



THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

Spécialité : **Optique et Radio Fréquence**

Arrêté ministériel : 7 août 2006

Et de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ NATIONALE DU VIETNAM, HO-CHI-MINH VILLE

Spécialité : **Génie Électronique**

Présentée par « **Dat-Son NGUYEN** »

Thèse dirigée par « **Pr. Smaïl TEDJINI** » et « **Dr. HDR. Mau-Chien DANG** »

préparée au sein du

Laboratoire de Conception et d'Intégration des Systèmes
de l'École Doctorale "Electronique, Electrotechnique, Automatique
et Traitement du Signal"

et du **Laboratoire de Nanotechnologie**

de l'École Doctorale "Institut Polytechnique de Ho-Chi-Minh ville"

Développement de Capteurs sans fil basés sur les Tags RFID UHF passifs pour la détection de la Qualité des aliments

Thèse soutenue publiquement le « **27 Septembre 2013** »,
devant le jury composé de :

Mme. Habiba OUSLIMANI

Professeur à l'Université de Paris 10

(Rapporteur)

Mme. Odile PICON

Professeur à l'Université de Paris-Est

(Rapporteur)

M. Eric FRIBOURG-BLANC

CEA-LETI, Grenoble

(Examineur)

M. Alain FOUCARAN

Professeur à l'Université Montpellier 2

(Président)

M. Mau-Chien DANG

Directeur du Laboratoire LNT, UNV-HCMV, Vietnam

(Co-Directeur de Thèse)

M. Smaïl TEDJINI

Professeur à Grenoble-INP/LCIS

(Directeur de Thèse)



AVANT-PROPOS

Les travaux de cette thèse en co-tutelle ont été réalisés au Laboratoire de Nanotechnologie (LNT) localisé à Ho-Chi-Minh ville (Vietnam) et au Laboratoire de Conception et d'Intégration des Systèmes (LCIS) localisé à Valence, Grenoble.

Je remercie très chaleureusement mon directeur de thèse, Monsieur Smail TEDJINI, Professeur à l'Institut National Polytechnique de Grenoble. Merci beaucoup pour tes conseils précieux, ton soutien, ta disponibilité et surtout toute la confiance que tu as su m'accorder et me donner beaucoup des renseignements pendant la thèse.

Je tiens à exprimer également mes remerciements à mon co-directeur de thèse, Monsieur Mau-Chien DANG, le Directeur du Laboratoire de Nanotechnologie – Université Nationale du Vietnam à Ho-Chi-Minh ville, notamment pour sa confiance et son soutien permanent depuis mon souhait de réaliser cette thèse.

Un très grand merci à Monsieur Eric FRIBOURG-BLANC, chercheur au CEA-LETI-MINATEC (France) qui est détaché au LNT, pour m'avoir beaucoup aidé pendant la première année de ma thèse au Vietnam. Tes idées sont une partie essentielle en inspirant ma passion de la technologie RFID.

Merci également à l'ensemble du corps enseignant et personnel de Département de Télécommunications à l'Institut Polytechnique de Ho-Chi-Minh ville (IPHCM), surtout Monsieur Hong-Tuan DO et Madame Hong-Phuong PHAN pour avoir accepté ma suggestion et m'avoir aidé à utiliser et à pratiquer les équipements de mesure à l'IPHCM. J'apprécie vraiment vos aides pour la première étape de cette thèse.

Merci à tous les membres du LNT, en particulier les membres et anciens membres de l'équipe RFID au LNT: Monsieur Eric FRIBOURG-BLANC, Madame Hong-Phuong PHAN, Madame My-Dzung DANG-THI, Madame Nhan-Ai TRAN, Monsieur Tran-Thuat NGUYEN, Nguyen-Ngan LE, Tan-Phat LAM, Alexis, Erwan, Maxime, Hoang-Duc, Thanh-Quan, Yacine, Rémy, Stéphen, Thanh-Toan, Huy-Nam, Van-Duong.

Merci à tous les stagiaires ingénieurs et stagiaires techniciens au LNT que j'ai encadrés et avec qui j'ai eu le plaisir de travailler: Trung-Luong NGUYEN, Cong-Tam

VUONG-HO et The-Hien NGUYEN, Gia-Tam PHAN, Vinh-Lan TRUONG, Xuan-Chien LE, Tien-Thong PHAM, Florent SEGOUIN, Thierry ZHANG, Maxime RÉMI, Louis PÉCHINOT, Raphael BRAHAMI.

Merci à tous les membres du Laboratoire de Conception et d'Intégration des Systèmes à Valence (France) et en particulier de l'équipe ORSYS que j'ai eu le plaisir de travailler ensemble: Mme. Carole SEYVET, Mlle. Jennyfer DUBERVILLE, M. Cédric CARLOTTI, Pierre, Étienne, Yvan, Romain, Darine, Mossaab, Tsitoha, Gianfranco, Raji, Divya, Arnaud, Hamza, Antoine, Duy-Thong.

Un très grand merci au Ministère de la Science et Technologie (MOST) du Vietnam et à la Fondation Nationale du Développement de la Science et Technologie (NAFOSTED) du Vietnam pour les supports de financement aux participation de la conférence PIERS 2013 en Suède et les budgets de voyage entre la France et le Vietnam pendant ma thèse.

Merci à tous les participants et aux exposants du séminaire MINATEC 2010 (à LNT - UNV-HCMV sur la technologie RFID), les conférences de l'IWNA (en 2009, 2011 à Vung Tau, Vietnam) et la conférence RFID-TA 2012 (en 2012 à Nice, France). Ce fut un plaisir de participer à l'organisation des telles conférences.

Enfin, j'exprime une énorme pensée pour ma famille et mes proches pendant la thèse.

TABLE DES MATIÈRES

Pour plus de clarté, la présente table des matières ne fait référence qu'aux chapitres traités. Elle est complétée dans chaque chapitre par un sommaire détaillé.

Introduction générale	1
Chapitre 1. État de l'art de la technologie RFID	4
Chapitre 2. La conception d'antennes appliquée aux tags RFID UHF passifs	32
Chapitre 3. Les processus de fabrication de tag RFID bas-cout au Laboratoire de Nanotechnologie (Vietnam)	69
Chapitre 4. Effets des paramètres du procédé de fabrication sur les caractéristiques de l'antenne du tag RFID	91
Chapitre 5. Considérations des effets de l'environnement sur la permittivité des matériaux et caractérisation de la permittivité des aliments	122
Chapitre 6. Intégration de la capacité de capteur pour le tag RFID UHF passif et application à la détection de la qualité des aliments	154
Conclusions générales et perspectives	202
Liste des publications	204

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Ces dernières années, la technologie de RFID s'est affirmée en importance notamment pour ses applications dans le domaine civil. Au Vietnam, l'application des standards de qualité dans les domaines comme l'industrie agroalimentaire, l'industrie pharmaceutique ou la cosméto-pharmacie nécessite l'utilisation d'un grand nombre de capteurs spécifiques. En effet, l'identification des produits expirés sans endommagement est une orientation de recherche très prometteuse pour remédier à la situation du Vietnam. Cependant, le prix de ces capteurs est encore trop important en particulier par rapport au niveau de vie au Vietnam. La thèse **“Développement de capteurs sans fil basés sur les tags RFID UHF passifs pour la détection de la qualité des aliments”** qui est une thèse en cotutelle entre le Laboratoire de Nanotechnologie (LNT) et le laboratoire LCIS de Grenoble–INP a l'intention de développer des capteurs sans fil sur la base de la technologie RFID et des technologies et matériaux disponibles au Vietnam afin de contribuer à résoudre ce type de problème.

Généralement, un tag RFID est constitué d'une puce RFID et d'une antenne qui sont intégrées sur un substrat en général flexible. Un tag RFID peut aussi se composer de plusieurs puces et plusieurs antennes sur un même substrat dont chaque couple de puce/antenne est conçu pour travailler sur un intervalle déterminé de valeur de permittivité. Une fois que la permittivité de l'objet sur lequel est fixé le tag se retrouve dans cet intervalle, le signal réfléchi vers le lecteur a une signature spécifique. Donc, à partir de l'ensemble des permittivités déterminées pour chaque couple de puce/antenne et les signaux réfléchis vers le lecteur, nous pourrions définir la valeur de permittivité de l'objet tracé. Pour contrôler la sensibilité du tag, nous devons non seulement considérer les facteurs d'environnement qui influencent la permittivité des matériaux mais encore prévoir le changement de la permittivité d'un mélange. Finalement, à partir de ces considérations de permittivité et des connaissances en conception de l'antenne, nous développerons un tag capteur de type "multi puce/antenne" qui sera utilisé comme un capteur sans fil pour la détection de la qualité des aliments.

Dans ce travail, les prototypes du tag-capteur RFID sont réalisés par la technologie de lithographie et la pulvérisation cathodique classique ou l'impression de jet d'encre et électrodéposition disponible au LNT. Les équipements de mesure et les logiciels de

simulation disponibles dans les 2 laboratoires LCIS et LNT sont aussi essentiels pour cette thèse. Parmi eux, les mesures expérimentales sur les effets de l'environnement sur la permittivité des aliments et les simulations fondamentales auront lieu au LNT tandis que la conception et l'optimisation des caractéristiques du tag multi-accès se produiront au LCIS.

Ce mémoire décrit l'ensemble de nos travaux pendant la thèse à partir du Janvier 2010. Il est constitué de l'introduction, de six chapitres et d'une conclusion.

Dans le premier chapitre, nous réalisons une présentation générale de la RFID et des différents systèmes de la RFID disponibles. Nous ferons un état de l'art des systèmes RFID UHF passifs et discuterons les avantages de cette technologie.

Le second chapitre est consacré à la conception de l'antenne et les techniques de l'adaptation d'impédance entre la puce et l'antenne du tag RFID. Nous présentons aussi quelques conceptions pour le tag RFID utilisant des antennes de type « méandres ».

Le troisième chapitre concerne les propriétés de matériaux du substrat et le processus de fabrication du tag RFID bas-coût au Laboratoire de Nanotechnologie (Vietnam). Ce chapitre est dirigé avec l'aide de l'équipe RFID au Laboratoire de Nanotechnologie (Université Nationale du Vietnam, Ho-Chi-Minh ville) pour les processus de fabrication comme la photolithographie et jet d'encre.

Le quatrième chapitre est consacré à l'étude des effets du processus de fabrication sur les caractéristiques de l'antenne. Les effets du processus de fabrication (comme la lithographie, la pulvérisation, l'électrodéposition, l'impression jet d'encre, la connexion entre la puce et l'antenne, l'épaisseur de peau) sur les performances de l'antenne et du tag RFID sont aussi considérés dans ce chapitre. Dans ce chapitre, nous utilisons les résultats de l'équipe RFID au Laboratoire de Nanotechnologie (Université Nationale du Vietnam, Ho-Chi-Minh ville) pour la considération des effets du processus de fabrication sur les performances de l'antenne et du tag RFID UHF passif.

Le cinquième chapitre aborde les méthodes de la caractérisation de la permittivité des matériaux et les effets de l'environnement sur la permittivité des aliments (comme la température, l'humidité, le temps de stockage...). Le processus de mesure et les résultats expérimentaux de la permittivité des aliments sont aussi introduits dans ce chapitre.

Le sixième chapitre présente le concept du tag capteur RFID qui est une exploitation des capacités de capteur pour le tag RFID passif à partir des données obtenues dans Chapitre 5. Les résultats de simulations et de mesure sont aussi introduits dans ce chapitre.

Finalement, la conclusion résumera l'ensemble des travaux de cette thèse et présentera les perspectives envisagées.

Chapitre 1

État de l'art de la technologie RFID

L'abréviation **RFID** signifie “**R**adio **F**requency **I**Dentification”, c'est une technologie qui permet d'identifier un objet, d'en suivre le cheminement ou d'en connaître les caractéristiques à distance grâce à un tag (ou une étiquette) réfléchissant des ondes radio, attaché ou incorporé à l'objet. La technologie RFID permet la lecture des tags même sans ligne de vue directe et peut traverser de fines couches de matériaux (peinture, neige, etc...). Bien que le premier document sur la rétro-réflexion modulée (le principe de base de fonctionnement du tag RFID passive) a été publié en 1948, cette technologie a connu de très nombreux développements avant qu'elle n'atteigne le niveau de maturité et de performance actuel [1.1]. Aujourd'hui la technologie RFID a de très nombreuses applications dans de très nombreux domaines et repose sur plusieurs normes et réglementations admises et utilisées au niveau international (ISO, classe 0, classe 1 et Gen 2 sont des exemples). Ce premier chapitre, est dédié à une présentation générale de la RFID et ses principales caractéristiques.

TABLE DES MATIÈRES

CHAPITRE 1	4
1.1. HISTOIRE DE LA TECHNOLOGIE RFID ET COMPARAISON ENTRE LES TECHNOLOGIES DE L'IDENTIFICATION DISPONIBLES.....	7
1.1.1. LE DEVELOPPEMENT DE LA TECHNOLOGIE RFID:	7
1.1.2. MARCHE MONDIAL DE LA TECHNOLOGIE RFID	9
1.1.3. CODE A BARRES ET RFID	11
1.1.3.1. Code à barres.....	11
1.1.3.2. RFID.....	12
1.2. LES AVANTAGES DE LA TECHNOLOGIE RFID DANS LA VIE QUOTIDIENNE.....	13
1.2.1. LA RFID COMME OUTIL DE PAIEMENT	13
1.2.2. LA RFID DANS LES GESTIONS DE TRANSPORT.....	13
1.2.3. LA RFID ET LES DOCUMENTS D'IDENTITE	15
1.2.4. LA RFID POUR L'HOPITAL ET L'IMPLANT RFID	15
1.2.5. LA RFID POUR TATOUER LES ANIMAUX DOMESTIQUES ET LES LOGISTIQUES.....	16
1.3. L'HIERARCHIE ET LES REGULATIONS DU SYSTEME RFID	18
1.3.1. COMPOSANTS FONDAMENTAUX DU SYSTEME RFID.....	18
1.3.1.1. Lecteur.....	18
1.3.1.2. Tag (ou Étiquette)	21
1.3.1.3. Le middleware RFID.....	21
1.3.2. CLASSEMENT DES SYSTEMES RFID	22
1.3.2.1. Le classement par la méthode de l'alimentation.....	23
1.3.2.2. Le classement par la programmation de la puce	24
Le tag à écriture unique (read-only - RO tag).....	24
Le tag à écriture unique et lecture multiple (Write Once Read Multiple - WORM tag).....	24
Le tag à écriture/lecture multiple (Read/Write – RW tag).....	24
1.3.2.3. Classement par distance de communication	24
Système RFID en champ proche	25
Système RFID en champ lointain.....	26
1.4. LES AXES DE RECHERCHE DANS LA TECHNOLOGIE RFID	28
1.5. CONCLUSIONS	29
BIBLIOGRAPHIE – CHAPITRE 1	30

LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX

FIGURE 1.1 - LES PHASES DE DEVELOPPEMENT DE LA TECHNOLOGIE RFID	7
FIGURE 1.2 – LE MARCHE ET LES ACTEURS DE RFID DE 2006 A 2016.....	9
FIGURE 1.3 - LE MARCHE GLOBAL EN RFID VERS 2016 - UN SCENARIO PREVISIONEL	9
TABLEAU 1.1 – COMPARAISON ENTRE LES DIFFERENTES TECHNOLOGIES DE L’IDENTIFICATION	10
FIGURE 1.4 - UN EXEMPLE DE CODE A BARRES UPC	11
FIGURE 1.5 - DES COMPOSANTS D’UN TAG RFID PASSIF.....	12
FIGURE 1.6 - LE DISPOSITIF DE PAIEMENT PIDION BIP-1300.....	13
FIGURE 1.7 - LA RFID DANS LES TRANSPORTS EN COMMUN	14
FIGURE 1.8 - LA RFID PERMET DE REGULER LES MOYENS DE TRANSPORT AU LABORATOIRE DE NANOTECHNOLOGIE (VIETNAM)	14
FIGURE 1.9 - LA RFID EST PRESENTE DANS LES DOCUMENTS D’IDENTITE	15
FIGURE 1.10 - LES TECHNOLOGIES SANS FIL POUR LA GESTION DES PATIENTS AU SEIN DE L’HOPITAL ET A LA LONGUE DISTANCE	16
FIGURE 1.11 - SUIVRE L’ACTIVITE D’UN CHIEN A DISTANCE	17
FIGURE 1.12 - LA RFID PERMET DE FACILITER LA LOGISTIQUE	17
FIGURE 1.13 - ÉLÉMENTS D’UN SYSTEME RFID	18
FIGURE 1.14 - SCHEMA SYNOPTIQUE FONCTIONNEL D’UN LECTEUR RFID (FRONT-END RF)....	19
FIGURE 1.15 - MODULATION TYPE ASK DANS UN LECTEUR RFID	20
FIGURE 1.16 - LE ROLE DU MIDDLEWARE RFID	21
FIGURE 1.17 - LE CLASSEMENT DES TAGS RFID	22
FIGURE 1.18 - LES METHODES DE L’ALIMENTATION POUR DES TAGS RFID.....	23
FIGURE 1.19 – LE CHAMP MAGNETIQUE DU LECTEUR	25
TABLEAU 1.2 – CLASSEMENT DES TAGS RFID PAR LE CHAMP DE RAYONNEMENT	27
FIGURE 1.20 - LES AXES DE RECHERCHES DANS LE DOMAINE DU TAG RFID SANS PUCE	29

1.1. Histoire de la technologie RFID et comparaison entre les technologies de l'identification disponibles

1.1.1. Le développement de la technologie RFID:

Aujourd'hui, les technologies de communication deviennent de plus en plus performantes tout en devenant de plus en plus simples notamment en termes d'ergonomie, de commodité d'usage et simplicité d'utilisation. A ce titre, les technologies sans fil sont très attractives et de ce fait font l'objet de beaucoup de développements. L'invention de la technologie RFID est à l'origine d'une véritable révolution dans l'environnement des technologies d'interaction actuelles. Les phases de développement de la technologie RFID ainsi que les principaux événements seront brièvement décrits dans la Figure 1.1 ci-dessous.

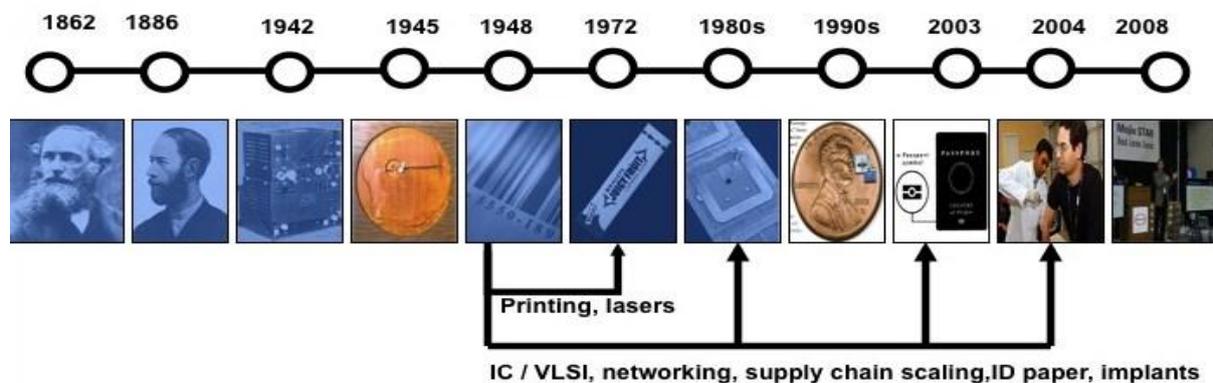


Figure 1.1 - Les phases de développement de la technologie RFID [1.2]

En 1945, Léon Theremin a inventé un dispositif d'espionnage, appelé « the thing », pour l'Union Soviétique qui assure la fonction d'un microphone sans fil transmettant un signal acoustique sur une porteuse RF [1.3]. Les ondes acoustiques font vibrer une membrane intégrée dans une cavité électromagnétique couplée à une antenne de type monopole. Ainsi en présence d'onde sonore il y a vibration de la membrane ce qui conduit à une modulation de la réflexion du monopole et donc la transmission de l'onde sonore comme signal modulant une onde RF incidente sur « the thing ». Bien que « the thing » soit avant tout un dispositif d'écoute clandestine, pas un tag d'identification, Il est sans doute l'ancêtre des tags modernes de la technologie RFID. Il est aussi totalement passif et intègre une fonction capteur. .

Une autre technologie utilisant le principe de communication par ondes réfléchies est apparue durant la deuxième guerre mondiale. Il s'agit du transpondeur IFF inventé dans le Royaume-Uni en 1944 par Robert Watson-Watt [1.4]. Il a été très largement exploité par les alliés durant la Seconde Guerre Mondiale pour identifier les avions amis des avions

ennemis. L'IFF est encore utilisé par la plupart des aéronefs à ce jour. Le premier travail théorique explorant le principe de la RFID fut publié en 1948 par Harry Stockman dans un article IRE intitulé "Communication au moyen de puissance réfléchie" [1.3]. Stockman a conclu son papier par "... un travail de développement et de recherche considérable doit être fait avant que les problèmes fondamentaux de la communication par puissance réfléchie soient résolus et que le domaine des applications utiles soit exploré".

Mario Cardullo (U.S. Patent 3,713,148 en 1973) était le premier vrai ancêtre de la RFID moderne; un transpondeur radio passif avec mémoire. Le dispositif originel était passif, actionné par un signal d'interrogation, a été présenté en 1971 à la New York Port Authority et à d'autres utilisateurs potentiels. Il était composé d'un transpondeur avec une mémoire de 16 bits pour une utilisation comme un dispositif de péage. Le brevet de Cardullo couvre l'utilisation de la RF, le son et la lumière pour la transmission du média. Le plan d'affaires original présenté aux investisseurs en 1969 a intégré des applications dans le transport (l'identification de véhicules, le système de péage automatique, la plaque de licence électronique, le véhicule « routing »), dans les opérations de banque (le chèque électronique, la carte de crédit électronique), dans la sécurité (l'identification de personnel, les portes automatiques, la surveillance) et dans le médical (l'identification, le suivi des patients) [1.3-1.6].

Une toute première démonstration de la puissance réfléchie (rétro-réflexion modulée) des tags de RFID, passifs et semi-passifs, a été exécutée par Steven Depp, Alfred Koelle et Robert Freyman au Laboratoire National de Los Alamos en 1973. Le système portatif opérait à 915MHz et utilisait les tags de 12-bit. Cette technique est utilisée par la majorité des tags UHF et micro-ondes RFID [1.7]. Le premier brevet à être associé à l'abréviation RFID a été accordé à Charles Walton en 1983 (U.S. Patent 4,384,288).

Le plus grand déploiement de RFID actif est celui utilisé par le Ministère de la défense Américains. Il s'agit de tags actifs installés sur chacun du million de récipients maritimes qui voyagent à l'extérieur des États-Unis (CONUS). Depuis le début de ce siècle et avec l'apparition de la norme EPC Global, de très nombreux développements ont vu le jour et la technologie ne cesse d'évoluer et de s'ouvrir à d'autres applications de la RFID dans de nombreux domaines de la vie quotidienne comme des applications dans les réseaux de capteurs sans fil et "Internet of Thing". [1.7-1.8]

1.1.2. Marché mondial de la technologie RFID

Il y a eu plus de 2.24 milliards de tag RFID vendus dans le monde entier à partir du 2007 et le marché de RFID sera prévisionnellement 26 milliards USD en 2016 selon IDTechex. Généralement, un lecteur RFID à Ultra-Haute Fréquence coûte entre 200\$ et 1000\$ tandis que les prix des tags RFID UHF passifs sont maintenant entre 0.07\$ et 0.15\$. Cependant, leurs prix continuent à décroître et pourraient devenir moins chers que les inlays de code-barre vers l'horizon de 2020 selon certaines prévisions [1.9]. Le scénario prévisionnel du marché de la technologie RFID jusqu'à 2016 est montré dans les figures 1.2 et 1.3.

Application	Parameter	Value \$billion	Suppliers include
Car clicker immobilisers active tag systems	Value of sales in the last ten years	1.5	Subcontract to car manufacturers, Texas Instruments spin off.
Military active tag systems	World's largest RFID order (2006)	0.425	Savi Technology (acquired by Lockheed Martin in 2006)
RFID smart cards	2006/2016 sales	0.627 / 1.005	Gemalto, Giesecke & Devrient
Animal tags	2006/2016 sales	0.2 / 1.4	Allflex
Healthcare, active and passive	2006/2016 sales	0.19 / 2.1	Tagsys, Symbol Technologies
Air industry, active and passive	2006/2016 sales	0.2 / 1.0	Intelleflex, Symbol Technologies

Figure 1.2 – Le marché et les acteurs de RFID de 2006 à 2016 [1.9]

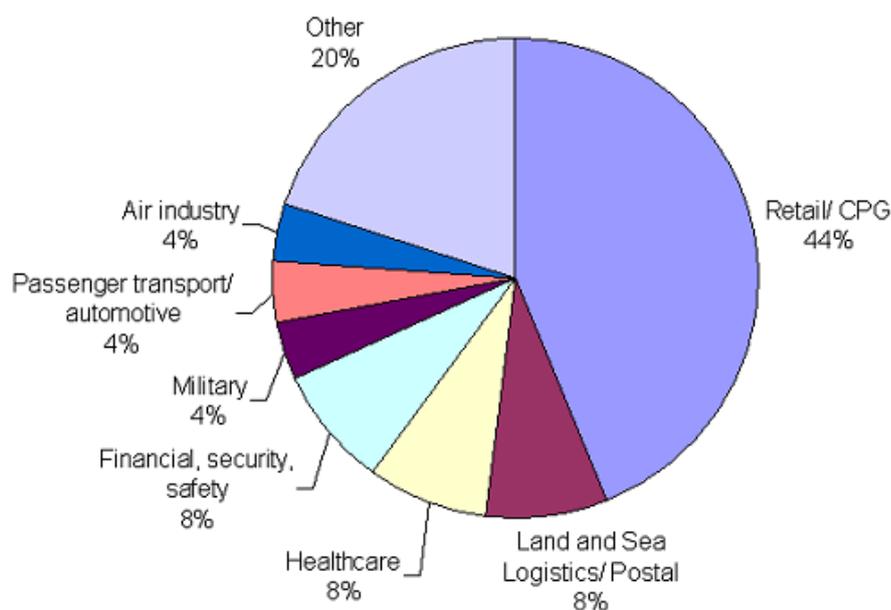


Figure 1.3 - Le marché global en RFID vers 2016 - Un scénario prévisionnel [1.9]

Micron Technologies, IBM et Symbol sont des sociétés qui ont dominé les inventions dans le domaine de la technologie RFID durant la période 1977-2008. Parmi eux, Micron a été le champion avec 183 inventions, et suivi par IBM. Depuis, de nouveaux acteurs sont apparus comme par exemple HP, Intermec IP, 3M Innovative Properties, Tagsys, Alien... Aujourd'hui, la technologie RFID s'installe rapidement dans tous les domaines applicatifs comme le montre la Fig. 1.3 et ce grâce aux réglementations internationales sous l'égide de l'ISO [1.7, 1.9]. D'autre part, les avantages de la RFID en comparaison avec des technologies de l'identification disponibles sont présentés dans le tableau 1.1.

Tableau 1.1 – Comparaison entre les différentes technologies de l'identification

Technologies d'identification	Avantages	Desavantages
Code Barre	<ul style="list-style-type: none"> - Peu couteux. - Simple. 	<ul style="list-style-type: none"> - Vitesse lente. - Distance de lecture courte. - Ne fonctionne pas dans les environnements humides.
Serrure à combinaison codée	<ul style="list-style-type: none"> - Le code peut être facilement remplacé. - Pas de clé physique. 	<ul style="list-style-type: none"> - Plus cher que la serrure en métal - Vulnérable
Carte magnétique	<ul style="list-style-type: none"> - Système bon marché et simple 	<ul style="list-style-type: none"> - La durée de vie est courte
Carte à puce	<ul style="list-style-type: none"> - Peut être utilisée pour de nombreuses applications. - Mémoire plus grande que la carte magnétique. - Niveau de sécurité plus haut que la carte magnétique. 	<ul style="list-style-type: none"> - Plus cher que la carte magnétique
Identification biométrique	<ul style="list-style-type: none"> - Haute densité de données. - Niveau de la sécurité très élevé. A priori invulnérable. 	<ul style="list-style-type: none"> - Distance de fonctionnement courte et - Très cher. - Vitesse de traitement lente.
RFID	<ul style="list-style-type: none"> - La mémoire de la puce est plus grande que la carte intelligente. - Lisible sans contact par le lecteur quand le tag est monté sur les différents objets. 	<ul style="list-style-type: none"> - Plus cher que la carte intelligente

1.1.3. Code à barres et RFID

1.1.3.1. Code à barres

Il existe plusieurs technologies possibles pour réaliser l'identification d'objets ou de personnes. La plus connue et la plus répandue est probablement la technologie Code à Barres dont le premier principe a été introduit en 1948 par Bernard Silver [1.10]. Un code-barre, ou code à barres est la représentation d'une donnée numérique ou alphanumérique sous forme d'un symbole constitué de barres et d'espaces dont l'épaisseur varie en fonction de la symbologie utilisée et des données ainsi codées comme la figure 1.4. Il existe des milliers de codes-barres différents; ceux-ci sont destinés à une lecture automatisée par un lecteur électronique, le lecteur de code-barres. Pour l'impression des code-barres, les technologies les plus utilisées sont l'impression laser et le transfert thermique [1.1] [1.11].



Figure 1.4 - Un exemple de code à barres UPC [1.11]

La première utilisation du code à barres a été l'étiquetage des wagons de train, mais cela ne s'est pas avéré comme un succès commercial. En revanche, leur succès dans le domaine du commerce et la distribution a été impressionnant. Ils sont aujourd'hui incontournables pour automatiser les activités des supermarchés et de la vente et sont devenus universels.

Leur usage s'est étendu à bien d'autres secteurs, des tâches qui sont généralement qualifiées d'identification automatique et de saisie des données (Auto ID Data Capture: AIDC). D'autres technologies tentent de faire des percées sur le marché AIDC, mais la simplicité, l'universalité et le faible coût des codes-barres a limité leur pénétration. La mise en œuvre d'un code-barre est d'environ 0.02 USD [1.12], à contrario d'un tag RFID passif (Identification par RadioFréquence), qui coûte encore environ 0.07USD à 0.15USD [1.2] [1.7] [1.13-1.15]. Cependant, le code à barres présente de nombreuses limitations et inconvénients parmi lesquels:

- Un lecteur de code à barres permet de scanner uniquement à courte distance.
- Le lecteur de code-barre ne peut pas lire les étiquettes mouillées.
- Quand le code à barres est hors de la vue du lecteur il ne peut pas être identifié.
- Le code à barres peut coder une quantité de données limitée, comparativement à la RFID.

1.1.3.2. RFID

Le tag RFID est composé d'une antenne et d'une puce RFID, généralement attaché sur les produits ou les objets à identifier (Figure 1.5). De manière simple, on peut l'appeler une "étiquette intelligente". Pour lire les tags RFID, nous avons besoin d'un lecteur dédié RFID. La communication entre le lecteur RFID et les tags RFID se fait par onde radiofréquence. Les tags RFID peuvent inclure d'autres composants en fonction du type d'application. Citons la carte à puce sans contact comme exemple de tag RFID spécifique aux applications sécurisées.

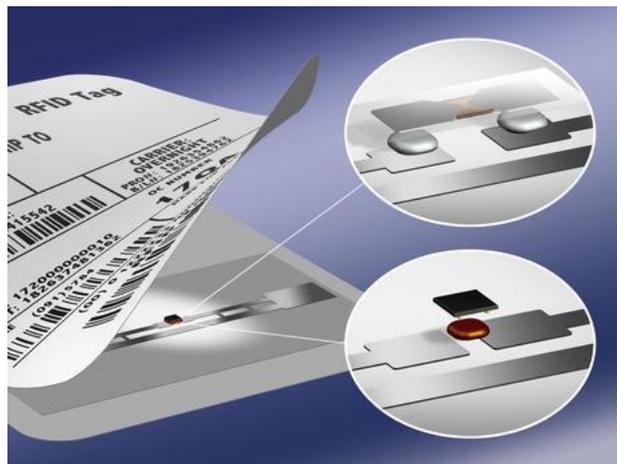


Figure 1.5 - Des composants d'un tag RFID passif [1.14]

Les avantages de la RFID sont:

- Le lecteur et le tag peuvent communiquer sur différentes fréquences.
- La longévité du tag RFID. Les tags passifs ont une durée de vie quasi-illimitée.
- Les tags RFID peuvent mémoriser de très grandes quantités de données.
- Le lecteur et les tags RFID ne nécessitent pas un alignement précis pour communiquer.
- Les tags RFID peuvent « supporter » les conditions rigoureuses.

1.2. Les avantages de la technologie RFID dans la vie quotidienne

1.2.1. La RFID comme outil de paiement



Figure 1.6 - Le dispositif de paiement Pidion BIP-1300 [1.6] [1.17]

Le paiement est un des défis importants de la RFID. Parmi les applications de la RFID dans ce domaine, le modèle Pidion BIP-1300 se présente comme un dispositif de type PDA (Personal Digital Assistant), qui accepte des techniques de paiement diverses, comme les cartes bancaires à puce ou à bande (Figure 1.6). Il est également équipé d'un module RFID permettant la lecture de cartes sans contact [1.15-1.18] via la connexion WiFi 802.11b/g, Bluetooth Class 2 ou encore GSM Edge en direct avec les banques et les instituts de paiement. Le paiement sans contact peut aussi s'effectuer via une montre. C'est ce que propose Laks, une société autrichienne, depuis 2002. Pour ce faire, la montre accepte une carte SIM personnalisable qui contient la puce RFID. Depuis le début 2009, Laks propose cette montre au public en partenariat avec Austria Card, et avec l'accord de MasterCard.

1.2.2. La RFID dans les gestions de transport

L'amélioration de la gestion des flux grâce à la RFID se remarque aussi dans le domaine des transports comme la figure 1.7. La société de services Steria a mis en place à l'aéroport Charles de Gaulle à Paris un système qui permet de gérer la flotte de taxis, et de proposer des taxis en adéquation avec le trafic de passagers. Ce système fonctionne grâce à une puce RFID située sur les taxis, et un capteur placé à l'entrée du garage des taxis. Un système identique est en place à l'aéroport de Heathrow à Londres, et prochainement à l'aéroport de Lyon St-Exupéry [1.6] [1.19-1.20].

Une des applications les plus connues et les plus démocratisées de la technologie RFID reste la carte de transport sans contact. L'utilisateur du métro passe sa carte sur une base (généralement apposée à des tourniquets d'accès), qui l'authentifie, valide son titre de transport, et lui donne accès au réseau. Ainsi, 3.4 millions de titres de transport sans contact circulaient en juin 2008 sur le réseau de transport en commun parisien de la RATP. Ce système fonctionne également dans des villes telles que Londres, Helsinki ou encore Singapour et Tokyo [1.19-1.20].



Figure 1.7 - La RFID dans les transports en commun [1.17]

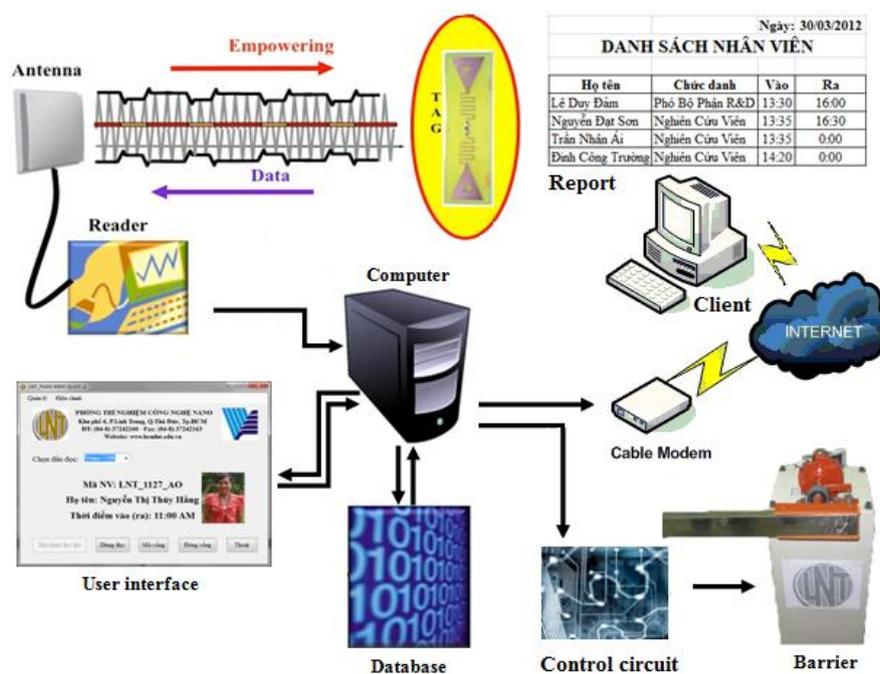


Figure 1.8 - La RFID permet de réguler les moyens de transport au Laboratoire de Nanotechnologie (Vietnam)

Au Laboratoire de Nanotechnologie (Université Nationale du Vietnam à Ho-Chi-Minh ville, Vietnam), nous avons exploité la technologie RFID dans la gestion des transports afin de développer un systèmes de gestion et récupération des données automatique dans les parkings ou les usines au Vietnam. Le fonctionnement du système est montré dans la figure 1.8.

1.2.3. La RFID et les documents d'identité



Figure 1.9 - La RFID est présente dans les documents d'identité

L'identification des individus passe aussi par l'authentification des papiers d'identité comme dans la figure 1.9. La RFID est alors un moyen d'une part de s'assurer de la validité des documents, mais aussi de s'assurer que les informations contenues dans le passeport sont également sous forme de données numérique [1.1-1.3] [1.20]. Il est à noter que des questions de sécurité importantes se posent quant à la l'intégrité des données contenues dans les tags RFID des passeports. Des hackers ont, dès 2006, rendu public les failles de sécurité qui pèsent sur les passeports équipés de RFID.

1.2.4. La RFID pour l'hôpital et l'implant RFID

Dans le domaine de la santé, la localisation des patients et le suivi des processus de soins trouvent une synergie toute particulière grâce aux applications rendues possibles par la RFID. La société Versus Technology a intégré des tags RFID dans ses solutions logicielles de suivi des plannings et de la logistique à destination des cliniques et des hôpitaux. Personnel comme patients sont ainsi équipés de tags qui permettent à la fois de les situer précisément

dans l'établissement, et de vérifier que les parcours de soins sont correctement effectués comme la figure 1.10.

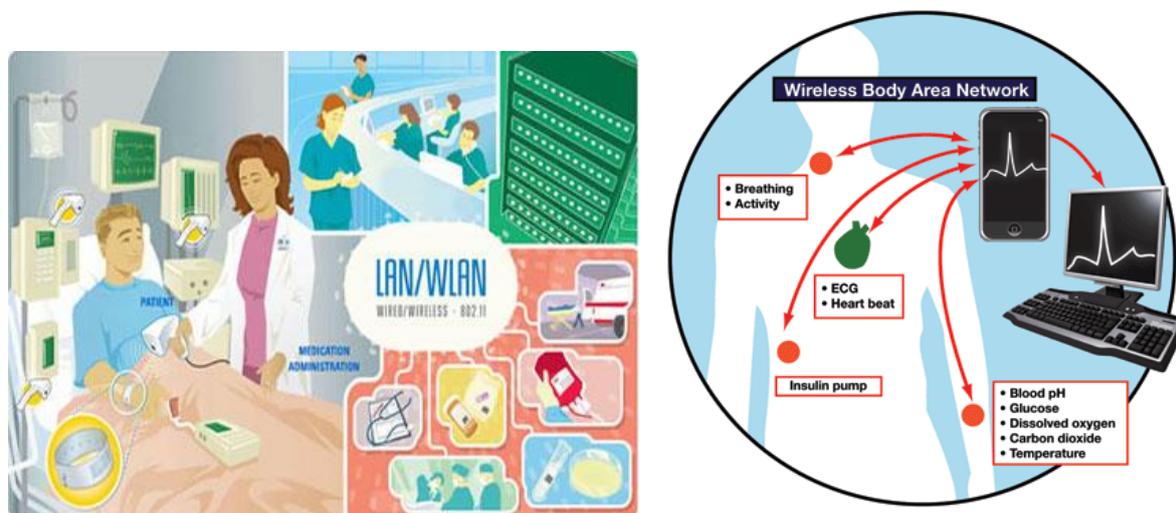


Figure 1.10 - Les technologies sans fil pour la gestion des patients au sein de l'hôpital et à la longue distance [1.21]

Le contrôle et la surveillance des patients peuvent également s'effectuer par le biais de puces RFID attachées ou implantées dans le corps humain de manière sous cutanée. C'est ce que a proposé la société Verichip, qui implante chez des patients volontaires des puces en vue d'assurer leur suivi medical ou lors de leur hospitalisation [1.3-1.9]. Cependant, cette technologie d'implantation a été décriée pour son potentiel de surveillance de l'individu, et l'intrusivité de son concept. Il est à noter que des sociétés comme Nonatec proposent ce type de produit pour des animaux domestiques ou d'élevage.

1.2.5. La RFID pour tatouer les animaux domestiques et les logistiques

La société Sniftag propose d'adapter le RFID pour les besoins des animaux de compagnie, et de leur maîtres. Accroché au collier d'un chien, un boîtier contenant un tag RFID permet de constituer des historiques des différentes activités, de son alimentation, ou encore de son état de santé comme dans la figure 1.11 [1.1-1.9]. Il est également possible de suivre son chien à distance, via un portail Internet, pour connaître l'activité d'un animal pendant que le maître est absent.



Figure 1.11 - Suivre l'activité d'un chien à distance

Un des secteurs d'activité dans lequel la technologie RFID est utilisée depuis longtemps est celui de la logistique (Figure 1.12). Rapidement, les codes à barre ont été remplacés par les tags RFID, et dans des domaines aussi divers que la fabrication de médicaments, ou encore ici dans celui de la gestion de marchandises [1.1-1.9]. L'avantage de la RFID est ici déterminant, car la RFID UHF a une portée qui permet de repérer des tags actifs à plusieurs centaines de mètres. Cela permet par exemple d'effectuer des inventaires et de surveiller les marchandises en temps réel.



Figure 1.12 - La RFID permet de faciliter la logistique

1.3. L'hierarchie et les régulations du système RFID

1.3.1. Composants fondamentaux du système RFID

Un système RFID se compose principalement d'un lecteur, d'un ou plusieurs tags et d'un logiciel d'application. La figure 1.13 décrit le schéma général d'un système RFID. Le lecteur agit généralement en maître par rapport au tag; si le tag est dans la zone de lecture du lecteur, ce dernier l'active en lui envoyant une onde électromagnétique puis entame la communication et l'échange des données. Le lecteur est relié à un hôte d'application qui récupère l'information pour le logiciel d'application. Un lecteur RFID est donc chargé de l'interface avec le système global relatif à l'application et de la gestion de l'identification des tags qui se présentent à lui. Le tag est, quand à lui, constitué d'une antenne et d'une puce électronique miniature [1.3].

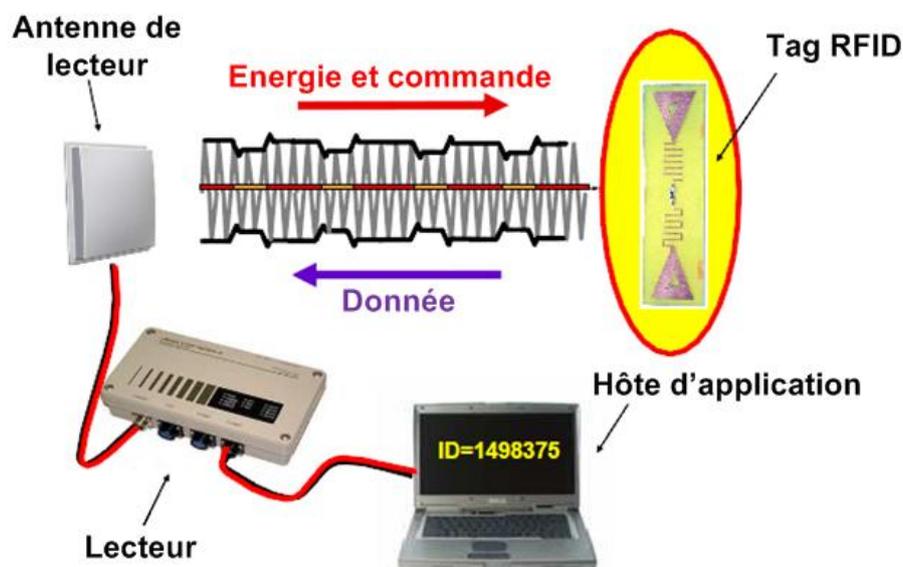


Figure 1.13 - Éléments d'un système RFID [1.2]

1.3.1.1. Lecteur

Le lecteur RFID est un émetteur-récepteur radio spécialisé. Comme tous ces dispositifs, le lecteur doit générer des signaux à la fréquence porteuse (environ 900MHz pour les appareils UHF en général) et moduler ces signaux pour transmettre des informations aux tags. Il doit recevoir et identifier sélectivement des réponses à partir des tags. Pour cela il est doté de circuits de démodulation et de fonctions de traitement lui permettant d'adresser et communiquer sélectivement et individuellement avec tout tag dans son champ de lecture

(imposé par le diagramme de rayonnement de l'antenne du lecteur). Le schéma synoptique général d'un tel système lecteur est représenté sur la figure 1.14 [1.3]. Les lecteurs RFID fonctionnent généralement dans les gammes de fréquence libre de licence (bandes ISM). Cela ne signifie pas que leur fonctionnement n'est pas réglementé, mais les différents dispositifs ne nécessitent pas de licence pour fonctionner dans une certaine bande de fréquences, tant qu'ils répondent à certaines exigences.

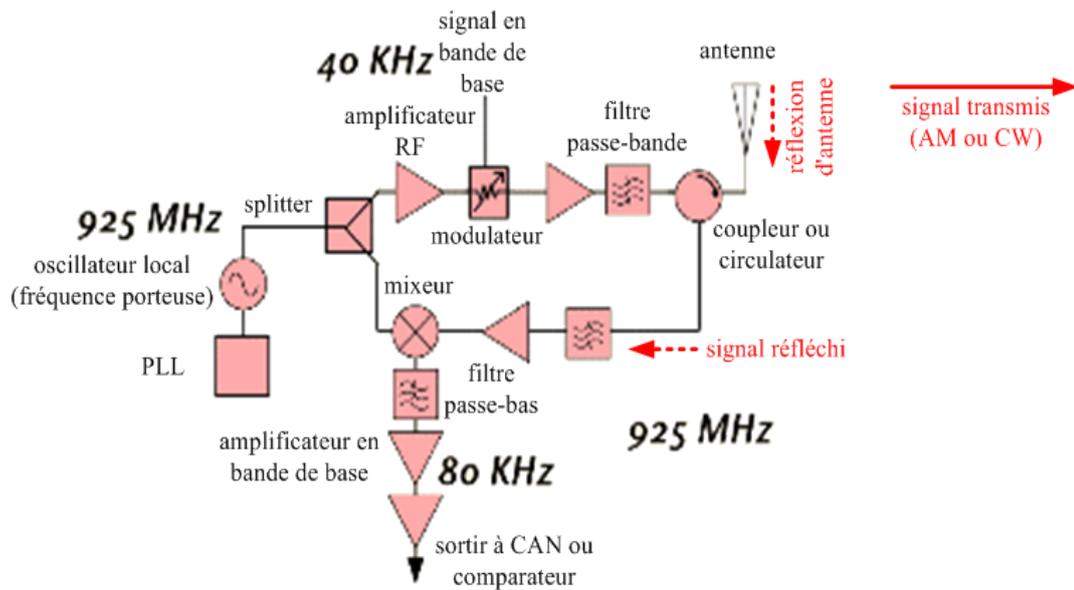


Figure 1.14 - Schéma synoptique fonctionnel d'un lecteur RFID (Front-end RF) [1.3]

Par exemple, la bande UHF en Europe est 866 - 869MHz, en Amérique du Nord est 902 - 928MHz, au Japon et certains pays asiatiques est 950 - 956MHz [1.3]. Les dispositifs utilisant la bande UHF fonctionnent selon un des deux modes: ils peuvent « basculer » selon un mode pseudo-aléatoire d'un canal de fréquence à un autre au sein de la bande autorisées (FHSS : Frequency Hoping Spread Spectrum), ou ils peuvent utiliser des techniques de modulation à large bande. Les deux approches sont destinées pour réduire l'interférence avec les canaux adjacents et les émissions radios voisines. La plupart des lecteurs RFID utilisent la première approche. Ainsi, l'oscillateur local est basé sur une Boucle à Verouillage de Phase (PLL) qui doit être capable de passer rapidement d'une fréquence à une autre. Durant le saut de fréquence, il est commun d'éteindre le transmetteur, pour éviter la transmission à l'extérieur de la bande de rayonnement autorisée. Il est aussi possible de mettre deux synthétiseurs dans la partie radio, pour que l'un s'accorde sur le canal suivant pendant que l'autre émet, en permettant au lecteur de changer de canal sans perte de performance, mais cela ajoute de la complexité et accroît le prix du lecteur [1.3] [1.7] [1.9].

Les lecteurs de RFID font face à des exigences assez différentes de leurs frères de la norme 802.11 ou le téléphone cellulaire. En effet, les étiquettes passives sont des « radios » très muettes: elles n'ont aucune capacité de détecter un changement de fréquence et peuvent seulement détecter des changements dans l'amplitude du signal transmis pour la **modulation d'amplitude** (AM) comme dans la figure 1.15. Les modulations plus sophistiquées, et spectralement plus efficaces, comme la phase-shift keying (PSK) ou la modulation d'amplitude en quadrature (QPSK), ne sont pas utilisées pour les systèmes RFID passifs (bien que la norme ISO-18000-6C : EPC Global Class 1 Gen 2 défini des modulations plus performantes que la simple modulation AM). Par conséquent, le transmetteur pour un lecteur RFID peut être une structure très simple se composant d'un synthétiseur pour générer le signal à transmettre et un atténuateur variable, ou même un simple interrupteur de type ON-OFF.

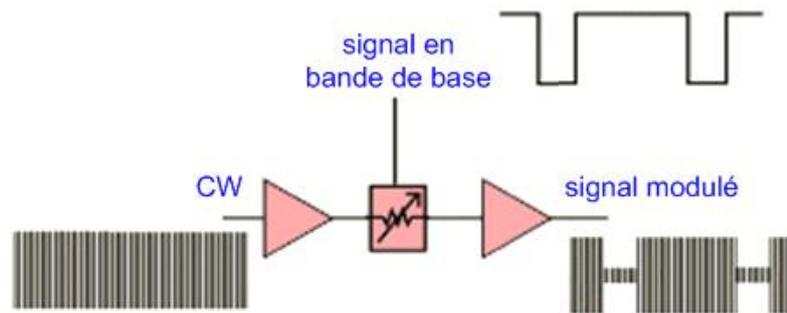


Figure 1.15 - Modulation type ASK dans un lecteur RFID [1.3]

Le système le plus simple est l'ASK schématisé ci-dessus. Il a un grand inconvénient: les transitions soudaines entre les états ON et OFF dans le signal numérique en bande de base sont potentiellement reproduites directement sur l'enveloppe du signal émis à haute fréquence. Il en résulte une pollution spectrale qui peut être importante et se traduit par des interférences indésirables avec d'autres lecteurs RFID ou dispositifs sans fil. Toutefois les tags ne sont pas affectés par ce phénomène. Pour éviter de tels inconvénients, le signal en bande de base est généralement lissé et filtré pour éviter la génération de composantes spectrales inutiles. Au niveau de la réception, la fréquence réfléchi par le tag est identique à celle qui est envoyée par le lecteur. Ainsi la plupart des récepteurs sont homodynes ou le signal transmis est mélangé avec le signal reçu pour que la fréquence porteuse soit complètement rejetée et que seulement la fréquence de modulation du signal reçu reste.

1.3.1.2. Tag (ou Étiquette)

Le tag est extrêmement discret par sa finesse, sa taille est réduite (quelques centimètres), et sa masse est très petite. Grâce à son coût devenu faible, on peut envisager de l'utiliser en nombre, voire de le rendre jetable, bien que la réutilisation soit plus « écologiquement correcte ». Les dispositifs passifs, ne nécessitent aucune source d'énergie en dehors de celle fournie par le lecteur au moment de leur interrogation. Pour activer le tag, le lecteur doit envoyer un signal d'interrogation de puissance suffisante selon un protocole particulier auquel répond le tag. L'une des réponses les plus simples possibles est le renvoi d'une identification numérique, par exemple le tag du standard EPC-96 utilise 96 bits. Une table ou une base de données peut alors être consultée pour assurer un contrôle d'accès, un comptage ou un suivi donné sur une ligne de montage, ou une autre action spécifique [1.3].

Il n'y a pas encore si longtemps, la lecture des puces passives était limitée à une distance de quelques mètres, mais maintenant, grâce aux technologies utilisées, notamment la technologie CMOS faible consommation, dans les systèmes de communication en champ lointain, cette distance peut dépasser facilement la dizaine de mètres [1.22-1.23].

1.3.1.3. Le middleware RFID

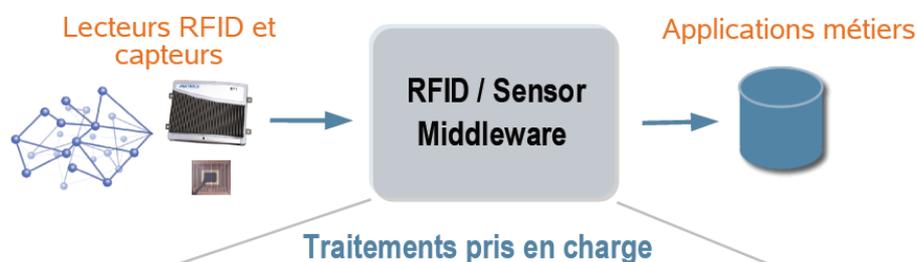


Figure 1.16 - Le rôle du middleware RFID [1.16]

En architecture informatique, un **middleware** (anglicisme) d'un système RFID [1.3] est une couche des logiciels qui crée un réseau d'échange d'informations entre différentes applications informatiques comme dans la figure 1.16. Le réseau est mis en oeuvre par l'utilisation d'une même technique d'échange d'information dans toutes les applications impliquées à l'aide de composants logiciels. Les composants logiciels du middleware assurent la communication entre les applications quelque soit les ordinateurs impliqués et quelque soit les caractéristiques matérielles et logicielles des réseaux informatiques, des protocoles réseau, des systèmes d'exploitation impliqués.

Le rôle du middleware RFID:

- Filtrage et validation des données brutes.
- Fusion des données émises par les différents capteurs.
- Transfert vers les applications métiers.
- Gestion du système (surveillance, niveaux de service, ...).

1.3.2. Classement des systèmes RFID

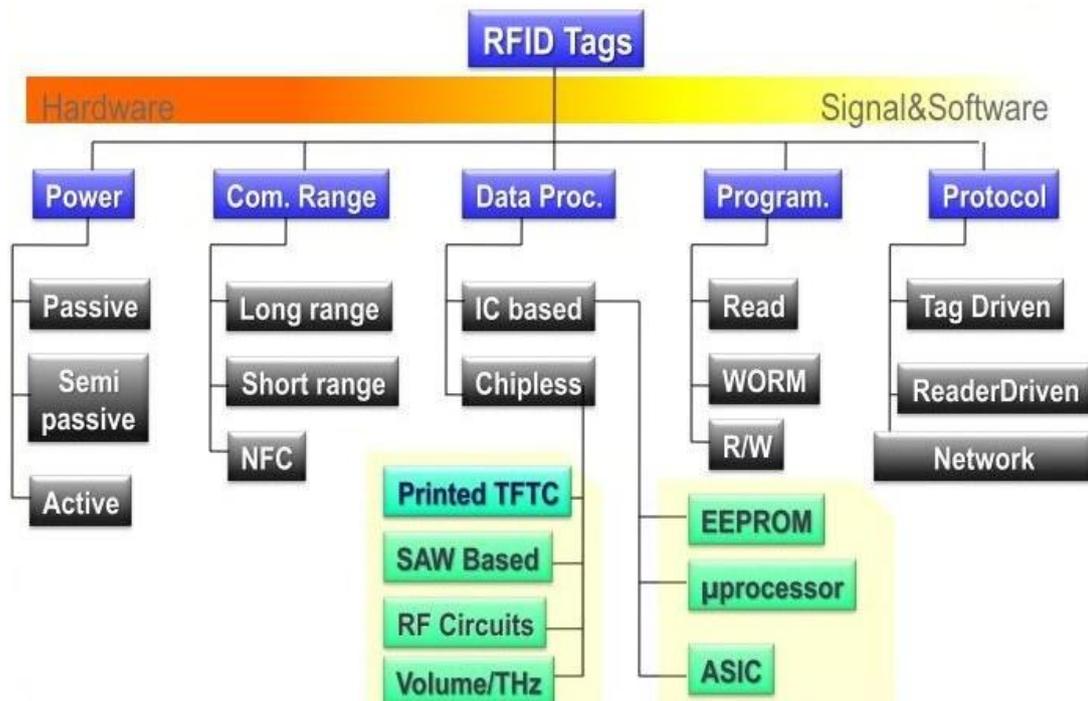


Figure 1.17 - Le classement des tags RFID [1.2]

Les différents systèmes RFID existants sont classés selon plusieurs critères définissant leurs catégories d'appartenance comme la figure 1.17 [1.2-1.3]. La communication avec un transpondeur peut se faire soit sous la forme d'une simple lecture (le lecteur peut par exemple rechercher une information d'identification: badges d'accès) ou de lectures et écritures multiples (suivi de produits frais, cartes de transport en commun ...). Il est également possible d'établir une classification des systèmes en fonction de leurs caractéristiques physiques (méthode d'alimentation, distance de lecture, le traitement des données, programmation de la puce, les protocoles de communications) comme le montre dans la figure 1.17. Dans cette section, nous décrivons les classements du système RFID selon les critères dessus.

1.3.2.1. Le classement par la méthode de l'alimentation

Pour la méthode de l'alimentation du tag RFID, nous avons 3 types de tag RFID : passif, actif et semi-passif comme la figure 1.18. Le tag passif se compose:

- D'une antenne
- D'une puce de silicium
- D'un substrat et/ou d'une encapsulation

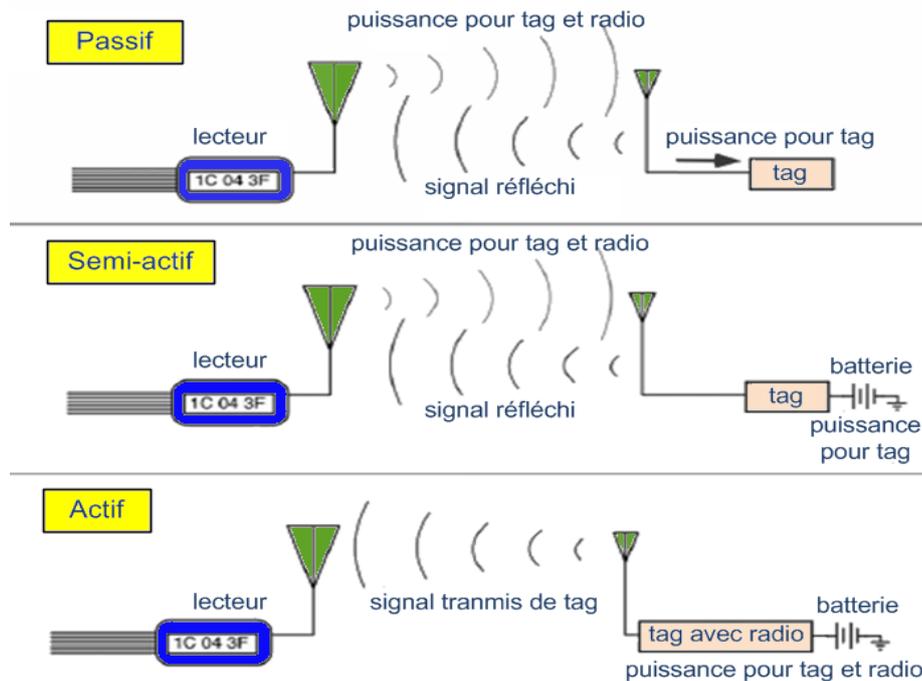


Figure 1.18 - Les méthodes de l'alimentation pour des tags RFID [1.3]

Les tags « actifs » et « semi-passifs » incluent une batterie interne embarquée sur le tag RFID. Les tags actifs sont équipés d'une batterie leur permettant d'émettre un signal. De ce fait, ils peuvent être lus sur de longues distances, contrairement aux tags passifs. Cependant, une émission active d'informations signale la présence des tags, et peut soulever des questions quant à la sécurité des marchandises par exemple. Par ailleurs, le coût de ces tags est généralement très élevé comparativement aux tags passifs [1.15-1.18].

Les tags semi-passifs n'utilisent pas leur batterie pour émettre des signaux. Ils agissent comme des tags passifs au niveau communication. Mais leur batterie leur permet, par exemple, d'enregistrer des données lors du transport. Ces tags sont utilisés pour le suivi de produits sous température contrôlée et enregistrent la température de la marchandise à intervalle régulier.

1.3.2.2. Le classement par la programmation de la puce

Le tag à écriture unique (read-only - RO tag)

Le tag à écriture unique ne peut être programmé qu'une seule fois dans la puce RFID. Les données peuvent être enregistrées dans le mémoire de la puce lors de la fabrication. Cela se fait comme suit: les fusibles individuels sur la puce du tag sont écrits de façon permanente en utilisant des faisceaux laser. Après cette écriture, on ne peut plus changer les données sur la puce. Cette carte est appelée « factory programmed ». Les fournisseurs de tags programment des données sur le tag que les utilisateurs ne peuvent changer [1.18].

Le tag à écriture unique et lecture multiple (Write Once Read Multiple - WORM tag)

Les données du tag WORM ne peuvent être écrites qu'une seule fois. Elles ne sont pas obligatoirement enregistrées par le fournisseur, mais souvent par les utilisateurs qui développent leurs applications.. En fait, les tags WORM peuvent être enregistrés un certain nombre de fois (environ 100 fois). Si le tag est enregistré un nombre de fois supérieur au maximum permis, la carte peut être endommagée de façon permanente. Leur prix acceptable, leur performance et les fonctions de sécurité des données font que ce type du tag RFID devient très populaire dans le domaine commercial aujourd'hui [1.18].

Le tag à écriture/lecture multiple (Read/Write – RW tag)

Le tag RW peut être programmé plusieurs fois (de 10.000 à 100.000 fois ou plus) ce qui est un grand avantage car les données peuvent être enregistrées par le lecteur. L'étiquette RW se compose d'une mémoire Flash (FRAM par exemple) qui permet de sauvegarder les données. La sécurité des données est un défi pour le tag RW. En outre, ce type de tag est généralement le plus cher. Donc, les tags RW ne sont pas très utilisés dans les applications d'aujourd'hui [1.18].

1.3.2.3. Classement par distance de communication

En fonction de l'antenne du tag et du lecteur, les systèmes RFID peuvent être classés en deux grandes catégories comme la figure 1.17.

Système RFID en champ proche

Dans cette situation, il est plus naturel de parler de couplage électromagnétique entre un tag et le lecteur comme montré dans la figure 1.19. Ce couplage est souvent assuré par deux bobines, une au niveau du lecteur et l'autre au niveau du tag. On parle alors de champ proche car la distance de communication est limitée à quelques dizaines de cm au maximum. Dans les systèmes RFID en champ proche, la transmission de la puissance ainsi que les données à partir du lecteur sont assurées grâce au couplage mutuel à travers le champ magnétique pour un couplage inductif ou le champ électrique à travers un couplage capacitif. Dans la pratique c'est souvent le couplage magnétique qui est mis en œuvre à cause de sa simplicité. Le principal inconvénient des systèmes RFID en champ proche est la relative faible distance de lecture.

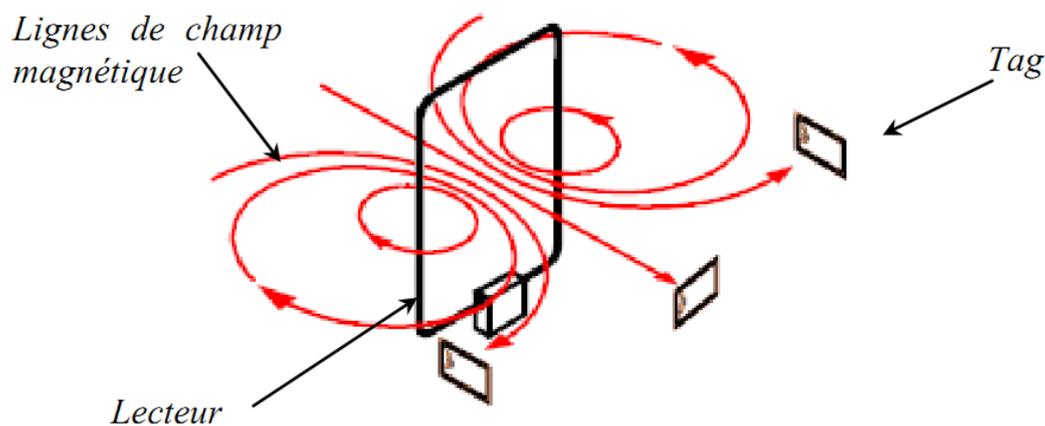


Figure 1.19 – Le champ magnétique du lecteur [1.13]

Le mode de fonctionnement en couplage magnétique concerne les systèmes travaillant aux fréquences entre 9kHz et 135kHz en basses fréquences et 13.56MHz en haute fréquence. Aujourd'hui, nous utilisons des systèmes de couplage magnétique fonctionnant jusqu'à 29MHz. Historiquement, les premiers systèmes magnétiques fonctionnaient en basses fréquences et puis, les premières applications à haute fréquence ont vu le jour dans les années 1990. Ce type de tag (antenne et circuit/mémoire) est généralement gravé sur un substrat flexible de dimension qui ne dépasse pas 10cm, intégrable donc sur des dispositifs tels que des cartes à puces.

Pour les systèmes RFID en couplage magnétique, l'énergie de l'induction est une fonction de la distance à partir de la bobine d'antenne. Le champ magnétique décroît avec un taux de $1/r^3$, où r est la distance entre le lecteur et l'étiquette. La distance de lecture sur un tel

système RFID en champ proche est généralement inférieure à 1m. En outre, une autre limitation est la vision entre le champ magnétique et la position de l'étiquette. Pour la vision de l'antenne du lecteur, l'intensité du champ magnétique de la composante perpendiculaire au plan de l'antenne du lecteur est très forte, alors que l'intensité du champ de la composante parallèle au plan de l'antenne du lecteur est très faible ou même nulle. Par conséquent, si le tag est placé parallèlement au champ magnétique de l'antenne du lecteur, le lecteur ne sera pas possible à l'identifier car il n'y a pas de flux magnétique qui s'écoule à travers le tag [1.3].

Système RFID en champ lointain

Contrairement aux systèmes à champ proche, les systèmes RFID en champ lointain ont la capacité de transmettre des informations entre le lecteur et le tag par les ondes électromagnétiques et donc sur des distances beaucoup plus grandes, qui peuvent dépasser la dizaine de mètres. Le lecteur transmet de l'énergie au tag, une partie de cette énergie est reçue et absorbée par le tag pour s'auto-alimenter alors qu'une autre partie est réfléchi par l'antenne du tag. Grâce à une commutation électronique réalisée par le chip RFID, l'antenne du tag voit une commutation de charge ce qui modifie le niveau du signal réfléchi par le tag. C'est cette opération appelée "backscattering" (ou rétro-modulation) qui permet la communication des données du tag vers le lecteur.

Les systèmes RFID en champ lointain fonctionnant aux fréquences typiquement supérieures à 100 MHz, la plupart du temps en bande UHF (Ultra High Frequency) comme 868 MHz, 915 MHz ou 955 MHz ou les bandes ISM à 5.8 GHz ou 2.45 GHz. La distance de lecture pour les systèmes RFID en champ lointain est affectée par la densité de l'énergie reçue par le tag et la sensibilité du lecteur pour le signal réfléchi à partir de l'étiquette. La sensibilité des lecteurs est en constante amélioration. Ils peuvent détecter les signaux faibles avec le niveau de puissance d'au moins -90 dBm à un coût acceptable. La distance de lecture de ces systèmes peut varier de quelques mètres jusqu'à 100m ou plus pour des tags actifs [1.3]. Les performances des systèmes RFID sont résumés dans le tableau 1.2.

Fréquence	Distance de lecture	Applications
Systèmes RFID en champ proche		
9 – 135 KHz	quelques cm jusqu'au 50 cm	Les cartes de paiement et passeports électroniques
6.78 MHz	quelques cm jusqu'au 50 cm	Pas beaucoup d'application
13.56 MHz	quelques cm jusqu'au 50 cm	Les cartes intelligentes sans contact
Systèmes RFID en champ lointain		
433.92 MHz	1 m jusqu'au 30 m dépendant des applications	Les systèmes RFID actifs aux fréquences UHF
860 MHz ~ 960 MHz	≈ 5 m jusqu'au 10 m	Les systèmes RFID passifs aux fréquences UHF
2.45 GHz	1 m jusqu'au 6 m	Les systèmes de péage, Actifs
5.8 GHz	Inférieur à 1 m	Pas encore beaucoup d'exploitation

Tableau 1.2 – Classement des tags RFID par le champ de rayonnement

Les systèmes UHF ne sont pas limités par l'émission localisée des lignes de champ autour du lecteur. Les dimensions des antennes capables de produire des champs électromagnétiques suffisants pour assurer la communication sont de l'ordre de la demie de longueur d'onde (pour une fréquence de 900 MHz, l'antenne devra mesurer ≈ 16,5 cm). Dans le cas des transpondeurs passifs, l'énergie d'alimentation du tag est générée par la récupération d'une partie du champ rayonné par le lecteur. Cette partie est redressée puis conditionnée pour alimenter la puce RFID.

La densité d'énergie de signal rayonné décroît en fonction de l'inverse du carré de la distance séparant le lecteur et le tag. De ce fait, l'utilisation des systèmes passifs se limite à des distances ne dépassant pas la dizaine de mètres pour des fréquences aux alentours de 900MHz. Cette distance diminue fortement lorsque la fréquence augmente. Pour des fréquences supérieures, les tags nécessitent souvent une alimentation et deviennent actifs. Un avantage majeur des tags UHF réside certainement dans leur faible coût de production grâce aux techniques de développement utilisées et la miniaturisation du tag (puce et antenne).

