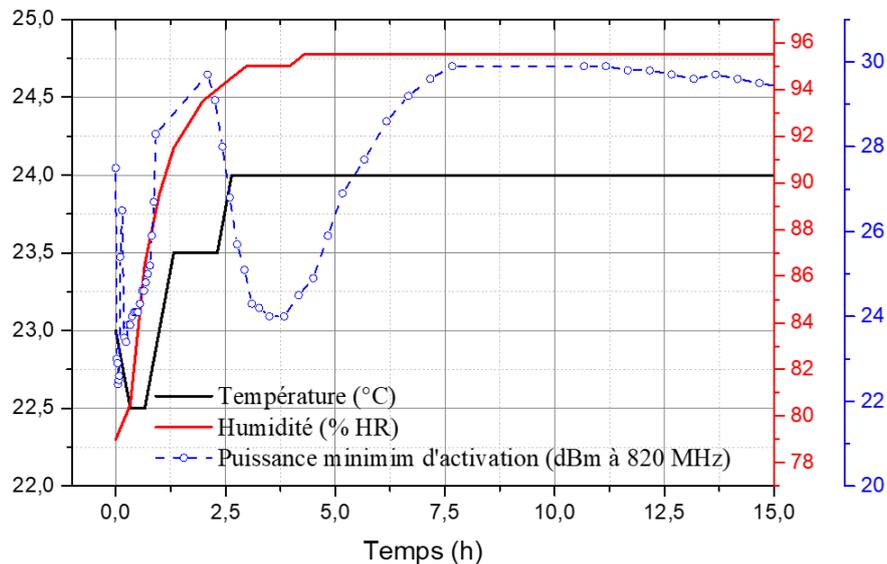


Figure 4-17 : Réponse du capteur-RFID à la fréquence de 820 MHz, comparée aux courbes d'humidité relative et de température. Les résultats correspondent à la période de stabilisation du gluten de blé exposé à un environnement complexe présent à l'intérieur de la cellule.

Afin de corréliser les données du capteur-RFID à l'acceptabilité visuelle de fermentation, nous avons ajouté, au plus près de la cellule, une caméra pour prendre des photos de l'état du fromage toutes les 30 minutes. Nous avons sélectionné quelques photos afin de faire le lien entre les mesures des différents capteurs et l'apparition de germes. Comme on peut le voir sur la Figure 4-18, les deux photos en haut de la figure sont prises à $t = 0$ h et à $t = 125$ h. Elles correspondent respectivement au début et à la fin de l'expérimentation. Les trois photos du bas ont été sélectionnées afin d'observer la texture du fromage au moment où l'éthanol est relâché. L'oxygène à ce moment-là étant à un niveau très proche de 0% (donc le CO_2 a atteint son maximum ~ 20 %). Sur la photo prise à $t = 55$ h, on remarque le début de l'apparition de germes sur le fromage. Les photos prises peu de temps avant ($t = 47$ h) et peu de temps après ($t = 70$ h) confirment l'apparition de germes uniquement à partir de l'instant où l'éthanol est relâché. A $t = 70$ h les germes se sont déjà multipliés. Sur la courbe de réponse du capteur-RFID à 820 MHz, la photo prise à $t = 55$ h correspond au moment où la valeur de la puissance minimum d'activation de la puce se stabilise. De ce fait, il est possible de corréliser ces résultats à l'apparition de germes après 55 heures d'essai.

