



HAL
open science

**Traçabilité RFID à l'aide de petites antennes :
application au cas des instruments chirurgicaux : étude
et validation d'une solution prototype**

Megdouda Benamara

► **To cite this version:**

Megdouda Benamara. Traçabilité RFID à l'aide de petites antennes : application au cas des instruments chirurgicaux : étude et validation d'une solution prototype. Electronique. Université Paris-Est, 2017. Français. NNT : 2017PESC1251 . tel-02373954

HAL Id: tel-02373954

<https://theses.hal.science/tel-02373954v1>

Submitted on 21 Nov 2019

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

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



**UNIVERSITÉ PARIS-EST
ÉCOLE DOCTORALE MSTIC**

THÈSE

Pour obtenir le grade de
Docteur de l'Université Paris-Est
Spécialité : **Électronique, optronique et systèmes**

**Traçabilité RFID à l'aide de petites antennes:
application au cas des instruments chirurgicaux.
Etude et validation d'une solution prototype.**

par:

Megdouda BENAMARA

Directeur de thèse : **Gaëlle LISSORGUES**

Encadrants : **Marjorie GRZESKOWIAK** et **Antoine Diet**

Président de jury : DE OLIVEIRA ALVES Francisco , Directeur de l' IUT de Cachan, Université Paris Saclay

Rapporteurs :

Christophe Delaveaud, Ingénieur au CEA LETI, Directeur du laboratoire LAPCI
Philippe Pannier, Professeur à l'université Aix-Marseille , Directeur du CNFM PACA

Examineurs :

DE OLIVEIRA ALVES Francisco, Directeur de l' IUT de Cachan, Université Paris Saclay
Gaëlle LISSORGUES, Professeur à l'ESIEE, ESYCOM, Université Paris Est
Marjorie Grzeskowiak, Maître de Conférences, ESYCOM, Université Paris Est
Antoine Diet, Maître de Conférences, GEEPS, Centrale-Supelec

Invités :

Patrick Poulichet, Maître de Conférences, ESYCOM, Université Paris Est
Marc-Antoine Sergeant , Ingénieur, société HEALTH FOR PEOPLE

Résumé

Le projet ARTIC, Application de la RFID pour la traçabilité des Instruments chirurgicaux, concerne la mise en place d'une solution d'automatisation de la traçabilité dans le secteur hospitalier, en particulier dans la stérilisation et dans la salle d'opération. Le développement d'une telle solution soulève plusieurs problèmes. En effet le contrôle et le suivi des instruments doit être rapide et adapté à l'environnement de travail, en tenant compte des exigences inhérentes à ces instruments: stérilisation à l'autoclave (121-138 ° C, vapeur saturée, 1-2 bar) et utilisation par les chirurgiens. La spécification doit combiner l'ergonomie, la résistance au traitement en autoclave, la rapidité lors du contrôle et la fiabilité, tout en générant un faible coût additionnel. De plus, une telle solution, doit permettre un contrôle multiple (identification de plusieurs instruments à la fois) dans toutes les directions spatiales possibles (sachant que les instruments sont posés d'une manière aléatoire dans les bacs de stérilisation). La thèse sur la traçabilité RFID à l'aide de petites antennes a pour but de proposer des solutions prototypes basées sur le couplage entre les boucles du lecteur et celle du tag. Les performances attendues du prototype sont, notamment, une distance de communication allant jusqu'à 10 cm, en utilisant une antenne lecteur ayant la taille des bacs de stérilisation, soit 50 cm de longueur, ainsi qu'un tag miniature de quelques millimètres de rayon. Plusieurs prototypes sont proposés et développés. (1) un prototype d'antenne lecteur incluant des résonateurs, qui permet d'augmenter le couplage du système RFID HF. Cette structure a été simulée, réalisée et mesurée. Afin de relier la simulation et la mesure, nous avons développé des modèles d'équations analytiques qui nous permettent à la fois de retrouver l'inductance propre d'un système lecteur à N-boucles ainsi que l'inductance mutuelle équivalente du système. (2) Une autre solution est une structure multi-boucles torsadées, basée sur la réorientation des lignes de champ magnétique. Son intérêt est de permettre une détection des tags quelque soient leurs positionnements angulaires dans un volume donné (quelconque).

Abstract

The ARTIC project concerns the implementation of an automatized system used to track Surgical Instruments with Radio Frequency Identification in hospitals, more precisely in sterilization area and operating room. The development of such solution should overcome different challenges. For example, the control of the instruments must be rapid and adapted to the sterilization inside the autoclave (121-138 ° C, under vapor, 1-2 bar). The specification must combine ergonomic constraints, sterilization process resistance and reliability, while being fast and generating low additional cost. Moreover, such a solution must allow multiple control (identification of several instruments at a time) in all possible spatial directions. The thesis on RFID tracking using small antennas aims to propose prototype solutions based on the magnetic coupling between a reader and the tag loops. The purpose of the prototype optimization is to reach a communication distance up to 10 cm, using a large reader loop antenna (the size of the sterilization trays: 50 cm length) and a miniature tag (few millimeters). Several prototypes are proposed and developed. (1) A prototype of the reader loop antenna including resonators, which allows to increase the magnetic coupling of the RFID system. This structure is simulated, realized and measured. In order to match simulation and measurement, we developed calculations of the equivalent electrical model allowing to find the equivalent inductance of the N-loops reader antenna, and also the equivalent mutual inductance of the system. (2) Another solution is a multiple twisted loop reader antenna. It is based on the reorientation of the magnetic field lines. Its interest is to allow a detection of the tags whatever their angular positioning into a given volume.



Table des matières

I.1.	Système de traçabilité actuel	20
I.1.1	Dans le bloc opératoire :	21
I.1	.2 La stérilisation et le reconditionnement	21
I.2	Automatisation de la traçabilité.....	23
I.2.1	Choix de la technologie :	24
a.	Code à barres :.....	24
b.	Data matrix :.....	25
c.	La RFID :.....	26
I.2.2.	Contraintes sur le système étudié et normes	28
I.2.3.	Réorganisation de la structure hospitalière selon la solution RFID	29
a.	Au bloc opératoire.....	30
b.	A la stérilisation	30
I.2.4.	Intégration du système et marquage d'instruments	32
I.2.5.	Récapitulatif du mode technique ARTIC.....	33
I.3	Etat de l'art des solutions existantes sur le marché.....	34
I.3.	Conclusion du chapitre I.....	34
I.4.	Bibliographie du chapitre I	36
Chapitre II:	38
Communication en champ proche		38
II.1.	Principe physique de la communication RFID :	39
A.	Champ magnétique	39
B.	Inductance mutuelle :	41
II.2.	Modélisation électrique du système RFID.....	42
II.2.1.	Environnement une boucle de lecteur et un tag :.....	42
II.2.2.	Environnement multi-boucles du lecteur et un tag	45
A.	Cas deux boucles du lecteur	45
A.1.	Décalage d'impédance de la boucle du lecteur.....	48
A.2.	Décalage de fréquence.....	48
A.3.	Méthode de résolution du problème de décalage de fréquence	49
B.	Cas général :	50
B.1.	Hypothèse sur le couplage entre résonateurs	51
B.2.	Considération du couplage entre résonateurs.....	52
II.2.3.	Environnement une boucle du lecteur et multi-tags	54

A.	Décalage d'impédance équivalente	55
B.	Décalage de fréquence :	56
C.	Méthode de correction du décalage de fréquence.....	57
II.2.4.	Environnement multi boucles du lecteur et multi-tags.....	57
A.	Décalage de fréquence :	57
B.	Méthode de correction du décalage de fréquence :	58
II.3.	Application au cas du système RFID.....	58
II.4.	Conclusion du chapitre II	59
II.5.	Bibliographie du chapitre II :	60
Chapitre III :	63
Structures antennaires du lecteur RFID HF		63
III.1.	Structure antennaire avec résonateurs.....	64
III.1.1.	Cas conventionnel (sans résonateurs).....	64
A.	Champ magnétique généré par la boucle du lecteur.....	64
B.	Inductance mutuelle.....	65
B. 1.	Variation du rayon de tag.....	65
B. 2.	Effet de variation de la configuration spatiale du tag.....	66
III.1.2.	Structure antennaire avec résonateurs.....	67
A.	Effet du résonateur	68
A.1.	Taille du résonateur :	69
A.2 .	Positionnement du résonateur	70
B.	Distribution des lignes de champ magnétique.....	73
III.2.3	Etude numérique et mesure du système :	75
A.	Configuration parallèle :	75
A.1.	Inductance mutuelle avec variation de la distance entre le lecteur et le tag.....	75
A.2.	Résistance mutuelle	76
B.	Configuration perpendiculaire	77
B. 1.	Inductance mutuelle avec variation de la distance entre le lecteur et le tag	77
B. 2.	Résistance mutuelle	78
b.	Paramètres d'impédance propre équivalente du lecteur bi-boucle et tag.....	78
III.2.4.	Effet sur la matrice impédance	79
A.	Impédance propre du lecteur : Z_{11} et Z_{11eq}	80
B.	Impédance propre du tag : Z_{22} et Z_{22eq}	81
C.	Impédance mutuelle du système : Z_{12} et Z_{12eq}	82

III.2.5 Effet sur les impédances vues du lecteur et tag.....	83
A. Cas parallèle :	83
B. Cas perpendiculaire :	84
III.2.3 Système antennaire multi résonateurs :	86
A. Cas de deux résonateurs	86
III.2.5. Validation expérimentale	89
A. Décalage de fréquence.....	89
III.2. Antenne torsadée :	92
III.2.1 Lignes de champ magnétique.....	92
III.2.2. Principe de fonctionnement.....	93
III.2.3. Etude théorique :	94
a. Comparaison des structures selon la configuration.....	95
b. Variation de la distance entre le lecteur et le tag	96
c. Variation du rayon de tag.....	97
IV.2.4 Réalisation et mesures	98
IV.2.5. Détection RFID :	100
III. 3 Antenne multi-boucles torsadée (MTLA) avec résonateurs :	101
III.4. Etude du décalage de fréquence.....	108
Nous représentons par les Figures III.45 et III.46, les quatre différentes positions de résonateurs dans le cas antenne rectangulaire et antenne multi-boucles du lecteur.....	108
III.5. Conclusion du chapitre III	111
III.6 Bibliographie du chapitre III	111
Chapitre IV.....	115
Prototypage et environnement métallique	115
IV.1. Effet de l'environnement métallique sur le système RFID.....	116
IV.1.1 Influence des plaques métalliques sur la structure.....	116
V.1.1. Effet sur l'inductance mutuelle équivalente :	117
V.1.2. Courant de Foucault et le champ généré :	118
V.1.3. Solution d'antenne du lecteur en deux étages	119
a. Effet sur l'inductance mutuelle équivalente	120
b. Effet sur les courants de Foucault	121
V.1.4 Structure grillagée	122
V.2. La RFID à proximité des instruments chirurgicaux	123
V.2.1. Présentation du matériel :	123

V.2.2.	Influence sur le champ magnétique	123
V.2.3.	Influence sur l'inductance mutuelle équivalente :	124
V.3.	Solution à base de ferrite :	125
V.3	Prototypage	126
V.4.	Conclusion du chapitre IV.....	140
V.5.	Bibliographie du chapitre V	140
I.	Revue internationale	145
II.	Actes de congrès internationaux.....	145
III.	Actes de congrès nationaux	146
IV.	Participation à des workshops	146

Liste des figures

Figure I. 1 : bloc opératoire	21
Figure I. 2 : containers métalliques (a) et sachets de stérilisation (b).....	22
Figure I. 3 : Architecture typique de la stérilisation	23
Figure I. 4 : code à barres (b) et son lecteur associé (a)	24
Figure I. 5 : code data matrix.....	25
Figure I. 6 : Architecture d'un système RFID HF	26
Figure I. 7 : Tag RFID (a) basses fréquences LF, (b) hautes fréquences HF et (c) ultra hautes fréquences.....	26
Figure I. 8 : Exemple de lecteur RFID HF (SL015M-3).....	27
Figure I. 9 : bac de stérilisation.....	28
Figure I. 10 : Instruments chirurgicaux.....	29
Figure I. 11 : Nouvelle structure proposée pour le bloc opératoire : portiques en entrée du bloc opératoire (1), salle de bloc opératoire (2), et stockage (3)	30
Figure I. 12 : Réorganisation de la stérilisation	31
Figure I. 13 : instruments tagué : tag collé (a) et tag intégré (b).....	35
Figure I. 14 : instrument tagué.....	35
Figure II. 1 : Une boucle émettrice (a) et communication en champ proche entre deux boucles (b) .	39
Figure II. 2 : Champ magnétique en fonction du rayon de la boucle	40
Figure II. 3: inductance mutuelle en fonction des rayons R1 et R2 des boucles C ₁ et C ₂ et de la distance entre elles	41
Figure II. 4 : Modèle électrique d'un système à une boucle du lecteur et un tag.....	43
Figure II. 5 : Tension aux bornes de la charge pour différentes valeurs de la tensions du lecteur et pour différentes valeurs d'inductances du tag	44
Figure II. 6 : : Circuit équivalent du système lecteur bi-boucle et tag.....	45
Figure II. 7 : Décalage de fréquence de résonance dans le cas boucle du lecteur avec un résonateur en fonction du coefficient de couplage K entre la boucle du lecteur et le résonateur	48
Figure II. 8 : Méthode de correction de décalage de fréquence au niveau de la boucle du lecteur....	50
Figure II. 9 : Circuit équivalent du système multi-boucles du lecteur et tag.....	51
Figure II. 10 : modèle électrique d'un système à une boucle du lecteur et multi-tags.....	55
Figure III. 1 : Système -boucle du lecteur et boucle du tag	64
Figure III. 2: champ magnétique généré par une boucle : amplitudes (a, b) et lignes de champs (c) ..	65
Figure III. 3: Inductance mutuelle pour différentes tailles de la boucle du tag	66
Figure III. 4 inductance mutuelle en configuration parallèle (a) et perpendiculaire (b)	67
Figure III. 5 : Système -boucle du lecteur et boucle du tag	68
Figure III. 6 : : Inductance mutuelle équivalente entre la bi-boucle du lecteur et le tag en parallèle (a) et perpendiculaire (b) pour différentes tailles du résonateur	69
Figure III. 7 : inductance mutuelle entre le résonateur et la boucle du lecteur	71

Figure III. 8 : inductance mutuelle entre le résonateur et la boucle du tag en positions parallèle (a) et perpendiculaire (b).....	72
Figure III. 9 : inductance mutuelle équivalente pour différentes positions du résonateur en configuration parallèle (a) et perpendiculaire (b).....	73
Figure III. 10 : Amplitude et lignes du champ magnétique généré par la bi-boucles du lecteur	74
Figure III. 11 : prototype réalisé : bi-boucles de lecteur et boucle du tag	74
Figure III. 12 : Inductance mutuelle équivalente simulée et mesurée du système lecteur bi-boucle et tag en fonction du déplacement latéral : Variation de la distance (a) et comparaison calcul, simulation et mesure (b).....	75
Figure III. 13 : : Partie réelle de l'impédance équivalente entre la bi-boucle du lecteur et le ta.....	76
Figure III. 14: Inductance mutuelle équivalente simulée et mesurée en fonction de la distance (a) et du déplacement latéral (b).....	77
Figure III. 15 : : Résistance mutuelle avec et sans résonateur	78
Figure III. 16: Paramètres d'impédance propre équivalente du lecteur et tag.....	79
Figure III. 17: Paramètres d'impédance conventionnelle et équivalente pour la boucle du lecteur....	80
Figure III. 18: Paramètres d'impédance conventionnelle et équivalente pour la boucle du tag.....	82
Figure III. 19: Partie imaginaire et réelle de l'impédance mutuelle conventionnelle (a,b) et équivalente simulée (c,d) et mesurée (e,f)	83
Figure III. 20: Amplitude et phase des impédances et impédances équivalentes d'entrée (a, b) et sortie (c, d).....	84
Figure III. 21: Amplitude et phase des impédances et impédances équivalentes d'entrée (a, b) et sortie (c, d).....	85
Figure III. 22: Prototype réalisé avec deux résonateurs ainsi que son modèle électrique équivalent	86
Figure III. 23. inductance mutuelle équivalente pour différentes valeurs de Δ (distance entre résonateurs).	88
Figure III. 24: structure fabriquée du lecteur RFID sans (a) et avec (b) résonateur	89
Figure III. 25 : Tests de détection RFID avec un prototype conventionnel (a), un prototype avec un résonateur (b) et un prototype avec deux résonateurs (c) en configuration parallèle et perpendiculaire)	91
Figure III. 26: distribution des lignes du champ magnétique pour une boucle torsadé (a) et une boucle classique (b).....	92
Figure III. 27 : antenne torsadée	93
Figure III. 28: modèle électrique de la boucle torsadée en présence d'un tag.....	93
Figure III. 29 : structures antennaires, déplacement latérale (dY), distance (dZ) et orientation spatiale du tag ($d\theta$)	94
Figure III. 30: comparaison des deux antennes rectangulaire et torsadée pour la configuration parallèle (b) et perpendiculaire (a).....	96
Figure III. 31: variation de la distance pour boucle classique en configuration parallèle (a) et perpendiculaire (b) et de la TLA en configuration parallèle (c) et perpendiculaire (d).....	97
Figure III. 32: variation du rayon de tag pour boucle classique en configuration parallèle (a) et perpendiculaire (b) et de la TLA en configuration parallèle (c) et perpendiculaire (d).....	98
Figure III. 33 : Banc de mesure des structures antennaires	98
Figure III. 34: comparaison de résultats de simulation et mesure en configuration perpendiculaire (a) et parallèle (b)	99