1.4. Les axes de recherche dans la technologie RFID

Ces dernières années, la technologie RFID est apparue avec ses importantes applications dans plusieurs domaines de la vie quotidienne. Pour l'instant, les principaux axes de recherche dans la technologie RFID s'articulent autour de:

- Miniaturisation de l'étiquette RFID et développement des outils de conception automatisés: Les logiciels de conception automatisée facilitent le processus de conception pour le designer. Les contraintes techniques et les critères de conception (tels que la fréquence de travail, la distance de lecture, la taille maximale, etc) seront pris en compte par le logiciel pour arriver aux conceptions finales à partir des structures initiales [1.24].
- Réduction du coût des étiquettes RFID par un choix approprié des technologies de fabrication, par exemple en utilisant les nouvelles technologies de fabrication tels que le jet d'encre et la sérigraphie. [1.25-1.26]
- Intégration d'autres fonctionnalités dans les étiquettes RFID. La RFID est une technologie sans fil entièrement compatible avec l'intégration des capteurs. Donc, il est devenu essentiel de combiner la technologie RFID au développement des réseaux de capteurs sans fil (Wireless Sensor Network). Ainsi, la tendance actuelle est d'intégrer la fonction capteur dans les technologies d'identification (en particulier RFID) [1.27-1.28]
- Les étiquettes RFID sans puce: Elles visent à abaisser le coût des étiquettes RFID. Parmi les approches possibles (présentées dans la figure 1.20), on peut utiliser des matériaux de type SAW (Surface Acoustic Wave) ou exploiter les paramètres électromagnétiques comme la Surface Équivalente Radar (SER), la polarisation, le temps du groupe... afin d'améliorer le niveau du signal de lecture et la quantité de d'information mémorisée sur un tag sans puce. Il existe aussi des travaux pour exploiter des systèmes à fréquence très élevée dans le domaine THz et pour des applications militaires [1.29-1.30].
- La sécurité des données et les réglementations de la RFID: Les algorithmes pour augmenter la fiabilité et réduire le risque des intrusions dans les systèmes RFID. En outre, les réglementations RFID contribuent à unifier les normes et les performances des systèmes RFID [1.1] [1.31]

- Applications M2M ou Internet of Things: La tendance de l'intégration de toutes les technologies d'identification sans fil dans des applications telles que les réseaux de capteurs sans fil (Wireless Sensor Network) ou réseau intelligent (Smart Grid) est une des orientations de recherches potentielles pour améliorer la qualité de vie. Les travaux de recherche récents mentionnent «Internet of Things» comme une des tendances et perspectives dans cette révolution [1.32-1.33].

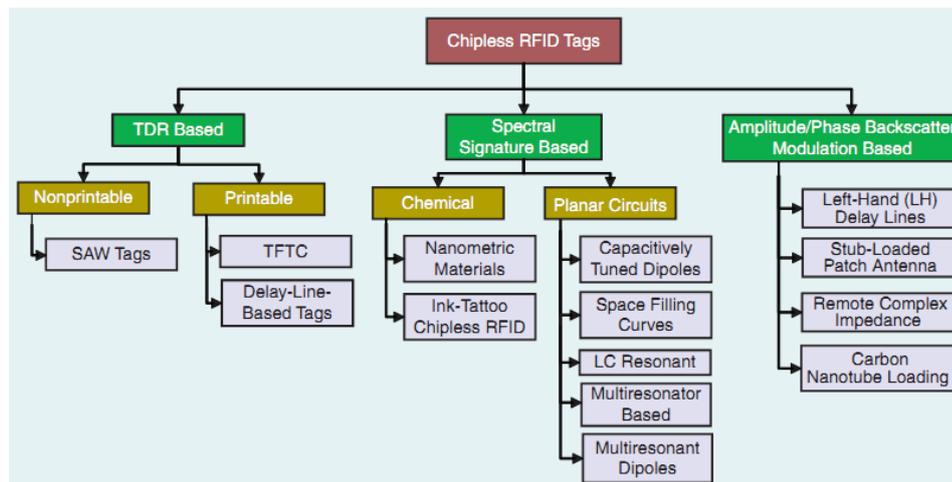


Figure 1.20 - Les axes de recherches dans le domaine du tag RFID sans puce [1.29]

1.5. Conclusions

Dans ce chapitre, nous avons présenté une vue générale sur la technologie RFID et ses avantages, notamment dans les applications civiles. En outre, nous avons présenté la structure et les normes d'un système RFID. De cet exposé nous pouvons mieux identifier les caractéristiques et propriétés de chaque composant. Nous avons aussi présenté brièvement les axes de recherche actuels qui sont envisagés pour le développement de la RFID et ses applications. C'est dans le cadre de cette évolution que vont se situer nos propres travaux faisant l'objet des prochains chapitres. Plus spécifiquement, nous visons le développement de tags capteurs, capables de donner une information sur la contamination des produits alimentaires comme la viande par exemple. Il s'agit de capteurs totalement passifs dont la structure est exactement la même et aussi simple que celle d'un tag UHF passif. Ainsi cette thèse a l'intention de développer des capteurs sans fil sur la base de la technologie RFID et des technologies et matériaux disponibles au Vietnam afin de contribuer à résoudre ce type de problème.

Bibliographie – Chapitre 1

- [1.1]. Klaus Finkenzeller, “RFID Handbook: Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards and Identification”, 2nd edition, John Wiley & Sons, 2003.
- [1.2]. S. Tedjini, E.Perret, «Radio-Frequency Identification Systems and Advances in Tag Design», Invited paper, Radio Science Bulletin No 331, pp. 9-20, December 2009, <http://ursi-test.intec.ugent.be/files/RSBdecember09rincolour.PDF>
- [1.3]. Daniel Dobkin, “RF in RFID: Passive RFID UHF in Practice”, Newnes, 2008.
- [1.4]. Http://www.vectorsite.net/ttwiz_01.html
- [1.5]. Http://www.ehow.com/info_8441969_emergence-rfid-technology.html
- [1.6]. Himanshu Bhatt and Bill Glover, “RFID Essentials”, 1st edition, O’Reilly Media, 2006.
- [1.7]. <Http://www.rfidjournal.com>
- [1.8]. <Http://www.discoverrfid.org/how-it-works/history/development-of-rfid.html>
- [1.9]. IDTechEx, <http://www.idtechex.com/>.
- [1.10]. <Http://www.invention-help.com/content/view/43/41/>
- [1.11]. Http://www.gs1.org/barcodes/technical/bar_code_printing_methods
- [1.12]. <Http://www.crewnoble.com/BarCode.html>
- [1.13]. Anthony Ghiotto, “Conception d’Antennes de Tags RFID UHF, Application à la Réalisation par Jet de Matière”, Thèse de Doctorat, Institut Polytechnique de Grenoble, Novembre 2008
- [1.14]. <Http://www.polygait.calpoly.edu/tutorial.htm>
- [1.15]. BRIDGE project report, “Economic impact of RFID”, April 2008.
- [1.16]. Y. Zhang, L.T. Yang, J. Chen, “RFID and Sensor networks”, Auerbach, 2010.
- [1.17]. Wikipedia Encyclopedia, <http://www.wikipedia.com>
- [1.18]. Harvey Lehpamer, “Design Principles”, Artech House, 2008.
- [1.19]. P. Hauet, "L'Identification par Radiofréquence (RFID) Techniques et Perspectives", REE No.10, Novembre 2006. Available online from: http://www.kbintelligence.com/fileadmin/pdf/RFID_REE_JPH.pdf

- [1.20]. G. Avoine, "RFID et Sécurité Font-Elles Bon Ménage?", SSTIC06, Symposium sur la sécurité des technologies de l'information et de la communication, Rennes, 31 mai, 1-2 Juin 2006.
- [1.21]. [Http://mwrf.com/systems/extend-active-rfid-zigbee-network](http://mwrf.com/systems/extend-active-rfid-zigbee-network)
- [1.22]. Tagsys, <Http://www.tagsysrfid.com/>.
- [1.23]. Bielomatik, <http://www.rf-looptag.com/>.
- [1.24]. Etienne PERRET, Smail TEDJINI Hamza CHAABANE, "Towards UHF RFID Robust Design Tag," in *2010 IEEE Conference on RFID*, Orlando, 2010, pp. 223 - 229
- [1.25]. Li Yang, "Design and development of novel Radio Frequency Identification Tag Structures," Georgia Institute of Technology , 2009, PhD Thesis
- [1.26]. A. Rida, *et al.*, "Conductive Inkjet-Printed Antennas on Flexible Low-Cost Paper-Based Substrates for RFID and WSN Applications," *Antennas and Propagation Magazine, IEEE*, vol. 51, pp. 13-23, 2009
- [1.27]. Lorenzo Mattioni, and Claudio Calabrese Gaetano Marrocco, "Multiport Sensor RFIDs for Wireless Passive Sensing of Objects—Basic Theory and Early Results," *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, vol. 56, no. 8, pp. 2691 - 2702, 2008
- [1.28]. E. Abad, *et al.*, "Flexible tag microlab development: Gas sensors integration in RFID flexible tags for food logistic," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 127, pp. 2-7, 2007
- [1.29]. S. Preradovic and N. C. Karmakar, "Chipless RFID: Bar Code of the Future," *Microwave Magazine, IEEE*, vol. 11, pp. 87-97, 2010
- [1.30]. Sudhir Shrestha, "Chipless RFID Sensor tag system with Microstrip transmissionline based ID generation schemes," College of Engineering and Science Louisiana Tech University, 2009, B.E. thesis
- [1.31]. N. C. Wu, *et al.*, "Challenges to global RFID adoption," *Technovation*, vol. 26, pp. 1317-1323, 2006
- [1.32]. Http://www.cisco.com/web/about/ac79/docs/innov/IoT_IBSG_0411FINAL.pdf
- [1.33]. L. Atzori, *et al.*, "The Internet of Things: A survey," *Comput. Netw.*, vol. 54, pp. 2787-2805, 2010

Chapitre 2

La conception d’antennes appliquée aux tags RFID UHF passifs

Ce chapitre est consacré à la conception des antennes pour les tags RFID UHF passifs. Les techniques de conception de ces antennes sont différentes de la conception des antennes conventionnelles, car les applications et les contraintes sont fondamentalement différentes. En effet, l’antenne du tag, en plus de permettre la transmission des données par réflexion joue un rôle prédominant dans l’alimentation en énergie de la puce RFID. De plus, la méthode de conception qui est décrite dans cette section sera appliquée pour la conception des tags capteur dans les prochains chapitres. Dans ce chapitre, nous présenterons la méthodologie de conception que nous avons mise en place, puis exploitée toute au long de ce travail.

Table des matières

CHAPITRE 2	32
2.1. LES PARAMETRES FONDAMENTAUX D'UNE ANTENNE.....	37
2.1.1. L'IMPEDANCE	37
2.1.2. LE COEFFICIENT DE REFLEXION ET LE COEFFICIENT DE TRANSMISSION	38
2.1.3. LES REGIONS DU CHAMP ELECTROMAGNETIQUE	39
2.1.4. POLARISATION.....	39
2.1.5. LA DISTANCE DE LECTURE	41
2.1.6. SER (SURFACE EQUIVALENTE RADAR)	42
2.2. LES MOTIFS CLASSIQUES DES ANTENNES DE TAG RFID	43
2.2.1. ANTENNE DIPOLAIRE	44
2.2.2. ANTENNE A FENTE (SLOT ANTENNA).....	44
2.2.3. ANTENNE MICRORUBAN (MICROSTRIP ANTENNA)	45
2.2.4. ANTENNE EN F INVERSE (IFA).....	45
2.3. LA METHODOLOGIE DE LA CONCEPTION POUR L'ANTENNE DU TAG RFID UHF PASSIF.....	46
2.3.1. LES CONTRAINTES POUR LA CONCEPTION DU TAG RFID.....	47
2.3.1.1. <i>La fréquence et la bande passante</i>	47
2.3.1.2. <i>La distance de lecture</i>	48
2.4. TECHNIQUES D'ADAPTATION D'IMPEDANCE POUR LES TAGS RFID UHF PASSIFS.....	48
2.4.1. T-MATCH	49
2.4.2. LA BOUCLE D'INDUCTANCE A COUPLAGE MUTUEL	50
2.4.3. NESTED-SLOT	51
2.4.4. STRUCTURE TIP-LOADING.....	51
2.4.5. DIPOLE REPLIE	53
2.5. LES CONCEPTIONS POUR LE TAG RFID UHF PASSIF	54
2.5.1. LES CONCEPTIONS DU TAG POUR LES APPLICATIONS RFID UHF A BANDE ETROITE (868MHz)	54
2.5.1.1. <i>La boucle AK3 Tagsys</i>	54
2.5.1.2. <i>La structure de l'antenne SO-05</i>	55
2.5.1.3. <i>La structure de l'antenne HO-02</i>	56
2.5.1.4. <i>La structure de l'antenne TO-04</i>	57
2.5.2. CONCEPTIONSPOUR LES APPLICATIONS RFID UHF A TRES LARGE BANDE (860 MHz - 960 MHz)	60

2.5.2.1. <i>La structure de l'antenne basée sur la boucle AK3 Tagsys</i>	60
2.5.2.2. <i>La structure de l'antenne basée sur la connexion directe avec la puce</i>	61
2.5.2.3. <i>Discussion sur les 2 différentes approches</i>	64
2.6. CONCLUSION	65
BIBLIOGRAPHIE – CHAPITRE 2	66

Liste des figures et Tableaux

FIGURE 2.1 - SCHEMAS EQUIVALENTS D'UNE ANTENNE EN:	37
(A) TRANSMISSION ET (B) RECEPTION	37
FIGURE 2.2 – LES REGIONS DE RAYONNEMENT AU VOISINAGE D'UNE ANTENNE	39
FIGURE 2.3 – DIFFERENTES DISPOSITIONS DES TAGS DIPOLAIRES PAR RAPPORT A LA POLARISATION DE L'ANTENNE DU LECTEUR	40
FIGURE 2.4 - LES TAGS BI-DIPOLAIRES MULTI-POLARISATION	41
FIGURE 2.5 - SER MESUREES DE TAGS COMMERCIAUX	43
FIGURE 2.6 - ANTENNE DIPOLAIRE CLASSIQUE	44
FIGURE 2.7 – ANTENNE À FENTE ET SON DIAGRAMME DE RAYONNEMENT	44
FIGURE 2.8 – ANTENNE MICRORUBAN ET SON DIAGRAMME DE RAYONNEMENT	45
FIGURE 2.9 – LES MOTIFS DE L'ANTENNE IFA ET PIFA	45
FIGURE 2.10 - METHODOLOGIE DE CONCEPTION D'ANTENNE DES TAGS RFID UHF PASSIFS	46
FIGURE 2.11 – LES INFLUENCES DE L'ENVIRONNEMENT SUR L'ONDE ELECTROMAGNETIQUE SELON LES DIFFERENTES FREQUENCES	47
FIGURE 2.12 – LA CONFIGURATION T-MATCH ET LE CIRCUIT EQUIVALENT	49
FIGURE 2.13 – LE MODELE DE CIRCUIT EQUIVALENT DE LA CONFIGURATION T-MATCH	49
FIGURE 2.14 - LA BOUCLE A COUPLAGE MUTUEL ET LE CIRCUIT EQUIVALENT	50
FIGURE 2.15 – LA CONFIGURATION DE NESTED-SLOT	51
FIGURE 2.26 - LE DIPOLE RACCOURCI PAR L'AJOUTANT DES CAPACITES AUX BOUTS	51
FIGURE 2.37 - FREQUENCE DE RESONNANCE D'UN FIL MONOPOLE DE 3.1CM CHARGE PAR LES DISQUES DE TAILLE VARIABLE	52
FIGURE 2.18 - TEXAS INSTRUMENT CLASSE 1 GENERATION 2 INLAY (2004)	52
FIGURE 2.19 - A) DIPOLE REPLIE B) TENSION EN DECOMPOSANT EN MODES DIFFERENTIEL ET COMMUN	53
FIGURE 2.20 - DIPOLE REPILE AVEC DES STRUCTURES D'ADAPTATION D'IMPEDANCE	54
FIGURE 2.21 - LA BOUCLE AK3 TAGSYS ET SON COEFFICIENT DE REFLEXION	55
FIGURE 2.22. LE PROTOTYPE SO-05 OPTIMISE ET LA GEOMETRIE DU TAG FINAL	56
FIGURE 2.23 - LA STRUCTURE HO-02 OPTIMISEE	56
FIGURE 2.24 -LA STRUCTURE TO-04 OPTIMISEE	58
FIGURE 2.25 - LE COEFFICIENT DE REFLEXION DES STRUCTURES PROPOSEES	58
FIGURE 2.26 - LE DIAGRAMME DE RAYONNEMENT DES STRUCTURES PROPOSEES DANS LES PLANS E ET H	59
FIGURE 2.27 - LES PORTEES DE LECTURE THEORIQUES DES STRUCTURES PROPOSEES	59
FIGURE 2.28 - LA STRUCTURE SO-08 OPTIMISEE	60
FIGURE 2.29 - LE DIAGRAMME DE RAYONNEMENT DE LA STRUCTURE SO-08 SUR LES PLANS DE E ET H	61
FIGURE 2.30 - LES STANDARDS DE CALIBRATION "SHORT-OPEN-LOAD" POUR LA MESURE DE L'IMPEDANCE DE LA PUCE	62
FIGURE 2.31 - LA MESURE DE L'IMPEDANCE DE LA PUCE AVEC L'ANALYSEUR DE RESEAU VECTORIEL ZVB8	62
FIGURE 2.32 - LA STRUCTURE HO-01 OPTIMISEE	63

FIGURE 2.33 - LE CIRCUIT EQUIVALENT DE LA STRUCTURE HO-01 PAR RAPPORT A LA SIMULATION FDTD	63
FIGURE 2.34 - LES COEFFICIENTS DE REFLEXION ET LES READ-RANGE THEORIQUES DES CONCEPTION HO-01 ET SO-08	65

2.1. Les paramètres fondamentaux d'une antenne

2.1.1. L'impédance

Dans une approche circuit, une antenne est caractérisée par son impédance complexe Z_a . Cette impédance est composée d'une partie réelle R_a et d'une partie imaginaire X_a .

$$Z_a = R_a + jX_a \quad (2.1)$$

La partie réelle dans l'équation (2.1) est composée de la résistance de rayonnement R_r et de la résistance des pertes R_l . L'énergie dissipée dans R_r correspond à l'énergie rayonnée par l'antenne. L'énergie dissipée par R_l correspond quant à elle aux pertes de conduction, aux pertes diélectriques et aux pertes d'onde de surface de l'antenne.

$$R_a = R_r + R_l \quad (2.2)$$

Dans le cas de l'émission, un générateur connecté à l'antenne possède également une impédance de interne Z_g constituée d'une partie réelle R_g et d'une partie imaginaire X_g .

$$Z_g = R_g + jX_g \quad (2.3)$$

Le schéma équivalent d'une antenne en transmission est représenté sur la Fig. 2.1a.

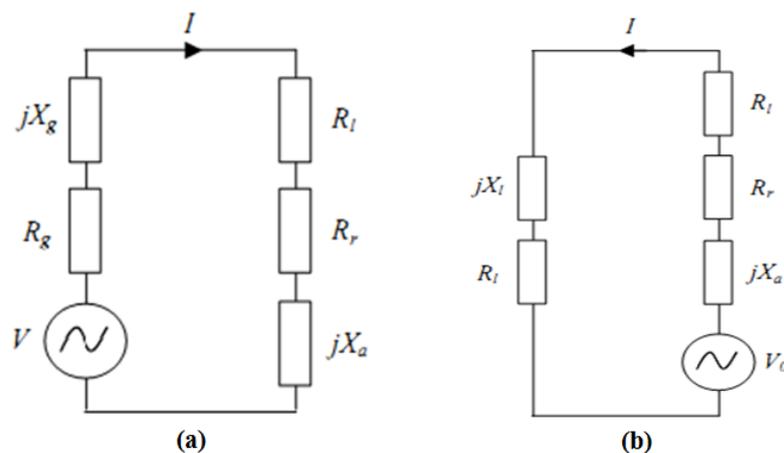


Figure 2.1 - Schémas équivalents d'une antenne en:

(a) Transmission et (b) Réception

Dans le cas de la réception, l'antenne est connectée à une charge ayant une impédance Z_l composée pareillement d'une partie réelle R_l et d'une partie imaginaire X_l .

$$Z_l = R_l + jX_l \quad (2.4)$$

Le schéma équivalent d'une antenne en réception est représenté sur la Fig. 2.1b. V_o représente la tension générée aux bornes de l'antenne en mode réception. Dans le cas de l'adaptation, elle est reliée à la densité de puissance S de l'onde incidente par l'équation [2.1]:

$$\frac{V_o}{8R_a} = S \frac{l^2}{4\rho} G \quad (2.5)$$

Où G est le gain de l'antenne que nous introduirons par la suite, λ est la longueur d'onde à la fréquence considérée.

2.1.2. Le coefficient de réflexion et le coefficient de transmission

Communément, une antenne est conçue pour être adaptée à l'impédance caractéristique Z_0 réelle d'une ligne de transmission (généralement 50Ω ou 75Ω) afin de minimiser le taux d'onde stationnaire (TOS). On définit alors le coefficient de réflexion d'une antenne Γ par [2.1-2.2]:

$$\Gamma = \frac{Z_a - Z_o}{Z_a + Z_o} \quad (2.6)$$

Le TOS est quant à lui donné par (2.7):

$$TOS = \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma} \quad (2.7)$$

On peut définir le coefficient de transmission en puissance T par (2.8). Il correspond au rapport de la puissance transférée à une charge sur la puissance totale maximum pouvant lui être transférée.

$$T = 1 - |\Gamma^*|^2 \quad (2.8)$$

À partir de (2.6) et (2.8), on peut obtenir la relation (2.9) reliant le coefficient de transmission aux impédances d'une antenne et de sa charge (Z_a et Z_l) en considérant l'antenne en réception (Fig 2.1b). Cette relation est très utile en RFID, car elle correspond au rapport de la puissance transférée à une puce RFID sur la puissance totale maximum pouvant lui être transférée.

$$T = \frac{4R_a R_l}{|Z_a + Z_l|^2} \quad (2.9)$$

2.1.3. Les régions du champ électromagnétique

Le champ électromagnétique rayonnée par une antenne peut être divisé en plusieurs régions telles que illustrées sur la Fig. 2.2, où « a » désigne la plus grande dimension de l'antenne. Ces différentes régions sont délimitées par les sphères de rayon R_1 et R_2 respectivement définies comme dans la Fig. 2.2 [2.1]:

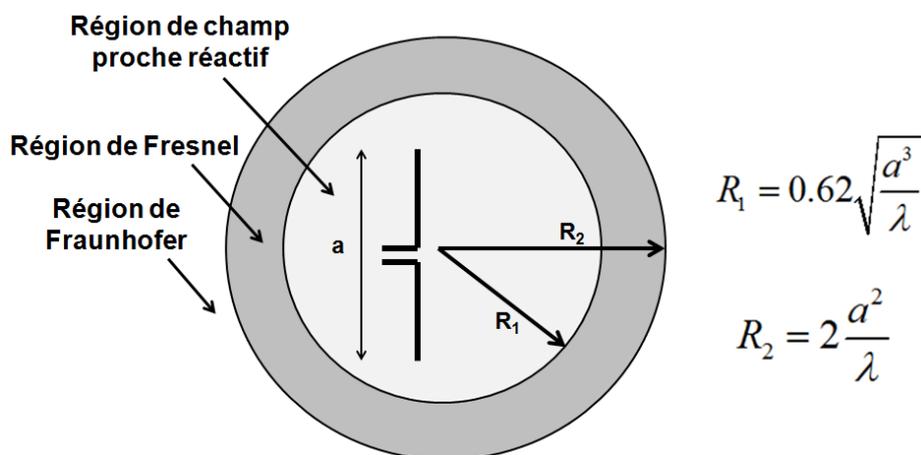


Figure 2.2 – Les régions de rayonnement au voisinage d'une antenne

La région de champ proche réactif est la région immédiatement entourant une antenne. Dans cette région le champ réactif est dominant. Pour une petite antenne, cette région est communément comprise dans une sphère de rayon $\lambda/2\pi$.

La région de Fresnel (ou région de champ proche radiatif) est une région intermédiaire entre la région de champ proche et la région de Fraunhofer. Si l'antenne a une dimension petite comparée à la longueur d'onde cette région peut ne pas exister. Dans cette région, la distribution du champ électromagnétique est dépendante de la distance par rapport à l'antenne.

La région de Fraunhofer (ou région de champ lointain) est définie comme étant la région où l'onde électromagnétique générée par l'antenne est formée. La distribution du champ rayonné et donc le diagramme de rayonnement sont indépendants de la distance par rapport à l'antenne.

2.1.4. Polarisation

Les champs électromagnétiques ont une orientation spatiale qui peut être constante ou variable dans le temps et cette orientation définit la polarisation de l'onde [2.3]. Les champs

électriques incidents sur un conducteur génèrent des courants de surface parallèles à eux. Si le champ incident sur une antenne est majoritairement perpendiculaire à la polarisation de l'antenne, alors le signal généré sera très faible et ne permettra pas le fonctionnement du tag dans le cas de la RFID. La plupart des antennes que nous avons examinées sont allongées (notamment de forme dipolaire) dans une direction et communiqueront facilement avec les champs polarisés le long de cette direction.

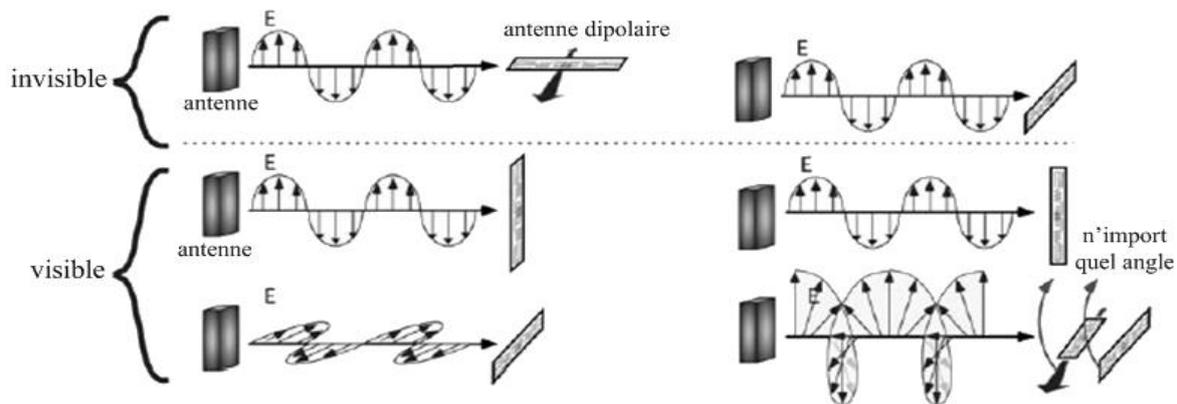


Figure 2.3 – Différentes dispositions des tags dipolaires par rapport à la polarisation de l'antenne du lecteur [2.3]

Cela signifie que quelques combinaisons de polarisation et d'orientation permettront aux tags d'être lus et d'autres combinaisons laisseront les tags quasi-invisibles à l'illumination du lecteur (Fig. 2.3) [2.1-2.3]. En conséquence, les antennes de tag dipolaires doivent être alignées selon la polarisation de l'antenne de lecteur pour être lues. Cette configuration peut être obtenue de plusieurs façons:

- **Contrôle d'orientation:** une antenne de lecteur à polarisation linéaire peut être utilisée si les tags sont toujours orientés de telle manière que leurs axes longs soient parallèles à la direction de polarisation, ou si l'antenne de lecteur peut être physiquement tournée pour accomplir cet alignement.
- **Polarisation circulaire:** une antenne de lecteur circulairement polarisée communiquera avec les tags dans n'importe quelle orientation dans le plan perpendiculaire à la ligne de tag-lecteur. Une antenne circulairement polarisée lira aussi des tags alignés le long de la direction de propagation (par contre invisible quand ils sont placés directement en face de l'antenne), si les objets auxquels les tags sont attachés se déplacent dans la zone de lecture, pour qu'ils soient vus sous des angles variables.

- **Bi-dipôle ou antennes de tag avec multi-polarisation:** une structure d'antenne avec les caractéristiques allongées orthogonalement dans deux directions, ou presque-orthogonalement, communiquera avec les champs électriques dans n'importe quelle direction dans le plan de l'antenne (Fig 2.4).

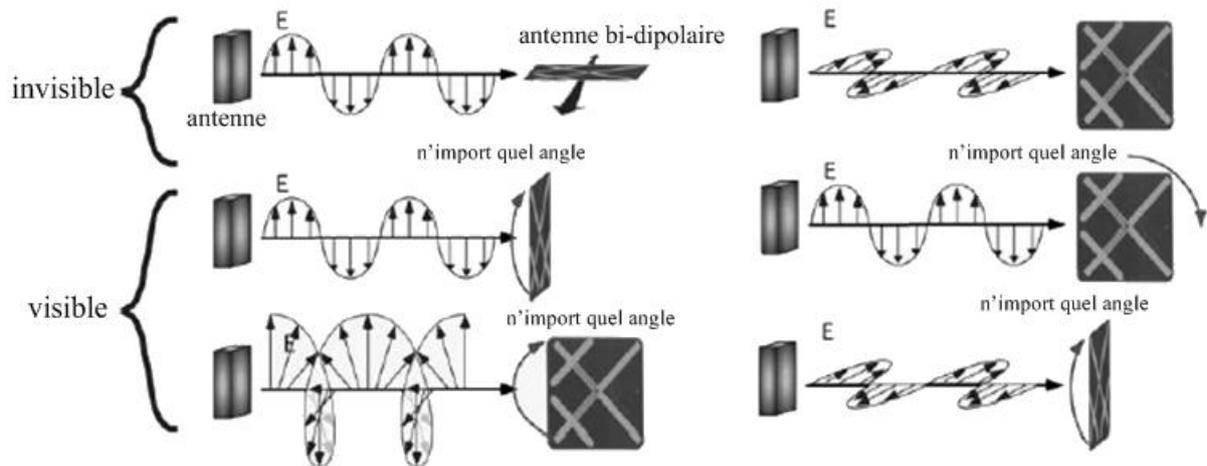


Figure 2.4 - Les tags bi-dipolaires multi-polarisation [2.3]

2.1.5. La distance de lecture

La distance de lecture est un des facteurs les plus importants pour évaluer la performance de la conception de l'antenne d'un tag. Cette distance, connue également sous le nom de « read-range » est donnée par la formule (2.10) [2.4-2.5]:

$$d_{\max}(\theta, \phi) = \frac{c}{4\pi f} \sqrt{\frac{EIRP_R}{P_{th}} \tau G_{tag}(\theta, \phi)} \quad (2.10)$$

Où $G_{tag}(\theta, \phi)$ est le gain de l'antenne du tag

$$G(\phi, \theta) = e \cdot D(\phi, \theta) (1 - |\Gamma^*|^2) \quad (2.11)$$

e est l'efficacité de rayonnement qui tient compte de la polarisation de l'onde, $D(\phi, \theta)$ est la directivité de l'antenne du tag et Γ est le coefficient de réflexion de l'antenne.

Le coefficient de transmission τ est donné comme dans l'équation (2.9):

$$\tau = \frac{4R_{chip}R_A}{|Z_{chip} + Z_A|^2} \leq 1 \quad (2.12)$$

Selon la formule ci-dessus, la distance de lecture dépend des paramètres suivants: fréquence (f), puissance isotrope rayonnée équivalente (EIRP), sensibilité de la puce (P_{th}), le coefficient de transmission (τ) et le gain de l'antenne ($G(\phi, \theta)$). Les trois premiers paramètres sont fixés au départ et seront inchangés au cours de la conception. Puisque le coefficient de transmission τ dépend de l'adaptation de l'impédance entre la puce et l'antenne, la distance de lecture sera affectée de manière significative si l'adaptation entre la puce et l'antenne n'est pas assurée. D'autre part, le gain de l'antenne dépend la structure retenue lors de la conception et influe sur la distance de lecture du système. En outre, la distance de lecture dépend aussi de l'objet sur lequel le tag est placé. En effet, la constante diélectrique, la tangente des pertes, l'épaisseur de l'objet ... sont des facteurs qui ont beaucoup d'influence sur le gain de l'antenne, la fréquence de résonance et l'adaptation de l'impédance... Ces effets seront examinés plus en détail dans le chapitre 5.

2.1.6. SER (Surface équivalente radar)

La surface équivalente radar (SER ou RCS pour *radar cross section* en anglais), ou surface efficace radar, est une propriété physique inhérente des objets indiquant l'importance relative de la surface de réflexion d'un faisceau électromagnétique qu'ils provoquent. La surface équivalente radar est fonction de la forme de l'objet, de la nature de son(s) matériau(x) constitutif(s) ainsi que de la longueur d'onde, des angles d'incidence et de réflexion du rayonnement. La SER est un paramètre spécifique à un chaque objet (cible, véhicule, avion, navire...) influant grandement sur sa susceptibilité d'être détecté par un radar. Représenté dans une formule mathématique (équation) la SER est désignée par la lettre grecque σ (sigma) exprimée en mètre carré.

La SER est composée de plusieurs paramètres. La puissance reçue par une antenne est le produit de la densité de puissance incidente et de l'ouverture efficace de l'antenne. L'ouverture efficace est le produit du gain d'antenne et de l'ouverture d'une antenne isotrope idéale, qui est proportionnelle au carré de la longueur d'onde. Dans notre modèle de circuit équivalent simple la puissance rayonnée par le tag est la puissance dissipée par la résistance de radiation. La puissance rayonnée dans la direction incidente est alors plus élevée que pour le cas isotrope:

$$A_{SC} = \frac{\lambda^2}{4\pi} G^2 \left| \frac{2R_{rad}}{Z_{load} + Z_{ant}} \right|^2 \quad (2.13) \quad [2.3]$$

Ainsi, la SER est déterminée par le gain d'antenne et le rapport de la résistance de radiation à l'impédance de charge de l'antenne. La SER d'une antenne dépend seulement de la longueur d'onde et du gain, et pour les petites antennes utilisées dans les tags, le gain est près de celui d'un dipôle (soit 2.2 dBi).

Quelques données mesurées pour les tags commerciaux réalisés sur un substrat papier sont résumées sur la figure 2.5 [2.3]. Les plus grands tags ont les plus grandes SER sur une plus large bande de fréquence. Les tags compacts de Rafsec et Alien ((d) et (e) dans la figure) ont de petites valeurs de SER. Le tag très compact, fortement serpenté (f) a une SER mesurée de seulement quelques centimètres carrés. Il est conçu pour être déposés sur des substrats à forte permittivité.

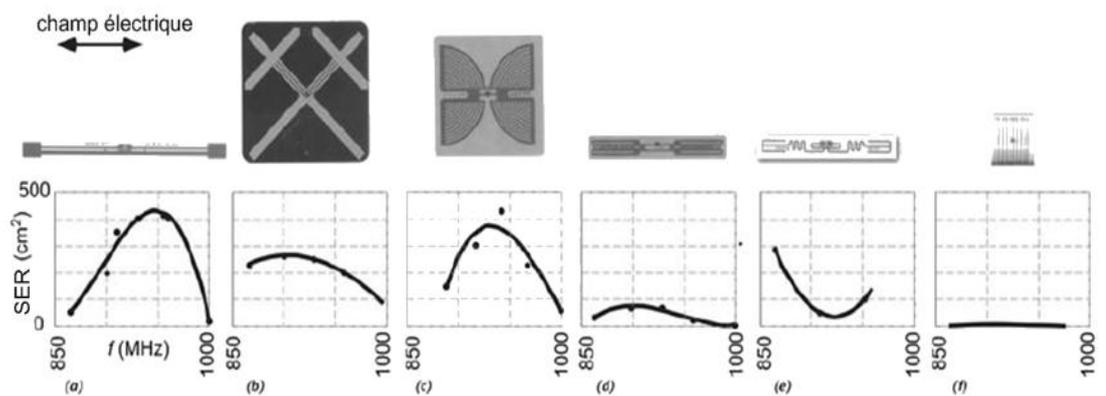


Figure 2.5 - SER mesurées de tags commerciaux [2.3]

2.2. Les motifs classiques des antennes de tag RFID

Dans les technologies sans fil, la communication entre le récepteur et l'émetteur est conditionnée par les paramètres et performances des antennes. En fonction des besoins spécifiques de chaque application, l'antenne sera conçue pour répondre aux contraintes correspondantes. Dans cette section, les motifs les plus courants des antennes pour la conception des étiquettes RFID sont revus.

2.2.1. Antenne dipolaire

L'antenne dipolaire est le motif le plus couramment utilisé pour l'antenne RFID, en raison de sa simplicité en termes de conception et de fabrication, notamment par rapport à d'autres types d'antennes. Une des caractéristiques de l'antenne dipôle est sa polarisation linéaire. Pour l'application RFID, le dipôle se caractérise par une faible directivité et une haute impédance ce qui permet pas d'obtenir des performances élevées.

Par ailleurs, la longueur de l'antenne dipole classique est environ une demie de la longueur d'onde ($\lambda/2$). Cette taille est en fait un désavantage important pour ce motif dans les conceptions de tag RFID. Pour remédier à cela, les techniques de miniaturisation pour l'antenne dipolaire, comme le méandre ou le couplage mutuel... seront appliquées afin d'obtenir des dipôles modifiés de plus petite taille [2.1, 2.6].

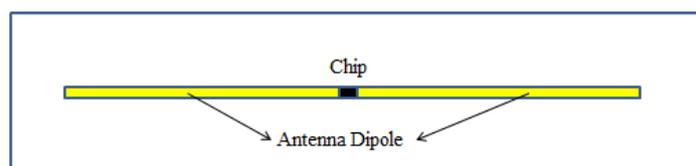


Figure 2.6 - Antenne Dipolaire classique

2.2.2. Antenne à fente (slot antenna)

L'antenne à fente est un motif qui possède une large bande de passante et l'intégration avec des composants ou circuits électroniques est relativement aisée. En outre, l'antenne à fente est très facile à fabriquer et présente un bas coût. Ce type de l'antenne est particulièrement adapté pour une exploitation dans les environnements métalliques [2.1].

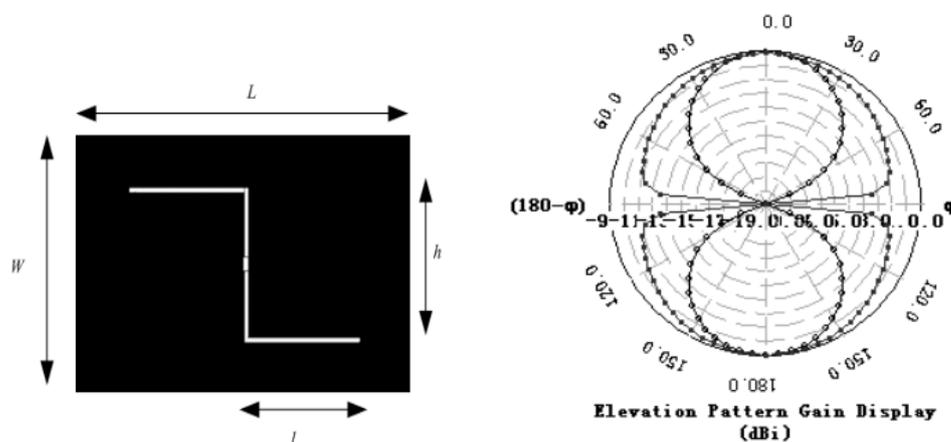


Figure 2.7 – Antenne à fente et son diagramme de rayonnement [2.7]

2.2.3. Antenne microruban (Microstrip antenna)

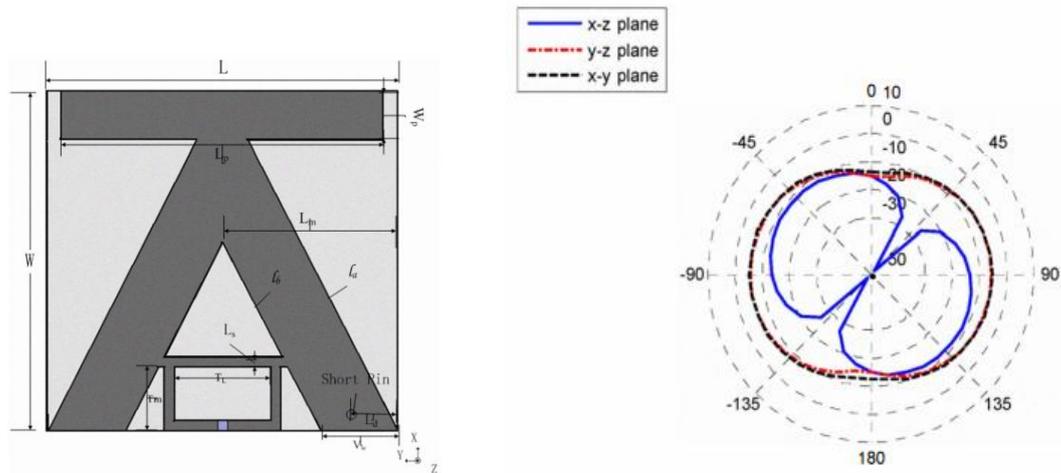


Figure 2.8 – Antenne microruban et son diagramme de rayonnement [2.8]

L'antenne microruban est aussi couramment utilisée dans la conception d'antenne pour la RFID. Les avantages de l'antenne micro-ruban sont la taille, généralement plus petite que les autres types de l'antenne, un faible coût de fabrication, une alimentation électrique très flexible et la robustesse à l'environnement où le tag est placé. Cette robustesse est due à la présence du plan de masse. Les inconvénients les plus importants de ce motif sont une bande passante très étroite et une polarisation linéaire qui limitent sa gamme d'application dans la RFID.

2.2.4. Antenne en F Inversé (IFA)

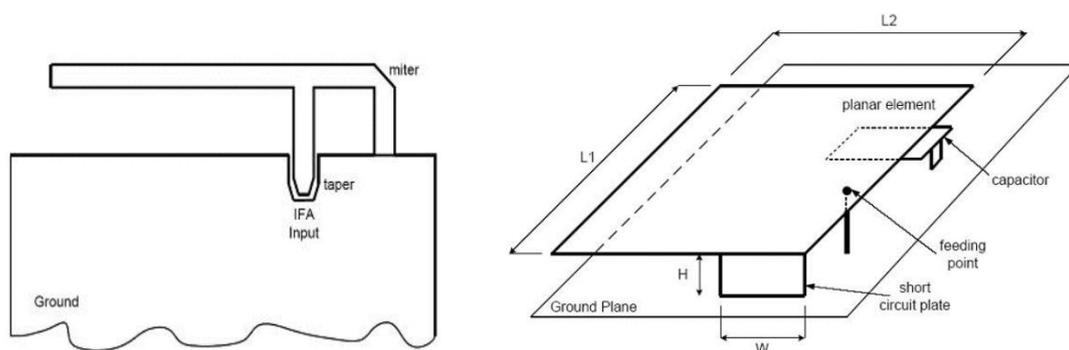


Figure 2.9 – Les motifs de l'antenne IFA et PIFA [2.9]

Un autre motif utilisé pour les tags RFID est l'antenne en F inversé (Inverted F Antenna-IFA). L'IFA se compose d'un fil conducteur placé parallèlement au plan de masse, un morceau de fil assurant la connexion au plan de masse et un fil d'alimentation pour

l'antenne. La longueur du fil vertical qui est relié entre le fil de conducteur et le plan de masse peut être utilisée pour ajuster la résistance et la capacité de l'antenne. Le principal élément rayonnant est la ligne de conducteur parallèle au plan de masse, tandis que le fil de liaison est la cause des pertes de puissance. Pour améliorer la bande passante de l'IFA, le fil de rayonnement sera remplacé par un plan de rayonnement et nous permet d'obtenir un nouveau motif appelé PIFA (Fig 2.9).

2.3. La méthodologie de la conception pour l'antenne du tag RFID UHF passif

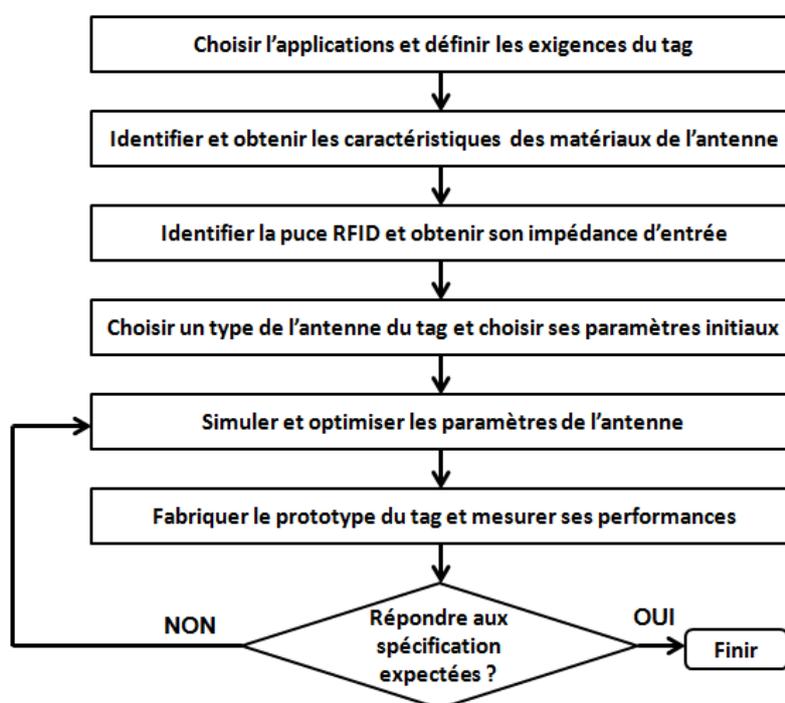


Figure 2.10 - Méthodologie de conception d'antenne des tags RFID UHF passifs

La conception d'antenne de tag RFID UHF passif nécessite de mettre en oeuvre une méthodologie de développement dont l'organigramme est présenté dans la figure 2.10 [2.10]. Lors de la sélection des applications RFID, les exigences et contraintes du système seront mises en correspondance avec les exigences de l'étiquette. L'étiquette sera conçue le plus souvent à l'aide de logiciel de simulation électromagnétique 3D afin d'optimiser les performances comme la distance de lecture, le gain, l'impédance de l'antenne... Une fois la conception terminée, nous réalisons les antennes et les mesurons pour s'assurer si la conception satisfait aux besoins de l'application. S'il est satisfait, le processus de conception

sera réussi. Dans le cas contraire, il faut continuer à l'adapter et l'optimiser jusqu'à ce que les exigences soient satisfaites.

2.3.1. Les contraintes pour la conception du tag RFID

Pour que le système RFID fonctionne bien, une condition préalable est la nécessité de définir clairement les exigences de conception. Chaque situation a des besoins différents qui dépendent en fonction de l'objet d'application, les réglementations de chaque pays, la capacité d'interagir avec les autres systèmes de télécommunication... [2.4] [2.11] [2.12]

2.3.1.1. La fréquence et la bande passante

La fréquence est choisie en fonction de l'application. En effet aussi bien les hautes fréquences que les basses fréquences peuvent être envisagées. Cependant, les caractéristiques de chaque gamme de fréquence sont très différentes en terme d'application. En effet, l'environnement ou les obstacles entre l'étiquette et le lecteur peuvent influencer sur la performance du système. Les fréquences LF et HF sont utilisées normalement dans les environnements comme les matériaux diélectriques (papier, plastique, céramique, etc...) qui peuvent laisser pénétrer dans les champs électromagnétiques. Ils sont également utilisés pour des matériaux à fortes pertes diélectriques ou des milieux métalliques car la pénétration de l'onde électromagnétique est souvent suffisante. Néanmoins, la distance de lecteur demeure modeste, le plus souvent bien inférieure au mètre, car il s'agit d'un couplage magnétique.

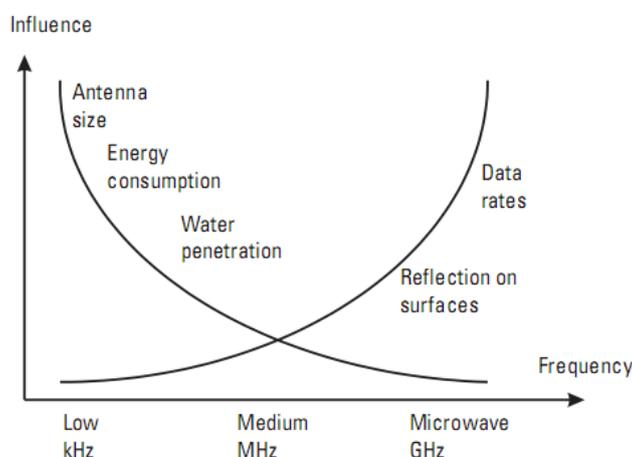


Figure 2.11 – Les influences de l'environnement sur l'onde électromagnétique selon les différentes fréquences [2.2]

Dans la région de plus haute fréquence (UHF ou supérieur), le champ électrique devient plus important et on utilise un phénomène de propagation pour communiquer entre le lecteur et le tag. Des distances de lecture de plusieurs mètres sont alors envisageables. Par ailleurs la sensibilité de l'antenne à son voisinage immédiat permet de concevoir des capteurs exploitant cette sensibilité à un ou plusieurs paramètres de l'environnement.

2.3.1.2. La distance de lecture

La distance de lecture d'un système RFID dépend de la configuration des composants du système et les paramètres suivants [2.1-2.4]:

- a. La fréquence de travail et les performances de l'antenne.
- b. La polarisation de l'antenne.
- c. La répartition de courant.
- d. La sensibilité du récepteur.
- e. Les méthodes de modulation et de démodulation.
- f. Le nombre de bits de données et l'algorithme d'anticollisions.
- g. L'environnement.

La distance de lecture du système UHF est plus grande que pour la HF car l'efficacité de l'antenne augmente quand la fréquence augmente. Avec une fréquence de résonance constante, les paramètres de (a) à (c) dépendent de la structure d'antenne. Le paramètre (d) est déterminé par la configuration de lecteur. La condition (e) concerne au protocole de communication du dispositif et la condition (f) concerne le logiciel d'application. Idéalement, pour les applications RFID, la forme et la taille de l'antenne doit être conçues de sorte que le tag puisse fonctionner sur les différents objets (cartes d'identité, des valises, des papiers, etc...) différentes surfaces y compris courbées (comme boîtes à pilules, les flacons de vaccin, etc...) ou pliables comme sur les valises utilisées dans le transport aérien. En outre, la taille de l'antenne détermine également la fréquence de fonctionnement et aussi l'efficacité de rayonnement de l'antenne du tag. Dans la pratique des compromis sont à faire avoir la meilleure conception.

2.4. Techniques d'adaptation d'impédance pour les tags RFID UHF passifs

Le premier avantage de l'adaptation d'impédance entre l'antenne du tag et la puce est de récupérer suffisamment d'énergie pour générer une tension continue suffisante pour

alimenter la puce RFID (en particulier l'unité de traitement numérique qui gère le protocole de communication).

2.4.1. T-match

Une approche possible pour l'adaptation d'une antenne à la puce RFID qui a généralement une impédance capacitive, est d'ajouter une structure d'adaptation inductive. Une structure possible utilise une combinaison d'inductances en parallèle et en série. Une telle approche est montrée à la figure 2.12 [2.13]. Les inductances parallèle et série sont réalisées par des longueurs de ligne conductrice raccordant l'antenne à la puce.

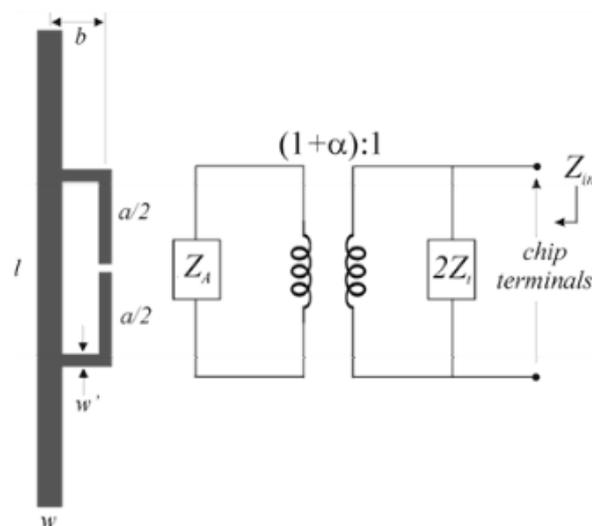


Figure 2.12 – La configuration T-match et le circuit equivalent [2.13]

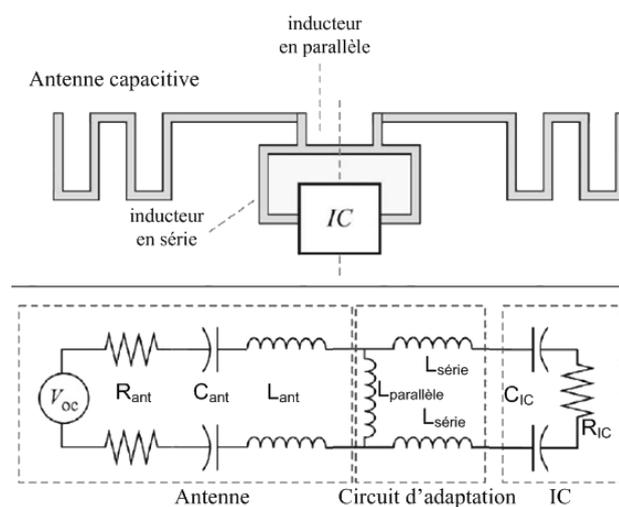


Figure 2.13 – Le modèle de circuit equivalent de la configuration T-Match [2.3]

L'impédance équivalente vue à partir de la puce:

$$Z_{in} = \frac{2Z_t(1+\alpha)^2 Z_a}{2Z_t + (1+\alpha)^2 Z_a} \quad (2.14)$$

Où Z_t est l'impédance du stub et Z_a est l'impédance équivalente de l'antenne.

La configuration T-Match fonctionne comme un adaptateur de l'impédance. Les dimensions de la largeur et de la longueur des pistes conductrices peuvent être ajustées pour que l'adaptation de l'impédance entre la puce et l'antenne soit assurée.

2.4.2. La boucle d'inductance à couplage mutuel

Le fonctionnement de cette configuration est presque identique à la configuration T-Match, mais nous utilisons une boucle proche de l'antenne pour exploiter le couplage mutuel afin d'ajuster l'impédance de la structure (Fig. 2.14). Les paramètres de l'adaptation de l'impédance sont les dimensions de la boucle ainsi que de l'antenne et la distance entre la boucle et l'antenne. L'impédance équivalente vue à partir de la puce [2.13]:

$$Z_{in} = Z_{loop} + \frac{(2\pi fM)^2}{Z_A} \quad (2.15)$$

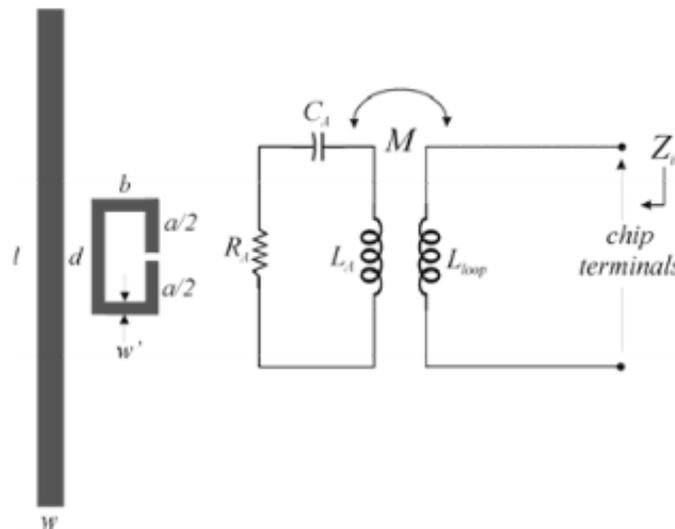


Figure 2.14 - La boucle à couplage mutuel et le circuit équivalent [2.13]

2.4.3. Nested-slot

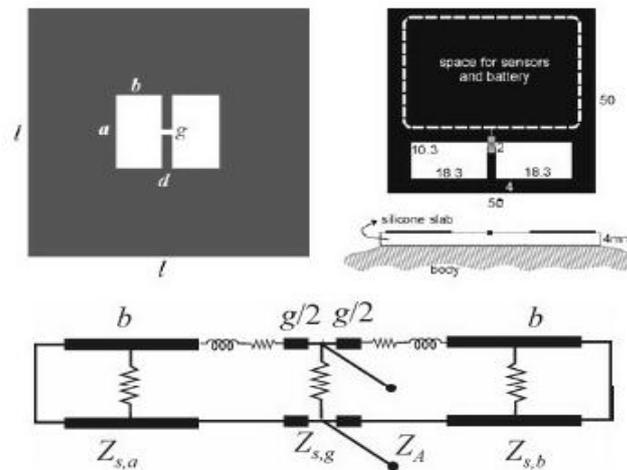


Figure 2.15 – La configuration de Nested-slot [2.13]

C'est une approche complètement différente en comparaison avec celles au dessus: au sein de la structure de l'antenne plate, des fentes pour l'adaptation sont créées comme dans la Fig. 2.15. Les fentes sont équivalentes aux résistances et inductances qui permettent de stocker et de rayonner l'énergie électromagnétique. Avec plusieurs degrés de liberté, cette configuration contribue à la réduction de la taille et à la réalisation de structures multi-bandes.

2.4.4. Structure Tip-loading

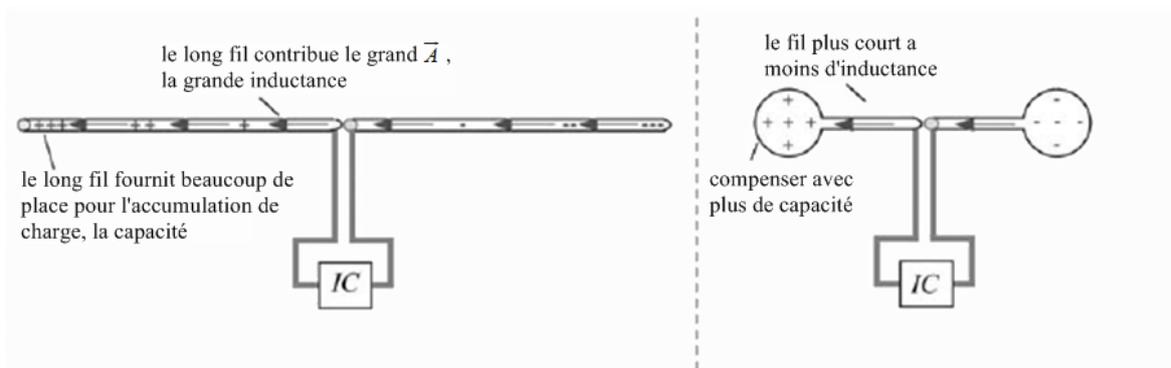


Figure 2.16 - Le dipôle raccourci par l'ajout de capacités aux bouts [2.3]

Une autre méthode consiste à utiliser une antenne plus courte avec une impédance convenable puis de lui ajouter une structure de grande taille à ses extrémités. Cette grande structure est connue comme le « tip-loading capacitive » [2.3] et a globalement un effet

capacitif. Un dipôle tip-loading semble plus inductif qu'un dipôle conventionnel de la même longueur et est donc plus facile à adapter.

Les anciens dipôles de tip-loading utilisaient souvent des sphères en métal, avec une capacité proportionnelle à la superficie de surface de la sphère. Les antennes imprimées doivent utiliser des structures plates et la capacité ajoutée est grossièrement proportionnelle au périmètre de la forme plutôt que sa superficie.

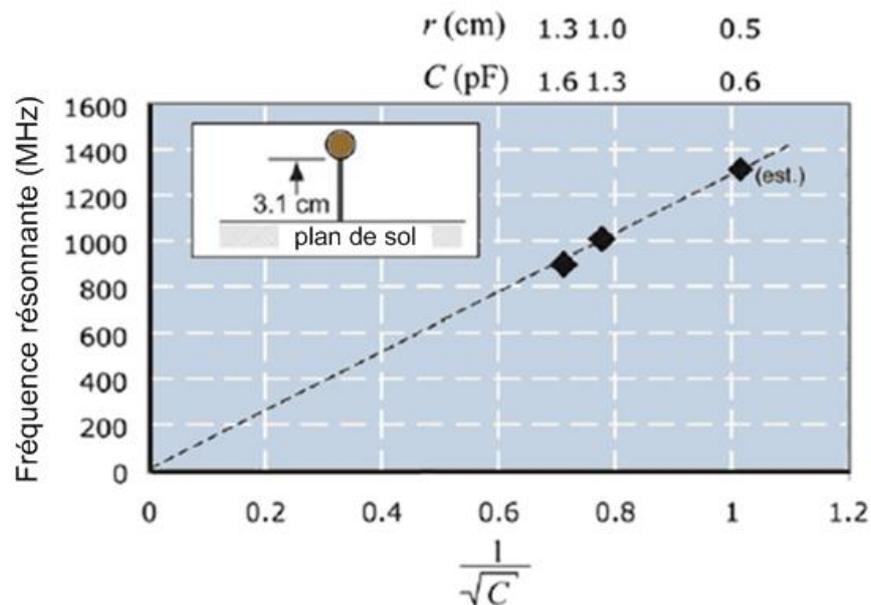


Figure 2.17 - Fréquence de résonance d'un fil monopôle de 3.1cm chargé par les disques de taille variable [2.3]

Les exemples de données mesurées pour un fil monopôle de 3.1cm chargé par les disques de taille variable sont montrés à la figure 2.17. Les disques avec un rayon d'environ 1cm fournissent la capacité d'environ 1pF, et permettent une antenne résonnante à 900 MHz, ce qui permet d'avoir une longueur d'antenne de 10cm (au lieu de 15cm) pour une antenne filaire. Un exemple d'une structure de tag commercial avec le tip-loading est le circuit d'adaptation d'impédance de T-match sont dans la figure 2.18.

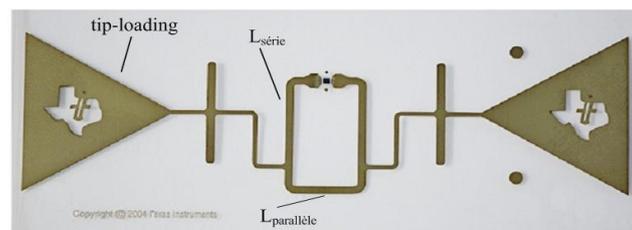


Figure 2.18 - Texas Instrument Classe 1 Generation 2 inlay (2004) [2.3]

2.4.5. Dipôle replié

Le dipôle replié peut être analysé en décomposant la tension appliquée en parties différentielle et commune. La partie différentielle lorsque les deux fils reçoivent des tensions opposées, et la partie commune, lorsque les segments à gauche et à droite reçoivent la même tension (figure 2.19b). Les tensions différentielles se propagent le long de ce qui ressemble à une ligne de transmission bifilaire; puisque le courant sur le fil à gauche est toujours égal en grandeur et en direction opposée à celui sur le fil de droite. Le rayonnement de ces courants s'annule et donc la ligne de transmission n'a aucune résistance de radiation associée à cela. Dans le cas particulier où chaque bras de l'antenne est un quart de la longueur d'onde, les segments de ligne de transmission transforment le court-circuit à leur bout dans en circuit ouvert, pour que la tension de ligne de transmission ne génère aucun courant du tout.

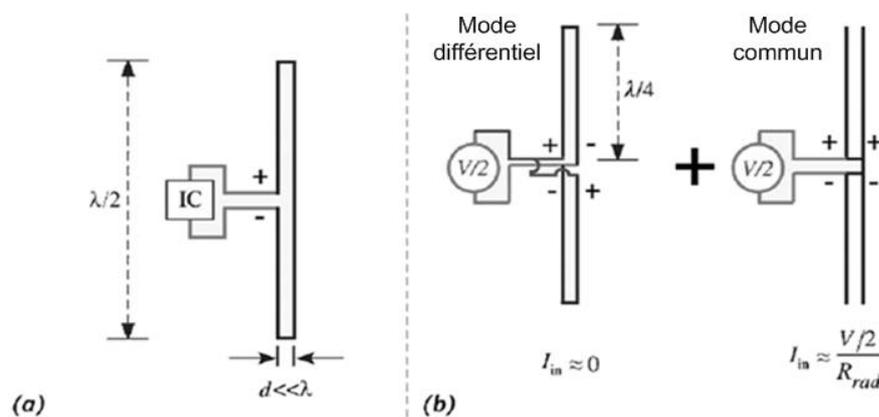


Figure 2.19 - a) Dipôle replié b) Tension en décomposant en modes différentiel et commun [2.3]

Puisque l'impédance d'un dipôle n'est pas une fonction très sensible à sa coupe transversale, la paire de fils peut être considérée comme un dipôle régulier pour le mode commun. Ainsi le courant de mode commun est généré par la moitié de la tension appliquée à l'origine du dipôle. La moitié de ce courant s'écoule sur les segments gauches et l'autre moitié sur le segment de droite. Le résultat consiste en ce que pour une tension d'entrée donnée, nous obtenons $\frac{1}{4}$ du courant que nous aurions observé d'un dipôle conventionnel; cela signifie qu'un dipôle replié a une résistance de radiation quatre fois plus grande qu'un dipôle conventionnel, soit environ 260-280 Ω [2.3].

Les variantes du dipôle replié sont aussi utilisées dans des tags commercialisés. Les conceptions de l'Alien Technology I-tag peuvent être considérées comme les dipôles repliés avec des inductances parallèles/séries (figure 2.20).

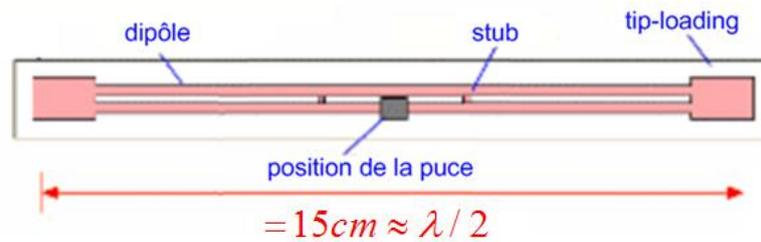


Figure 2.20 - Dipôle repilé avec des structures d'adaptation d'impédance [2.3]

2.5. Les conceptions pour le tag RFID UHF passif

Avec la méthodologie et les techniques de conception ci-dessus, nous allons utiliser ces approches pour concevoir des antennes de tags RFID passifs pour les applications dans la gamme UHF. Dans cette section, nous présentons les conceptions du tag RFID pour les applications aussi bien à bande étroite (pour la régulation ETSI à 868MHz) qu'à bande large (860MHz - 960 MHz) [2.14].

2.5.1. Les conceptions du tag pour les applications RFID UHF à bande étroite (868MHz)

2.5.1.1. La boucle AK3 Tagsys

Une des différentes possibilités pour la conception des étiquettes RFID est d'utiliser des tags RFID primaires qui sont composés de petites boucles déjà connectées avec la puce RFID. Cette structure est connue sous le nom de AK3 et est développée par la société Tagsys. Avec cette boucle primaire connectée à la puce, on peut facilement réaliser la conception du tag en évitant le problème habituel lié à la connexion directe entre la puce et l'antenne. L'antenne est également conçue pour une fabrication sur un substrat PET de 80 μm d'épaisseur et des pistes de cuivre d'épaisseur de 10- μm . L'alignement entre l'AK3 Tagsys a été fait par des repères en points et en croix comme indiqué sur la Fig. 2.21.

Les tags soient conçus dans cette section avec la boucle AK3 TAGSYS qui est une antenne primaire reliée à une puce NXP. À partir de nos études (Fig. 2.21), cette boucle peut rayonner elle-même avec un gain faible (1.63 dBi) et son diagramme de rayonnement est omnidirectionnel autour du bord de la boucle. En outre, la distance de lecture de la l'AKtag avec le lecteur portable de 500-mW [2.15] de puissance est juste autour 5cm ce qui n'est pas compatible pour les applications RFID réelles. L'objectif principal est de concevoir une

antenne secondaire sur substrat de PET d'une épaisseur de 80 microns, afin d'améliorer la distance de lecture de l'étiquette complète pour des applications réalistes. Selon les informations fournies par le fournisseur [2.16], la puce NXP après packaging a une impédance de $22 - j195$ Ohms, qui est utilisée dans les conceptions de nos antennes.

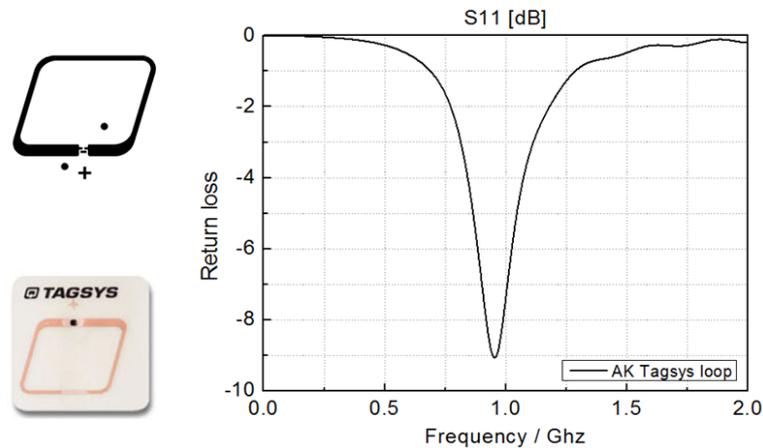


Figure 2.21 - La boucle AK3 Tagsys et son coefficient de réflexion

2.5.1.2. La structure de l'antenne SO-05

En premier, la conception proposée (notée SO-05) est basée sur l'antenne méandre classique avec une boucle d'adaptation de type T-match. Comme discuté ci-dessus, une autre conception de l'antenne secondaire en méandre est inspirée de la littérature [2.2-2.5, 2.10, 2.13] sera conduite afin d'améliorer la distance de lecture du tag final comme cela est décrit dans la figure 2.22. Les études paramétriques seront exécutées à la fois pour miniaturiser la taille de l'antenne et pour obtenir une bonne adaptation de l'impédance entre l'antenne et la puce NXP. D'après les études paramétriques et les recherches connexes [2.17-2.21], l'inductance de l'antenne et le facteur de qualité peuvent être évalués afin d'optimiser les performances et d'améliorer la bande passante du tag. La structure de l'antenne finale est sur la Figure 2.22.

La taille de la géométrie optimisée est de 26mm x 64mm et la bande passante à -10dB est d'environ 28 MHz (Figure 2.25). L'abaque de Smith et le diagramme de rayonnement de cette conception sont montrés dans les Fig. 2.25 et 2.26. Comme on peut le constater, la structure optimisée SO-05 présente une bonne adaptation avec un coefficient de réflexion de -24 dB à 868MHz après ajustement des dimensions géométriques. En outre, le diagramme de rayonnement a une forme omnidirectionnelle avec un gain d'antenne d'environ 1.9 dBi ce qui conduit à une distance de lecture du tag final autour de 10m (Fig. 2.27). À partir de ces

résultats, la structure de l'antenne proposée a une très bonne adaptation de l'impédance et une portée de lecture suffisante pour les applications RFID utilisant la régulation ETSI.