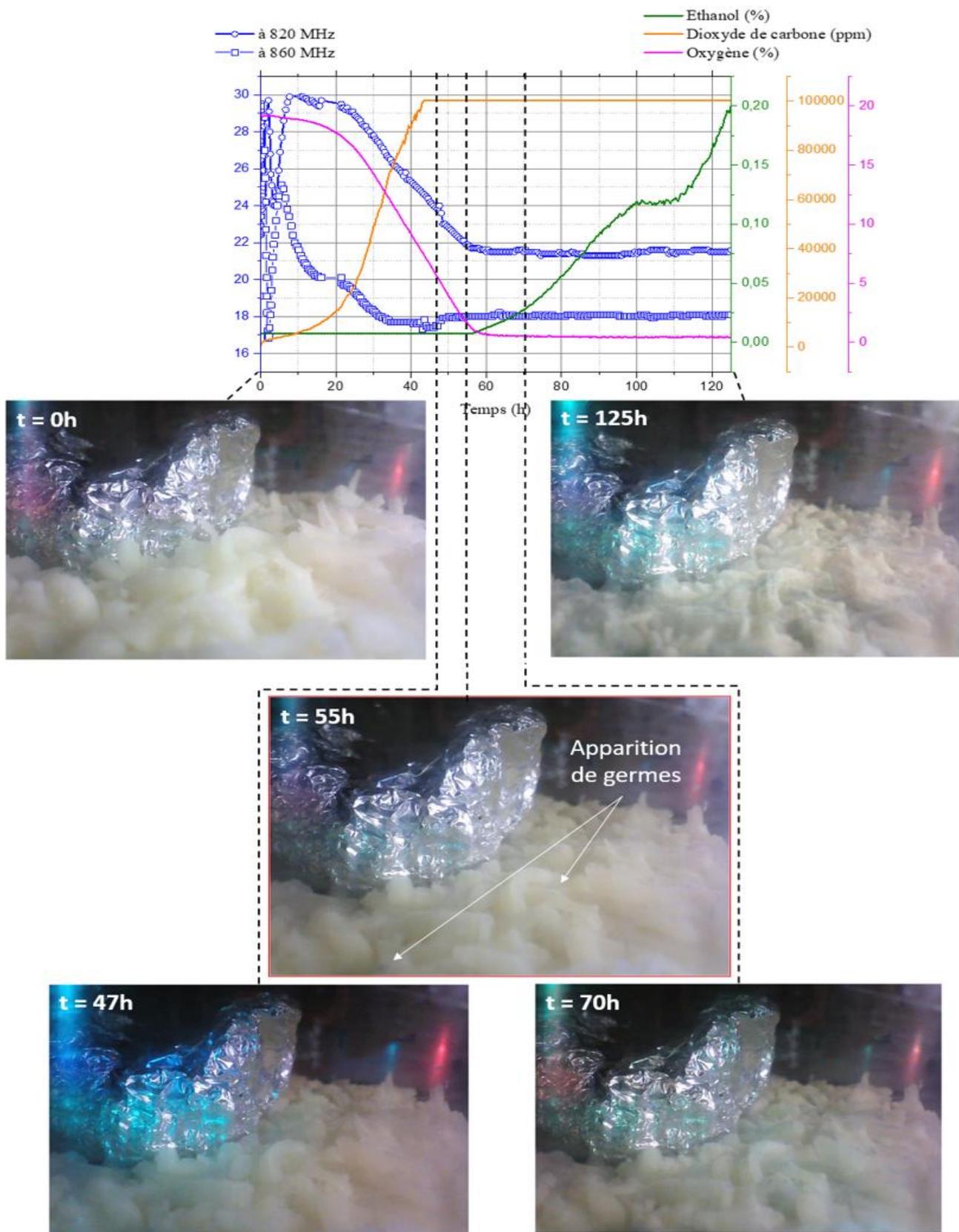


Figure 4-18: Relation entre les données du capteur-RFID et l'aspect visuel du fromage. Le monitoring a été effectué pendant 5 jours.

4.5 Conclusion

Ce chapitre, s'est porté sur l'étude de la détection de la qualité des aliments en utilisant le capteur-RFID avec fonctionnalisation au gluten de blé. Nous avons tout d'abord présenté le principe de détection basé sur le suivi des variations des propriétés diélectriques du gluten de blé lorsque celui-ci est exposé au dioxyde de carbone et/ou l'éthanol, pour une humidité relative de 90 %. Ensuite, dans une seconde partie nous avons présenté l'état de l'art des capteur-RFID dédié à la détection de la qualité des aliments.

Nous avons présenté ensuite les résultats de l'étude menée avec le capteur-RFID basé sur le gluten de blé étudié dans cette thèse. Des expérimentations ont été menées sur plusieurs aliments et les résultats de mesures issus du capteur-RFID ont été corrélés avec l'aspect visuel des aliments ainsi que les concentrations en gaz présents dans l'emballage de l'aliment.

Malgré les milieux complexes dans lequel nous avons placé le capteur pour ces expériences, une relation évidente peut être faite entre la texture des aliments et les mesures du capteur RFID. La dernière expérimentation sur le fromage nous indique que le capteur-RFID dans ce cas se stabilise en puissance d'activation lorsque l'oxygène atteint son minimum et que les germes apparaissent.

Ceci étant, le dispositif d'expérimentation peut encore être amélioré. D'autres expériences doivent être menées afin de confirmer quel est le gaz le plus influent sur les propriétés diélectriques du gluten de blé. Notamment, la prochaine expérience consisterait à tester à l'aide d'un banc dédié, les effets de chacun des gaz séparément sur le capteur-RFID.

Pour nous rapprocher d'un design pré-industrialisable nous envisageons également d'ajuster la géométrie du capteur RFID présenté dans le cadre de cette thèse afin qu'il puisse être utilisé dans les bandes de fréquences allouées aux systèmes RFID en Amérique du Nord et en Europe.