Figure III. 35 : banc de mesures de détection RFID	100
Figure III. 36:mesures de détection RFID pour Configuration parallèle pour la boucle rectangulaire (a) et la TLA (b) Configuration perpendiculaire pour la boucle rectangulaire (a) et la TLA (b)	100
Figure III. 37 : structure antennaire du lecteur : rectangulaire (a) et multi-boucles (b)	101
Figure III. 38 : Amplitude et lignes du champ magnétique de la structure rectangulaire et multi-boucles	102
Figure III. 40 : Modèle électrique du système multi-boucles du lecteur avec résonateur et le tag ...	104
Figure III. 41 :Inductance mutuelle et inductance mutuelle équivalente en configuration parallèle (a) et perpendiculaire (b).....	105
Figure III. 42 : amplitude du champ magnétique de l'antenne multi-boucles avec résonateurs	106
Figure III. 43 : Antenne multi-boucles fabriquée avec des résonateurs.....	106
Figure III. 44 : résultats de détection sans et avec résonateurs en configuration parallèle (a, c) et perpendiculaire (b, d).....	107
Figure III. 45 : différentes positions du résonateur sur la boucle du lecteur	108
Figure III. 46 : différentes positions du résonateur sur la multi- boucle du lecteur.....	108
Figure III. 47 : Variation de la partie imaginaire de Z_{11} (sans résonateur) en fonction de la fréquence pour la structure rectangulaire (a) et multi-boucles (b)	109
Figure III. 48 : Variation de la partie imaginaire de Z_{11eq} (avec résonateur) en fonction de la fréquence pour la structure rectangulaire (a) et multi-boucles (b)	110
Figure III. 49 : décalage de fréquence de résonance en fonction des différentes positions de résonateurs pour la structure rectangulaire (a) et multi-boucles (b)	111
Figure IV. 1 : solution de traçabilité proposée en présence du métal dans le plan (X, Y) (a) et (Y, Z) (b)	117
Figure IV. 11 : : champ magnétique en présence des ciseaux.....	124
Figure IV. 12: courant induit (a) et champ généré sur le métal (b) pour une structure sans résonateur	124
Figure IV. 13: inductance mutuelle (équivalente) en présence du métal pour une structure avec (b) et sans résonateur (a) en présence des ciseaux.....	125
Figure IV. 14: inductance mutuelle (équivalente) en présence du métal et de la ferrite entre tag et instrument pour une structure avec (b) et sans résonateur (a).....	126
Figure IV. 15 : tag RFID HF à utiliser sur les instruments chirurgicaux.....	127
Figure IV. 16 : tag RFID accroché à un instrument chirurgical.....	128
Figure IV. 17 : encapsulation du tag associé à un instrument chirurgical	129
Figure IV. 18: Structure antenne carrée avec résonateur : sur un étage (a) et sur deux étages (b)..	130
Figure IV. 19 : amplitude du champ magnétique dans les plan (X,Y) (a) et (Y, Z) (b) pour une structure à deux étages.....	131
Figure IV. 21 : Répartition du champ magnétique (amplitude) dans la structure incluant les résonateurs dans les plan (X, Y) et (Y, Z)	132
Figure IV. 22 : banc de mesures du prototype ARTIC avec résonateur	133
Figure IV. 23 : structure multi-boucles torsadées et tag en position parallèle ou perpendiculaire...	134
Figure IV. 24 Amplitude du champ magnétique dans les plans (X, Y) (a) et (Y, Z) – préciser a, b, c, d !	135
Figure IV. 25 : modèle électrique équivalent du système multi-boucles du lecteur et tag	136

Figure IV. 26 : Inductance mutuelle en configuration parallèle (a) et perpendiculaire (b).....	136
Figure IV. 27 : structure multi-boucles torsadée et tag pour mesure en détection	137
Figure IV. 28: distance de détection RFID en configuration parallèle(a) et perpendiculaire (b).....	138
Figure IV. 29 : Prototype structure multi-boucles avec un résonateur	139

Liste des tableaux

Tableau. I. 1 : caractéristiques des technologies RFID

Tableau. I. 2 : Etat de l'art des solutions de traçabilité des instruments chirurgicaux

Tableau. II. 1: Propriétés électriques du système une boucle du lecteur et un tag

Tableau III.1: Changement de fréquence dans le système RFID

Tableau. III. 2: propriétés électriques des structures boucles rectangulaire et TLA



Introduction

Les infections nosocomiales et les maladies contaminatrices constituent des risques majeurs auxquels sont confrontées les organisations hospitalières. Dans la plupart des cas, ces maladies se présentent sous forme d'un virus, très facile à se retransmettre d'un patient à l'autre à cause de la réutilisation des instruments chirurgicaux. Après chaque utilisation, un instrument chirurgical suit un cycle de stérilisation qui consiste en un processus physique de nettoyage à la fois manuel et industriel, réalisé à haute température (134°C) et à haute pression (2 bars) pour permettre la destruction des micro-organismes. Pour éviter les risques de contamination, le matériel chirurgical utilisé dans chaque opération doit être relié à son patient. Si ce patient est atteint d'une maladie contaminatrice, une procédure de stérilisation doit être appliquée afin de protéger le personnel hospitalier du risque de contamination. Le cycle classique de stérilisation du matériel chirurgical sera détaillé dans le chapitre 1.

La durée de vie d'un instrument étant limitée, les structures hospitalières adoptent une méthode de traçabilité afin de pouvoir accéder à leurs historiques d'utilisation. Jusqu'à présent, la méthode de traçabilité utilisée par les structures hospitalières est manuelle. Les infirmiers gèrent cette étape, qui peut donc être source d'erreurs humaines. (Les erreurs de comptage, saisie de l'historique d'utilisation et recomposition des boîtes, car il y a des centaines de types d'instruments différents et l'identification est parfois basée sur un catalogue). Chaque boîte contient 80 instruments et 140 boîtes sont reconstituées chaque jour par 10 infirmiers(es) en stérilisation. Cette étape de reconditionnement est considérée comme l'étape qui prend le plus de temps, et qui présente le plus de risques d'erreurs. Ces tâches sont répétées plus de 5000 fois par jour.

Cette thèse s'inscrit dans une démarche d'amélioration de la traçabilité dans les structures hospitalières. Il s'agit de l'étude d'une possibilité d'automatisation de la traçabilité des instruments chirurgicaux à l'aide d'un dispositif d'identification radiofréquence (RFID) (projet ARTIC). Le choix de cette technologie a été discuté (avec la HAS / la Haute Autorité de Santé) : la solution codes à barres (1D ou 2D) a été vite écartée à cause du risque d'usure des étiquettes (la stérilisation se fait par quantité d'instruments (vrac), il y a donc des frottements entre les instruments). A force de répétition de la

procédure de stérilisation, la gravure des étiquettes s'érode et pour être réutilisés les instruments doivent être ré-étiquetés. Une préférence pour une solution RFID a été rapidement mise en avant.

Le choix de la technologie est également dépendant de la bande de fréquence RFID possible. Cette technologie est basée sur une communication à distance entre le tag et le lecteur, et a comme avantage la possibilité de réécriture sur le tag (ajout de nouvelles données après chaque utilisation). Deux paramètres du cahier des charges sont à respecter en priorité: le coût de fabrication du dispositif final et son bon fonctionnement en présence du métal. La technologie qui répond le plus à nos exigences est la RFID par couplage magnétique (Haute Fréquence 13.56 MHz).

La RFID en couplage magnétique est encore constituée de deux entités : un lecteur et un tag. Le lecteur est une carte électronique qui gère la partie traitement des données. Il est associé à une antenne boucle qui assure la communication par lien inductif avec l'antenne du tag. Le tag est constitué d'une autre petite antenne boucle associée à une puce électronique où toutes les informations concernant l'identifiant sont stockées. Pour que la communication soit établie entre ces deux entités, le tag doit recevoir une énergie*, générée par le lecteur, suffisante pour lui permettre de fonctionner. Les difficultés dans la mise en œuvre d'un tel système sont les contraintes de la taille des tags et sur la distance de détection, fixée par le cahier des charges. Dans notre contexte, le tag doit être petit (quelques mm²) pour ne pas gêner les chirurgiens lors de l'utilisation des instruments, et il doit pouvoir être détecté à une distance minimale de 10 cm, ce qui correspond à la hauteur des paniers de stérilisation. Parmi les verrous technologiques à lever durant ces travaux de thèse, le premier est d'assurer la détection des tags dont la surface constitue 1% (voir moins) de la surface de la boucle du lecteur, avec un fonctionnement correct selon les différentes orientations spatiales possibles entre les antennes du tag et du lecteur.

Lors de la stérilisation des instruments qui arrivent en vrac, une solution d'encapsulation du tag est envisagée afin de protéger les tags de tout choc pouvant le détruire. Les tags seront mis dans des boîtiers suivant leurs formes puis entourés par une résine qui protège l'électronique du tag mais aussi permet l'adhérence le tag à l'instrument quels que soient les cycles de température et pression.

Pour répondre aux exigences du personnel hospitalier, un cahier des charges a été fixé dans le cadre d'un projet intitulé ARTIC (dire l'acronyme). Le dispositif RFID proposé doit donc satisfaire un certain nombre de critères :

- **Distance minimale de détection** de 10 cm qui est la hauteur des paniers de lavage = distance entre l'antenne et le tag

- **Nombre minimal d'instruments à détecter** : 5 à la fois, pour assurer un gain en temps et nombre de personnel

• **Configurations spatiales possibles de détection** : le but est d'avoir une possibilité de détection dans toutes les positions du tag par rapport à l'antenne du lecteur (recherche d'une solution de détection en volume)

• **Taille des tags et leur fixation**: Diamètre maximal de 5mm, il doit être le plus petit possible pour ne pas gêner le chirurgien lors de l'utilisation. De la même manière il faut bien choisir son positionnement sur l'instrument.

Les travaux développés dans ce manuscrit se sont focalisés sur la partie antennaire du lecteur ainsi que l'influence de l'environnement métallique.

Dans le premier chapitre, nous présentons la méthode de traçabilité utilisée actuellement dans une structure hospitalière moyenne. Nous suivons le cheminement d'un instrument entre le bloc opératoire et la stérilisation, ce qui va permettre d'identifier les zones dans lesquelles des modifications peuvent être apportées pour minimiser les risques d'erreurs et aussi assurer un gain de temps et de coûts. Pour ces zones identifiées, nous proposons de mettre en place notre solution d'automatisation de la stérilisation à l'aide de la technologie RFID HF et nous fixons le cahier des charges qui répond aux exigences de la solution.

Dans le second chapitre, nous présentons un système de communication en champ proche, et déterminons les grandeurs physiques qui interviennent. Ce système (classique : une boucle du lecteur et une boucle du tag) sera modifié progressivement pour répondre à nos exigences en développant des systèmes plus complexes : plusieurs boucles du lecteur et/ou plusieurs boucles des tags.

Proposition : Dans ce chapitre notre intérêt est principalement d'évaluer analytiquement en se basant sur la matrice impédance les dégradations de performances des couplages magnétiques entre antennes lecteur et tag, selon différents critères (taille, distance entre boucles, nombre de boucles...).

Le chapitre III porte sur les structures antennaires du lecteur. Trois types de structures sont proposées et validées par des simulations HFSS (High-Frequency Electromagnetic Solvers), conjointement par des mesures des paramètres d'impédances avec un analyseur de réseau vectoriel (VNA) ainsi que par des mesures de détection RFID. Ces structures sont : une antenne du lecteur avec plusieurs résonateurs, une antenne torsadée simple et une antenne torsadée avec des résonateurs. La proposition de ces différentes structures est basée sur la distribution du champ magnétique généré par l'antenne du lecteur (son homogénéisation sur la surface de l'antenne et la réorientation de ses lignes) : l'objectif principal est d'assurer la détection de plusieurs tags dans différentes orientations spatiales et à différentes distances de lecture.

Dans le chapitre IV, nous présentons l'influence de l'environnement métallique (instruments chirurgicaux et bacs de stérilisations) sur le prototype RFID. Une étude théorique et numérique sur les courants de Foucault sera détaillée. Nous proposons des solutions d'amélioration du dispositif par des structures en deux étages associées à de la ferrite. Des tests de détection RFID en présence du métal sont aussi analysés en utilisant deux prototypes du projet ARTIC.

Nous achèverons ce manuscrit par une conclusion du travail récapitulant l'avancement du projet sur l'automatisation de la traçabilité des instruments chirurgicaux et nous proposerons quelques perspectives à court et moyen termes.



Chapitre I :

La traçabilité dans les structures hospitalières, solution d'automatisation

Selon l'enquête du ministère de la santé menée en 1999 sur les infections nosocomiales, 10000 patients décèdent chaque année et 600000 personnes sont atteintes de ces infections [1.1]. Le bilan s'alourdit de plus en plus et passe à 750000 cas atteints d'infections en 2006. Ces infections deviennent donc l'une des préoccupations majeures des dirigeants de santé, médecins mais aussi des patients. Pour différentes causes de contamination, ces infections sont dans la plupart des cas une conséquence d'une erreur de stérilisation, sachant que tous les instruments qui entrent dans la salle de bloc opératoire doivent passer un cycle de stérilisation qui consiste à les nettoyer et à les désinfecter. Ces tâches qui sont d'une importance cruciale sont effectuées par des infirmiers (es), et cela les rend très exposées aux risques d'erreurs humaines. Lors du cycle de cheminement entre le bloc opératoire et la stérilisation, la boîte contenant les instruments doit être reconstituée (ces instruments sont identifiés visuellement à l'aide d'une photographie) puis envoyée en stock ou en bloc opératoire selon d'agenda de la journée. Afin d'identifier l'étape du cycle de stérilisation la plus exposée aux erreurs, les structures hospitalières font souvent appel à l'automatisation de la traçabilité des instruments chirurgicaux. Dans ce chapitre, nous allons présenter le cheminement de chaque instrument à l'aide de la méthode de traçabilité actuelle utilisée dans une structure hospitalière moyenne (qu'on va définir) et désigner les zones de chemin les plus exposées aux erreurs. Ensuite nous détaillons la solution d'automatisation de la traçabilité proposée dans ces travaux. Cette solution basée sur l'identification radiofréquence par couplage magnétique a pour but d'offrir une réduction significative des risques d'erreurs et aussi un gain financier pour la structure hospitalière.

I.1. Système de traçabilité actuel

La traçabilité est une technique permettant l'accès à l'historique d'utilisation de l'objet. Dans le cas d'une structure hospitalière, la traçabilité d'un instrument chirurgical signifie la maîtrise et la connaissance de son historique d'utilisation. Les instruments de chirurgie transitent entre l'équipe du bloc opératoire et celle de la stérilisation. Ces équipes fonctionnent de manière séparées et se transmettent donc les différents instruments chirurgicaux. Une procédure de contrôle et de suivi logistique est alors mise en place afin d'accorder leur bon échange et de coordonner les activités. Des conflits peuvent exister concernant le suivi des instruments. En effet, le transport des instruments peut toujours être source de problèmes de suivi (pertes, mélange entre bacs,...). Pour se faire, les instruments arrivent dans des grands bacs et sont répartis (après un trempage préliminaire) dans des bacs en inox grillagés avant l'étape de lavage. Dans ce contexte de travail de traçabilité, toute solution proposée doit répondre aux critères liés à la taille de la structure hospitalière (nombre de bloc opératoire et salle de bloc opératoire, salle de stérilisation, nombre d'interventions chirurgicales, nombre d'instruments utilisés,...etc)

Dans notre étude, nous nous intéressons au cas d'une structure hospitalière de taille moyenne ayant les caractéristiques suivantes [I.2]:

- Nombre de blocs opératoires: 2
- Nombre de salles d'opérations: 8, quatre salles d'opérations par bloc
- Nombre moyen d'instruments par opération: 364
- Nombre d'autoclaves: 2
- Nombre d'interventions chirurgicales par an: 7150
- Nombre d'instruments de l'établissement: 25 000
- Nombre d'instruments à stériliser par jour : 7280
- Nombre de personnes en stérilisation: 10

Pour simplifier la problématique, nous ferons aussi des hypothèses sur le déroulement des opérations chirurgicales. Comme pour les hypothèses prises précédemment, le déroulement des opérations représente une référence qui servira de base pour notre étude. Nous supposons que:

- Quatre boîtes, six sachets et deux plateaux sont utilisés par opération.
- Sur les 8 blocs opératoires 20 opérations par jour sont réalisées
- 80 boîtes, de 120 sachets, et de 40 plateaux sont utilisées par jour (avec en moyenne 80 instruments par boîtes, 5 instruments par sachets et 7 instruments par plateaux).

Pour comprendre l'origine des erreurs de la traçabilité utilisée dans une telle structure, nous allons présenter le cycle standard de cheminement d'un instrument depuis son utilisation lors d'une intervention chirurgicale dans la salle de bloc opératoire jusqu'à la stérilisation.

I.1.1 Dans le bloc opératoire :

Les instruments arrivent dans le bloc opératoire, depuis la stérilisation, (Figure. I.1) dans des boîtes transportées à l'aide d'un chariot (1). Selon l'agenda des opérations, les boîtes vont soit en salle d'opération (2) soit en zone de stockage (4). À leur entrée et sortie du bloc, les instruments vont être comptés par le personnel hospitalier pour être sûr qu'il n'y a pas d'oubli d'instruments dans le bloc. En zone de stockage (une salle avec des armoires), chaque boîte doit être associée à un tiroir par le personnel du stockage.

Quatre boîtes contenant 80 instruments arrivent en salles d'opérations dans un chariot (2), 5 sachets de 6 instruments chacun et deux plateaux de 7 instruments chacun. L'infirmier (e) de bloc sort tous les instruments des boîtes et sachets, les compte puis les pose sur le plateau pour être utilisés lors d'une intervention. Après leur utilisation, les instruments sont mis en bassine de décontamination et envoyés en stérilisation

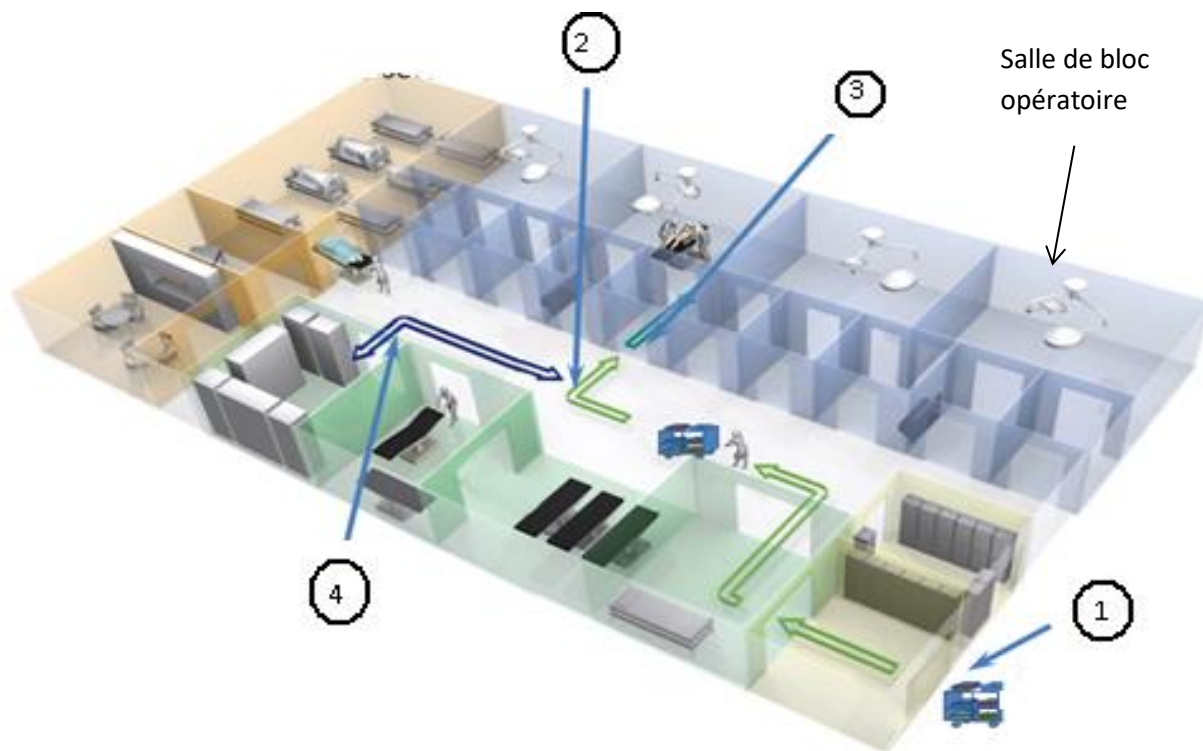


Figure I. 1 : bloc opératoire

I.1 .2 La stérilisation et le reconditionnement

Dans la plupart des structures hospitalières, la salle de stérilisation ne se situe pas dans le même étage que le bloc opératoire, le transport des instruments se fait donc par des ascenseurs ou par camion si la stérilisation est loin du bloc opératoire. L'architecture complète est proposée Figure I.3. Les instruments arrivent en salle de stérilisation mélangés dans des bassines de décontamination à une température de 30°C (5). Le pré-lavage se fait parfois à la main (6) et les baignoires sont renouvelés après chaque utilisation. Cette étape sert à

enlever les résidus d'opération (sang, peau,..). À ce stade de nettoyage les instruments sont considérés comme toujours sales. Par la suite, les instruments doivent être comptés, triés et comparés à un bordereau d'accompagnement généré à la sortie du bloc opératoire. Les instruments abimés sont donc éliminés et le reste est associé instrument par instrument à son mode de stérilisation indiqué par le constructeur. Cette étape est faite par le personnel de stérilisation. Si l'agent de réception valide l'étape de pré lavage, les instruments passent au nettoyage à l'aide des machines laveur-désinfecteur (7), les instruments à ce stade sont propres et peuvent selon l'agenda de la journée passer en zone de conditionnement (8).