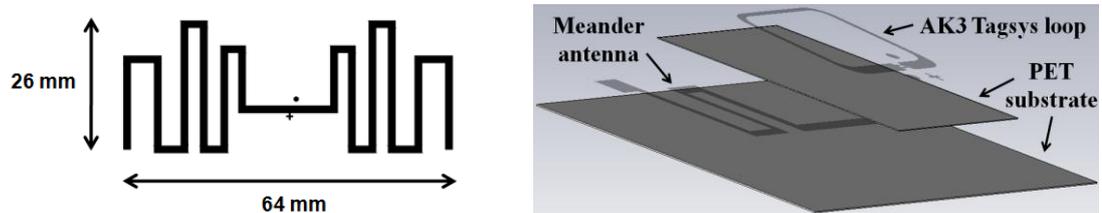


Figure 2.22. Le prototype SO-05 optimisé et la géométrie du tag final

2.5.1.3. La structure de l'antenne HO-02

Après le premier prototype proposé SO-05, nous continuerons à concevoir les autres structures de l'antenne pour les tags RFID basées sur la boucle AK3 Tagsys. Dans cette conception (noté HO-02), une autre approche pour la miniaturisation de l'antenne est proposée en utilisant un "Tip-loading" spiral au lieu de lignes en méandres (Fig. 2.23). Par ailleurs, la forme de la boucle T-match est conçue similairement par rapport à la boucle de Tagsys afin d'augmenter le couplage mutuel entre les deux. Après les études paramétriques, nous constatons que l'échelle de la taille de la boucle sur l'antenne méandre (par rapport aux dimensions de la boucle AK3 Tagsys) qui est notée "scale" dans la Fig. 2.23 joue un rôle très important pour l'adaptation de l'impédance. Donc, l'échelle "scale" de 0.89 donne les meilleures performances du tag pour que nous pouvons obtenir la conception optimisée avec la taille finale de 89mm x 10mm (Figure 2.23).

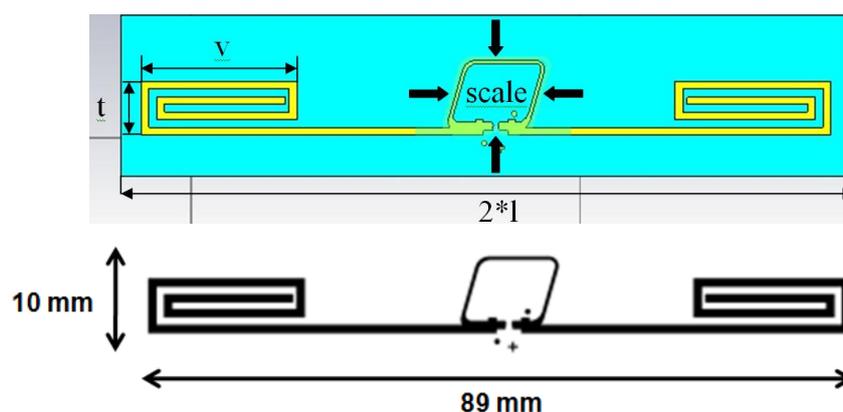


Figure 2.23 - La structure HO-02 optimisée

À partir des études paramétriques, la structure optimisée présente un S_{11} de -20dB à 868MHz (Fig. 2.25) avec une bande passante de 37MHz. De plus, le diagramme de

rayonnement est omni-directionnel avec un gain de 1.8 dBi, ce qui conduit à une distance de lecture théorique de 10m pour la réglementation ETSI (Fig. 2.26 et 2.27).

La longueur du dipôle "l" a des effets sur l'amélioration de l'adaptation de l'impédance en augmentant la résistance de rayonnement. Selon la littérature [2.19-2.22], l'impédance totale peut être utilisée pour optimiser les performances de l'antenne. Les effets du couplage mutuel entre l'antenne et la AK3 Tagsys peuvent contrôler l'efficacité de rayonnement. De plus, l'alignement entre l'antenne et la boucle Tagsys est très important pour ajuster l'impédance du tag final. Ce paramètre a une grande importance pour l'intégration de la fonction « détecteur » aux étiquettes RFID qui seront discutées dans Chapitre 5. La structure proposée HO-02 est également compacte et facile à fabriquer en utilisant les boucles AK3 Tagsys. L'efficacité maximale de rayonnement est aussi bonne (environ 1.8 dBi) avec un diagramme de rayonnement omnidirectionnel mais l'angle à mi-puissance de ce motif est plus petit que pour la structure SO-05 (dans la figure 2.26) qui conduit au meilleur gain de l'antenne du tag.

2.5.1.4. La structure de l'antenne TO-04

Avec la troisième conception (notée TO-04), une boucle rectangulaire a été ajoutée à l'antenne afin d'augmenter le couplage mutuel avec la boucle Tagsys. Pour obtenir un diagramme de rayonnement omnidirectionnel et une efficacité de rayonnement élevée, un dipôle droit est initialement proposé puis transformé en une structure plus compacte grâce à la technique des méandres. En ajoutant un autre "stub" perpendiculaire à la charge de l'antenne, la fréquence de résonance sera contrôlée grâce à l'effet de ce "tip-load" supplémentaire [2.3] [2.14] [2.18] [2.21]. En effet, la capacité équivalente de la charge est transformée en inductance grâce aux brins de longueur quart-d'onde ce qui au final permet l'adaptation de la puce par compensation de sa partie capacitive. D'autre part, ce "stub" vertical produit une augmentation indésirable du coefficient de réflexion mais améliore aussi les performances et la bande passante du tag final.

Par ailleurs, une étude paramétrique de cette structure a été faite dans le but de l'optimiser. La structure optimisée a une taille compacte (14mm x 84mm) et est présentée sur la Fig. 2.24. Il a été remarqué dans le processus de conception qu'à la fréquence de résonance le coefficient de réflexion S_{11} atteint -27dB (Fig. 2.25) en choisissant la position du stub au milieu de la charge de l'antenne. D'après la figure 2.26, on peut noter que le gain de la

structure optimisée est autour de 1.877 dBi et que la structure finale du TO-04 présente une bonne adaptation à la fréquence de résonance souhaitée (environ 868 MHz).

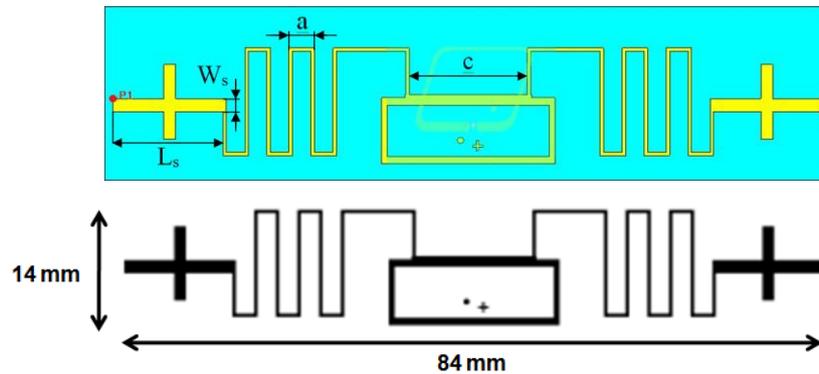


Figure 2.24 -La structure TO-04 optimisée

Afin d'estimer la distance de lecture de tous les tag conçus, nous utilisons la formule de Friis dans espace libre qui est décrite par l'équation (2.10) [2.13]. Ainsi, la distance de lecture du tag TO-04 est d'environ 10m pour la régulation ETSI de RFID à UHF (Fig. 2.27).

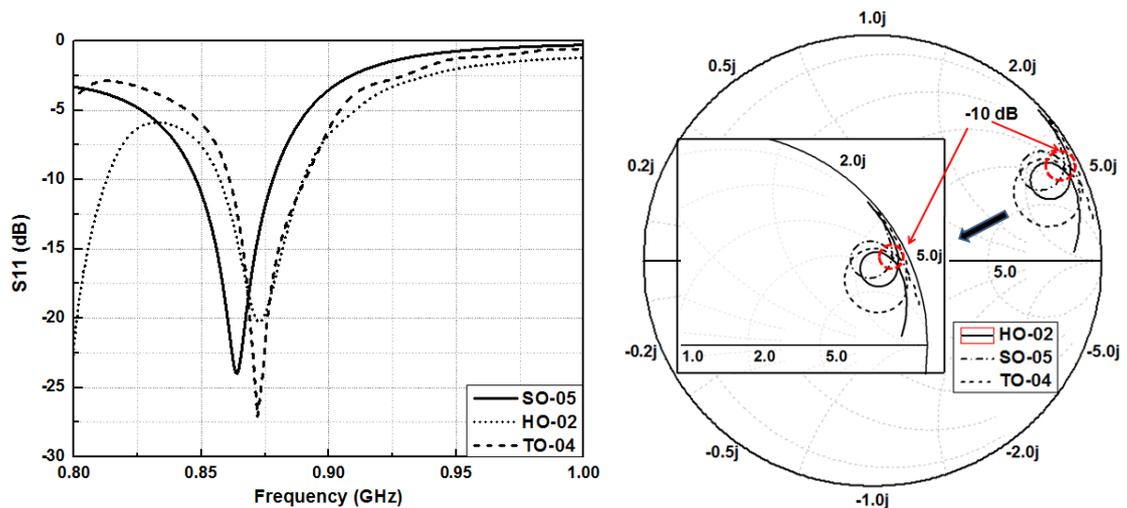


Figure 2.25 - Le coefficient de réflexion des structures proposées

Du diagramme de rayonnement de TO-04 dans le plan H (Fig. 2.26), on peut se noter que l'angle d'ouverture à mi-puissance du tag TO-04 est amélioré par rapport au tag HO-02, mais reste plus faible que celui du SO-05. Selon les figures de 2.25 à 2.27, les 3 structures proposées ont une bonne adaptation d'impédance, une distance de lecture satisfaisante (environ 10m) et un comportement omni-directionnel pour la réglementation ETSI. Ce sont donc des structures adaptées pour une utilisation dans des applications réelles. Par ailleurs, elles présentent des avantages pratiques en terme de compacité et surtout de facilité de

réalisation car il n'y a plus de connexion physique entre la puce et l'antenne qui est généralement un défi technologique, seul un couplage électromagnétique est utilisé.

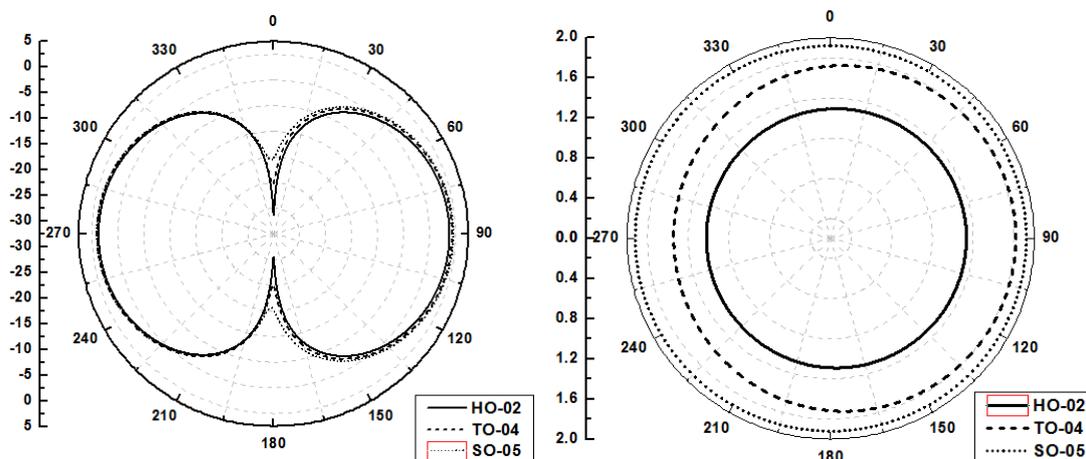


Figure 2.26 - Le diagramme de rayonnement des structures proposées dans les plans *E* et *H*

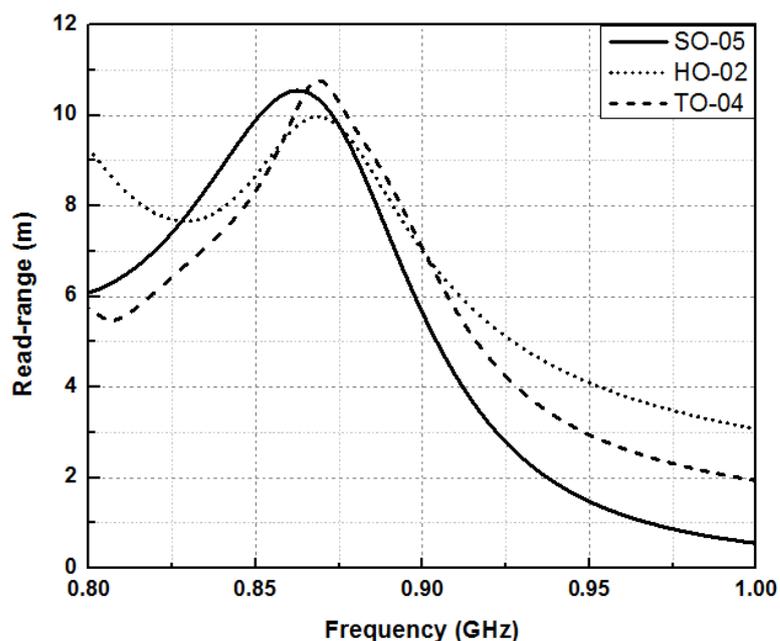


Figure 2.27 - Les portées de lecture théoriques des structures proposées

Les bandes passantes à -10dB des 3 structures sont respectivement 28MHz pour le SO-05, 37MHz pour le HO-02 et 30MHz pour le TO-04. D'après la figure 2.26, les diagrammes de rayonnement des 3 structures proposées sont tous omnidirectionnel ce qui est un avantage pratique pour assurer une communication aisée entre les étiquettes et le lecteur RFID.

2.5.2. Conceptions pour les applications RFID UHF à très large bande (860 MHz - 960 MHz)

Dans cette section, nous présentons deux conceptions très large bande pour les étiquettes RFID UHF passives respectivement avec la boucle AK3 de Tagsys et la puce XRAG2 de ST Microelectronics [2.24]. La conception avec XRAG2 utilise l'approche de conception classique avec une connexion physique directe de la puce tandis que la conception avec la boucle AK3 Tagsys supprime la connexion directe et utilise un couplage électromagnétique, ce qui constitue une simplification majeure lors de la réalisation et améliore l'ajustement entre la simulation et la caractérisation. Ces deux approches donnent lieu à des tags RFID passifs ayant un diagramme de rayonnement omnidirectionnel et une portée de lecture suffisante dans toute la bande RFID UHF dans le monde entier.

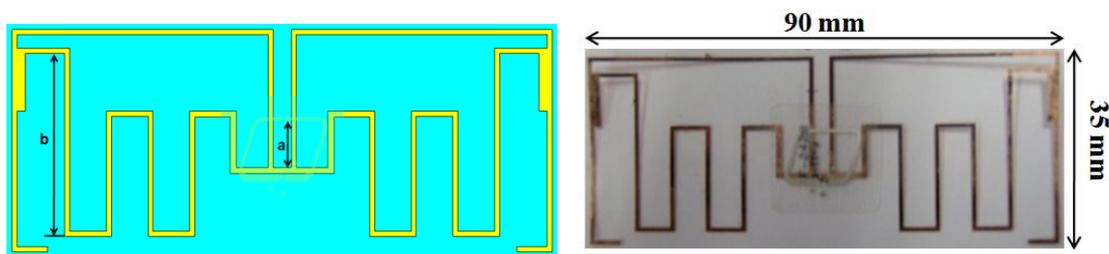


Figure 2.28 - La structure SO-08 optimisée

2.5.2.1. La structure de l'antenne basée sur la boucle AK3 Tagsys

D'après les analyses théoriques des antennes de tags RFID à très large bande [2.1] [2.10] [2.13] [2.25], deux branches de dipôle avec les longueurs similaires seront ajoutés dans la géométrie afin de créer 2 fréquences de résonance très proches comme dans la Fig. 2.28. Les deux branches de l'antenne sont reliées aux extrémités afin de créer un effet de réduction sur la résistance de rayonnement de l'antenne finale. Le but de cette technique est de réduire le facteur de qualité et d'augmenter ainsi la bande passante de l'antenne. Après des études paramétriques, nous avons obtenu une géométrie d'antenne optimisée de taille compacte (35mm x 90mm) comme le montre la Fig. 2.28. En outre, la bande passante à -10dB de cette conception est d'environ 147 MHz, ce qui est compatible avec la totalité de la bande UHF dans le monde entier pour la RFID (Fig. 2.32).

Après les études paramétriques, nous pouvons conclure que la distance verticale entre l'antenne et le méandre AK3 Tagsys joue un rôle très important sur la bande passante obtenue. En d'autres termes, la position du secteur d'intersection a un effet significatif sur le

facteur de qualité de l'antenne. De la littérature [2.17-2.20], le couplage mutuel entre l'antenne et le méandre AK3 Tagsys est toujours très important dans la maximisation de la performance du tag final. D'autre part, l'alignement vertical entre l'antenne et la boucle AK3 Tagsys est très proche de la connexion avec la puce, ce qui conduit à plus 'effet sur l'adaptation de l'impédance. Malheureusement, le calcul du couplage mutuel entre l'antenne et la boucle AK Tagsys est très difficile. Cependant, les études paramétriques ci-dessus peuvent nous fournir une méthode de réglage pour améliorer la performance de la conception proposée.

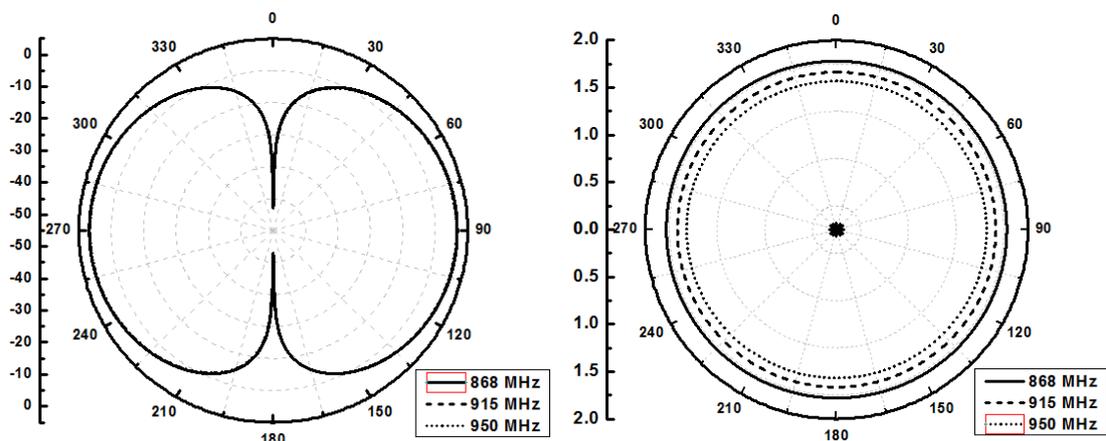


Figure 2.29 - Le diagramme de rayonnement de la structure SO-08 sur les plans de E et H.

Les gains des antennes sont respectivement 1.78 dBi, 1.664 dBi et 1.567 dBi à 868MHz, 915MHz et 950MHz (Fig. 2.29) avec un diagramme de rayonnement omnidirectionnel. Par ailleurs, une bonne adaptation de l'impédance peut être observée entre 825 MHz et 972 MHz, ce qui permet une distance de lecture théorique toujours supérieure à 8m sur toute la bande UHF pour la RFID passive dans le monde entier (Fig. 2.32).

2.5.2.2. La structure de l'antenne basée sur la connexion directe avec la puce

La deuxième conception proposée (notée HO-01) utilise la connexion directe avec la puce XRAG2 ayant une impédance d'entrée de $10-245j$ Ohms à 915 MHz [2.24] comme indiqué sur la Figure 2.30. Dans le processus de connexion avec l'antenne, une capacité parasite apparaît et doit être prise en compte dans l'impédance finale de la puce [2.26]. Par conséquent, la mesure expérimentale de l'impédance de la puce doit être faite avant de démarrer le processus de conception de l'antenne du tag. À l'aide de la calibration de Short-Open-Load [2.27] et un balun de transformation, connecté au l'Analyseur de Réseau Vectoriel

ZVB8 avec la gamme de fréquence de 300kHz à 8GHz [2.28], on peut déterminer l'impédance de la puce qui est de 23-180j Ohms pour notre conception comme dans les figures 2.30 et 2.31.

La technique de calibrage la plus courante est la SOL (short-open-load), dans laquelle un court-circuit, un circuit ouvert et une charge adaptée sont successivement connectés à l'un des ports et puis mesurés par l'Analyseur de Réseau Vectoriel pour réaliser le calibrage du coefficient de réflexion. La Figure 2.30 présente les 3 standards utilisés dans cette étude et la figure 2.31 montre la procédure à suivre sur l'Analyseur de Réseau Vectoriel. Les standards utilise une charge de $49.9\Omega \pm 1\%$ résistance, un court-circuit sous forme d'une ligne conductrice, tandis que le standard ouvert a été laissé vide [2.27].

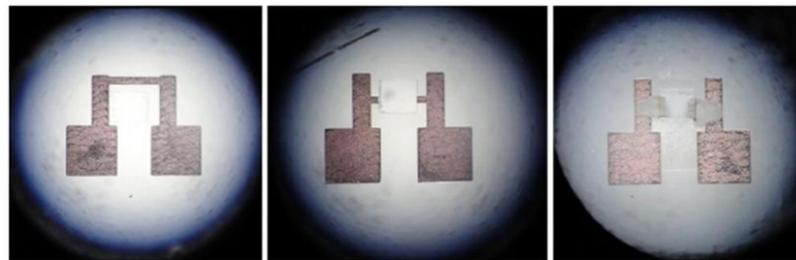


Figure 2.30 - Les standards de calibration "Short-Open-Load" pour la mesure de l'impédance de la puce

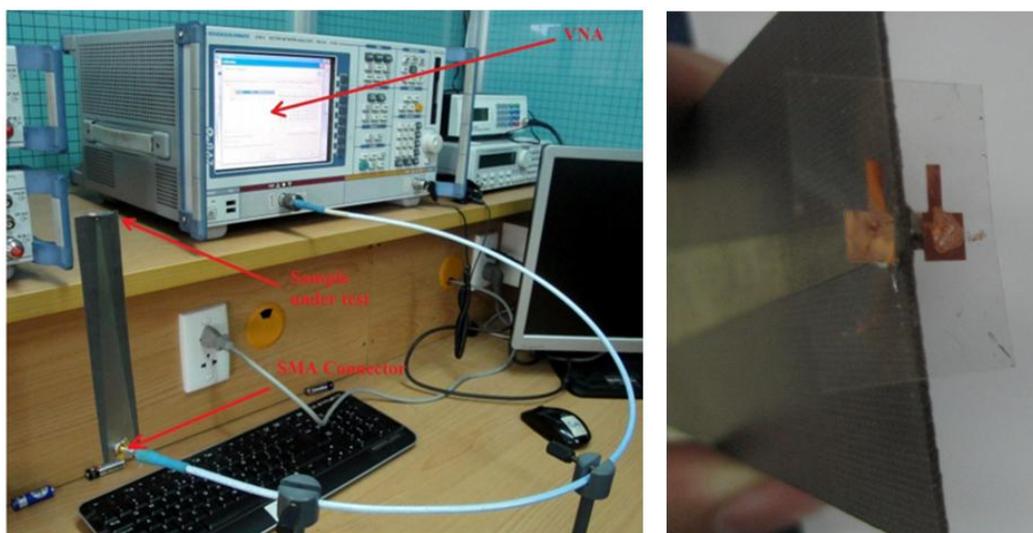


Figure 2.31 - La mesure de l'impédance de la puce avec l'Analyseur de Réseau Vectoriel ZVB8

Afin de réduire la taille de l'antenne, une charge et la technique du T-Match sont utilisées pour obtenir l'adaptation de l'impédance entre la puce et l'antenne (Fig. 2.32) comme inspiré de la littérature [2.13]. L'amélioration de la bande passante a été fondée sur

l'idée de la superposition de deux fréquences de résonance à partir de deux longueurs dipolaires différentes. Ainsi, quatre "patch" ont été ajoutés à la structure par l'approche "tip-load" afin d'augmenter la capacité de l'antenne. Après des études paramétriques sur l'impédance de l'antenne et une analyse des structures d'antennes large bande UHF pour les tags RFID passifs [2.21-2.23] [2.29-2.31], on peut conclure que le facteur "a", qui correspond à la longueur du dipôle, est le facteur la plus important pour contrôler la bande passante de l'antenne.

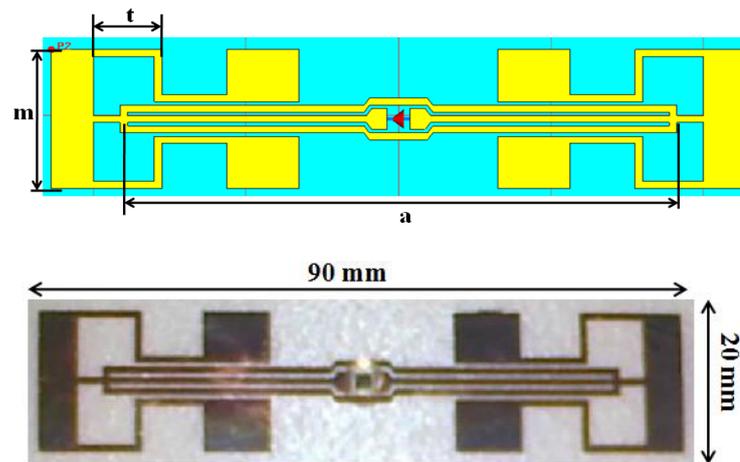


Figure 2.32 - La structure HO-01 optimisée

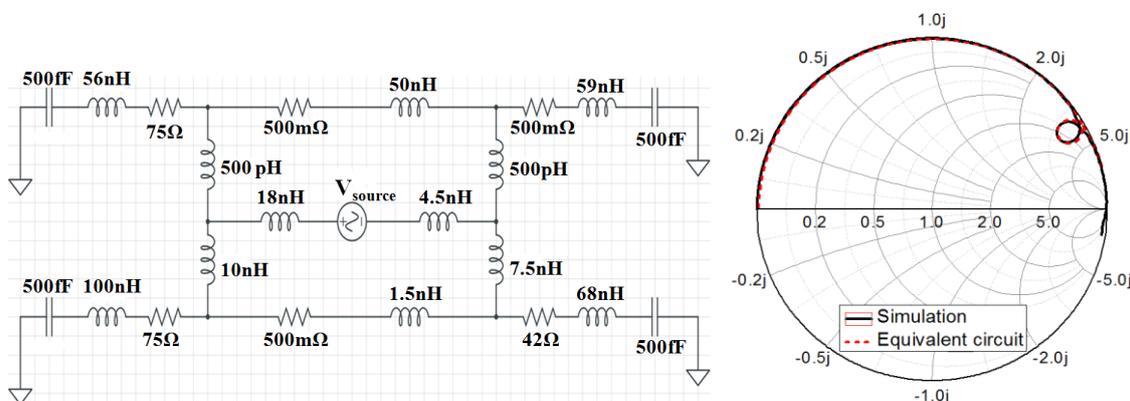


Figure 2.33 - Le circuit équivalent de la structure HO-01 par rapport à la simulation FDTD

Des analyses ci-dessus, nous pouvons nous concentrer sur une méthode d'ajustement des dimensions de l'antenne pour atteindre l'adaptation d'impédance de manière plus rapide. Cependant, il était assez difficile de faire correspondre les deux parties réelles et imaginaires de l'impédance en même temps. À partir des travaux [2.25, 2.29-2.31], nous avons proposé un circuit équivalent de cette structure afin de faciliter l'adaptation de l'impédance (Fig. 2.33). L'impédance du circuit équivalent qui est réalisé sur le logiciel ADS de Agilent [2.32] sera

comparée aux résultats de la simulation sur le logiciel CST Microwave Studio [2.33] afin que nous puissions conclure au sujet de la validité de ce modèle. Dans la figure 2.33, l'abaque de Smith du circuit équivalent et la simulation par CST Microwave Studio ont un bon accord, ce qui prouve l'applicabilité de ce modèle pour cette structure d'antenne. Du circuit équivalent, nous pouvons définir la relation entre les éléments dans ce modèle avec les études paramétriques des dimensions considérées sur l'impédance de l'antenne.

De l'analyse ci-dessus et des études paramétriques, nous pouvons obtenir l'impédance d'antenne désirée ($23 + j180$ ohms) pour adapter à l'impédance complexe de la puce dans toute la bande RFID UHF. Au final, nous avons obtenu la structure optimisée HO-01 avec une taille totale de $90 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ (Fig. 2.32).

2.5.2.3. Discussion sur les 2 différentes approches

De la simulation et des études paramétriques, nous pouvons obtenir les structures optimisées pour les applications RFID UHF à large bande (notées SO-08 et HO-01 ci-dessus). La bande passante théorique et la portée de lecture de chaque conception sont décrites respectivement dans la figure 2.34. Les deux conceptions présentent des bandes passantes et des portées de lecture qui sont compatibles avec les applications réelles de la RFID UHF dans le monde entier (de 860MHz à 960MHz). Les conceptions optimisées, qui sont fondées sur les structures dipolaires à méandres modifiés, ont un diagramme de rayonnement omnidirectionnel.

Les deux conceptions ont une taille compacte mais la structure SO-08 élimine la connexion directe avec la puce tandis que la conception HO-01 offre plus d'avantages en terme d'efficacité de rayonnement en raison de l'utilisation de moins de couches de substrats diélectriques pour la structure finale. En effet, la boucle AK3 Tagsys est une antenne à boucle primaire, qui a déjà été connectée à la puce RFID et fabriquée sur un substrat en polyéthylène téréphtalate [2.34]. Quand nous collons le AK3 Tagsys sur une autre antenne pour compléter le tag final, cela signifie que nous aurons une couche de substrat supplémentaire, ce qui diminue l'efficacité de rayonnement. En outre, le couplage mutuel entre la boucle AK3 Tagsys et l'antenne secondaire doit être étudié attentivement afin d'obtenir la meilleure efficacité de rayonnement et de garder des performances acceptables pour les étiquettes RFID. Par ailleurs, les conceptions avec la boucle AK3 Tagsys dans ce travail ont contribué aux améliorations des performances pour les applications réelles de AK3 Tagsys avec le

read-range de 1-3 metre [2.35]. D'un autre coté, la connexion directe avec la puce nécessite un processus de fabrication plus coûteux mais également l'étalonnage entre la simulation et la mesure afin de maintenir les performances pour les applications RFID.

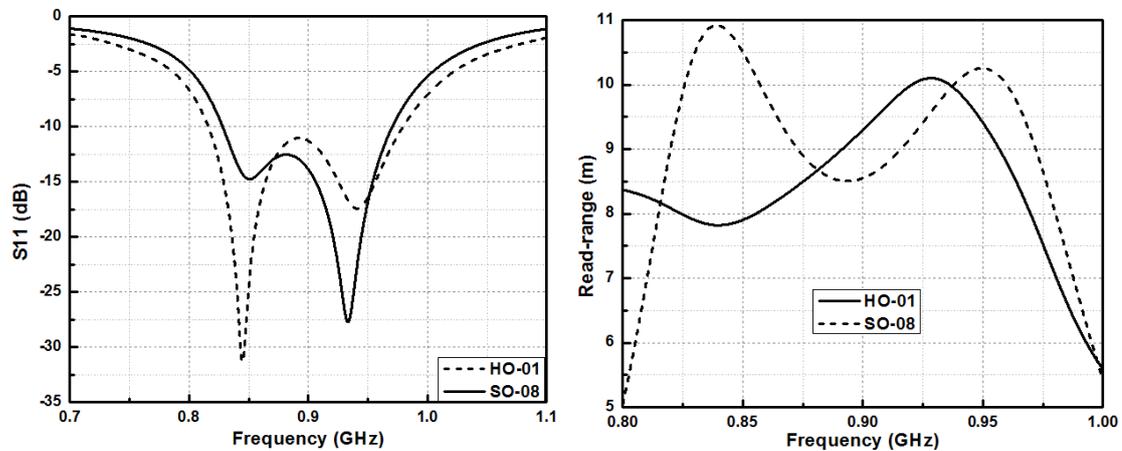


Figure 2.34 - Les coefficients de réflexion et les read-range théoriques des conception HO-01 et SO-08

2.6. Conclusion

Après un aperçu assez détaillé sur la technologie RFID dans le chapitre 1, nous nous sommes focalisé sur les méthodes de conception d'antennes pour les tags RFID UHF passifs. Avec la méthodologie et les techniques de conception de la littérature, nous utilisons ces approches pour concevoir des tags RFID passifs pour les applications dans la gamme UHF. De plus, nous avons identifié quelques structures de type méandres pour valider nos approches de conception. Dans ce chapitre 2, nous présentons les conceptions du tag RFID pour les applications aussi bien à bande étroite (pour la régulation ETSI à 868MHz) qu'à bande large (860MHz - 960MHz). Ainsi plusieurs conceptions utilisant le AK3 de Tagsys ont été obtenues et permettent de simplifier la réalisation des tags en évitant la connexion physique entre la puce RFID et l'antenne du tag. De la simulation et des études paramétriques, nous obtenons les structures optimisées pour les applications RFID UHF à large bande (notées SO-08 et HO-01 ci-dessus). Les avantages et désavantages de chaque approche des conception sont aussi discutés dans ce chapitre. Ceci nous permettra dans la dernière phase d'optimiser nos tags en vue de les utiliser comme capteurs.

Bibliographie – Chapitre 2

- [2.1]. Constantine A. Balanis, “Antenna theory: Analysis and Design”, 2nd edition, John Wiley & Sons, 1996
- [2.2]. D. M. Pozar, "Microwave Engineering", John Wiley & Sons, second edition, 1998
- [2.3]. Daniel Dobkin, “RF in RFID: Passive RFID UHF in Practice”, Newnes, 2008.
- [2.4]. Klaus Finkenzeller, “RFID Handbook: Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards and Identification”, 2nd edition, John Wiley & Sons, 2003
- [2.5]. P. V. Nikitin and K. V. S. Rao, "Theory and measurement of backscattering from RFID tags", IEEE Antennas and Propagation Magazine, Vol. 48, No. 6, December 2006, pp. 212-218.
- [2.6]. Richard C. Johnson, “Antenna Engineering Handbook”, 3rd edition, McGraw – Hill, 1992
- [2.7]. Yongming Zhou (2010), “*A Novel Slot Antenna for UHF RFID Tag*”, Wireless, Mobile and Multimedia Networks (ICWMNN 2010), IET 3rd International Conference , Sept.2010
- [2.8]. Jingmin Yan (2010), “*A Novel Patch Antenna for UHF band RFID tag*”, Wireless and Optical Communications Networks (WOCN), Seventh International Conference On 2010
- [2.9]. Iulian Rosu, “*PIFA-Planar Inverted F Antenna*”, YO3DAC/VA3IUL, <http://www.qsl.net/va3iul>
- [2.10]. K. V. Seshagiri Rao, Pavel V. Nikitin, Sander F. Lam (2005), "*Antenna Design for UHF RFID Tags: A Review and a Practical Application*", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol.53, No.12, December
- [2.11]. Harvey Lehpamer, “Design Principles”, Artech House, 2008
- [2.12]. M. Fairley, "RFID Smart Labels – A 'How to' Guide to Manufacturing and Performance for the Label Converter", second edition, Labels and Labeling, 2007
- [2.13]. G. Marocco, “The art of UHF RFID antenna design: impedance matching and size-reduction techniques”, IEEE Antennas and Propagation Magazine, Vol. 50, No 1, Jan 2008

- [2.14]. N. Dat Son, *et al.*, "Novel design of RFID UHF passive tag for wideband applications by direct and contactless chip connection," in *RFID-Technologies and Applications (RFID-TA), 2012 IEEE International Conference on*, 2012, pp. 131-136
- [2.15]. Psion Teklogix[®], RFID reader products brochure, Available from: http://www.pSION.com/documents/com/specSheets/RFID_brochure010912_EN_A4.pdf
- [2.16]. <http://www.tagsysrfid.com/Products-Services/RFID-Tags/AK>
- [2.17]. Amit Rawal, Nemaï C. Karmakar, "A Novel L-Shaped RFID Tag Antenna", Proceedings of the 10th European Conference on Wireless Technology, 2007, p. 245-248.
- [2.18]. Youngbaek Choi, Uisheon Kim, Jaehoon Choi, "Design of a Dipole Tag Antenna Enclosed by a Short-Stub for UHF RFID Application", IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, 2008, pp. 1-4
- [2.19]. H. W. Son and C. S. Pyo, "Design of RFID tag antennas using an inductively coupled feed," IEE Electronics Letters, vol. 41, no. 18, pp. 994–996, Sept. 2005
- [2.20]. C. C. Chang and Y. C. Lo, "Broadband RFID tag antenna with capacitively coupled structure," Electronics Letters, vol. 42, no. 23, pp. 1322–1323, Nov. 2006
- [2.21]. J. C. Bolomey and F. Gardiol, "Optimization of passive RFID tag antennas," in Antennas and Propagation Society International Symposium, San Diego, CA, USA, Jul. 2008
- [2.22]. Naaser A. Mohammed, Kenneth R. Demarest, and Daniel D. Deavours, "Analysis and Synthesis of UHF RFID Antennas using the Embedded T-match", 2010 IEEE Conference on RFID, pp. 230-236, April 2010, USA
- [2.23]. Daniel D. Deavours, "Improving the Near-Metal Performance of UHF RFID Tags", 2010 IEEE Conference on RFID, pp. 187-194, April 2010, USA
- [2.24]. STMicroelectronics, "XRAG2 – 432-bit UHF, EPC global Class 1 Gen 2 and ISO 18000-6C, Contactless Memory Chip 96 with User Memory", Datasheet, April 2008
- [2.25]. T. G. Tang, Q. M. Tieng, and M. W. Gunn, "Equivalent circuit of a dipole antenna using frequency-independent lumped elements," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 41, no. 1, pp. 100-103, Jan. 1993
- [2.26]. P. V. Nikitin and K. V. S. Rao, "Performance of RFID Tags with Multiple RF Ports", IEEE Antennas and Propagation Symposium, Honolulu, HI, June 2007

- [2.27]. Anthony Ghiotto (2008), “Conception d’Antennes de Tags RFID UHF, Application à la Réalisation par Jet de Matière”, Thèse de Doctorat, L’Institut Polytechnique de Grenoble
- [2.28]. Quick Start Guide of Vector Network Analyzer R&S® ZVB4/ZVB8/ZVB14/ZVB20 version 2009
- [2.29]. P.V. Nikitin, K.V. Seshagiri Rao, S.F. Lam, V. Pillai, R. Martinez, and H. Heinrich, “Power reflection coefficient analysis for complex impedances in RFID Tag design”, IEEE Trans Microwave Theory Tech Vol. 53, No. 9, pp. 2721–2725, 2005
- [2.30]. T. C. Chau, B. A. Welt, and W. R. Eisentadt, “Analysis and characterization of transponder antenna for radio frequency identification (RFID) systems”, Journal of Packaging Technology and Science, vol. 19, pp. 33–44, 2006
- [2.31]. Daniel D. Deavours, “Analysis and Design of Wideband Passive UHF RFID Tags Using a Circuit Model”, 2009 IEEE Conference on RFID, pp. 283 – 290, April 2009, USA
- [2.32]. <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5988-3326EN.pdf>
- [2.33]. <http://www.cst.com/Content/Products/MWS/Overview.aspx>
- [2.34]. V. Svorcik, O. Ekrt, V. Rybka, J. Liptak and V. Hnatowicz, “Permittivity of polyethylene and polyethyleneterephthalate”, Journal of Materials Science Letters, Vol 19, Number 20, pp. 1843-1845, DOI: 10.1023/A:1006715028026
- [2.35]. <http://www.directindustry.com/prod/tagsys/textile-rfid-tags-35033-211447.html>

Chapitre 3

Les processus de fabrication de tag RFID bas coût au Laboratoire de Nanotechnologie (Vietnam)

Traditionnellement, les antennes planaires RF sont réalisées sur des substrats dont les propriétés diélectriques sont très bien connues (FR4, Duroïd, Alumine, Quartz...). En général, le conducteur (cuivre) est pré-déposé et ensuite gravé pour donner la forme de l'antenne avec une bonne précision de la couche métallique. Le travail dans le contexte de ce mémoire est différent dans la mesure où la technologie RFID est fortement contrainte en termes de coût de l'étiquette. Cela implique un choix de matériaux bas coût, aussi bien au niveau de la matière que de la technologie de réalisation. Il en va de même pour les parties conductrices où nous serons amenés à utiliser des procédés et matériaux plus classiques comme la lithographie sur le film flexible ou l'impression de jet d'encre combinées avec des méthodes de dépôt bas coût ou des encres conductrices.

Les éléments rapportés dans ce chapitre permettent de mieux comprendre le contexte technologique dans lequel est réalisée cette thèse. Les procédés et résultats présentés sont le fruit des développements réalisés au Laboratoire de Nanotechnologie (LNT) de l'Université Nationale du Vietnam – Ho-Chi-Minh ville qui seront adaptés dans les prochaines étapes de ce travail afin de réaliser pratiquement les étiquettes capteurs et de les tester en situation réelle très proche du contexte applicatif au Vietnam.

Table des matières

3.1. LE PROCEDE « LITHOGRAPHIE – PULVERISATION – LIFT OFF – DEPOT ELECTROLYTIQUE ».....	72
3.2. RESULTATS DE FABRICATION.....	78
3.3. LA TECHNOLOGIE DE L'IMPRESSION JET D'ENCRE COMBINEE AVEC LE DEPOT ELECTROLYTIQUE.....	80
3.3.1. ÉTAT DE L'ART DE LA TECHNOLOGIE JET D'ENCRE	80
3.3.2. SYNTHÈSE D'UNE SOLUTION DE NANOPARTICULES DE CUIVRE	81
3.3.3. FABRICATION DE L'ENCRE CONDUCTRICE A PARTIR DES NANOPARTICULES DE CUIVRE	82
3.4. IMPRESSION JET D'ENCRE POUR LA FABRICATION DE L'ANTENNE RADIOFREQUENCE	83
3.5. PROCEDE D'IMPRESSION DE L'ANTENNE.....	85
3.6. CONCLUSION	88
BIBLIOGRAPHIES - CHAPITRE 3.....	89

Liste des figures et Tableaux

FIGURE 3.1 - LE PROCESSUS DE FABRICATION DE L'ANTENNE PAR LIFT-OFF	72
FIGURE 3.2 – EQUIPEMENT DE GRAVURE PAR IONS REACTIFS PLASMALAB80 +	73
FIGURE 3.3 – LE DISPOSITIF DE SPINNER SUSS MICROTEC/ DELATA 6RC ET L'ECHANTILLON APRES LA COUVERTURE DE LOR/PHOTOSENSIBLE	74
FIGURE 3.4 – EQUIPEMENT DE PHOTOLITHOGRAPHIE MJB-4 (SUSS MICROTEC).....	75
FIGURE 3.5 – MASQUE EN CHAMP NOIR (DARK-FIELD) POUR RESINE PHOTOSENSIBLE POSITIVE (A GAUCHE) ET EN CHAMP BLANC (LIGHT-FIELD) POUR LA NEGATIVE (A DROITE).....	75
FIGURE 3.6 – EQUIPEMENT DE PULVERISATION CATHODIQUE LEYBOLD UNIVEX 350 (A GAUCHE) ET INTERIEUR DE LA CHAMBRE DE PULVERISATION (A DROITE).....	76
FIGURE 3.7 – ECHANTILLON APRES LA PULVERISATION CATHODIQUE DE CUIVRE (A GAUCHE) ET EN COURS DE LIFT-OFF (A DROITE)	76
FIGURE 3.8 – BANC TECHNIC POUR LE DEPOT ELECTROLYTIQUE DE L'ANTENNE	77
TABLEAU 3.1 – COMPOSITION DE L'ELECTROLYTE ET DES ADDITIFS COMMERCIAUX	78
FIGURE 3.9 – ECHANTILLON PULVERISE POUR L'ETUDE DE LA QUALITE DU DEPOT METALLIQUE	79
FIGURE 3.10 – MESURE DE LA RESISTIVITE DE LA COUCHE METALLIQUE PAR SONDE 4 POINTES79	
FIGURE 3.11 – PROCEDE JET D'ENCRE (A DROITE) PAR RAPPORT AU PROCEDE DE FABRICATION PAR TECHNOLOGIE MICROELECTRONIQUE STANDARD (A GAUCHE).....	80
FIGURE 3.12 - SYNTHESE DE L'ENCRE CONDUCTRICE DE CUIVRE PAR LA REDUCTION DE L'ACIDE ASCORBIQUE.....	82
FIGURE 3.13 – DIFFERENTES ENCREES SELON LA CONCENTRATION EN POIDS DE « NANO-CUIVRE »	82
FIGURE 3.14 – (A) IMPRIMANTE POUR MATERIAUX DIMATIX (B) CARTOUCHE D'IMPRESSION	83
(C) ELEMENT PIEZO-ELECTRIQUE (D) SORTIE DU CANAL.....	83
FIGURE 3.15 - L'ENCRE EN ATTENTE	84
FIGURE 3.16 - L'ENCRE EST INJECTEE DEPUIS LE RESERVOIR.....	84
FIGURE 3.17 - L'ENCRE EST PUSSEE HORS DU CANAL	85
FIGURE 3.18 - LE TUYAU RETIENT A L'ETAT INITIAL.....	85
FIGURE 3.19 - TETE D'IMPRESSION ET CARTOUCHE	86
FIGURE 3.20 – LIGNES IMPRIMEES A DIFFERENTES RESOLUTIONS	86
FIGURE 3.21 – LARGEUR DES LIGNES IMPRIMEES ET DISTANCE ENTRE LES GOUTTELETTES D'ENCRE EN FONCTION DE LA RESOLUTION	87

3.1. Le procédé « Lithographie – Pulvérisation – Lift off – Dépôt électrolytique »

Cette méthode utilise un liquide spécifique (communément connu sous le nom commercial LOR – Lift Off Resist) pour assurer le décollage de la couche métallique après dépôt par pulvérisation cathodique [3.1-3.2]. Ce type de polymère est inerte, n'est pas sensible à la lumière UV et facilement corrodé dans les solutions de développement normales. L'ingrédient principal de la solution LOR est le Poly Diméthyl Glutar Imide (PMGI) qui est souvent utilisé en combinaison avec d'autres types de résine photosensible positive pour améliorer l'efficacité de décollage. La solution LOR peut être appliquée pour différentes épaisseurs et vitesses de corrosion, conformément à diverses applications telles que: la fabrication des périphériques sans fil, laser et détecteur semi-conducteurs, MEMS...

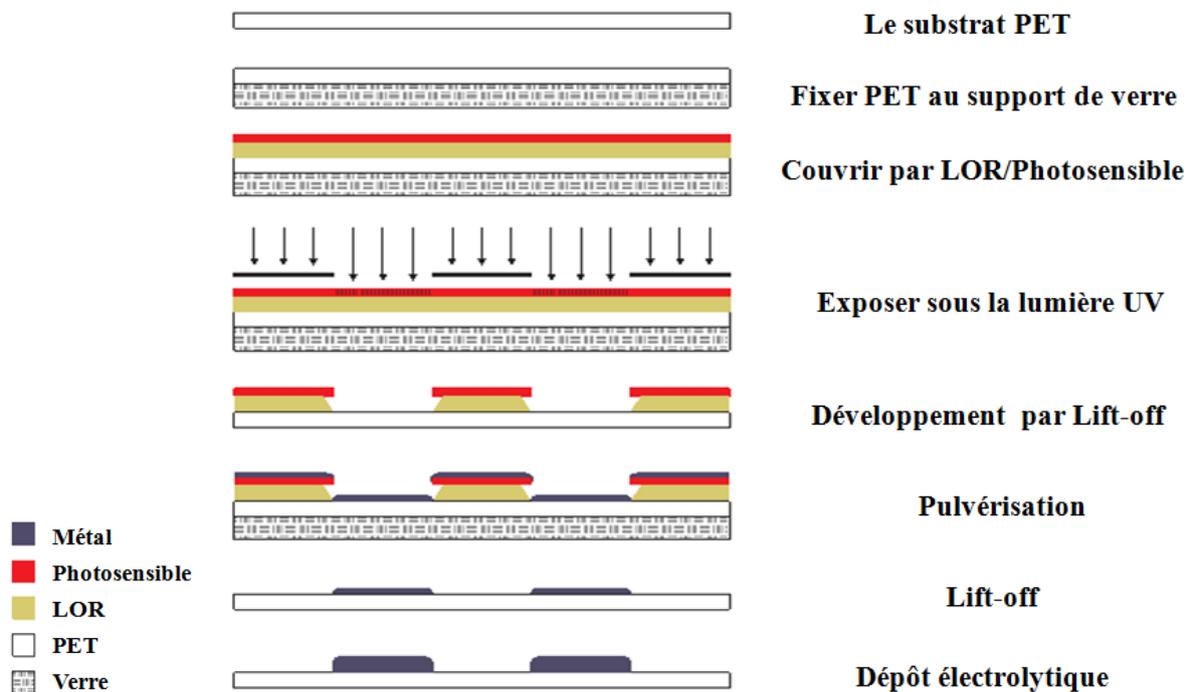


Figure 3.1 - Le processus de fabrication de l'antenne par lift-off [3.1-3.2]

Tout d'abord, le substrat est recouvert d'une couche de LOR cuite à haute température, puis une résine photosensible est déposée et recuite pour évaporer le solvant [3.3-3.4]. L'échantillon est ensuite exposé à la lumière ultraviolette dans l'équipement de photolithographie puis soumis à une solution de développement. La solution de développement ne dissout pas seulement la couche de résine photosensible qui a été exposée, mais aussi corrode la couche de LOR sous-jacente créant une surgravure. Cette zone limitera

le dépôt de matière sur les côtés du profil développé dans la résine et facilitera ainsi le processus de lift-off. Le processus de fabrication de l'antenne est décrit dans la figure 3.1.

Étape 1: Nettoyage du substrat Polyéthylène téréphtalate (PET)

Par nature, le PET disponible dans le commerce présente une contamination, notamment organique, qui doit être traitée afin d'éliminer toutes les impuretés avant son utilisation pour fabriquer l'antenne. Après la découpe du substrat en carrés de 4 pouces, le substrat PET est nettoyé selon le processus de base suivant: nettoyage à l'acétone pour éliminer les impuretés organiques, puis à l'éthanol pour éliminer l'acétone, et enfin rincé à l'eau désionisée et séché par soufflage d'azote.



Figure 3.2 – Equipement de gravure par ions réactifs Plasmalab80 +

Étape 2: Traitement de la surface du substrat par plasma oxygène

Un plasma d'oxygène augmente le caractère hydrophile de la surface du polymère en créant des liaisons pendantes en surface. Ces liaisons permettent le renforcement de l'adhérence entre la couche de revêtement et le substrat PET. En même temps, il contribue aussi à la réduction de la rugosité du substrat PET [3.3]. Ce processus est exécuté dans l'équipement de gravure par ions réactifs Plasmalab80 + (Oxford Instruments) (Figure 3.2).

Étape 3: Photolithographie

Le procédé de photolithographie doit être réalisé rapidement après le traitement de surface du film PET par plasma oxygène, pour éviter sa contamination par l'environnement. Après le traitement de surface, le substrat PET est fixé sur une plaque de verre de la même taille. Cette plaque de verre a été aussi préalablement nettoyée selon la même séquence que le substrat PET. Ensuite, une couche de résine LOR (LOR 20B ou 5A LOR, Microchem) [3.4] est déposée sur le film PET à l'aide de la centrifugeuse de dépôt.



Figure 3.3 – Le dispositif de spinner SUSS Microtec/ DELATA 6RC et l'échantillon après la couverture de LOR/Photosensible

L'échantillon recouvert de LOR est stabilisé par séchage sur une plaque chauffante pendant 5 à 10 minutes à une température de 150°C. Avec cette température de séchage, la vitesse de corrosion dans la solution de développement est de 333Å/s selon le fournisseur. La solution photosensible (de type positive ou négative) est ensuite déposée sur l'échantillon, également au moyen de la centrifugeuse de dépôt. Le substrat couvert de la double couche résine photosensible/LOR est à nouveau séché sur plaque chauffante à une température et pendant un temps adaptés à chaque type de résine photosensible. Le masque d'exposition a une taille de 5 inches × 5 inches. C'est un masque faible coût, réalisé par impression offset sur film polyester. Pour permettre l'épaississement de la couche métallique de l'antenne à l'aide d'un dépôt électrolytique, il est nécessaire de prévoir un chemin électrique permettant d'apporter le courant à l'ensemble des antennes présentes sur l'échantillon. Le procédé d'exposition est réalisé sur l'équipement Mask Aligner MJB-4 de Suss Microtec (Figure 3.4). Pendant l'exposition, le masque est placé en contact direct avec la couche de résine photosensible. La dose d'ultraviolets est réglée par le temps d'exposition et la durée est dépendante du type de résine photosensible utilisé.

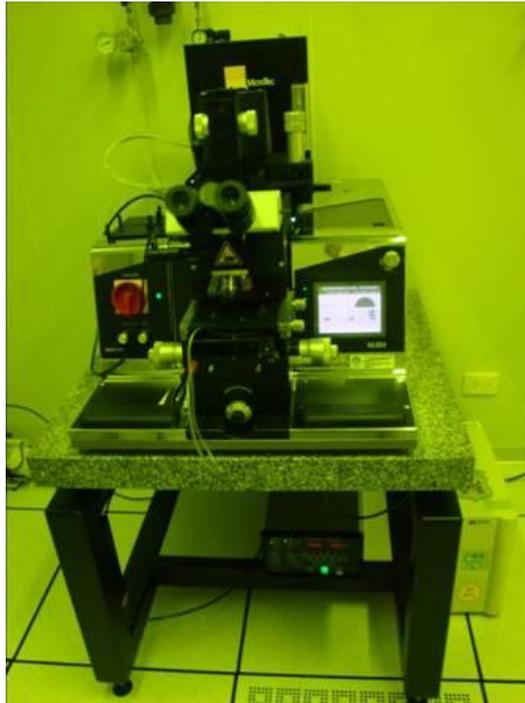


Figure 3.4 – Equipement de photolithographie MJB-4 (Suss Microtec)

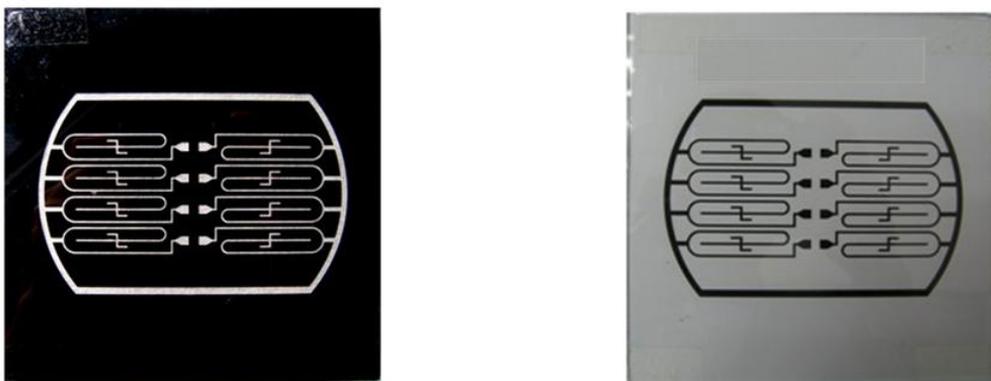


Figure 3.5 – Masque en champ noir (dark-field) pour résine photosensible positive (à gauche) et en champ blanc (light-field) pour la négative (à droite)

Une cuisson après exposition à 120°C est ensuite effectuée pour assurer la stabilisation finale de la résine et faciliter le processus de développement. Les échantillons sont alors immergés dans la solution de développement appropriée pour un temps de trempage de quelques minutes dépendant de l'épaisseur de la couche photosensible et des paramètres de stabilisation avant exposition. Puis, l'échantillon est lavé à l'eau désionisée et remis sur la centrifugeuse pour séchage complet.

Étape 4: Pulvérisation cathodique pour créer la couche métallique de l'antenne

Figure 3.6 – Equipement de pulvérisation cathodique Leybold Univex 350 (à gauche) et intérieur de la chambre de pulvérisation (à droite)



Figure 3.7 – Echantillon après la pulvérisation cathodique de cuivre (à gauche) et en cours de lift-off (à droite)

Après que le motif de l'antenne a été transféré sur le substrat PET par photolithographie, une pulvérisation cathodique est réalisée pour former la couche métallique de l'antenne. La pulvérisation cathodique est un procédé maîtrisé, étudié et continûment développé depuis le début des années 1970. L'échantillon est placé sur un support rotatif dans la chambre de l'équipement de pulvérisation cathodique. La chambre de pulvérisation est alors évacuée pour atteindre une pression inférieure de 3.10^{-5} mbar afin d'éliminer au maximum la contamination par l'oxygène [3.5]. Un plasma d'argon est allumé dans la chambre au voisinage de la cible métallique à pulvériser. La puissance fournie au plasma est

graduellement augmentée jusqu'à la puissance de pulvérisation souhaitée. Cette étape est réalisée lorsque l'obturateur est encore fermé pour nettoyer la surface de la cible avant que la pulvérisation commence vers l'échantillon. Après la pulvérisation, le plasma est stoppé et la chambre ramenée à la pression atmosphérique afin de sortir l'échantillon.

Étape 5: Lift-off

Une fois sorti de la chambre de pulvérisation, l'échantillon est trempé dans une solution de N-Méthyl Pyrrolidone (NMP) afin de dissoudre la couche de LOR/Photosensible. Si nécessaire le bain de NMP peut être placé dans sous ultrasons pour assurer décollage plus rapide de la résine. Enfin, l'échantillon est lavé avec de l'eau désionisée et séché.

Étape 6: Dépôt électrolytique

Un dépôt électrolytique est nécessaire pour épaissir la couche métallique de l'antenne jusqu'à atteindre l'épaisseur désirée. Le bac de dépôt électrolytique a une capacité de 9,5 litres et comprend une alimentation électrique, un thermostat et un brassage par recirculation mécanique. Une électrode est suspendue par un crochet d'un côté et l'échantillon est placé dans le bain en vis-à-vis à une distance d'environ 10 cm.



Figure 3.8 – Banc Technic pour le dépôt électrolytique de l'antenne

Le tableau 3.1 ci-dessous liste la composition des électrolytes étudiés. Les concentrations des constituants principaux sont choisies afin d'obtenir un fort rapport d'aspect des structures déposées [3.5]. Les concentrations des additifs commerciaux, éléments critiques pour obtenir un dépôt de qualité, ont été modifiées pour déterminer le taux approprié.

Tableau 3.1 – Composition de l'électrolyte et des additifs commerciaux

Électrolytes	CuSO ₄ (g/L)	H ₂ SO ₄ (mL/L)	HCl (uL/L)	Surtec A (mL/L)	Surtec B (mL/L)	Surtec C (mL/L)
S1	45	170	110	0.6	0.6	8
S2	45	170	110	0.6	0.6	6
S3	45	170	110	0	0	10

L'antenne étant fabriquée sur un substrat PET qui est souple et léger, l'échantillon a tendance à dériver dans le réservoir de dépôt. Pour éviter ce problème, nous contraignons l'échantillon par un support de téflon afin de le maintenir toujours parallèle à l'anode. La quantité d'électricité à fournir a été calculée en fonction de la taille réelle de chaque échantillon qui est liée au motif de l'antenne. La température de dépôt est 75°F et la densité de courant de dépôt est modifiée de 7 à 30 mA/cm² afin de déterminer la densité de courant optimisée du processus [3.3-3.7]. Après le dépôt électrolytique, l'échantillon est lavé à l'eau désionisée et séché à 100°C pendant quelques minutes jusqu'à séchage complet.

3.2. Résultats de fabrication

Épaisseur et résistivité du dépôt de cuivre

Il est connu que la résistivité d'un film métallique dépend fortement des conditions de pulvérisation. Pour étudier les caractéristiques électriques et l'homogénéité de la couche métallique fabriquée par le processus de pulvérisation cathodique, nous utilisons un substrat de verre carré divisé en 16 carrés à l'aide de rubans adhésifs (Figure 3.9). Les paramètres considérés sont la pression et la puissance de pulvérisation lors du dépôt. La pression est ajustée en modifiant le débit d'argon tandis que la puissance est réglée directement sur le régulateur d'injection de puissance électrique au plasma. L'épaisseur de la couche est mesurée par profilométrie mécanique à l'aide du 6M Dektak de Veeco. Ce dispositif fonctionne en déterminant les changements d'élévation d'un stylet déplacé à la surface de l'échantillon pendant la mesure.

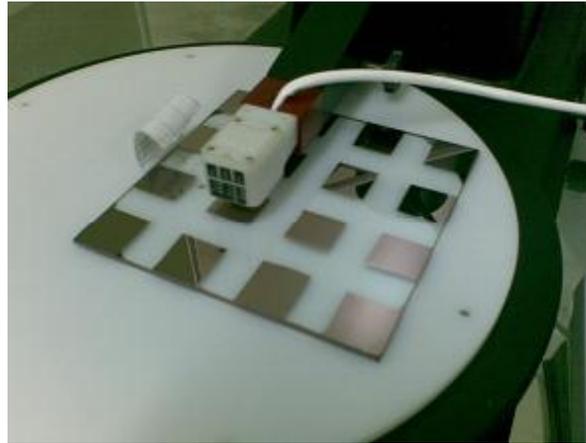


Figure 3.9 – Echantillon pulvérisé pour l'étude de la qualité du dépôt métallique

Pour déterminer la précision de mesure de l'épaisseur, nous avons étudié plus de 50 échantillons. Avec un échantillon de 1 μm d'épaisseur, l'erreur mesurée est de $\pm 70\text{nm}$ ce qui est tout à fait acceptable pour notre application. La résistance de la membrane de cuivre est le facteur le plus important pour décider de la qualité finale du dépôt pulvérisé. Les mesures de résistivité sont effectuées avec le dispositif de sonde à 4 points dans lequel quatre aiguilles équidistantes sont mises en contact avec la surface de l'échantillon par des ressorts (Figure 3.10).

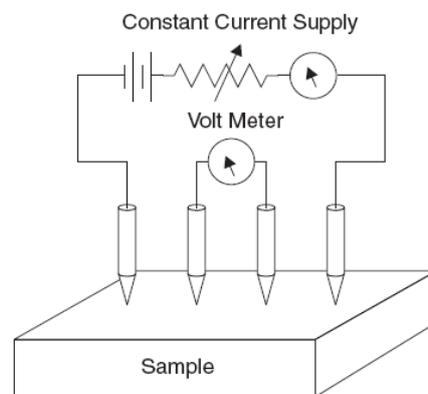


Figure 3.10 – Mesure de la résistivité de la couche métallique par sonde 4 points

Les deux électrodes externes servent de source de courant injecté à travers l'échantillon et les deux électrodes internes servent à mesurer la tension résultante. La distance S entre les deux électrodes successives est de 1,47 mm. La résistivité de l'échantillon peut être déterminée par la formule :

$$\rho = \frac{\pi t}{\ln 2} \left(\frac{V}{I} \right)$$

Où t est l'épaisseur de l'échantillon, V et I sont la tension et le courant relevés lors de la mesure. La résistance carrée des couches d'épaisseur t très minces peut être calculée par la formule suivante :

$$R_s = \frac{\rho}{t} = k \left(\frac{V}{I} \right) \text{ avec } k = 4.52$$

3.3. La technologie de l'impression jet d'encre combinée avec le dépôt électrolytique

3.3.1. État de l'art de la technologie jet d'encre

L'impression jet d'encre est une technique qui permet l'utilisation d'une imprimante de bureau pour imprimer des documents et des images sur le papier ou d'autres substrats. Ces dernières années, cette technologie a fait des progrès remarquables qui permettent d'imprimer à très haute qualité, et est petit à petit appliquée dans le domaine de la fabrication des couches minces [3.16]. L'attractivité la plus importante de cette technique est sa capacité de dépôt sans masque, qui présente un fort potentiel pour créer des circuits électriques sur supports flexibles.

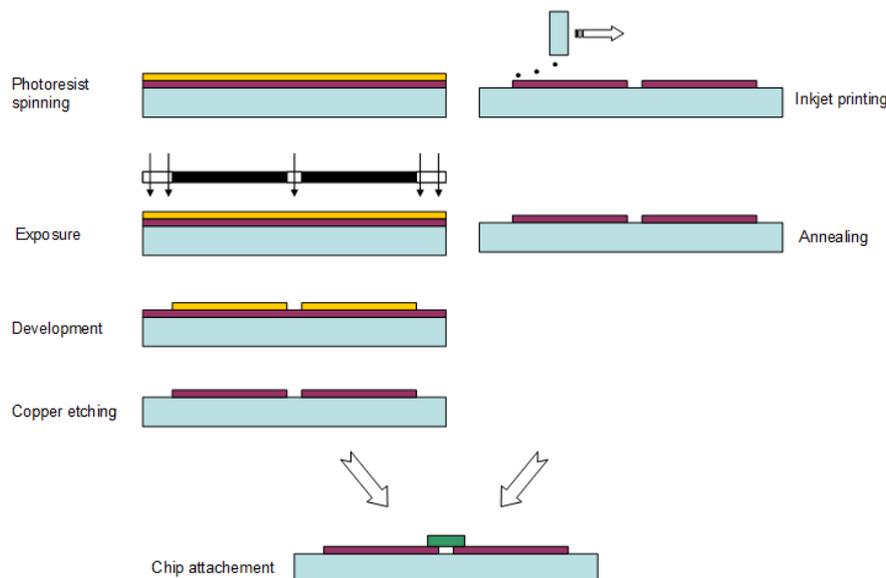


Figure 3.11 – Procédé jet d'encre (à droite) par rapport au procédé de fabrication par technologie microélectronique standard (à gauche)

Les méthodes d'impression disponibles sont l'impression offset, la lithographie optique, l'impression flexographique et l'impression jet d'encre qui ont des résolutions similaires (environ de 10 à 30 μm). L'avantage du jet d'encre par rapport aux méthodes mentionnées ci-dessus est en particulier sa capacité d'impression sans masque (Figure 3.11) qui permet une plus grande rapidité de prototypage et un avantage économique pour les composants finaux. C'est une des raisons pour lesquelles l'impression jet d'encre peut être utilisée en laboratoire pour déposer des matériaux sensibles, en particulier des matériaux semi-conducteurs (polymères ou inorganiques) dont la pureté influence beaucoup sur la qualité. Par ailleurs, l'industrie moderne a un besoin croissant de pouvoir fabriquer des prototypes et composants passifs sur différents types de substrat avec des tailles critiques compatibles avec la microtechnologie classique (en micromètres) et les composants électroniques traditionnels.

3.3.2. Synthèse d'une solution de nanoparticules de cuivre

Afin de pouvoir réaliser des dépôts conducteurs par jet d'encre, la méthode actuellement la plus employée est basée sur une encre contenant des nanoparticules métalliques. Les nanoparticules métalliques ont été étudiées depuis quelques dizaines d'années et il y a actuellement de nombreux travaux sur les nanoparticules [3.8-3.10]. Le plus simple jusqu'à présent consistait à utiliser des nanoparticules d'argent car elles sont plus faciles à synthétiser et à contrôler en solution. Afin de réduire le coût de l'encre conductrice, certains chercheurs ont proposé de développer une encre à base de nanoparticules de cuivre. Mais les nanoparticules de cuivre s'oxydent facilement même en milieu liquide. Donc leur synthèse a souvent lieu sous azote ou argon. Mais ce n'est pas pratique pour des applications réelles, en particulier lors du stockage et de l'impression qui doivent aussi normalement être en environnement sans oxygène.

Au Laboratoire de Nanotechnologie (Vietnam), nous avons synthétisé des encres à base de nanoparticules de cuivre par la méthode de réduction chimique : les ions Cu^{2+} dans une solution de cuivre (II) sulfate ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) sont réduits en Cu^0 comme l'équation suivante: $\text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Cu}^0$. Les réactifs chimiques pour la réduction peuvent être le borohydrure de sodium (NaBH_4), l'éthanol, l'éthylène glycol, l'acide ascorbique, etc [3.11]. En outre, des encapsulants de surface sont aussi ajoutés pour créer une protection et décroître l'agglomération entre les particules. Les polymères comme Poly Vinyl Pyrrolidone (PVP),

Poly Vinyl Alcohol (PVA), le glucose, la chitosane, les alkylamines, les alkylthiols,... sont souvent utilisés afin d'aider les particules à bien se disperser dans la solution.

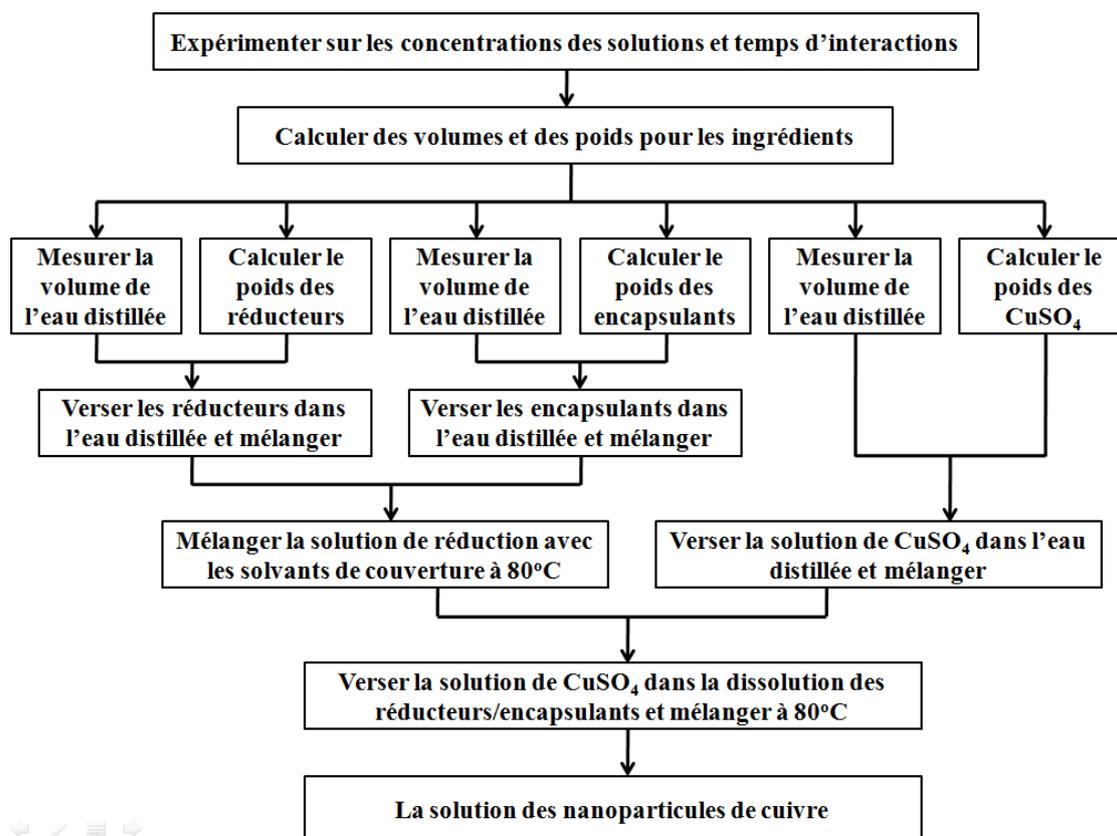


Figure 3.12 - Synthèse de l'encre conductrice de cuivre par la réduction de l'acide ascorbique [3.11]

3.3.3. Fabrication de l'encre conductrice à partir des nanoparticules de cuivre

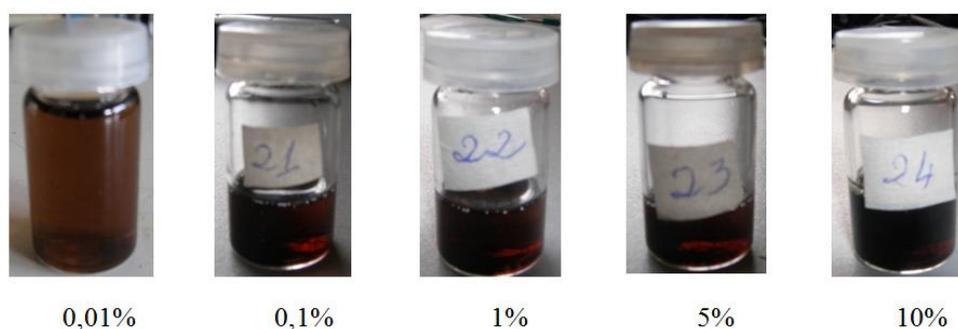


Figure 3.13 – Différentes encres selon la concentration en poids de « nano-cuivre »

Après centrifugation de la solution pour récupérer les nanoparticules de cuivre (sous forme de poudre « nano-cuivre »), l'étape suivante consiste à disperser la poudre de « nano-

cuivre » dans un solvant approprié (comme sur la figure 3.13) pour la fabrication d'une encre possédant la tension de surface et la viscosité désirées. Dans certains travaux de référence, l'éthylène glycol et le 2-méthoxyéthanol ont été utilisés en tant que solvant primaire avec une petite quantité d'eau désionisée afin d'ajuster la viscosité. L'éthanol est également utilisé comme solvant mais les résultats ne sont pas bons parce que cela résulte en une évaporation rapide de l'encre lors du dépôt, ce qui pose problème au niveau de la tête d'impression.