4.6 Références

- [1] C. Guillaume, B. Sorli, V. Guillard, et N. Gontard, « Emballage intelligent et RFID », *Innov. Agron.*, vol. 58, p. 21- 30, 2017.
- [2] F. Bibi, *Etude des propriétés diélectriques à haute fréquence d'un polymère végétal : le gluten de blé, et utilisation comme biocapteur de marqueurs environnementaux de la qualité des aliments dans des systèmes RFID passifs*. Montpellier, 2015.
- [3] « CommercialStorageIntro : USDA ARS ». [En ligne]. Disponible sur: <https://www.ars.usda.gov/oc/np/commercialstorage/commercialstorageintro/>.
- [4] M. S. Desobry, « Mise au Point et Caractérisation de Films Comestibles à Base de Polysaccharides et de Matières Grasses », p. 160.
- [5] « Champignon de Paris Un emballage à base de gluten de blé pour une meilleure conservation », *Terre-net*. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.terre-net.fr/observatoire-technique-culturelle/strategie-technique-culturelle/article/Null-217-28656.html>.
- [6] F. Bibi, C. Guillaume, N. Gontard, et B. Sorli, « A review: RFID technology having sensing aptitudes for food industry and their contribution to tracking and monitoring of food products », *Trends Food Sci. Technol.*, vol. 62, p. 91- 103, avr. 2017.
- [7] D. S. Nguyen, « Développement des capteurs sans fil basés sur les tags RFID uhf passifs pour la détection de la qualité des aliments », PhD Thesis, Université Grenoble Alpes, 2013.
- [8] K. Ong, J. Bitler, C. Grimes, L. Puckett, et L. Bachas, « Remote Query Resonant-Circuit Sensors for Monitoring of Bacteria Growth: Application to Food Quality Control », *Sensors*, vol. 2, n° 6, p. 219- 232, juin 2002.
- [9] S. Manzari, A. Catini, C. D. Natale, et G. Marrocco, « Ambient Sensing by Chemical-loaded UHF-RFIDs », p. 3, 2013.
- [10] S. Manzari, A. Catini, G. Pomarico, C. D. Natale, et G. Marrocco, « Development of an UHF RFID Chemical Sensor Array for Battery-Less Ambient Sensing », *IEEE Sens. J.*, vol. 14, n° 10, p. 3616- 3623, oct. 2014.
- [11] 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 », *Sens. Actuators Phys.*, vol. 247, p. 355- 367, août 2016.
- [12] « Vernier Software &Technology | Vernier ». [En ligne]. Disponible sur: <https://www.vernier.com/>.
- [13] 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. Actuators B Chem.*, vol. 230, p. 212- 222, juill. 2016.
- [14] M. Sicard, S. Martin, R. Reuillon, S. Mesmoudi, I. Alvarez, et N. Perrot, « The viability theory to control complex food processes. Application to Camembert cheeseripeningprocess », sept. 2018.

Conclusion générale

Ce travail de thèse qui portait sur la réalisation d'un Capteur-RFID UHF passif, nous a permis de traiter plusieurs aspects de la technologie RFID. Au terme de cette étude, nous sommes arrivés à la réalisation d'un capteur-RFID fonctionnalisé par dépôt de bio-polymère. Ce type de dispositif a été validé pour la détection de l'humidité dans un premier temps, puis adapté à l'agroalimentaire. Pour y parvenir, nous avons couplé le potentiel du gluten de blé en tant qu'élément sensible avec une antenne RFID afin d'en extraire une information capteur liée à la mesure environnementale. Par ailleurs, cette preuve de concept a été réalisée en prenant en compte plusieurs critères tels que le coût, l'encombrement ou encore le respect des réglementations en vigueur (Normes ISO, EPC, EIRP).

À travers le premier chapitre, nous avons vu que le domaine des capteurs-RFID est relativement large, notamment grâce à un état de l'avancement technologique des capteurs RFID existants, d'un point de vue commercial et académique. Ce premier travail a permis le positionnement de mon sujet de thèse. Il est apparu que le coût du capteur-RFID est un argument non négligeable pouvant permettre la démocratisation de cette technologie. C'est ce qui justifie le choix d'un capteurs-RFID UHF passif avec fonctionnalisation d'antenne, utilisant une puce RFID standard.

Dans le deuxième chapitre, après avoir donné un certain nombre de notions fondamentales à la compréhension de mon travail, j'ai présenté une étude sur le design, la méthode de conception et la réalisation de l'antenne d'un capteur-RFID (gain de 0.8, distance de lecture de 3.5m). Cette dernière est divisée en deux parties : la partie rayonnante, de type dipôle replié, et la partie appelée « zone sensible » sur laquelle nous avons déposé le bio-polymère (le gluten de blé). Les paramètres fixés, tels que l'encombrement, la taille de la zone de dépôt, le choix de la puce et surtout le choix de la fréquence de résonance, nous ont permis d'optimiser l'antenne capteur avec dépôt de gluten de blé. Toujours dans ce même chapitre, j'ai validé le fait que les simulations effectuées soient en accord avec les mesures expérimentales.

Le chapitre 3 s'est porté sur l'aspect mathématique du sujet de thèse. En effet l'objectif est de récupérer une information capteur à l'aide d'un lecteur RFID standard. Deux problématiques principales ont été soulevées dans ce chapitre pour arriver à ce but:

- La première concerne l'extraction d'une information capteur à partir d'une antenne RFID fonctionnalisée pour laquelle nous avons identifié l'utilisation de deux paramètres clés que sont la puissance minimum transmise par le lecteur permettant l'activation de la puce RFID noté $P_t^{activation} [\psi]$ et la puissance rétrodiffusée par la puce RFID lors de son activation et reçue au niveau de l'antenne du lecteur RFID noté $P_r^{activation} [\psi]$.
- Puis la seconde problématique s'est portée sur la fiabilisation de l'information extraite qui représente le principal enjeu lié à l'utilisation d'un capteur-RFID avec fonctionnalisation. Pour répondre à cet objectif, nous avons mis au point deux modèles mathématiques de régression linéaire, l'un pour une utilisation à fréquence fixe (régression linéaire simple) et l'autre se basant sur des mesures effectuées sur plusieurs canaux dans la bande de fréquence nord-Américaine (régression linéaire multiple). Ces modèles ont été construits et validés par la mesure du capteur dans un environnement contrôlé après une première phase d'étalonnage.