Figure I. 2 : containers métalliques (a) et sachets de stérilisation (b)

Le conditionnement est une opération qui consiste à mettre les instruments lavés dans des sachets autocollants ou des containers métalliques qui permettent le passage de la vapeur d'eau lors de la stérilisation (Figure. I.2). Cette opération est associée à une tâche d'identification. Elle est effectuée par un(e) infirmier(e) et est source d'erreurs. Lorsque une erreur de conditionnement se produit, la boîte arrivant au bloc opératoire sera ouverte mais ne sera pas utilisée et une nouvelle boîte sera demandée au stock.

Après conditionnement les boîtes et les sachets sont reconstitués, ils passent en salle de stérilisation par autoclave (10). Cette étape est destinée à détruire les microbes à une température de 134°C et une pression de 2 bars, sachant que la plupart des instruments chirurgicaux sont thermorésistants.

A leur sortie de l'autoclave, les boîtes et les sachets sont stérilisés et mis en zone de pré-stockage (11). Selon l'agenda du bloc opératoire, ils seront envoyés au bloc opératoire (12), pour être directement utilisés lors d'une intervention, ou encore stockés pour être utilisés ultérieurement. Le cheminement des instruments en stérilisation est ainsi reporté sur la Figure.I.3, où chaque étape est associée à un numéro. La stérilisation a les caractéristiques suivantes (dans la structure hospitalière moyenne choisie à titre d'exemple) :

- 140 boîtes et 300 sachets reformés par jours
- 70 plateaux reformés par jours

C'est tâches sont faites par 10 infirmiers, ce qui fait une moyenne de 1201 instruments par infirmier (e) (14 boîtes, 30 sachets et 7 plateaux).

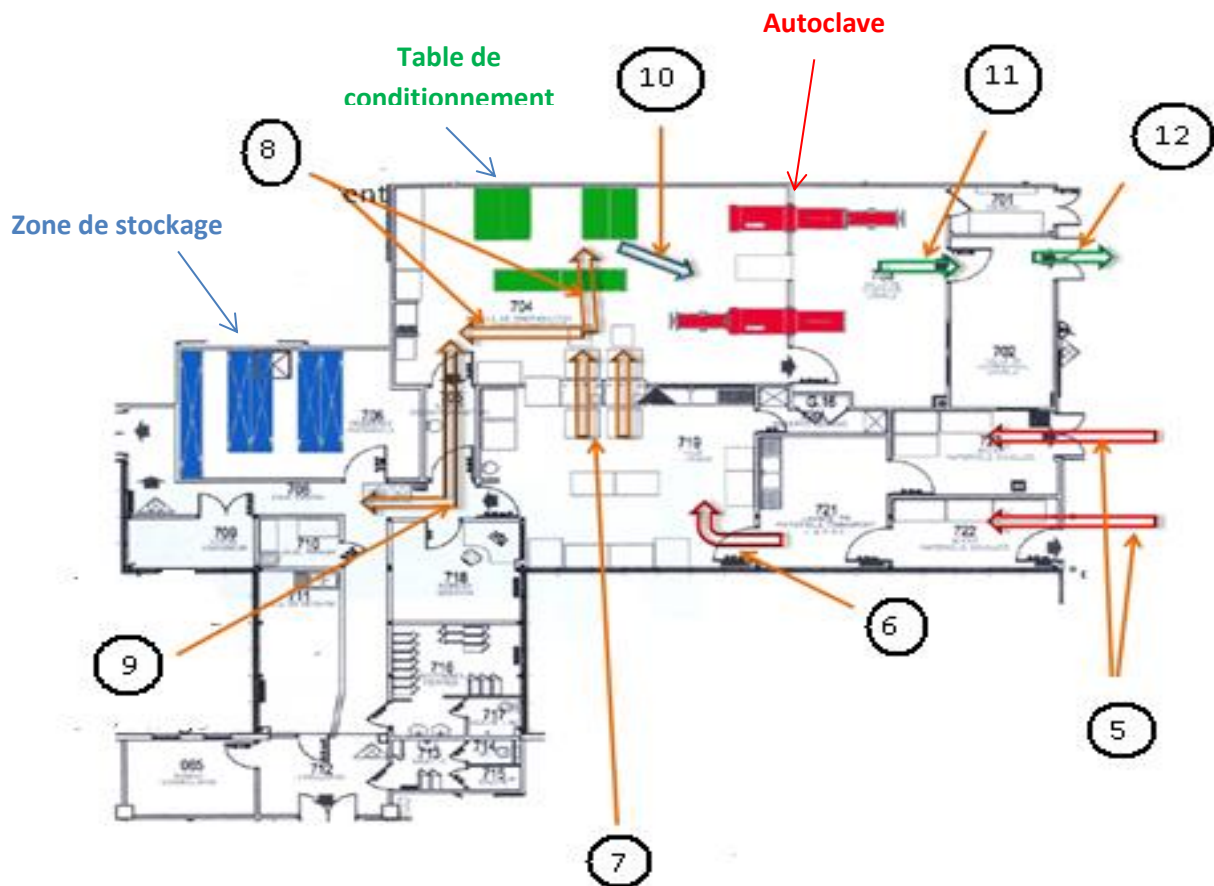


Figure I. 3 : Architecture typique de la stérilisation

I.2 Automatisation de la traçabilité

La solution de traçabilité et d'identification automatique des instruments semble être le meilleur moyen de réduire les risques d'erreurs et d'améliorer le processus en termes de temps et de coût. L'objectif est de concevoir un dispositif d'identification des instruments chirurgicaux et d'associer chaque instrument à une boîte. Une première nécessité pour appliquer un tel système de traçabilité est de créer pour chaque instrument une base de données qui contient toutes les informations ainsi que l'historique liés à son utilisation : ces informations seront copiées sur une puce. L'identification de l'instrument permet à l'aide d'un logiciel informatisé, la reconnaissance de l'instrument (nous pouvons imaginer une identification par sa forme, son poids...). Par la suite, l'instrument doit être associé automatiquement à la boîte marquée lui correspondant (par exemple : la boîte N°1 doit contenir les instruments a, b,...). D'autre part, une identification de plusieurs instruments à la fois est envisageable pour éviter le comptage manuel. Le projet d'automatisation de la traçabilité sera appliqué aux blocs opératoires qui sont les plus exposés aux infections et

contaminations puis aux salles de stérilisation pour réduire le coût, le temps, les erreurs de comptages et les erreurs de reconstitution de boîtes. Nous allons présenter les solutions technologiques actuellement disponibles.

I.2.1 Choix de la technologie :

Une identification sans contact et à distance de plusieurs instruments en même temps présente de meilleurs avantages. Trois technologies peuvent répondre à cette solution : code barres, data matrix et RFID.

a. Code à barres :

L'origine du suivi de produit date des années 1949, lorsque un premier brevet d'application code à barres a été déposé par Bernard Silver et Norman Joseph Woodland [1.3][1.4]. Leur idée était d'utiliser de l'encre à lire à l'aide des rayons lumineux. Deux ans plus tard, ils concevaient un premier lecteur code barre composé d'un tube photomultiplicateur branché à un oscilloscope et une ampoule. Le motif à lire était constitué d'une encre sous forme de lignes imprimées sur une feuille. Lorsque la feuille reçoit de la lumière, certains rayons lumineux sont réfléchis vers le tube et le déplacement de la feuille sur la lumière provoque la variation du signal sur l'oscilloscope. Ce système, malgré la lecture de l'encre, reste limité par des verrous tels que le traitement automatique des données et le faisceau lumineux intense (incapacité de traitement de signal électronique en sortie de l'oscilloscope par les ordinateurs de l'époque).



Figure 1. 4 : code à barres (b) et son lecteur associé (a)

D'autre part, la lumière émise par la lampe était trop importante et provoquait une chaleur qui brûlait la feuille et qui pouvait être dangereuse. Deux besoins ont donc été clairement identifiés : des ordinateurs à fortes capacités de traitement de données et une source de lumière importante et à petite surface. Le début des années 1960 a été marqué par le besoin d'identifier des wagons de marchandises et leur suivi. Une première application réelle à base des codes à barres, a été exploitée par David J. Collins, qui a développé des étiquettes colorées à base de matériaux réfléchissants. Le traitement du signal de sortie a été fait par des nouveaux ordinateurs conçus par Sylvia Corporation, le système

fonctionnait correctement mais son seul inconvénient était un coût élevé. La découverte du laser et son utilisation comme émetteur de lumière pour lecteur à code barre par Computer Identics a réduit les coûts et a permis le lancement de la technologie qui a été, et est encore, largement appliquée dans les commerces et les grandes surfaces (Figure. I.4).

b. Data matrix :

Appelé aussi code QR (Quick Response), cette technologie appartenant à la famille des codes à barres améliorés, et a été inventée par TOYOTA en 1994 pour répondre à l'exigence de la mise en œuvre d'un système de suivi de chemin des pièces détachées dans ses usines. Cette solution a été rendue publique en 1999 et a été largement utilisée avec l'essor des Smartphones pour le stockage des données [I.5][I.6]. Elle a aussi été largement appliquée pour la traçabilité des produits pharmaceutiques depuis leur fabrication jusqu'à leur transmission aux patients. Le code **Data Matrix** est un code-barres bidimensionnel permettant de stocker une grande quantité d'informations sur une petite surface. C'est une technologie basée sur une étiquette autocollante ou sur la gravure d'un code sur l'objet à tracer. Le code contient des informations concernant l'objet (Figure. I.5).



Figure I. 5 : code data matrix

L'inconvénient de ces deux technologies (code à barres et QR) est la limitation de la distance de lecture et du placement des étiquettes car il faut une bonne visibilité entre l'étiquette et son lecteur. Les faiblesses sont la capacité de stockage, relative à la taille de l'étiquette, ainsi que l'impossibilité de modification des informations enregistrées. Dans le milieu hospitalier, les instruments suivent un certain cycle qui les confronte à des environnements tel que la chaleur, l'humidité et la pression, ceci rend impossible les solutions à base d'étiquettes autocollantes. Ces deux premières technologies ne répondent pas pleinement au cahier des charges notamment en ce qui concerne l'ajout d'informations sur les étiquettes ou la robustesse face au cycle de stérilisation.

c. La RFID :

Les systèmes d'identification sans contact présentés précédemment font partie d'un type d'identification optique. Dans cette partie nous abordons un autre type de liaison qui est la liaison RF (Radio Frequency). La RFID est une des technologies qui utilise la RF comme lien de communication, physique, entre l'interrogateur (le lecteur) et le transpondeur (le tag) (Figure.I.6).

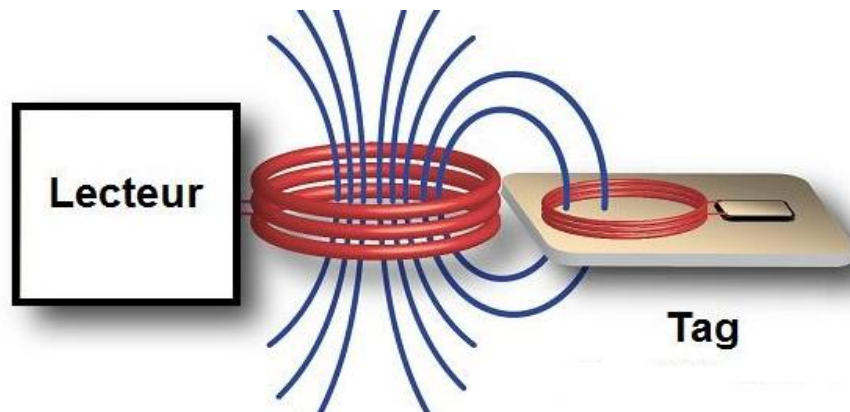


Figure I. 6 : Architecture d'un système RFID HF

Cette technologie fut l'objet de plusieurs études depuis sa première apparition pendant la deuxième guerre mondiale en **1938** (IFF : Identifie Friendly Foe). Son objectif principal était la sécurisation de l'espace aérien britannique face à toute menace provenant de la détection d'un appareil inconnu. Ce système jusqu'à la fin des années **70**, était employé dans les applications militaires. Seul le tag actif était connu, la RFID était donc assez coûteuse pour être mise à disposition du grand public [1.7][1.8][1.9]. Le développement plus massif s'est produit au début des années 80 (**1983**) après l'invention des tags passifs :

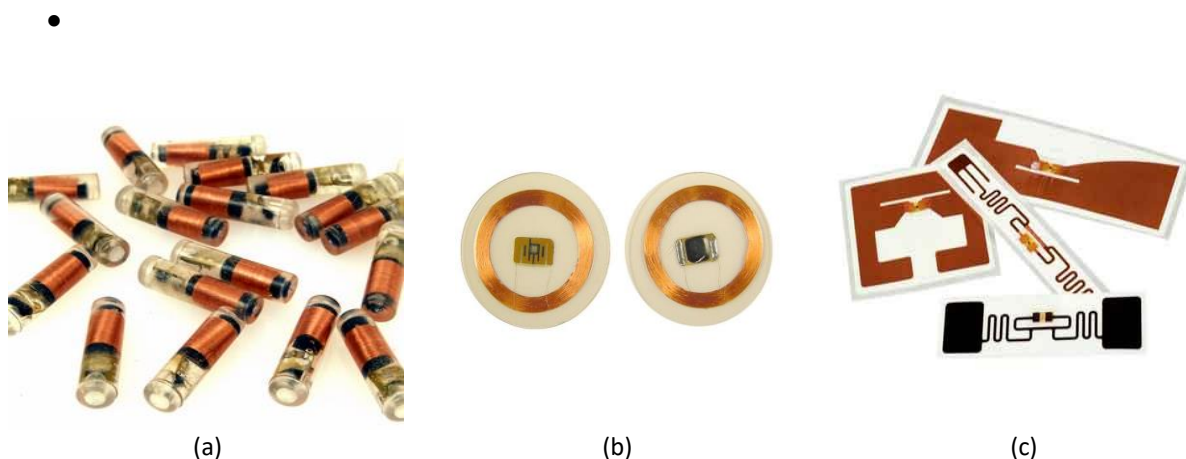


Figure I. 7 : Tag RFID (a) basses fréquences LF, (b) hautes fréquences HF et (c) ultra hautes fréquences

Le tag est une boucle reliée à une puce électronique, sur laquelle les données concernant l'objet à identifier sont stockées (Figure.I.7). Selon son alimentation, on distingue :

- Tag actif : il fonctionne comme un émetteur-récepteur radiofréquence. Son énergie provient d'une batterie d'où la possibilité de communication à grande distance. Les inconvénients sont le coût élevé et la durée de vie limitée des batteries.

Tag passif : il ne contient pas de batterie. L'énergie nécessaire pour son fonctionnement lui provient d'un couplage inductif avec l'antenne du lecteur. La distance de communication est donc limitée. il transmet les informations au lecteur via le principe de la modulation de charge.

L'interrogateur, ou le lecteur, est une carte électronique associée à un logiciel d'exploitation et reliée à une antenne. La carte s'occupe de la partie traitement des données à envoyer ou à recevoir du tag. Quant à l'antenne, elle émet un champ électromagnétique qui lui permet d'échanger des informations avec le tag par un lien RF (Figure. I.8) [I.10][I.11].

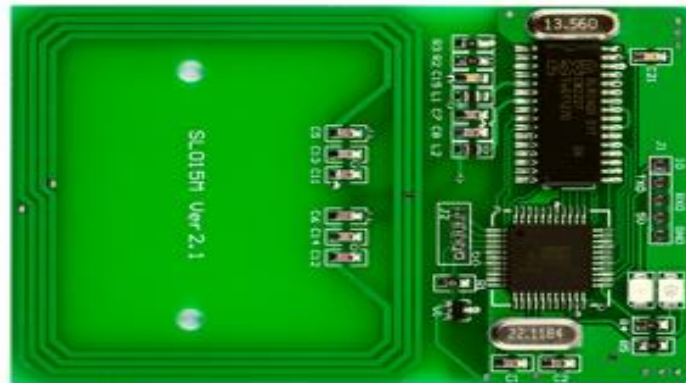


Figure I. 8 : Exemple de lecteur RFID HF (SL015M-3)

Le dialogue entre le lecteur et le tag se fait par un échange de données. Le lien de communication dépend de la bande de fréquence d'utilisation: LF/HF ou UHF. En LF et HF la communication entre les deux antennes du système RFID se fait par couplage magnétique. Le tag doit appartenir à la zone de champ proche de l'antenne du lecteur, cela entraîne une distance de communication limitée (<1m). En revanche en UHF, la distance de communication est plus grande (de 1m à 10m). Selon, le type d'application désirée, l'une des technologies RFID LF, HF ou UHF doit être employée [I.12][I.13]. Les caractéristiques des technologies sont reportées sur le tableau [I.1] :

Caractéristiques/fréquence	125 KHz (BF)	13.56 MHz (HF)	800 MHz (UHF)
Type de fréquence	Basse	Haute	Ultra Haute
Technologies antennaires	Bobines	Boucles imprimées ou gravées	Boucles imprimées ou gravée
Distance de détection	<1m	1m	1m à 10m
Influence de métal	Perturbation	Perturbation	Atténuation

Tableau. I. 2 : caractéristiques des technologies RFID

I.2.2. Contraintes sur le système étudié et normes

Le système de traçabilité proposé doit avoir avant tout un facteur de risque d'erreurs quasi nul, il doit apporter un gain sur le côté humain, santé et aussi sur un plan financier à longue durée pour la structure hospitalière. Le système d'identification associé aux instruments doit respecter quelques normes à savoir la puissance d'émission qui ne doit en aucun cas dépasser la bande de $-42\text{dB}\mu\text{Am}^{-1}$ autorisée par l'ISO (à une distance maximale de 10 m) pour éviter tout risque d'exposition du personnel à des débits d'absorption spécifique – DAS - assez élevés (la quantité de DAS tolérée ne doit pas dépasser 4Wkg^{-1} pour des fréquences allant de 10MHz à 300GHz) [I.14]. D'autre part, la stérilisation étant faite à une température assez élevée, le système doit être rigide et résister à ce niveau de température ainsi qu'à l'humidité et la pression. Une autre contrainte assez déterminante pour le système, c'est la possibilité de fonctionner en environnement métallique, compte tenue de la nature métallique des instruments chirurgicaux, ainsi que des boîtes les contenant. En effet, la technologie appliquée doit répondre aux critères et conditions de stérilisation des instruments :

➤ La stérilisation se fait en autoclave (134°C , 2 bars) : la solution doit conjuguer l'ergonomie, la résistance en autoclave et la fiabilité, tout en étant rapide, et n'engendrer qu'un faible cout additionnel. Nous recherchons une telle solution, de type automatisée et permettant un contrôle multiple (plusieurs instruments à la fois).