3.4. Impression jet d'encre pour la fabrication de l'antenne radiofréquence

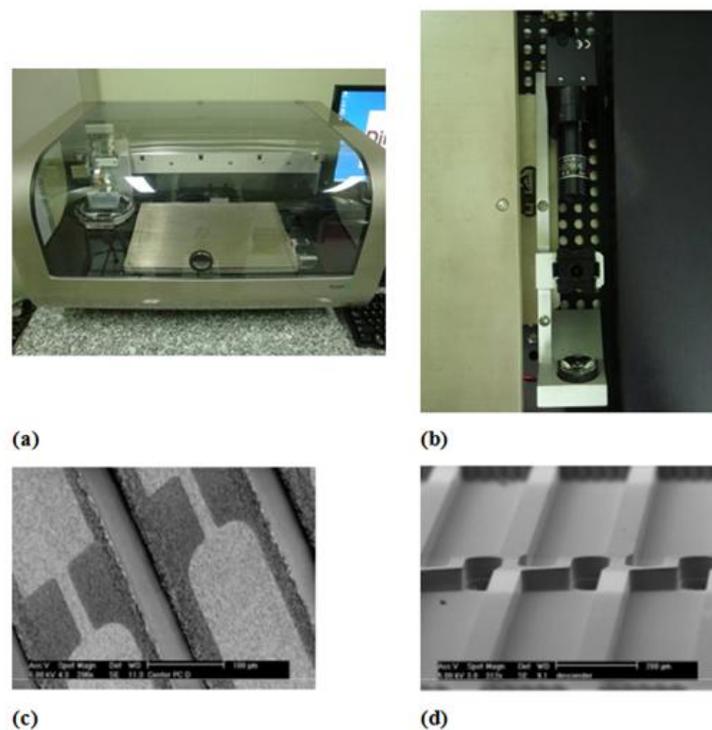


Figure 3.14 – (a) Imprimante pour matériaux Dimatix (b) Cartouche d'impression
(c) Élément piézo-électrique (d) Sortie du canal

L'équipement pour ce procédé jet d'encre est l'imprimante pour matériaux Dimatix[®]. Ce dispositif fonctionne sur la technologie piézo-électrique qui est aussi la méthode la plus courante pour l'impression des encres pour la fabrication des composants et des dispositifs (Figure 3.14). L'élément piézo-électrique (normalement un morceau de matériau PZT) est fixé au canal et connecté à un générateur de signal. Quand une tension est appliquée à l'élément piézo-électrique, la modification de sa forme peut augmenter ou diminuer la section transversale du canal d'encre. Cela induit une force de compression qui va pousser les

gouttelettes d'encre à la sortie du canal. Le plus petit volume de gouttelettes d'encre pouvant être réalisé dépend principalement de la section du canal [3.11-3.12]. Les systèmes d'impression basés sur la technologie jet d'encre piézo-électrique fonctionnent généralement sur un cycle de quatre phases [3.13-3.14].

Phase 0: encre au repos. Dans cette phase, la cartouche ne fonctionne pas encore et juste avant le début du cycle d'impression, une faible tension est appliquée sur l'élément piézo-électrique afin de créer une déformation faible (figure 3.15).

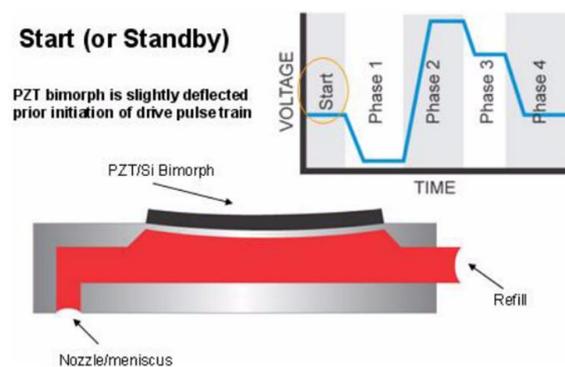


Figure 3.15 - L'encre en attente [3.14]

Phase 1: l'encre est injectée dans le réservoir. Dans cette phase, l'encre est amenée dans le réservoir à travers des trous de chargement. Lorsque le cycle d'impression commence, la tension d'impulsion tombe à 0. L'élément piézo-électrique n'est plus déformé et la chambre d'encre revient en situation statique. Cela forme des ondes de compression acoustiques qui vont attirer le liquide de la cartouche et du canal dans le réservoir. Puis, la tension est maintenue constante (Figure 3.16).

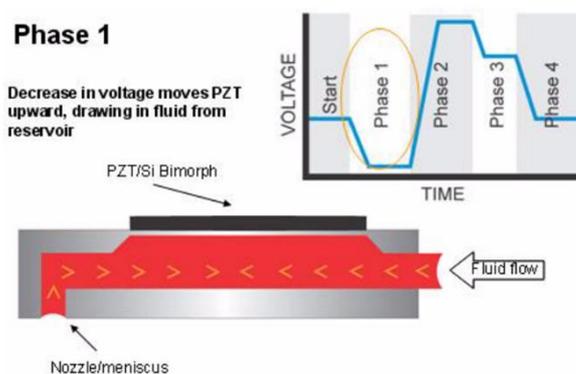


Figure 3.16 - L'encre est injectée depuis le réservoir [3.14]

Phase 2: Des gouttelettes d'encre sont formées et éjectées du canal. La tension augmente afin de créer une déformation de l'élément piézo-électrique qui induit une compression dans le réservoir d'encre. La pression va pousser l'encre jusqu'à l'éjection hors du canal (Figure 3.17).

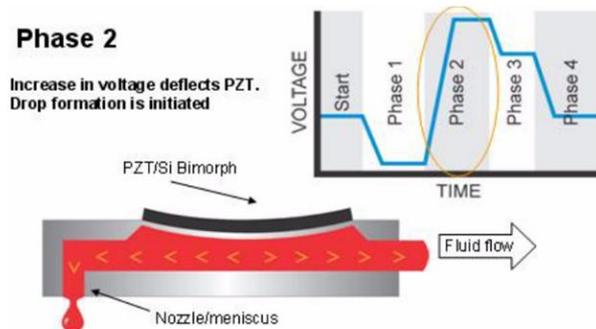


Figure 3.17 - L'encre est poussée hors du canal [3.14]

Phases 3 et 4: Cette phase est la phase de récupération avec retour de la tension à 0.

Le réservoir d'encre est décompressé partiellement dans la phase 3 et rempli en phase 4 afin de le préparer pour le prochain cycle (Figure 3.18). La phase 3 n'est pas obligatoire, elle est ajoutée dans le but d'éliminer les ondes acoustiques se propageant dans la tête, afin d'optimiser les caractéristiques du jet d'encre piézo-électrique [3.15]

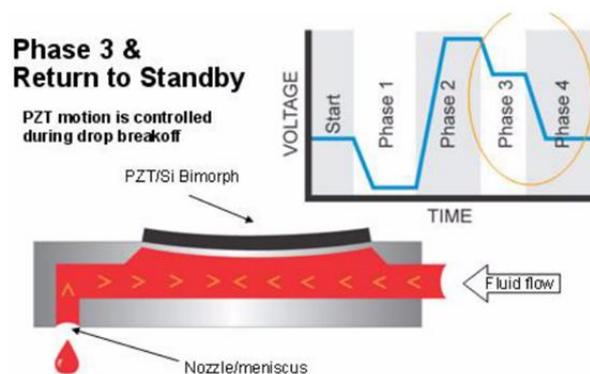


Figure 3.18 - Le tuyau retient à l'état initial [3.14]

3.5. Procédé d'impression de l'antenne

Étape 1: Traiter le substrat PET

Le PET est découpé à la taille de 210 × 310 mm, puis séché à 80°C pendant 15 minutes. Ensuite, il subit un nettoyage dans l'ordre suivant : éthanol, acétone, eau DI et séché

a l'azote. Cette étape a lieu en salle blanche afin de s'assurer qu'il n'y a pas accumulation de poussière sur la surface du PET après nettoyage. Pour le procédé d'impression jet d'encre, l'adhésion à la surface du PET est très importante et elle dépend sérieusement du traitement de surface du PET.

Étape 2: Préparer l'encre à imprimer

Nous utilisons des encres nano-argent U5603 de Sunjet avec des paramètres tels que

- viscosité : 10-13 cP
- tension de surface : 27-31 mN/m
- concentration en argent : 20% en poids



Figure 3.19 - Tête d'impression et cartouche [3.14]

Étape 3: Préparer la cartouche et la tête d'impression

L'encre est injectée soigneusement dans la cartouche à l'aide d'une aiguille spécialisée, afin d'éviter les bulles d'air. Puis la tête d'impression est insérée dans l'imprimante. Notons que la tête d'impression peut être ajustée à différents angles pour changer la résolution.

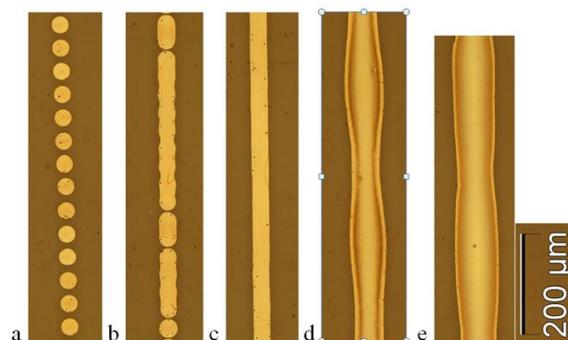


Figure 3.20 – Lignes imprimées à différentes résolutions

Étape 4: Jet d'encre sur l'équipement "DIMATIX Materials Printer"

Avant d'imprimer l'antenne, il faut vérifier l'état des canaux grâce au système de caméra intégré dans l'imprimante afin d'ajuster les paramètres appropriés tels que la tension appliquée, la fréquence d'éjection, la température de la tête d'impression. Enfin, nous installons le cycle de nettoyage de surface de la tête d'impression. L'imprimante DMP utilise une tête d'impression composée de 16 buses dont nous pouvons ajuster deux paramètres importants : la tension et la température. Le réglage de la température influencera sur la viscosité et la tension de surface de l'encre. Plus haute la température est, plus basse est la viscosité. Si la viscosité et la tension de surface de l'encre sont trop élevées, elle obstrue les buses de sortie et l'encre ne peut plus être éjectée. Tandis que si la viscosité est trop faible, il va créer des gouttelettes parasites pendant l'impression ce que nous devons éviter. Par conséquent, on ajuste la température de la tête d'impression selon la viscosité de l'encre désirée [3.15]. Après l'impression, il faut cuire l'échantillon pour activer les propriétés conductrices des composants.

Étape 5: Dépôt électrolytique pour l'épaississement de l'antenne

Résolution [dpi]	La distance entre les gouttelettes de l'encre [μm]	La largeur moyenne des lignes imprimées [μm]
423.33	60	44.55
461.22	55	43.75
508.00	50	43.101
564.44	45	42.82
635.00	40	39.2
725.71	35	40.02
846.67	30	41.61
1016.00	25	40.88
1270.00	20	50.98
1693.33	15	54.18
2540.00	10	70.83
5080.00	5	94.34

Figure 3.21 – Largeur des lignes imprimées et distance entre les gouttelettes d'encre en fonction de la résolution

Comme nous l'avons vu, une antenne RFID complète doit avoir une épaisseur de la couche métallique d'environ 10 microns tandis que l'épaisseur d'une couche de

nanoparticules d'argent imprimée est juste de quelques centaines de nanomètres. Donc, nous avons décidé d'utiliser l'encre d'argent afin d'imprimer juste la couche métallique de nucléation parce que l'encre nanoparticule d'argent est assez chère. Pour compléter l'antenne, nous avons couvert de cuivre la couche d'argent par la méthode de dépôt électrolytique traditionnelle. Après l'impression sur le substrat PET avec 2 couches de d'encre argent, nous avons fait le dépôt électrolytique avec les échantillons immergés dans la solution de CuSO_4 .

3.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une synthèse succincte des procédés de fabrication à petite échelle tels que développés au Laboratoire de Nanotechnologie - Université Nationale du Vietnam, Ho Chi Minh ville. Cet ensemble de procédés relativement coûteux et non transférable à l'échelle industrielle sera petit à petit complété par des procédés potentiellement moins onéreux tels que l'utilisation de résine photosensible sèche, le jet d'encre de cuivre ou la sérigraphie. Cela permettra également une évolution vers la réalisation d'étiquettes sur de nouveaux substrats et l'amélioration de la qualité de fabrication des étiquettes. Nous avons défini brièvement les types de matériaux utilisés et les procédés pour la réalisation des étiquettes RFID. Enfin, il faut noter que la fabrication d'une étiquette pour une application de capteur est plus contraignante que pour une application d'identification dans la mesure où la précision de la fréquence de résonance a un impact direct sur la fonction capteur et sa sensibilité.

Bibliographies - Chapitre 3

- [3.1]. Tran Huy Nam, Tran Nhan Ai, Nguyen Tran Thuat, Dang Mau Chien, Eric Fribourg-Blanc Luong Hong Dung, "Study of RFID antenna fabrication," in 2nd International Workshop in Nanotechnologies and Applications (IWNA), 2009, pp. 622-625.
- [3.2]. Son Dat Nguyen, Duc Hoang Thai Pham, Thuat Nguyen-Tran, Chien Mau Dang and Eric Fribourg-Blanc Ai Nhan Tran, "A new platform for RFID research in Vietnam," Adv. Nat. Sci.: Nanosci. Nanotechnol, vol. 1, p. 045015, 2010
- [3.3]. K. Narushim, N. Tuchida, et al. N. Inagaki, "Surface characterization of plasma-modified Poly(ethylene terephthalate) film surfaces," Journal of Polymer Science: Part B: Polymer Physics, vol. 42, no. 3727, 2004
- [3.4]. LOR Datasheet: Microchem Corp
- [3.5]. Jim Watkowski, "Electrodeposition in Printed circuit handbook", Jr Clyde F. Coombs, Ed.: McGraw Hill, 2008, ch. 29.
- [3.6]. Michael Kohler, "Etching in microsystem technology", Germany: Wiley, 1999
- [3.7]. S. Hayakawa, K. Wasa, "Handbook of sputter deposition technology", Noyes Publications, 1992
- [3.8]. Henry Borsook and Geoffrey Keighley, "Oxidation-reduction potential of ascorbic acid (vitamin C)", Proceedings of the National Academy of Science, vol. 19, pp. 875-8, 1933
- [3.9]. Han-Sung Park, Jong-Hoon Byun, Kijeong Kong, Jeong-O Lee, Hyunju Chang, Beyoung-Hwan Ryu Young-Min Choi, "Synthesis of highly concentrated silver nanosol and its application to inkjet printing", Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects, vol. 270-271, pp. 345-51, 2005
- [3.10]. David Ezra Green, "The potentials of ascorbic acid", Biochemichal, pp. 1044-8, 1933
- [3.11]. Kwi Jong Lee, Nathan E Stott, Donghoon Kim, Youngil Lee Jun-rak Choi, "Large-scale synthesis of copper nanoparticles by chemically controlled reduction for applications of inkjet-printed electronics", Nanotechnology, vol. 19, pp. 415-604, 2008
- [3.12]. Sunho Jeong, Jooho Moon, Jang Sub Kim, Bong Kyun Park Dongjo Kim, "Direct writing of copper conductive patterns by ink-jet printing", Thin Solid Films, vol. 515, pp. 7706-7711, 2007

[3.13]. H. Sirringhaus, E. Gili, M. Caironi, "Picoliter Printing", *Comprehensive Nanoscience and Technology*, vol. 4, pp 117-143, 2011

[3.14]. "Dimatix Materials Printer: DMP-2800 Series User Manual," Dimatix Fujifilm, 2008

[3.15]. P. C. Duineveld, "The stability of ink-jet printed lines of liquid with zero receding contact angle on a homogeneous substrate", *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 477, pp. 175-200, 2003

[3.16]. [Http://www.conductiveinkjet.com/technology.aspx](http://www.conductiveinkjet.com/technology.aspx)

Chapitre 4

Effets des paramètres du procédé de fabrication sur les caractéristiques de l'antenne du tag RFID

Ce chapitre traite des paramètres technologiques et leur effet sur la performance de l'antenne et donc de l'étiquette. En effet, si la conception fournit un ensemble de paramètres cibles, la réalisation technologique sera sujette à une certaine imprécision qui dépend des procédés de fabrication et de leur mise œuvre. Ainsi en étudiant les limites des procédés utilisés nous pouvons mieux comprendre les caractéristiques réelles de l'antenne (impédance d'entrée, fréquence de résonance,...). En outre, nous profiterons de ces résultats pour ajuster les caractéristiques de l'antenne afin d'assurer la meilleure communication possible entre l'étiquette et le lecteur.

Table des matières

4.1. EFFET DU PROCEDE DE PHOTOLITHOGRAPHIE SUR LES PERFORMANCES DE L'ANTENNE.....	95
4.1.1. EFFET DE LA PRESSION DU GAZ DANS LE PROCESSUS DE PULVERISATION.....	95
4.1.2. IMPACT DE LA DENSITE D'EXPOSITION SUR LES DIMENSIONS DE L'ANTENNE.....	97
4.1.3. EFFETS DU PROCEDE D'IMPRESSION JET D'ENCRE	99
4.2. INFLUENCE DES FACTEURS DU PROCEDE JET D'ENCRE SUR LA QUALITE DE L'ETIQUETTE FABRIQUEE	101
4.2.1. ABSENCE D'EJECTION	101
4.2.2. VITESSES INAPPROPRIEES	102
4.2.3. RESOLUTION.....	103
4.2.4. TEMPERATURE DU SUBSTRAT	104
4.3. EFFET DU PROCEDE DE DEPOT-ELECTROLYTIQUE ET EFFET DE PEAU SUR L'ANTENNE FABRIQUEE	105
4.3.1. EFFETS DU PROCEDE DE DEPOT-ELECTROLYTIQUE	105
4.3.1.1. <i>Densité de courant du dépôt-électrolytique</i>	105
4.3.1.2. <i>Vitesse du dépôt-électrolytique</i>	106
4.3.2. EFFET DE L'ÉPAISSEUR DE PEAU	110
4.3.2.1. <i>Épaisseur de peau</i>	110
4.3.2.2. <i>Effet de peau sur les caractéristiques de l'antenne</i>	114
4.4. EFFET DE LA CONNEXION ENTRE LA PUCE ET L'ANTENNE	116
4.5. CONCLUSION	119
BIBLIOGRAPHIE – CHAPITRE 4	120

LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX

FIGURE 4.1 - ETAPES DE FABRICATION AU LABORATOIRE DE NANOTECHNOLOGIE (VIETNAM).....	95
FIGURE 4.2 – EVOLUTION DE LA RESISTIVITE DU FILM DE CUIVRE SELON LA PRESSION DE PULVERISATION	96
FIGURE 4.3 – POSITIONS CHOISIES POUR L’EVALUATION DE L’ECART ENTRE CONCEPTION ET FABRICATION PAR LE PROCEDE DE PHOTOLITHOGRAPHIE	97
FIGURE 4.4 – DIMENSIONS DES ANTENNES FABRIQUEES SELON LA DENSITE D’EXPOSITION AVEC LA RESINE PHOTOSENSIBLE SECHE ALPHA-940	98
FIGURE 4.5 - DIMENSIONS DES ANTENNES FABRIQUEES SELON LA DENSITE D’EXPOSITION AVEC LA RESINE PHOTOSENSIBLE MA-P1215	98
FIGURE 4.6 DIMENSIONS DES ANTENNES FABRIQUEES SELON LA DENSITE D’EXPOSITION AVEC LA RESINE PHOTOSENSIBLE MA-N415.....	99
FIGURE 4.7 – LARGEUR DE LIGNE SELON LA DISTANCE ENTRE DES GOUTTELETTES	100
FIGURE 4.8 – RELATIONS ENTRE LES COUCHES IMPRIMEES ET L’EPAISSEUR AINSI QUE LA RESISTANCE DE SURFACE.....	101
FIGURE 4.9 – EFFETS DE L’ABSENCE D’EJECTION	102
FIGURE 4.10 - LIGNES D'IMPRESSON INADEQUATES DUES A DES VITESSES INAPPROPRIEES	103
FIGURE 4.11 - LIGNES CONDUCTRICES A DIFFERENTES RESOLUTIONS :	103
(A) 423.33 DPI (B) 635 DPI (C) 846.67 DPI (D) 1270 DPI (E) 2540 DPI.....	103
TABLEAU 4.1 - DIAMETRE MOYEN DES GOUTTELETTES A DIFFERENTES TEMPERATURES DE SUBSTRAT.....	104
FIGURE 4.12 – ELARGISSEMENT DES MOTIFS PENDANT LE DEPOT ELECTROLYTIQUE.....	105
FIGURE 4.13 – CORRELATION ENTRE LA DENSITE DE COURANT ET L’ERREUR DES DIMENSIONS APRES DEPOT ELECTROLYTIQUE AINSI QUE L’ERREUR SUR L’EPAISSEUR DE L’ANTENNE	106
FIGURE 4.14 – POSITIONS CONSIDEREES POUR LA MESURE DE LA RESISTIVITE ET DE L’EPAISSEUR DE L’ANTENNE.....	107
FIGURE 4.15 – RELATIONS ENTRE LA VITESSE DU DEPOT ELECTROLYTIQUE	107
(A) ET LA RESISTIVITE MOYENNE DE L’ANTENNE.....	107
(B) AUX DIFFERENTES DENSITES DE COURANT DANS LA MEME SOLUTION S_1	107
FIGURE 4.16 – REPARTITION DE L’EPAISSEUR ET DE LA RESISTIVITE MOYENNE DANS LA DIRECTION HORIZONTALE DE L’ECHANTILLON	108
FIGURE 4.17 – REPARTITION DE L’EPAISSEUR ET DE LA RESISTIVITE MOYENNE DANS LA DIRECTION VERTICALE DE L’ECHANTILLON	108
FIGURE 4.18 – EPAISSEUR ET RESISTIVITE DE LA COUCHE PULVERISEE A 100 W PENDANT 3 MINUTES SUIVI D’UN DEPOT ELECTROLYTIQUE DANS LA SOLUTION S_1	109
FIGURE 4.19 – EPAISSEUR ET RESISTIVITE DE LA COUCHE PULVERISEE A 100 W POUR LES DENSITES DE COURANT DE 17 MA/CM ² ET 22 MA/CM ²	110
TABLEAU 4.2 – ÉPAISSEUR DE PEAU POUR DIFFERENTS MATERIAUX CONDUCTEURS A LA FREQUENCE DE 900 MHZ	111
FIGURE 4.20 - MODELE D'UNE LIGNE CONDUCTRICE DE FORME CYLINDRIQUE	111
FIGURE 4.21 – GEOMETRIE DE L’ANTENNE DE L’ETIQUETTE HO-01	113

FIGURE 4.22 - MESURE DE L'IMPEDANCE DES PROTOTYPES HO-01 AVEC L'ANALYSEUR DE RESEAU VECTORIEL ZVB8 DE ROHDE & SCHWARZ	113
FIGURE 4.23 - PARTIE REELLE ET PARTIE IMAGINAIRE DE L'IMPEDANCE DE L'ANTENNE HO-01 AUX DIFFERENTES EPAISSEURS DANS LA GAMME RFID UHF (860 MHz – 960 MHz)	114
FIGURE 4.24 - ABAQUE DE SMITH DE L'ANTENNE HO-01 AUX DIFFERENTES EPAISSEURS DANS LA GAMME RFID UHF (860 MHz – 960 MHz)	115
FIGURE 4.25 - CONNEXION DE LA PUCE AVEC L'ANTENNE.....	116
FIGURE 4.26 - CONNEXION AVEC DEFAUT ENTRE LA PUCE ET L'ANTENNE.....	117
FIGURE 4.27 - PERTURBATIONS ET VARIATIONS D'IMPEDANCE LE LONG DE LA CHAINE D'ASSEMBLAGE DE L'ETIQUETTE RFID.....	118
FIGURE 4.28 - EFFETS DE L'ECART ENTRE LA PUCE ET LE SUBSTRAT PET SUR LA CONNEXION ENTRE LA PUCE ET L'ANTENNE.....	119

4.1. Effet du procédé de photolithographie sur les performances de l'antenne

4.1.1. Effet de la pression du gaz dans le processus de pulvérisation

Pour obtenir un film métallique de bonne qualité et de bonne adhérence, la surface du substrat doit être nettoyée soigneusement. Le dépôt métallique par pulvérisation cathodique induit un échauffement du substrat si le bombardement est trop intense, mais ce paramètre est réglable. La puissance de travail a été limitée à 150 W de ce fait et le substrat n'est pas échauffé lors des dépôts. C'est aussi l'avantage le plus important de la méthode de pulvérisation cathodique pour notre besoin. Cela permet de métalliser de nombreux matériaux comme le papier, les tissus ou plastiques... Cependant, la qualité du dépôt et notamment sa densité, qui influe sur la résistivité du film métallique, dépend en particulier de la pression et de la puissance de pulvérisation. Notamment lorsque la pression est plus élevée, les espèces du plasma, activées par la décharge électrique, absorberont fortement les particules de métal diffusant vers le substrat et formant la membrane [4.1].

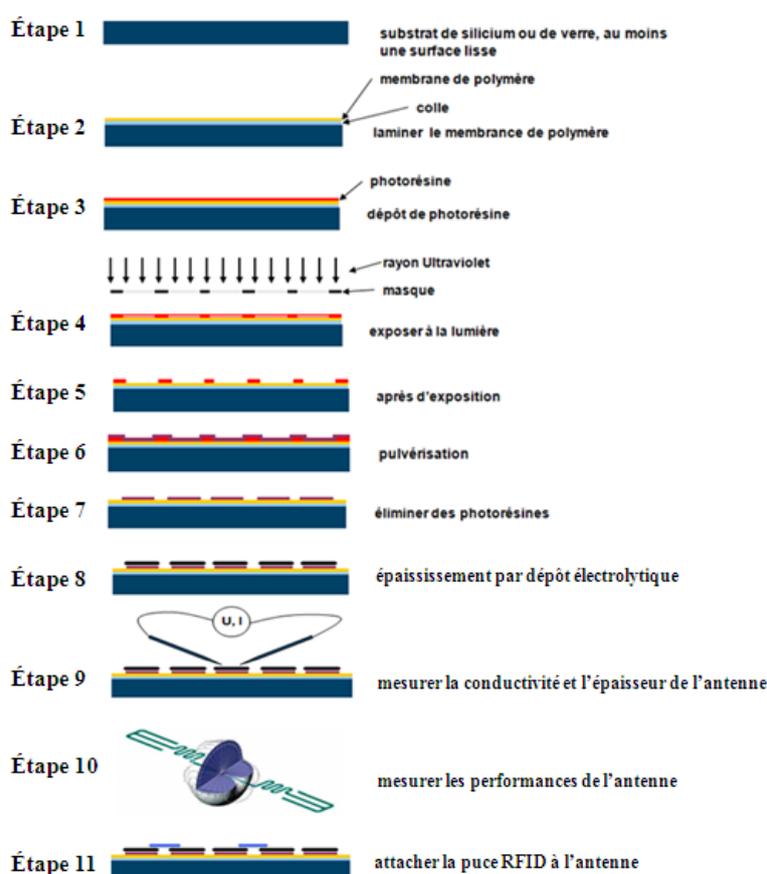


Figure 4.1 - Etapes de fabrication au Laboratoire de NanoTechnologie (Vietnam)

Une basse pression de pulvérisation résulte en un plasma moins dense qui interagit moins avec les atomes de cuivre pulvérisés. Cela permet aux atomes éjectés de conserver plus d'énergie et favorise une plus grande densité de la couche métallique et une meilleure organisation de son réseau [4.2-4.3]. On attend donc naturellement une résistance plus faible du film métallique. La ligne rouge de la figure 4.2 représente la résistance de la couche de cuivre et les points noirs indiquent l'épaisseur de l'échantillon selon la puissance de pulvérisation cathodique. La plupart des échantillons (sauf 2 échantillons à 40W et 1 échantillon à 100 W) ont une épaisseur proche de de 1 μm , ce qui assure la cohérence des comparaisons entre les mesures. Les résultats des tests montrent que la résistance n'est pas corrélée à l'épaisseur mais est plus directement influencée par la pression et dans une moindre mesure par la puissance. La ligne épaisse verte représente la résistance du cuivre pur (1.65 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$) et la ligne mince verte à 2.5 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$ indique la résistance de la couche de Cu pouvant être utilisée pour la fabrication de l'antenne.

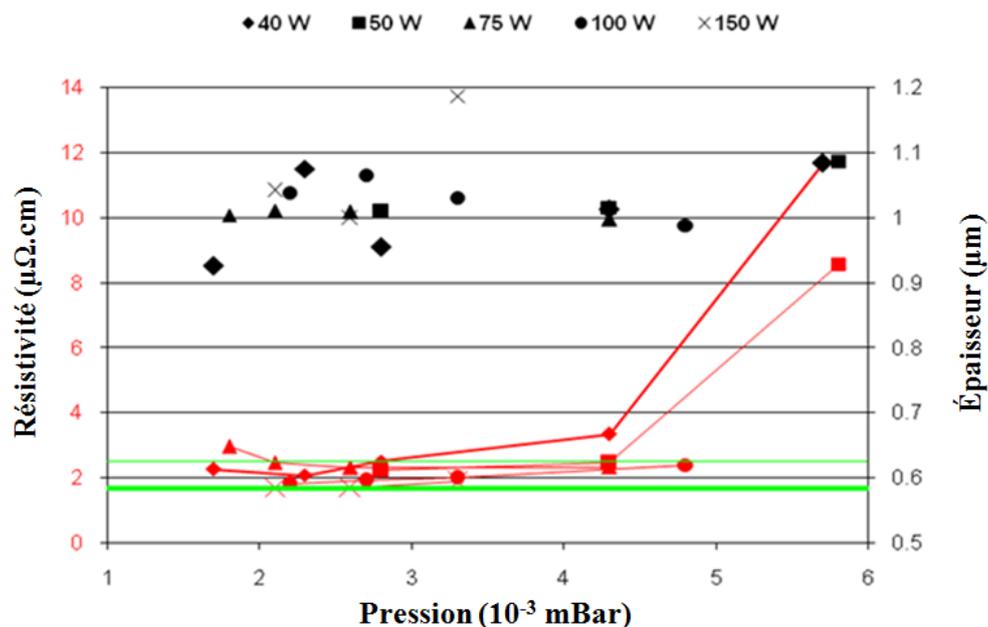


Figure 4.2 – Evolution de la résistivité du film de cuivre selon la pression de pulvérisation

La résistivité de la couche mince est dépendante de son épaisseur. Elle ne change presque plus à partir d'une épaisseur de quelques centaines de nanomètres pour l'épaisseur de la membrane [4.4]. Par conséquent, l'étude des caractéristiques de la couche de cuivre est faite sur des échantillons de 1 μm d'épaisseur afin assurer des conditions stables sur la qualité des films examinés. Cependant, la détermination de la résistivité des films métalliques sur le substrat PET par la méthode de la sonde 4-pointes pose de nombreux problèmes en raison de

la finesse et la flexibilité du substrat PET. Comme le changement de substrat ne modifie que légèrement les propriétés des films métalliques, nous avons utilisé un substrat de verre pour ces mesures de résistivité, ce qui a permis des mesures plus faciles et plus précises. Des résultats ci-dessus, nous déduisons que la pression a une influence grandissante sur la résistivité au-delà d'un seuil de 3 μbar environ. En dessous de ce seuil, la puissance de pulvérisation n'a que peu d'influence sur la résistivité de la couche métallique. La référence [4.4] montre également que les conditions de pression les plus appropriées pour former le dépôt métallique de cuivre par pulvérisation cathodique vont de 2 à 4,2 μbar . Cette gamme est suffisamment large pour permettre le contrôle du débit d'argon. Dans cette gamme, une puissance de dépôt faible, pour limiter l'échauffement du substrat, permet de créer une couche de cuivre avec une résistivité inférieure à 2,5 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$.

4.1.2. Impact de la densité d'exposition sur les dimensions de l'antenne

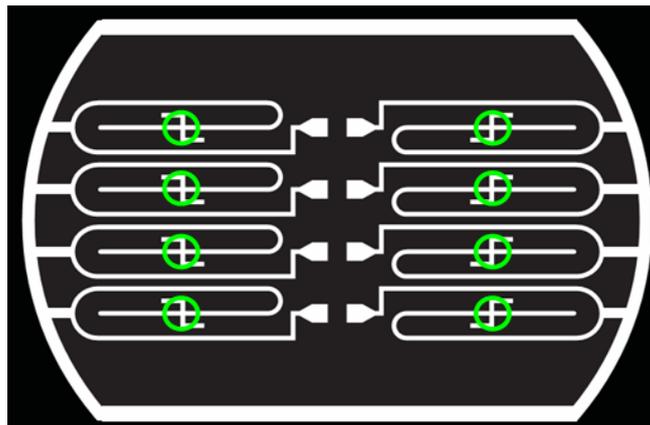


Figure 4.3 – Positions choisies pour l'évaluation de l'écart entre conception et fabrication par le procédé de photolithographie

Dans le procédé de photolithographie, le plus important est que les motifs des composants soient transférés correctement sur la couche de photosensible (résine ou sèche dépend en processus de fabrication). Le matériau photosensible est celui normalement utilisé pour réaliser des motifs sur le substrat de silicium. Par conséquent, compte tenu du fait que le PET est un matériau transparent, les paramètres de fabrication doivent être ajustés pour optimiser le procédé. Ainsi, les dimensions des composants fabriqués ont été choisies comme critères d'évaluation de la précision du processus de photolithographie. Les dimensions de l'antenne ont été évaluées au Laboratoire de NanoTechnologie (LNT) grâce au microscope inverse GX51 (la tolérance de ce dispositif est de $\pm 1,4\mu\text{m}$). Ceci permet d'étudier les écarts

entre la conception et la fabrication. Sur chaque échantillon, nous avons effectué les mesures à l'endroit du stub comme indique sur la figure 4.3. Ainsi 8 mesures ont été réalisées et nous avons reporté la valeur moyenne pour évaluer les écarts de dimensions entre fabrication par photolithographie et conception.

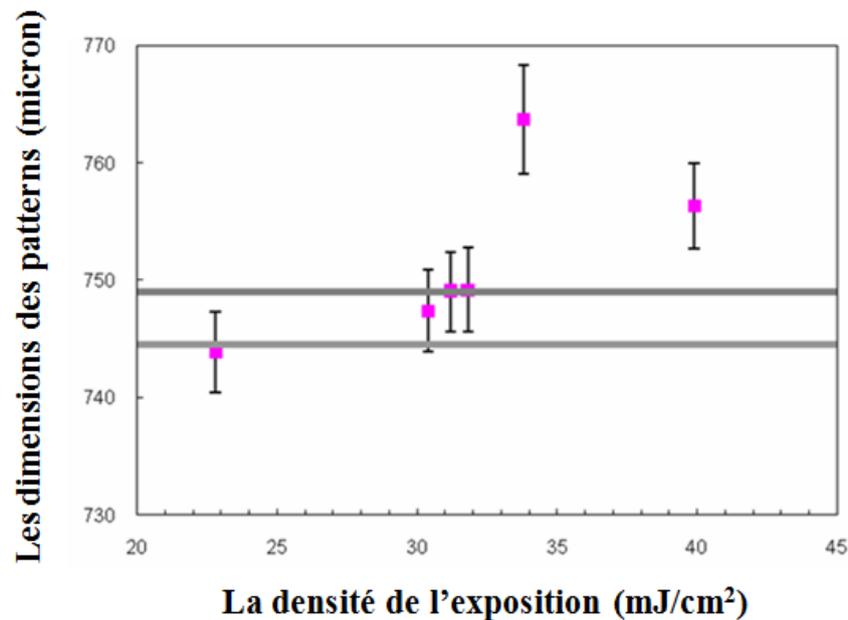


Figure 4.4 – Dimensions des antennes fabriquées selon la densité d'exposition avec la résine photosensible sèche alpha-940

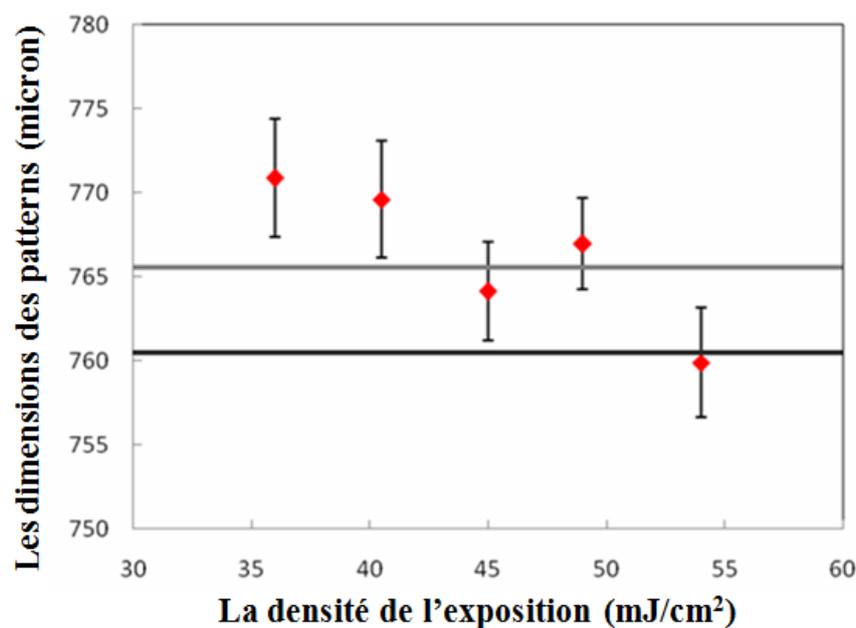


Figure 4.5 - Dimensions des antennes fabriquées selon la densité d'exposition avec la résine photosensible ma-P1215

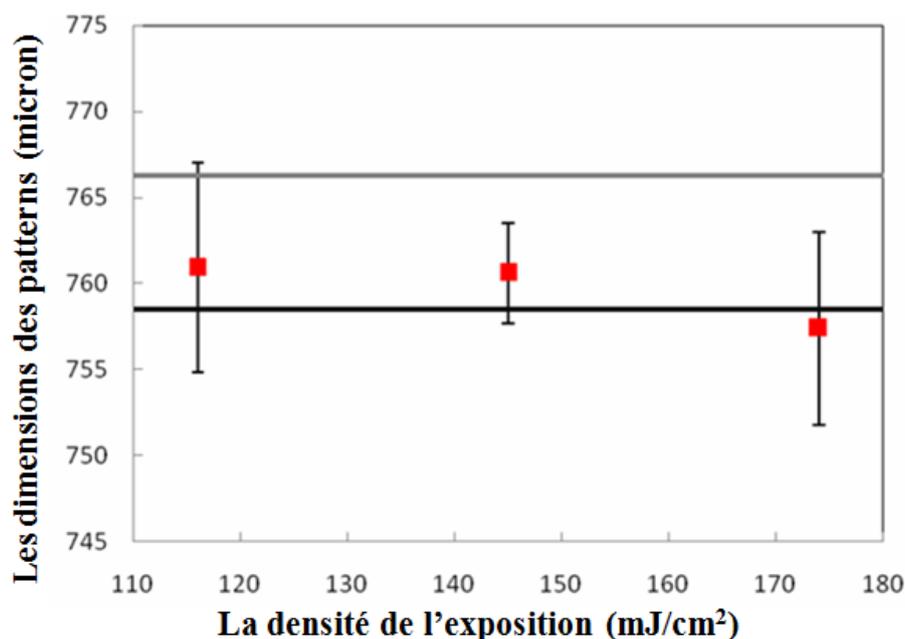


Figure 4.6 Dimensions des antennes fabriquées selon la densité d'exposition avec la résine photosensible ma-N415

La figure 4.4 décrit les dimensions de l'antenne mesurées, après le procédé de photolithographie avec la photosensible sèche (alpha-940) pour différentes densités d'exposition à la lumière UV. Les deux lignes horizontales représentent les dimensions du masque (les dimensions des motifs du masque sont de 745 μm) tandis que les points restants représentent les dimensions de l'antenne fabriquée pour différentes densités d'UV. De cela, on peut voir que les échantillons qui sont fabriqués avec une densité d'UV de 30 à 33 mJ/cm^2 ont des dimensions les plus proches de la taille du masque. Nous avons fait la même étude pour les photosensibles de résines ma-P1215 et ma-N415. Les résultats sont donnés sur les figures 4.5 et 4.6. De ces résultats nous pouvons conclure que pour la résine photosensible ma-P1215, la meilleure densité d'exposition est environ 45 mJ/cm^2 , alors que pour la résine ma-N415 la meilleure exposition est dans la gamme 140~150 mJ/cm^2 . À partir de ces analyses, nous utiliserons ce paramètre optimisé pour fabriquer les antennes sur le substrat PET.

4.1.3. Effets du procédé d'impression jet d'encre

La largeur de la ligne imprimée a tendance à augmenter quand nous continuons à réduire l'écart entre gouttes en-deca de 30 μm . Cependant, l'augmentation de largeur s'accompagne d'une série d'élargissements le long de la ligne d'impression. Ce phénomène a

été étudié et détaillé par Duineveld [4.5]. Il est le résultat de l'instabilité dynamique provoquée par l'écoulement du fluide lorsque des nouvelles gouttelettes d'encre arrivent à la surface du substrat. L'élargissement de la ligne d'impression se produit parce que les nouvelles gouttelettes d'encres qui coalescent avec la ligne accroissent l'angle de contact de l'encre sur le substrat qui dépasse alors localement l'angle d'avancée, créant ainsi des élargissements locaux. La limitation de ce phénomène est décrite par une fonction entre la distance entre les gouttelettes et la fréquence des gouttelettes qui tombent sur le substrat (calculée par la vitesse de la tête d'impression en comparaison avec le substrat et divisée par la distance entre les gouttes d'encre). L'étude paramétrique ci-dessus nous permet de sélectionner la résolution 725.71 dpi ($d = 35\mu\text{m}$) pour imprimer la ligne conductrice sur un substrat à la température ambiante (23°C). L'échantillon après impression a été séché à 100°C pendant une heure, puis on continue d'imprimer des couches multiples. Enfin une cuisson à une température de 150°C est réalisée pour consolider les lignes imprimées [4.6].

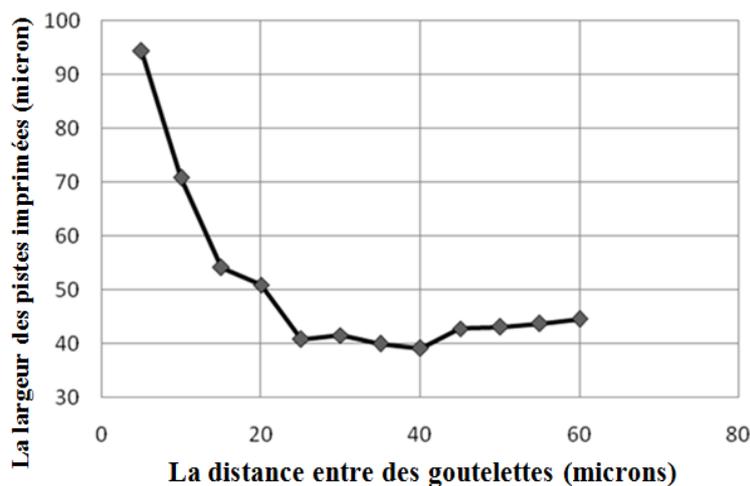


Figure 4.7 – Largeur de ligne selon la distance entre des gouttelettes

Pour obtenir l'épaisseur désirée (environ $10\mu\text{m}$) nous devons imprimer de très nombreuses couches conductrices superposées sur un même substrat. Cela conduit à un autre problème qui est la conductivité électrique de l'échantillon. Parce que l'encre utilisée contient des nanoparticules d'argent, il faut cuire l'échantillon après l'impression (150°C pendant 90 minutes) pour les consolider et obtenir la meilleure densité possible. Plus il y a de couches et plus le phénomène de consolidation est complexe. Par conséquent, la résistivité de l'échantillon sera limitée à une certaine valeur minimale. En outre, le prix de l'encre chargée en nanoparticules d'argent est encore élevé pour l'instant et cette méthode ne sera pas très économique.

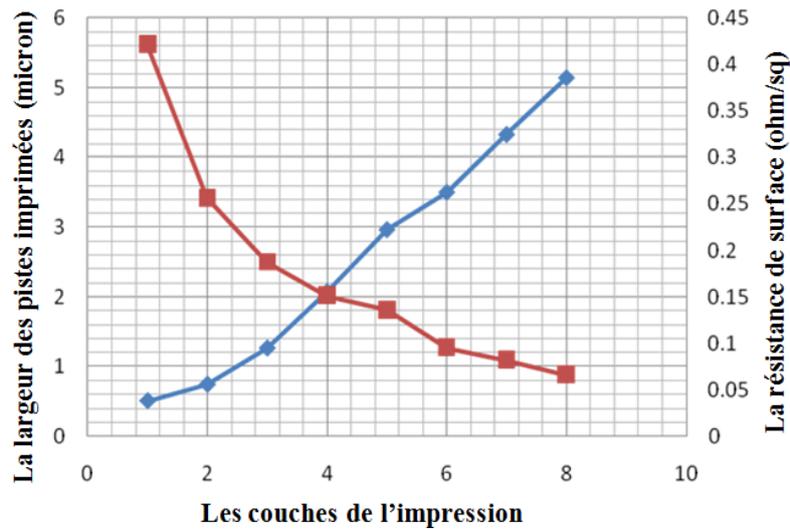


Figure 4.8 – Relations entre les couches imprimées et l'épaisseur ainsi que la résistance de surface

4.2. Influence des facteurs du procédé jet d'encre sur la qualité de l'étiquette fabriquée

Pour obtenir les motifs d'antenne désirés, les différentes conditions d'impression, comme l'état des jets, la distance entre les points d'impression et la température du substrat, doivent être fixés.

4.2.1. Absence d'éjection

L'absence d'éjection correspond à une situation où les jets ne sortent pas d'encre quelles que soient les conditions. Il y a deux raisons qui causent généralement ce phénomène. La première raison est le piégeage d'air dans le canal interne à la tête jet d'encre, qui annule ou atténue efficacement l'impulsion de jet. Dans ce cas-là, le ménisque à la sortie de la buse continue à osciller légèrement mais il n'y a pas suffisamment d'énergie pour forcer une gouttelette à se former. La deuxième possibilité correspond à un séchage local de l'encre sur la plaque de buses. Lorsqu'un jet est bouché ou desséché, nous ne sommes pas capables d'observer les pulsations subtiles du ménisque au niveau de la buse correspondante. Afin de résoudre ce problème, nous pouvons augmenter la tension appliquée au piézoélectrique commandant le canal ou désactiver le jet (ce qui sera pris en compte par le logiciel de commande de l'imprimante). Cependant, ce phénomène d'instabilité du jet peut se produire

pendant l'impression comme nous pouvons voir dans la figure 4.9 où les positions marquées en bleu sont causées par cette instabilité d'éjection. De plus, la position (b) marquée en rouge est un jet qui a été totalement obstrué pendant l'impression. Les conséquences de ce phénomène sont la non-uniformité de l'épaisseur et la conductivité insuffisante de l'antenne imprimée.

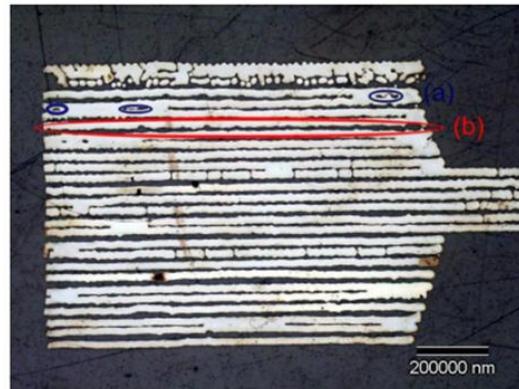


Figure 4.9 – Effets de l'absence d'éjection

Afin d'éviter cet inconvénient, on peut éliminer les bulles d'air piégées dans l'encre d'argent pendant le remplissage de la cartouche. Cela nécessite un montage de dégazage constitué d'une pompe à vide, d'une pompe péristaltique et d'un module avec une membrane spécifique. L'encre s'écoule vers une face de la membrane alors que le vide est établi sur l'autre face. Les bulles d'air traversent la membrane perméable au gaz laissant une encre dégazée à la sortie du dispositif [4.7]. Plus il y a de jets simultanés lors de l'impression, plus il est possible d'imprimer rapidement et avec une meilleure répétabilité.

4.2.2. Vitesses inappropriées

Avant d'imprimer, il faut régler la tension appliquée à chaque canal pour obtenir une vitesse constante entre les jets. Sinon, nous observons des variations sur les motifs imprimés et les gouttelettes correspondantes comme sur la figure 4.10, d'où des inhomogénéités et une mauvaise qualité d'impression. Sur la figure 4.10, la tension appliquée au quatrième jet est trop faible par rapport aux autres et doit être augmentée. Un autre problème se pose quand nous fabriquons sur un substrat chauffe. Le transfert de chaleur à partir du substrat vers la tête jet d'encre située à 1 mm au-dessus de la surface augmentera la température de celle-ci et la viscosité de l'encre en sera modifiée, ce qui contribue à l'instabilité des vitesses d'encre pendant l'impression.

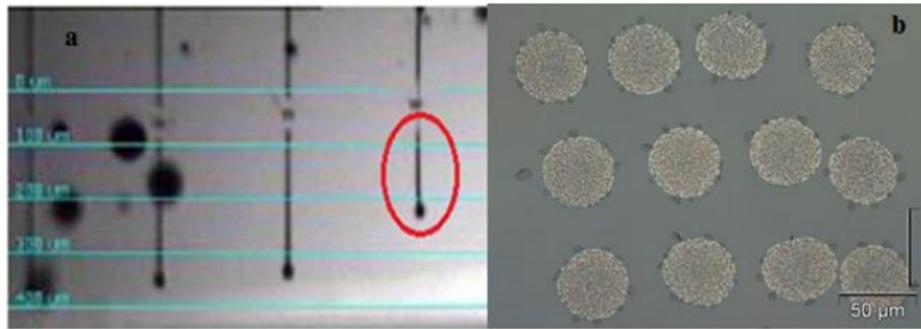


Figure 4.10 - Lignes d'impression inadéquates dues à des vitesses inappropriées

4.2.3. Résolution

Pour imprimer une ligne conductrice continue, on réduit la distance entre les gouttelettes de sorte que des gouttelettes adjacentes peuvent interagir pour former une ligne continue comme sur la Figure 4.11. La distance est réglée en modifiant la résolution de l'imprimante. La résolution est définie par le nombre de points par pouce (dpi). La relation entre la résolution et la distance entre les gouttes peut être calculée par:

$$Drospacing(\mu m) = \frac{25400}{resolution(dpi)} \quad (4.1)$$

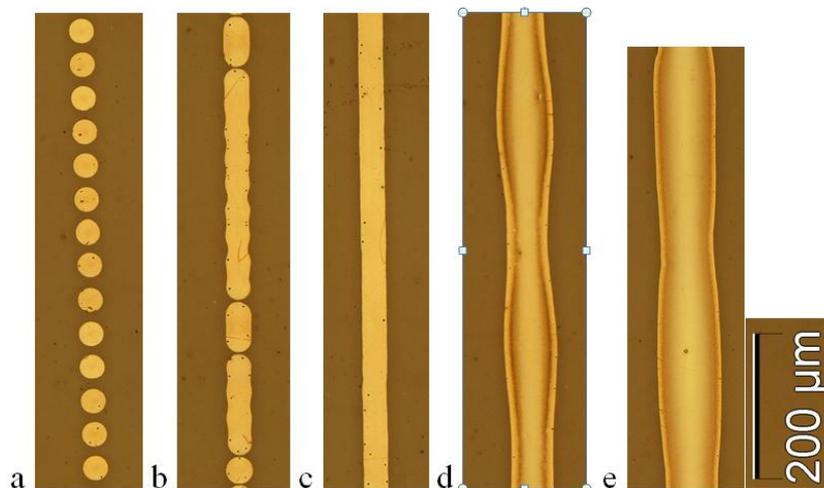


Figure 4.11 - Lignes conductrices à différentes résolutions :

(a) 423.33 dpi (b) 635 dpi (c) 846.67 dpi (d) 1270 dpi (e) 2540 dpi

Les gouttelettes d'encre commencent à se relier entre elles pour former des lignes ou pistes conductrices à partir d'une résolution d'impression de 636 dpi (distance entre gouttes $d = 40\mu m$) et forment une piste continue à partir de 725.17 dpi ($d = 35\mu m$). Par ailleurs, nous

avons également mesuré le diamètre des gouttelettes d'encres ainsi que la largeur de la ligne imprimée pour différentes résolutions. Des résultats obtenus, présentés sur la figure 4.11, on peut noter que le diamètre des gouttelettes d'encres a tendance à diminuer lorsque nous réduisons la distance inter-gouttelettes. Cela correspond à une coalescence des gouttelettes en une ligne, coalescence qui crée un effet capillaire qui tend à légèrement diminuer la largeur de ligne.

4.2.4. Température du substrat

La température du substrat	23°C	30°C	40°C	50°C	60°C
Le diamètre moyen des gouttelettes	47.68 μm	40.39 μm	40.09 μm	39.15 μm	38.14 μm

Tableau 4.1 - Diamètre moyen des gouttelettes à différentes températures de substrat

La température du substrat pendant le processus d'impression joue un rôle très important sur les dimensions. Pour étudier ce point nous imprimons alternativement des gouttelettes à différentes températures de substrat tandis que les autres paramètres sont maintenus inchangés. Après ces impressions, nous avons mesuré le diamètre moyen de 50 gouttelettes, ce qui donne les résultats présentés dans le tableau 4.1.

On peut voir qu'il y a une diminution significative du diamètre moyen des gouttelettes lorsque l'on augmente la température du substrat en passant de la température ambiante (23°C) à 60°C en chauffant le substrat. Ce phénomène s'explique par le fait qu'à plus haute température, la vitesse d'évaporation s'accroissant, la goutte dispose de moins de temps pour s'étaler. Ainsi, la taille des gouttelettes déposées est plus proche de celle à l'impact. Par ailleurs, les particules n'ont pas suffisamment de temps pour être transportées dans la gouttelette par le flux de solvant qui mène à l'effet rond de café [4.8].

Après avoir étudié les paramètres d'impression jet d'encre, nous avons choisi ceux qui sont les plus satisfaisants en ce qui concerne le temps d'impression, l'encre argent utilisée et la stabilité du processus d'impression. Nous avons aussi mis en place un procédé pour éliminer les bulles d'air de l'encre. Enfin, la résolution à 1270 dpi ($d = 20\mu\text{m}$) et la température du substrat à 40°C ont été choisies pour limiter l'effet rond de café sur les lignes imprimées.

4.3. Effet du procédé de dépôt-électrolytique et effet de peau sur l'antenne fabriquée

4.3.1. Effets du procédé de dépôt-électrolytique

4.3.1.1. Densité de courant du dépôt-électrolytique

Dans la section 4.1, nous avons déjà discuté sur les procédé de définition de la couche conductrice par 2 méthodes de fabrication (photolithographie et jet d'encre). Grâce à ceux-ci, les motifs de l'antenne peuvent être transférés sur le substrat sous la forme d'une couche conductrice (épaisseur de quelques centaines de nanomètres). Toutefois, l'épaisseur finale de l'antenne ne peut être atteinte et il faut poursuivre par un épaissement grâce au procédé de dépôt électrolytique pour atteindre l'épaisseur désirée (environ $10\mu\text{m}$). Un phénomène se produit souvent pendant le dépôt électrolytique sur les échantillons de petites tailles. Il s'agit de l'élargissement des motifs par rapport à la couche conductrice précédente.

Dans ce procédé, l'antenne est immergée dans la solution d'électrolyte, puis une couche de cuivre est déposée sur toute la surface de l'antenne pour augmenter son épaisseur. Cependant, le procédé de dépôt électrolytique se produit non seulement perpendiculairement à la surface mais aussi sur tous les cotés de l'antenne. Pour ces raisons, l'antenne change non seulement d'épaisseur mais aussi suivant les dimensions horizontales comme schématisé sur la figure 4.12.

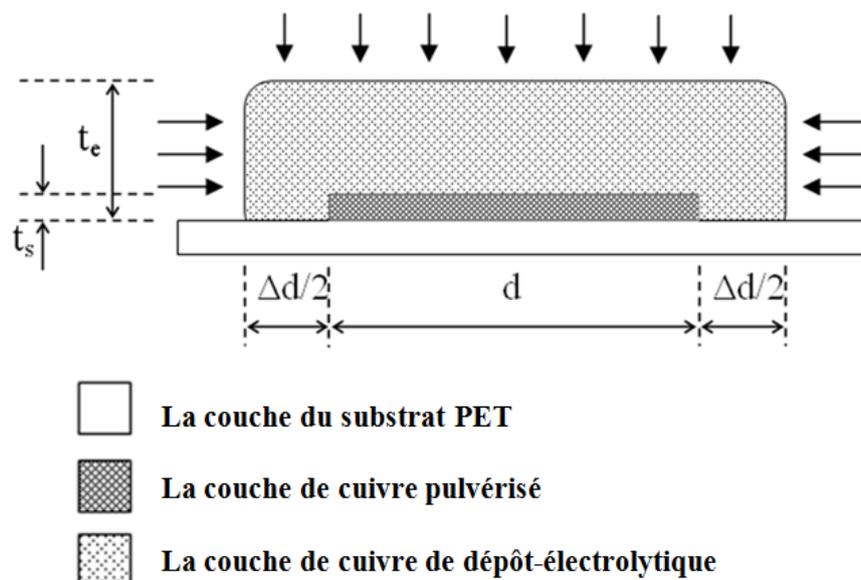


Figure 4.12 – Élargissement des motifs pendant le dépôt électrolytique

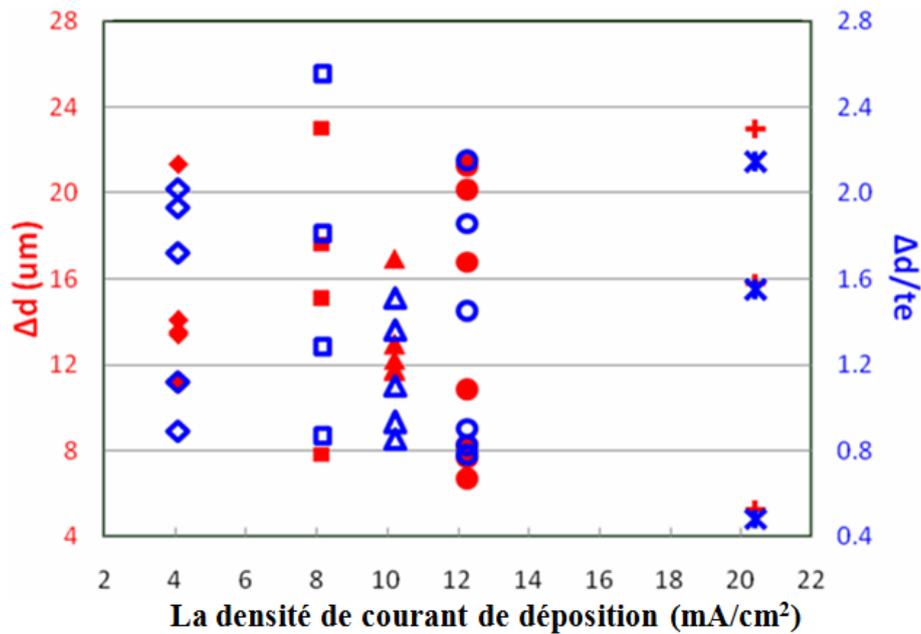


Figure 4.13 – Corrélation entre la densité de courant et l'erreur des dimensions après dépôt électrolytique ainsi que l'erreur sur l'épaisseur de l'antenne

De plus, après le dépôt électrolytique nous avons aussi étudié la relation entre la tolérance des dimensions de l'antenne et l'écart de l'épaisseur de l'antenne en fonction des densités de courant dans la solution d'électrolyte S_1 ; les résultats de cette étude sont présentés dans la figure 4.13. Pour la gamme de densité de courant d'électrodéposition considérée, la largeur de l'antenne après le dépôt-électrolytique est augmentée entre $5\mu\text{m}$ et $23\mu\text{m}$ par rapport aux dimensions initiales. En particulier, c'est pour la densité de 10 mA/cm^2 que la variation des dimensions est plus stable. De ces mêmes résultats, nous trouvons que l'écart le plus petit est égal à la moitié de l'épaisseur désirée ($10\mu\text{m}$) et le plus grand est de 2.5 fois cette épaisseur.

4.3.1.2. Vitesse du dépôt-électrolytique

La couche de cuivre qui est utilisée pour fabriquer l'antenne est évaluée par l'épaisseur et la résistivité moyennes selon les directions horizontales et verticales. L'épaisseur et la résistivité de l'antenne sont mesurées les valeurs moyennes respectivement par le dispositif Dektak 6M [4.9] et la sonde de 4 pointes (décrits dans la section 3.2). À partir des mesures selon la direction horizontale, pour 4 antennes fabriquées sur un même substrat comme montré sur la figure 4.14. La résistivité de la couche de cuivre est déterminée en multipliant la valeur de la résistance carrée avec l'épaisseur de la couche.

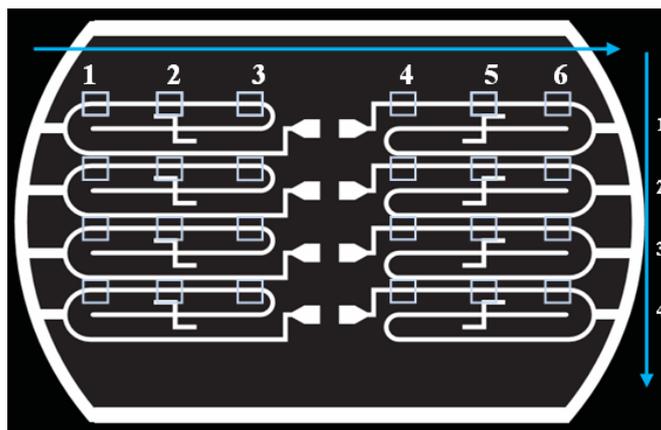


Figure 4.14 – Positions considérées pour la mesure de la résistivité et de l'épaisseur de l'antenne

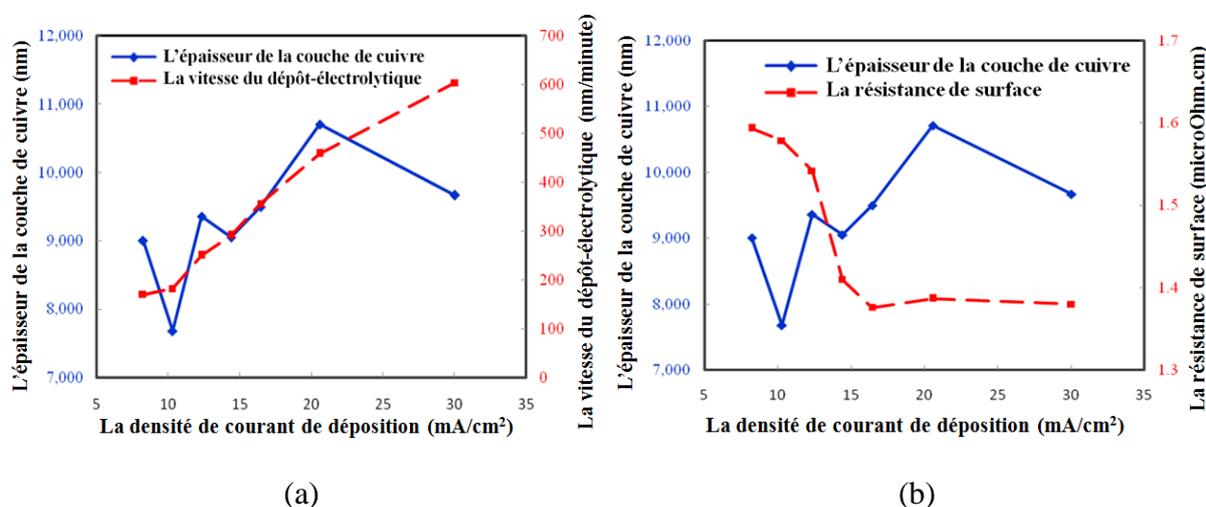


Figure 4.15 – Relations entre la vitesse du dépôt électrolytique (a) et la résistivité moyenne de l'antenne

(b) aux différentes densités de courant dans la même solution S_1

La figure 4.15 (a) montre l'épaisseur du cuivre et la vitesse du dépôt-électrolytique en fonction de la densité de courant sur la couche primaire de cuivre pour une même épaisseur de 370 nm et dans la même solution d'électrolyte S_1 . Globalement, le taux de dépôt de la couche augmente avec l'accroissement de la densité de courant. Toutefois, avec une même quantité d'électricité, l'épaisseur moyenne de la membrane varie beaucoup en fonction de la densité de courant d'électrodéposition. Ceci montre que la densité de courant est un facteur très important dans le processus de dépôt électrolytique. En outre, l'intensité du courant de dépôt-électrolytique influence aussi beaucoup la résistivité de la couche de cuivre. La figure 4.15 (b) montre la variation de la résistivité en fonction de la densité du courant sur la couche

primaire d'épaisseur 370 nm. Dans la gamme d'intensité de courant étudiée, la résistivité est relativement élevée lorsque la densité de courant de dépôt électrolytique varie entre 8 mA/cm² et 12 mA/cm². Au-delà, elle diminue rapidement à partir de la densité de 14 mA/cm² et on obtient une valeur optimale d'environ 2,25 μΩ.cm pour une densité de courant de 16 mA/cm².

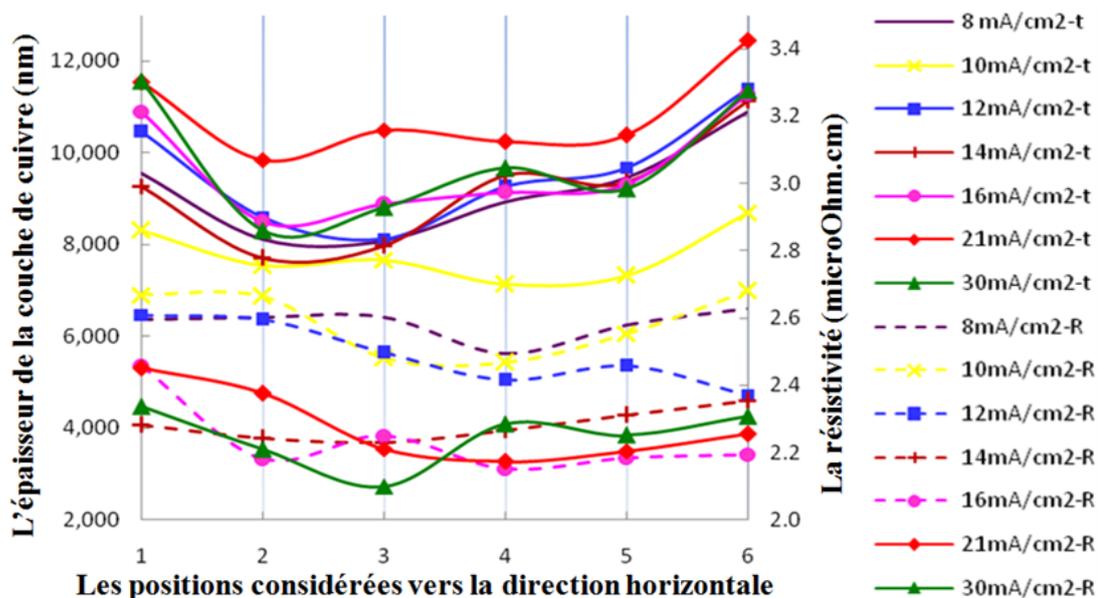


Figure 4.16 – Répartition de l'épaisseur et de la résistivité moyenne dans la direction horizontale de l'échantillon

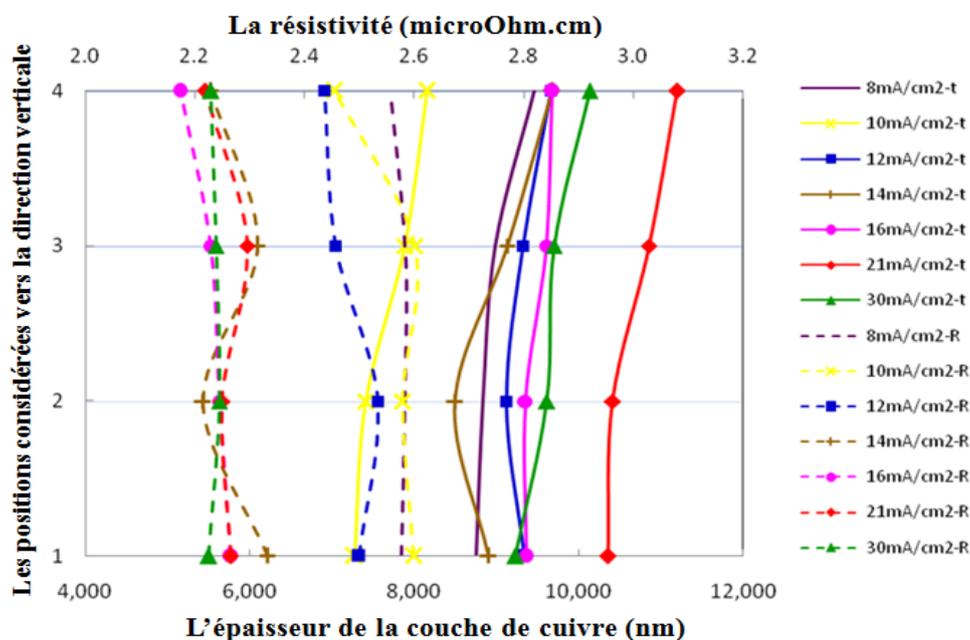


Figure 4.17 – Répartition de l'épaisseur et de la résistivité moyenne dans la direction verticale de l'échantillon

L'épaisseur et la résistivité moyenne de l'antenne après dépôt électrolytique sont considérées également dans les directions horizontales et verticales. Les résultats de ces études sont présentés sur les figures 4.16 et 4.17. Pour la direction horizontale de l'échantillon (Figure 4.16), la répartition de l'épaisseur moyenne est en forme de W. C'est-à-dire que l'épaisseur au bord de l'échantillon est plus élevée que celle au milieu. Par ailleurs, la différence d'épaisseur sur un même échantillon selon la direction horizontale est relativement importante (entre 1,5 μm et 3,3 μm). Dans la direction verticale (Figure 4.17), l'épaisseur est plus grande au bord de l'échantillon mais la variation de l'épaisseur est plus petite que celle de la direction horizontale (entre 0,5 μm et 1,2 μm). En particulier, l'échantillon à la densité de 10 mA/cm^2 a la meilleure uniformité d'épaisseur selon la direction horizontale tandis que la densité de 16 mA/cm^2 procure la meilleure uniformité selon la direction verticale. De même, la répartition de la résistivité de l'échantillon fluctue plus dans la direction horizontale alors que la répartition verticale est meilleure et plus constante avec la densité de courant optimale de 14 mA/cm^2 .