Pour finir nous avons implémenté un programme de mesure et d'étalonnage dans un lecteur RFID standard respectant les contraintes réglementaires, ce qui nous a permis de valider le fonctionnement du capteur-RFID d'humidité pour lequel nous obtenons de très bons résultats de suivi de la montée en humidité. En outre, nous avons démontrés que la

technologie RFID UHF passive est d'ores et déjà prête pour un déploiement de capteurs RFID passifs.

Dans le dernier chapitre, et suite aux résultats prometteurs obtenus précédemment, nous avons voulu tester un second aspect de détection du gluten de blé, la détection de gaz pour le suivi de la qualité des aliments. Dans de précédents travaux, le gluten de blé a également été testé pour sa sensibilité au CO₂ et à l'éthanol (pour une humidité relative de 90 % HR), nous nous sommes donc basés sur ces résultats pour mener notre étude. En effet, à l'intérieur d'un emballage alimentaire nous sommes en présence d'un environnement complexe due à la respiration de l'aliment (augmentation du CO₂ et diminution de l'oxygène) l'humidité se stabilise à une valeur haute (autour de 95%HR). Puis lors de la fermentation, due à la prolifération de bactéries, l'aliment « relâche » de l'éthanol. C'est dans cet environnement que nous avons positionné notre capteur-RFID. Nous nous sommes rapidement aperçu que la réaction de notre capteur-RFID pouvait être corrélée aux différentes étapes de vie de l'aliment. Nous avons pu différencier l'étape de stabilisation en humidité, de l'étape de respiration jusqu'à la dernière étape de fermentation. Ceci étant, le dispositif d'expérimentation peut encore être amélioré. D'autres expériences doivent être menées afin d'identifier le gaz le plus influent sur les propriétés diélectriques du gluten de blé.

Perspectives

Les applications visées influencent le choix du type de capteur, ou du type de dépôt pour les capteur-RFID avec fonctionnalisation d'antenne. Pour nous rapprocher d'un design pré-industrialisable nous envisageons d'ajuster la géométrie du capteur RFID présentée dans le cadre de cette thèse afin qu'il puisse être utilisé dans les bandes de fréquences allouées aux systèmes RFID à la fois en Amérique du Nord et en Europe. Le substrat utilisé actuellement étant du polyimide, nous envisageons également de transposer le design du capteur-RFID sur des substrats à plus faible coût tels que le papier ou le plastique avec des méthodes de fabrication à grand volume.

Nous avons validé jusqu'à présent l'utilisation de notre capteur avec un système champ proche dont la distance est connue et maîtrisée. Une extension possible de l'utilisation de ce capteur serait de pouvoir lire l'information capteur à une plus grande distance. Cependant dans ce cas, plusieurs perturbations peuvent interférer car l'information se trouve dans les paramètres des signaux électromagnétiques échangés entre le lecteur et le capteur RFID. C'est pourquoi, pour fiabiliser l'acquisition d'information capteur, deux solutions exposées dans la littérature pourraient être utilisées. La première fait appel au concept d'identifiant analogique (AID) et la seconde au principe de lecture différentielle.

Enfin, nous souhaitons décliner notre capteur-RFID à partir d'autres bio-polymères qui pourraient permettre la détection d'autres paramètres physiques tels que la température, ou permettant la détection de gaz variés.

Annexe C : Capteurs-RFID par l'ajout d'un microcontrôleur, avec récupérateur d'énergie, tirés de la littérature.

| Référence | Capteurs intégrés | Distance de lecture théorique | Energie | µC | Puce RFID | |
|-----------|--|-------------------------------|-----------------------------------|---|------------|------------|
| [1] | Humidité et température | 27 m | Solaire | MSP430G2553 | Monza X 8K | |
| [2] | RAMSES | Température | 5 m | RF | ---- | Monza X 2K |
| | SPARTACUS | Luminosité | 3.5 m | RF | PIC18F | WM72016 |
| [3] | Plateforme multi-capteur | 1.5 m | RF | PIC16LF1503 | EM4325 | |
| [4] | Température (capteur analogique) | ---- | RF | PIC16LF1503 | EM4325 | |
| [5] | Température | ---- | Chaleur corporelle | ---- | ---- | |
| [6] | Accéléromètre | ---- | RF | Carte d'évaluation Farsens : Medusa-M2233 | | |
| [7] | Humidité et température | ---- | RF | PIC24 | PE3001 | |
| [8] | Optique (UV, IR, RGB) | 1.1m | Tension rectifiée de la puce RFID | PIC16LF | SL900A | |
| [9] | Force | 2.8 m | | PIC18LF | SL900A | |
| [10] | Pression atmosphérique Température Humidité gaz | 2.5 m | RF avec super-capacité | PIC16LF1518 | SL900A | |
| [11] | Rythme cardiaque | 2.6 m | EEGWISP | | | |
| [12] | Plateforme | ---- | WISP-PDL | | | |