➤ Une seconde difficulté est liée aux propriétés physiques des instruments chirurgicaux et les bacs de stérilisations.

Ces derniers (Figure.I.9) sont fabriqués en inox grillagé. Nous pouvons soulever trois remarques :

- Le nombre d'instruments disposés en vrac est important et l'espace à contrôler est grand devant la taille des tags.
- L'omniprésence de l'inox, qui nous conduit intuitivement à chercher des solutions pour un fonctionnement à 13,56 MHz.
- La distance de lecture est de l'ordre de 5 à 10 cm (hauteur des bacs).



Figure I. 9 : bac de stérilisation

La difficulté technologique de cette solution est aussi liée aux instruments chirurgicaux (Figure.I.11). Les matériaux utilisés pour leur fabrication sont conformes à des normes nationales et internationales. Etant donné que la fonction de la plupart des instruments exige une solidité élevée, on utilise des aciers chromés avec une teneur en carbone faible à moyenne. La teneur en chrome est $> 12,5 \%$ car seule cette teneur permet de garantir une résistance à la corrosion suffisante.

Une des technologies présentées précédemment répond aux différents critères et contraintes fixés par le cahier des charges. Cette technologie est la donc RFID en haute fréquence (13.56 MHz) : résistance, possibilité de miniaturisation du tag, fonctionnement en présence du métal.... . Après ce choix de technologie, nous allons, désormais, associer le nom ARTIC (Application de la RFID à la Traçabilité des Instruments de Chirurgie) à la solution proposée dans ces travaux de thèse.

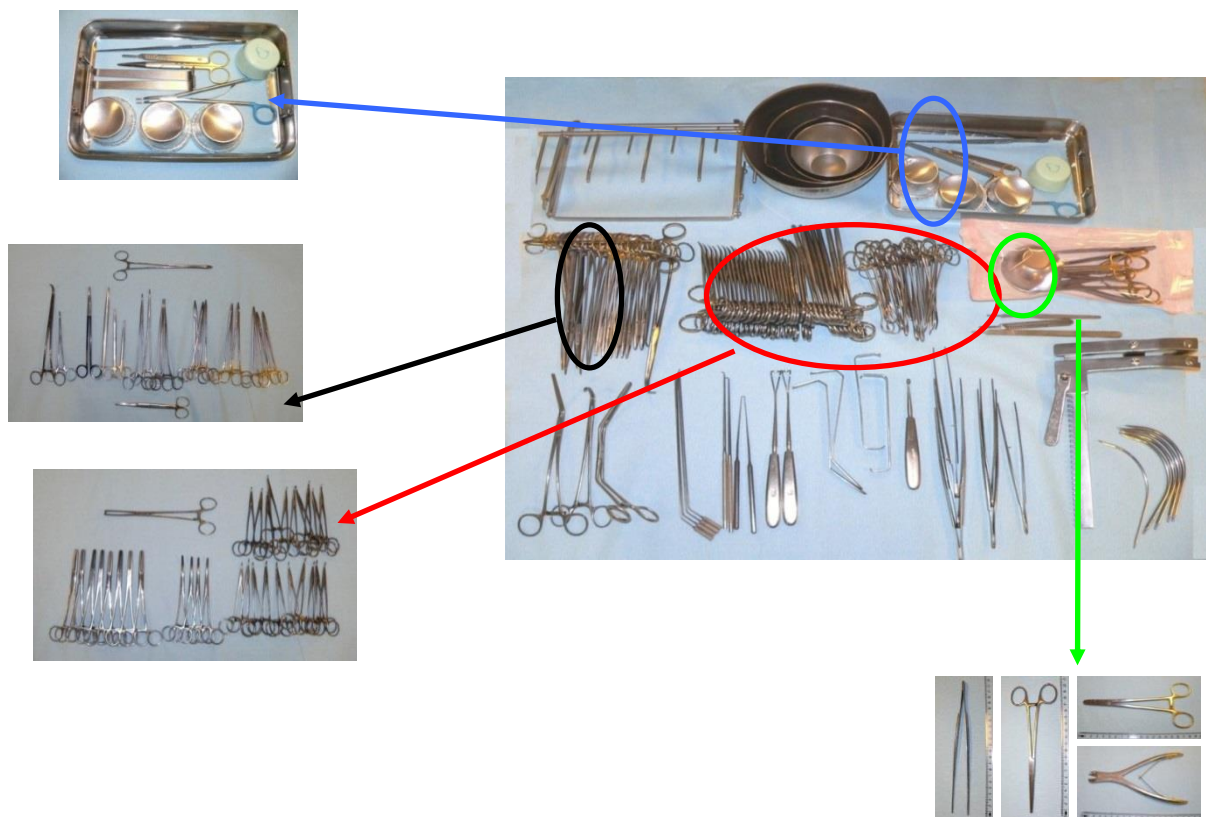


Figure I. 10 : Instruments chirurgicaux

I.2.3. Réorganisation de la structure hospitalière selon la solution RFID

Après avoir adopté la RFID par couplage magnétique comme une technologie efficace face aux exigences de notre système, nous allons dans cette partie présenter la nouvelle réorganisation de la structure hospitalière modèle présentée auparavant suite à l'adoption envisagée de cette technologie.

a. Au bloc opératoire

Un système d'identification à base de détecteurs sera mis en œuvre dans les blocs opératoires. En entrée de bloc, des portiques seront installés, le passage de chariot entre les portiques envoie un message automatique au logiciel utilisé qui renvoie le nombre de boîtes ou de sachets entrants. Ce premier portique contient des informations sur l'agenda de la journée et peut donc décider si le chariot va en salle d'opération ou en zone de stockage.

En entrée des salles d'opération, les portiques font le calcul des instruments qui entrent et ceux qui sortent de la salle pour éviter l'oubli des instruments. En zone de stockage les portiques ont pour rôle la gestion des stocks, ils donnent la localisation des boîtes à récupérer ou les positions où les placer (Figure. I.12).

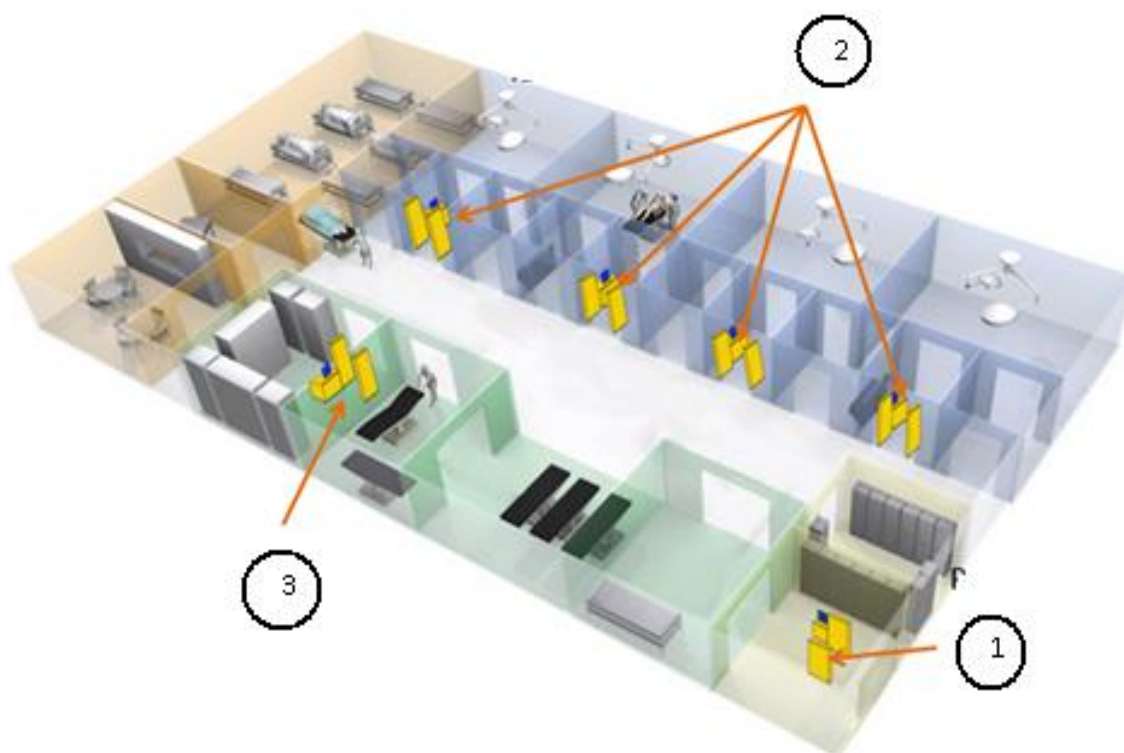


Figure I. 11 : Nouvelle structure proposée pour le bloc opératoire : portiques en entrée du bloc opératoire (1), salle de bloc opératoire (2), et stockage (3)

b. A la stérilisation

Le système de traçabilité proposé se poursuit en salle de stérilisation. Nous allons donc remplacer les tables de conditionnement par deux tables informatisées (en vert sur la Figure.I.10) où les instruments portant des puces ou des étiquettes peuvent être posés en quantité dans un panier issu du lavage. Le panier passe sur la table de conditionnement

équipée d'un tapis roulant : le passage du panier dans le système d'identification renvoie via un logiciel, le nombre d'instruments et l'identité de chacun des instruments ainsi que la boîte à laquelle il doit être associé. Ensuite, pour réorganiser les zones de stockage (en bleu sur la figure), chaque instrument ayant un identifiant doit être associé à une étagère numérotée dans la salle de stockage.

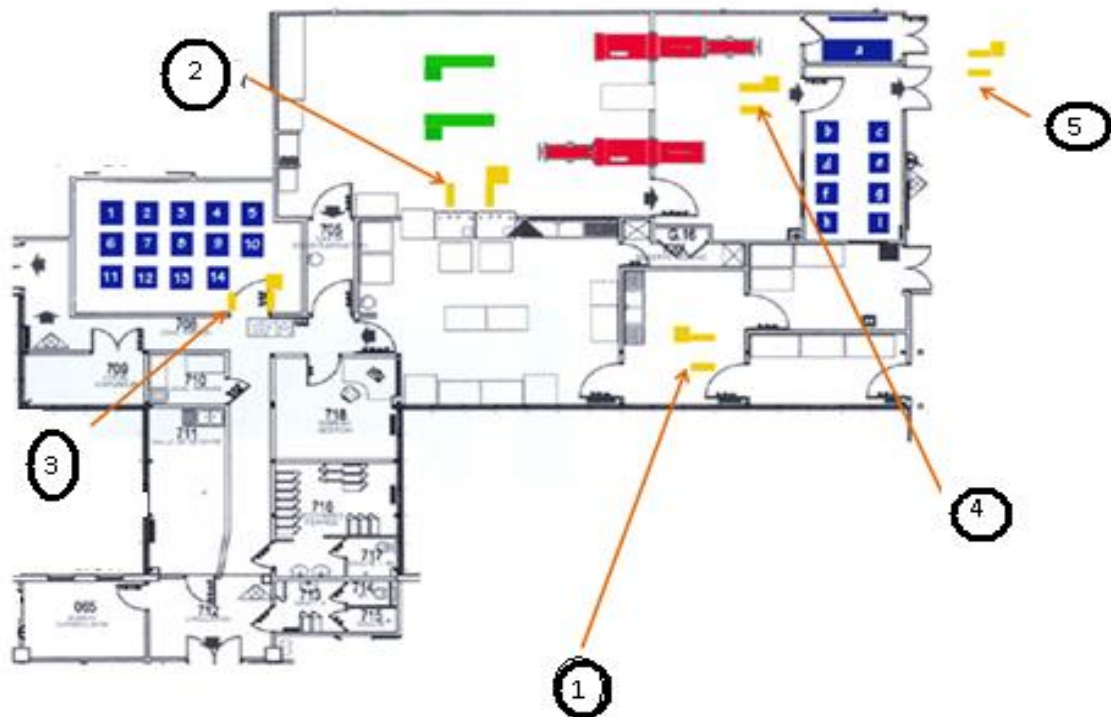


Figure I. 12 : Réorganisation de la stérilisation

Le système d'identification sera aussi renforcé par des portiques :

- Portique 1: sert de comparateur de nombres d'instruments qui entrent dans la salle de stérilisation et ceux qui sortent de bloc opération pour réduire le risque de perte ou d'oubli d'instruments.
- Portique 2: selon l'agenda de reconstitution, les portiques indiquent si les instruments doivent aller en conditionnement (selon le numéro de la table) ou en zone de stockage (selon la zone de stockage et l'étagère associé)
- Portique 3: indicateur du nombre d'instruments entrants et sortants, leur localisation dans la zone, ainsi qu'un rappel de l'étagère associée.
- Portique 4 : à la fin de la stérilisation, le portique indique si les instruments ont bien été stérilisés et donne accès à la zone de stockage.
- Portique 5 : portique de sortie des instruments qui vont vers le bloc opératoire où se fait le calcul du nombre d'instruments sortants

Pour conclure cette partie nous pouvons résumer ce que nous devons installer dans les deux zones bloc opératoire et stérilisation, dans le cas d'une structure hospitalière de taille moyenne servant d'établissement témoin:

- 17 portiques à installer.
- 2 tables de conditionnement
- 25 000 instruments à marquer
- 520 tags longues portées
- Un logiciel global à fournir

1.2.4. Intégration du système et marquage d'instruments

Après avoir fait une étude du fonctionnement de la structure hospitalière, nous avons proposé un plan d'action de mise en route de la traçabilité de leurs instruments.

Tout d'abord nous allons créer une fiche technique pour chaque instrument. Cette fiche sera associée automatiquement à son instrument par un logiciel d'aide à l'identification de l'instrument qui fonctionne par reconnaissance visuel de l'instrument (logiciel de reconnaissance photo). Pour se faire nous devons commencer par marquer tous les instruments de l'établissement. Cette étape est cruciale, nous devons marquer 25 000 instruments. La machine de marquage devra être capable aussi par l'intermédiaire d'une interphase de reconnaître le code de la puce, et d'associer ce code au fichier de l'instrument correspondant dans la base de données.

En parallèle de cette tâche, seront installés les éléments de traçabilité (détecteurs et autres). Selon l'offre choisie par l'établissement, un logiciel de modélisation des flux doit déterminer les endroits où l'on devra installer les détecteurs et systèmes de traçabilité. Lors de cette installation, on installera aussi le logiciel de traçabilité associé à l'offre proposée. Ce logiciel devra soit s'adapter aux logiciels existants soit remplacer le logiciel existant. Pour ce faire il faudra vérifier si le matériel de l'établissement est fonctionnel au niveau de sa compatibilité avec le système d'identification. Ce logiciel ne doit pas interférer lors de son installation avec le système déjà en place dans l'établissement, mais il doit venir l'accompagner pour peu à peu le remplacer.

Un second travail est de marquer les boites sachets et plateaux, à l'aide des tags longues portées (520 tags à installer sur les boites et rentrer leurs noms dans le logiciel d'identification). Il faut ensuite réorganiser les zones de stockage et installer les portiques de détections avec leur système de lecture (17 portiques à installer et leur écran de contrôle, avec les systèmes de suivi dans les zones de stockage (3 zones de stockages)).

La dernière étape de la mise en place de la solution d'identification automatique est l'installation des tables de conditionnement. Cet élément est primordial pour la zone de stérilisation et ce système de traçabilité présente l'avantage principal: reconstitution semi-automatique des boîtes (deux tables de conditionnement avec le système de lecture adapté). Pour finir le personnel de la stérilisation sera formé sur l'utilisation du système de traçabilité.

I.2.5. Récapitulatif du mode technique ARTIC

Le projet ARTIC, Application de la RFID à la Traçabilité des Instruments de Chirurgie, qui a servi de guide/contexte pour ces travaux de thèse, concerne la mise en œuvre de la solution de traçabilité proposée précédemment. La solution représente potentiellement un gain de temps, une amélioration des procédures suivies, et une réduction de coûts mais sa mise pratique exige de relever des verrous techniques.

Les objectifs du projet sont alors fixés de manière à satisfaire les critères énumérés :

- Démontrer et valider la faisabilité de la solution de traçabilité de type RFID HF avec les contraintes définies par le projet, notamment la miniaturisation du « tag ».
- Analyser et valider l'influence de l'environnement électromagnétique, en particulier l'acier inoxydable des instruments de chirurgie, sur les performances de détection du système RFID.
- Analyser la stabilité et caractériser la résine polymère servant à l'encapsulation.

La réalisation de ces objectifs entraîne des interactions de domaines importantes, de l'électromagnétisme à la science des matériaux, et pose également des verrous technologiques:

1. Prototyper de manière effective le système RFID, composé du lecteur (module et antenne) et de l'identifiant « tag » (puce et antenne), et s'assurer de la compatibilité avec la méthode de fixation des « tags » sur un support métallique (les instruments).
2. Tester et valider expérimentalement ce prototype en présence des instruments chirurgicaux.
3. Mettre au point la résine polymère résistante aux cycles de stérilisation (autoclavage)
4. Encapsuler de manière effective les « tags » sans altérer leur détection
5. Identifier des possibilités d'amélioration de la méthode de fixation en fonction des considérations d'ordres ergonomiques et sanitaires.
6. Évaluer l'impact de l'environnement métallique et proposer une adaptation du système RFID à ce type de contrainte.