Pour évaluer l'influence de l'épaisseur de la couche primaire sur la résistivité après le dépôt électrolytique, nous examinons la résistivité de la couche dans la solution d'électrolyte S_1 pour différentes épaisseurs de la couche primaire. La couche primaire utilisée est la même couche de cuivre pulvérisée sur le substrat PET à la puissance de pulvérisation de 100 W avec un temps variant de 1 à 5 minutes. L'épaisseur et la résistivité de la couche primaire sont extrapolées à partir des résultats de fabrication précédents dans la gamme de 25 nm à 125 nm comme sur les figures 4.18 et 4.19.

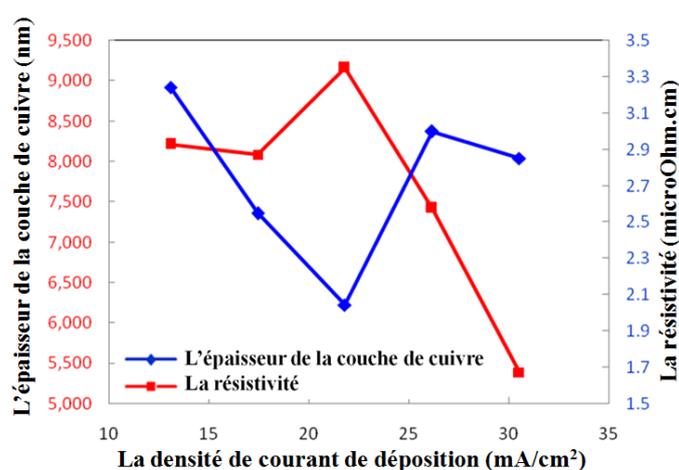


Figure 4.18 – Epaisseur et résistivité de la couche pulvérisée à 100 W pendant 3 minutes suivi d'un dépôt électrolytique dans la solution S_1

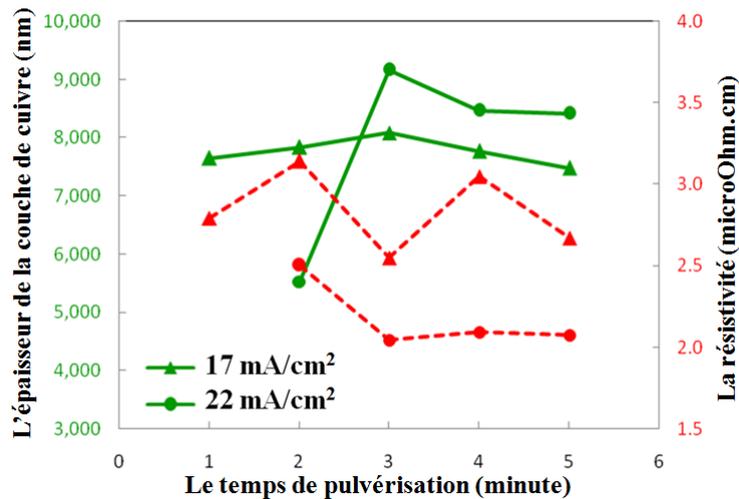


Figure 4.19 – Épaisseur et résistivité de la couche pulvérisée à 100 W pour les densités de courant de 17 mA/cm² et 22 mA/cm²

La figure 4.18 montre l'épaisseur et la résistivité de l'antenne obtenue à partir d'une couche primaire pulvérisée à 100 W pendant 3 minutes sous différentes densités de courant. Parmi les densités de courant considérées, la résistivité atteint la valeur optimale dans la gamme entre 15 mA/cm² et 25 mA/cm². Nous avons sélectionné les densités de courant à 17 mA/cm² et 22 mA/cm² afin d'étudier la résistivité de l'antenne obtenue à partir de différentes épaisseurs de la couche primaire dans la même solution d'électrolyte S₁ comme présenté sur la figure 4.19. Dans les deux cas, avec la même quantité de courant de 0,2 Ah, la couche par dépôt électrolytique sur la couche de pulvérisation à 100 W pendant 3 minutes est la plus épaisse et la plus faible en résistivité. Toutefois, la résistivité pour 17 mA/cm² est relativement élevée et instable. En revanche, la couche obtenue à 22 mA/cm² a la plus faible résistivité tandis que les valeurs de résistivité sont aux alentours de 2.2 μOhm.cm pour un temps de pulvérisation de 5 minutes.

4.3.2. Effet de l'épaisseur de peau

4.3.2.1. Épaisseur de peau

L'effet de peau qui concerne la pénétration d'une onde électromagnétique dans un matériau conducteur est modélisé par le paramètre appelé épaisseur de peau. En effet l'amplitude de l'onde diminuera d'un facteur d'environ 536 fois en passant de la surface vers l'intérieur du matériau sur une distance très courte à savoir l'épaisseur de peau [4.10-4.11].

Par définition, nous avons l'épaisseur de peau :

$$d = \sqrt{\frac{2}{\omega \sigma m_0}} \quad (4.2)$$

Dans cette formule:

ω : la pulsation (rad/s)

m_0 : la perméabilité du vide (H/m)

σ : la conductivité du matériau (S/m)

Conducteur	σ (S/m)	δ (μm)
Argent	$6,3 \cdot 10^7$	2,05
Cuivre	$5,96 \cdot 10^7$	2,1
Or	$4,52 \cdot 10^7$	2,42
Aluminium	$3,77 \cdot 10^7$	2,65

Tableau 4.2 – Épaisseur de peau pour différents matériaux conducteurs à la fréquence de 900 MHz

Cet effet de peau induit une augmentation importante de la résistance électrique du conducteur ainsi qu'une réduction de l'inductance dans le conducteur. Considérons un conducteur cylindrique de section circulaire de rayon a , parcouru par un courant sinusoïdal selon l'axe z à la pulsation ω comme illustré sur la figure 4.20.

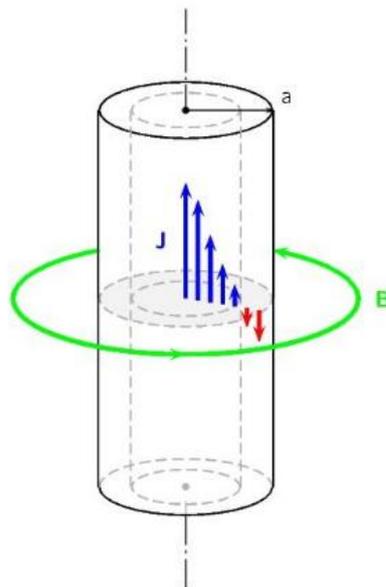


Figure 4.20 - Modèle d'une ligne conductrice de forme cylindrique

L'amplitude du champ dans le conducteur décroît d'un facteur $1/e$ (36,8%) après avoir pénétré à la profondeur de l'épaisseur de peau. Cette épaisseur caractéristique dépend de la

fréquence. Aux fréquences micro-ondes, cette épaisseur est très petite. Le tableau 4.2 présente les épaisseurs de peau de différents matériaux conducteurs usuels pour la fréquence de 900 MHz.

Supposons que la conductivité est très grande pour que nous puissions ignorer le courant de déplacement par rapport au courant de conduction. Les champs électriques et magnétiques s'expriment par :

$$\dot{E} = \frac{k \dot{I}}{2\pi\sigma a} * \frac{J_0(kr)}{J_1(ka)} \quad (4.3)$$

$$\dot{H} = \frac{k \dot{I}}{2\pi a} * \frac{J_1(kr)}{J_1(ka)} \quad (4.4)$$

Où $J_i(kr)$ sont les fonctions de Bessel de i -ème classe. Ils indiquent la répartition de la densité de courant dans le conducteur et peuvent être exprimés sous forme complexe:

$$J_0(kr) = b_0(r) e^{(i\beta_0 r)} \quad (4.5)$$

$$J_1(kr) = b_1(r) e^{(i\beta_1 r)} \quad (4.6)$$

Des champs magnétiques et électriques, on déduit la résistance et l'inductance dans le conducteur cylindrique comme sur la figure 4.20 [4.12] :

$$R = \frac{1}{2\pi a} \sqrt{\frac{\omega\mu}{\sigma}} \frac{b_0(a)}{b_1(a)} \cos\left[\beta_0(a) - \beta_1(a) - \frac{\pi}{4}\right] \quad (4.7)$$

$$L = \frac{1}{2\pi\omega a} \sqrt{\frac{\omega\mu}{\sigma}} \frac{b_0(a)}{b_1(a)} \sin\left[\beta_0(a) - \beta_1(a) - \frac{\pi}{4}\right] \quad (4.8)$$

De ce modèle, nous pouvons conclure que la résistance et l'inductance du conducteur vont changer avec son épaisseur (correspondant à son rayon dans le cas du conducteur cylindrique). Par conséquent, ils changent l'impédance d'entrée de l'antenne. Pour vérifier ce modèle, nous effectuons des simulations pour différentes épaisseurs et résistivités pour la conception HO-01 décrite dans le chapitre 2. Ici, nous utilisons le logiciel de CST Microwave Studio qui est un logiciel de simulation électromagnétique utilisant la méthode de FDTD

(Finite-Difference in Time-Domain) [4.13]. On utilise les mêmes paramètres pour le substrat et les dimensions optimisées que ceux obtenus au chapitre 2.

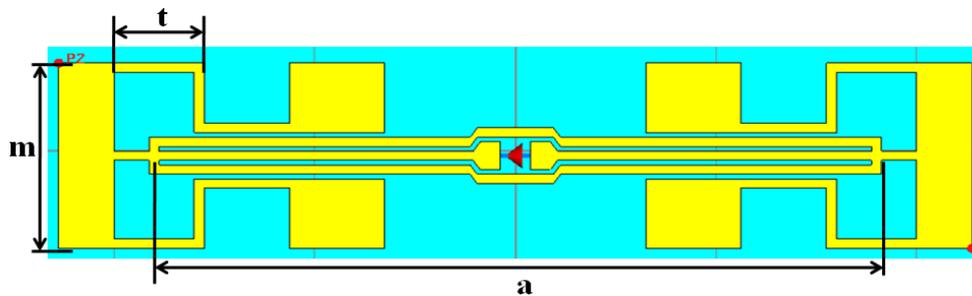


Figure 4.21 – Géométrie de l'antenne de l'étiquette HO-01

Le coefficient de réflexion et l'impédance de l'antenne peuvent être mesurés avec l'Analyseur de Réseau Vectoriel (VNA) ZVB8 comme présenté sur la figure 4.22. Cet analyseur couvre la gamme de fréquence de 300 kHz à 8 GHz et la calibration du VNA doit être exécutée avant la mesure afin de corriger toutes les erreurs sur les résultats de mesure [4.14]. La calibration est réalisée grâce au kit de calibration fourni avec le VNA. Une fois la calibration réalisée on peut mesurer le dispositif (Device Under Test) et obtenir les paramètres-S réels du DUT [4.15]. La technique de calibration utilisée est la technique courante dite SOLT (short-open-load-thru). Dans cette technique le kit de calibration est constitué d'un court-circuit, d'un circuit ouvert et d'une charge adaptée [4.16].



Figure 4.22 - Mesure de l'impédance des prototypes HO-01 avec l'Analyseur de Réseau Vectoriel ZVB8 de Rohde & Schwarz

4.3.2.2. Effet de peau sur les caractéristiques de l'antenne

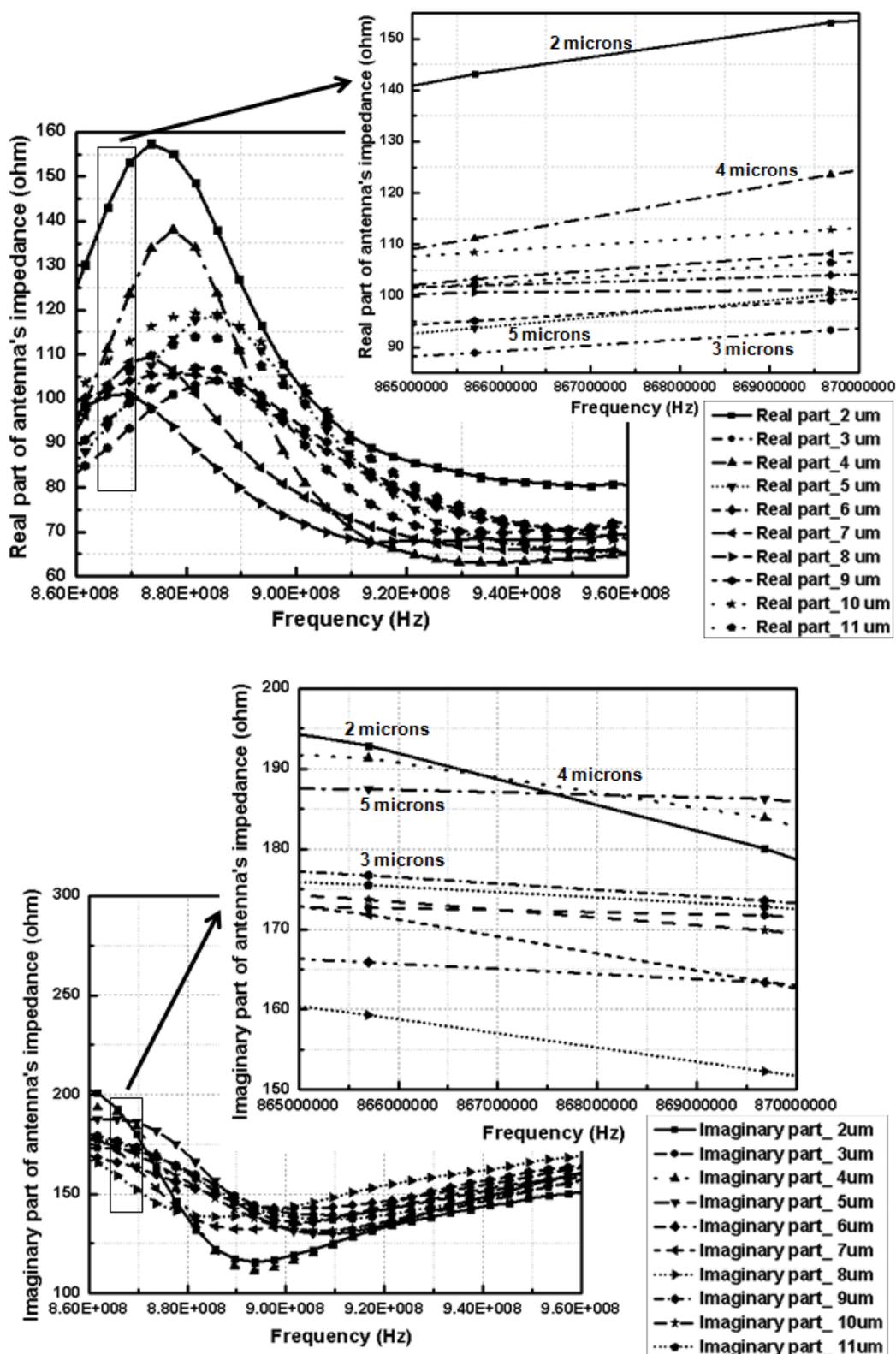


Figure 4.23 - Partie réelle et partie imaginaire de l'impédance de l'antenne HO-01 aux différentes épaisseurs dans la gamme RFID UHF (860 MHz – 960 MHz)

Dans cette partie, nous allons fabriquer différents prototypes du HO-01 à différentes valeurs d'épaisseur du cuivre afin d'étudier l'effet de l'épaisseur de peau sur les caractéristiques de l'antenne. Avec les prototypes du HO-01 d'épaisseurs entre 2 microns et 11 microns (l'incrément d'épaisseur est de 1 micron et la tolérance du processus de fabrication est ± 0.1 micron), nous allons mesurer l'impédance de l'antenne. Nous travaillons dans la gamme RFID UHF soit (860 MHz – 960 MHz). Dans cette gamme de fréquence l'épaisseur de peau théorique du cuivre massif est de l'ordre de 2 μm comme le montre le tableau 4.2. L'épaisseur de peau anticipée sera alors de 2 fois cette valeur (environ 5 microns) afin de passer du modèle de conducteur cylindrique au modèle de ligne de transmission.

À partir des résultats expérimentaux (Figure 4.23 et 4.24), nous trouvons que, si l'épaisseur de cuivre est inférieure à l'épaisseur de peau (environ 5 micron), l'impédance d'entrée de l'antenne varie beaucoup dans la gamme de fréquence entre 860 MHz et 960 MHz. La résistance augmente d'un facteur 2 et l'inductance se réduit du même facteur (figure 4.23 et figure 4.24). Ces résultats sont cohérents avec les 2 formules (3) et (4) ci-dessus. Par conséquent, cela conduit à un changement de 20 MHz sur la fréquence de résonance. C'est à dire que l'adaptation entre l'impédance de l'antenne et la puce RFID n'est plus satisfaisante, provoquant ainsi une dégradation de la portée de lecture de l'étiquette. En conclusion, nous devons nous assurer que l'épaisseur de la couche métallique est toujours supérieure à l'épaisseur de peau afin de maintenir les performances de l'étiquette RFID.

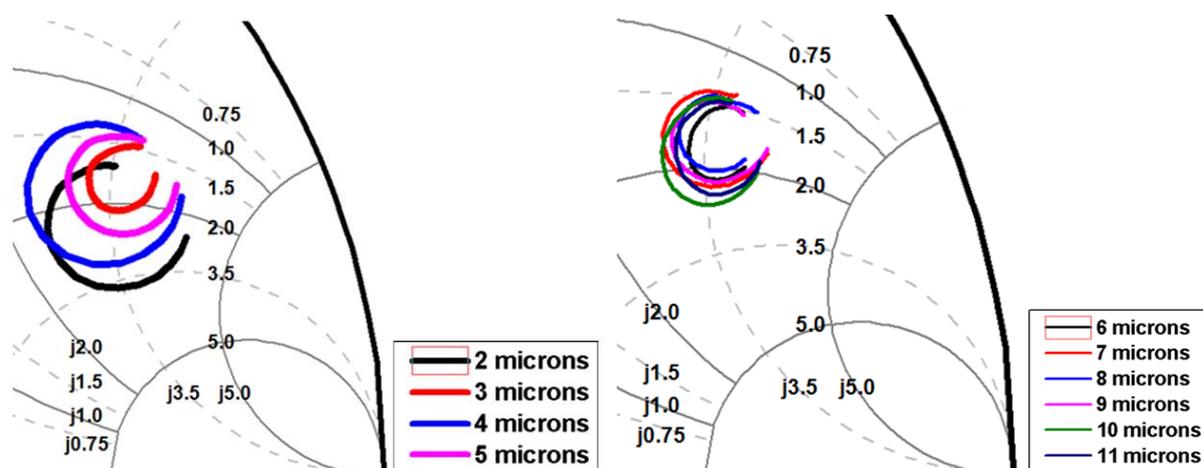


Figure 4.24 - Abaque de Smith de l'antenne HO-01 aux différentes épaisseurs dans la gamme RFID UHF (860 MHz – 960 MHz)

4.4. Effet de la connexion entre la puce et l'antenne

Une étiquette RFID passive est composée d'une antenne déposée sur un substrat qui est connectée avec une puce (circuit intégré). Pendant la conception de l'antenne pour étiquette RFID, il faut adapter l'impédance de l'antenne Z_a à la valeur conjuguée de l'impédance de la puce Z_c afin de maximiser la puissance transférée [4.17]. L'impédance d'antenne est contrôlée par la conception de l'antenne et influencée par le processus de fabrication tel que décrit dans les sections 4.1 et 4.2 [4.18-4.20]. En supposant que la fabrication de l'antenne est bien maîtrisée et que nous pouvons facilement adapter l'impédance de l'antenne à la valeur souhaitée de l'impédance de puce par des simulations numériques, il restera toujours à réaliser la connexion entre l'antenne et la puce RFID. Cette connexion doit être fiable et reproductible. Cependant l'impédance de la puce est dépendante du processus de connexion sur le substrat flexible, les caractéristiques des matériaux utilisés et tous les paramètres qui peuvent modifier l'impédance d'origine. Ce point doit être étudié. Une étude préliminaire a déjà été réalisée lors de la connexion de puce par l'impression de jet d'encre au Laboratoire de Nanotechnologie (LNT).

La figure 4.25 montre le processus de connexion entre la puce et l'antenne sur le substrat PET. Tout d'abord, nous ouvrons un orifice dans le PET aux dimensions de la puce (largeur 2 mm et longueur 1,8 mm), puis nous positionnons la puce dans ce trou en affleurement du cote de l'antenne. Nous réalisons la connexion de sorte que les connexions électriques de la puce soient dans le plan de l'antenne. Pour ce faire nous utilisons du scotch adhésif sur la face de la puce afin de la maintenir à plat avec la surface du PET. Puis, nous retournons la feuille de PET et nous appliquons une petite goutte de colle sur l'autre face pour couvrir la puce et le PET autour. Après recuit de la colle, on peut enlever le scotch et nettoyer les deux surfaces avec un solvant approprié avant l'impression.

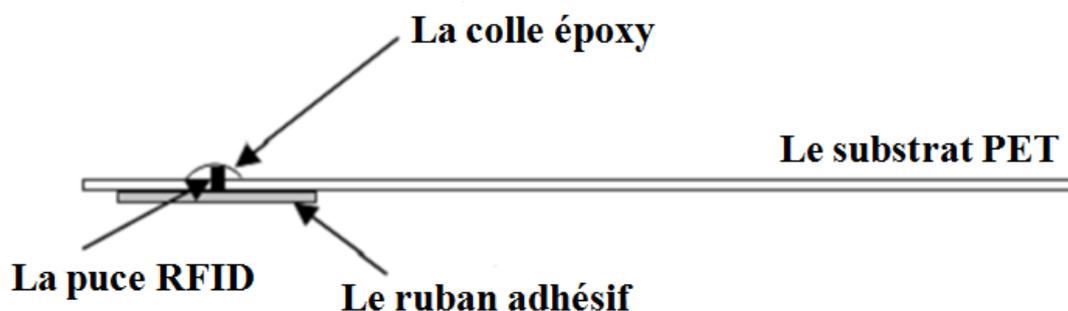


Figure 4.25 - Connexion de la puce avec l'antenne

L'avantage de ce processus est son coût faible et la possibilité de le réaliser en laboratoire. D'autres méthodes de connexion de la puce au substrat flexible sont disponibles comme la technologie flip-chip. Cependant, il faut des équipements spécifiques qui sont souvent chers et non disponibles au laboratoire LNT. Toutefois dans notre cas, il s'agit d'un processus manuel avec des nombreux paramètres (comme les dimensions du trou et la quantité de colle déposée sur la puce) qui peuvent influencer les performances des étiquettes fabriquées. Dans la figure 4.26, l'écart entre les bords de la puce et la feuille de PET ne permet pas une bonne connexion entre la puce et l'antenne. L'impédance de la puce connectée change à chaque fabrication ce qui conduit à une solution non optimisée.

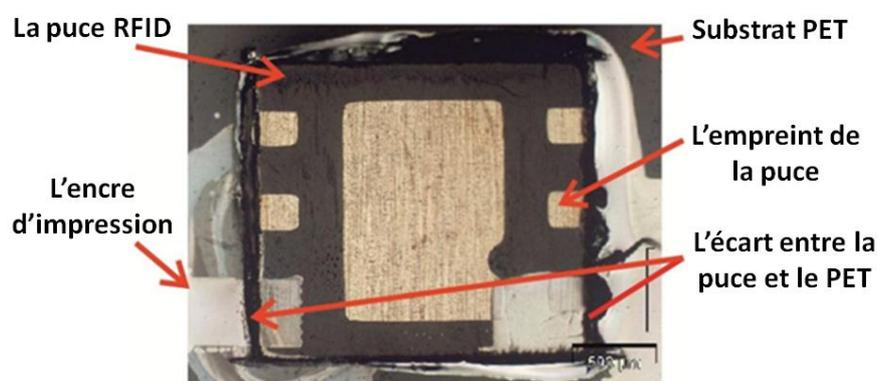


Figure 4.26 - Connexion avec défaut entre la puce et l'antenne

Le substrat en polyéthylène téréphtalate (PET), avec les propriétés indiquées dans la section 3.1, a été choisi pour plusieurs raisons. Le PET est un substrat souple qui s'adapte sur des surfaces différentes comme les emballages, les plastiques rigides ou des bouteilles en verre... Il peut être utilisé dans diverses applications. Il a également une température de transition vitreuse compatible avec l'étape de durcissement après l'impression de l'antenne. Le PET est très bon marché ce qui est très important dans le contexte de la réduction des coûts partout où il est possible [4.21-4.22].

Comme cela a été dit dans la section précédente, l'antenne de l'étiquette RFID doit avoir une valeur d'impédance presque égale à la valeur conjuguée de celle de la puce afin de maximiser la puissance transférée à la puce. Ainsi, nous devons connaître la valeur d'impédance de la puce afin d'adapter l'impédance de l'antenne. La puce RFID utilisée dans cette étude est la puce XRAG2 de ST Microelectronics qui a une impédance d'entrée $Z_c = 10 - j245 \Omega$ donnée par le fournisseur [4.23]. La Figure 4.27 montre toutes les étapes au cours de la fabrication des étiquettes RFID où l'impédance peut être modifiée [4.24].

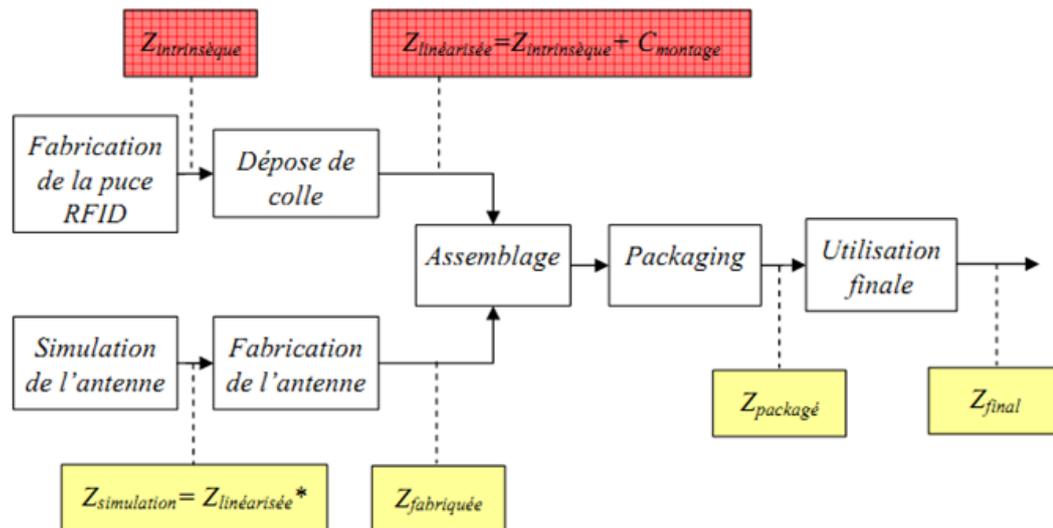


Figure 4.27 - Perturbations et variations d'impédance le long de la chaîne d'assemblage de l'étiquette RFID

Pour cette étude, nous devons considérer l'impédance parasite provenant des procédés de packaging et de connexion à la puce RFID. Le packaging de la puce a été choisi par le fournisseur et nous ne pouvons plus changer cette valeur d'impédance mais cette valeur réelle peut être mesurée avec le VNA. On obtient une valeur $(20 - j255\text{Ohm})$ [4.25]. De plus, nous devons considérer l'impédance parasite créée à cause du collage de la puce sur le substrat PET, du trou contenant la puce et de l'épaisseur des zones de connexion. Au Laboratoire de NanoTechnologie, nous avons étudié ces trois facteurs indépendamment afin d'obtenir finalement la valeur d'impédance en fonction du volume de la goutte de colle, la taille du trou et l'épaisseur des zones de connexion de la puce. Le but de ces études est d'obtenir un procédé de connexion entre la puce et l'antenne stabilisé, bas cout et répétable afin de réduire le prix final de l'étiquette fabriquée en grande quantité.

L'écart entre la puce et le substrat PET est le paramètre le plus important à contrôler. Un écart trop grand entre les zones de connexion de la puce et le bord du substrat PET ne peut pas être rempli par l'encre qui créent des connexions faibles ou inexistantes. Nous devons nous assurer que l'écart est inférieur à $160\ \mu\text{m}$ des 2 côtés de la puce (à gauche et à droite) afin d'avoir un contact électrique entre la puce et l'antenne comme sur la figure 4.28. En effet, l'impression de jet d'encre sur les zones de connexion de la puce après dépôt électrolytique est un bon moyen de le contrôler. Notre étude sur la tolérance d'injection de la colle montre que cette étape ne semble pas influencer sur l'impédance de la puce. Cette étude valide la fabrication des étiquettes RFID au Laboratoire de Nanotechnologie tout en

maintenant la fiabilité de l'antenne par l'impression jet d'encre et contribue au développement de la technologie RFID ouvrant de nombreuses applications au Vietnam.

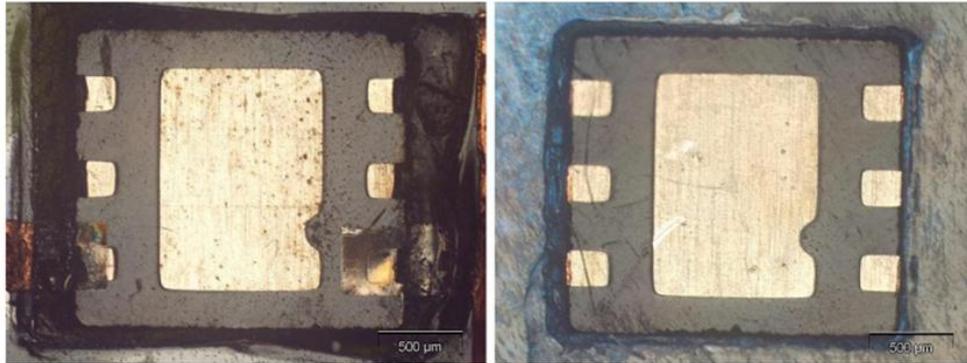


Figure 4.28 - Effets de l'écart entre la puce et le substrat PET sur la connexion entre la puce et l'antenne

4.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons examiné les effets des procédés de fabrication sur les caractéristiques de l'antenne finale. Dans ces études, nous avons considéré les paramètres qui affectent les caractéristiques de l'antenne et nous avons déterminé les paramètres optimisés pour l'ajustement entre la conception et la fabrication. De plus, à partir du modèle de l'effet de peau et les mesures réelles faites au Laboratoire de Nanotechnologie, nous avons confirmé l'influence importante de l'effet de peau sur les caractéristiques de l'antenne et au final les performances de l'étiquette. La simulation sous CST nous a permis de prédire ces effets et d'ajuster nos conceptions. Toutefois, les résultats expérimentaux partiels obtenus doivent encore être approfondis pour assurer une reproductibilité optimale.

Bibliographie – Chapitre 4

- [4.1]. Luong Hong Dung (2009), “Research of fabricating antennas for RFID applications”, Memoire de fin d’étude – Département de Technologie de Matériaux, Institut Polytechnique de Ho Chi Minh ville, Vietnam
- [4.2]. Tran Huy Nam, Tran Nhan Ai, Nguyen Tran Thuat, Dang Mau Chien, Eric Fribourg-Blanc Luong Hong Dung, "Study of RFID antenna fabrication," in 2nd International Workshop in Nanotechnologies and Applications (IWNA), 2009, pp. 622-625
- [4.3]. Son Dat Nguyen, Duc Hoang Thai Pham, Thuat Nguyen-Tran, Chien Mau Dang and Eric Fribourg-Blanc, Ai Nhan Tran, "A new platform for RFID research in Vietnam", Adv. Nat. Sci.: Nanosci. Nanotechnol, vol. 1, p. 045015, 2010
- [4.4]. S. Hayakawa and K. Wasa, Handbook of sputter deposition technology: Noyes Publications, 1992
- [4.5]. P. C. Duineveld, "The stability of ink-jet printed lines of liquid with zero receding contact angle on a homogeneous substrate," Journal of Fluid Mechanics, vol. 477, pp. 175-200, 2003
- [4.6]. Meaghan McMurrin, Dr. Dan V. Goia Krishna Balantrapu, "Inkjet Printing of Silver Nanoparticles for Electronic Applications", Digital library of Electronic Components Industry Association. Available from: <http://ecadigitallibrary.com/detail.php?cid=9&pid=195>
- [4.7]. J.P. Montoya, C.J. Shanley, S.I. Merz, R.H. Bartlett, "Plasma leakage through microporous membranes: role of phospho-lipids", Journal of ASAIO, Vol. 38 (1992), pp. 399-405
- [4.8]. D. Kim, S. Jeong, J. Moon, "Ink-Jet printing of silver conductive tracks on flexible substrates", Molecular Crystals & Liquid Crystals, Vol. 459, pp. 325-335, 2006
- [4.9]. Veeco Instruments, Dektak 6M Manual, 2006
- [4.10]. S. Zollmann, et al., "Theory of the skin effect of an electrically conducting spherical shell," Czechoslovak Journal of Physics B, vol. 29, pp. 1224-1236, 1979
- [4.11]. P. Silvester, "Modal network theory of skin effect in flat conductors," Proceedings of the IEEE, vol. 54, pp. 1147-1151, 1966
- [4.12]. D. M. Pozar, "Microwave Engineering", second edition: Wiley, 1998

- [4.13]. CST Microwave Studio. Available online from: <http://www.cst.com/Content/Products/MWS/Overview.aspx>
- [4.14]. Quick Start Guide of Vector Network Analyzer R&S® ZVB4/ZVB8/ZVB14/ZVB20, 2009
- [4.15]. Applications note of Agilent Technologies, "In fixture measurements using vector network analyzers", AN 1287-9, 2006. Available from: <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5968-5329E.pdf>
- [4.16]. L.W. Mayer, A.L. Scholtz, Sensitivity and impedance measurements on UHF RFID Transponder Chips, ICRFE, Vienna University of Technology
- [4.17]. D.H. Redinger, Solution processing techniques for low-cost circuit fabrication, PhD thesis, EECS, University of California at Berkeley, 2007
- [4.18]. Clyde F. Coombs, Jr., "ELECTROPLATING," in Printed Circuits Handbook, Sixth Edition, ed: McGraw Hill Professional, Access Engineering, 2008
- [4.19]. M. Köhler, "Wet-Chemical Etching Methods," in Etching in Microsystem Technology, ed: Wiley-VCH Verlag GmbH, 2007, pp. 29-110
- [4.20]. K. Wasa and S. Hayakawa, Handbook of sputter deposition technology, 1992.
- [4.21]. H. Gleskova, I. C. Cheng, S. Wagner, J. C. Sturm, and Z. G. Suo, "Mechanics of thin-film transistors and solar cells on flexible substrates," Solar Energy, vol. 80, pp. 687-693, 2006
- [4.22]. Dimatix Fujifilm, Dimatix material printer: DMP-2800 Series User Manual, 2008
- [4.23]. STMicroelectronics datasheet, XRAG2 Datasheet, Available from: <http://www.alldatasheet.com/pdf/131013/STMICROELECTRONICS/XRAG2.html>
- [4.24]. A. Pouzin, "Qualification d'éléments RFID en environnement opérationnel", PhD Thesis, Institut Polytechnique de Grenoble, 2009
- [4.25]. M. C. Dang, N. A. Tran, A. Hoang, D. S. Nguyen, E. Fribourg-Blanc, H. P. Phan, H. C. T. Vuong, V. H. Nguyen, T. T. Pham, T. Nguyen-Tran, "Contribution on UHF RFID antenna design and tag fabrication," in IEEE International Conference on RFID – Technologies and Applications (RFID-TA), 2011, pp. 463-468

Chapitre 5

Considération des effets de l'environnement sur la permittivité des matériaux et caractérisation de la permittivité des aliments

Les progrès récents dans les réseaux de capteurs sans fil (Wireless Sensor Networks, WSN) [5.1–5.4] et leur intégration avec la téléphonie mobile et internet font naître un nouveau aspect d'investigation pour le développement de capteurs sans fils et à très faible consommation. De tels capteurs pourraient être mis en réseau et couvrir des zones géographiques de tailles importantes. Les applications types de ce type de configurations concernent la surveillance de l'environnement, l'habitat et la domotique, la santé, le suivi, la sécurité et la surveillance des installations... Ce chapitre va introduire, non seulement les approches d'intégration de la fonction capteur aux tag RFID UHF, mais aussi quelques applications de cette idée pour la conception du capteur sans fil RFID.

Table des matières

CHAPITRE 5	122
5.1. LES FACTEURS DE CONTROLE DU CHANGEMENT DE LA PERMITTIVITE	125
5.1.1. LES FACTEURS QUI AFFECTENT LA PERMITTIVITE DES MATERIAUX	125
5.1.2. L'EFFET DE LA FREQUENCE.....	126
5.1.3. L'EFFET DE LA TEMPERATURE	128
5.1.4. L'EFFET DE L'HUMIDITE.....	129
5.1.5. LES EFFETS DE LA COMPOSITION INTERNE.....	130
5.1.6. LES EFFETS DE LA STRUCTURE	131
5.1.7. EFFET DU TEMPS DE STOCKAGE	131
5.1.8. CERTAINS MODELES MATHEMATIQUES POUR LE CALCUL DE LA PERMITTIVITE DE LA COMPOSITION DES MATERIAUX	132
5.2. LA CARACTERISATION DE LA PERMITTIVITE DES PRODUITS ALIMENTAIRES	133
5.2.1. LES METHODES DE CARACTERISATION DE LA PERMITTIVITE DU MATERIAU	133
5.2.2. LA METHODE DE LA SONDE COAXIALE	135
5.2.2.1. <i>Les propriétés de la méthode de la sonde coaxiale.....</i>	<i>135</i>
5.2.2.2. <i>Le circuit équivalent et les formules de calcul pour la sonde coaxiale</i>	<i>136</i>
5.3. LES MESURES AVEC LA METHODE DE LA SONDE COAXIALE	138
5.3.1. LA CONFIGURATION DE LA MESURE	138
5.3.2. LES CONTRAINTES DE L'ECHANTILLON A CARACTERISER	139
5.3.3. CALIBRATION DU DISPOSITIF AVANT LA CARACTERISATION	139
5.4. LES CARACTERISATIONS EXPERIMENTALES.....	140
5.4.1. LA PREPARATION DES ECHANTILLONS	140
5.4.2. EXECUTION DES MESURES.....	143
5.4.2.1. <i>Le fromage.....</i>	<i>143</i>
5.4.2.2. <i>Le porc et le boeuf.....</i>	<i>145</i>
5.4.2.3. <i>Les résultats obtenus</i>	<i>146</i>
5.5. CONCLUSIONS	150
BIBLIOGRAPHIE – CHAPITRE 5	151

LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX

FIGURE 5.1 – EXEMPLE DES PROPRIETES DIELECTRIQUES DU BUTYL-ALCOOL A 20°C	126
FIGURE 5.2 - CHANGEMENT DE LA PERMITTIVITE DANS LES ZONES DE DISPERSION α, β, γ	127
FIGURE 5.3 - EFFETS DES DIFFERENTS MECHANISMES SUR LE FACTEUR DE PERTE DES PRODUITS ALIMENTAIRES	127
FIGURE 5.4 – EFFET DE LA TEMPERATURE SUR LE FACTEUR DE PERTE DIELECTRIQUE DE NaCl A 3 TEMPERATURES DIFFERENTES.....	128
FIGURE 5.5 - PERMITTIVITE DE QUELQUES ALIMENTS EN FONCTION DE LA TEMPERATURE.....	128
FIGURE 5.6 - LA PERMITTIVITE DE QUELQUES ALIMENTS EN FONCTION DE L'HUMIDITE	129
FIGURE 5.7 - LA PERMITTIVITE DU BOEUF SELON LES ORIENTATIONS DES TISSUS AUX DIFFERENTES FREQUENCES: A. 27MHz, B. 915 MHz, C. 1800 MHz.....	131
FIGURE 5.8 - CHANGEMENT DE LA PERMITTIVITE DE LA VIANDE DE BOEUF EN FONCTION DU TEMPS DE STOCKAGE AUX DIFFERENTES FREQUENCES.....	132
FIGURE 5.9 - LES METHODES DE CARACTERISATION DE LA PERMITTIVITE DU MATERIAU POPULAIRES.....	134
FIGURE 5.10 - LE CIRCUIT EQUIVALENT DE LA SONDE COAXIALE.....	136
FIGURE 5.11 - LA SONDE COAXIALE DANS LE VIDE ET EN CONTACT AVEC L'ECHANTILLON DE MESURE.....	136
FIGURE 5.12 - LA METHODE DE LA SONDE COAXIALE PAR REFLEXION	138
FIGURE 5.13 - LA SONDE COAXIALE DE AGILENT.....	139
FIGURE 5.14 - LA CALIBRATION DU DISPOSITIF AVEC LES STANDARDS DE CALIBRATION	140
FIGURE 5.15 - LA CONFIGURATION DES DISPOSITIFS POUR LA METHODE DE LA SONDE COAXIALE	140
FIGURE 5.16 - LA PROCEDURE DE MESURE POUR LES PRODUITS ALIMENTAIRES.....	141
FIGURE 5.18 - LA CARACTERISATION DE LA PERMITTIVITE DU FROMAGE.....	143
FIGURE 5.19 - LES POSITIONS DE MESURE DU pH ET LA PERMITTIVITE POUR LE FROMAGE.....	143
FIGURE 5.20 - LA CARACTERISATION DE LA PERMITTIVITE ET LE pH POUR LA VIANDE	145
FIGURE 5.21 - LES POSITIONS DE MESURE DU pH ET LA PERMITTIVITE POUR LA VIANDE.....	145
FIGURE 5.22 - LE pH DU BOEUF (A GAUCHE) ET DU PORC (A DROITE) EN FONCTION DU TEMPS	146
FIGURE 5.23 - LA PERMITTIVITE DU BOEUF EN FONCTION DU TEMPS.....	146
FIGURE 5.24 - LA PERMITTIVITE DU PORC EN FONCTION DU TEMPS	147
FIGURE 5.25 - L'HUMIDITE RELATIVE (A GAUCHE) ET LE pH (A DROITE) DU FROMAGE CHEDDAR EN FONCTION DU TEMPS	148
FIGURE 5.26 - LA PERMITTIVITE DU FROMAGE CHEDDAR EN FONCTION DU TEMPS	148
TABLEAU 6.1 - LES VALEURS DE LA PERMITTIVITE CHOISIES POUR LA CONCEPTION DES TAGS CAPTEUR	149

5.1. Les facteurs de contrôle du changement de la permittivité

L'idée pour la conception du tag-capteur RFID dans cette thèse est la combinaison entre le concept de multiports et le changement naturel de la permittivité des produits alimentaires en fonction du temps. Donc, nous avons plusieurs paires de puce/antenne sur un même tag-capteur RFID passif afin de garder un faible cout pour la conception finale. À partir de la littérature [5.5], la constante diélectrique et le facteur de perte du produit changeraient en fonction des conditions de température et d'humidité du stockage. Cela conduit au changement de la permittivité quand le produit alimentaire est contaminé sous différentes conditions de température d'humidité de stockage. Donc, la prise en compte des effets d'environnement sur le changement de la permittivité est très utile pour évaluer les performances, notamment la sensibilité et les erreurs du tag-capteur basé sur ce principe.

5.1.1. Les facteurs qui affectent la permittivité des matériaux

La permittivité relative d'un matériau diélectrique peut être représentée sous forme d'un nombre complexe comme suit [5.5]:

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (5.1)$$

Où ε' est la constante diélectrique et ε'' est le facteur de perte. On en déduit la tangente de l'angle de perte:

$$\tan \delta_e = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (5.2)$$

Le facteur de perte d'un matériau diélectrique comprend 2 composantes:

$$\varepsilon'' = \varepsilon''_d + \varepsilon''_\sigma = \varepsilon''_d + \frac{\sigma}{\varepsilon_o \omega} \quad (5.3)$$

Dans cette formule, la composante ε''_d est la contribution de la permittivité due à la rotation dipolaire et la composante ε''_σ est la contribution de la permittivité due à la conduction ionique. $\sigma, \omega, \varepsilon_o$ sont respectivement la conductivité ionique du matériau (S/m), la pulsation (rad/s) et la permittivité du vide ($8.854 \cdot 10^{-12}$ F/m) [5.5].

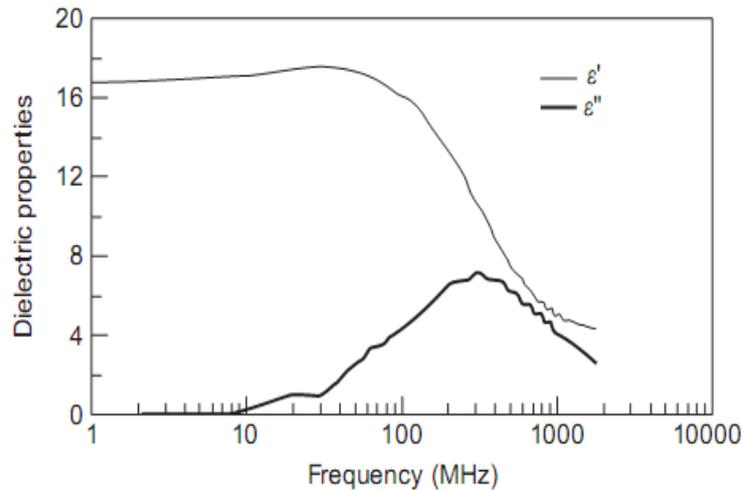


Figure 5.1 – Exemple des propriétés diélectriques du butyl-alcool à 20°C [5.5]

5.1.2. L'effet de la fréquence

À l'exception de certains matériaux avec un facteur de perte extrêmement faible, la constante diélectrique du matériau varie en fonction de la fréquence comme dans la figure 5.2 [5.6]. La constante diélectrique est une fonction de la fréquence:

- Aux basses fréquences, inférieures à 100 Hz, la constante diélectrique peut atteindre des valeurs supérieures à 10^6 ou 10^7

- Aux fréquences plus élevées, la baisse de la constante diélectrique due à l'impact de la dispersion, ce qui est principalement à cause de trois types de dispersion α , β , γ :

- + La dispersion α : La dispersion est due à la polarisation des ions proches de la surface chargée du tissu et peut-être due à la polarisation des grandes structures membranaires à l'intérieur du tissu.

- + La dispersion β (des centaines de kHz): principalement due à la polarisation de la membrane cellulaire. Peut aussi être causée par la polarisation des protéines et d'autres molécules organiques.

- + La dispersion γ (dans la région de 1GHz ou plus): en raison de la polarisation des molécules d'eau.

Aux fréquences plus élevées, la constante diélectrique et le facteur de perte sont normalement plus grand qu'en basse fréquence [5.5]. Pour un liquide pur, le modèle de Debye décrit la permittivité diélectrique en fonction de la fréquence :

$$\varepsilon^* = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + \omega^2 \tau^2} - j \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty) \omega \tau}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (5.4)$$

Où ε_∞ est la permittivité relative en haute fréquence, ε_s est la permittivité relative en DC et τ est le temps de relaxation du matériau diélectrique .

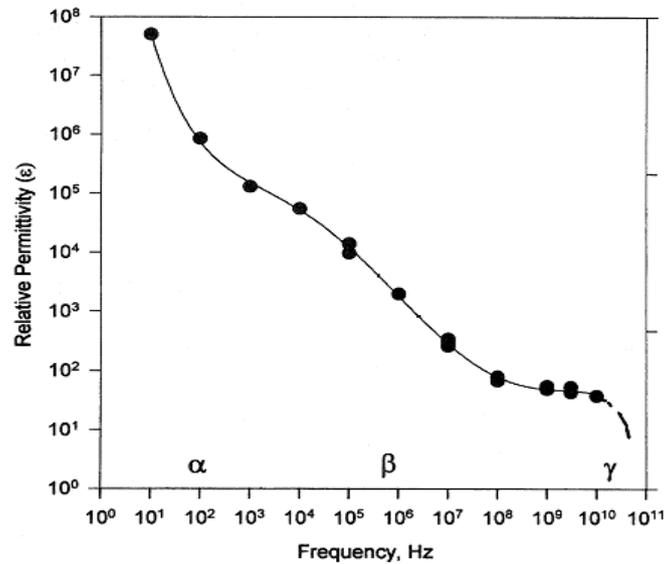


Figure 5.2 - Changement de la permittivité dans les zones de dispersion α, β, γ [5.6]

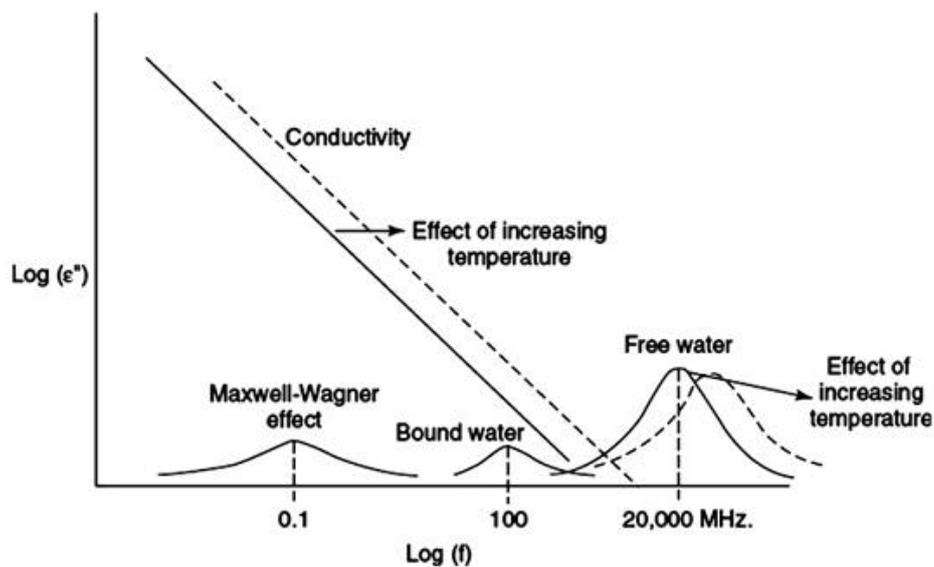


Figure 5.3 - Effets des différents mécanismes sur le facteur de perte des produits alimentaires [5.7]

5.1.3. L'effet de la température

Le facteur de perte et la constante diélectrique dépendent de la polarisation de l'eau "à la surface" et "en volume" de l'aliment et vont augmenter avec la température. D'autre part, ces deux valeurs de l'eau libre diminuent avec la température. Le temps de relaxation est un paramètre très important qui influence la constante diélectrique. La relation entre temps de relaxation des molécules sphériques avec la viscosité et la température est [5.8-5.9]:

$$\tau = V \frac{3\nu}{kT} \quad (5.5)$$

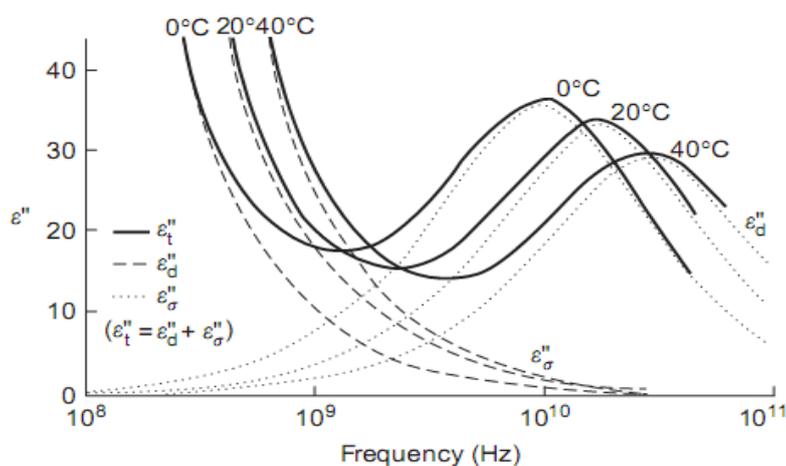


Figure 5.4 – Effet de la température sur le facteur de perte diélectrique de NaCl à 3 températures différentes [5.5]

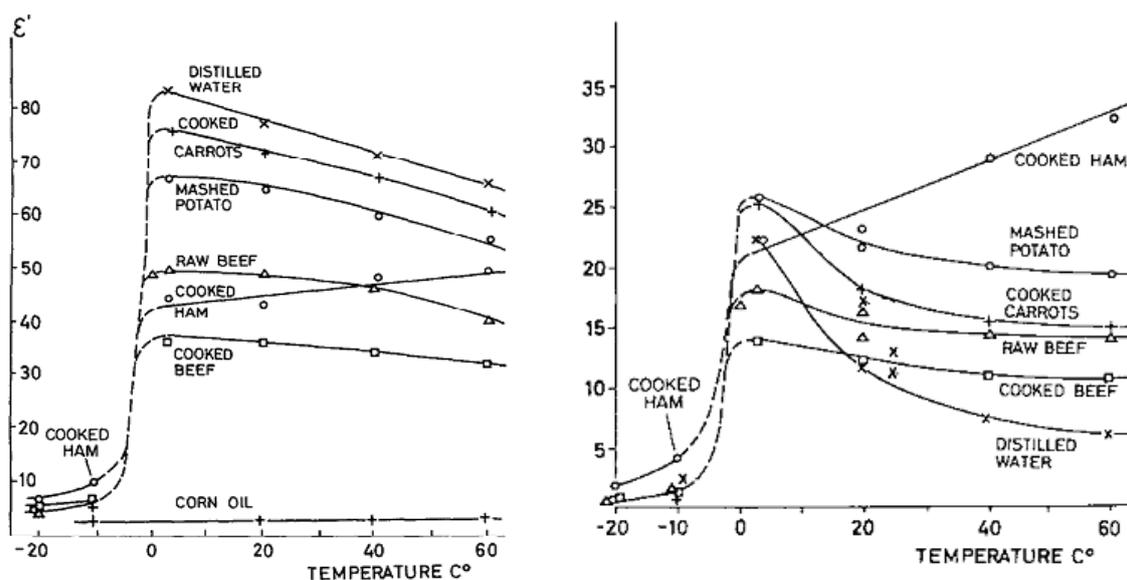


Figure 5.5 - Permittivité de quelques aliments en fonction de la température [5.10]

Le facteur de perte est proportionnel à la conductivité. La conductivité augmente quand la température augmente et la viscosité diminue, ce qui conduit à l'augmentation de la mobilité des ions. Par conséquent, le facteur de perte augmente proportionnellement avec la température. Lorsque la température augmente, le temps de relaxation du matériau sera diminué. Ainsi, la conductivité du matériau sera déplacée vers le domaine des basses fréquences. En d'autres termes, le facteur de perte des matériaux diélectriques sera déplacé vers les basses fréquences pour les liquides ioniques (chlorure de sodium) comme dans la figure 5.4 [5.5].

5.1.4. L'effet de l'humidité

L'eau est un solvant polaire et facile à absorber l'énergie par la rotation du dipôle dans l'eau. Par conséquent, l'eau est un facteur très important pour les propriétés diélectriques des produits alimentaires. En général, plus la teneur de l'humidité du matériau est élevée, plus la constante diélectrique et le facteur de perte de matériau sont grands [5.5]. Cela s'explique assez bien si on se rappelle que la constante diélectrique de l'eau liquide est de 81. En règle générale, plus que l'humidité élevée, plus la constante diélectrique et le facteur de perte du matériau sont importants. Dans l'étude de S. Rynänen [5.11], il montre la relation entre la permittivité relative et l'humidité pour quelques aliments donnés sur la figure 5.6.

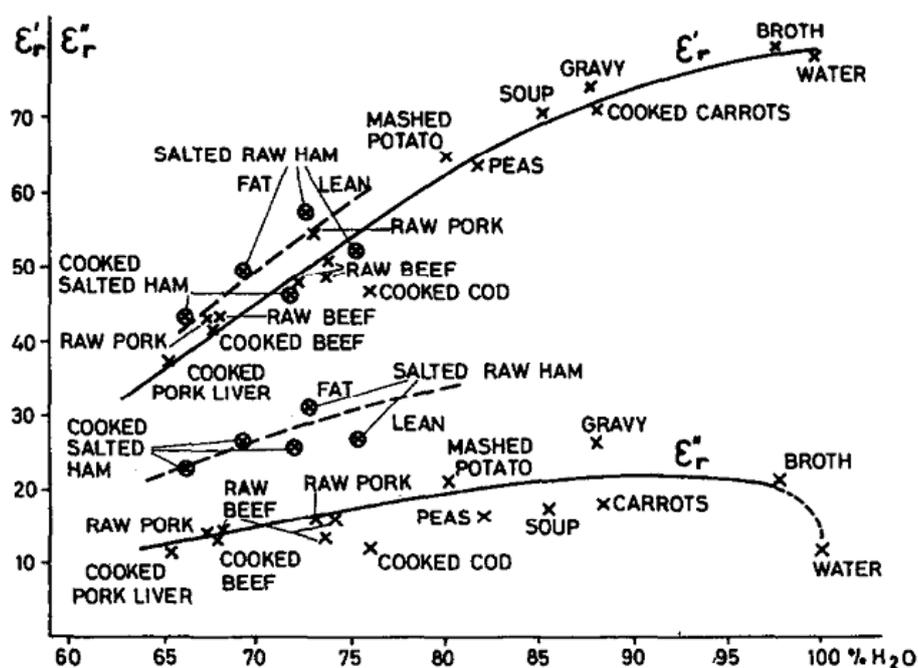


Figure 5.6 - La permittivité de quelques aliments en fonction de l'humidité [5.12]

Aux températures supérieures à la température de congélation, l'humidité se présente dans l'aliment dans l'une des deux formes: l'eau libre (free water) et de l'eau entourée (bound water). L'eau libre présente une constante diélectrique similaire à l'eau ordinaire ($78+j12.5 @ 2.45 \text{ GHz}$ et 25°C) tandis que l'eau entourée a des propriétés diélectriques similaires à la glace ($3.2+j0.0029 @ 2.45\text{GHz}$ et 25°C) [5.12]. Le facteur de perte diminue rapidement lorsque l'humidité est réduite jusqu'au alentour de la valeur M_c (l'humidité où il y a juste l'eau entourée). À partir de cette valeur d'humidité, le facteur de perte diminue très peu en raison de la composition unique de l'eau entourée.

5.1.5. Les effets de la composition interne

La permittivité d'un matériau dépend des composants chimiques contenus dans celui-ci. Pour les produits alimentaires, l'eau est l'élément dominant. De plus, l'influence de l'eau, le sel et les autres composants minéraux dépendent significativement de la façon dont ils sont entourés ou limités en mouvement par les autres composants [5.13]. Donc, il est très compliqué de prévoir la permittivité diélectrique du mélange en connaissant la permittivité diélectrique de chaque composant. La viande a une composition chimique de : 70-75% d'eau, 15-20% de protide, 1-3% de lipides, très peu de glucides et environ 1% de déchets. Les composants organiques qui sont présents dans les aliments ont de faibles valeurs de permittivité ($\epsilon_r' < 3$ et $\epsilon_r'' < 0.1$), notamment par rapport à l'eau.

- L'effet de la graisse: Parce que sa constante diélectrique est très faible, l'effet de la graisse dans les aliments est principalement basée sur l'effet de dilution. En fait, l'augmentation de la composition de la graisse conduit à la diminution de l'eau libre dans l'aliment, ce qui réduit la constante diélectrique.

- L'effet de la protéine: Les protéines sont relativement inertes et leur interaction avec les micro-ondes peut être négligeable. Dans le processus de dénaturation des protéines, l'asymétrie de la distribution de charge va augmenter en raison de la structure des protéines perturbées. Cela augmente la polarisation et les moments dipolaires, ce qui affectera les propriétés diélectriques.

5.1.6. Les effets de la structure

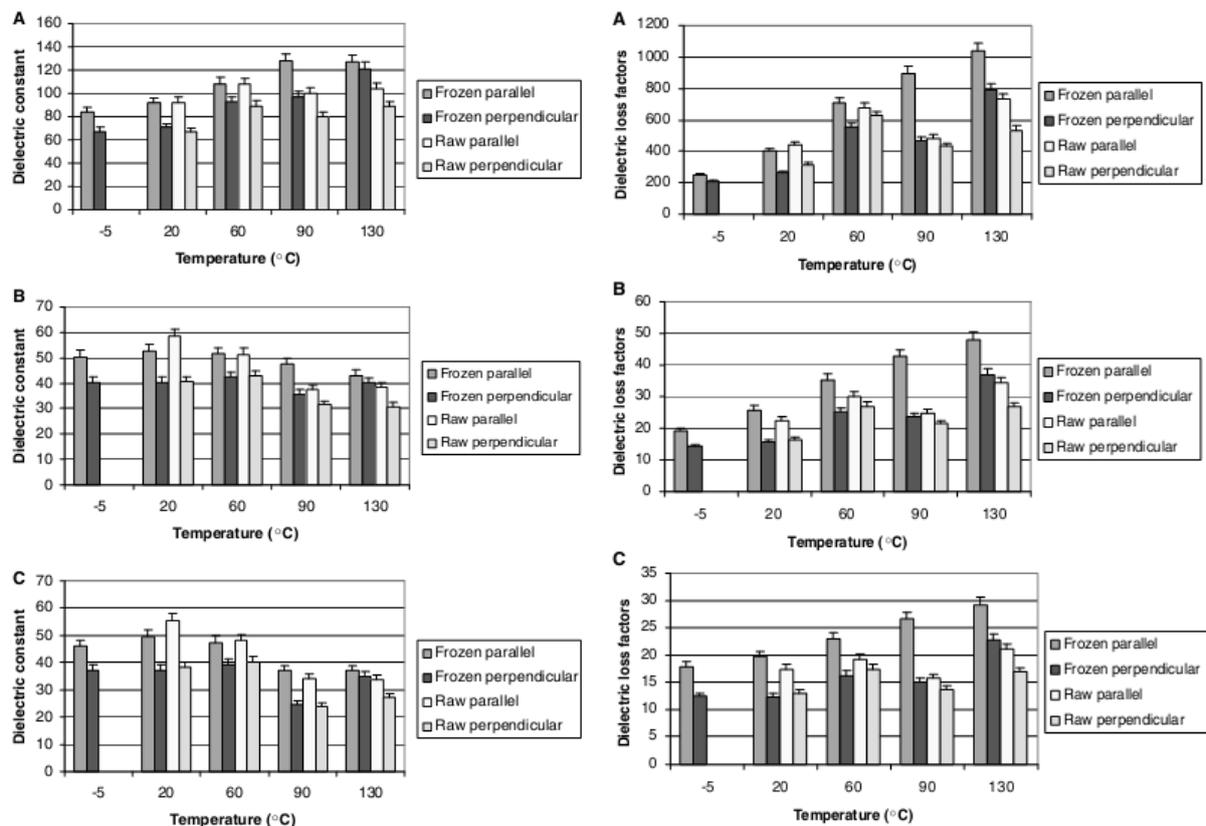


Figure 5.7 - La permittivité du boeuf selon les orientations des tissus aux différentes fréquences: A. 27MHz, B. 915 MHz, C. 1800 MHz [5.14]

La structure physique affecte également les propriétés diélectriques du matériau de sorte que la masse par unité de volume affecte le champ électromagnétique [5.15]. Plus la densité est élevée, plus la constante diélectrique le sera. Dans [5.14], ils ont préparé les échantillons de viande afin d'examiner l'influence de l'orientation des fibres sur la permittivité diélectrique par la méthode de la sonde coaxiale. À partir de la figure 5.7, on peut noter que la constante diélectrique et le facteur de perte sont plus grands dans le cas de fibres parallèles que dans le cas des fibres perpendiculaire à la même fréquence et la même température.

5.1.7. Effet du temps de stockage

Au cours du temps de stockage, la permittivité diélectrique de l'aliment variera en fonction du changement des composants chimiques contenus dans l'aliment. Ce ci conduit à la variation de l'humidité et du pH comme indiqué dans la figure 5.8.

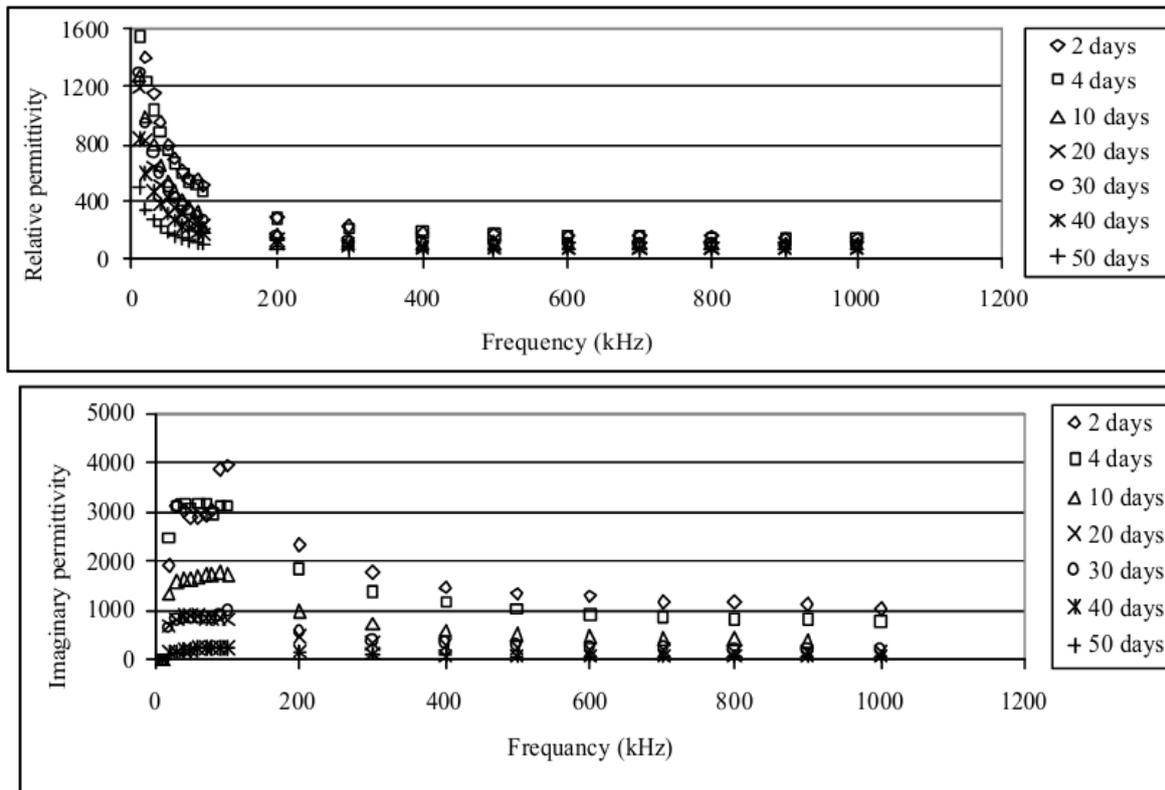


Figure 5.8 - Changement de la permittivité de la viande de boeuf en fonction du temps de stockage aux différentes fréquences [5.16]

5.1.8. Certains modèles mathématiques pour le calcul de la permittivité de la composition des matériaux

Les règles de Maxwell-Garnett pour le mélange de 2 phases (Maxwell-Garnett, 1904) permettent de prédire la permittivité effective du mélange [5.15] :

$$\varepsilon_{eff} = \varepsilon_w + 3.v_f.\varepsilon_w \frac{\varepsilon_{inc} - \varepsilon_w}{\varepsilon_{inc} + 2\varepsilon_w - v_f(\varepsilon_{inc} - \varepsilon_w)} \quad (5.6)$$

Où ε_{eff} est la permittivité effective du mélange, ε_w est la permittivité de l'eau (le matériau hôte), ε_{inc} est la permittivité de l'inclusion et v_f est la fraction volumique de l'inclusion dans l'hôte. Ce modèle est seulement applicable pour un mélange de 2 matériaux diélectriques constitutifs.

La règle pour le mélange de 3 phases (Sihvola 1999, Robinson et Friedman 2002) [5.15] :

$$\frac{\varepsilon_{eff} - \varepsilon_w}{\varepsilon_{eff} + 2\varepsilon_w} = (v_{f_a} + v_{f_b}) \frac{(\varepsilon_{ia} - \varepsilon_w)(\varepsilon_{ib} + 2\varepsilon_{ia}) + \frac{v_{f_b}}{v_{f_a} + v_{f_b}} (\varepsilon_{ib} - \varepsilon_{ia})(\varepsilon_w + 2\varepsilon_{ia})}{(\varepsilon_{ia} + 2\varepsilon_w)(\varepsilon_{ib} + 2\varepsilon_{ia}) + 2 \frac{v_{f_b}}{v_{f_a} + v_{f_b}} (\varepsilon_{ib} - \varepsilon_{ia})(\varepsilon_{ia} - \varepsilon_w)} \quad (5.7)$$

La permittivité effective devient une fonction extrêmement non linéaire de la fraction volumique pour un contraste de permittivité élevé (Sihvola, 1999). Une valeur de 20 pour ce dernier est permise entre l'hôte et les inclusions quand ces 2 modèles sont utilisés [5.15]. Les 2 formules seront appliquées pour l'explication du mécanisme opérationnel du tag-captur dans le chapitre 6.