- [1] A. E. Abdulhadi and R. Abhari, "Multiport UHF RFID-Tag Antenna for Enhanced Energy Harvesting of Self-Powered Wireless Sensors," *IEEE Trans. Ind. Inform.*, vol. 12, no. 2, pp. 801–808, Apr. 2016.
- [2] L. Catarinucci, R. Colella, D. De Donno, and L. Tarricone, "RFID augmented devices for autonomous sensing and computation," in *2013 European Microwave Conference*, Nuremberg, Germany, 2013, pp. 999–1002.
- [3] C. Felini, M. Merenda, and F. G. Della Corte, "Fully RF Powered UHF-RFID Sensors Platform," *Procedia Eng.*, vol. 87, pp. 1346–1349, Jan. 2014.
- [4] D. Iero, F. G. Della Corte, C. Felini, M. Merenda, C. Minarini, and A. Rubino, "RF-powered UHF-RFID analog sensors platform," in *2015 XVIII AISEM Annual Conference*, Trento, Italy, 2015, pp. 1–3.
- [5] I. Jauregi *et al.*, "UHF RFID Temperature Sensor Assisted With Body-Heat Dissipation Energy Harvesting," *IEEE Sens. J.*, vol. 17, no. 5, pp. 1471–1478, Mar. 2017.
- [6] K. Oharada, B. Shizuki, and S. Takahashi, "AccelTag: A Passive Smart ID Tag with Acceleration Sensor for Interactive Applications," presented at the UIST, Québec City, Canada, 2017, pp. 63–64.
- [7] P. Pursula, I. Marttila, K. Nummila, and H. Seppä, "High Frequency and Ultrahigh Frequency Radio Frequency Identification Passive Sensor Transponders for Humidity and Temperature Measurement Within Building Structures," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 62, no. 9, pp. 2559–2566, Sep. 2013.

- [8] P. Escobedo, A. Martínez Olmos, M. Carvajal, A. Palma, and J. F. Salmerón, "Passive UHF RFID tag for spectral fingerprint measurement," 2015, pp. 1–4.
- [9] J. Fernández Salmerón *et al.*, "Design and Development of Sensing RFID Tags on Flexible Foil Compatible With EPC Gen 2," *IEEE Sens. J.*, vol. 14, no. 12, pp. 4361–4371, Dec. 2014.
- [10] T. Viet Tran, N. Trung Dang, and W.-Y. Chung, "Battery-free smart-sensor system for real-time indoor air quality monitoring," *Sens. Actuators B Chem.*, vol. 248, pp. 930–939, Sep. 2017.
- [11] A. Dementyev and J. R. Smith, "A wearable UHF RFID-based EEG system," in *2013 IEEE International Conference on RFID (RFID)*, Penang, Malaysia, 2013, pp. 1–7.
- [12] D. Yeager, P. S. Powledge, R. Prasad, D. Wetherall, and J. R. Smith, "Wirelessly-Charged UHF Tags for Sensor Data Collection," in *2008 IEEE International Conference on RFID (Frequency Identification), IEEE RFID 2008*, 2008, pp. 320–327.

Annexe D : Interface logiciel du code d'automatisation

The interface is organized into several functional areas:

- Population (Top Left):** Includes a 'Data path 2' field, a 'Population' label, a 'Détection ?' indicator, a 'Nombre de tag détecté' display (0), and a 'Liste Tag' field.
- Seuil (Top Center):** Features a 'Seuil' indicator and a 'Temps d'attente en minutes' display (0).
- Temps écoulé (Top Right):** Shows a 'Temps écoulé' display (00:00:00,000).
- Puissance de rétrodiffusion (Middle Right):** A large graph showing 'Puissance de rétrodiffusion (dB)' vs 'Fréquence (Mhz)'. It includes sub-labels for 'Puissance de rétrodiffusion', 'Puissance de transmission', and 'Puissance de transmission 2'. A 'Trace 0' button is present.
- Amplitude and Dernière réponse (Middle Left):** Two smaller graphs. 'Amplitude' shows signal amplitude over time (0 to 0.01). 'Dernière réponse' shows the 'Dernière réponse' over time (0 to 0.0008).
- Chemin du fichier d'enregistrement des données (Bottom Left):** A text field containing the path 'C:\Users\Macumba1\Desktop\Reactive\test\Newcode'.
- Control Elements:** Multiple 'ARRÊTER' buttons, 'Stop' labels, and a 'Response Tag?' indicator.
- Bottom Right:** Displays 'Numerique' (0), 'Numerique 2' (0), 'Phase' (0), 'Resulting power' (0), 'Power out.' (0), and 'Fréquence...' (0).

Annexe E : Programme d'automatisation du banc

Dans cette partie, nous allons détailler le code Labview réalisé, permettant d'automatiser le banc et de caractériser le capteur-RFID. L'interface du code est présentée en annexe D, elle se décline en deux parties la première partie permet de réaliser un inventaire des tags présents dans le champ de l'antenne RFID. La deuxième partie permet de réaliser un balayage en puissance de transmission (pour récupérer la puissance minimum d'activation du tag sélectionné) dans un balayage fréquentiel, le tout dans un cycle répétitif toutes les X minutes (en fonction de l'étude). Et ainsi, toutes ces informations nous permettront par la suite d'extraire une information capteur via un traitement mathématique que nous verrons plus tard.