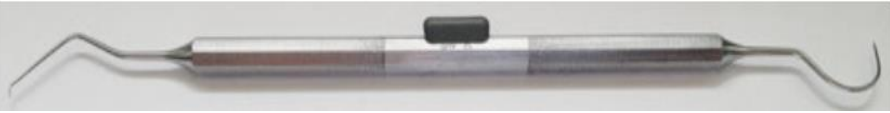

Les objectifs du projet ARTIC sont étudiés par un consortium qui regroupe des compétences en électromagnétisme, électronique/micro-électronique (L2S-DRE, ESYCOM), et la science des matériaux (ARMINES-DTPCIM). Le transfert technologique vers le secteur hospitalier, est assuré via EURASANTE et M. Sergeant. Dans ce rapport de thèse, notre étude est exclusivement consacrée à la partie antennaire du prototype RFID (points 1, 2 et 6 précédents de la liste des verrous technologiques).

I.3 Etat de l'art des solutions existantes sur le marché

Les risques et dégâts causés par les problèmes de stérilisation cités précédemment ont motivé les chercheurs et industriels à proposer des solutions [I.15][I.16][I.17][I.18][I.19][I.20]. Nous avons consacré une partie du travail bibliographique à l'analyse de ces différentes solutions sachant qu'aucune de ces solutions n'a été largement appliquée pour la stérilisation des instruments chirurgicaux plus particulièrement en France. La méthode d'automatisation de la traçabilité des instruments chirurgicaux en utilisant de la RFID a déjà été envisagée et testée mais il y a une grande disparité des modalités de mise en œuvre (fréquence de communication, puces sélectionnées, conception d'antennes, méthode de fixation, ergonomie et mise en œuvre du contrôle...). La diversité des produits RFID et leurs optimisations (objets de nos recherches) nous permettent d'explorer de nouvelles solutions, dans le même domaine, et de considérer que des verrous technologiques sont encore présents et que le potentiel de la solution est toujours important. Pour cette partie de travail nous avons fait une sélection de quelques-unes des solutions proposées par d'autres équipes de recherche. Le récapitulatif des solutions est développé dans le tableau I.2.

I.4. Conclusion du chapitre I

Dans le cadre des travaux menés dans cette thèse, nous travaillons sur le système de traçabilité en stérilisation, plus exactement lors du conditionnement. Notre objectif est d'identifier tous les types d'instruments grâce à la technologie RFID HF. Les tables de conditionnement seront associées à des antennes lecteurs de tailles assez grandes dont le but est de pouvoir identifier des petits tags associés à chaque instrument. Dans ce premier chapitre, nous avons identifié les lacunes dans le système de traçabilité actuelle dans les structures hospitalières. Par la suite nous avons présenté notre solution d'automatisation de la traçabilité des instruments chirurgicaux en utilisant la technologie RFID par couplage magnétique. Par ailleurs, l'application de cette technologie entraîne des verrous technologiques à lever. Ces verrous sont identifiés et seront développés dans les prochains chapitres, en particulier la difficulté d'identifier plusieurs instruments en même temps et en vrac (tags nombreux et dans des positions quelconques les uns par rapports aux autres), la difficulté de reconnaître des tags de dimensions nettement inférieures à celles du lecteur (instruments vs tables), et enfin assurer le fonctionnement du système dans un environnement métallique perturbateur.

Projet/Nom	Technologie Utilisée	Résultats aboutis
SATYAtek En collaboration avec la Section de Médecine dentaire (SMD) de l'Université de Genève (UNIGE) et la Stérilisation centrale des Hôpitaux Universitaires Genevois (HUG)	Traçabilité des instruments dentaire en utilisant la technologie RFID à 125kHz : tag RFID collé ou intégré dans le manche des instruments	<ul style="list-style-type: none"> - contrôle automatique des instruments marqués par RFID et reconnaissance visuelle au moyen de photos d'instruments non marqués. - identification des boîtes par RFID - génération automatique d'un rapport de chargement et archivage. - détection à 100% dans le tunnel
 (a)	 (b)	

Projet/Nom	Technologie Utilisée	Résultats aboutis
Caretag	→Suivi des instruments chirurgicaux →RFID UHF	Caretag Surgical développe des logiciels et des étiquettes pour des équipements chirurgicaux et autres équipements hospitaliers. Leurs prototypes sont proposés aux clients mais le détail de la technologie n'est pas donné sur leur site web.



Figure I. 14 : instrument tagué

Figure I. 13 : instruments tagué : tag collé (a) et tag intégré (b)

Tableau. I. 2 : Etat de l'art des solutions de traçabilité des instruments chirurgicaux

I.5. Bibliographie du chapitre I

- [I.1] Jean LANGLOIS, « Rapport adopté lors de la session du Conseil national de l'Ordre des médecins du 30 juin 2000 »
- [I.2] Documents Marc Antoine « porteur du projet ARTIC »
- [I.3] D. Paret. « Identification Radio-Fréquences et Cartes à puce sans contact ». Dunod, Paris, 2000.
- [I.4] K. Finkenzeller. "RFID handbook, fundamentals and applications in contactless smart cards and identifications". 2nd ed., John Wiley and Sons, 2003.
- [I.5] G.A.Theile, W.L.Stutzman, "Antenna Theory and Design", third Edition, , 2013, p. 42
- [I.6] Jeanne Baylot, « ABC de la RFID », Décembre 2003
- [I.7] FAUGERAS Isabelle, « Couplage inductif multi-antennes: application au transfert d'énergie et d'informations pour un dispositif d'identification radiofréquence », 1999
- [I.8] C. Zierhofer, E. Hochmair, "Geometric approach for coupling enhancement of magnetically coupled coils". IEEE transactions on Biomedical Engineering, pp.708-714, 1996.
- [I.9] C. Reinhold, P. Schohl, W. John, U. Hilleringmann. Efficient antenna design of inductive coupled RFID-system with high power demand. Journal of communication, Vol.2, NO.6, , pp.14-23, November 2007.
- [I.10] C. Liu, Y. Dong. Resonant coupling of a passive inductance-capacitance-resistor loop in coil-based sensing system. IEEE sensors journal, Vol, 12, NO. 12. pp.3417-3423, 2012
- [I.11] E. WAFFENSCHMIDT. Homogeneous Magnetic Coupling for free positioning in inductive wireless power system. IEEE journal of emerging and selected topics in power electronics, Vol. 3, NO. 1, pp.226-233, 2015
- [I.12] M. Grzeskowiak, A. Diet, P. S. Diao, S. Protat, C. Bourcier, Y. Le Bihan, G. Lissorgues. Pebbles Tracking Thanks to RFID LF Multi-loops Inductively Coupled Reader. Progress In Electromagnetics Research, PIER C, ISSN: 1937-8718, Vol. N°55, pp. 129-137, 2014.
- [I.13] Zhen Zhang, K. T. Chau, Chunhua Liu¹, Fuhua Li, and T. W. Ching, "Quantitative Analysis of Mutual Inductance for Optimal Wireless Power Transfer via Magnetic Resonant Coupling", IEEE Transactions on Magnetics, Vol.50, No.11, 2014.
- [I.14] S. Hackl, C. Lansch"utzer, P. Raggam, W.L. Randeu, "A Novel Method for Determining the Mutual Inductance for 13.56MHz RFID Systems", Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing, pp. 297-300, 2008.
- [I.15] <http://www.haldor-tech.com/>
- [I.16] <https://www.wirelessintegrated.com/>
- [I.17] <http://www.xerafy.com/>
- [I.18] <https://www.keysurgical.com/>
- [I.19] <http://www.satyatek.com/>
- [I.20] <http://www.caretagsurgical.com/>

Chapitre II:

Communication en champ proche

Tout conducteur parcouru par un courant alternatif génère un champ électrique et un champ magnétique dont les intensités varient en fonction de la distance selon le point de mesure ou d'observation, conformément à leurs distributions vectorielles définies par les équations de Maxwell. Ce conducteur peut alors être considéré comme une antenne (dispositif rayonnant). Selon la distance et la fréquence, on distingue trois zones de fonctionnement des antennes : la zone proche, la zone de transition et la zone lointaine. Les communications en champ proche utilisent le couplage magnétique (phénomène d'induction mutuelle). Toutefois, les dimensions des antennes sont directement liées à la fréquence de travail, à travers une dimension physique appelée la longueur d'onde. Dans le cas des applications RFID HF, les boucles d'émission et celles de réception ont des rapports de taille importants. Les dimensions de l'antenne du lecteur sont grandes pour maximiser le champ magnétique qu'elle génère, tandis que les dimensions de l'antenne du tag sont petites (pour que le tag puisse être intégré aux objets à identifier). La distribution des lignes de champ est générée selon l'orientation vectorielle du champ magnétique et la surface effective du tag. Des zones de communication privilégiées existent alors entre le lecteur et le tag (passif). Dans ce chapitre nous allons développer toutes les grandeurs physiques qui caractérisent les antennes d'une communication en champ proche pour évaluer leurs dégradations en fonction des caractéristiques des antennes d'émission et de réception ainsi que la distance entre elles. Pour compenser la différence de tailles entre l'antenne du lecteur et celle du tag, nous allons proposer des structures multi-boucles dans le but d'avoir un niveau de couplage élevé et réparti sur toute la surface de la boucle du lecteur. En partant d'une structure électrique simple du système RFID HF : une boucle pour le lecteur et un seul tag, nous allons progressivement modéliser électriquement un système multi-boucles (lecteur) et multi-tags. Les phénomènes de décalage des fréquences d'accord seront introduits et des formules de calcul d'impédances équivalentes des différents systèmes seront développées.

II.1. Principe physique de la communication RFID :

Un système de communication sans fil comprend un ensemble d'éléments d'émission et de réception visant à transformer un signal électrique en un signal électromagnétique et inversement. La circulation du courant dans l'antenne génère un rayonnement électromagnétique. A la réception, l'antenne reçoit ce rayonnement (induction) et le transforme en un signal électrique, qui sera interprété et/ou utilisé pour récupérer de l'énergie dans le cas d'une télé-alimentation. Si l'on s'intéresse à la partie radio de cette chaîne de communication, cela revient à étudier le rayonnement électromagnétique de l'antenne d'émission. Les équations de propagation d'une onde formée par un champ électrique et magnétique sont données par les équations de Maxwell. La résolution de ces équations nous permet d'exprimer les composantes vectorielles des champs en tout point de l'espace [II.1-II.6].

En champ proche, les antennes RFID de l'émetteur et du récepteur sont généralement des boucles de forme circulaire ou rectangulaire avec des pistes en cuivre (en HF). Dans la première partie de ce chapitre le système étudié est constitué d'une seule antenne émettrice. Dans ce cas, dans tout l'espace incluant le point d'observation, seul le champ généré par cette boucle existe (Figure II.1.a). En revanche, si l'on se place dans le cadre des communications en champ proche, le système est constitué de deux antennes, on parle alors d'un phénomène de couplage magnétique entre les deux boucles grâce à l'induction magnétique. Pour le modéliser physiquement, nous allons étudier le couplage inductif entre deux boucles (contours fermés) C_1 et C_2 , traversées respectivement par des courants I_1 et I_2 (Figure II.1.b).

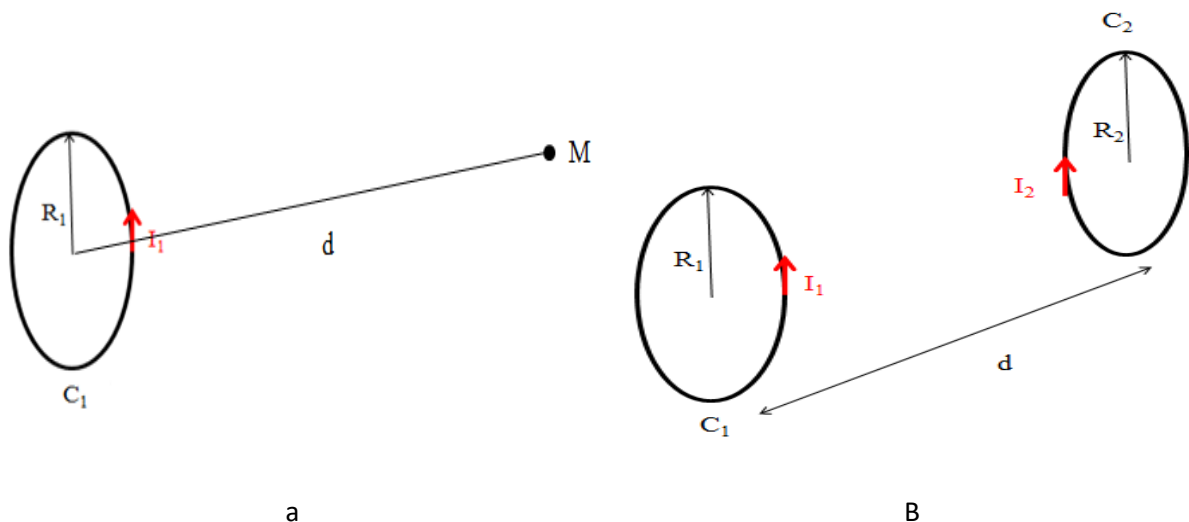


Figure II. 1 : Une boucle émettrice (a) et communication en champ proche entre deux boucles (b)

A. Champ magnétique

Le champ magnétique généré par une boucle circulaire dépend à la fois de l'intensité du courant, de la géométrie de l'antenne et de la distance du point d'observation (de calcul). Dans cette partie, nous supposons que le point d'observation est sur l'axe du centre de

l'antenne (boucle C_1) et nous partons de l'expression de la composante du champ magnétique sur l'axe pour évaluer l'influence de sa dimension (son rayon R_1) ainsi que la distance « d » entre l'antenne et le point d'observation [II.7-II.10].

$$H = \frac{NI}{2} \frac{R_1^2}{\sqrt{(R_1^2 + d^2)^3}} \quad \text{II.1}$$

Où :

- « R_1 » : est le rayon de l'antenne C_1
- « d » : est la distance entre l'antenne C_1 et le point d'observation.
- « I » : est l'intensité de courant qui traverse C_1
- « N » : est le nombre de tours de l'antenne C_1

Pour un nombre de tours fixe ($N=1$ tour) et une intensité de courant $I=1A$, nous avons tracé sur la figure.II.2 l'évolution du champ magnétique généré par l'antenne C_1 en fonction de sa taille R_1 et de la distance « d ». Les deux boucles sont ici coaxiales et dans une configuration dite parallèle, c'est-à-dire que leurs surfaces effectives sont comprises dans des plans parallèles. Le phénomène d'induction magnétique repose alors sur les composantes du champ normales à ces deux plans.

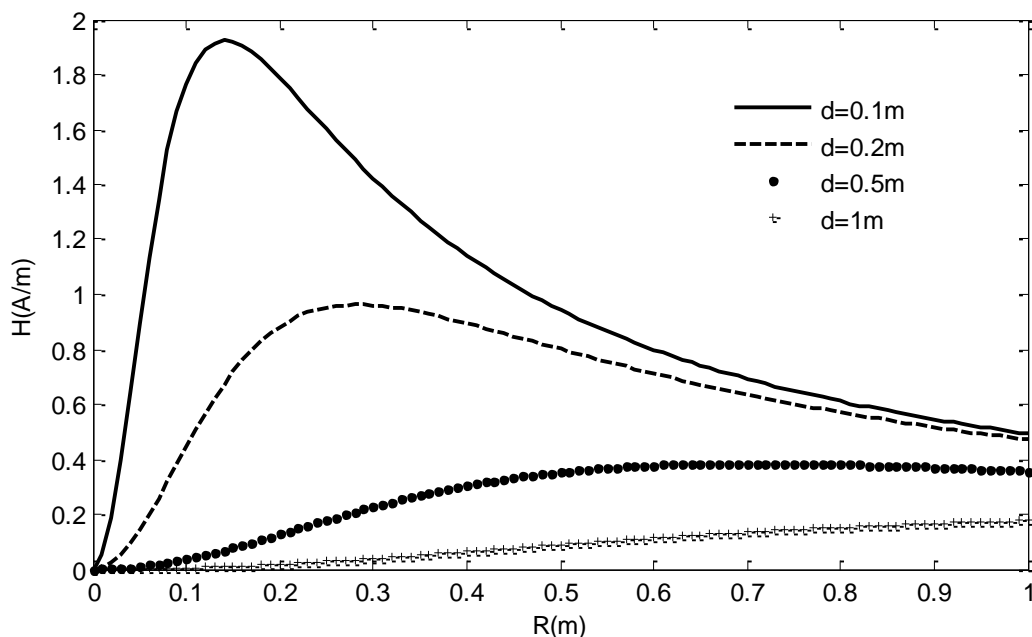


Figure II. 2 : *Champ magnétique en fonction du rayon de la boucle*

Pour des distances faibles ($<0.5m$) le champ sur l'axe (champ normal au plan de la boucle) est élevé pour une boucle de rayon $R_1 = R$ compris entre $0.1m$ et $0.3m$. Cette composante décroît très rapidement avec l'augmentation du rayon. En revanche, à grande distance ($d>0.5m$), le champ magnétique augmente avec l'augmentation du rayon (pour des rayons compris entre $0.1m<R<0.6m$), il atteint une valeur maximale à $R=0.6m$ qu'il maintient

jusqu'à $R=0.85m$ puis se dégrade à nouveau. En résumé, la composante normale du champ magnétique se dégrade avec l'augmentation de la distance (Biot-et-Savart), et atteint un maximum pour des rayons de boucles comparables à la distance fixée .

B. Inductance mutuelle :

Dans le cas du système de la figure.II.1.b (système à deux boucles), la boucle C_1 génère un champ magnétique à travers la boucle C_2 . L'influence d'une boucle sur l'autre peut être évaluée à l'aide de l'inductance mutuelle. Ce paramètre relie le flux capté par la boucle 2 et le courant qui circule dans la boucle 1 (réciproque dans le cas des systèmes passifs). Elle s'exprime par la formule de Neumann [II.7-II.10]:

$$M_{12} = \frac{\mu_0}{4\pi} \oint_{C_1} \oint_{C_2} \frac{\vec{dl}_1 \cdot \vec{dl}_2}{d} \text{ (Henry)} \tag{II.2}$$

Le même phénomène peut se traduire de la boucle 2 vers la boucle 1 : $M_{12}=M_{21}$.

Sur la Figure.II.3, nous avons tracé la variation de l'inductance mutuelle en fonction des rayons des boucles C_1 et C_2 et de la distance entre elles.