5.2. La caractérisation de la permittivité des produits alimentaires

La conception des antennes pour les étiquettes RFID dans les gammes UHF (Ultra Haute Fréquence) et micro-ondes nécessite une connaissance des propriétés des matériaux constitutifs, notamment le substrat du tag et le métal utilisé pour fabriquer les antennes. Ces paramètres déterminent les caractéristiques de rayonnement (par exemple: la fréquence de résonance, l'impédance, l'efficacité de rayonnement, le gain, le diagramme de rayonnement...). La caractérisation des propriétés est essentielle pour la simulation, la conception et l'évaluation des performances de l'antenne et du tag RFID après la fabrication. Dans ce travail, la caractérisation de la permittivité des aliments est très essentielle pour la création de la base de données avant que nous les introduisons dans le modèle de simulation. Donc, les paramètres des aliments comme le pH, la permittivité, l'humidité... seront caractérisés à partir de l'état frais jusqu'à l'état contaminé. Grâce à cette base de données, nous allons considérer les changements des paramètres du tag RFID UHF passif selon l'ensemble de la permittivité des aliments pour détecter la qualité des aliments en déterminant le moment de la contamination.

5.2.1. Les méthodes de caractérisation de la permittivité du matériau

Il y a beaucoup de méthodes différentes pour la caractérisation des permittivités diélectriques [5.17-5.19]. Pour sélectionner la méthode de caractérisation appropriée, il faut définir un ou plusieurs paramètres en fonction de la propriété du matériau comme la gamme

de fréquence, la gamme de la permittivité du matériau (forte perte ou faible perte), les propriétés physiques du matériau (solide, gel ou liquide...)... Ces paramètres dépendent généralement de la structure du matériau et des contraintes de l'application visée. D'un point de vue pratique, il s'agit le plus souvent de mesurer en fonction de la fréquence une impédance Z , ou une admittance Y ou les paramètres S .

Les méthodes de caractérisation du matériau sont classées en fonction de la gamme de fréquence comme résumé la figure 5.9. Pour les méthodes « basse fréquence » on distingue deux approches : les méthodes dans le domaine temporel (10^{-6} - 10^3 Hz) et les méthodes dans le domaine fréquentiel (10^{-5} - 10^6 Hz).

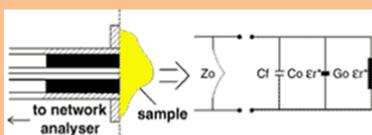
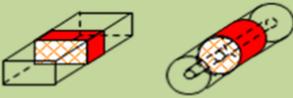
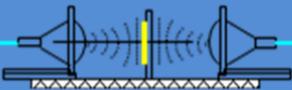
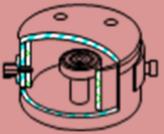
La méthode de caractérisation	La configuration	La gamme de l'utilisation
La méthode de la sonde coaxiale		- Large bande de ϵ_r - Compatible pour les liquides et semi-solides
La méthode de la ligne de transmission		- Large bande de ϵ_r & μ_r - Compatible pour les poudres ou les solides
La méthode de l'espace libre		- Large bande pour les ondes millimétriques - La mesure sans contact
La méthode de la cavité de résonance		- Bande étroite et haute précision - Compatible pour les matériaux basse-perte

Figure 5.9 - Les méthodes de caractérisation de la permittivité du matériau populaires

[5.17]

Les méthodes « haute fréquence » comprennent les méthodes « sans-résonance » et les méthodes à « résonance ».

- Les méthodes « sans-résonance »:

- + Les méthodes en réflexion pour une gamme de fréquence allant du MHz à 10GHz.
- + Les méthodes en transmission / réflexion pour une gamme de fréquence supérieure au GHz.

- Les méthodes de « résonance »:

+ Les méthodes de réflexion pour une gamme de fréquence du GHz à 100 GHz

+ Les méthodes de transmission pour une gamme de fréquence du GHz à 100 GHz

Les méthodes de « basse fréquence » ne sont pas applicables pour notre gamme de fréquence (860MHz - 960MHz pour la RFID UHF passive). Les méthodes « haute fréquence » sans-résonance peut être utilisées sur une large bande de fréquence mais sont peu précise, tandis alors que les méthodes à résonance sont compatibles avec notre application et permettent des mesures précises... Ici, nous nous concentrons nos mesures dans la gamme de fréquence pour les applications de la RFID UHF.

5.2.2. La méthode de la sonde coaxiale

Sur la comparaison dans la figure 5.9, nous voyons que la méthode de la sonde coaxiale est la méthode la plus adaptée pour la mesure de la permittivité diélectrique des aliments tels que la viande et le fromage [5.20]. La méthode de la caractérisation des permittivités diélectriques utilisée pour ce travail est la méthode de la sonde coaxiale à extrémité ouverte (open-ended coaxial probe) qui est classée comme une méthode de réflexion sans-résonance. Cette méthode est basée sur le coefficient de réflexion de la sonde coaxiale qui dépend de la permittivité diélectrique du matériau sous test (Material Under Test - MUT) placé en contact avec la sonde. Pour calculer la permittivité diélectrique à partir du coefficient de réflexion mesuré, nous utilisons le circuit équivalent de la sonde coaxiale qui est ouverte aux extrémités.

5.2.2.1. Les propriétés de la méthode de la sonde coaxiale

- Large bande de fréquence: entre 0.2GHz et 50GHz

- Convient pour les matériaux à forte perte: essentiellement les liquides et les semi-solides. Les poudres et les solides peuvent également être mesurés si nous avons un bon contact entre le matériau et la sonde coaxiale.

- La précision: environ de 1% à 10% dépendant de la taille de la sonde.

- La complexité: Cette méthode nécessite une calibration du dispositif avant chaque mesure. La calibration est du type de 3 standards "Short-Open-Load".

5.2.2.2. Le circuit équivalent et les formules de calcul pour la sonde coaxiale

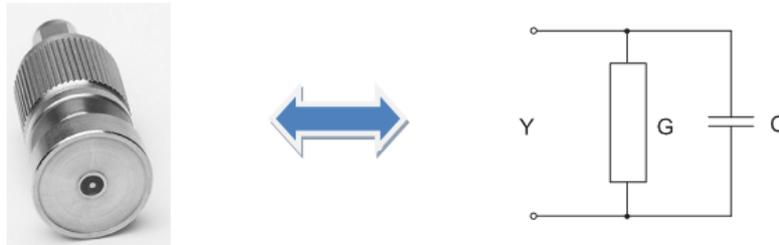


Figure 5.10 - Le circuit équivalent de la sonde coaxiale

La sonde est considérée comme un circuit équivalent comprenant un condensateur de couplage entre les couches conductrices interne et externe avec une conductance qui montre la perte le long de la ligne de transmission. La capacitance et l'inductance dépendent de la fréquence, de la permittivité diélectrique et de la taille de la sonde coaxiale (diamètres intérieur et externe). La sonde peut être décrite comme une antenne avec l'admittance d'entrée $Y = G + jB$ dont G est la conductance et C est la susceptance comme dans la figure 5.10 [5.20].

$$Y_0 = G_0(\varepsilon_c, \omega) + j\omega C_0(\varepsilon_c, \omega) \quad (5.8)$$

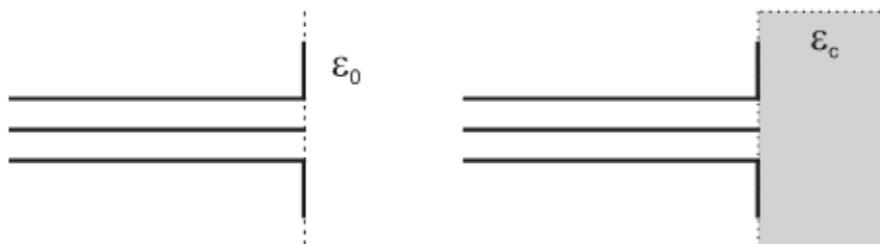


Figure 5.11 - La sonde coaxiale dans le vide et en contact avec l'échantillon de mesure

[5.21]

Où G_0 et C_0 sont constantes si le rayonnement de l'antenne se fait dans l'espace libre ($\varepsilon_c = 1$). Si nous remplaçons l'espace libre par le matériau sous test, la dépendance de

l'admittance de l'antenne avec la permittivité du matériau peut être déduite en utilisant le théorème de Deschamps. De cela, l'admittance contiendra un autre terme ε_c

$$Y(\varepsilon_c, \omega) = \sqrt{\varepsilon_c} Y_0(1, \omega \sqrt{\varepsilon_c}) \quad (5.9)$$

Cela signifie que l'admittance du matériau de permittivité diélectrique ε_c à la fréquence angulaire ω est égale à l'admittance mesurée dans l'espace libre à une fréquence angulaire $\sqrt{\varepsilon_c}$ fois plus grande que celle dans l'espace libre et puis multipliée par un facteur $\sqrt{\varepsilon_c}$.

La capacitance C_0 peut être considérée comme une constante dans l'espace libre. La conductance G_0 de la sonde entourée par le matériau diélectrique peut être calculé dans le cas où le matériau diélectrique est l'air en appliquant la fonction de Bessel à la série de Maclaurin:

$$\begin{aligned} G_0 &= \frac{Y_0}{\ln \frac{a}{b}} \int_{\pi/2}^0 [J_0(ka \sin \theta) - J_0(kb \sin \theta)]^2 \frac{d\theta}{\sin \theta} \\ &\approx \frac{Y_0}{\ln \frac{a}{b}} [G_1(f^4) + G_2(f^6) + \dots] \end{aligned} \quad (5.10)$$

$J_0(x)$ est la fonction de Bessel d'ordre zero. G_i sont des paramètres dépendants de la taille et la géométrie de la sonde (les rayons interne et externe sont respectivement a et b) et la longueur d'onde. On utilise habituellement l'approximation $G_i \approx G_1$. Ainsi, l'influence du rayonnement de la sonde coaxiale qui est représenté par la conductance de rayonnement dans le circuit équivalent peut être approximée par:

$$G_1(f^4) = \frac{2}{3} (a^2 - b^2) \frac{\pi^4}{c^4} f^4 \approx f^4 \quad (5.11)$$

En appliquant le théorème Deschamps:

$$Y_0 = G_0 + j\omega C_0 \Leftrightarrow Y(\varepsilon_c, \omega) = \sqrt{\varepsilon_c} G_0 (\sqrt{\varepsilon_c})^4 + \sqrt{\varepsilon_c} j\omega C_0 \sqrt{\varepsilon_c}$$

Et on en deduit:
$$Y = \sqrt{\varepsilon_c^5} G_0 + j\omega \varepsilon_c C_0 \quad (5.12)$$

Y représente l'admittance de la sonde mesurée et G_0 , C_0 sont la conductance et la susceptance dans le circuit équivalent de la sonde placée dans l'espace libre qui sont constantes. L'admittance Y est reliée au coefficient de réflexion S comme suit:

$$Y = Y_0 \frac{1 - S_{11}}{1 + S_{11}} \quad (5.13)$$

où $Y_0 = \frac{1}{50\Omega} = 0.02S$ est l'admittance caractéristique de la sonde

5.3. Les mesures avec la méthode de la sonde coaxiale

5.3.1. La configuration de la mesure

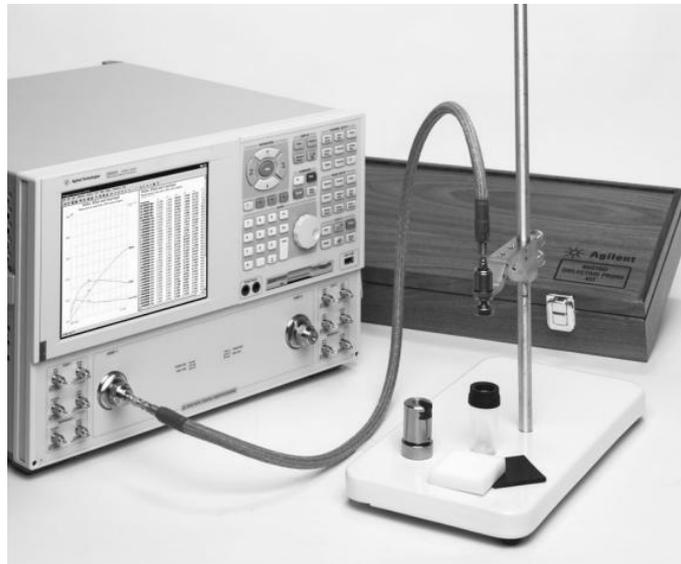


Figure 5.12 - La méthode de la sonde coaxiale par réflexion [5.20]

Le système de mesure contient l'analyseur de réseau vectoriel, la sonde coaxiale et le logiciel 85070 de Agilent afin d'exporter les données mesurées sur un ordinateur comme dans la figure 5.12. Les spécifications de chaque composant seront décrites comme dans le paragraphe suivant:

- L'analyseur de réseau vectoriel: ENA E5071C de Agilent [5.22]
- La sonde coaxiale utilisée: La sonde de mesure à haute température (High temperature probe kit) de Agilent avec les spécifications comme au-dessous [5.20]
- + La bande de fréquence opérationnelle: 200MHz jusqu'à 20GHz.

- + La sonde peut fonctionner sur la gamme de température entre -40°C et 200°C.
- + La couverture de la sonde est très dure et convient pour les mesures des matériaux comme les solides, les liquides et les gels.

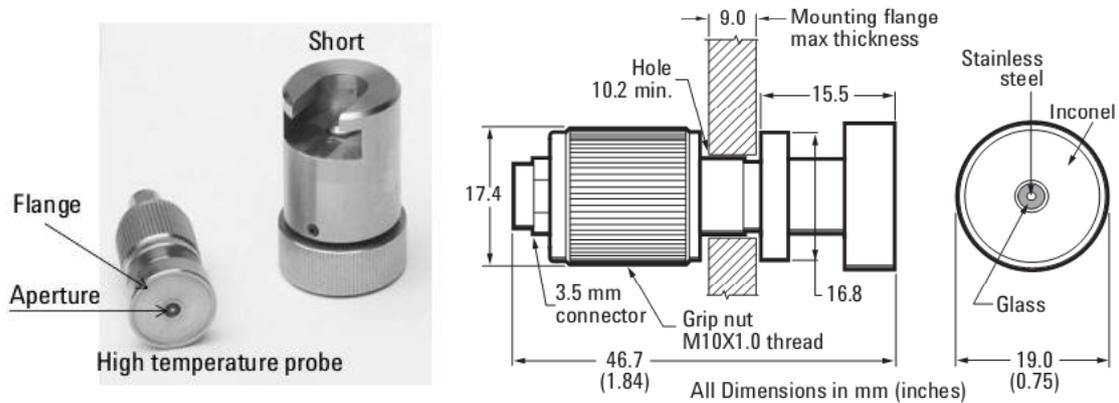


Figure 5.13 - La sonde coaxiale de Agilent [5.20]

5.3.2. Les contraintes de l'échantillon à caractériser

- + Le diamètre de la surface à mesurer doit être supérieur à 20mm.
- + L'épaisseur de l'échantillon doit être supérieur à la valeur de $\frac{20}{\sqrt{|\epsilon_r^*|}}$ mm dont ϵ_r est la permittivité du matériau sous test.
- + Convient pour les matériaux non-magnétiques ($\mu_r = 1$), homogènes et isotropes
- + La surface du matériau doit être plate et il faut s'assurer qu'il n'y a pas de gap d'air entre la sonde et le matériau pendant la mesure.

5.3.3. Calibration du dispositif avant la caractérisation

Tout d'abord, il faut connecter l'analyseur de réseau vectoriel et sélectionner la calibration "Air / Short / Eau" pour la calibration avec les 3 standards "Ouvert dans l'air", "Court-Circuit" et "L'eau distillée" comme décrite dans la figure 5.14. Il est important que pendant la calibration, la sonde soit être complètement immergée dans la solution (au moins 2 mm). Après la calibration, il faut effectuer la mesure de la permittivité diélectrique de l'air. Si

le résultat est proche de la valeur $1.00 + j0.00$, la calibration est complétée. Sinon, il nous faut refaire la calibration.

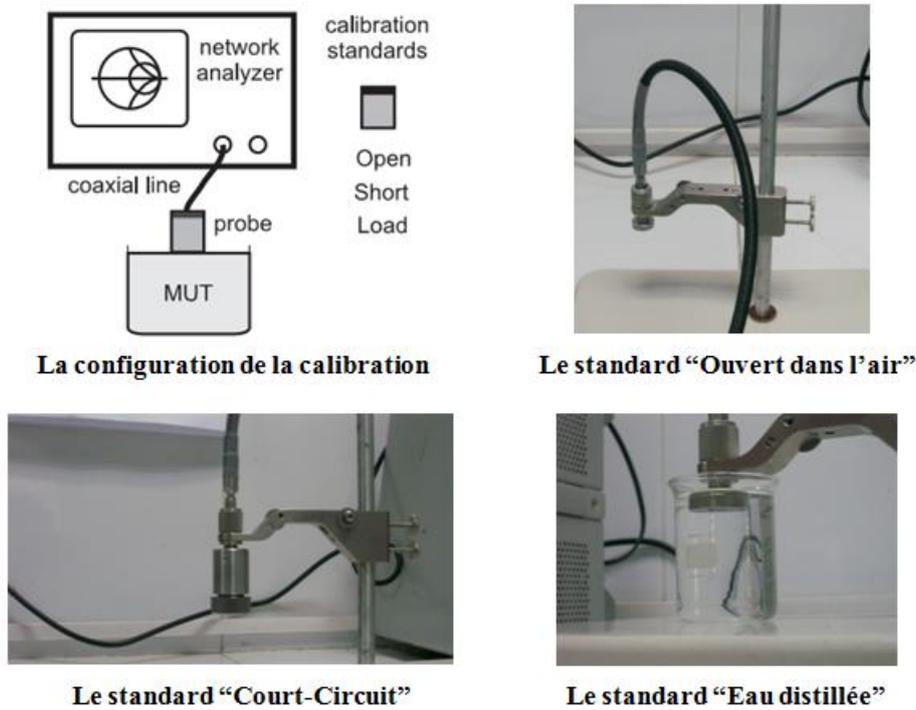


Figure 5.14 - La calibration du dispositif avec les standards de calibration

5.4. Les caractérisations expérimentales

5.4.1. La préparation des échantillons

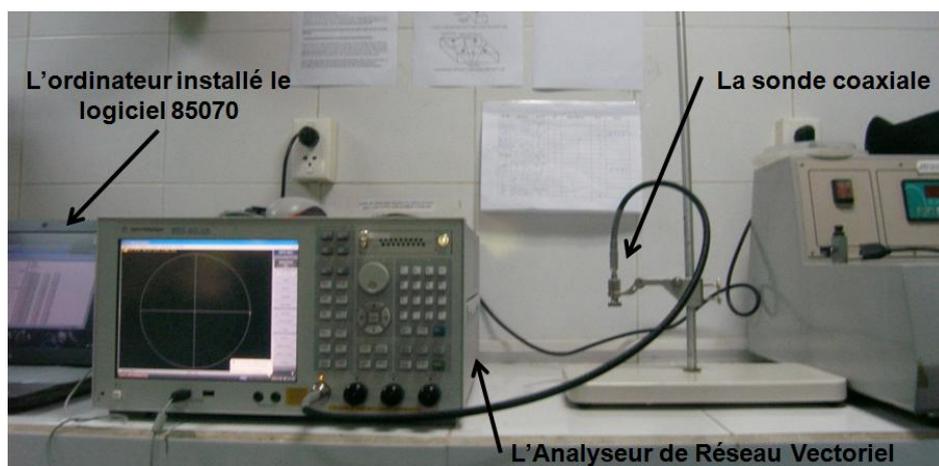


Figure 5.15 - La configuration des dispositifs pour la méthode de la sonde coaxiale

Comme décrit ci-dessus, nous utilisons la sonde coaxiale connectée avec l'analyseur de réseau vectoriel ENA E5071C de Agilent [5.22] comme dans la figure 5.15. Dans ce travail, nous avons mesuré la permittivité diélectrique du fromage et de la viande à partir de l'état frais jusqu'à l'état contaminé pour obtenir la base de données à mettre dans nos modèles de simulation pour la conception du tag capteur RFID pour la détection de la qualité des aliments. Les temps de contamination pour la viande et le fromage seront basés sur des standards physico-chimique "intermédiaires" tels que le pH et l'humidité (pour le fromage) ou le pH (pour la viande) ainsi que des signes visibles comme l'odeur et la viscosité des aliments lorsqu'ils ont été contaminés. La viande et le fromage que nous utilisons dans ce travail sont le porc, le boeuf et le fromage Cheddar (qui est très populaire dans les supermarchés européens et américains). Ces produits sont du supermarché METRO[®] Vietnam.

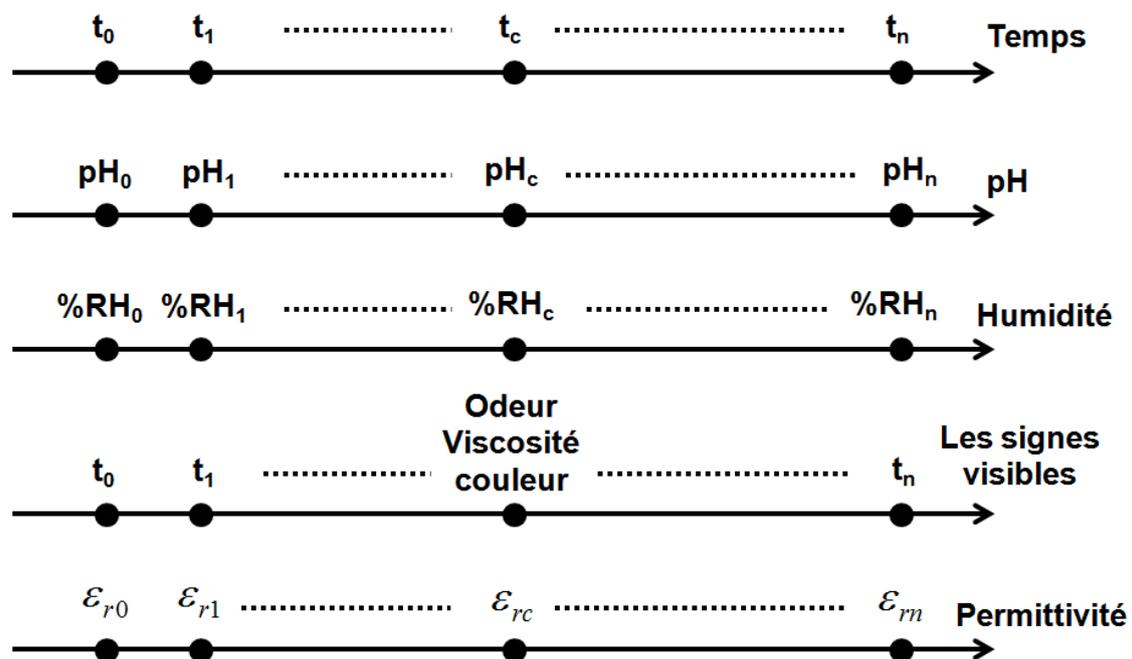


Figure 5.16 - La procédure de mesure pour les produits alimentaires

Selon les normes de l'évaluation de la qualité des aliments comme USDA (United States Department of Agriculture) [5.23-5.24] ainsi que ISO (International Standards Organisation) [5.25], les produits alimentaires comme la viande ou le fromage peuvent être considérés comme contaminés si les paramètres "physico-chimiques" comme le pH, l'humidité relative, la concentration d'ammoniac (NH_3) ... dépassent les seuils autorisés. Pour le fromage Cheddar, nous pouvons conclure que le fromage devient contaminé si le pH est

supérieur à 6.2 et l'humidité relative dépasse la valeur de 39%. D'autre part, la viande (le porc ou le boeuf) peut être considérée comme contaminée dès que son pH et sa concentration de NH_3 sont respectivement supérieur aux valeurs de 6.2 et 35mg/100g. Pour les conditions de manipulation au niveau du laboratoire, nous avons choisi les paramètres comme le pH et l'humidité relative pour la caractérisation en parallèle de la permittivité des échantillons du fromage et de la viande. La procédure de mesure avec les paramètres à caractériser est décrite comme dans la figure 5.16.



Figure 5.17 - Le fromage et la viande sont stockés dans le frigo dans les mêmes conditions qu'au supermarché

La viande et le fromage après l'achat seront stockés dans le réfrigérateur avec les mêmes conditions que dans les supermarchés (température entre 0°C et 5°C et humidité environ 50% comme dans l'air) comme dans les figures 5.16 et 5.17. Les paramètres mesurés comprennent: la permittivité (la constante diélectrique et le facteur de perte), le pH des produits alimentaires (le porc, le boeuf et le fromage), l'humidité du fromage ainsi que le test des signes visibles tels que l'odeur, la viscosité, la couleur ... des échantillons de la viande et du fromage. Ces paramètres peuvent être divisés en 2 groupes de mesure. Le première groupe inclut des paramètres spécifiques pour l'évaluation de la qualité des aliments tels que le pH, les signes visibles pour la viande et le pH, l'humidité pour le fromage. Le reste, ce sont les permittivités diélectriques du boeuf, du porc et du fromage. Les mesures de ces paramètres seront faites toutes les 12 heures. La température et l'humidité du réfrigérateur sont contrôlées et réglées chaque jour pour maintenir les conditions appropriées.

5.4.2. Execution des mesures

5.4.2.1. Le fromage

Les échantillons de fromage seront mesurés pour 3 paramètres: la permittivité diélectrique, le pH et l'humidité. Les positions et l'ordre de la mesure sont présentés dans les figures 5.18 et 5.19. Pour les mesures des permittivités diélectriques, la sonde coaxiale est mise en contact avec l'échantillon et la mesure est faite sur 3 positions comme indiqué en bleu dans la figure 5.19. Pour la mesure du pH, l'électrode du pH-mètre sera appliquée directement sur les échantillons de fromage aux 2 positions indiquées dans la figure 5.19. Dans tous les cas, on prend la valeur moyenne des 3 mesures pour chaque position. Une fois que nous avons fini toutes les mesures, nous prendrons finalement les valeurs médianes pour le pH, l'humidité et la permittivité diélectrique.



Figure 5.18 - La caractérisation de la permittivité du fromage

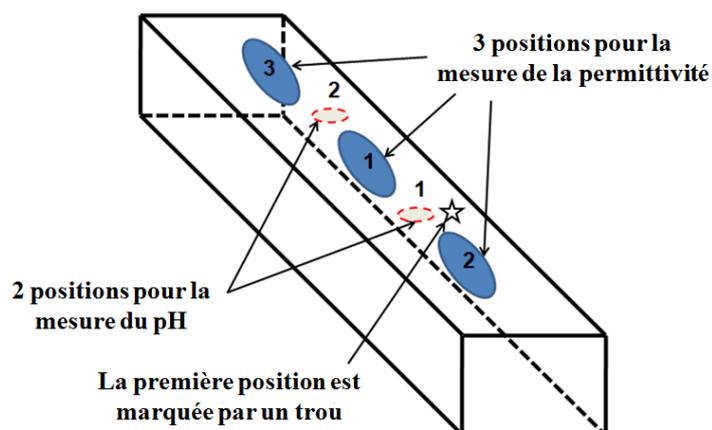


Figure 5.19 - Les positions de mesure du pH et la permittivité pour le fromage

L'humidité des fromages sera mesurée par la méthode de séchage dans le vide (Vacuum Oven Method). Les étapes de cette méthode sont comme suit:

- Tout d'abord, une balance électronique est utilisée pour déterminer la masse du bol de l'échantillon m_0 .

- Ensuite, nous découpons un petit échantillon avec de masse environ 3-4 grammes à partir de l'échantillon de fromage et mettons dans le bol de l'échantillon. Puis, nous utilisons la balance électronique à déterminer la masse m_1 du bol avec l'échantillon de fromage.

- Nous mettons ensuite le bol avec l'échantillon de fromage dans le four de séchage. Dans le four, nous avons mis du gel de silice déshydratant pour absorber la vapeur humide qui est créée pendant le séchage du fromage. Nous diminuons la pression dans le four, puis nous ajustons la température du four à 125-130°C et séchons environ 2 heures afin de laisser l'échantillon atteindre à une masse constante [5.26]. Après le séchage pendant 2h, nous pesons le bol de l'échantillon avec le fromage séché pour déterminer la masse m_2 .

- Après avoir déterminé la valeur m_2 , nous continuons le séchage du bol de l'échantillon pendant 30 minutes et pesons le bol une deuxième fois pour déterminer la masse m_3 . Si la différence entre les 2 valeurs m_2 et m_3 est inférieure à 15mg, l'échantillon peut être considéré comme ayant atteint une masse constante. Sinon, il faut répéter ce processus jusqu'à ce que la différence entre ces valeurs reste en dessous de 15mg. Après avoir fini toutes les étapes ci-dessus, l'humidité relative (RH) du fromage sera calculée par la formule suivante:

$$RH(\%) = \frac{(m_1 - m_3)}{(m_1 - m_0)} \cdot 100\% \quad \text{Avec la condition: } |m_2 - m_3| \leq 15mg$$

Où: m_0 est la masse du bol de l'échantillon.

m_1 est la masse du bol avec l'échantillon de fromage avant le séchage

m_2 est la masse du bol de l'échantillon avec le fromage après 2 heures du premier séchage

m_3 est la masse du bol de l'échantillon avec le fromage après 30 minutes du deuxième séchage

5.4.2.2. Le porc et le boeuf

Les échantillons de la viande seront mesurés sur deux paramètres: la permittivité diélectrique et le pH. Après la calibration du dispositif de mesure, nous effectuons d'abord la mesure de la permittivité diélectrique et puis la mesure du pH afin d'éviter les variations de température sur la valeur de la permittivité diélectrique. Les positions de mesure et l'ordre de mesure sont indiqués dans les figures 5.20 et 5.21. Pour chaque échantillon de viande (porc ou bœuf) on mesure la permittivité diélectrique aux 4 points en bleu et le pH aux 4 points en blanc comme décrit dans la figure 5.21. Comme pour les échantillons de fromage, nous avons fait trois mesures en en chaque point de mesure pour la permittivité diélectrique et le pH, nous prenons la valeur moyenne à chaque position. Une fois que nous avons fini toutes les mesures, nous prendrons finalement les valeurs médianes pour le pH et la permittivité diélectrique pour chaque échantillon de la viande.

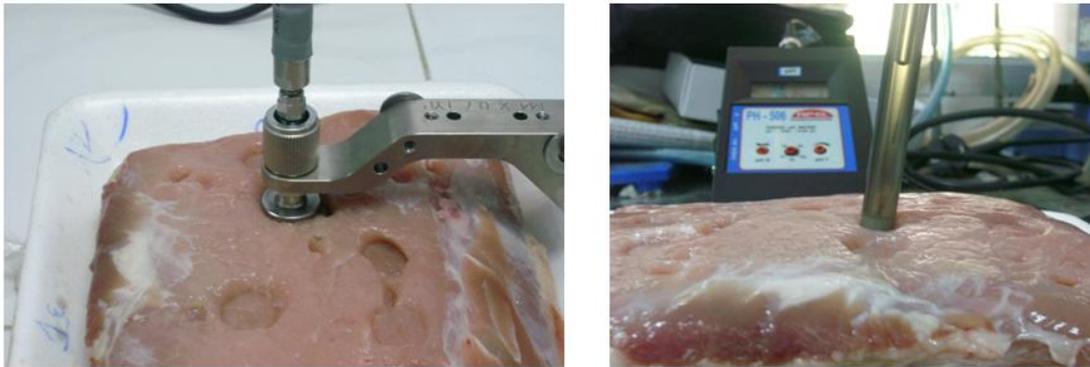


Figure 5.20 - La caractérisation de la permittivité et le pH pour la viande

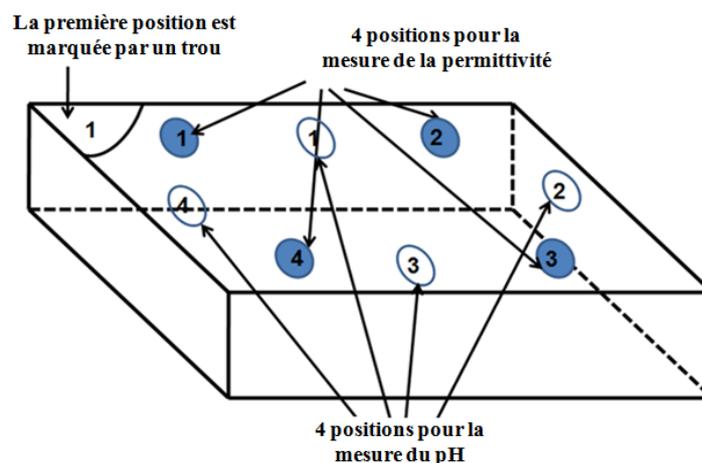


Figure 5.21 - Les positions de mesure du pH et la permittivité pour la viande

5.4.2.3. Les résultats obtenus

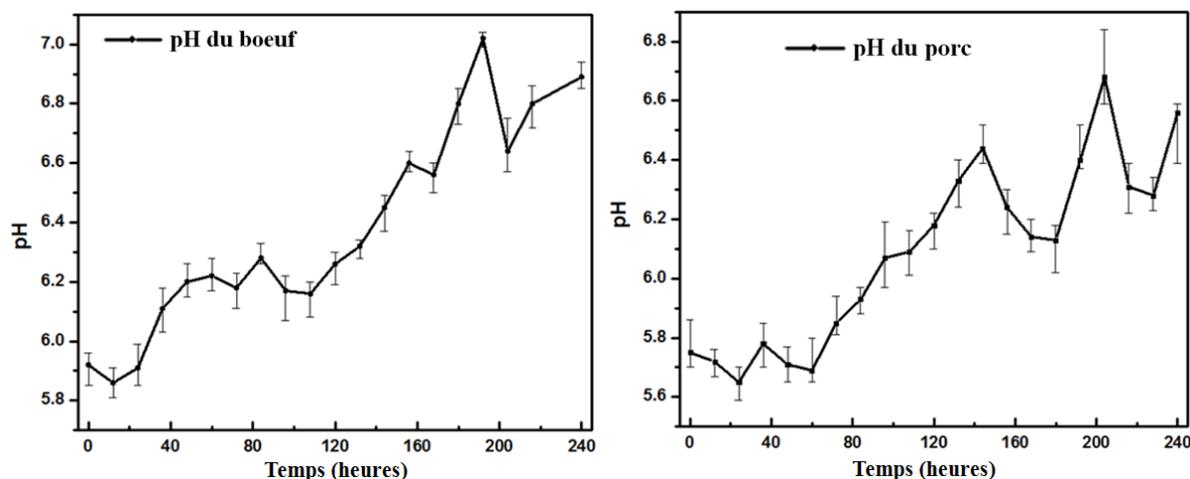


Figure 5.22 - Le pH du boeuf (à gauche) et du porc (à droite) en fonction du temps

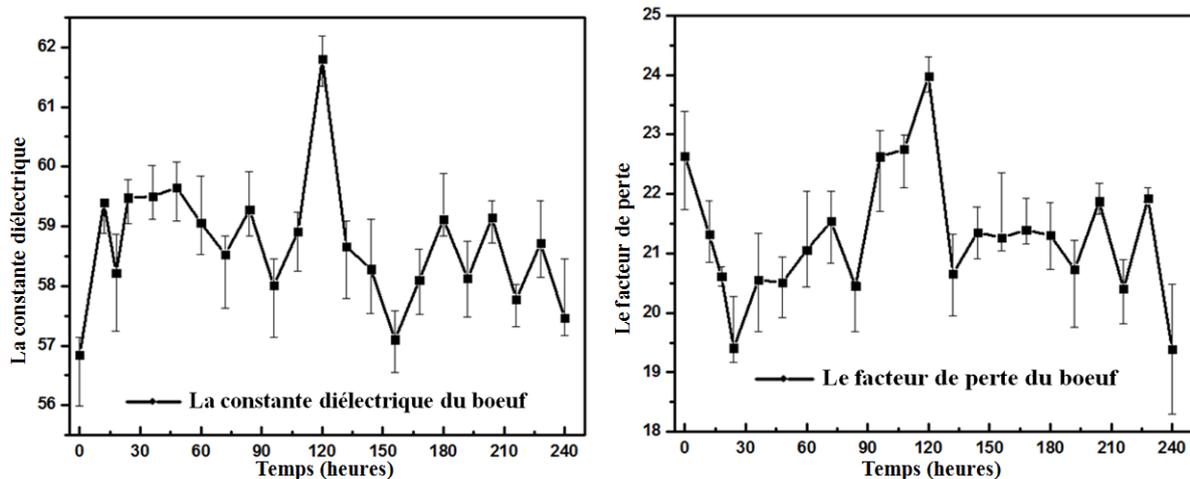


Figure 5.23 - La permittivité du boeuf en fonction du temps

Après avoir exécuté les mesures des échantillons de viande et de fromage comme décrit ci-dessus, nous obtiendrons les paramètres humidité, pH, et permittivité diélectrique du fromage ainsi que le pH et la permittivité diélectrique pour les échantillons de viande de porc et de bœuf en fonction du temps comme dans les figures 5.22, 5.23 et 5.24. Les permittivités diélectriques des aliments obtenues après les caractérisations seront utilisées comme une base des données dans le modèle de simulation pour la conception des tags capteurs RFID en vue de détecter la qualité des aliments.

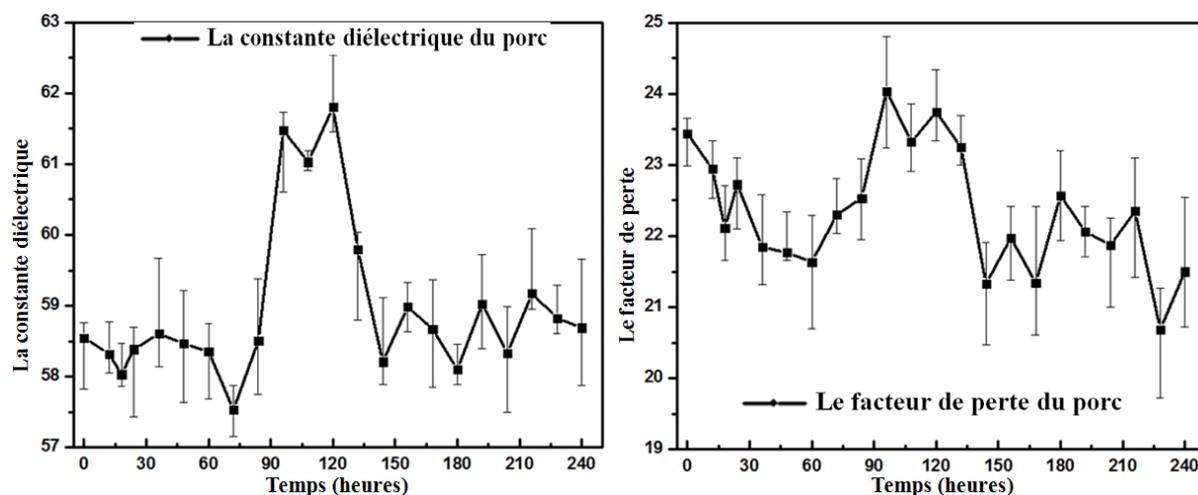


Figure 5.24 - La permittivité du porc en fonction du temps

À partir des mesures du pH de la viande donné sur la figure 5.22, nous voyons qu'il y a une transition dans les courbes de pH (qui présente une valeur minimale à 120h) tandis que la permittivité s'approche de ses valeurs maximales dans la partie réelle et la partie imaginaire (la constante diélectrique et le facteur de perte sur les figures 5.23 et 5.24). Après 120h, le pH va augmenter dramatiquement et la permittivité se réduit fortement. Il y a aussi apparition du phénomène de l'odeur et la viscosité des échantillons du porc et du boeuf. Un autre point est le pH qui va dépasser le seuil de 6.2 après 120h (figure 5.22). De ces analyses, nous pouvons conclure que la contamination de la viande (du porc et du boeuf) apparait après 120h environ.

Selon ces résultats nous obtenons que la permittivité diélectrique de l'échantillon de boeuf en bon état (correspondant à 0h) est de $56.8473 + j22.6368$ et la permittivité diélectrique à l'état de contamination (correspondant à 120h) du boeuf est de $61.8023 + j23.9777$. Pour les échantillons de porc, la permittivité diélectrique en état de bonne qualité est de $58.548 + j23.4422$ (correspondant à 0h) alors que la permittivité diélectrique à l'état la contamination correspond à $61.8027 + j23.7454$ après 120h. La différence des valeurs de la permittivité entre les 2 états (de bonne qualité et de la contamination) sera prise en compte dans les modèles de simulation pour la conception des tags capteurs. Cette variation de la permittivité se traduit par un changement de la portée de lecture.

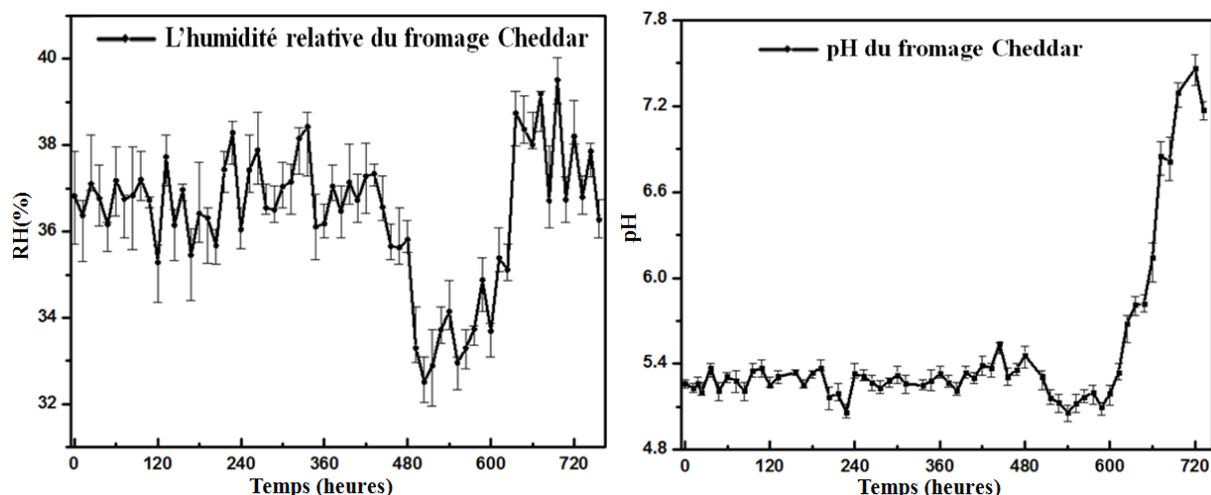


Figure 5.25 - L'humidité relative (à gauche) et le pH (à droite) du fromage Cheddar en fonction du temps

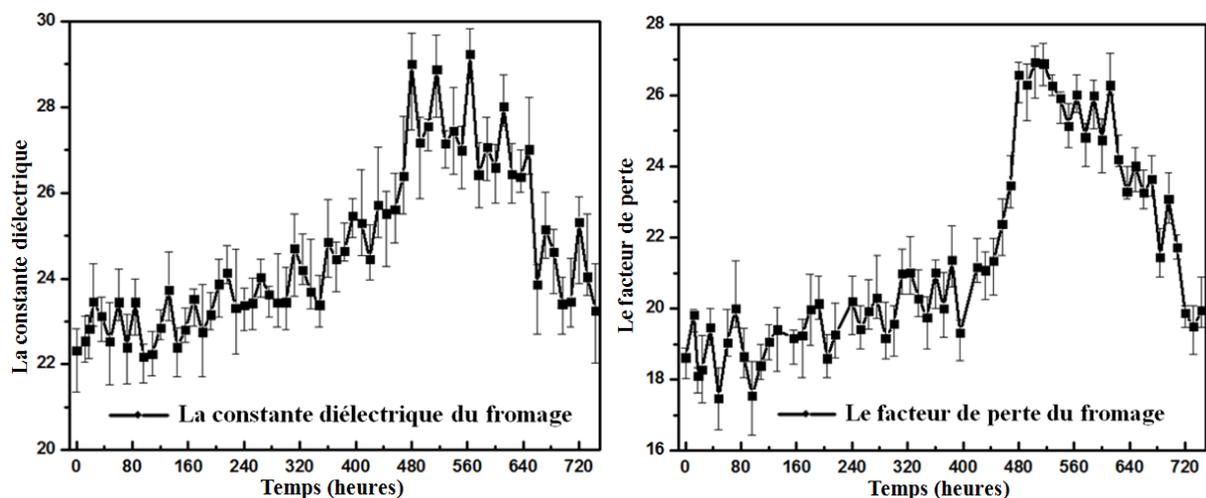


Figure 5.26 - La permittivité du fromage Cheddar en fonction du temps

Selon les normes de l'évaluation de la qualité des aliments comme USDA (United States Department of Agriculture) ainsi que ISO (International Standards Organisation) [5.23-5.25], nous pouvons conclure que le fromage Cheddar devient contaminé si le pH est supérieur à 6.2 et l'humidité relative dépasse la valeur de 39%. À partir des figures 5.25 et 5.26, nous pouvons noter que l'état de contamination se situe entre 620 et 640 heures. À ces moments, l'humidité relative et le pH du fromage dépassent les seuils de 39% et 6.2 tandis que les parties réelle et imaginaire de la constante diélectrique décroissent brusquement comme dans la figure 5.26. D'autre part, les signes visibles tels que l'odeur et la viscosité du fromage apparaissent également avec la diminution de la permittivité. À partir de ces analyses, nous pouvons déduire que la permittivité du bon état du fromage est $22.3918 + j19.99$

(correspondant à 80h) et la permittivité diélectrique de l'état contaminé est $29.2293 + j26.0108$ (correspondant à 560h).

À partir des mesures et des analyses pour les échantillons de viande et du fromage ci-dessus, nous allons sélectionner un ensemble de valeurs de permittivités pour la conception des étiquettes capteurs RFID comme dans le tableau 6.1.

Tableau 6.1 - Les valeurs de la permittivité choisies pour la conception des tags capteur

Temps (heures)	80	160	240	320	400	480	560	640	720
Échantillon de fromage	22.3918 + j19.99	23.5185 + j19.2463	23.3827 + j20.2009	24.2016 + j21.0176	25.2858 + j19.3133	28.9994 + j26.5697	29.2293 + j26.0108	26.3611 + j23.2771	25.3146 + j19.8634
Tangent de perte	0.892	0.818	0.864	0.868	0.7638	0.9162	0.8899	0.883	0.7847
Temps (heures)	0	30	60	90	120	150	180	210	240
Échantillon de porc	58.548 + j23.4422	58.3861 + j22.7259	58.3551 + j21.6361	61.476 + j24.0383	61.8027 + j23.7454	58.9823 + j21.9742	58.1019 + j22.5657		
Tangent de perte	0.4	0.389	0.3556	0.391	0.386	0.3876	0.3895		
Temps (heures)	0	30	60	90	120	150	180	210	240
Échantillon de boeuf	56.8473 + j22.6368	59.4764 + j19.4102	59.0539 + j21.0592	58.006 + j22.6277	61.8023 + j23.9777	57.103 + j21.2671	59.1214 + j21.3047	57.775 + j20.4042	57.4604 + j19.3841
Tangent de perte	0.3982	0.3263	0.3412	0.4049	0.3879	0.3724	0.3604	0.3531	0.3373

5.5. Conclusions

Plusieurs approches ont été proposées pour développer des dispositifs RFID avec une certaine capacité de détection et donc en tant que capteur comme décrites dans la littérature. Dans notre cas, la famille de tags considérée peut travailler sans capteur spécifique intégré, car on exploite la dépendance de l'impédance d'entrée du tag et de la section de radar avec les caractéristiques physiques de l'environnement et géométriques de l'antenne. En effet, il y a une relation entre les caractéristiques de l'antenne (comme l'impédance ou la portée de lecture) et la permittivité de l'objet sur lequel le tag RFID est monté. La prise en compte de l'effet des paramètres de l'environnement (température, humidité...) sur la permittivité des produits alimentaires et leur évolution en fonction du temps sont très importants pour l'idée de conception du tag capteur dans cette thèse. À partir de ces considérations théoriques et résultats expérimentaux dans ce chapitre, nous visons à exploiter l'impact sur les caractéristiques du tag RFID passif quand il est monté sur un produit alimentaire dont sa permittivité change dans le temps pour la détection de la qualité de la viande. Les résultats et discussion de cette technique seront présentés dans le chapitre suivant.

Bibliographie – Chapitre 5

- [5.1]. I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, “A survey on sensor networks,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 40, no. 8, pp.102–114, Aug. 2002.
- [5.2]. M. Aboelaze and F. Aloul, “Current and future trends in sensor net-works: A survey,” in *Preoc. 2nd IFIP Int. Conf. Wireless Optical Communications Networks*, March 2005, pp. 551-555.
- [5.3]. M. A. M. Vieira, C. N. Coelho, Jr, D. C. da Silva, Jr, and J. M. daMata, “Survey on wireless sensor network devices,” in *Proc. IEEE Conf. Emerging Technologies Factory Automation*, Sep. 16–19, 2003, vol. 1, pp. 537–544.
- [5.4]. T. Arampatzis, J. Lygeros, and S. Manesis, “A survey of applications of wireless sensors and wireless sensor networks”, *Proc. 13th Mediterranean Conf. Control Automation*, Cyprus, Turkey, Jun. 2005, pp. 719–724.
- [5.5]. Komarov, V., S. Wang, and J. Tang. 2005. *Permittivity and Measurement*. K. Chang (eds.). *The Wiley Encyclopedia of RF and Microwave Engineering*. John Wiley & Sons, Inc., New York. 4: 3693-3711
- [5.6]. Kenneth R. Foster, " Dielectric Properties of Tissues", *The Biomedical Engineering Handbook: Second Edition*, Ed. Joseph D. Bronzino, Boca Raton: CRC Press LLC, 2000
- [5.7]. Tang, J., Feng, H. & Lau, M., "*Microwave heating in food processing*", in *Advances in Bioprocessing Engineering*, ed. X. Young, & J. Tang, World Scientific Publisher, New Jersey, pp. 1-43, 2002
- [5.8]. U. Mc Carthy, G. Ayalew, F. Butler, K. Mc Donnell, J. Lyng, S. Ward, “Permittivity of Meat Fish and their Components at UHF RFID Frequencies and Industry Relevant Temperatures”, *Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal*, Manuscript 1280. Vol. XI, December 2009.
- [5.9]. Scott B. Jones, Shmulik P. Friedman, “Particle shape effects on the effective permittivity of anisotropic or isotropic media consisting of aligned or randomly oriented ellipsoidal particles”, *Water Resources Research*, Vol. 36, No. 10, Pages 2821-2833, October 2000.

- [5.10]. T. Ohlsson and N. Bengtsson, "Microwave technology and foods," in *Advances in Food and Nutrition Research*. vol. Volume 43, ed: Academic Press, 2001, pp. 65-140
- [5.11]. S. Ryyänen, "The electromagnetic properties of food materials: A review of the basic principles," *Journal of Food Engineering*, vol. 26, pp. 409-429, 1995
- [5.12]. Metaxas, A.C. and R. J. Meredith (1983), "Industrial Microwave Heating", London: Peter Peregrinus.
- [5.13]. Mudgett, R.E. (1985). Dielectric properties of foods, *In Microwaves in the Food Processing Industry* (ed.) R.V. Decareau. Academic Press, Inc., New York
- [5.14]. Basaran-Akgul, N., Basaran, P. and Rasco, B.A., "Effect of Temperature (-5 to 130°C) and Fiber Direction on the Dielectric Properties of Beef *Semitendinosus* at Radio Frequency and Microwave Frequencies", *Journal of Food Science*, 2008
- [5.15]. Mark J. Schroeder, Anupama Sadaasiva, Robert M. Nelson, "An Analysis on the Role of Water Content and State on Effective Permittivity Using Mixing Formulas", *Journal of Biomechanics, Biomedical and Biophysical engineering*, Vol. 2, Issue 1, 2008
- [5.16]. Z.F. Ghatass, M.M. Soliman and M.M. Mohamed , " Dielectric Technique for Quality Control of Beef Meat in the Range 10 kHz - 1 MHz", *American-Eurasian Journal of Scientific Research* 3, ISSN 1818-6785, 2008, pp. 62-69
- [5.17]. Agilent - "Basics of Measuring the Dielectric Properties of Materials", Application Note.
- [5.18]. Komarov, V., S. Wang, and J. Tang. 2005. Permittivity and Measurement. K. Chang (eds.). *The Wiley Encyclopedia of RF and Microwave Engineering*. John Wiley & Sons, Inc., New York. 4:3693-3711
- [5.19]. S. Ryyänen, "The electromagnetic properties of food materials: A review of the basic principles," *Journal of Food Engineering*, vol. 26, pp. 409-429, 1995
- [5.20]. Agilent - "85070E Dielectric Probe Kit 200 MHz to 50 GHz", Technical Overview. Available from: <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5091-6247EUS.pdf>
- [5.21]. Z.F. Ghatass, M.M. Soliman and M.M. Mohamed , " Dielectric Technique for Quality Control of Beef Meat in the Range 10 kHz - 1 MHz", *American-Eurasian Journal of Scientific Research* 3, ISSN 1818-6785, 2008, pp. 62-69

[5.22]. [Http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5989-5479EN.pdf](http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5989-5479EN.pdf)

[5.23]. Jean Buzby (2005-02-01). "USDA" . Ers.usda.gov. Retrieved 2010-05-01

[5.24]. "BCD5: Natural American Cheese for use in domestic programs", USDA Commodity Requirements, 2008

[5.25]. Standards of ISO 1735 : 2004, "Cheese and processed cheese products - Determination of fat content - Gravimetric method", 2004.

[5.26]. Food and Agriculture Organisation Food and Nutrition Paper (FAO FNP) 14/7, p.205, 1986

Chapitre 6

Conception et caractérisation des tags RFID capteurs pour la détection de la qualité des aliments

La technologie RFID offre de nombreux avantages notamment la capture automatique des données sans contact d'une étiquette intelligente ce qui permet d'économiser du temps et des coûts de main-d'œuvre considérables. La transformation des étiquettes RFID en capteurs est une orientation récente de la RFID qui est très intéressante et très étudiée. Dans ce chapitre, nous présentons une nouvelle approche pour doter les tags RFID de capacité de détection, qui au final les transforme en capteur pour le suivi des contaminations alimentaires. Pour cela nous utilisons des tags RFID UHF conventionnels et exploitons la sensibilité de l'antenne du tag à son environnement pour remonter aux propriétés de l'objet sur lequel le tag est apposé. Dans ce chapitre, nous exploitons la base de données fondamentale construite à partir de la caractérisation de la permittivité des produits alimentaires comme le fromage et la viande. Ces données sont très importantes pour la conception des tags capteur RFID comme décrite au chapitre 5. Les résultats de mesure et les discussions sur les perspectives de cette étude sont aussi présentés.

Table des matières

6.1. LES APPROCHES POUR L'INTEGRATION DE LA FONCTION CAPTEUR DANS LES SYSTEMES SANS FIL.....	158
6.1.1. CAPTEUR DE BACTERIES	158
6.1.2. TAG RFID ACTIF AVEC CAPTEUR SPECIFIQUE	161
6.1.2.1. Antenne.....	161
6.1.2.2. Le bloc de RF Front-End	162
6.1.2.3. Le protocole de communication RadioFréquence	162
6.1.2.4. La batterie	162
6.1.2.5. Le bloc logique.....	162
6.1.2.6. Capteurs	163
6.1.3. LES TAGS RFID PASSIFS AVEC LES MATERIAUX SENSIBLES	163
6.1.4. LE CONCEPT DU TAG MULTIPTS	164
6.1.4.1. Introduction au tag multiports	164
6.1.4.2. Définitions de base pour les systèmes RFID.....	165
6.1.4.3. Le concept de tag multiports	166
6.1.4.4. Détection de la permittivité de la cible	168
6.2. L'INTEGRATION DE LA FONCTION CAPTEUR POUR LE TAG RFID UHF PASSIF.....	169
6.2.1. LES CONCEPTS DE BASE POUR L'APPROCHE DU TRAVAIL	169
6.2.2. LA METHODE DE LA CONCEPTION	172
6.3. LA CONCEPTION DES TAGS RFID CAPTEURS.....	174
6.3.1. LES GEOMETRIES DE L'ANTENNE PROPOSEES POUR LA CONCEPTION DES TAGS CAPTEURS RFID	174
6.3.2. LA CONCEPTION DES TAGS CAPTEURS RFID POUR LA DETECTION DE LA QUALITE DU BOEUF	177
6.3.2.1. La méthode de conception.....	178
6.3.2.2. La considération de la distance d entre les 2 paires de puce/antenne.....	180
6.3.2.3. Les performances de la conception finale du tag capteur SO-1	183
6.3.2.4. Les conceptions du tag capteur TO-1 et TO-2	186
6.4. LA CONFIGURATION DU BANC-MESURE ET LES RESULTATS EXPERIMENTAUX.....	188
6.5. CONCLUSIONS	195
BIBLIOGRAPHIE – CHAPITRE 6	198

Liste des figures et tableaux

FIGURE 6.1 - CONFIGURATION DU SYSTEME DE DETECTION DE LA CONCENTRATION DE BACTERIES.....	158
FIGURE 6.2 - SCHEMA DE LA CONFIGURATION POUR LE LIQUIDE.....	159
FIGURE 6.3 – PARTIES REELLE ET IMAGINAIRE DE L'IMPEDANCE ET LA GEOMETRIE DU CAPTEUR	159
FIGURE 6.4 - PERMITTIVITE COMPLEXE MESUREE PAR UN CAPTEUR IMMERGE DANS DE LA VIANDE.....	160
FIGURE 6.5 - SCHEMA BLOC D'UN TAG CAPTEUR RFID ACTIF	161
FIGURE 6.6 - TAG CHIPLESS POUR LA DETECTION DES GAZ.....	163
FIGURE 6.7 - SCENARIO DANS LEQUEL LE CHANGEMENT DES CARACTERISTIQUES DE LA CIBLE GENERE UNE MODIFICATION DU SIGNAL DE RETRO-MODULATION	165
FIGURE 6.8 – LES TAG MULTIPTS	167
A) UN GROUPE DE TAGS MONOPOINT CO-LOCALISES	167
B) UNE ETIQUETTE MULTIPTS : UNE ANTENNE AVEC PLUSIEURS PUCES.....	167
FIGURE 6.9 - ENSEMBLES D'ACTIVATION ET GAMME DE DETECTION D'UN TAG RFID A DEUX-PORTS EN MODE DETECTION ANALOGIQUE.....	168
FIGURE 6.10 - LE MODELE DE SIMULATION AVEC LES PARAMETRES DE CHAQUE COUCHE DE MATERIAUX.....	171
FIGURE 6.11 - GEOMETRIE DE L'ANTENNE UTILISEE POUR LA SIMULATION	171
FIGURE 6.12. PORTEE DE LECTURE (A GAUCHE) ET IMPEDANCE DE L'ANTENNE (A DROITE) DU TAG PROPOSE EN FONCTION DE LA PERMITTIVITE	172
FIGURE 6.13 - PROCESSUS DE CONCEPTION DES TAGS-CAPTEUR POUR LA DETECTION DE LA CONTAMINATION DES ALIMENTS	173
FIGURE 6.14 - LES STRUCTURES DE L'ANTENNE PROPOSEES POUR LES CONCEPTIONS DU TAG CAPTEUR	174
FIGURE 6.15 - LA PARTIE REELLE ET LA PARTIE IMAGINAIRE DE L'IMPEDANCE DES STRUCTURES DE L'ANTENNE SELON LA PERMITTIVITE.....	175
FIGURE 6.16 - LE GAIN ET LE READ-RANGE DES STRUCTURES DE L'ANTENNE SELON LA PERMITTIVITE	176
TABLEAU 6.1 - LES PERMITTIVITES DU BOEUF A PARTIR DE LA MESURE.....	178
FIGURE 6.17 - L'IMPEDANCE DE LA STRUCTURE SO-1 EN FONCTION DU CHANGEMENT DE LA PERMITTIVITE DU BOEUF SELON LE TEMPS	179
FIGURE 6.18 - LE READ-RANGE DE CHAQUE PAIRE DE L'ANTENNE/PUCE MISES SEPARÉMENT SUR L'ÉCHANTILLON DU BOEUF	180
FIGURE 6.19 – STRUCTURE A DEUX PAIRES ANTENNA/PUCE AVEC UNE DISTANCE "D" ENTRE LES 2 PAIRES	181
FIGURE 6.20 - LE READ-RANGE DE CHAQUE PAIRE DE L'ANTENNE/PUCE MISES ENSEMBLE SUR L'ÉCHANTILLON DU BOEUF AVEC LA DISTANCE D ENTRE 1CM ET 4CM	181
FIGURE 6.21 - LE READ-RANGE DE CHAQUE PAIRE DE L'ANTENNE/PUCE MISES ENSEMBLE SUR L'ÉCHANTILLON DU BOEUF AVEC LA DISTANCE D ENTRE 5CM ET 8CM	182

FIGURE 6.22 - LA CONCEPTION FINALE POUR LE TAG CAPTEUR SO-1 AVEC DISTANCE $d = 1\text{cm}$	183
FIGURE 6.23 - LES DIAGRAMMES DE RAYONNEMENT DE LA CONCEPTION SO-1 SUR THETA-PLAN ET PHI-PLAN.....	184
FIGURE 6.24 - LES DIAGRAMMES DE RAYONNEMENT DE LA CONCEPTION SO-1 SUR THETA-PLAN ET PHI-PLAN PRESQUE INCHANGES EN FONCTION DU TEMPS	184
FIGURE 6.25 - LA CONFIGURATION DES TAGS ET LECTEURS POUR LE SCENARIO DE L'APPLICATION REELLE	185
FIGURE 6.26 - LES RESULTATS DE SIMULATION FINAUX DE LA CONCEPTION DU TAG CAPTEUR TO-1	186
FIGURE 6.27 - LES DIAGRAMMES DE RAYONNEMENT DE LA CONCEPTION TO-1 SUR PHI-PLAN (A GAUCHE) ET THETA-PLAN (A DROITE).....	186
FIGURE 6.28 - LES RESULTATS DE SIMULATION FINAUX DE LA CONCEPTION DU TAG CAPTEUR TO-2.....	187
FIGURE 6.29 - LES DIAGRAMMES DE RAYONNEMENT DE LA CONCEPTION TO-2 SUR PHI-PLAN (A GAUCHE) ET THETA-PLAN (A DROITE).....	188
FIGURE 6.30 - LES PROTOTYPES DU TAG CAPTEUR SO-1, TO-1 ET TO-2 POUR LA DETECTION DU BOEUF CONTAMINE.....	189
FIGURE 6.31 - LA MESURE DES READ-RANGE EN 3D DES CONCEPTIONS DU TAG CAPTEUR AVEC LE BOEUF.....	189
FIGURE 6.32 - LES RESULTATS DES MESURES REELLES POUR LA CONCEPTION SO-1	190
FIGURE 6.33 - LES DIAGRAMMES DE RAYONNEMENT MESURES POUR LA CONCEPTION SO-1 SUR PHI-PLAN (A GAUCHE) ET THETA-PLAN (A DROITE).....	190
FIGURE 6.34 - LES RESULTATS DES MESURES REELLES POUR LA CONCEPTION TO-1	191
FIGURE 6.35 - LES DIAGRAMMES DE RAYONNEMENT MESURES POUR LA CONCEPTION TO-1 SUR PHI-PLAN (A GAUCHE) ET THETA-PLAN (A DROITE).....	191
FIGURE 6.36 - LES RESULTATS DES MESURES REELLES POUR LA CONCEPTION TO-2.....	192
FIGURE 6.37 - LES DIAGRAMMES DE RAYONNEMENT MESURES POUR LA CONCEPTION TO-2 SUR PHI-PLAN (A GAUCHE) ET THETA-PLAN (A DROITE).....	192
FIGURE 6.38 - ÉTUDE DE LA REPETABILITE DU TAG CAPTEUR TO-1 A LA CONDITION DE STOCKAGE T2 (DONT LA TEMPERATURE DE $7\pm 1^{\circ}\text{C}$ ET L'HUMIDITE DE $50\pm 5\%$)	193
FIGURE 6.39 - ÉTUDE DE LA REPETABILITE DU TAG CAPTEUR TO-1 A LA CONDITION DE STOCKAGE T1-H2 (DONT LA TEMPERATURE DE $3\pm 1^{\circ}\text{C}$ ET L'HUMIDITE DE $80\pm 5\%$)	193
FIGURE 6.40 - ÉTUDE DES EFFETS DE LA TEMPERATURE DE STOCKAGE SUR LES PERFORMANCES DU TAG CAPTEUR TO-1 (DONT $T1=2\pm 1^{\circ}\text{C}$ ET $T2=8\pm 1^{\circ}\text{C}$, L'HUMIDITE EST FIXEE A $50\pm 5\%$)	194
FIGURE 6.41 - ÉTUDE DES EFFETS DE L'HUMIDITE DE STOCKAGE SUR LES PERFORMANCES DU TAG CAPTEUR TO-1 (DONT LA TEMPERATURE EST FIXEE A $5\pm 1^{\circ}\text{C}$, $\%RH1=50\pm 5\%$ ET $\%RH2=80\pm 5\%$).....	195

6.1. Les approches pour l'intégration de la fonction capteur dans les systèmes sans fil

Cette partie présentera les idées de capteurs issues de recherches bibliographiques qui peuvent être utiles dans le cadre de cette thèse. La première idée est un capteur de bactéries [6.1]. En détectant un changement de la concentration de bactéries dans le temps, nous pouvons détecter les produits alimentaires contaminés, si la concentration de bactéries dans ces produits dépasse une limite déterminée.

6.1.1. Capteur de bactéries

Par la concentration de bactéries dans un produit, nous pouvons détecter la qualité du lait, de la viande et de la bière en tenant compte de la variation de la permittivité diélectrique complexe de l'objet qui est fonction de la concentration de bactéries dans l'échantillon. L'échantillon peut être un liquide (lait, bière) ou un échantillon solide (viande). Le capteur qui peut être un résonateur LC sera mis à l'intérieur de l'échantillon (figure 6.1).

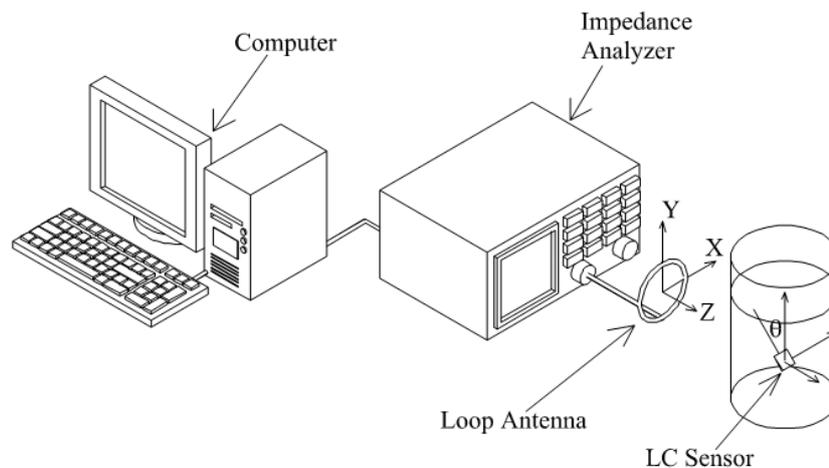


Figure 6.1 - Configuration du système de détection de la concentration de bactéries [6.1]

Puis, cet échantillon (avec le capteur) sera placé à proximité d'une antenne externe pour réaliser un couplage avec le résonateur LC. On pourra donc mesurer la fréquence de résonance (f_0 sur la figure 6.3) et la fréquence de réactance nulle (f_z sur la figure 6.3).

Ainsi, une variation de la concentration des bactéries affectera la permittivité de l'ensemble de l'échantillon et modifiera l'impédance du capteur. Le changement de

l'impédance du capteur décalera la fréquence de résonance et la fréquence de réactance nulle. Un étalonnage permettra de remonter à la concentration de bactérie.

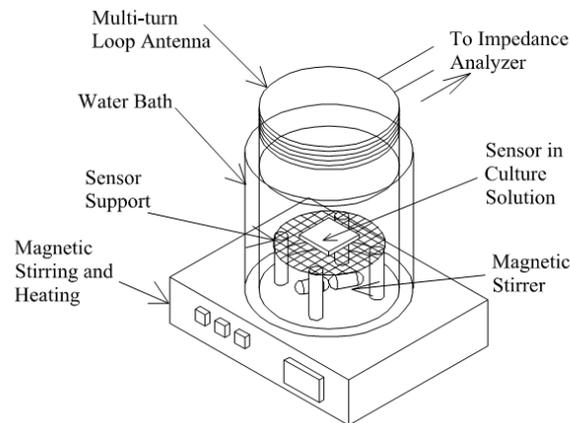


Figure 6.2 - Schéma de la configuration pour le liquide [6.1]

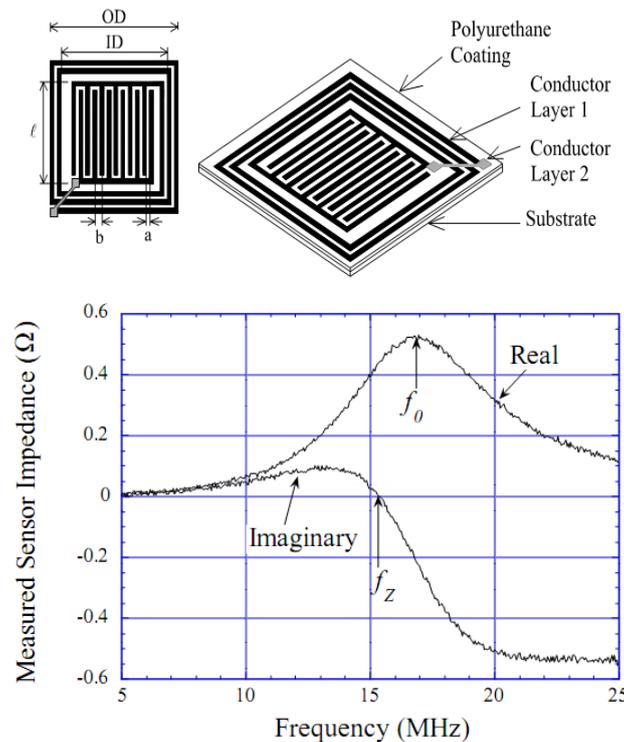


Figure 6.3 – Parties réelle et imaginaire de l'impédance et la géométrie du capteur [6.1]

Grâce à la fréquence de résonance et la fréquence de réactance nulle, nous pouvons calculer la partie réelle et la partie imaginaire de la permittivité complexe de l'échantillon du liquide ou du solide. Dans [6.1], on trouve de modèle donnant la permittivité effective du milieu étudiée en fonction des fréquences f_0 et f_z :

$$e'_{eff} = \text{Re}(e_{eff}) = \frac{1}{(2\rho f_o)^2 L k e_o} - e_s \quad (6.1)$$

$$e''_{eff} = -\text{Im}(e_{eff}) = \frac{\sqrt{f_o^2 - f_z^2}}{4\rho^2 f_o^3 L k e_o} \quad (6.2)$$

Où ϵ_0 est la permittivité de l'espace libre ($\epsilon_0=8.854 \times 10^{-12}$ Farads/m), ϵ_s est la permittivité relative du substrat sans pertes, K est une constante qui dépend de la capacité de la cellule interdigitée, et L est l'inductance de la bobine spirale. La constante κ et l'inductance L sont calculées à partir de la géométrie du capteur:

$$\kappa = \frac{\ell(N_c - 1)K[(1 - (a/b)^2)^{1/2}]}{2K[a/b]} \quad (6.3)$$

$$L = 1.39 \cdot 10^{-6} (OD + ID) N_L^{5/3} \log_{10} \left(4 \frac{OD + ID}{OD - ID} \right) \quad (6.4)$$

Où a , b , L , OD , ID sont les dimensions du capteur comme indiqué dans la figure 6.3.