Afin de mettre au point ce code, nous avons étudié avec plus de détails la communication entre le lecteur RFID et notre capteur-RFID. Plusieurs étapes sont à respecter pour aboutir à un échange d'information (commande) comme présentée Figure 1.

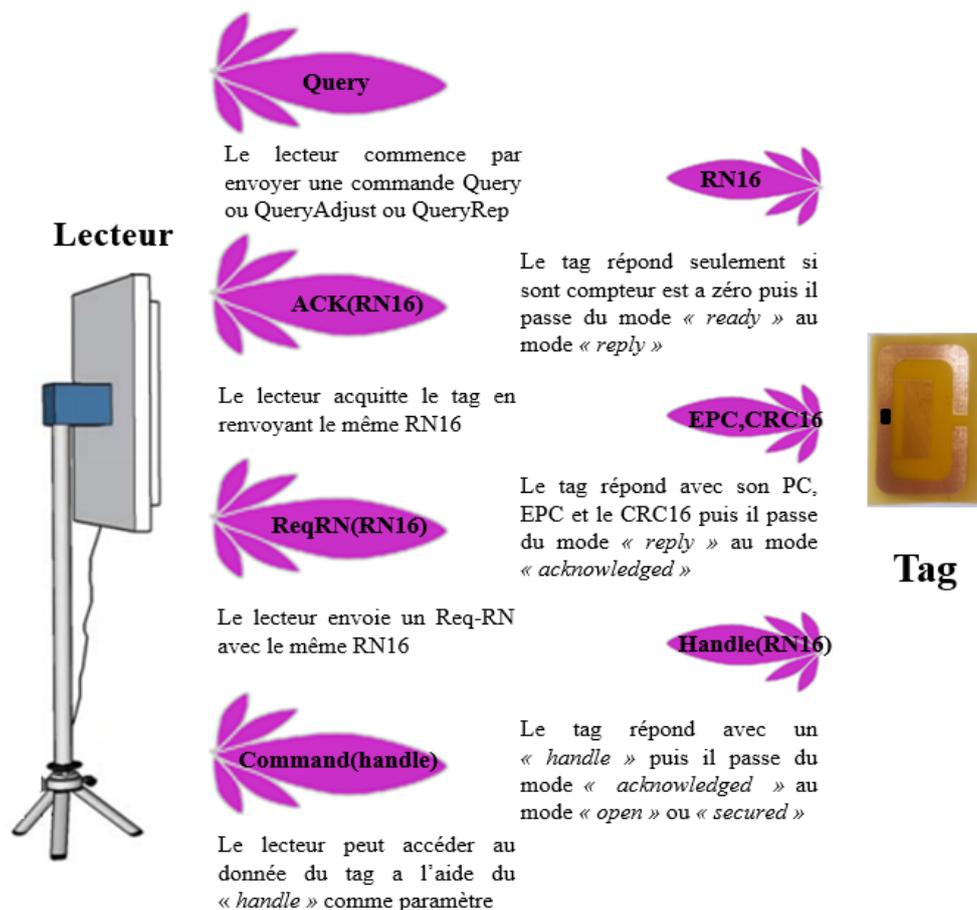


Figure 1: Exemple d'un « inventory » et un « access » à un tag

Les lecteurs gèrent les populations d'étiquettes à l'aide des trois opérations de base : « inventory », « access » et « select ». Chacune de ces opérations comprend plusieurs commandes, comme illustrées en Figure 1. Sous Labview nous avons utilisé « l'inventaire » dans la partie inventaire et « l'access » et le « select » dans la partie de récupération d'information.

- **« Inventory » :**

Comme illustré dans la Figure 1, le lecteur commence un inventaire en transmettant une commande « Query » (QueryAdjut ou QueryRep) dans l'une des quatre sessions (S0 – S3), un cycle d'inventaire fonctionne en une seule et même session à la fois, ce qui permet à d'autres lecteurs de lancer à leurs tours un inventaire dans une session libre. Le tag fonctionne en machine à état, lorsque le tag est alimenté il se place automatiquement dans le mode « ready » puis après réception de la commande « query » il vérifie s'il fait partie du groupe ciblé, s'il l'est, il doit choisir une valeur aléatoire dans la gamme (0, $2^Q - 1$). Dans notre cas, nous avons réglé le paramètre Q entre 1 et 2 afin d'augmenter la rapidité de détection. Quand la valeur du compteur atteint zéro, le tag passe en mode « reply » et répond à la demande du lecteur par un RN16, puis la communication continue. Concernant les tags qui n'ont pas encore de zéros dans le choix de la valeur aléatoire, ou ceux qui ont reçu un mauvais ACK(RN16), ou encore, dans le cas de collision, les tags sont automatiquement mis en mode « arbitrate » en attendant une commande (QueryAdjut ou QueryRep) du lecteur, afin de décrémenter la valeur du registre Q. Puis, ils reprendront la communication lorsqu'ils ont atteint la valeur zéro. Après que les tags soient tous singularisés, ils passent en mode « acknowledged » [40].