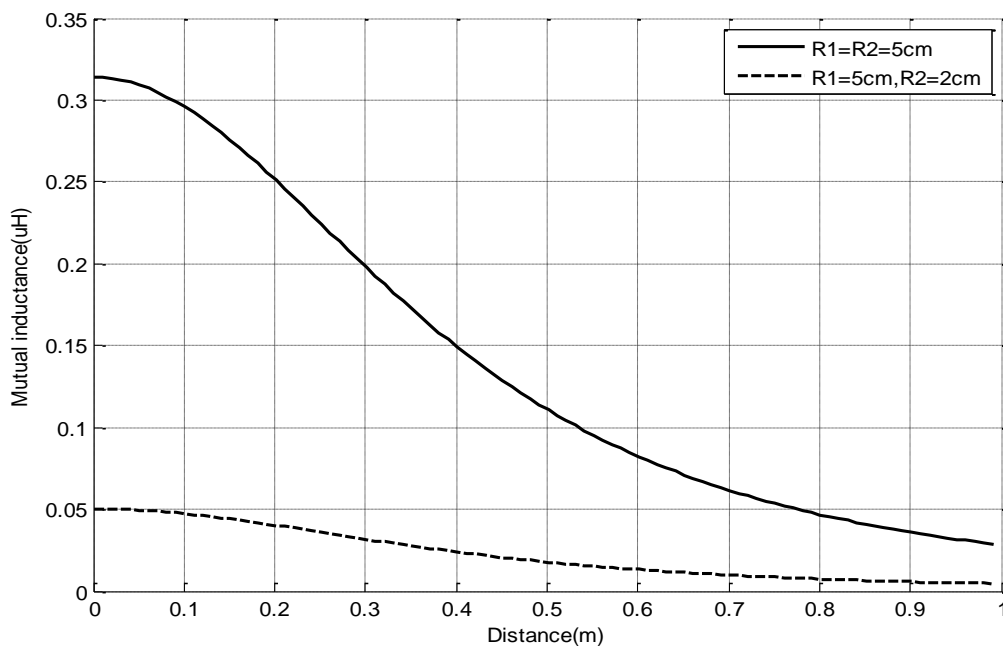


Figure II. 3: inductance mutuelle en fonction des rayons R_1 et R_2 des boucles C_1 et C_2 et de la distance entre elles

D'après la formule analytique de l'inductance mutuelle (formule de Neumann), le champ capté par une boucle dépend du champ généré par l'autre boucle (le champ magnétique est proportionnel à l'intensité de courant qui traverse la boucle). L'inductance mutuelle est donc maximale théoriquement quand les deux boucles sont à une distance nulle et de dimensions égales et coaxiales. Dans ce cas, tout le champ généré par la boucle 1

est capté par la boucle 2 et inversement. A une distance non-nulle, l'augmentation du rayon à une valeur optimale permet de générer des composantes normales qui augmentent le flux (si la distance entre elles est comparable à leurs tailles). A grande distance, l'inductance mutuelle décroît fortement, comme cela peut être exprimé grâce à la loi de Biot-Savart. Pour deux boucles de rayons très différents, l'inductance mutuelle est faible malgré la concentration et la faible distance entre elles. La distance entre les deux boucles n'est donc pas le seul facteur déterminant pour le couplage : la taille relative des boucles en est un autre.

Synthèse :

L'étude du couplage inductif faite dans cette première partie du chapitre II concerne un système champ proche entre une antenne émettrice et une antenne réceptrice. Nous avons étudié le lien entre le champ magnétique et les tailles d'antennes ainsi que la distance entre elles. A partir de cette première étude nous avons montré la dégradation du couplage magnétique pour des antennes ayant un rapport de taille élevée. Cette dégradation va être compensée par des structures d'antenne lecteur multi-boucles. D'autre part, nous avons défini les paramètres de couplage inductif : inductance mutuelle et champ magnétique. Ces paramètres sont en rapport avec la géométrie des boucles du lecteur et du tag et ils seront utilisés par la suite pour comparer les performances des différentes structures. En environnement réel, le système que nous proposons doit fonctionner pour la détection de plusieurs petits-tags comme expliqué dans le chapitre I. Dans la partie qui suit, nous allons développer des modèles électriques des structures multi-boucles du lecteur (des boucles du lecteur avec des résonateurs) et multi-tags (cas de la détection de plusieurs tags).

II.2. Modélisation électrique du système RFID

La RFID en LF (Low Frequency, 125 kHz) et HF (High Frequency, 13.56 MHz) est basé sur le principe de la modulation de charge, grâce au lien physique bidirectionnel créé par le couplage inductif entre la boucle du lecteur et celle du tag. Dans cette partie, nous nous intéressons à la partie antennaire du système RFID en se basant sur le modèle électrique équivalent.

II.2.1. Environnement une boucle de lecteur et un tag :

Electriquement, une antenne boucle est modélisée par une bobine traversée par un courant. Pour que le système puisse fonctionner de manière optimale à une fréquence donnée, une capacité d'accord doit être associée en série ou en parallèle avec la bobine. La communication entre l'antenne du lecteur et celle du tag se fait par couplage inductif [II.10-II.15].

Soit un système RFID, à une boucle lecteur et un tag modélisées respectivement par deux inductances (L_1 , L_2) à faibles pertes (r_1 , r_2) mises en série avec des capacités d'accords (C_1 , C_2) à 13.56 MHz (Figure. II.4). R_L représente la charge.

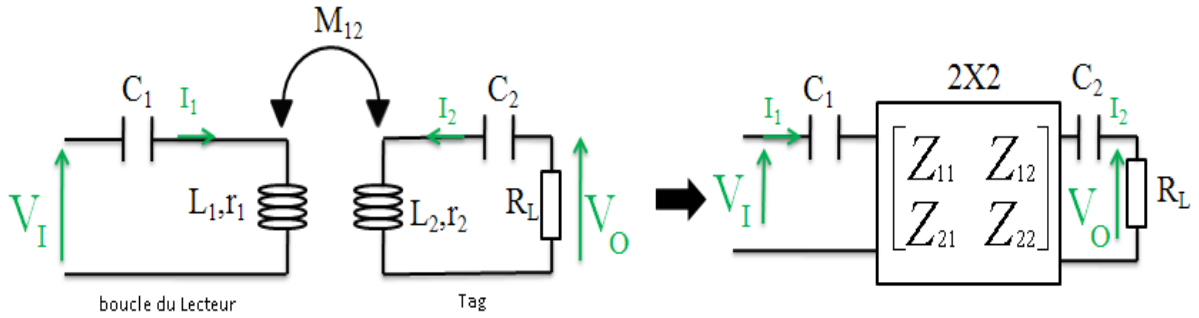


Figure II. 4 : Modèle électrique d'un système à une boucle du lecteur et un tag

Les tensions aux bornes de la boucle du lecteur et du tag s'expriment comme suit :

$$\begin{aligned}
 V_I &= Z_{11}I_1 + Z_{12}I_2 = (j\omega L_1 + r_1 + \frac{1}{j\omega C_1})I_1 + j\omega M_{12}I_2 \\
 V_O &= Z_{21}I_1 + Z_{22}I_2 = j\omega M_{21}I_1 + (j\omega L_2 + r_2 + \frac{1}{j\omega C_2})I_2
 \end{aligned}
 \tag{II.3}$$

Où:

- $M_{12}=M_{21}$: l'inductance mutuelle entre les deux circuits.
- r_1 et r_2 : respectivement, les résistances internes des boucles du lecteur et tag
- R_L : impédance de charge

Le système boucle du lecteur-tag utilisé dans cette étude a les caractéristiques électriques du tableau III.1. Ces valeurs ont été choisies pour pouvoir faire un prototype pour la suite.

Symbole	Quantité	Valeur
L_1	Inductance de la boucle du lecteur	0.3 μ H
L_2	Inductance de la boucle du tag	0.058 μ H
C_1	Capacité d'accord de la boucle du lecteur	0.45 nF
C_2	Capacité d'accord de la boucle du tag	2.32nF
r_1	Résistance interne de la boucle du lecteur	0.4mOhm
r_2	Résistance interne de la boucle du tag	0.07mOhm
freq	fréquence	13.56MHz

Tableau. II. 2: Propriétés électriques du système une boucle du lecteur et un tag

Dans les systèmes de transmission sans fil, la distance entre les deux antennes et leurs tailles sont déterminées par l'application désirée. Dans le cas des communications en champ proche, la distance est cependant généralement supérieure aux dimensions des antennes. D'autre part, la taille des antennes réceptrices (tag) est très réduite en comparaison de celle de l'émission. Le coefficient qui permet de quantifier le couplage d'un tel système est compris entre 0 et 1 et donné par :

$$K_{12} = \frac{M_{12}}{\sqrt{L_1 L_2}}$$

II.10

Où :

- $K_{12} = 1$ correspond à l'optimum : toutes les lignes de champ d'une boucle interceptent l'autre boucle (couplage parfait).
- $K_{12} = 0$ correspond au cas où aucune des lignes de champ de la boucle 1 n'atteint la boucle 2 (aucun phénomène d'induction).

Physiquement, les différentes valeurs de K_{12} comprises entre 0 et 1 renvoient à la position du tag par rapport à la boucle du lecteur, sachant que $K_{12} = 1$ est le cas où les deux antennes sont confondues, et ce cas est réellement inexistant.

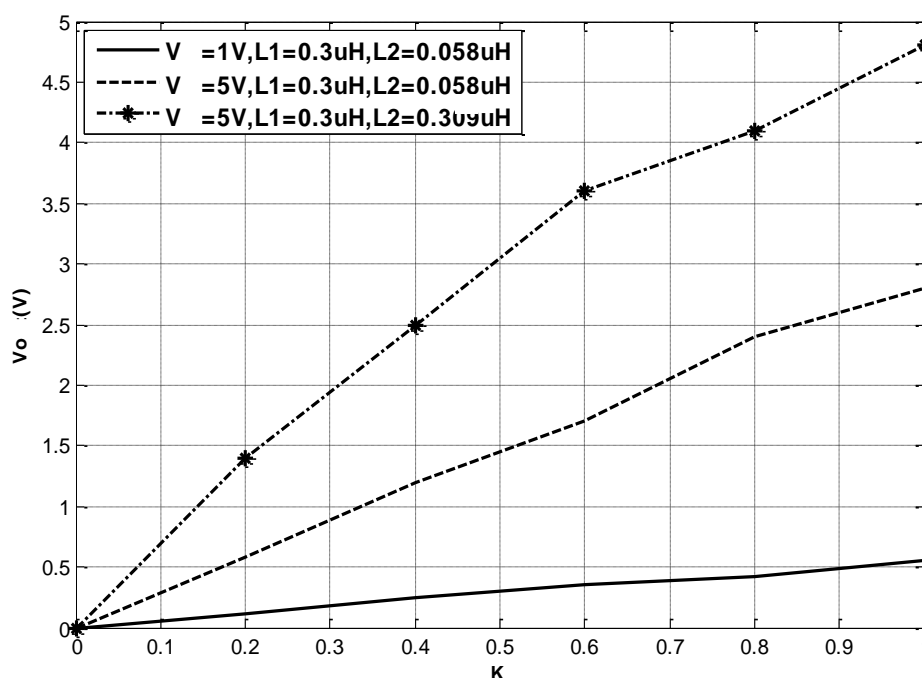


Figure II. 5 : Tension aux bornes de la charge pour différentes valeurs de la tensions du lecteur et pour différentes valeurs d'inductances du tag

Le schéma électrique de la figure II.5 est simulé à l'aide du logiciel ADS (Advanced Design System). Nous traçons, sur la figure. II.5 la variation de la tension aux bornes de la charge ($R_L = 1\text{K}\Omega$) du tag en fonction de la tension du lecteur. Sur ADS, le couplage est évalué par le coefficient de couplage K_{12} noté K dans le logiciel. La valeur de la tension aux bornes de la charge dépend de la tension d'alimentation de la boucle du lecteur. L'augmentation de V_1 entraîne l'augmentation de la tension aux bornes de la charge pour toutes les valeurs de K comprises entre 0 et 1. Ce dernier est donc décisif en termes d'efficacité de transmission du système. Pour une valeur maximale de $K=1$ ($V_1 = 1\text{ V}$ ou 5 V et $L_2 = 0.058\text{ uH}$), la tension aux bornes de la charge est presque égale à la moitié de la tension

émise ($V_o=0.55$ V, $V_o=2.7$ V).

II.2.2. Environnement multi-boucles du lecteur et un tag

Dans cette partie, nous allons étudier l'influence de l'ajout de résonateurs sur la partie antennaire du lecteur. Le résonateur est un circuit LC qui reçoit de l'énergie par couplage avec la boucle du lecteur.

A. Cas deux boucles du lecteur

L'ajout d'un résonateur transforme la matrice impédance en une matrice d'impédance équivalente [II.15-II.21]. De nouveaux termes de couplages entre les boucles du lecteur-résonateur et résonateur-tag apparaissent. Electriquement la boucle du lecteur est accordée à la fréquence de résonance de 13.56 MHz (Figure. II.6).

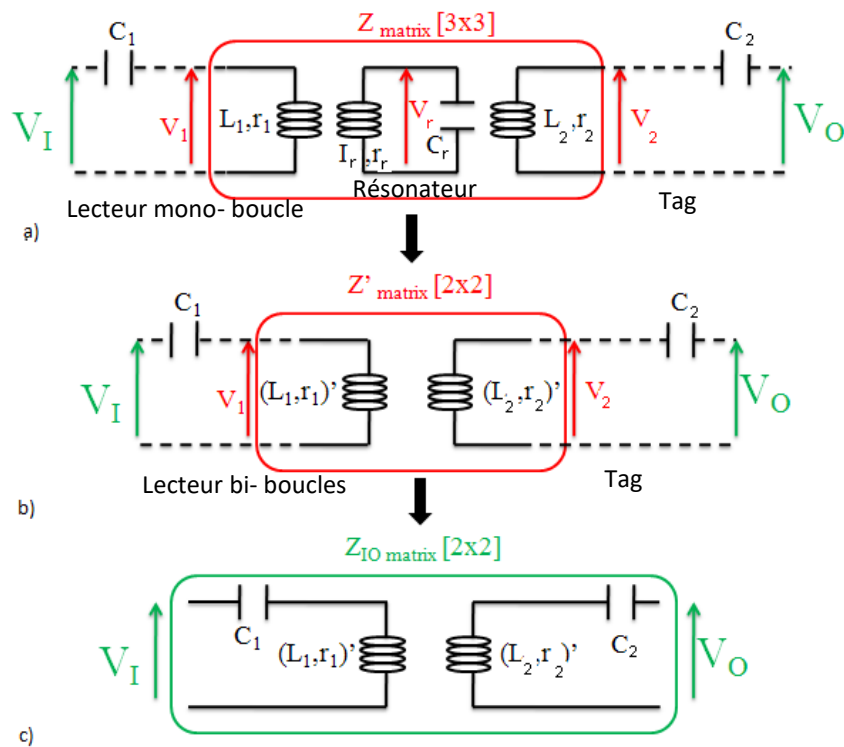


Figure II. 6 : *Circuit équivalent du système lecteur bi-boucle et tag*

D'après les schémas équivalents successifs de la figure II.6, les tensions V_1 , V_r et V_2 sont exprimées comme suit :

$$\begin{pmatrix} V_1 \\ V_r \\ V_2 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{1r} & Z_{12} \\ Z_{r1} & Z_{rr} & Z_{r2} \\ Z_{21} & Z_{2r} & Z_{22} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} I_1 \\ I_r \\ I_2 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} r_1 + j\omega L_1 & j\omega M_{1r} & j\omega M_{12} \\ j\omega M_{r1} & r_r + j\omega L_r & j\omega M_{r2} \\ j\omega M_{21} & j\omega M_{2r} & r_2 + j\omega L_2 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} I_1 \\ I_r \\ I_2 \end{pmatrix} \quad (II.4)$$

Où : L_1 , L_r and L_2 sont respectivement les inductances propres des boucles du lecteur, du résonateur et du tag ; r_1 , r_r et r_2 leurs résistances internes respectives ; C_1 , C_r et C_2 sont alors les capacités d'accord. Les termes d'inductances propres et d'inductances mutuelles sont définis ainsi par : $L_i = \frac{\text{im}(Z(i,i))}{2\pi f}$, $M_{ij} = \frac{\text{im}(Z(i,j))}{2\pi f}$

D'autre part, la tension V_r est la tension aux bornes de la capacité C_r du résonateur et peut s'exprimer par :

$$V_r = \frac{j I_r}{C_r \omega} \quad (11.5)$$

Le courant I_2 est donc donné par :

$$I_r = -\frac{j\omega M_{1r}}{\alpha} I_1 - \frac{j\omega M_{r2}}{\alpha} I_2 \quad (11.6)$$

α est l'impédance du résonateur :

$$\alpha = r_r + \left(j\omega L_r + \frac{1}{j\omega C_r} \right) \quad (11.7)$$

Le système d'équations est réduit alors à deux équations :

$$\begin{aligned} V_1 &= (r_1 + j\omega L_1)I_1 + j\omega M_{12}I_2 - j\omega M_{1r} \left(\frac{j\omega M_{1r}}{\alpha} I_1 + \frac{j\omega M_{r2}}{\alpha} I_2 \right) \\ V_2 &= j\omega M_{21}I_1 + (r_2 + j\omega L_2)I_2 - j\omega M_{2r} \left(\frac{j\omega M_{1r}}{\alpha} I_1 + \frac{j\omega M_{r2}}{\alpha} I_2 \right). \end{aligned} \quad (11.8)$$

Les rapports $\frac{V_i}{I_i}$ (sous conditions de charge) déterminent les éléments de la matrice impédance équivalente Z' (Figure. 11.6) avec :

$$\begin{aligned} Z'_{11} &= r_1 + \frac{\omega^2 M_{r1}^2}{\alpha} + j\omega L_1 \\ Z'_{12} &= j\omega M_{12} + \frac{\omega^2 M_{1r} M_{r2}}{\alpha} \\ Z'_{21} &= j\omega M_{21} + \frac{\omega^2 M_{2r} M_{1r}}{\alpha} \\ Z'_{22} &= r_2 + \frac{\omega^2 M_{r2}^2}{\alpha} + j\omega L_2 \end{aligned} \quad (11.9)$$

Pour avoir la matrice impédance équivalente Z_{10} (Figure. 11.6) qui détermine le système entier, nous intégrons les capacités dans le calcul :

$$\begin{aligned}
Z_{ii} &= r_1 + \frac{\omega^2 M_{r1}^2}{\alpha} + j\omega L_1 + Z_{C1} \\
Z_{io} &= j\omega M_{12} + \frac{\omega^2 M_{1r} M_{r2}}{\alpha} \\
Z_{oi} &= j\omega M_{21} + \frac{\omega^2 M_{r2} M_{12}}{\alpha} \\
Z_{oo} &= r_2 + \frac{\omega^2 M_{r2}^2}{\alpha} + j\omega L_2 + Z_{C2}
\end{aligned} \tag{II.17}$$

Sachant que $\alpha = r_r + \left(j\omega L_r + \frac{1}{j\omega C_r} \right)$

La matrice ZIO sera présentée par la suite comme une matrice impédance équivalente Zeq, ces éléments seront également représentés par des éléments équivalents.