Après un certain temps, la concentration des bactéries augmentera ainsi que la permittivité diélectrique complexe du produit alimentaire liquide ou solide. Un exemple de mesure réelle de ce capteur est donné dans la figure 6.4.

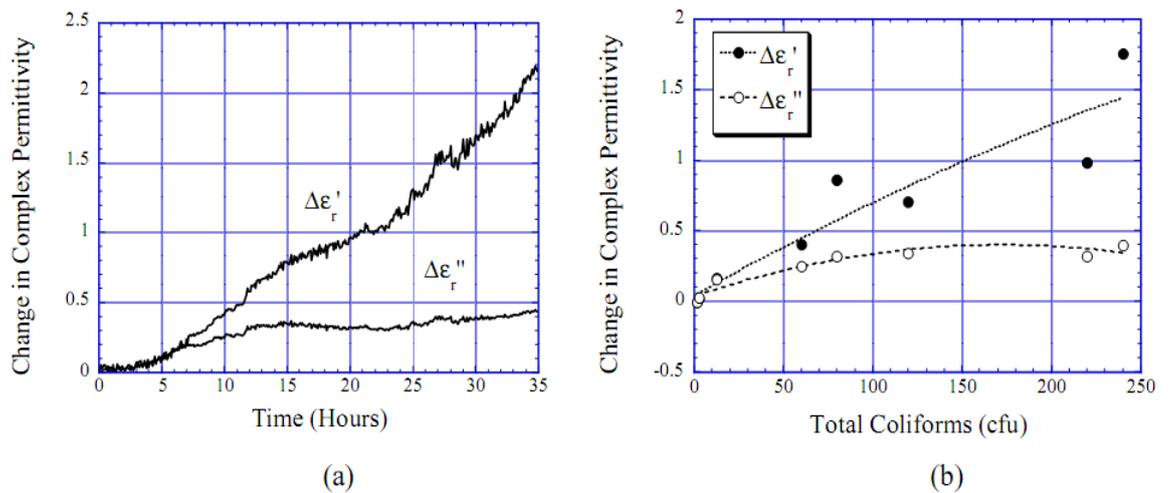


Figure 6.4 - Permittivité complexe mesurée par un capteur immergé dans de la viande [6.1]

6.1.2. Tag RFID actif avec capteur spécifique

Une autre approche pour intégrer la fonction de capteur dans un tag RFID UHF est d'utiliser des capteurs spécifiques connectés directement avec la puce RFID [6.2]. Ainsi le capteur va mesurer les paramètres de l'environnement puis les valeurs mesurées seront transférées vers le lecteur par l'antenne du tag. Le schéma bloc général et les caractéristiques techniques des étiquettes RFID capteurs sont abordées dans cette section. Dans cette famille nous trouvons aussi bien des tags capteurs RFID actifs ou semi-passifs. Du point de vue matériel, une étiquette RFID capteur de cette famille peut être représentée par le schéma bloc représenté dans la figure 6.5. Ce schéma met en évidence plusieurs blocs fonctionnels, notamment:

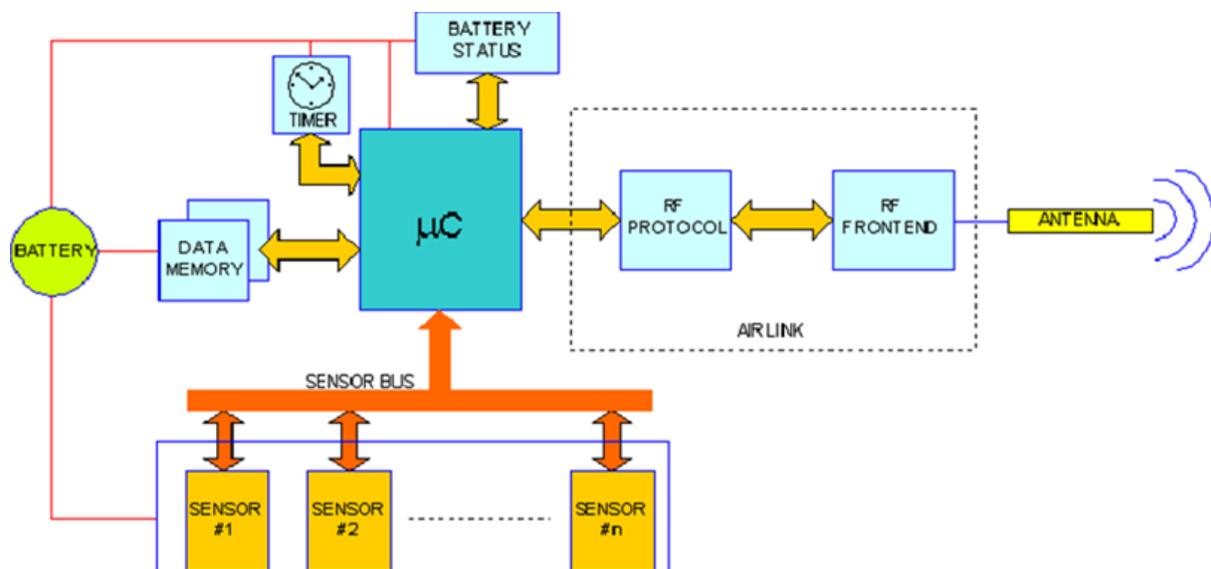


Figure 6.5 - Schéma bloc d'un tag capteur RFID actif

6.1.2.1. Antenne

Les tags capteurs RFID communiquent avec les interrogateurs (lecteurs) en utilisant un lien radiofréquence (RF) grâce à une antenne. Dans les tags capteurs compatibles, la communication RF est assurée par le principe de base de la RFID, à savoir la communication par ondes réfléchies combinée avec la modulation de charge (retro-modulation), ce qui ne requiert ni oscillateur local ni source d'énergie puisque le tag envoie ses informations au lecteur.

6.1.2.2. Le bloc de RF Front-End

Le Front-End RF pourrait être considéré comme une sorte d'émetteur-récepteur qui fonctionne comme un pont entre le domaine d'électricité analogique provenant de l'antenne et le domaine électronique numérique requise par le bloc du protocole de communication RF.

6.1.2.3. Le protocole de communication RadioFréquence

Le bloc protocole RF qui gère la communication comprend toute la logique nécessaire pour supporter les commandes définies dans l'interface air ainsi que les circuits et traitement pour le Front-End RF [6.3].

6.1.2.4. La batterie

Les contraintes typiques qui doivent être prises en compte dans le choix d'une batterie pour les applications RFID sont le coût, la gamme de température opérationnelle, et sa durée de vie. Chacun de ces paramètres peut fortement influencer sur la conception finale. Habituellement, la batterie est l'un des éléments les plus coûteux du tag entier et son coût est directement lié aux caractéristiques notamment la durée de vie et la gamme de température.

6.1.2.5. Le bloc logique

Le bloc logique réalise l'interface entre la mémoire de données, le gestionnaire du protocole RF et les dispositifs capteurs. Il fournit « l'intelligence » nécessaire pour les modes de fonctionnement et la gestion des données. En fait, les étiquettes capteurs devraient avoir un ensemble de modes de fonctionnement définies par l'utilisateur selon les caractéristiques de l'application déployée. Par exemple, il devrait être possible de définir l'état du capteur (activé, désactivé), le temps d'échantillonnage (l'intervalle de temps entre deux acquisitions consécutives d'échantillons) et le mode d'accès de données (en continu, à partir d'un seuil, piloté par les événements, etc.)

6.1.2.6. Capteurs

Les capteurs sont au cœur d'une étiquette capteur RFID. Différents types de capteurs ont été décrits dans la littérature [6.4-6.7]. Du point de vue architecture, les capteurs doivent s'interfacer facilement avec le bloc logique et partager (lorsque possible) un bus commun pour réduire le nombre des capteurs activés sur la même étiquette. Le choix des capteurs pour les applications du tag-capteur RFID dépend de l'utilisateur et des exigences du système. Des exemples sont donnés comme capteur de gaz [6.8-6.10], capteur de la température [6.11-6.12], capteur de pression [6.13-6.15], capteur bio-médical [6.16-6.18], capteur de l'humidité [6.19]... Il existe aujourd'hui sur le marché des capteurs couplés avec les étiquettes RFID comme la plateforme WISP (Wireless Identification Sensing Platform) de Intel [6.20].

6.1.3. Les tags RFID passifs avec les matériaux sensibles

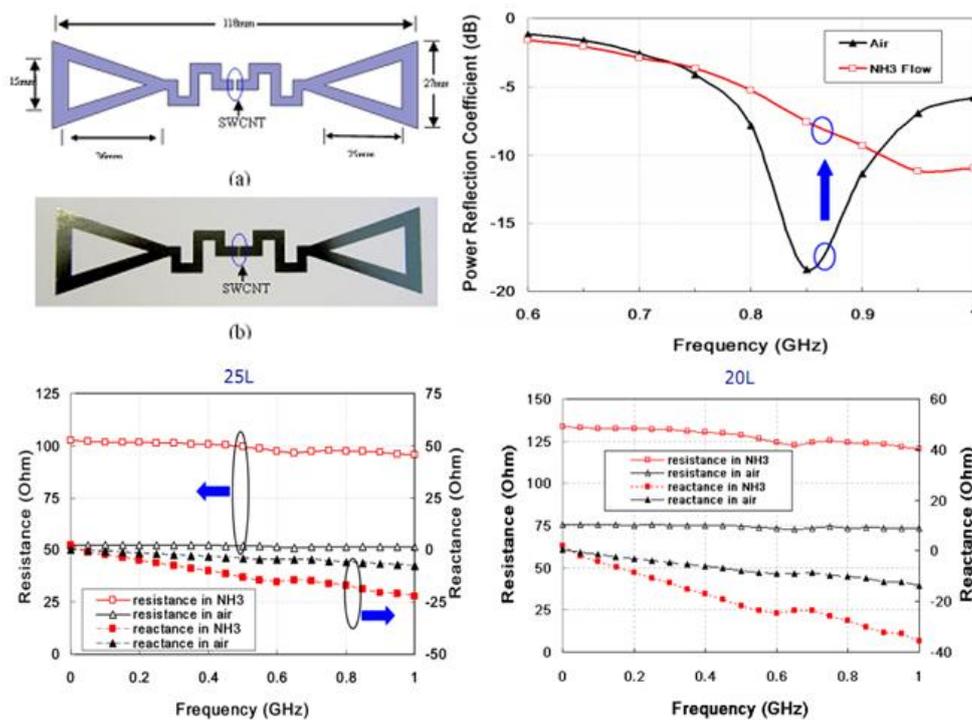


Figure 6.6 - Tag chipless pour la détection des gaz [6.21]

Cette partie présente l'intégration sur le papier d'un capteur de gaz chipless utilisant le nanomatériau sensible SW-CNT (Single-Wall CarbonNanoTube).. Les performances électriques de l'encre à base SW-CNT ultrasensible, qui est imprimée sur l'antenne du tag RFID passif, sont données jusqu'à 1GHz. Le module entier est réalisé par l'impression de jet

d'encre sur un substrat de papier cout-bas qui est conçu pour fonctionner dans la bande RFID UHF européenne comme illustré sur la figure 6.6.

Dans cette étude, 20 couches de SWCNT ont été utilisées pour imprimer la zone sensible au centre de l'étiquette RFID fabriquée. Dans l'air pur, la performance du film imprimé est proche à celui d'une charge 50-ohm avec un coefficient de reflexion de -10dB à 868MHz. En présence du gaz NH_3 , le coefficient de reflexion atteint -13dB, soit une diminution de 20% de l'impédance équivalente et une variation de 5% du signal réfléchi par l'antenne. Ce système totalement passif peut être envisagé pour réaliser un système fiable afin d'alerter et détecter la présence de gaz toxiques [6.21]. Néanmoins, un tel capteur requiert l'utilisation d'un lecteur dédié chipless ce qui n'est pas encore disponible sur le marché

6.1.4. Le concept du tag multiports

6.1.4.1. Introduction au tag multiports

La RFID est une des technologies capables de contribuer au développement des Réseaux des Capteurs Sans fil (Wireless Sensor Network) [6.22]. C'est une technologie sans fil, tout à fait compatible avec l'intégration de capteurs de manière au moins hétérogène. Ainsi, la tendance technologique est aujourd'hui de faire converger les technologies d'identification (en particulier la RFID), les capteurs sans fil et les réseaux de communications. Plusieurs approches ont été proposées pour développer des dispositifs RFID avec une certaine capacité de détection et donc en tant que capteur. Un exemple significatif utilisant de la RFID passive est donné par le projet "Wireless Identification Sensing Platform" (WISP) qui a introduit le concept de la modulation du signal d'identification généré par tag par le paramètre qu'on cherche à mesurer [6.20]. Dans ce scénario, la famille de tags considérée peut travailler sans capteur spécifique intégré, car on exploite la dépendance de l'impédance d'entrée du tag et de la section de radar en fonction des caractéristiques physiques et géométriques de l'environnement [6.23].

Il est bien connu que, quand une même étiquette est placée sur des cibles différentes, l'impédance d'entrée de l'antenne du tag peut se désadapter dans certains cas et produire un changement du signal renvoyé par l'étiquette et donc un changement de la distance de lecture. La variation de la puissance réfléchie qui correspond à la désadaptation de l'impédance peut donc être détectée par le lecteur (figure 6.7). Quand un groupe de tags RFID

passifs (circuits intégrés plus l'antenne - transpondeur) ou un tag multiports unique ayant des transpondeurs distincts, sont déployés sur une même cible, plusieurs signaux corrélés sont réfléchis. Chaque signal est marqué par le code d'identification unique (ID) du circuit intégré de réponse. Ces données peuvent être disponibles pour le post-traitement dans le dispositif d'interrogation dans le but de détecter les caractéristiques des cibles ainsi que leur modification et évolution dans le temps.

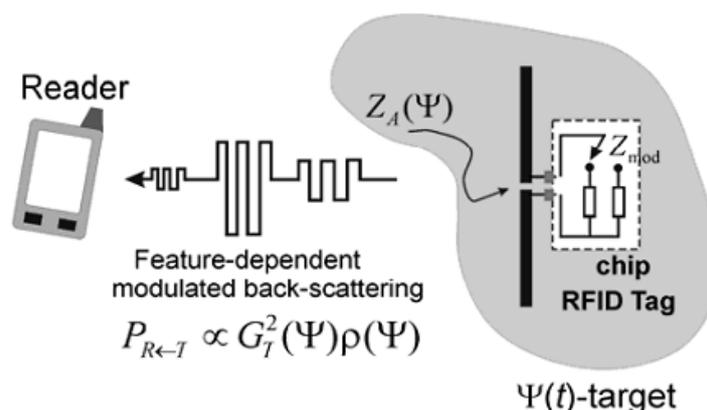


Figure 6.7 - Scénario dans lequel le changement des caractéristiques de la cible génère une modification du signal de rétro-modulation [6.23]

6.1.4.2. Définitions de base pour les systèmes RFID

La plate-forme RFID proposée est foncièrement basée sur la dépendance des paramètres du système de RFID en fonction des caractéristiques de l'objet étiqueté. Les définitions et concepts de base sont maintenant rapidement passés en revue. Au début du protocole de communication entre le lecteur et le tag, le lecteur alimente une étiquette placée sur un objet cible d'abord, en envoyant une onde continue. Pendant ce mode d'alimentation et d'écoute, la puce qui a une impédance d'entrée $Z_{chip} = R_{chip} + jX_{chip}$ doit être adaptée à l'impédance de l'antenne $Z_A = R_A + jX_A$ soit $Z_A = Z_{chip}^*$. Ceci permettra de transférer le maximum de puissance au tag. La puissance absorbée par le tag $P_{R \rightarrow T}$ est donnée par [6.24]:

$$P_{R \rightarrow T} = \left(\frac{\lambda_o}{4\pi d} \right)^2 G_R \tau G_T P_{in} \quad (6.5) \quad \text{Avec} \quad \tau = \frac{4R_{chip}R_A}{|Z_{chip} + Z_A|^2} \quad (6.6)$$

Où λ_o est la longueur d'onde dans espace libre, d est la distance du lecteur-tag, G_R le gain de l'antenne du lecteur et G_T est le gain de l'antenne du tag sur la cible (on suppose une polarisation adaptée des antennes), \mathcal{T} est le coefficient de transmission de puissance. Le tag sera activé lorsque la puissance absorbée dépasse le seuil de la sensibilité de la puce: $P_{R \rightarrow T} > p_T$. P_{in} est la puissance de transmission par le lecteur [6.23].

Durant les prochaines étapes de la communication, le tag reçoit la commande provenant du lecteur et répond finalement par des données en utilisant la technique de rétro-modulation de l'onde continue provenant du lecteur lui-même. La puce du tag travaille comme un commutateur programmable qui permet de basculer entre une impédance haute et une autre impédance basse Z_{mod} . Pendant le transfert de données, le système RFID peut être considéré comme un radar mono-statique et donc il peut être caractérisé par l'équation de radar. Dans le cas des étiquettes RFID classiques nous avons la forme:

$$\frac{P_{R \leftarrow T}(d)}{P_{in}} = \left(\frac{\lambda_o}{4\pi d} \right)^4 G_R^2 G_T^2 \rho \quad (5.7) \quad \text{avec} \quad \rho = \frac{4R_A^2}{|Z_{mod} + Z_A|^2} \quad (6.7)$$

D'où $P_{R \leftarrow T}$ est la puissance reçue par le lecteur et ρ est un paramètre de modulation lié à la section radar du tag.

6.1.4.3. Le concept de tag multiports

Comme n'importe quelle antenne qui est immergée ou à proximité à un objet réel, l'entrée et les caractéristiques de rayonnement d'un transpondeur RFID passif qui est placé sur une cible, ainsi que l'amplitude de la puissance de rétro-réflexion, sont étroitement liées aux propriétés physiques de l'objet étiqueté lui-même. Par exemple, sur sa matière constitutive, la forme, la température, l'humidité et d'autres paramètres. Notons ψ comme l'ensemble des caractéristiques pertinentes de la cible qui pourraient changer avec le temps, ou doivent être captées par une certaine manière. Si l'antenne du tag a été conçue pour des performances optimales lorsqu'ils sont placés sur une cible avec l'ensemble nominal des caractéristiques ψ_T ,

un changement d'un ou plusieurs paramètres de la cible à l'égard de ψ_T peut produire une variation de l'impédance d'entrée et donc la désadaptation de l'impédance $Z_A \neq Z_{chip}^*$.

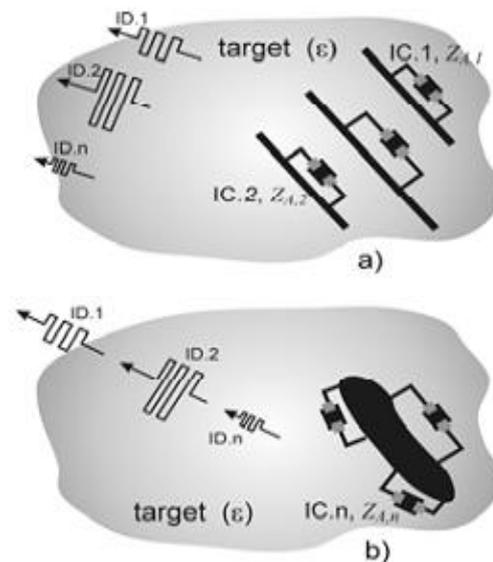


Figure 6.8 – Les tag multiports

a) Un groupe de tags monoport co-localisés

b) Une étiquette multiports : une antenne avec plusieurs puces

Par conséquent, la puissance de rétro-réflexion qui est collectée à par le lecteur sera aussi modifiée. Dans le cas limite, le tag peut être complètement désadapté afin que $P_{R \rightarrow T} < p_T$ et le tag est donc inactif. Plus simplement, nous nous concentrerons sur le cas simplifié où une seule caractéristique de la cible est soumise au changement d'un paramètre. Ce paramètre est la permittivité relative du matériau. Il est maintenant utile de définir l'ensemble d'activation du tag $A_\epsilon(d)$ pour une longueur de liaison d , comme l'ensemble des valeurs de permittivité de la cible pour laquelle la puissance récoltée par le tag est suffisante pour l'activer: $A(d) = \{ \epsilon \mid P_{R \rightarrow T}(d, \epsilon) \geq p_T \}$.

Dans la plate-forme proposée, ces signaux sont originaires (Figure 6.8) auprès d'un groupe de N tags co-localisés sur une même cible, ou d'un tag unique avec N portes d'entrée sous la condition où chaque port de l'antenne a une autre impédance d'entrée. En particulier, nous notons $G_{T,n}$ comme le gain de rayonnement lorsque seul le n -ème port est nourri et les autres sont fermés par une charge de référence et $Z_{A,n}$ comme l'impédance d'entrée au n -ème

port dans les mêmes conditions. Le système de multiports doit être conçu de façon à ce que: après avoir fixé une géométrie de la cible et avoir choisi N différentes permittivités de référence $\{\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n\}$, l'impédance du n -ème port est adaptée à la puce si la valeur de la permittivité de la cible est ε_n (c'est à dire que $Z_{A,n}(\varepsilon_n) = Z_{chip}^*$). Cela signifie que, lorsque le système multi-puces est placé sur une cible réelle, les ports seront différemment désadaptés ($Z_{A,n}(\varepsilon_n) \neq Z_{chip}^*$) et donc ils vont créer les signaux de rétro-réflexion indépendants.

6.1.4.4. Détection de la permittivité de la cible

En fonction de la longueur de la liaison d et de la conception particulière du tag multiports, il existera des gammes de permittivité de la cible sur lesquelles plusieurs circuits intégrés (CI) répondent et donc le lecteur est capable de recueillir plusieurs signaux de rétro-réflexion, ou seulement un seul port est activé et le lecteur peut recevoir un ID unique. Si le tag a été conçu pour des permittivités de référence à proximité, l'impédance de chaque port aura un coefficient de transmission de puissance similaire (mais pas identique) alors que plusieurs puces seront activées. Dans ce cas, le système multiports aura un ensemble de signaux de réponses entre le tag et le lecteur.

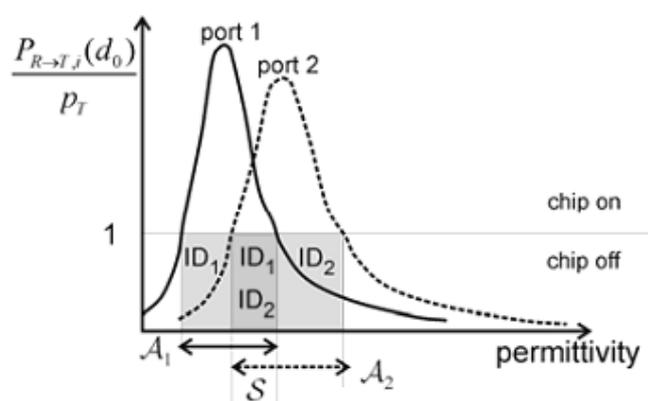


Figure 6.9 - Ensembles d'activation et gamme de détection d'un tag RFID à deux-ports en mode détection analogique

La procédure de récupération est maintenant décrite par un exemple impliquant un système à deux ports, c'est à dire que ce système peut réfléchir deux différentes IDs vers le lecteur. Une configuration possible est illustrée dans la figure 6.9. Lorsque les ID_1 et ID_2 sont tous reçus par le lecteur, la permittivité diélectrique de la cible inconnue ε_T appartiendra à

l'intersection des deux régions d'activation, par exemple $\varepsilon_T \in [A_1 \cap A_2]$. La valeur de la permittivité de la cible est donc récupérée en utilisant une courbe qui associe au taux de puissance de rétro-réflexion mesurée par le lecteur, une valeur de permittivité de la cible (Figure 6.9).

6.2. L'intégration de la fonction capteur pour le tag RFID UHF passif

6.2.1. Les concepts de base pour l'approche du travail

Plusieurs approches [6.22-6.27] ont été proposées pour développer des dispositifs RFID avec une certaine capacité de détection et donc en tant que capteur comme décrit dans la section 6.1. Dans ce travail, nous visons à exploiter l'impact sur les caractéristiques du tag RFID passif quand il est monté sur un produit alimentaire dont sa permittivité change dans le temps. Le tag RFID UHF passif est choisi à cause de son coût faible et de sa popularité pour les applications de gestion des produits au supermarché comme les systèmes de Wal-Mart [6.28]. De plus, le tag RFID UHF passif présente des avantages importants par rapport aux tags Haute-Fréquence (HF) pour ce type d'application très bas cout [6.28]. Le but de ce travail est de concevoir et de développer un nouveau type de capteurs sans fil basé sur la technologie RFID qui a la capacité d'évaluer la qualité de la viande avec les conditions de stockage comme dans la pratique (au supermarché).

En effet, les produits alimentaires ou agricoles sont généralement conservés dans des conditions de température et d'humidité spécifiées (3-5°C) pour être conservés pendant une longue période. Toutefois, dans ces conditions de stockage, la concentration de bactérie dans les produits alimentaires comme la viande ou le fromage est encore en croissance. Lorsque cette concentration dépasse un certain seuil, les aliments deviennent contaminés [6.29]. Dans le cadre de ce travail, nous voulons développer une nouvelle famille d'étiquettes RFID qui seront collées sur les produits alimentaires, non seulement pour connaître ou surveiller les informations du produit (comme la date de fabrication, le fabricant, la production par lots...) mais aussi peut indiquer au gestionnaire du système dès que les produits alimentaires deviennent contaminés afin de les éliminer immédiatement de l'entrepôt.

Comme nous savons, il y a une relation entre l'impédance de l'antenne et la permittivité diélectrique du substrat de l'antenne [6.30]. Cette relation conduit au changement des caractéristiques de l'antenne comme l'impédance ou le read-range du tag quand la permittivité de l'objet sur lequel le tag RFID est monté. En effet, l'impédance d'entrée de

l'antenne et la permittivité diélectrique du substrat sont reliés entre eux. Cela signifie également que, lorsque la constante diélectrique du substrat change, il y a changement de l'impédance de l'antenne. Avec le changement de l'impédance de l'antenne, la puissance de reçue par la puce RFID va également changer comme l'indique la formule du coefficient de transmission [6.31]:

$$\tau = \frac{4R_{chip}R_A}{|Z_{chip} + Z_A|^2} \quad (6.8)$$

Où Z_{chip} et Z_a sont respectivement les impédances de la puce et de l'antenne du tag RFID. R_{chip} et R_A sont respectivement les parties réelles de l'impédance de la puce et de l'antenne.

La variation de l'impédance se traduit au final par une modification du coefficient de transmission de puissance τ entre la puce RFID et l'antenne du tag, soit une modification de la portée de lecture donnée par l'expression ci-dessous [6.31]:

$$r = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{P_t G_t G_r \tau}{P_{th}}} \quad (6.9)$$

Où r est la distance de lecture, λ est la longueur d'onde, $P_t G_t$ est la puissance de transmission maximale qui dépend de la réglementation, G_r est le gain de l'antenne du tag, τ est le coefficient de transmission entre la puce RFID et l'antenne, P_{th} est la puissance de réveil de la puce (dans notre cas c'est la puce NXP de -15dBm). Pour montrer plus précisément ce phénomène, nous allons considérer les effets de la permittivité des cibles où le tag RFID passif est apposé. Le tag RFID est conçu à partir de l'antenne méandre classique. La permittivité du produit alimentaire sera variée entre 40 et 80 dans cette première étape pour réduire le temps de simulation.

Les paramètres à inclure dans le modèle de simulation (Figure 6.10) comprennent:

- L'épaisseur et les dimensions de l'antenne de la boucle AK3 Tagsys
- L'épaisseur, la taille et la permittivité diélectrique du substrat PET de la boucle AK3 Tagsys
- L'impédance de la puce RFID.
- Les paramètres de l'antenne à méandre.

- L'épaisseur, la taille et la permittivité de la couche plastique recouvrant le produit alimentaire
- La permittivité diélectrique et la taille du produit alimentaire

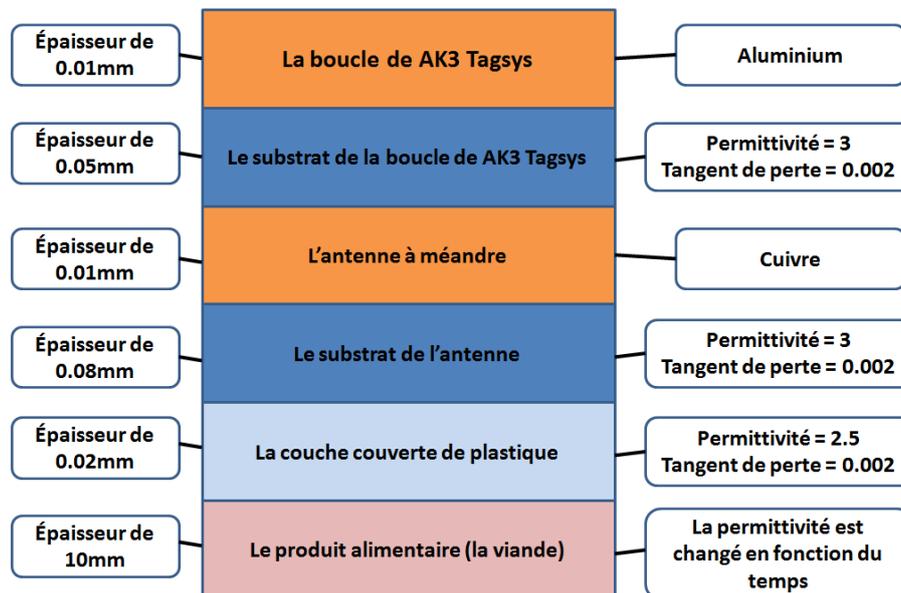


Figure 6.10 - Le modèle de simulation avec les paramètres de chaque couche de matériaux

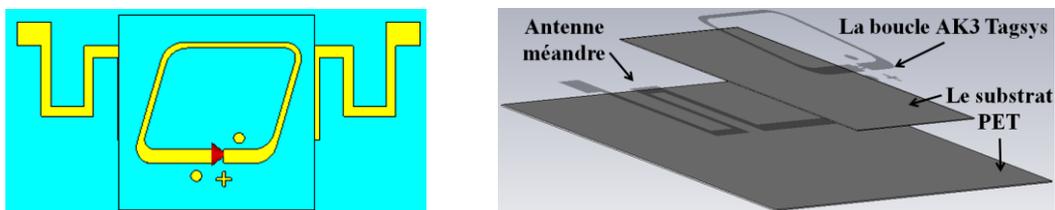


Figure 6.11 - Géométrie de l'antenne utilisée pour la simulation

Dans la figure 6.11, nous présentons la géométrie type d'un tag RFID conçu pour être sensible à son environnement représenté par un contact direct avec un aliment destiné à être surveillé et d'épaisseur supposée de 1cm. Nous avons considéré un produit dont la gamme de la permittivité se situe entre 40 et 80 pour simuler un produit alimentaire, en se basant sur les données issues de [6.32-6.41]. Nous donnons la variation de la portée de lecture du tag pour la gamme de permittivité dans le modèle de simulation comme dans la figure 6.12. La structure que nous supposons pour cette démonstration, est l'antenne dipôle à méandre classique basée sur une boucle AK3 Tagsys comme décrit dans le chapitre 2 (SO-05). L'impédance de la puce NXP du AK3 est de $22-j195$ ohm. On remarque une variation très

importante de la portée, qui s'explique par le changement de l'impédance de l'antenne du tag (aussi bien la partie réelle que la partie imaginaire).

Une autre chose, les relations entre la permittivité effective et les permittivités de chaque composants dans le mélange des 2 ou 3 différents matériaux comme dans la section 5.1.8 peut être utile pour montrer ce phénomène. Dans le modèle de simulation de la figure 6.10, nous voyons que le substrat de l'antenne, le "couvert" en plastique du produit alimentaire et le produit alimentaire peuvent influencer sur la permittivité effective qui est calculée à partir des valeurs de ces 3 permittivités. Quand la permittivité du produit alimentaire change dans le temps, cela conduit à la modification de la valeur de la permittivité effective du mélange de ces 3 objets. Ce principe sera utilisé pour concevoir et « régler » le tag-captteur RFID pour la détection de la qualité des aliments. Dans ce travail, nous allons illustrer quelques conceptions dans le cas de la viande de bœuf.

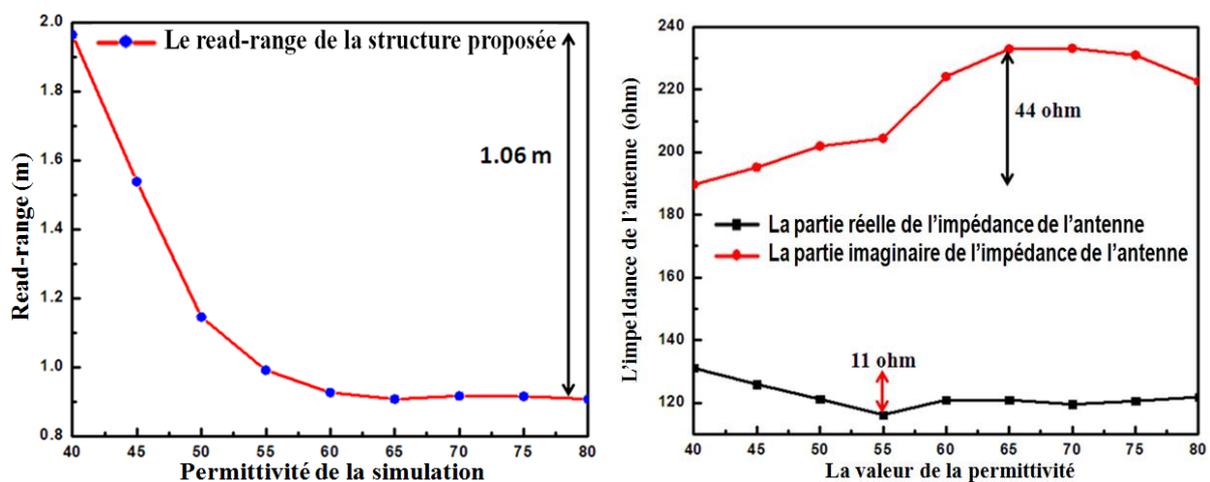


Figure 6.12. Portée de lecture (à gauche) et impédance de l'antenne (à droite) du tag proposé en fonction de la permittivité

6.2.2. La méthode de la conception

Le processus de conception du tag capteur RFID est décrit dans la figure 6.13. La permittivité du bœuf sera mesurée par la méthode de la sonde coaxiale [6.42] au cours du temps à partir de l'achat au supermarché de METRO® [6.43] et jusqu'à 240 heures plus tard dans les mêmes conditions de stockage qu'au supermarché (3-5°C). Le problème qui nous intéresse, c'est quand les produits alimentaires sont considérés "contaminés" et ne peuvent pas continuer à être vendus? La question très importante ici est le critère pour juger si la

viande est considérée comme contaminée? D'après les normes de pH et les signaux visibles tels que l'odorat et la couleur de la viande [6.44-6.47], nous pouvons conclure que le bœuf devient contaminé après 100-120 heures lorsque le pH est supérieur à 6.2. Les paramètres du modèle comme la permittivité diélectrique de la viande en fonction du temps, la taille d'antenne, la constante diélectrique du substrat à fabriquer le tag... seront intégrés dans le logiciel CST Microwave Studio® comme le modèle de simulation le décrit dans la figure 6.10.

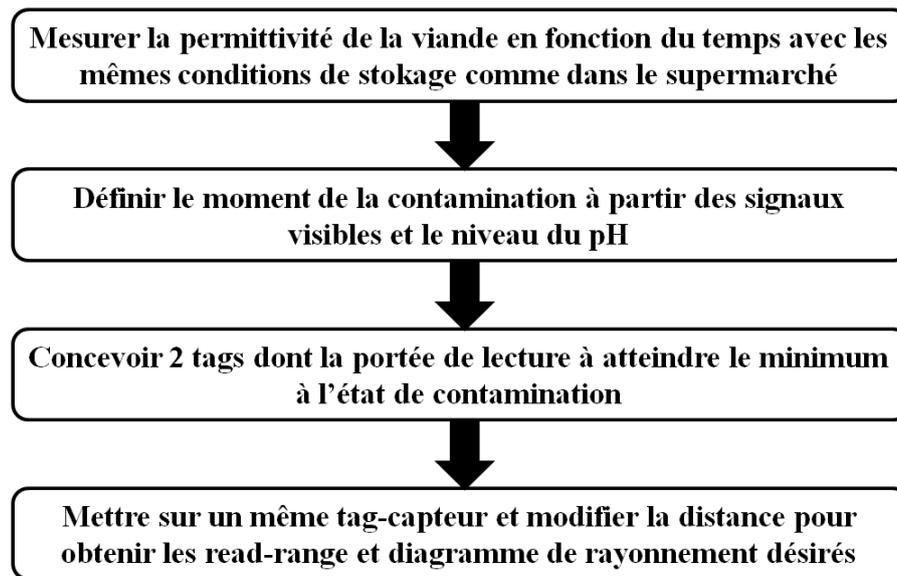


Figure 6.13 - Processus de conception des tags-capteur pour la détection de la contamination des aliments

Une autre étude doit être menée en parallèle à la conception de ce tag capteur. Il s'agit, de considérer les effets des facteurs de l'environnement (tels que la température, l'humidité, etc) sur la permittivité diélectrique du produit alimentaire comme décrit dans la section 5.1. En fait, dans différentes conditions de température et d'humidité, la constante diélectrique et le facteur de perte du produit alimentaire changeraient en fonction de la température et de l'humidité de stockage comme décrit dans la section 5.1. D'après les normes [6.44-6.47], les indicateurs physiques et chimiques tels que le pH (la gamme de pH de la viande fraîche est entre 5.5 et 6.2) et la concentration de NH_3 (pas plus de 35mg/100g de la viande) peuvent être utilisés pour évaluer la qualité de la viande. Nous allons évaluer le seuil de l'état contaminé du produit à travers les valeurs de la permittivité diélectrique par les indicateurs physiques et chimiques. La valeur de la permittivité diélectrique est mesurée en temps réel à partir de l'état frais jusqu'à l'état de l'état contaminé de la viande.

6.3. La conception des tags RFID capteurs

6.3.1. Les géométries de l'antenne proposées pour la conception des tags capteurs RFID

Avant d'entrer dans la conception des tags RFID capteur, la première chose est de d'identifier quelques structures assez sensibles aux variations de la permittivité de l'objet support de l'étiquette RFID. À partir des données pour la conception des antennes pour le tag RFID décrits dans le chapitre 2, nous recommanderons quelques structures basées sur l'antenne dipôle à méandre qui est considérée comme la plus sensible avec le changement de l'environnement par rapport à autres types d'antenne comme l'antenne PIFA. Les structures de l'antenne proposées seront conçues en combinaison avec la boucle AK3 Tagsys (figure 6.14) car cela permet de simplifier le processus de fabrication du tag RFID grâce au procédé décrit dans le chapitre 3. La sensibilité du design aux paramètres du procédé de réalisation technologique et leurs impacts sur les performances expérimentales sera prise en compte comme décrit dans le chapitre 4.

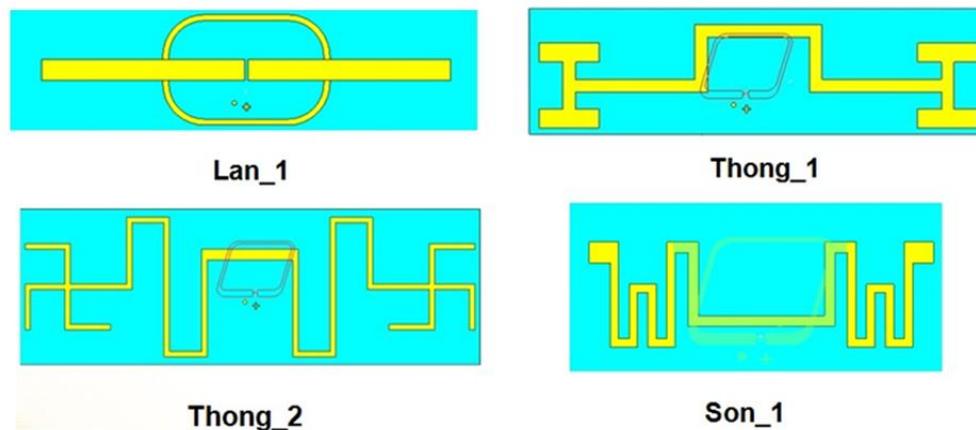


Figure 6.14 - Les structures de l'antenne proposées pour les conceptions du tag capteur

Dans cette étape de considération, nous allons examiner quatre structures basées sur la transformation des antennes dipôle à méandre (notées Lan_1, Thong_1, Thong_2 et Son_1 comme indiquées sur la figure 6.14). Afin de choisir les structures d'antennes les plus sensibles au changement de la permittivité diélectrique de l'objet sur lequel le tag RFID est collé, nous allons considérer les changements de performance de l'antenne et du tag (tels que l'impédance, le gain et le read-range). En fait, nous allons profiter des propriétés naturelles que le changement de la permittivité diélectrique des aliments en fonction du temps va

également affecter les performances du tag RFID comme montré dans la section 6.2. Ce changement sera exploité pour détecter le moment de contamination des aliments. Les paramètres du matériau et la taille des « patterns » seront inclus dans le modèle de simulation. Les paramètres à modifier dans ce modèle comprennent la valeur de la permittivité diélectrique de la viande, les dimensions internes de la structure de l'antenne choisie. Dans cette étude, nous nous concentrons sur une seule fréquence de 868MHz (correspondant à la fréquence centrale de la réglementation de la RFID UHF passive en Europe) afin d'examiner les effets des paramètres sur l'impédance de l'antenne et la portée de lecture du tag RFID UHF passif.

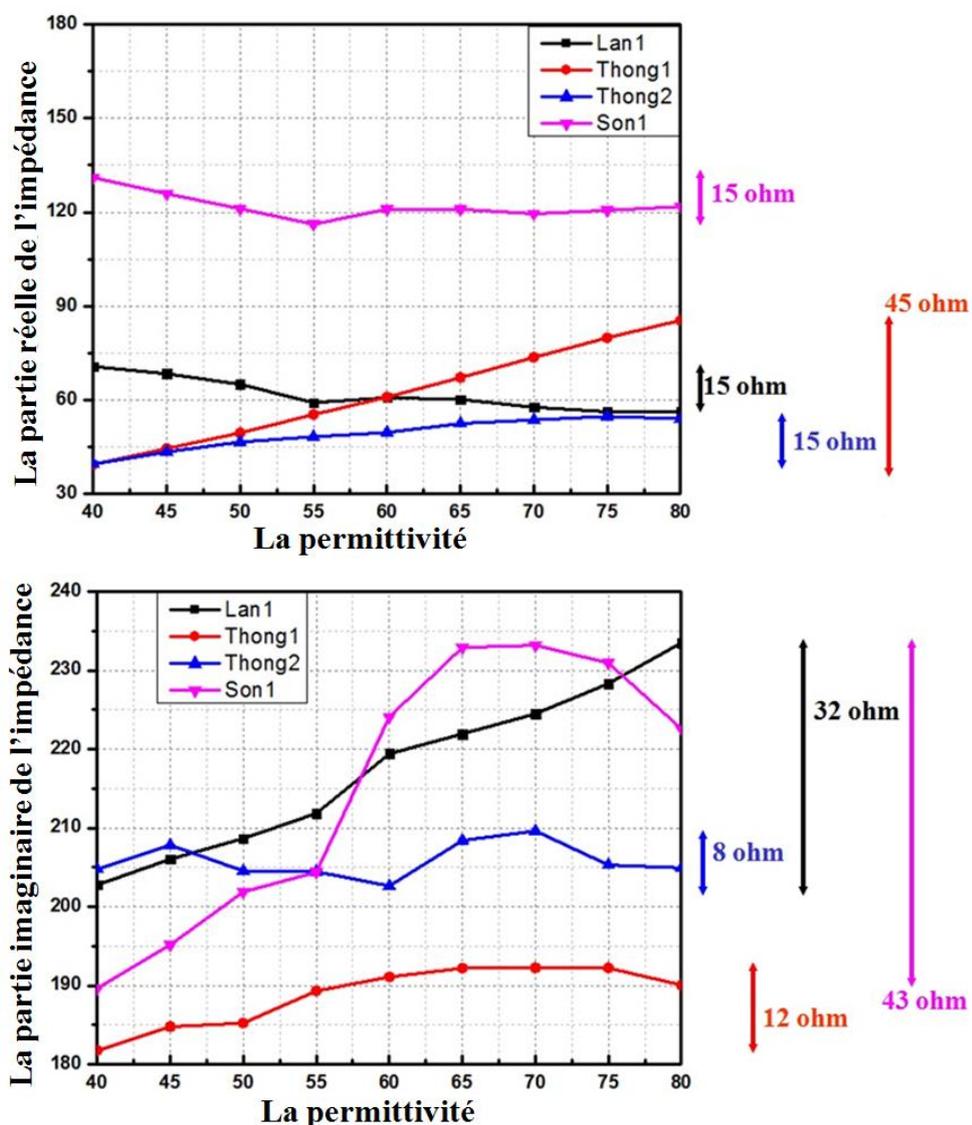


Figure 6.15 - La partie réelle et la partie imaginaire de l'impédance des structures de l'antenne selon la permittivité

Dans cette étape, seule la permittivité diélectrique du boeuf sera modifiée de 40 à 80 (la gamme des valeurs du changement de la viande est prévue à partir de la littérature [6.32-6.41]). Nous allons étudier les 4 structures d'antennes proposées pour la fréquence 868MHz en fonction du changement de la permittivité diélectrique. Le but de cette étape est de déterminer les structures les plus "sensibles" pour notre application de détection de la contamination de la viande. Selon la figure 6.15, nous voyons que le changement dans la partie réelle de l'impédance de la structure Thong-1 est le plus grand parmi les 4 structure proposées, tandis que les structures Lan-1 et Son-1 ont la variation la plus grande de la partie imaginaire de l'impédance de l'antenne. Ces changements de l'impédance, conduisent à une modification du coefficient de transmission de puissance et au final au changement de la portée de lecture des étiquettes RFID.

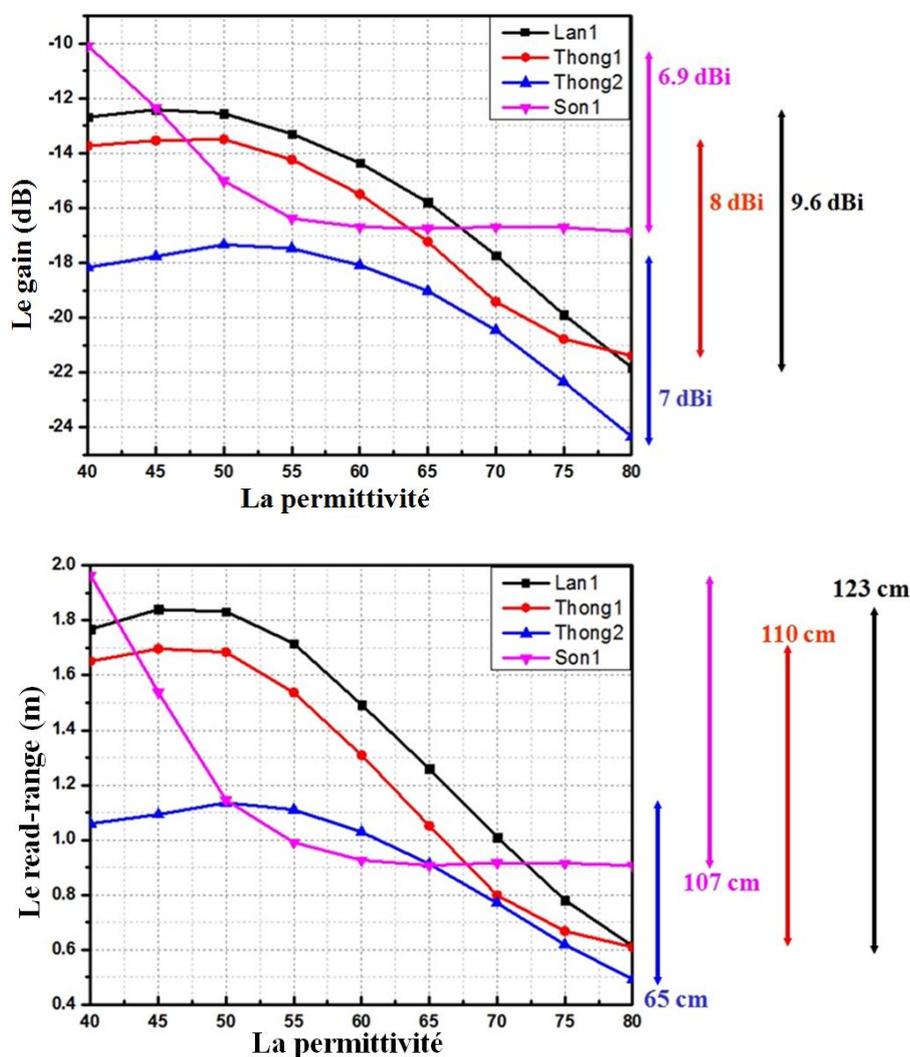


Figure 6.16 - Le gain et le read-range des structures de l'antenne selon la permittivité

Comme pour l'impédance de l'antenne, nous continuons à examiner le changement du gain de l'antenne ainsi que le read-range du tag RFID des structures proposées. Dans la figure 6.16, nous constatons que le gain de l'antenne va se réduire quand la permittivité diélectrique des aliments augmente pour les 4 structures. Ceci est compréhensible car le gain de l'antenne est directement lié à la permittivité du substrat. Selon les résultats de simulation, nous pouvons conclure que les structures Lan-1 et Thong-1 sont les plus sensibles pour le gain des antennes, avec des variations de, respectivement, environ 9.6dBi et 8dBi. Cependant, les structures Son-1 et Thong-2 présentent des changements de gain élevés de 7dBi.

Comme la figure 6.16, nous pouvons conclure que les structures proposées sont très sensibles au changement de la permittivité de la viande avec une variation du read-range importante (de 65cm à 123cm). Avec les paramètres de l'étude, nous pouvons conclure que les structures Lan-1, Thong-1, Thong-2 et Son-1 sont très sensibles au changement de la permittivité diélectrique du support du tag. Ces résultats seront utilisés et exploités dans la suite pour transformer les tags en capteurs.

6.3.2. La conception des tags capteurs RFID pour la détection de la qualité du boeuf

Après avoir examiné l'influence des changements de la permittivité diélectrique sur les performances des structures d'antennes proposées, les structures Son-1, Thong-1 et Thong-2 (notées So-1, To-1 et To-2 dans cette section) ont été sélectionnées pour concevoir les tags capteur RFID pour la détection de la qualité des aliments. La méthode de conception sera discutée en détail et démontrée avec la structure So-1. Une structure à deux tags sera aussi proposée et étudiée notamment en variant la distance entre les deux tags. Enfin, les prototypes réalisés au Laboratoire de Nanotechnologie (Université Nationale du Vietnam, Ho-Chi-Minh ville) du tag capteur RFID sont mesurés au Laboratoire LCIS (Grenoble-INP, France). Pour les structures To-1 et To-2, nous présentons seulement les résultats de simulation finaux et les mesures réelles.

6.3.2.1. La méthode de conception

À partir de la littérature, certaines applications des techniques électromagnétiques [6.1] [6.48] dans le suivi de la fraîcheur des produits alimentaires ont été développées. Dans cette étude, pour concevoir le tag capteur, nous exploitons essentiellement la variation de la portée de lecture. Nous utilisons également le concept de multi-tag développé dans la littérature [6.23]. Ainsi nous utilisons deux tags accordés sur des permittivités différentes. En effet, lorsque les produits alimentaires comme la viande, le fromage, le tofu... changent de qualité en passant d'un état frais à un état contaminé, alors leurs permittivités varient de manière significative. Dans ce travail, nous considérons la viande de bœuf sur laquelle sera déposé le tag capteur. Avec le temps, elle va perdre de sa fraîcheur pour atteindre l'état de contamination. En considérant que le tag a été conçu pour atteindre le minimum de read-range en état de contamination, le système peut alors déclencher une alarme en cas de la contamination. L'ensemble des valeurs de la permittivité du bœuf en fonction du temps a été mesurée et sélectionnée dans le tableau 6.1.

Tableau 6.1 - Les permittivités du boeuf à partir de la mesure

Temps (heures)	0	30	60	90	120	150	180	210	240
Échantillon de boeuf	56.8473	59.4764	59.0539	58.006	61.8023	57.103	59.1214	57.775	57.4604
	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	j22.6368	j19.4102	j21.0592	j22.6277	j23.9777	j21.2671	j21.3047	j20.4042	j19.3841
Tangent de perte	0.3982	0.3263	0.3412	0.4049	0.3879	0.3724	0.3604	0.3531	0.3373

Lorsque un aliment tel que le bœuf change de qualité à partir de l'état frais à l'état contaminé, la permittivité diélectrique sera également changée comme présenté dans la section précédente. La variation de la permittivité conduit à un changement de la distance de lecture de l'étiquette RFID collée sur la viande à travers les changements du gain et de l'impédance de l'antenne. Quand la portée de lecture du tag RFID atteint une valeur minimale (correspondant à la valeur de la permittivité diélectrique au moment de la contamination à 120h), les systèmes peuvent signaler la contamination de la viande en temps réel par la mesure des signaux réfléchis par le tag vers le lecteur RFID.

Pour cette configuration, un seul tag est suffisant pour la détection de la contamination. Pour augmenter la fiabilité, nous pouvons ajouter un autre tag passif à la

distance d du premier tag. Il sera aussi conçu pour obtenir un minimum de read-range au moment de la contamination du boeuf (qui est correspondant avec le minimum read-range à la permittivité de la contamination). La procédure de conception du tag capteur et la base de données des permittivités des aliments sont décrites comme la partie précédente. Pour assurer que cette application est faisable à un environnement réel (supermarchés), nous avons ajouté un film plastique d'emballage sur la viande d'épaisseur 20 microns et de même taille que le morceau de viande soit 20 cm x 30 cm.

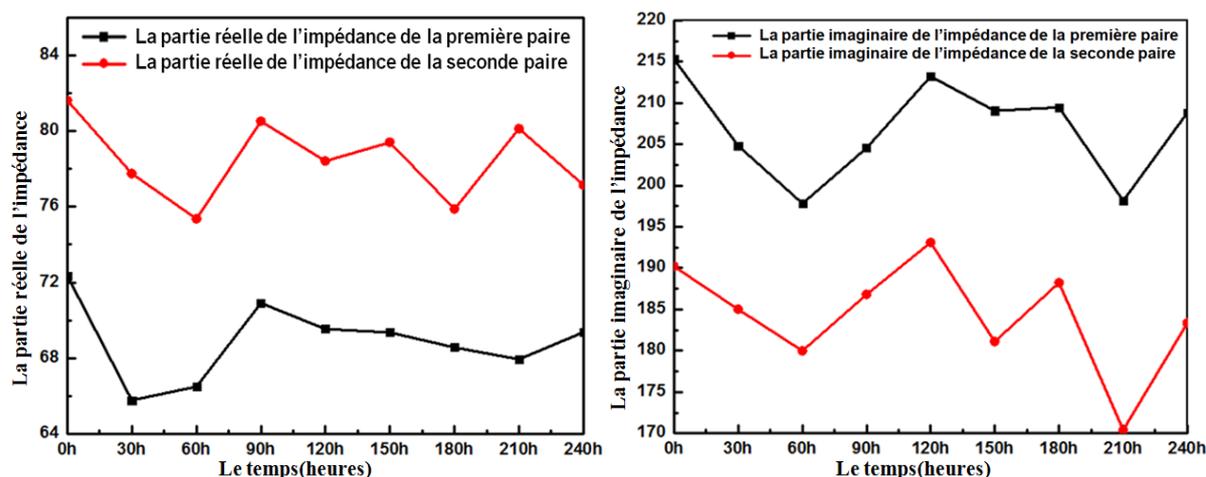


Figure 6.17 - L'impédance de la structure So-1 en fonction du changement de la permittivité du boeuf selon le temps

Comme la méthode décrite dans la figure 6.13, nous utilisons la valeur de la permittivité du bon état (correspondant à la permittivité diélectrique de 0h) pour concevoir le tag à la fréquence de 868MHz. Avec l'autre paire de l'antenne/puce, la valeur de la permittivité diélectrique à l'état de la contamination (correspondant à la permittivité diélectrique de 120h) sont utilisés pour concevoir le deuxième tag toujours à la fréquence de résonance 868MHz. Puis, nous considérons le changement du read-range de chaque paire puce/antenne selon la permittivité du boeuf à travers le temps. Notez que ces résultats sont pour le cas où chaque paire antenne/puce, est mise séparément sur la viande avec une permittivité diélectrique variable selon le temps comme dans le tableau 6.1. Les résultats de simulation pour chaque paire de l'antenne/puce sont présentés dans les figures 6.17 et 6.18, où les changements de l'impédance et du read-range de chaque paire sont considérés en fonction du changement de la permittivité du boeuf.

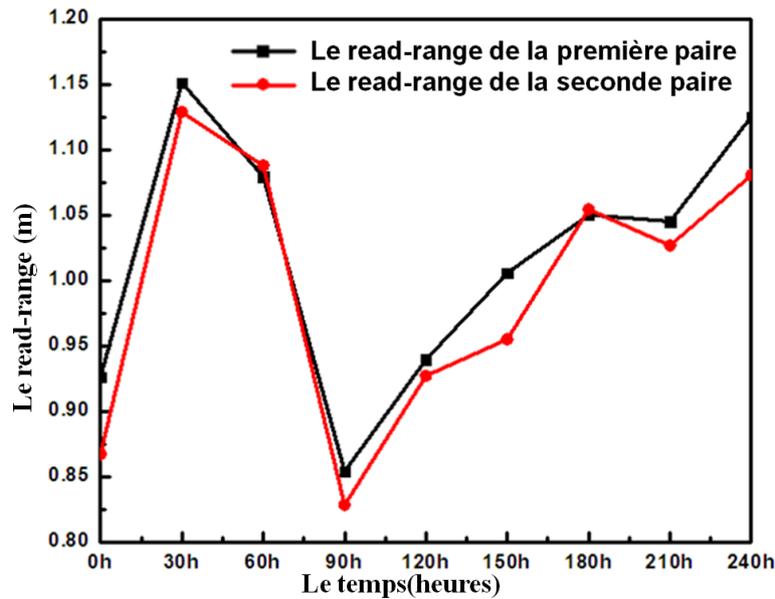


Figure 6.18 - Le read-range de chaque paire de l'antenne/puce mises séparément sur l'échantillon du boeuf

D'après la figure 6.18, on peut voir que si chaque paire antenne/puce est placée séparément sur la viande, la variation de la portée de lecture en fonctions du temps est presque similaire pour les deux tags. Par conséquent, notre prochaine étape sera de mettre les deux paires de antenne/puce sur un même échantillon de boeuf comme un tag capteur RFID unique afin de considérer la distance « d » entre les 2 paires. Le but de cette étude est pour profiter du couplage mutuel entre les antennes des deux tags afin d'obtenir une valeur minimale du read-range de chaque paire au moment de la contamination ainsi que d'augmenter la différence entre le read-range des deux paires.

6.3.2.2. La considération de la distance d entre les 2 paires de puce/antenne

Un autre but de cette étude vise à accroître la fiabilité du système en ajoutant un signal d'identification (ID) supplémentaire afin d'évaluer plus précisément la qualité de la viande. Nous allons également concevoir la deuxième paire de l'antenne/puce pour atteindre le minimum de portée de lecture au moment de la contamination (avec la permittivité du boeuf après 120 heures). La distance entre les deux tags est "d" comme illustré dans la figure 6.19. Elle sera variée entre 1cm et 8cm avec un pas de 1cm de afin de choisir la distance optimale entre les deux tags.

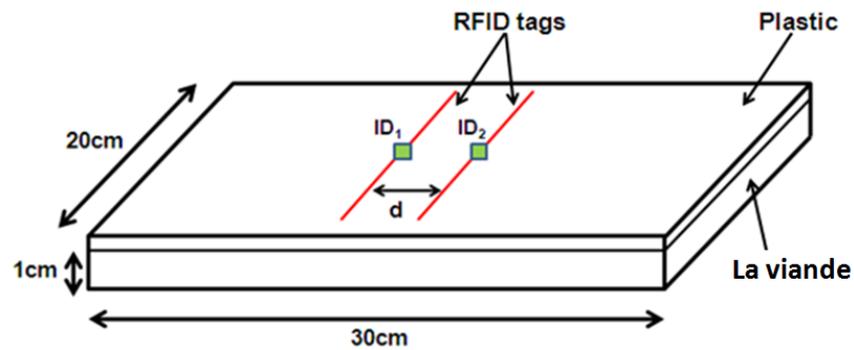


Figure 6.19 – Structure à deux paires antenna/puce avec une distance "d" entre les 2 paires

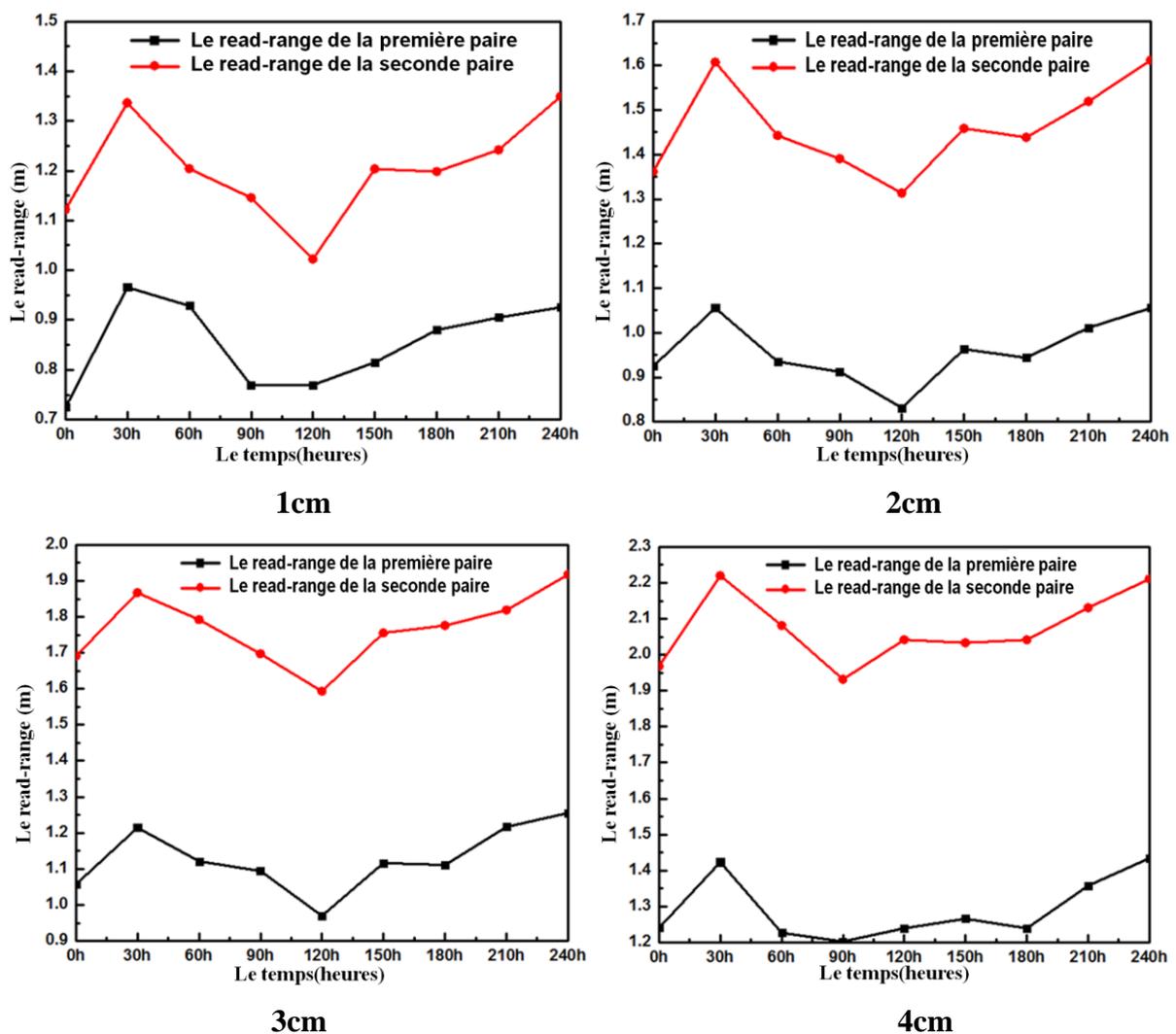


Figure 6.20 - Le read-range de chaque paire de l'antenne/puce mises ensemble sur l'échantillon du boeuf avec la distance d entre 1cm et 4cm

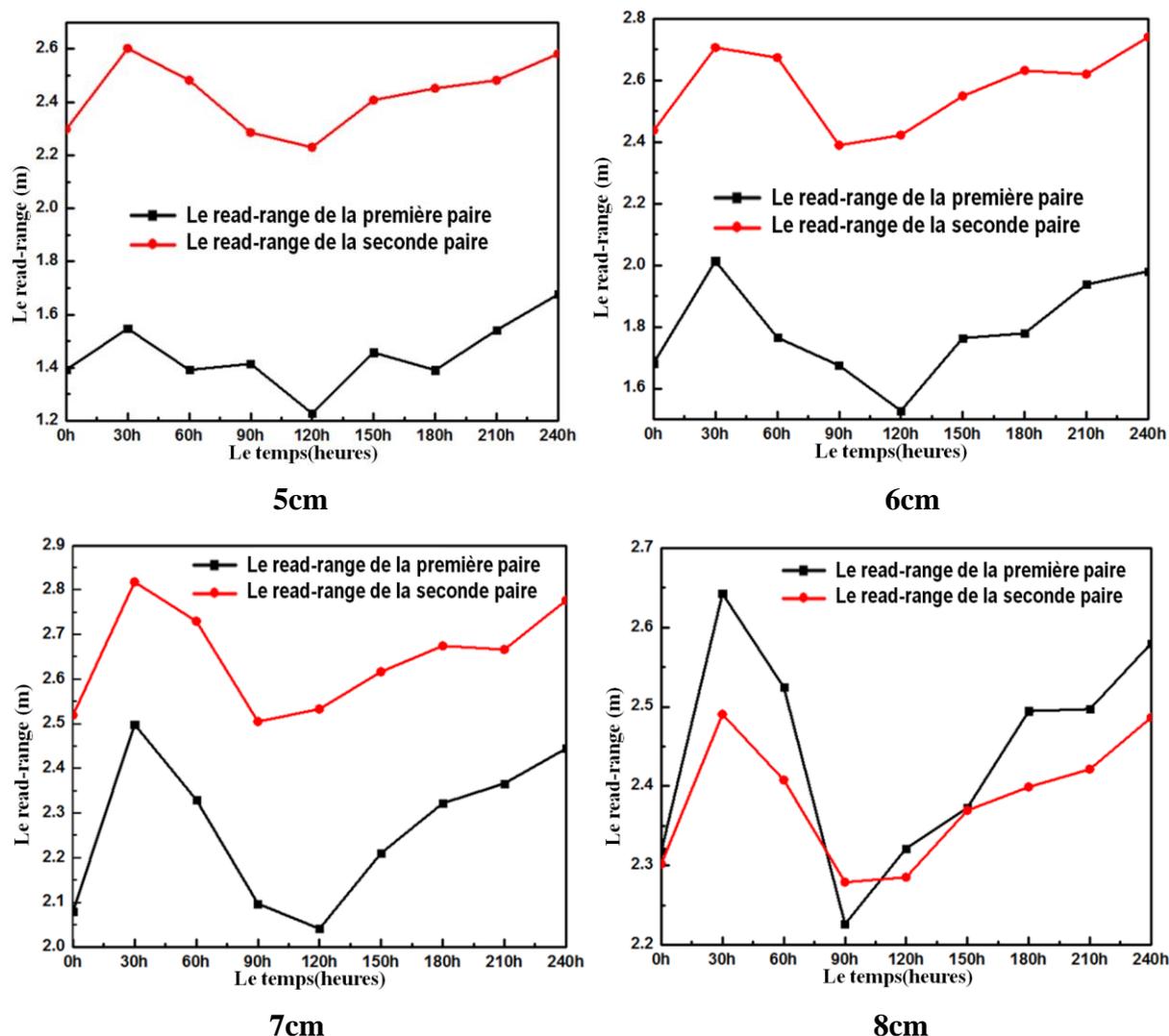


Figure 6.21 - Le read-range de chaque paire de l'antenne/puce mises ensemble sur l'échantillon du boeuf avec la distance d entre 5cm et 8cm

Les résultats sont donnés dans les figures 6.20 et 6.21. Avec les valeurs de « d » de 1cm à 4 cm, on peut conclure que la différence entre les valeurs maximum et minimum du read-range des 2 paires antenne/puce est la meilleure pour $d = 1$ cm (environ 40cm) et la pire pour la différence $d = 4$ cm (environ 25cm). Un autre commentaire, la distance de lecture pour $d = 4$ cm de chaque paire n'atteint pas la valeur minimum au moment de la contamination (environ 120 heures). Dans la figure 6.21, nous faisons la même étude correspondant aux distances « d » entre 5cm et 8cm. Dans la figure 6.21, nous voyons que: quand la distance « d » augmente au delà de 7cm, les courbes du read-range de 2 tags ont tendance à se rapprocher l'une de l'autre. Lorsque la distance « d » entre les deux paires dépasse cette valeur, nous n'avons presque plus aucune interaction électromagnétique ou couplage mutuel entre les 2 paires antenne/puce. À partir des figures 6.20 et 6.21, la différence entre les valeur

maximale et minimale du read-range de chaque paire à 7 cm est la meilleure parmi les valeurs de d (environ 45cm).

D'autre part, la distance de lecture pour $d = 4\text{cm}$ de chaque paire atteint la valeur minimum au moment de la contamination (après environ 120 heures). Cependant, nous avons choisi la conception correspondant à la distance $d = 1\text{cm}$ comme la conception finale pour le tag capteur RFID à cause de deux raisons:

- La différence entre les valeur maximale et minimale du read-range avec $d = 1\text{ cm}$ est d'environ 31cm qui est acceptable pour des applications réelles.
- La distance $d = 1\text{cm}$ conduit à la compacité de la conception finale par rapport à la conception avec la distance $d = 7\text{cm}$.