Enfin, pour finaliser l'inventaire il ne reste plus qu'au lecteur d'inverser le drapeau des tags ciblés dans le registre « target » (de A vers B ou de B vers A). Par exemple, un lecteur qui souhaite cibler les tags A, dans la session S2, va se mettre à changer les drapeaux de A vers B (phase de singularisation), de tous les tags détectés. Puis, il se met à répertorier tous les tags en inversant les drapeaux de B vers A.

- **« Access » :**

Une fois que le tag a été inventorié, le lecteur doit accéder au tag. Pour cela, le lecteur doit envoyer une commande Req-RN contenant le bon RN16 pour avoir en retour le « handle » qui sera utilisé en tant que clé d'accès par le lecteur lors de l'envoi de la commande. L'opération « Access » comprend plusieurs commandes dont : « Read », « Write », « Kill » et « Lock » [40].

Dans notre code, nous avons implémenté la fonction « Read » qui nous a permis de récupérer le code EPC du tag ciblé. Cette fonction a besoin de plusieurs paramètres pour fonctionner, tel que : le paramètre contenant la banque mémoire qui dans notre cas est la mémoire EPC, ensuite, le WordPtr qui est l'adresse de début dans la mémoire (à 0) puis, le WordCount qui est liée à la taille des données à renvoyer qui, dans notre cas, est réglé à zéro pour recevoir tout le contenu de la mémoire EPC. Ce dernier est utilisé dans la deuxième partie du code, présenté en annexe D, permettant de communiquer de manière ciblée avec les tags un à la suite.

- **« Select » :**

Le processus de sélection comprend deux commandes, « Select » et « Challenge ». « Select » autorise la sélection d'une population de tags pour un inventaire ultérieur, dans notre cas, elle sera utilisée pour une communication ciblée. « Challenge » permet à un lecteur de contester une population de tags. Select et Challenge sont les deux seules commandes qu'un lecteur peut émettre avant l'inventaire, mais que nous allons utiliser pour sélectionner notre capteur-RFID.

Nous avons donc implémenté cette commande dans notre code Labview, afin de sélectionner le capteur RFID, à l'aide de son code EPC précédemment récupéré lors de l'inventaire. La commande « Select » est composée de plusieurs paramètres dont : *Target*, *Action*, *MemBank*, *Pointer*, *Length*, *Mask*, *Tuncate* et fini par un CRC. Le paramètre *Target* indique si la commande modifie le drapeau SL (*selected*), ou choisit de sélectionner un tag inventorié dans une session particulière. Ensuite, le paramètre *action* permet, en fonction de la cible sélectionnée, de changer l'état du drapeau SL (de valide à non valide). Où, dans

le cas d'un tag inventorié, le paramètre *action* modifie sa valeur de $A \rightarrow B$ ou de $B \rightarrow A$. Le paramètre *mask* contient une chaîne de bits qu'il faut comparer à la chaîne de bits de la plage mémoire spécifiée (Mémoire EPC, TID ou utilisateur) dans notre cas le code EPC du capteur RFID. Le paramètre *truncate* spécifie, si un tag rétrodiffuse la totalité de l'EPC, ou seulement la partie de l'EPC qui suit immédiatement le masque, à la suite d'un ACK comme présenté Figure 1.

Pour finir, le programme envoie la trame de donnée construite et modulée (par un select, suivit d'un query), puis on récupère le signal rétro-modulé par le capteur-RFID. Un traitement des données et réaliser ensuite afin de récupérer la puissance du signal reçu et la phase. Pour enfin sauvegarder le tout dans un fichier (.txt), classé de manière à faciliter le traitement par la suite sur MATLAB.

• Utilisation de la chambre climatique (ESPEC SH-242)

La chambre climatique est programmée pour réaliser trois cycles de variation de l'humidité relative présentée dans la Figure 2. Un cycle se compose d'une montée de 30 % HR à 90 % HR et d'une descente de 90 % HR à 30 % HR en passant par des paliers de 50%, 60% 70% et 80%HR, pour une température fixée à 22°C. Chaque palier de la phase de montée d'humidité dure 3h, et 4h pour la descente, pour deux raisons : la première étant de laisser le temps au dépôt de gluten, de réagir à l'environnement et de se stabiliser [16], la deuxième est de pouvoir prendre plusieurs points de mesures.