D'où :

$$\begin{aligned}
Z_{ii} &= j\omega \left(L_1 - \frac{1}{C_1 \omega^2} + \omega M_{r1}^2 \gamma \right) + \omega^2 M_{r1}^2 \delta + r_1 = Z_{11eq} \\
Z_{io} &= j\omega (M_{12} + \omega M_{1r} M_{r2} \gamma) + \omega^2 M_{1r} M_{r2} \delta = Z_{12eq} \\
Z_{oi} &= j\omega (M_{12} + \omega M_{2r} M_{r1} \gamma) + \omega^2 M_{2r} M_{r1} \delta = Z_{21eq} \\
Z_{oo} &= j\omega \left(L_2 - \frac{1}{C_2 \omega^2} + \omega M_{r2}^2 \gamma \right) + \omega^2 M_{r2}^2 \delta + r_2 = Z_{22eq}
\end{aligned} \tag{II.18}$$

δ et γ s'expriment, ($\omega = 2\pi * 13.56$ MHz) par :

$$\gamma = \frac{\frac{1}{C_r \omega} - \omega L_r}{(\omega L_r - \frac{1}{C_r \omega})^2 + r_r^2} \tag{II.19}$$

$$\delta = \frac{r_2}{(\omega L_r - \frac{1}{C_r \omega})^2 + r_r^2} \tag{II.20}$$

Les équations montrent que le résonateur affecte tous les termes de la matrice impédance Z. L'impédance mutuelle du système est composée de la partie réelle qui représente la résistance équivalente et la partie imaginaire qui représente l'inductance mutuelle équivalente. Ces deux grandeurs sont données, après calcul analytique par :

$$M_{eq} = M_{12} + \omega (M_{1r} * M_{r2}) \gamma \tag{II.21}$$

$$R_{eq} = \omega^2 (M_{1r} * M_{r2}) \delta \tag{II.22}$$

Ces deux équations vont nous servir, par la suite, de comparaison avec la simulation et la mesure.

A.1. Décalage d'impédance de la boucle du lecteur

On appelle par ΔZ_{ii} le décalage de l'impédance de la boucle du lecteur (ou impédance ramenée):

$$\Delta Z_{ii} = \frac{\omega^2 M_{r1}^2}{\alpha_1} = j \omega^2 M_{1r1}^2 \gamma + \omega^2 M_{1r1}^2 \delta \quad (II.23)$$

Ce décalage est généré sur la partie réelle et imaginaire de l'impédance équivalente du lecteur (Z_{ii}), il est fonction des propriétés électriques du résonateur ainsi que de l'inductance mutuelle entre le résonateur et la boucle du lecteur.

A.2. Décalage de fréquence

Le décalage de la partie imaginaire de l'impédance de la boucle du lecteur crée un décalage de la fréquence de résonance et impacte donc le fonctionnement optimal du lecteur RFID. La fréquence de résonance de la boucle du lecteur étant fixée à 13.56 MHz, cela entraîne des valeurs fixes de l'inductance et de la capacité. Sur ADS, nous avons fixé les coefficients de couplages entre la boucle du lecteur-résonateur, la boucle du lecteur-tag et le résonateur-tag, respectivement, à 0.4, 0.2, 0.2. Dans ce cas, deux fréquences de résonance apparaissent à $f_1=17.64$ MHz et $f_2=11.39$ MHz.

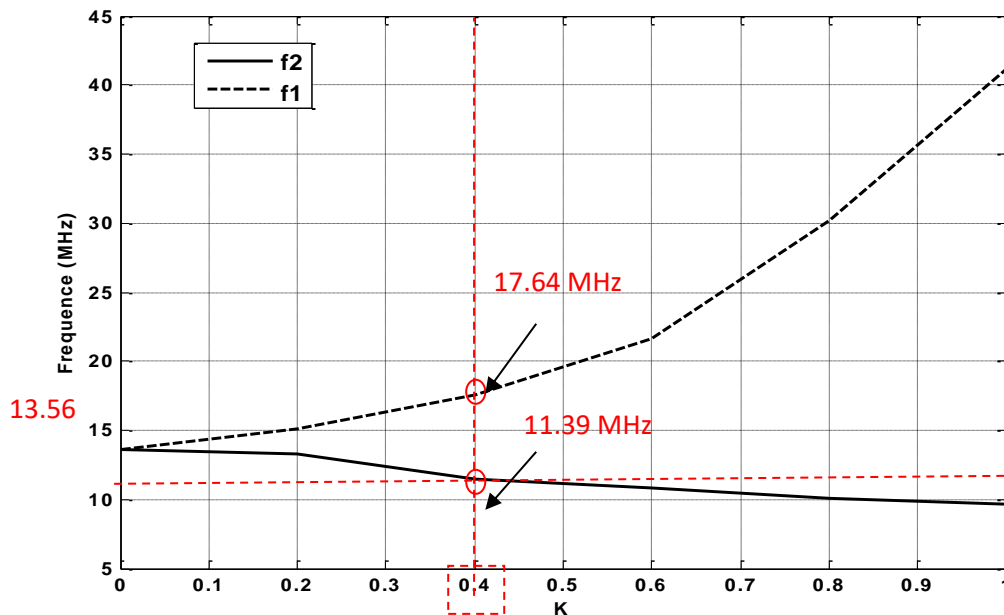


Figure II. 7 : Décalage de fréquence de résonance dans le cas boucle du lecteur avec un résonateur en fonction du coefficient de couplage K entre la boucle du lecteur et le résonateur

La variation du coefficient de couplage K du lecteur-résonateur entre 0 et 1, entraîne le décalage des deux fréquences f_1 et f_2 . Le décalage de fréquence augmente avec l'augmentation du coefficient de couplage (Figure. II.7). En revanche, les deux fréquences ne varient pas de la même manière. Selon les valeurs du coefficient de couplage, f_2 diminue et f_1 augmente avec l'augmentation de K.

Comme la capacité est fixée à une valeur donnée, c'est l'inductance équivalente du lecteur qui génère le décalage de fréquence (physiquement l'inductance de la boucle du lecteur est invariante, ce qu'on appelle ici par inductance équivalente, c'est la somme de l'inductance propre de la boucle et de la partie imaginaire de l'impédance ramenée par le couplage):

$$\Delta Z_{ii} = j \omega^2 k^2 L_1 L_{r_1} \gamma_1 + \omega^2 k^2 L_1 L_{r_1} \delta_1 \quad (II.24)$$

avec : δ_1 et γ_1 : les paramètres liés au résonateur « 1 » définis par les équations (II.19) et (II.20)

L'inductance équivalente de la boucle du lecteur s'exprime comme suit :

$$\begin{aligned} L_{1eq} &= L_1 + im(\Delta Z_{11}) = L_1 + \omega k^2 L_1 L_{ri} \gamma_i \\ &= L_1 (1 + \omega k^2 L_{ri} \gamma_i) \end{aligned} \quad (II.25)$$

A la résonance le terme γ_i dans l'équation d'inductance équivalente tend vers $1 \Omega^{-1}$. D'autre part, la valeur d'inductance équivalente est bornée par le coefficient de couplage ($k_{max}=1$) :

$$L_1 \leq L_{1eq} \leq L_1 (1 + \omega L_{ri} \gamma_i) \quad (II.26)$$

De la même manière, la fréquence est bornée suivant les valeurs d'inductance équivalente :

$$f_0 \geq f_{0eq} \geq f_0 \left(\frac{1}{\sqrt{1 + \omega L_{ri} \gamma_i}} \right) \quad (II.27)$$

Dans le cas d'une boucle du lecteur à un seul résonateur (N=1), d'inductance $L_{ri}=0.058 \mu H$ le décalage fréquentiel est compris entre 0 MHz et 3.53 MHz. L'intervalle de fréquence varie entre :

$$13.56 MHz \geq f_{0eq} \geq 10.03 MHz \quad (II.28)$$

Cet intervalle de variation correspond à la fréquence f2 sur la figure (Fig. II.7).

A.3. Méthode de résolution du problème de décalage de fréquence

Pour ramener la résonance à 13.56 MHz, nous allons devoir agir sur la valeur de la capacité de la boucle du lecteur. La difficulté est que cette valeur dépend du coefficient de

couplage k donc elle doit être adaptée en temps réel selon la position du récepteur. La valeur de la capacité à associer est :

$$C_{1eq} = C_1 \left(\frac{1}{1 + k\omega L_{ri}\gamma} \right) \quad (II.29)$$

Pour résoudre ce problème de décalage de fréquence en pratique, nous proposons d'utiliser des commutateurs. Après une série de calculs, on associe à la boucle du lecteur une capacité variable de manière discrète. Les calculs sont basés sur la position du résonateur sur la boucle du lecteur, ses propriétés électriques ainsi que le décalage fréquentiel correspondant. La méthode est rapportée sur l'organigramme de la Figure. II.8.

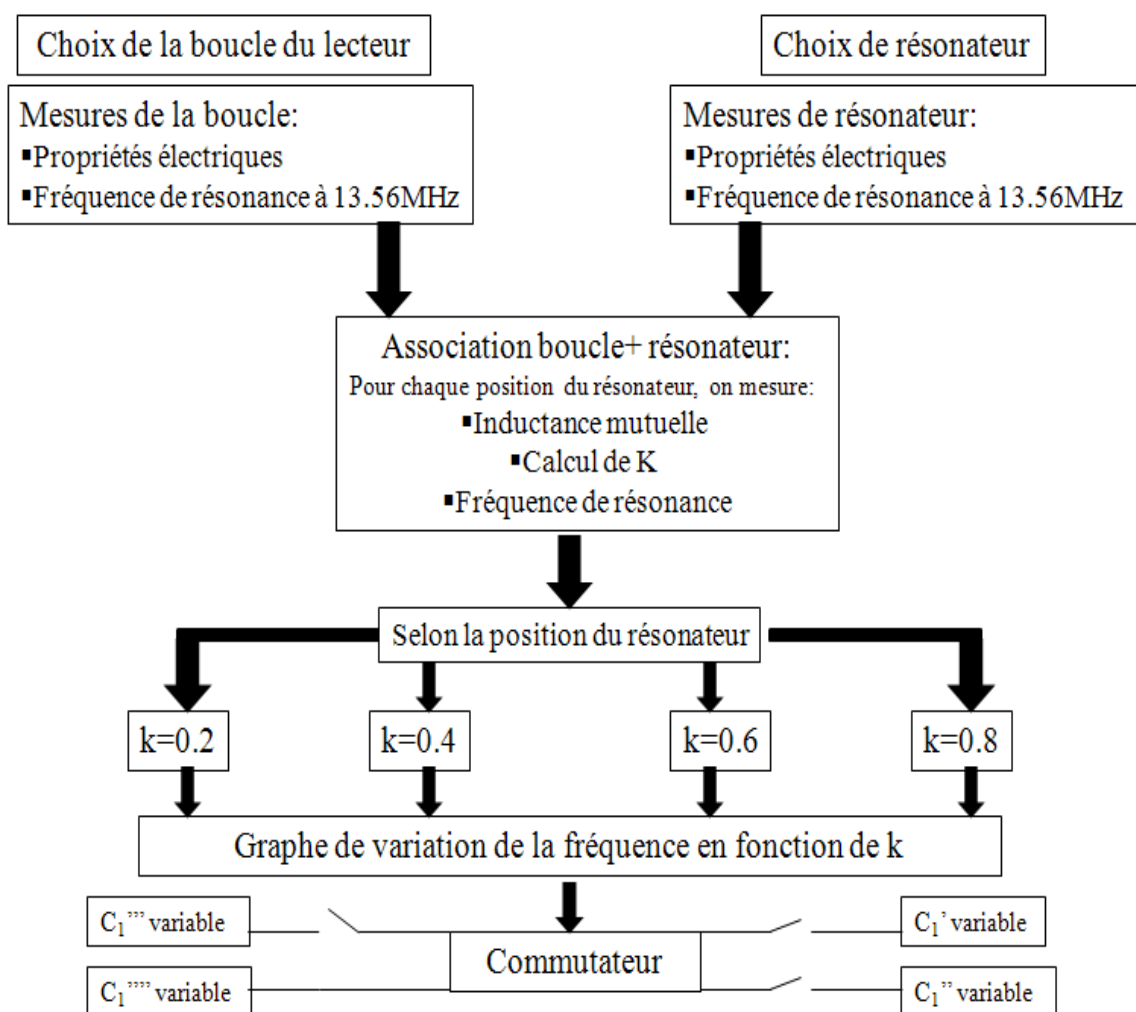


Figure II. 8 : Méthode de correction de décalage de fréquence au niveau de la boucle du lecteur

B. Cas général :

Pour répondre au cahier des charges lié au contexte de ces travaux de thèse, nous proposons une structure multi-résonateurs. Dans ce chapitre, les calculs de la matrice impédance pour le cas un résonateur sont présentés et détaillés. La même méthode de calcul est utilisée pour générer les différentes expressions pour le cas multi-résonateurs.

B.1. Hypothèse sur le couplage entre résonateurs

Le modèle électrique équivalent du système multi-boucles du lecteur est donné par la Figure.II.9. De nouveaux termes de couplages apparaissent comme le couplage entre les résonateurs. L'ajout de « n » résonateurs sur la surface de la boucle du lecteur transforme tous les paramètres de la matrice impédance équivalente.

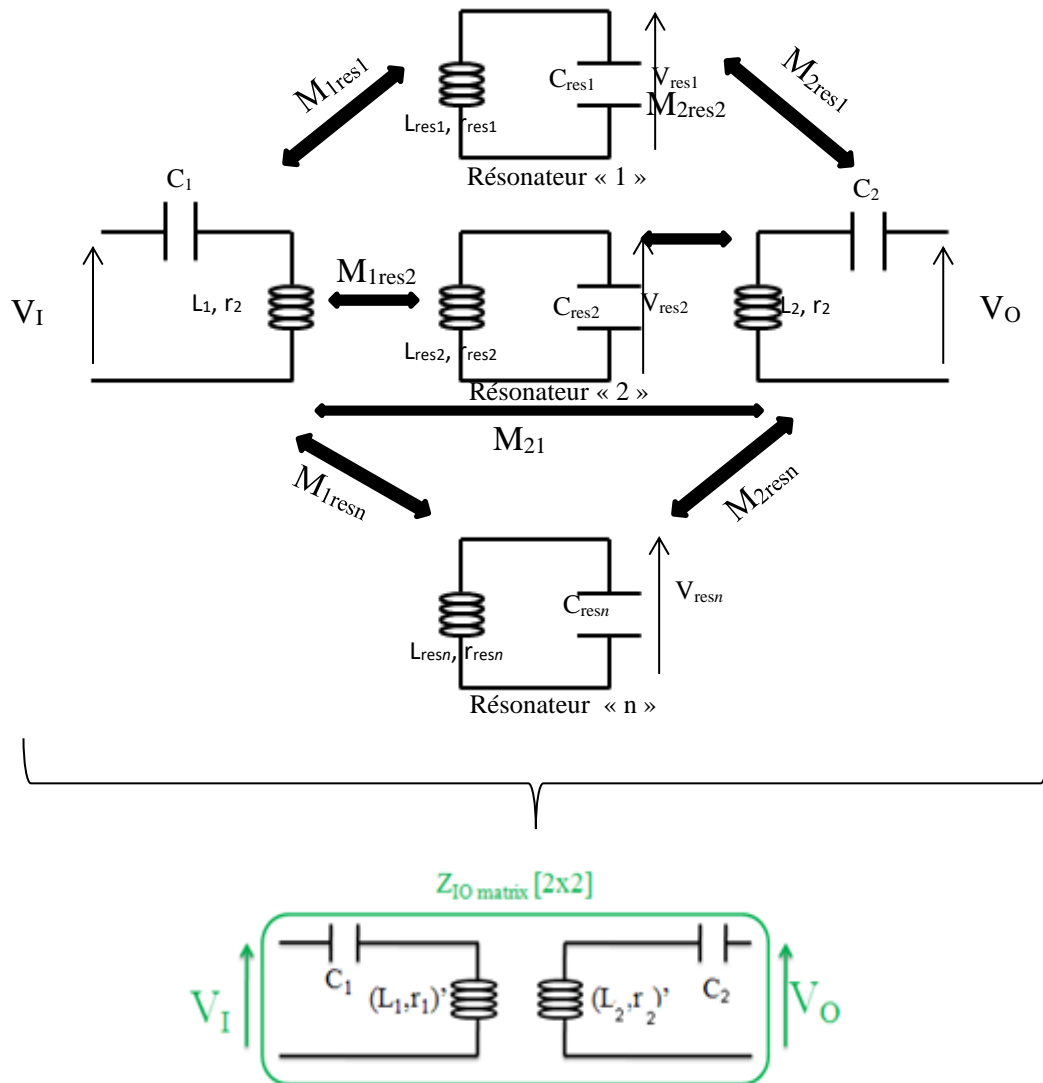


Figure II. 9 : Circuit équivalent du système multi-boucles du lecteur et tag

Dans le cas où le couplage entre résonateurs est négligeable, les éléments de la matrice impédance équivalente sont exprimés par l'équation II.30. Par comparaison avec l'équation II.17, une somme d'impédance mutuelle entre chacun des résonateurs et la boucle du lecteur ainsi que le tag apparaît sur les termes d'impédances propres équivalentes (Z_{ii} et Z_{oo}) ainsi qu'une somme liée au couplage mutuel à la fois entre chaque résonateur et la boucle du lecteur et le couplage mutuel entre chaque résonateur et le tag (Z_{io} et Z_{oi}).

$$\begin{aligned}
Z_{ii} &= r_1 + j\omega L_1 + Z_{C1} + \sum_{i=1}^n \frac{\omega^2 M_{r_i 1}^2}{\alpha_i} = Z_{11_{eq}} \\
Z_{io} &= j\omega M_{12} + \sum_{i=1}^n \frac{\omega^2 M_{1r_i} M_{r_i 2}}{\alpha_i} = Z_{12_{eq}} \\
Z_{oi} &= j\omega M_{21} + \sum_{i=1}^n \frac{\omega^2 M_{2r_i} M_{1r_i}}{\alpha_i} = Z_{21_{eq}} \\
Z_{oo} &= r_2 + j\omega L_2 + Z_{C2} + \sum_{i=1}^n \frac{\omega^2 M_{r_i 2}^2}{\alpha_i} = Z_{22_{eq}}
\end{aligned} \tag{II.30}$$

Dans cette partie, nous supposons que les couplages entre résonateurs sont négligeables et qu'ils ont le même couplage avec la boucle du lecteur et le tag cela revient donc à supposer que :

- Le système boucle du lecteur et celle du tag est sur le même axe
- Les résonateurs ont tous les mêmes propriétés électriques (car physiquement identiques).
- Les résonateurs sont suffisamment espacés entre eux pour négliger leurs couplages par rapport à celui entre la grande boucle lecteur et chacun d'entre eux.