6.3.2.3. Les performances de la conception finale du tag capteur SO-1

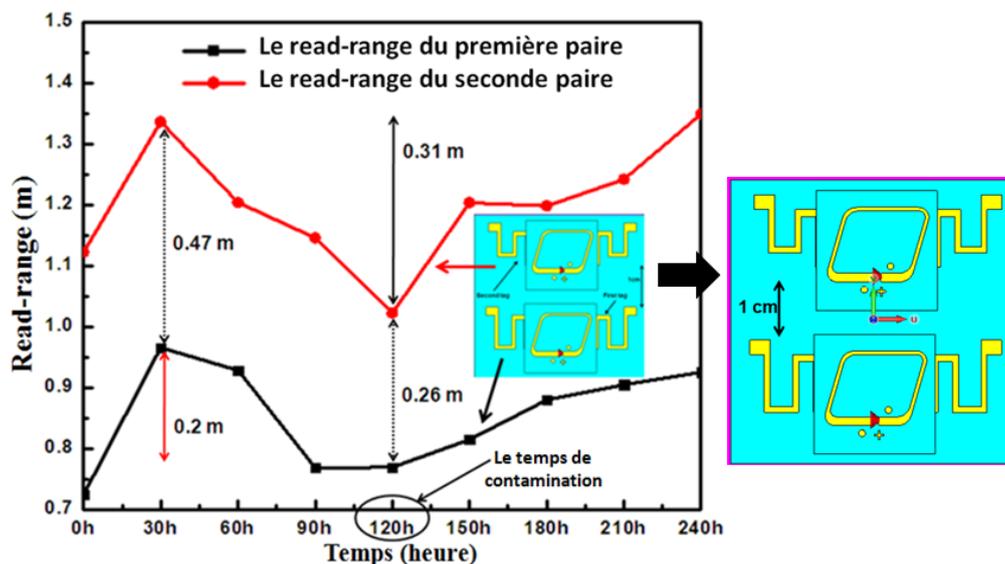


Figure 6.22 - La conception finale pour le tag capteur So-1 avec distance $d = 1\text{cm}$

Selon les figure 6.22 et 6.23, on peut voir que la portée de lecture de chaque tag atteint la valeur minimale à 120 heures et le diagramme de rayonnement de chaque étiquette conserve la même forme en fonction du temps. Nous voyons que la partie réelle et la partie imaginaire de l'impédance de l'antenne sont très sensibles au changement de la permittivité de la viande (environ 10 ohms avec la partie réelle et 20 ohms avec la partie imaginaire). Cette variation modifiera le coefficient de réflexion de l'antenne et conduira au changement de l'adaptation de l'impédance entre l'antenne et la puce. D'autre part, le gain de l'antenne

varie significativement (plus de 2 dB), ce qui change également le read-range de chaque paire antenne/puce. Une autre remarque est que la portée de lecture des 2 paires antenne/puce a beaucoup changé (environ 31cm pour la paire conçue avec la permittivité diélectrique du boeuf contaminé et plus de 20cm pour la paire conçue avec la permittivité diélectrique du boeuf frais).

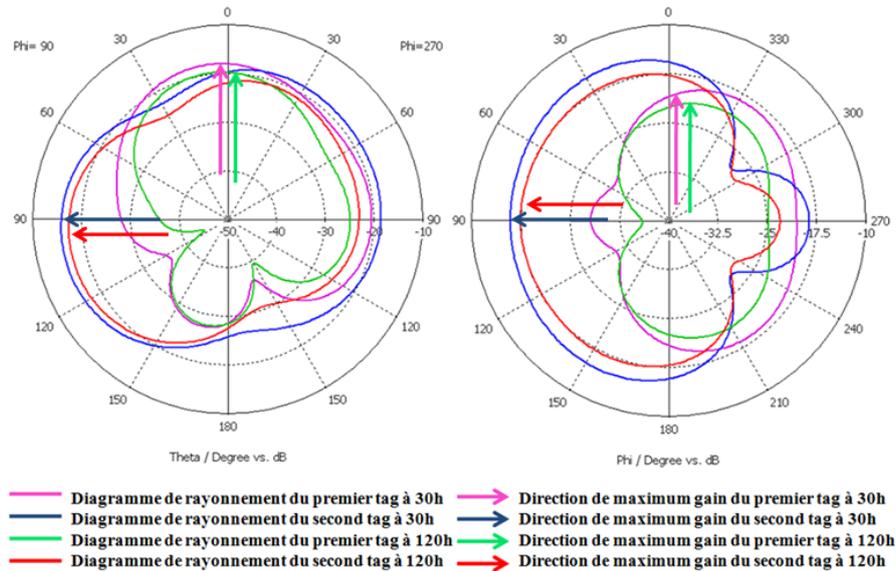


Figure 6.23 - Les diagrammes de rayonnement de la conception So-1 sur Thêta-Plan et Phi-Plan

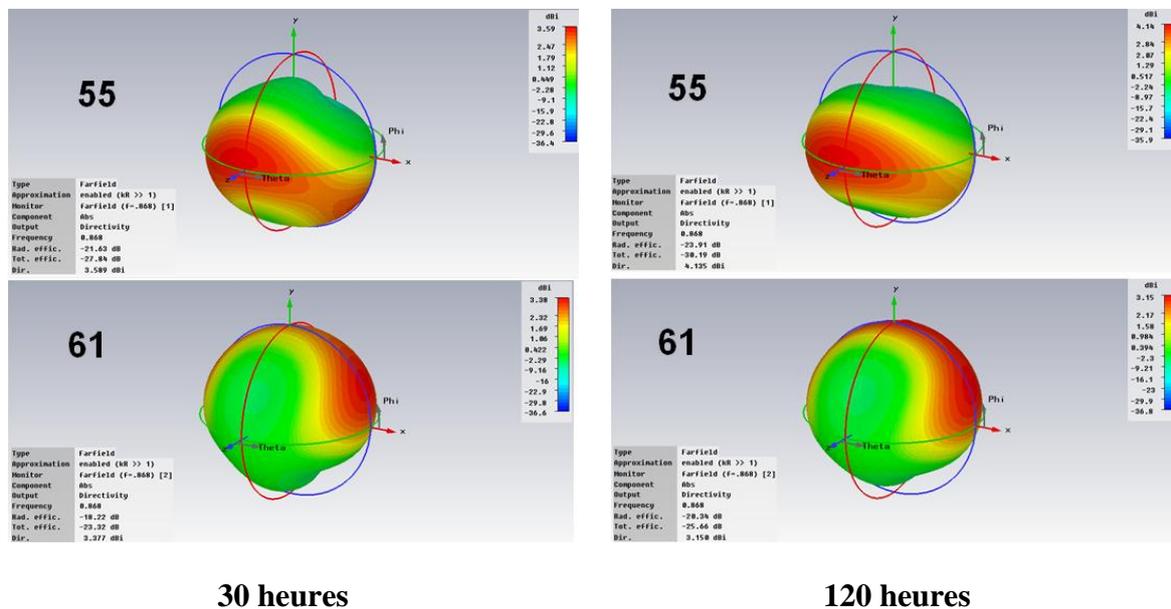


Figure 6.24 - Les diagrammes de rayonnement de la conception So-1 sur Thêta-Plan et Phi-Plan presque inchangés en fonction du temps

À partir des résultats de simulation, nous pouvons constater que le diagramme de rayonnement de chaque paire est presque constant au fil du temps. Cela conduit à la conclusion très importante que la direction de rayonnement maximal (correspondant aux zones rouges) sera quasiment inchangée dans le temps. Pour la conception So-1 avec $d = 1\text{cm}$ comme ci-dessus, il apparaît que le diagramme de rayonnement de chaque paire est presque constant en fonction du temps. De plus, nous pouvons choisir la distance $d = 1\text{cm}$ afin que les directions de lecture maximales sont presque perpendiculaires l'une à l'autre comme dans la figure 6.24. Dans le scénario de l'application, parce que un maximum de read-range est obtenu après 30 heures et un minimum est obtenu après 120 heures, dans des directions perpendiculaires, on peut utiliser deux lecteurs RFID UHF installés dans deux directions perpendiculaires pour détecter l'état de contamination en fonction du temps selon la figure 6.25.

Par exemple, pour une scénario d'application réelle, nous pouvons mettre chaque lecteur RFID UHF à une distance du produit alimentaire qui soit un peu supérieure à la valeur minimum du read-range de chaque paire antenne/puce (read-range après 120 heures). Les signaux réfléchis à partir du tag capteur RFID ne seront plus détectés par les lecteurs RFID après le moment de contamination de la viande. Après ce moment, les identifications à partir du tag capteur n'existent plus et le système aura détecté le moment de la contamination du boeuf.

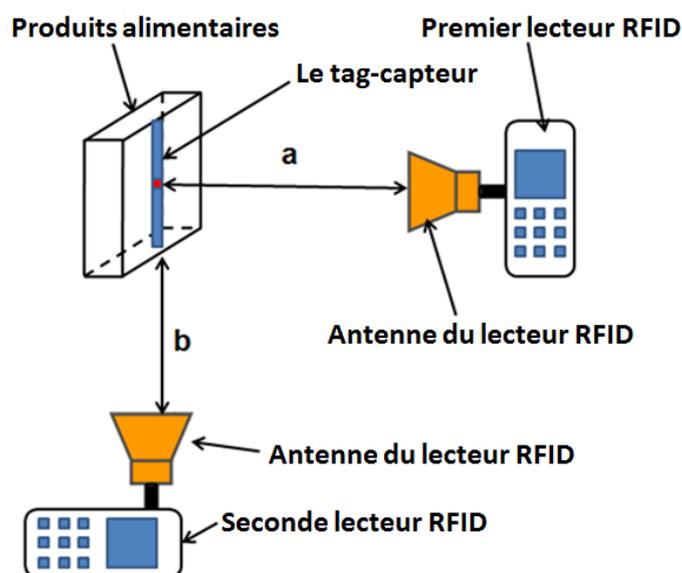


Figure 6.25 - La configuration des tags et lecteurs pour le scénario de l'application réelle

6.3.2.4. Les conceptions du tag capteur TO-1 et TO-2

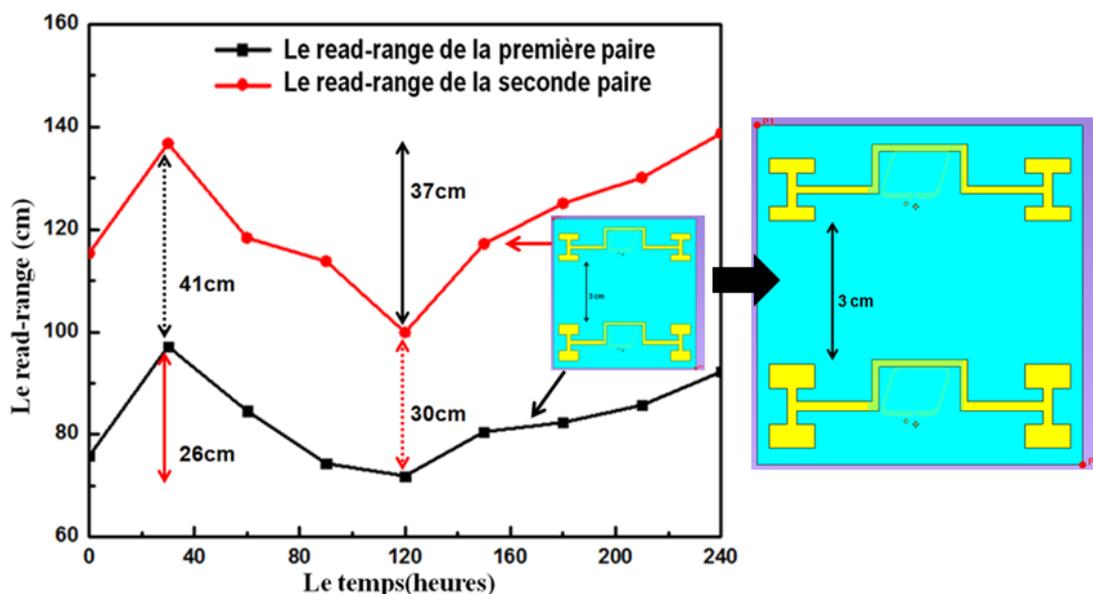


Figure 6.26 - Les résultats de simulation finaux de la conception du tag capteur To-1

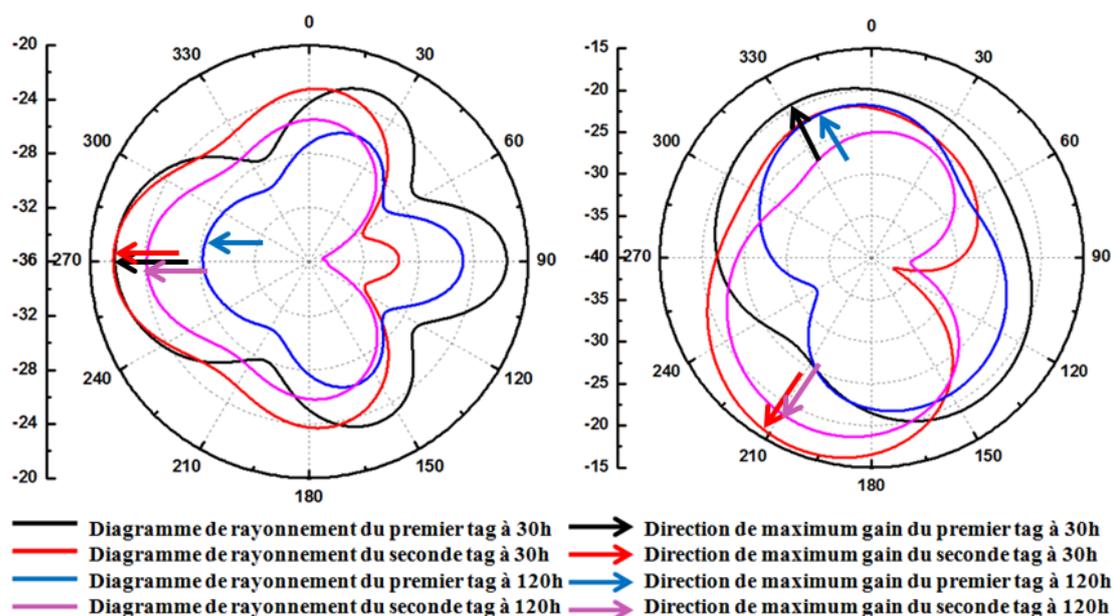


Figure 6.27 - Les diagrammes de rayonnement de la conception To-1 sur Phi-Plan (à gauche) et Thêta-Plan (à droite)

Avec la même méthode de conception et ajustement dans la partie précédente pour la structure So-1, nous obtenons respectivement les résultats de simulation pour les structures To-1 et To-2 dans les figures 6.26 et 6.27. Nous voyons que la portée de lecture de chaque tag de la conception To-1 atteint la valeur minimale à 120 heures et que le diagramme de rayonnement de chaque étiquette conserve la même forme, en fonction du temps, comme

pour la conception So-1. D'autre part, le diagramme de rayonnement de chaque étiquette est presque inchangé. De plus, les deux diagrammes sont perpendiculaire l'un à l'autre pour la distance $d=3\text{cm}$. De ces analyses, on déduit que les tags capteurs RFID To-1 ont aussi des perspectives pour les applications réelles avec des read-range meilleurs que la conception So-1 (environ 37cm pour la paire conçue avec la permittivité diélectrique du boeuf contaminé et plus de 26cm pour la paire conçue avec la permittivité diélectrique du boeuf frais).

Pour la conception du tag capteur RFID To-2, nous avons défini la distance optimale entre les 2 paires de l'antenne/puce à $d = 3\text{cm}$. À partir des figures 6.28 et 6.29, nous voyons que la portée de lecture de chaque tag de la conception To-2 atteint la valeur minimale à 120 heures et le diagramme de rayonnement de chaque étiquette conserve la même forme en fonction du temps comme la conception So-1 (les figures 6.28 et 6.29). Cependant, le diagramme de rayonnement de chaque étiquette est presque inchangé et opposé l'un à l'autre avec la distance $d=3\text{cm}$. De ces analyses, on déduit que les tags capteurs RFID To-2 ont aussi des perspectives pour les applications réelles avec des read-range acceptables, comparés à la conception So-1 (environ 32cm pour la paire conçue avec la permittivité diélectrique du boeuf contaminé et plus de 21cm pour la paire conçue avec la permittivité diélectrique du boeuf frais). La conception To-2 nous donne une autre perspective pour les applications réelles: les 2 lecteurs RFID seront mis en des positions opposées l'une de l'autre.

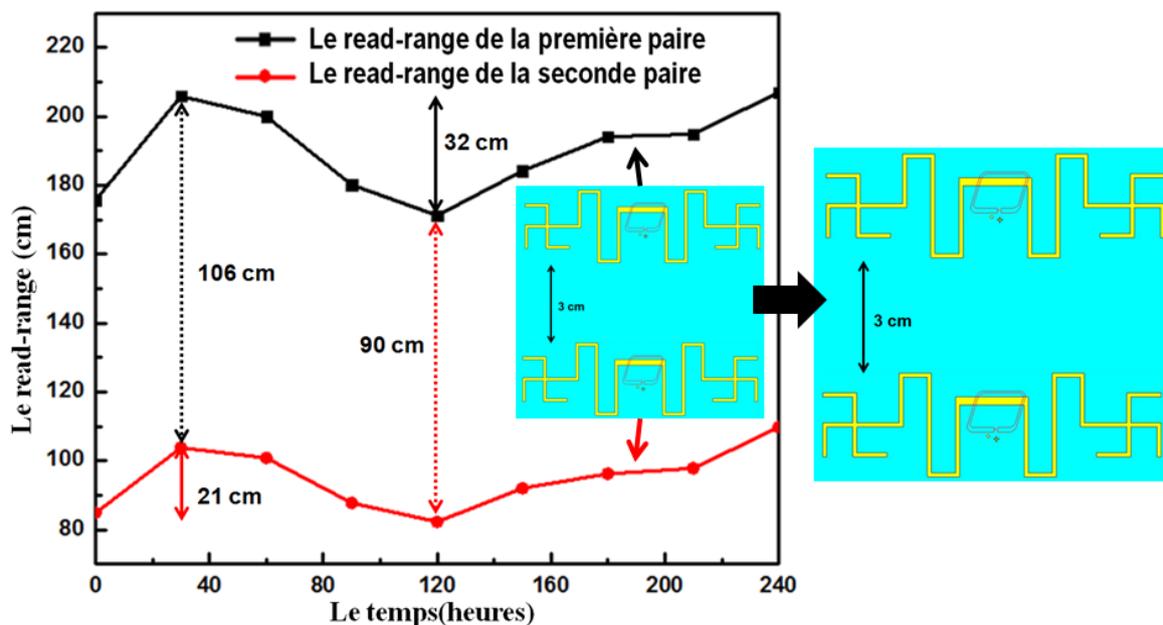


Figure 6.28 - Les résultats de simulation finaux de la conception du tag capteur To-2

Pour ces 3 conceptions du tag capteur RFID, nous avons différents choix possibles pour les configurations de placement du lecteur RFID qui dépendent des contraintes des supermarchés. L'approche de l'usage "multi-puce" sur un même tag capteur RFID afin d'améliorer la fiabilité du système dans le cas où le tag capteur est endommagé dans les environnements sévères (très humide, froid) des produits alimentaires. Un autre avantage de cette approche: nous pouvons ajuster les directions de lecture maximales en fonction de la distance entre les 2 paires antenne/puce et ainsi choisir les configurations désirées dans les applications réelles.

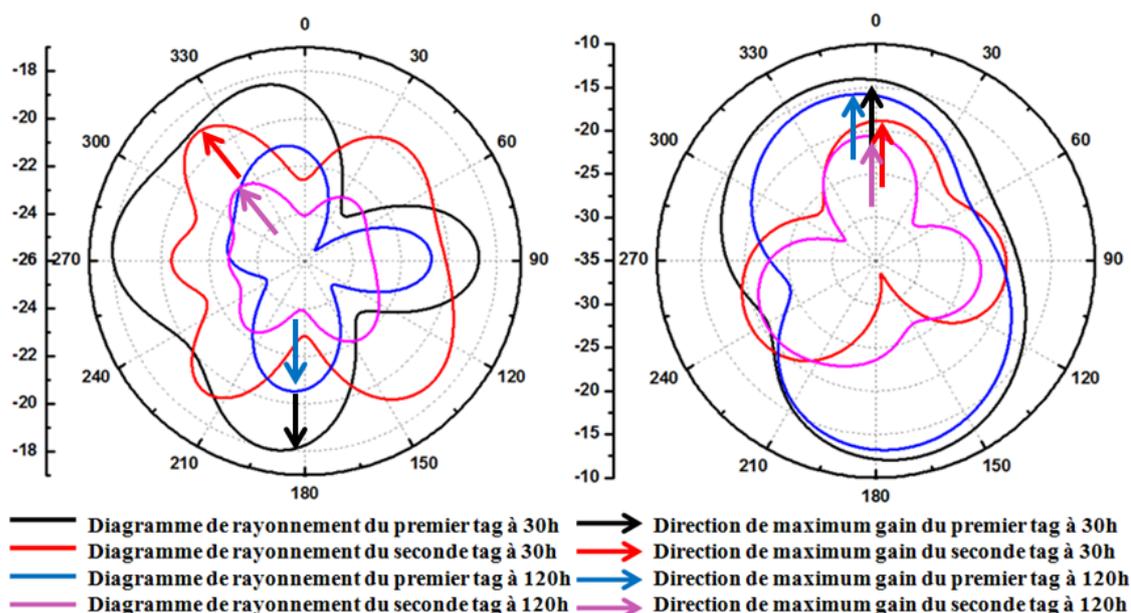


Figure 6.29 - Les diagrammes de rayonnement de la conception To-2 sur Phi-Plan (à gauche) et Thêta-Plan (à droite)

6.4. La configuration du banc-mesure et les résultats expérimentaux

Les prototypes du tag-capteur So-1, To-1 et To-2 ont été fabriqués et mesurés avec la configuration de mesure de la figure 6.30. Le lecteur RFID utilisé pour la caractérisation est le Speedway Révolution R420 de Impinj® offert par le laboratoire LCIS (Grenoble-INP, France) [6.49]. Le tag-capteur sera monté sur l'échantillon de bœuf afin de mesurer la portée de lecture en 3D à partir de l'état frais jusqu'à l'état de contamination (soit 7 jours consécutifs). Selon la configuration de mesure présentée dans la figure 6.31, l'échantillon du bœuf est fixé à la base d'un support de permittivité diélectrique proche de celle de l'air ($\epsilon_r = 1$) afin d'éviter les influences du support sur les résultats de mesure. La distance entre

le lecteur et l'échantillon est fixée et nous allons changer la puissance de transmission du lecteur afin de déterminer le read-range des 2 paires antenne/puce. Un panneau absorbant est placé sur le sol entre le lecteur RFID et l'échantillon du boeuf pour éliminer les effets des trajets multiples (les effets de reflexion intense à partir du sol).

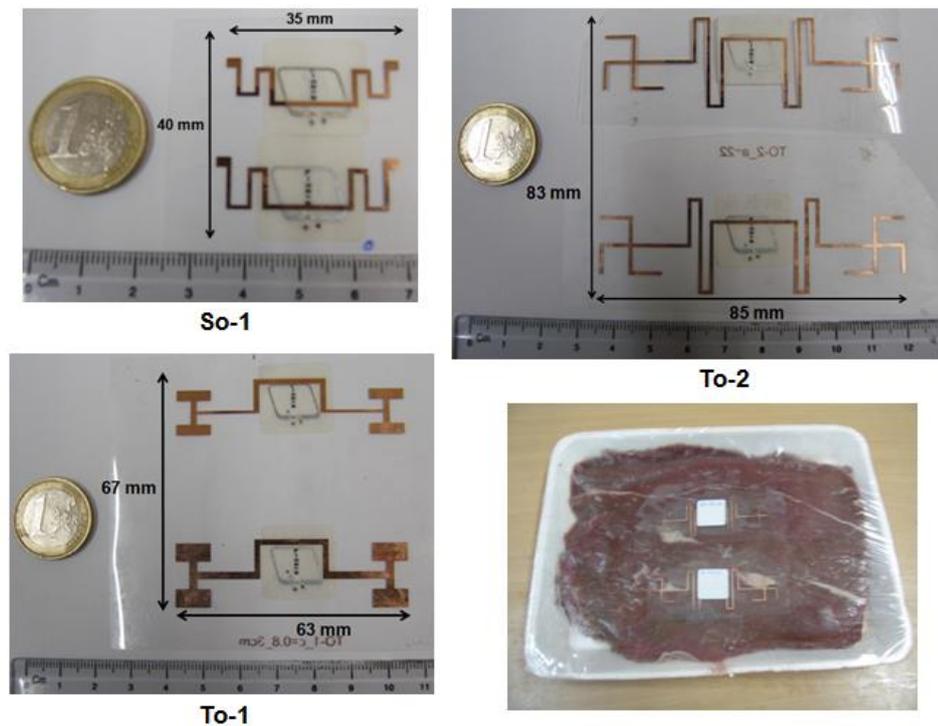


Figure 6.30 - Les prototypes du tag capteur So-1, To-1 et To-2 pour la détection du boeuf contaminé

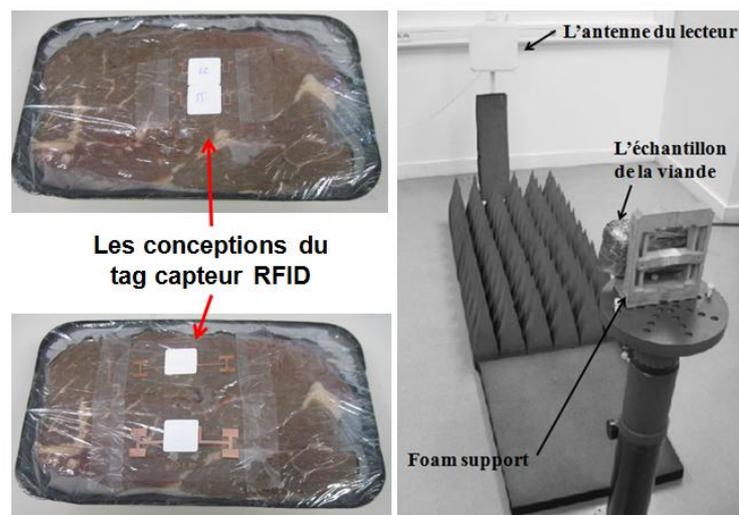


Figure 6.31 - La mesure des read-range en 3D des conceptions du tag capteur avec le boeuf

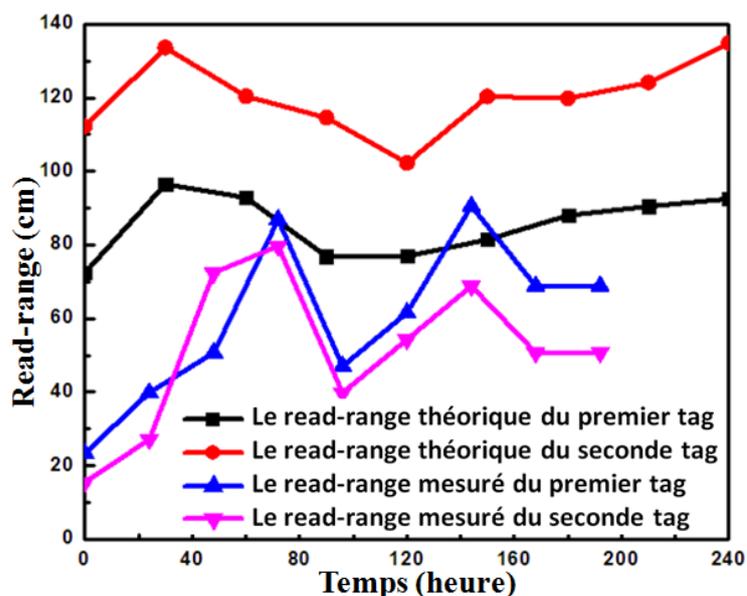


Figure 6.32 - Les résultats des mesures réelles pour la conception So-1

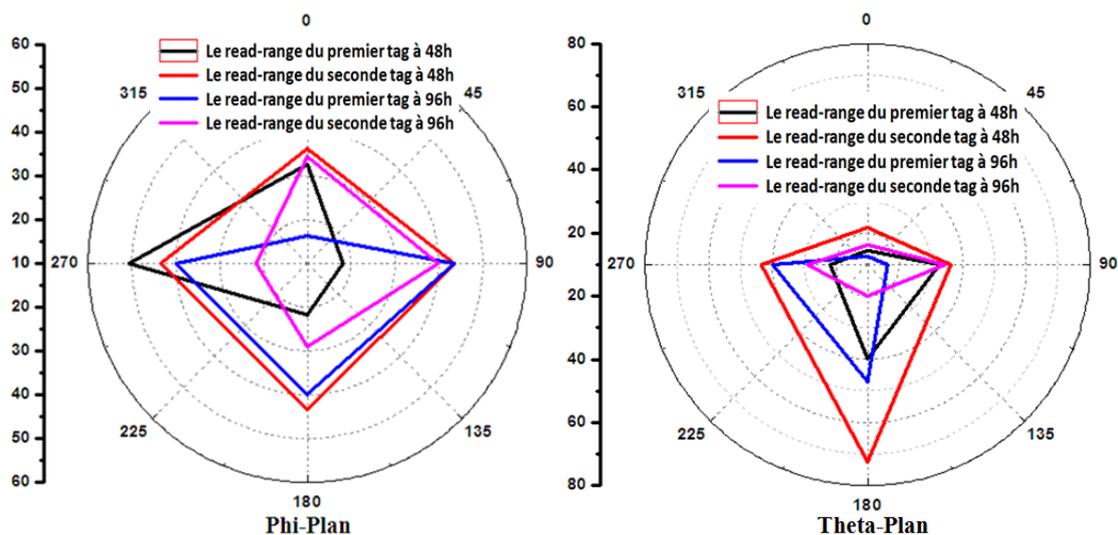


Figure 6.33 - Les diagrammes de rayonnement mesurés pour la conception So-1 sur Phi-Plan (à gauche) et Thêta-Plan (à droite)

À partir des résultats du read-range mesurés et donnés dans la figure 6.32, la différence entre la simulation et la mesure de la portée de lecture peut être expliquée par la précision des valeurs de notre base de données de permittivité (due à la différence de température et l'épaisseur de l'échantillon de bœuf). En outre, le temps de la contamination mesuré par le tag-capteur est toujours entre 96 heures et 120 heures à partir de la simulation. D'après la figure 6.33, on peut voir que les directions de lecture maximales sont quasi perpendiculaires l'une à l'autre. Cet accord prouve la faisabilité de cette technique de détection de la qualité alimentaire pour la conception So-1. Un avantage de la

conception So-1 est la compacité de sa taille (40mm x 35mm) qui est très intéressante pour les applications.

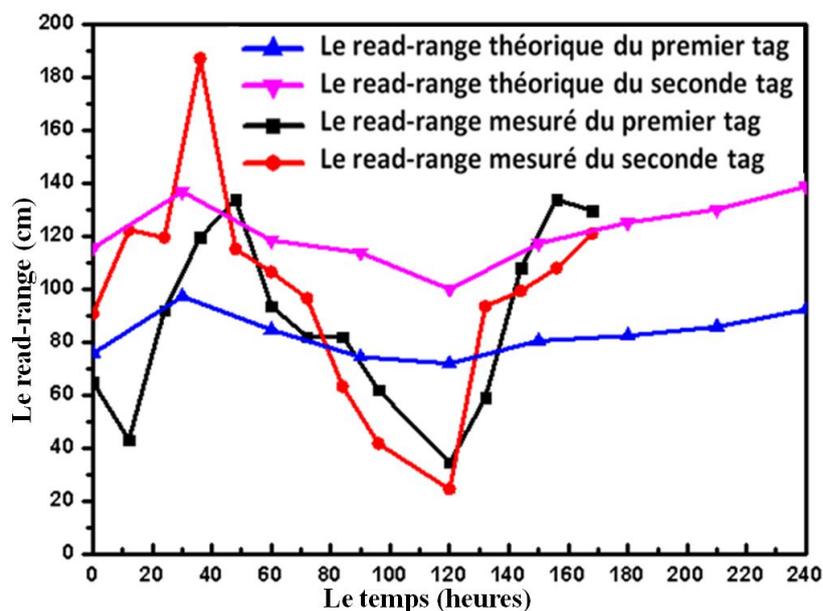


Figure 6.34 - Les résultats des mesures réelles pour la conception TO-1

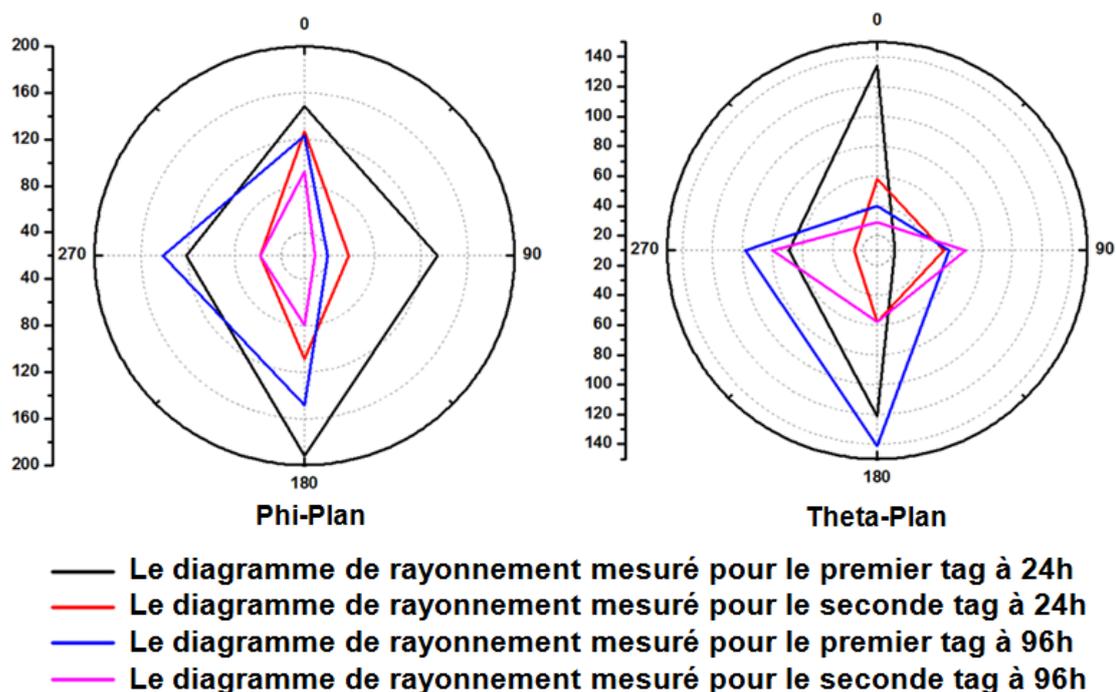


Figure 6.35 - Les diagrammes de rayonnement mesurés pour la conception To-1 sur Phi-Plan (à gauche) et Thêta-Plan (à droite)

À partir des résultats de mesure dans les figures 6.34 à 6.37, nous relevons les mêmes conclusions et commentaires pour les conceptions So-1. Les conceptions To-1 et To-2 ont

une taille plus grande que la conception So-1 mais des read-range mesurés sont meilleurs. Le temps de la contamination mesuré par To-1 et To-2 est toujours compris entre 96 heures et 120 heures et leurs directions de lecture maximales sont aussi quasi-perpendiculaires l'une à l'autre comme pour So-1.

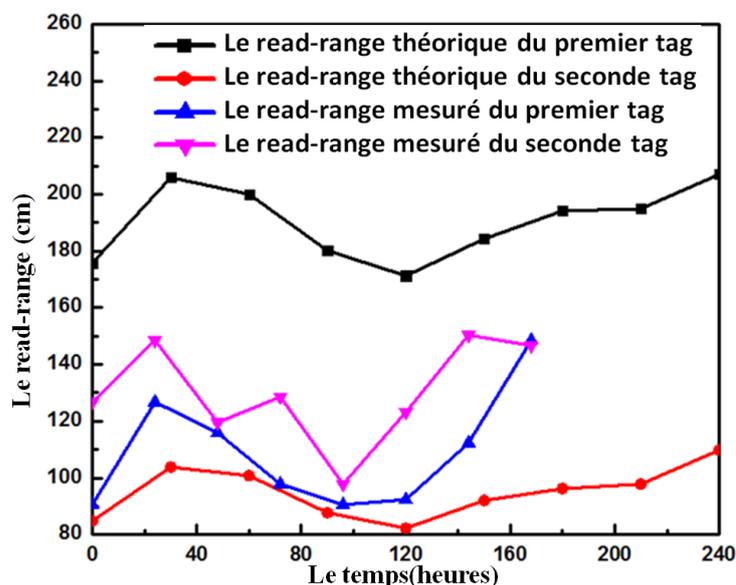


Figure 6.36 - Les résultats des mesures réelles pour la conception To-2

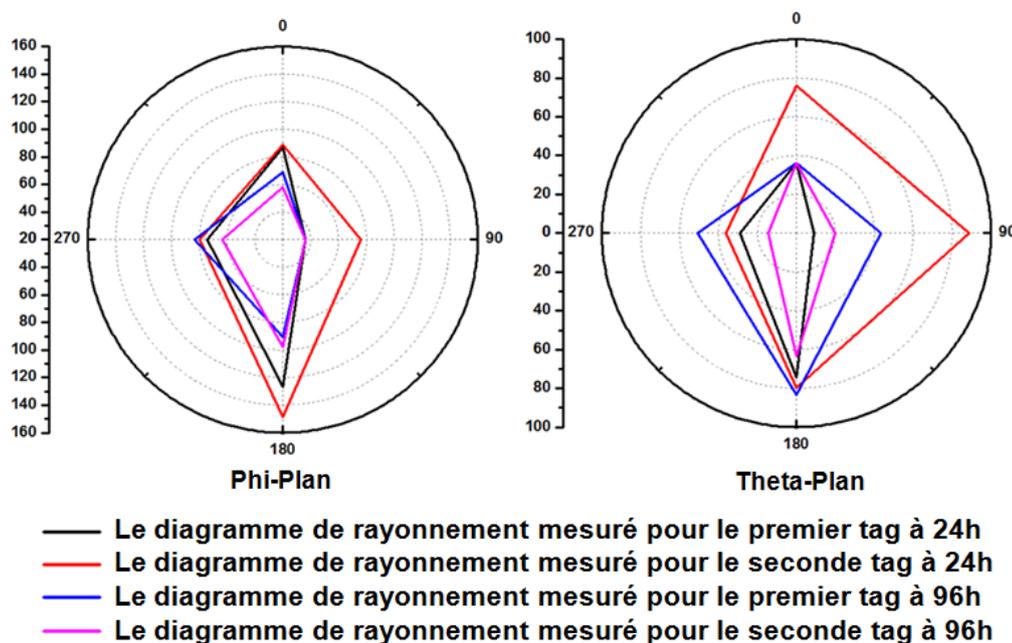


Figure 6.37 - Les diagrammes de rayonnement mesurés pour la conception To-2 sur Phi-Plan (à gauche) et Theta-Plan (à droite)

Pour approfondir ces résultats nous avons étudié la répétabilité et les effets de l'environnement sur les performances du tag-captteur. À partir des 3 conceptions ci-dessus,

nous retenons la conception TO-1 afin d'exécuter les mesures. Tout d'abord, nous considérons la répétabilité du tag capteur TO-1 aux 2 différentes conditions de stockage (qui sont notées T2 et T1-H2 dans les figures 6.38 et 6.39). Dans ces mesures, la condition T2 correspondant à une température de $7\pm 1^{\circ}\text{C}$ et une humidité de $50\pm 5\%$. Pour la condition T1-H2 nous avons une température de $3\pm 1^{\circ}\text{C}$ et une humidité de $80\pm 5\%$.

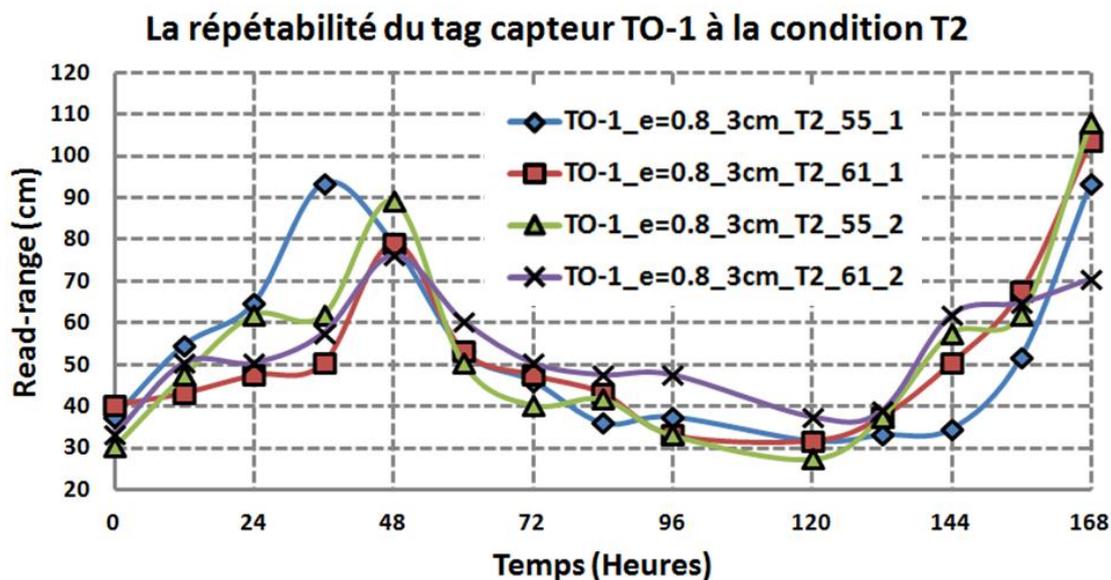


Figure 6.38 - Étude de la répétabilité du tag capteur TO-1 à la condition de stockage T2 (dont la température de $7\pm 1^{\circ}\text{C}$ et l'humidité de $50\pm 5\%$)

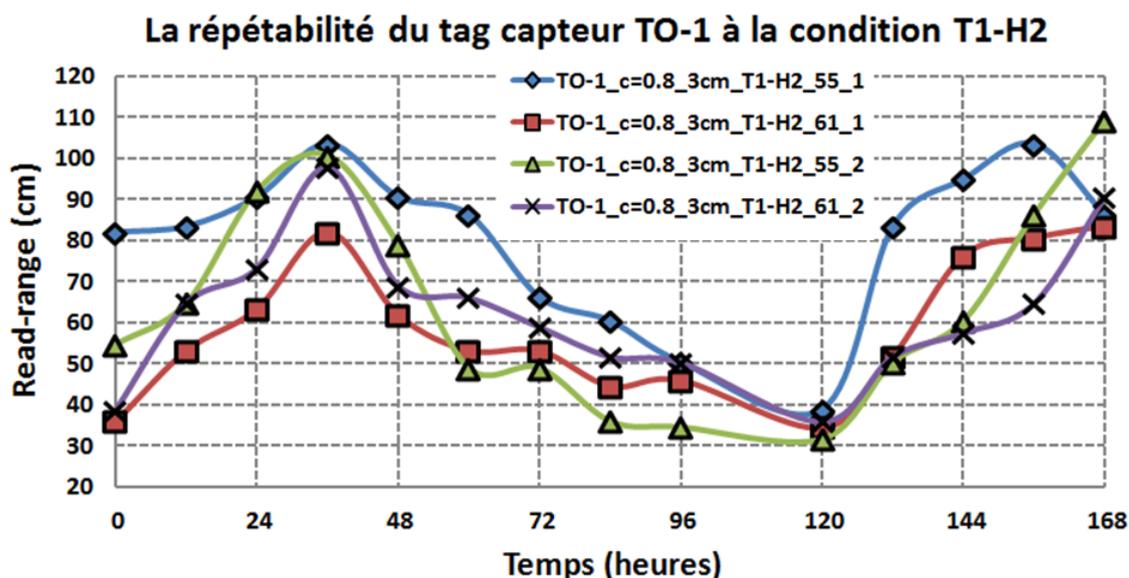


Figure 6.39 - Étude de la répétabilité du tag capteur TO-1 à la condition de stockage T1-H2 (dont la température de $3\pm 1^{\circ}\text{C}$ et l'humidité de $80\pm 5\%$)

À partir des résultats de la figure 6.38, nous voyons qu'il y a une différence dans les courbes du read-range des 2 prototypes du tag capteur TO-1 en fonction du temps. La différence est significative aux moments de 36 heures et 168 heures pour les mesures à la condition T2 mais la tendance des transitions du read-range est presque similaire pour les 2 courbes. Dans la figure 6.39, la différence entre les courbes, qui est plus grande que celle dans la condition T2, peut être expliquée par la forte valeur d'humidité. En fait, dans ce cas, l'échantillon de boeuf qui est entouré par de l'eau à cause de l'humidité de $80\pm 5\%$. Dans tous les cas, la tendance de ces courbes montre que le minimum read-range est toujours situé tout près de 120 heures et l'erreur sur le read-range autour de ce moment est assez petite pour assurer la fidélité du système.

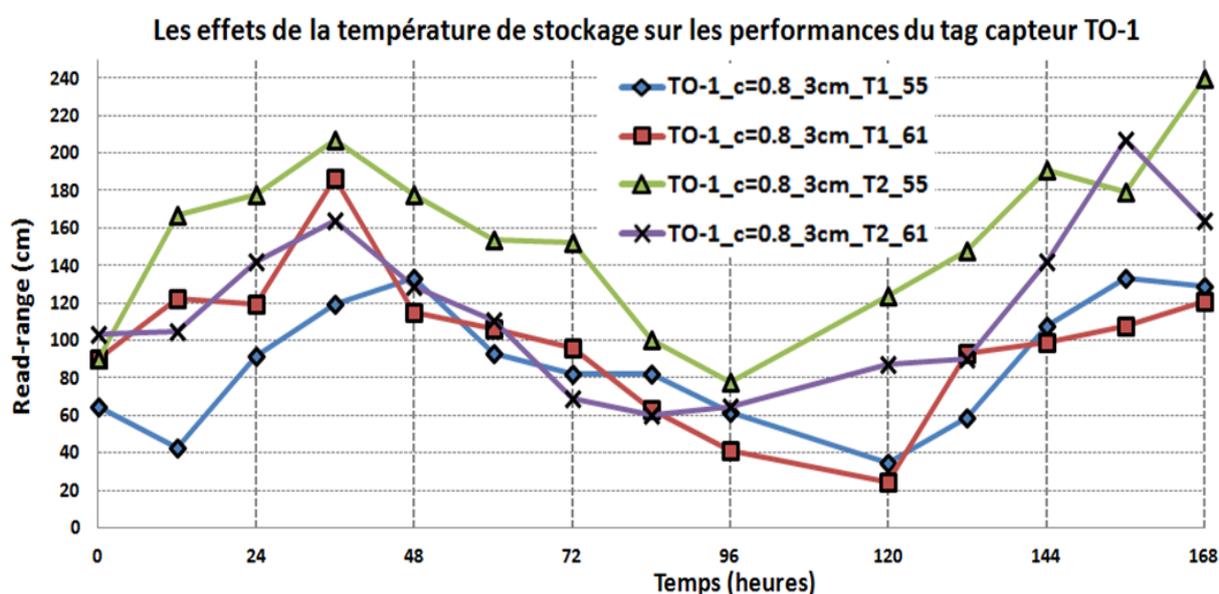


Figure 6.40 - Étude des effets de la température de stockage sur les performances du tag capteur TO-1 (dont $T1=2\pm 1^{\circ}\text{C}$ et $T2=8\pm 1^{\circ}\text{C}$, l'humidité est fixée à $50\pm 5\%$)

Ensuite, nous allons considérer les effets des conditions de stockage (la température et l'humidité) sur les performances du tag capteur TO-1. Pour l'étude de l'effet de la température, nous fixons l'humidité à la valeur $50\pm 5\%$ et mesurons le read-range à 2 différentes températures (soit $T1=2\pm 1^{\circ}\text{C}$ et $T2=8\pm 1^{\circ}\text{C}$). À partir de la figure 6.40, nous notons que le minimum du read-range pour le cas T2 est atteint autour de 96 heures tandis que celui du cas T1 est autour de 120 heures. C'est à dire que le moment de la contamination est plus rapide pour le cas T2 que pour le cas T1. Ceci s'explique par le fait que le taux d'augmentation des bactéries dans la viande est proportionnel à la température de stockage. D'autre part, nous obtenons que l'humidité de stockage n'a pas beaucoup d'effet sur la performance du tag capteur RFID comme la figure 6.41. Ceci peut être dû au fait que

l'isolation entre la viande et l'humidité est toujours maintenue par la présence de la couche plastique de couverture de l'échantillon du boeuf.

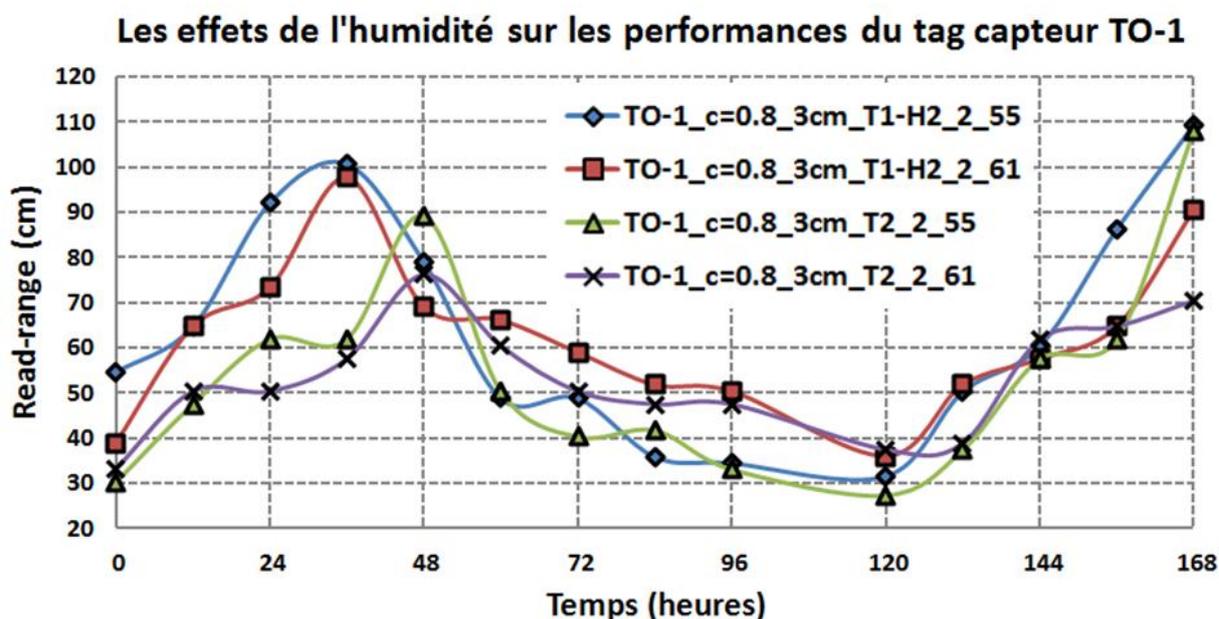


Figure 6.41 - Étude des effets de l'humidité de stockage sur les performances du tag capteur TO-1 (dont la température est fixée à $5\pm 1^{\circ}\text{C}$, $\%RH1=50\pm 5\%$ et $\%RH2=80\pm 5\%$)

6.5. Conclusions

Dans ce chapitre, nous avons proposé une approche utilisant les étiquettes RFID passives dans la bande UHF pour détecter le temps de contamination de la viande de boeuf. À partir des méthodes pour la conception des antennes pour les tags RFID décrites dans le chapitre 2, nous avons identifié quelques structures basées sur l'antenne dipôle à méandre qui est considérée comme la plus sensible avec le changement de l'environnement. Afin de choisir les structures d'antennes les plus sensibles au changement de la permittivité diélectrique de l'objet sur lequel le tag RFID est collé, nous avons considéré les changements de performance de l'antenne et du tag (tels que l'impédance, le gain et le read-range). Un produit alimentaire, comme la viande, dans le temps, va perdre de sa fraîcheur pour atteindre l'état de contamination, ce qui se traduit par un changement de sa permittivité complexe. En considérons que le tag a été conçu pour atteindre le minimum de read-range en état de contamination, le système peut alors déclencher une alarme en cas de contamination. Les résultats de simulation et des mesures expérimentales ont montré le potentiel de cette

technique pour des applications réelles de traçabilité et de contrôle de la qualité des aliments. L'étude de la répétabilité et les effets des conditions de stockage sur les performances du tag capteur sont aussi réalisées dans ce chapitre.

En outre, les résultats de cette étude permettent de considérer l'utilisation de cette méthode pour des applications biomédicales. En effet, comme la permittivité du muscle humain est très proche de la permittivité de la viande du porc ou le bœuf, il est envisageable d'utiliser cette approche pour des applications biomédicales, notamment comme antenne portable pour détecter des tumeurs cancéreuses.

Bibliographie – Chapitre 6

- [6.1]. Keat Ghee Ong, J. Samuel Bitler, Craig A. Grimes, Libby G. Puckett, Leonidas G. Bachas, “Remote Query Resonant-Circuit Sensors for Monitoring of Bacteria Growth: Application to Food Quality Control”, *Sensor MDPI*, 2-2002, pp.219-232
- [6.2]. BRIDGE project report, “Economic impact of RFID”, April 2008
- [6.3]. Antti Ruhanen and Fabrizio Bertuccelli, “D1.1.2 Specification of a common platform for sensor enabled RFID tags”, BRIDGE project, no. 033546, Revision 1.0.
- [6.4]. A. Bakker and J. H. Huijsing, “Micropower CMOS temperature sensor with digital output,” *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol.31, No. 7, pp.933-937, Jul. 1996
- [6.5]. J. M. Boriky and K. D. Wise, "Integrated signal conditioning for silicon pressure sensors," *Electron Devices, IEEE Transactions on*, vol. 26, pp. 1906-1910, 1979
- [6.6]. S. T. Cho, et al., "Secondary sensitivities and stability of ultrasensitive silicon pressure sensors," in *Solid-State Sensor and Actuator Workshop, 1990. 4th Technical Digest.*, IEEE, 1990, pp. 184-187
- [6.7]. R. Nagato, H. Hosaka, K. Sakamoto, “A TWO-DOF INCLINATION SENSOR BASED ON A SHELLFISH’S BALANCING ORGAN”, *TRANSDUCERS '99*, Sendai, June7-10, 1999, pp.1554-1557.
- [6.8]. F. Udrea and J. W. Gardner, "SOI CMOS gas sensors," in *Sensors, 2002. Proceedings of IEEE*, 2002, pp. 1379-1384 vol.2
- [6.9]. J. Zhou, et al., "Zeolite-modified microcantilever gas sensor for indoor air quality control," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 94, pp. 337-342, 2003
- [6.10]. D. J. Paul, et al., "Silicon quantum integrated circuits – an attempt to fabricate silicon-based quantum devices using CMOS fabrication techniques," *Thin Solid Films*, vol. 336, pp. 130-136, 1998
- [6.11]. M. Tuthill, "A switched-current, switched-capacitor temperature sensor in 0.6- μm CMOS," *Solid-State Circuits, IEEE Journal of*, vol. 33, pp. 1117-1122, 1998
- [6.12]. M. A. P. Pertijs, et al., "A CMOS smart temperature sensor with a 3σ inaccuracy of $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ from -50°C to 120°C ," *Solid-State Circuits, IEEE Journal of*, vol. 40, pp. 454-461, 2005

- [6.13]. W. J. Karl, et al., "A micromachined magnetostrictive pressure sensor using magneto-optical interrogation," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 81, pp. 137-141, 2000.
- [6.14]. A. DeHennis and J. Chae, "2.04 - Pressure Sensors," in *Comprehensive Microsystems*, Z. Hans, Ed., ed Oxford: Elsevier, 2008, pp. 101-133
- [6.15]. L. D. Du, et al., "An NiCr Alloy Piezoresistive Atmosphere Pressure Sensor based on Eutectic," *Procedia Engineering*, vol. 47, pp. 72-75, 2012
- [6.16]. H. Yang, et al., "A novel bulk micromachined gyroscope based on a rectangular beam-mass structure," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 96, pp. 145-151, 2002.
- [6.17]. R. A. Yotter, et al., "On a micro machined fluidic inclinometer," in *TRANSDUCERS, Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, 12th International Conference on*, 2003, pp. 1279-1282 vol.2
- [6.18]. H. Ueda, et al., "Micro Capacitive Inclination Sensor Utilizing Dielectric Nano-Particles," in *Micro Electro Mechanical Systems, 2006. MEMS 2006 Istanbul. 19th IEEE International Conference on*, 2006, pp. 706-709
- [6.19]. H. Shibata, et al., "A digital hygrometer using a polyimide film relative humidity sensor," *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on*, vol. 45, pp. 564-569, 1996
- [6.20]. A. P. Sample, et al., "Design of an RFID-Based Battery-Free Programmable Sensing Platform," *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on*, vol. 57, pp. 2608-2615, 2008
- [6.21]. L. Yang, et al., "A novel "green" fully-integrated ultrasensitive RFID-enabled gas sensor utilizing inkjet-printed antennas and carbonnanotube" in *Antennas and Propagation Society International Symposium, 2009. APSURSI '09. IEEE, 2009*, pp. 1-4
- [6.22]. Y. Zhang, L.T. Yang, J. Chen, "RFID and Sensor networks", Auerbach, 2010
- [6.23]. G. Marrocco, *et al.*, "Multiport Sensor RFIDs for Wireless Passive Sensing of Objects - Basic Theory and Early Results," *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, vol. 56, pp. 2691-2702, 2008
- [6.24]. D. M. Dobkin, "Chapter 5 - UHF RFID Tags," in *The RF in RFID (Second Edition)*, M. D. Daniel, Ed., ed: Newnes, 2013, pp. 189-237.

- [6.25]. Naaser A. Mohammed, Kenneth R. Demarest, and Daniel D. Deavours, "Analysis and Synthesis of UHF RFID Antennas using the Embedded T-match", 2010 IEEE Conference on RFID, pp. 230-236, April 2010, USA
- [6.26]. Daniel D. Deavours, "Improving the Near-Metal Performance of UHF RFID Tags", 2010 IEEE Conference on RFID, pp. 187-194, April 2010, USA
- [6.27]. N. Dat Son, *et al.*, "Novel design of RFID UHF passive tag for wideband applications by direct and contactless chip connection," in *RFID-Technologies and Applications (RFID-TA), 2012 IEEE International Conference on*, 2012, pp. 131-136
- [6.28]. D. M. Dobkin, "Chapter 9 - RFID Applications," in *The RF in RFID (Second Edition)*, M. D. Daniel, Ed., ed: Newnes, 2013, pp. 453-484
- [6.29]. Mudgett, R.E. (1985). Dielectric properties of foods, *In Microwaves in the Food Processing Industry* (ed.) R.V. Decareau. Academic Press, *Inc.*, New York
- [6.30]. D. M. Pozar, "Microwave Engineering", John Wiley & Sons, second edition, 1998
- [6.31]. Finkenzeller K., *RFID Handbook-Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards and Identification*, Wiley (2003)
- [6.32]. T. Ohlsson and N. Bengtsson, "Microwave technology and foods," in *Advances in Food and Nutrition Research*. vol. Volume 43, ed: Academic Press, 2001, pp. 65-140
- [6.33]. S. Ryyänen, "The electromagnetic properties of food materials: A review of the basic principles," *Journal of Food Engineering*, vol. 26, pp. 409-429, 1995
- [6.34]. Metaxas, A.C. and R. J. Meredith (1983), "Industrial Microwave Heating", London: Peter Peregrinus.
- [6.35]. Basaran-Akgul, N., Basaran, P. and Rasco, B.A., "Effect of Temperature (-5 to 130°C) and Fiber Direction on the Dielectric Properties of Beef *Semitendinosus* at Radio Frequency and Microwave Frequencies", *Journal of Food Science*, 2008
- [6.36]. Komarov, V., S. Wang, and J. Tang. 2005. Permittivity and Measurement. K. Chang (eds.). *The Wiley Encyclopedia of RF and Microwave Engineering*. John Wiley & Sons, Inc., New York. 4: 3693-3711
- [6.37]. Kenneth R. Foster, " Dielectric Properties of Tissues", *The Biomedical Engineering Handbook: Second Edition*, Ed. Joseph D. Bronzino, Boca Raton: CRC Press LLC, 2000

- [6.38]. Tang, J., Feng, H. & Lau, M., "Microwave heating in food processing", in *Advances in Bioprocessing Engineering*, ed. X. Young, & J. Tang, World Scientific Publisher, New Jersey, pp. 1-43, 2002
- [6.39]. U. Mc Carthy, G. Ayalew, F. Butler, K. Mc Donnell, J. Lyng, S. Ward, "Permittivity of Meat Fish and their Components at UHF RFID Frequencies and Industry Relevant Temperatures", *Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal*, Manuscript 1280. Vol. XI, December 2009.
- [6.40]. Scott B. Jones, Shmulik P. Friedman, "Particle shape effects on the effective permittivity of anisotropic or isotropic media consisting of aligned or randomly oriented ellipsoidal particles", *Water Resources Research*, Vol. 36, No. 10, Pages 2821-2833, October 2000.
- [6.41]. Mark J. Schroeder, Anupama Sadaasiva, Robert M. Nelson, "An Analysis on the Role of Water Content and State on Effective Permittivity Using Mixing Formulas", *Journal of Biomechanics, Biomedical and Biophysical engineering*, Vol. 2, Issue 1, 2008
- [6.42]. Agilent - 85070E Dielectric Probe Kit 200 MHz to 50 GHz, Technical Overview
- [6.43]. [Online], Available from: http://www.metro.com.vn/servlet/PB/menu/-1_12/index.html
- [6.44]. [Online], Food and Agricultural Organization (FAO) Standard, Available from: <Ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/010/ai407e/ai407e12.pdf>
- [6.45]. Jean Buzby (2005-02-01). "USDA" . Ers.usda.gov. Retrieved 2010-05-01
- [6.46]. "BCD5: Natural American Cheese for use in domestic programs", *USDA Commodity Requirements*, 2008
- [6.47]. Standards of ISO 1735 : 2004, "Cheese and processed cheese products - Determination of fat content - Gravimetric method", 2004.
- [6.48]. Z.F. Ghatass, M.M. Soliman and M.M. Mohamed , " Dielectric Technique for Quality Control of Beef Meat in the Range 10 kHz - 1 MHz", *American-Eurasian Journal of Scientific Research* 3, ISSN 1818-6785, 2008, pp. 62-69
- [6.49]. <Http://www.impinj.com/support/>

CONCLUSIONS GÉNÉRALES ET PERSPECTIVES

Ce travail a abordé les aspects de conception pour les tags RFID UHF afin de les exploiter et les transformer en tags RFID passifs et capteur sans fil. L'objectif ultime de ce travail est de développer un tag capteur bas-coût qui sera utilisé pour répondre au besoin de traçabilité et évaluation de la qualité des produits alimentaires au Vietnam. Ce travail s'est fait dans le cadre d'une collaboration entre le Laboratoire de Nanotechnologie (LNT) à Ho-Chi-Minh et le Laboratoire de Conception et d'Intégration des Systèmes (LCIS) à Valence. Dans ce contexte, la réalisation de l'antenne du tag par la technologie disponible au LNT fait partie des objectifs de cette thèse. La prise en compte des caractéristiques et limites de la technologie sont essentiels pour une conception réaliste de tags capteurs.

Hors du processus de fabrication classique (lithographie et électrodéposition), les nouvelles technologies de fabrication bas-coût comme le jet d'encre sont adaptées et améliorées au cours du temps au sein du LNT en vue de diminuer le prix du tag RFID. Ce coût doit représenter une part négligeable par rapport au produit qu'il identifie. L'impression est la piste la plus prometteuse vers la réduction du coût de production des tags RFID. Elle devrait permettre de rendre la RFID encore plus compétitive, comparativement aux technologies bas-coût comme le code barre. De plus, le développement des technologies d'impression rend possible la réalisation de capteurs qui pourraient bénéficier des avantages de la RFID. Également, l'impression des antennes sur des substrats de type papier, très bas coût, est une piste très prometteuse. Dans ce travail, nous avons considéré les effets du processus de fabrication sur les caractéristiques de l'antenne et les performances du tag RFID UHF passif. Du point de vue process, ceci a permis d'ajuster et diminuer la tolérance entre la conception et la fabrication.

Par ailleurs, nous avons aussi proposé et conçu des structures pour le tag RFID UHF passif à partir des travaux publiés dans la littérature. Ceci nous a permis d'identifier et valider les géométries initiales d'antennes pour l'intégration de la fonction capteur au tags RFID. L'application visée étant la détection de la qualité des aliments.

Concernant la conception d'antennes de tags multi-port pour la détection de la qualité des produits alimentaires, il est important de caractériser les permittivités des aliments à partir de l'état frais jusqu'à l'état contaminé et d'utiliser ces données dans le modèle de simulation. Grâce à la méthode de la sonde coaxiale pour la caractérisation des aliments, nous avons obtenu une base des données des permittivités et leur évolution dans le temps, notamment lorsque l'état contaminé est atteint. En effet, lorsque les produits alimentaires comme la viande, le fromage... changent de qualité en passant d'un état frais à un état contaminé, alors leurs permittivités varient de manière significative. Ainsi, un tag RFID apposé sur aliment verra donc ses performances se modifier dans le temps.

Nous exploitons essentiellement la variation de la portée de lecture pour concevoir le tag capteur en contrôlant la géométrie et les dimensions de l'antenne du tag RFID. Nous utilisons aussi deux tags accordés sur des permittivités différentes qui correspondent aux états frais et contaminé. Chaque paire antenne/puce est conçue pour fonctionner dans une gamme de valeur de la permittivité de l'aliment considéré. Connaissant la variation de la permittivité d'un aliment en fonction du temps (à cause du vieillissement), nous pouvons détecter le moment où le produit alimentaire devient contaminé grâce à une mesure de la réponse du tag, en particulier la portée de lecture. Dans ce travail, nous avons aussi proposé de nouvelles conceptions pour les tags capteurs RFID afin de démontrer leur potentiel pour détecter la contamination et la qualité de la viande. La méthode expérimentale et les résultats de simulation ont montré l'intérêt de cette technique pour les applications réelles de traçabilité alimentaire. De plus, les résultats de ce travail permettent d'envisager l'utilisation de cette approche pour des applications de nature médicales comme l'antenne portable ou les réseaux sans fil de détection pour les applications de santé.

LISTE DES PUBLICATIONS

International peer-reviewed journals

- [1] **Son Dat Nguyen**, Thong Tien Pham, Eric-Fribourg Blanc, Ngan Nguyen Le, Chien Mau Dang, Smail Tedjini, "A Novel Approach for Quality Detection of Food by RFID-based Wireless Sensor Tag", *IET Electronics Letters*, Iss. 25, Vol. 49, December 2013
- [2] Ai Nhan Tran, **Son Dat Nguyen**, Duc Hoang Thai Pham, Thuat Nguyen-Tran, Chien Mau Dang and Eric Fribourg-Blanc, "A new platform for RFID research in Vietnam", *Adv. Nat. Sci.: Nanosci. Nanotechnol.* 1 (2010) 045015

International Conferences

- [1] Ngan Nguyen Le, **Son Dat Nguyen**, Tam Gia Phan, Lan Vinh Truong, Phat Tan Lam, Eric Fribourg-Blanc, Chien Mau Dang and Smail Tedjini, "Food quality detection by dielectric permittivity and intermediate standards characterization", In Proceeding of 4th *International Workshop on Nanotechnology and Application*, November 14-16, 2013, Vung Tau, Vietnam
- [2] **Dat Son Nguyen**, Gia Tam Phan, Tien Thong Pham, Nguyen Ngan Le, Mau Chien Dang, Smail Tedjini, "A Battery free RFID sensor for quality detection of food products", In Proceeding of *2013 Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS 2013)*, 12th-15th August, 2013, Stockholm, Sweden, pp. 583 - 587
- [3] **Dat Son Nguyen**, Xuan Chien Le, Tien Thong Pham, Viet Hoa Nguyen, Mau Chien Dang, Smail Tedjini, "Novel Designs of RFID Passive Tag for UHF Wideband Applications by Direct and Indirect Chip Connection for Meander Antenna", In Proceeding of *2012 IEEE Conference on RFID Technology and Applications*, 5th-7th November 2012, Nice, France, pp. 131-136
- [4] **Dat Son Nguyen**, Smail Tedjini, Tien Thong Pham, Nhan Ai Tran, Hong Phuong Phan, Mau Chien Dang, Tran Thuat Nguyen, Eric-Fribourg Blanc, "Contactless Antenna for Wideband UHF RFID Tags", In Proceeding of *2012 IEEE International Conference on RFID*, April 2012, Orlando, Florida, USA
- [5] Le Nguyen Ngan, Luong Vu Nam, **Nguyen Dat Son**, Tran Nhan Ai, Dang Thi My Dung, Dang Mau Chien, "A new Approach for application of Multiport RFID tag in food quality detection", In Proceeding of *3rd International Workshop on Nanotechnology and Application*, November 10-12, 2011, Vung Tau, Vietnam, pp. 636-639
- [6] Thuat Nguyen-Tran, Mau Chien Dang, Nhan Ai Tran, Anh Hoang, **Dat Son Nguyen**, Eric Fribourg-Blanc, Hong Phuong Phan, Ho Cong Tam Vuong, Van Hieu Nguyen, Tien Thong Pham, "Contribution on UHF RFID antenna design and tag fabrication", In Proceeding of *2011 IEEE International Conference on RFID Technologies and Applications*, 15th-16th September 2011, Barcelona, Spain, pp. 463-468

- [7] Ho Cong Tam Vuong, Hong Phuong Phan, Mau Chien Dang, **Dat Son Nguyen**, Thuat Nguyen-Tran, Nhan Ai Tran, Anh Hoang, Eric Fribourg-Blanc, “Design and Fabrication of UHF RFID Tag”, In proceeding of *2011 IEEE International Conference on Advanced Technologies for Communications*, August 2011, Vietnam, pp. 98-101
- [8] Van Hieu Nguyen, Hong Phuong Phan, Manh Ha Hoang, **Dat Son Nguyen**, Mau Chien Dang, Thuat Nguyen-Tran, Nhan Ai Tran, Anh Hoang, Eric Fribourg-Blanc, “Improving Radiation Characteristics of UHF RFID Antennas by Zigzag Structures”, In Proceeding of *2011 IEEE International Conference on Advanced Technologies for Communications*, August 2011, Vietnam, pp. 102-105
- [9] Hong Phuong Phan, **Dat Son Nguyen**, "A design and adjustment method for Ultra Wide Band microstrip antenna design", In Proceeding of *18th International Conference on Microwave Radar and Wireless Communications (MIKON)*, Vilnius, Lithuania, 14th -16th June 2010, ISBN : 978-1-4244-5288-0

National seminars or conferences

- [1] **Dat Son Nguyen**, Nguyen Ngan Le, Mau chien Dang, Smail Tedjini, "Conception de capteur RFID passif pour la détection de la contamination et la qualité des aliments", In Proceeding of *18ème Journées Nationales Microondes*, 15th-17th Mai, Paris, 2013
- [2] **Dat Son Nguyen**, "State-of-the-art in RFID and Applications of RFID sensors", **Invited Talk at CST System Integrity Workshop Series 2012**, International University, Vietnam National University - Ho Chi Minh city, Ho Chi Minh City, Vietnam, 5th Jun 2012