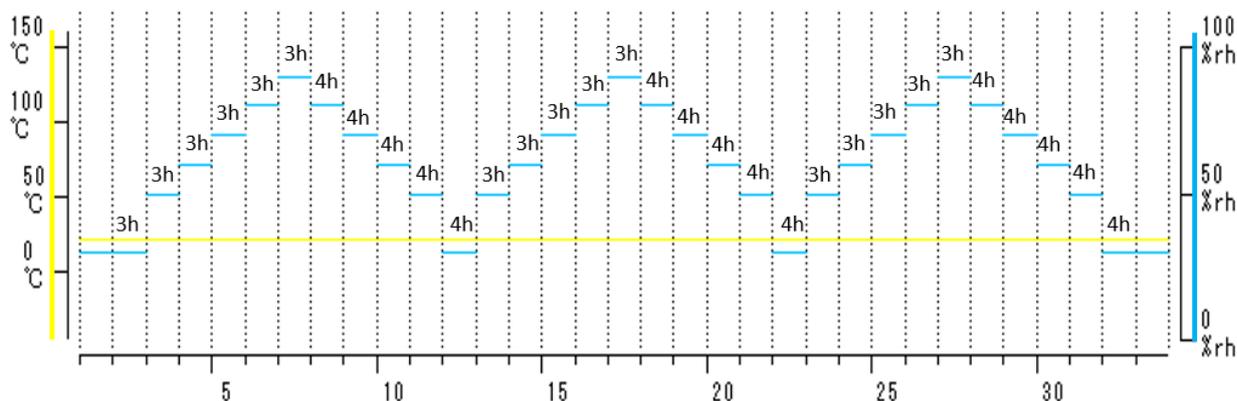


Figure 2: Trois cycles de variation d'humidité relative en chambre climatique

L'enceinte climatique possède son propre capteur d'humidité, un psychromètre. Ce dernier sert à mesurer le taux d'humidité dans l'air par un principe de mesure différentiel de températures humide et sèche. En effet, ce type de capteur dispose de deux thermomètres (sec et humide), l'un mesurant la température de l'air et l'autre la température d'un tissu imbibé d'eau liquide. Le séchage du tissu provoque une baisse de température jusqu'à saturation de l'air en contact avec le tissu. C'est ainsi qu'en se basant sur les données énergétiques de l'air le psychromètre de l'enceinte nous donne la valeur de l'humidité relative de l'air [41]. Toutes les données réglables à l'aide de l'enceinte sont enregistrées, avec horodatage, et facilement récupérables sous forme de table Excel.

ETUDE ET CONCEPTION D'UN CAPTEUR-RFID PASSIF EN BANDE UHF : APPLICATION A L'AGROALIMENTAIRE

Mots clés : *RFID, Capteur, Capteur d'humidité, Bio-polymère, Antenne flexible, Suivi de la qualité alimentaire*

La technologie d'identification radiofréquence (RFID) se décline aujourd'hui dans des milliers d'applications. Parmi elles nous pouvons citer les applications de gestion logistique des palettes/cartons dans les entrepôts industriels (RFID UHF) ainsi que l'identification des abonnés dans les réseaux de transports urbains (RFID HF). Depuis quelques années, des contributions scientifiques autour des technologies d'identification radiofréquence (RFID) avec un couplage capteur sont de plus en plus visibles. L'intérêt grandissant pour ce type de technologie s'appuie sur la possibilité d'une utilisation en masse de capteurs bon marchés pouvant être intégrés sur chaque objet. On parle alors d'objet connecté ou d'internet des objets (IoT). Dans cette thèse, nous nous focalisons sur l'étude et le développement d'un capteur RFID passif fonctionnant en bande UHF. Cette orientation technologique est dictée par l'application visée, l'agro-alimentaire, qui requiert des coûts de fabrication les plus faibles possibles et une distance de lecture supérieure au mètre. Pour l'élément sensible, nous utilisons un bio-polymère, plus précisément le gluten de blé dont les propriétés diélectriques en fonction de l'humidité relative ont été étudiées précédemment. Nous nous attachons à traiter toutes les problématiques liées à la communication entre un lecteur et un capteur RFID passif, l'objectif ultime de cette thèse étant de récupérer une information capteur à l'aide d'un lecteur RFID conventionnel respectant les standards du domaine et les directives radio en vigueur dans les différentes régions du monde. Pour valider cette étude, nous mettons en œuvre des capteurs-RFID pour réaliser un démonstrateur d'emballage « intelligent » permettant le suivi de la qualité des aliments.

STUDY AND DESIGN OF A PASSIVE RFID-SENSOR IN UHF BAND: APPLICATION TO AGRIFOOD DIAGNOSIS

Keywords: *RFID, Sensors, Humidity sensor, biopolymer, Flexible antenna, Signal processing, Food quality monitoring*

Radio frequency identification (RFID) technology is available today in thousands of applications. Among them we can mention the logistics management applications pallets / cardboard in industrial warehouses (RFID UHF) and the identification of subscribers in urban transport networks (RFID HF). In recent years, scientific contributions around the radio frequency identification (RFID) technologies with a sensor coupling are increasingly visible. The growing interest in this type of development rely heavily on a mass use of inexpensive sensors that can be integrated on each object. It is called connected objects or Internet of Things (IoT). In this thesis, we focus on the study and development of a passive RFID sensor operating in UHF band. This technological orientation is dictated by the targeted application, the food industry, which requires the lowest possible manufacturing costs and a reading distance greater than one meter. For the sensitive element, we use a biopolymer, specifically wheat gluten whose dielectric properties as a function of relative humidity have been studied previously. We are committed to dealing with all the issues related to the communication between a reader and a passive RFID sensor, the ultimate objective of this thesis being to get a sensor information using a conventional RFID reader complying with the standards and the radio directives imposed in different regions of the world. To validate this study, we are implementing RFID sensors to create a smart packaging demonstrator for monitoring the quality of food.