Ainsi, les sommes des impédances mutuelles dans l'équation se simplifient en nombre de résonateurs « n ». Les éléments de la matrice impédance équivalente sont définis comme suit :

$$\begin{aligned}
Z_{ii} &= j\omega \left(L_1 - \frac{1}{C_1 \omega^2} + \omega n M_{r_1}^2 \gamma \right) + \omega^2 n M_{r_1}^2 \delta + r_1 \\
Z_{io} &= j\omega (M_{12} + \omega n M_{1r} M_{r2} \gamma) + \omega^2 n M_{1r} M_{r2} \delta \\
Z_{oi} &= j\omega (M_{12} + \omega n M_{2r} M_{r1} \gamma) + \omega^2 n M_{2r} M_{r1} \delta \\
Z_{oo} &= j\omega \left(L_2 - \frac{1}{C_2 \omega^2} + \omega n M_{r_2}^2 \gamma \right) + \omega^2 n M_{r_2}^2 \delta + r_2
\end{aligned} \tag{II.31}$$

B.2. Considération du couplage entre résonateurs

Le couplage entre résonateurs dépend de la distance entre eux. Dans certain cas, ce couplage peut ne pas être négligeable. Différentes matrices d'impédances équivalentes sont développées en annexes pour différents nombres de résonateurs. Ces calculs vont servir pour déduire une formule générale du calcul des éléments de la matrice d'impédance équivalente pour un nombre donné de résonateurs sur la boucle du lecteur. D'après les résultats des calculs A1, A2 et A3, les paramètres de la matrice d'impédance équivalente avec « n » résonateurs dépendent des paramètres d'impédance des résonateurs « n-1 ». Par

ailleurs, les paramètres d'impédance équivalente varient selon les différents coefficients de variations $\frac{A_i^2}{B_i}$, $\frac{C_i^2}{B_i}$, $\frac{A_i C_i}{B_i}$, ($0 < i < n$). (équation II.32)

$$\begin{aligned}
 \left(Z_{11} \text{ eq} \right)_n &= \left(Z_{11} \text{ eq} \right)_{n-1} + \frac{A_n^2}{B_n} \\
 \left(Z_{12} \text{ eq} \right)_n &= \left(Z_{12} \text{ eq} \right)_{n-1} + \frac{A_n C_n}{B_n} \\
 \left(Z_{21} \text{ eq} \right)_n &= \left(Z_{21} \text{ eq} \right)_{n-1} + \frac{C_n A_n}{B_n} \\
 \left(Z_{22} \text{ eq} \right)_n &= \left(Z_{22} \text{ eq} \right)_{n-1} + \frac{C_n^2}{B_n} \\
 &\vdots \\
 &\vdots \\
 \left(Z_{11} \text{ eq} \right)_{n-2} &= \left(Z_{11} \text{ eq} \right)_{n-3} + \frac{A_{n-2}^2}{B_{n-2}} \\
 \left(Z_{12} \text{ eq} \right)_{n-2} &= \left(Z_{12} \text{ eq} \right)_{n-3} + \frac{A_{n-2} C_{n-2}}{B_{n-2}} \\
 \left(Z_{21} \text{ eq} \right)_{n-2} &= \left(Z_{21} \text{ eq} \right)_{n-3} + \frac{C_{n-2} A_{n-2}}{B_{n-2}} \\
 \left(Z_{22} \text{ eq} \right)_{n-2} &= \left(Z_{22} \text{ eq} \right)_{n-3} + \frac{C_{n-2}^2}{B_{n-2}} \\
 &\vdots \\
 &\vdots \\
 \left(Z_{11} \text{ eq} \right)_{n-n} &= Z_{11} \\
 \left(Z_{12} \text{ eq} \right)_{n-n} &= Z_{12} \\
 \left(Z_{21} \text{ eq} \right)_{n-n} &= Z_{21} \\
 \left(Z_{22} \text{ eq} \right)_{n-n} &= Z_{22}
 \end{aligned} \tag{II.32}$$

Par conséquent, les paramètres de la matrice d'impédance sont exprimés comme suit:

$$\begin{aligned}
 \left(Z_{11} \text{ eq} \right)_n &= Z_{11} + \sum_n \frac{A_n^2}{B_n} \\
 \left(Z_{12} \text{ eq} \right)_n &= Z_{12} + \sum_n \frac{A_n C_n}{B_n} \\
 \left(Z_{21} \text{ eq} \right)_n &= Z_{21} + \sum_n \frac{C_n A_n}{B_n} \\
 \left(Z_{22} \text{ eq} \right)_n &= Z_{22} + \sum_n \frac{C_n^2}{B_n}
 \end{aligned} \tag{II.33}$$

Avec:

A_n : coefficient de variation en fonction du nombre de résonateurs. Cela dépend des différents paramètres d'impédance mutuelle entre la boucle du lecteur et les différents résonateurs: $A_n = f(Z_{1ri} | (j = 0), Z_{1ri} | (j \neq 0))$

Où:

$Z_{1ri} | (j = 0)$ est l'impédance mutuelle entre la boucle du lecteur et le résonateur r_i ($1 < i < n$) lorsque l'influence des autres résonateurs est négligeable ($j = 0$)

$Z_{1ri} | (j \neq 0)$ est l'impédance mutuelle entre la boucle du lecteur et le résonateur r_i ($1 < i < n$) lorsque l'influence des autres résonateurs n'est pas négligeable ($j \neq 0$)

- B_n : coefficient de variation en fonction de l'impédance des résonateurs et des paramètres d'impédance mutuelle entre les différents résonateurs r_i et r_j avec ($1 < i, j < n, i \neq j$):
- C_n : coefficient de variation en fonction du nombre de résonateurs. Il dépend des différents paramètres d'impédance mutuelle entre le tag et les différents résonateurs:

$$C_n = f(Z_{2ri} | (j = 0), Z_{2ri} | (j \neq 0))$$

Où:

$Z_{2ri} | (j = 0)$: impédance mutuelle entre le tag et le résonateur r_i ($1 < i < n$) lorsque l'influence des autres résonateurs est négligeable ($j = 0$)

$Z_{2ri} | (j \neq 0)$: impédance mutuelle entre le tag et le résonateur r_i ($1 < i < n$) lorsque l'influence des autres résonateurs n'est pas négligeable ($j \neq 0$)

Dans le cas d'un système multi-résonateurs, le décalage de fréquence dépend du nombre de résonateurs ainsi que de leurs positionnements sur la boucle du lecteur. En pratique un système basé sur des capacités variables est utilisé pour réadapter la structure.

II.2.3. Environnement une boucle du lecteur et multi-tags

En ajoutant un ou plusieurs tags sur le système RFID étudié précédemment, chaque tag reçoit une puissance supplémentaire due au couplage mutuel tag-tag. La Figure.II.10, montre le modèle électrique d'un système à une boucle du lecteur et multi tags.

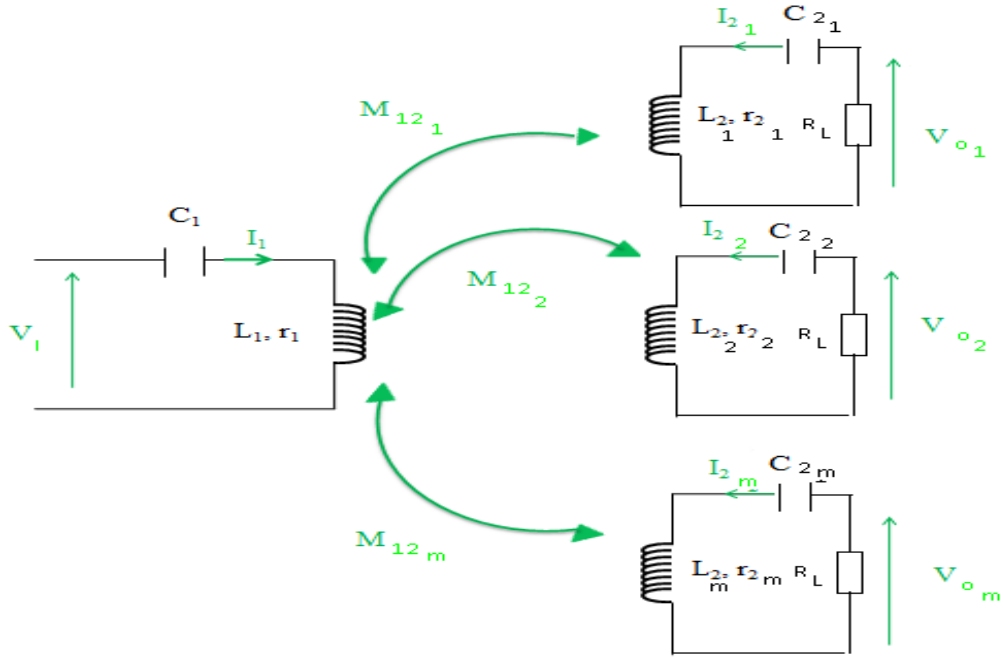


Figure II. 10 : modèle électrique d'un système à une boucle du lecteur et multi-tags

A. Impédance équivalente

Electriquement, le tag et le résonateur se comportent de la même manière. En connaissant tous les couplages entre le lecteur et les tags ainsi que ceux des tags entre eux, nous pouvons en déduire les expressions des tensions aux bornes de chaque port :

$$\begin{pmatrix} V_1 \\ V_{O_1} \\ \vdots \\ V_{O_{m-1}} \\ V_{O_m} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{ii} & Z_{iO_1} & \dots & Z_{iO_{m-1}} & Z_{iO_m} \\ Z_{O_1i} & \cdot & & & Z_{O_1O_m} \\ \vdots & & \ddots & & \vdots \\ Z_{O_{m-1}i} & & & \cdot & Z_{O_{m-1}O_m} \\ Z_{O_m i} & Z_{O_m O_1} & \dots & Z_{O_m O_{m-1}} & Z_{O_m O_m} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} I_1 \\ I_{2_1} \\ \vdots \\ I_{2_{m-1}} \\ I_{2_m} \end{pmatrix} \\
 = \begin{bmatrix} r_1 + j\omega L_1 & j\omega M_{12_1} & \dots & j\omega M_{12_{m-1}} & j\omega M_{12_m} \\ j\omega M_{2_1 1} & \cdot & & & j\omega M_{2_1 2_m} \\ \vdots & & \ddots & & \vdots \\ j\omega M_{2_{m-1} 1} & & & \cdot & j\omega M_{2_{m-1} 2_m} \\ j\omega M_{2_m 1} & j\omega M_{2_m 2_1} & \dots & j\omega M_{2_m 2_{m-1}} & r_{2_m} + j\omega L_{2_m} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} I_1 \\ I_{2_1} \\ \vdots \\ I_{2_{m-1}} \\ I_{2_m} \end{pmatrix} \quad (II.34)$$

Les éléments de la matrice impédance du système une boucle du lecteur et un tag « j » avec la présence de « m-1 » tags dans le système, s'expriment par :

$$\begin{aligned}
Z_{ii} &= r_1 + j\omega L_1 + Z_{C1} + \sum_{l=1}^{m-1} \frac{\omega^2 M_{2l1}^2}{Z_{2l}} \\
Z_{io_j} &= j\omega M_{12_j} + \sum_{l=1}^{m-1} \frac{\omega^2 M_{12_l} M_{2l2_j}}{Z_{2l}} \\
Z_{o_j i} &= j\omega M_{2_j1} + \sum_{l=1}^{m-1} \frac{\omega^2 M_{2_j2_l} M_{12_l}}{Z_{2l}} \\
Z_{o_j o_j} &= r_{2_j} + j\omega L_{2_j} + Z_{C2_j} + \sum_{l=1}^{m-1} \frac{\omega^2 M_{2_j2_l}^2}{Z_{2l}}
\end{aligned} \tag{III.35}$$

Où $Z_{2l} = Z_{jl}$ est l'impédance du tag « l » :

$$Z_{2l} = r_{2l} + j\omega L_{2l} + Z_{C2l} \tag{III.36}$$

Les termes sommes dans les éléments de la matrice impédance ne peuvent pas être simplifiés en nombre de tags. Les tags sont positionnés anarchiquement, et selon leurs positions spatiales et leurs distances par rapport à la boucle du lecteur, les couplages tags-boucle du lecteur diffèrent grandement.

B. Décalage de fréquence :

Dans le terme impédance équivalente du tag « j », un terme d'impédance mutuelle entre ce même tag et les autres tags apparaît. Ce terme, crée un décalage d'impédance du tag « j », d'où le décalage de fréquence.

$$\begin{aligned}
\Delta Z_{o_j o_j} &= \sum_{l=1}^{m-1} \frac{\omega^2 M_{2l2_j}^2}{Z_{2l}} \\
&= j \sum_{l=1}^{m-1} \omega^2 k^2 L_{2_j} L_{2l} \gamma_l + \sum_{l=1}^{m-1} \omega^2 k^2 L_{2_j} L_{2l} \delta_l
\end{aligned} \tag{III.37}$$

Le décalage de l'inductance propre équivalente du tag s'exprime par :

$$\begin{aligned}
\Delta L_{2_j} &= L_{2_j} + \sum_{l=1}^{m-1} \omega k^2 L_{2_j} L_{2l} \gamma_l \\
&= L_{2_j} \left(1 + \sum_{l=1}^{m-1} \omega k^2 L_{2l} \gamma_l \right)
\end{aligned} \tag{III.38}$$

Enfin, le décalage de fréquence s'exprime par :

$$\Delta f_0 = \frac{1}{\sqrt{1 + \sum_{l=1}^{m-1} \omega k^2 L_{2l} \gamma_l}} \tag{III.39}$$

C. Méthode de correction du décalage de fréquence

Pour résoudre ce problème de décalage de fréquence, dans un environnement multi-tags, la solution de capacité variable ne peut pas être appliquée à cause de la taille réduite des tags. Pour cela nous proposons de faire résonner les tags à une fréquence f_j ($f_j > 13.56$ MHz). Le décalage de fréquence peut ensuite ramener la résonance à 13.56 MHz si le positionnement du résonateur est optimisé. Cet ajustement nécessite une procédure spécifique qui dépend du système étudié (nombre, taille et position des tags), difficilement généralisable.

II.2.4. Environnement multi boucles du lecteur et multi-tags

Le système final a $n+1$ boucles du côté du lecteur (une boucle du lecteur avec « n » résonateurs à sa surface) et « m » tags. Les éléments de la matrice impédance entre le tag « j » et les $n+1$ boucles du lecteur en présence des « $m-1$ » tags s'expriment comme suit :

$$\begin{aligned}
 Z_{ii} &= r_1 + j\omega L_1 + Z_{C1} + \sum_{i=1}^n \frac{\omega^2 M_{r_i 1}^2}{\alpha_i} + \sum_{l=1}^{m-1} \frac{\omega^2 M_{2_l 1}^2}{Z_{2_l}} \\
 Z_{io_j} &= j\omega M_{12_j} + \sum_{i=1}^n \frac{\omega^2 M_{1r_i} M_{r_i 2_j}}{\alpha_i} + \sum_{l=1}^{m-1} \frac{\omega^2 M_{12_l} M_{2_l 2_j}}{Z_{2_l}} \\
 Z_{o_j i} &= j\omega M_{2_j 1} + \sum_{i=1}^n \frac{\omega^2 M_{1r_i} M_{r_i 2_j}}{\alpha_i} + \sum_{l=1}^{m-1} \frac{\omega^2 M_{2_j 2_l} M_{12_l}}{Z_{2_l}} \\
 Z_{o_j o_j} &= r_{2_j} + j\omega L_{2_j} + Z_{C2_j} + \sum_{i=1}^n \frac{\omega^2 M_{r_i 2_j}^2}{\alpha_i} + \sum_{l=1}^{m-1} \frac{\omega^2 M_{2_l 2_j}^2}{Z_{2_l}}
 \end{aligned} \tag{II.40}$$

Le tag « j » dans ce cas est couplé avec les $(n+1)$ éléments du côté du lecteur et $(m-1)$ tags. Les couplages dans l'équation (II.40) dépendent de la position spatiale du tag, et leurs sommes ne peuvent pas être simplifiées en nombre de résonateurs et/ou tags.

A. Décalage de fréquence :

Dans les éléments d'impédances propres équivalentes de la boucle du lecteur et le tag « j », on trouve tous les couplages du système : lecteur-tags, lecteur-résonateurs et résonateurs-tags. Le décalage de fréquence de résonance dans ce cas se fait à la fois sur la partie antennaire du lecteur et du tag.

Au niveau du lecteur, le terme de couplage boucle du lecteur-résonateurs peut être simplifié, en supposant que les résonateurs sont positionnés de sorte à avoir le même couplage avec la boucle du lecteur.

$$\Delta f_0 = \frac{1}{\sqrt{1 + n\omega L_{r_i} \gamma + \sum_{l=1}^m \omega k^2 L_{2_l} \gamma_l}} \tag{II.41}$$

Du côté du tag, le décalage de fréquence dépend de la position spatiale et de la distance tag-résonateurs et tag-tag. Dans ce cas le décalage ne peut pas être simplifié :

$$\Delta f_{0_j} = \frac{1}{\sqrt{1 + \sum_{l=1}^m \omega k^2 L_{r_l} \gamma + \sum_{l=1}^m \omega k^2 L_{2l} \gamma_l}} \quad (II.42)$$

B. Méthode de correction du décalage de fréquence :

Dans le cas d'un système à n+1 boucles du lecteur et m tags, le décalage de fréquence est vu sur la boucle du lecteur et sur les tags. Pour ramener leurs résonances à 13.56 MHz on applique les deux méthodes proposées précédemment en même temps. Des commutateurs pour commander les capacités variables au niveau de la boucle du lecteur et faire résonner les tags à des fréquences supérieures à 13.56 MHz puis ajuster progressivement.

II.3. Application au cas du système RFID

Dans le système RFID HF conventionnel, le couplage magnétique est défini comme étant le lien physique entre les boucles du tag et du lecteur RFID. En général, et particulièrement dans nos travaux, ce lien est modélisé à travers un paramètre qui est l'inductance mutuelle. Dans le but d'optimiser ce paramètre, nous avons proposé une solution par changement de la structure antennaire du lecteur RFID. Cette solution consiste à ajouter des petites boucles de résonateur sur la surface de la boucle du lecteur RFID. Cette solution, comme le montre la partie précédente, augmente le couplage inductif entre la boucle du lecteur et celle du tag mais agit aussi d'une manière significative sur tous les paramètres de la matrice impédance équivalente. Dans cette partie, nous allons interpréter et étudier l'influence du résonateur en se basant sur le développement mathématique du système équivalent [II.20-II.25]. Nous allons étudier d'autres paramètres liés au fonctionnement d'un système RFID tel que le Z_{in} (Impédance d'entrée), Z_{ineq} (Impédance d'entrée équivalente), Z_{out} (Impédance de sortie) et le Z_{outeq} (Impédance de sortie équivalente).

Dans le cas d'un système classique, les paramètres déterminants sont l'impédance vue par le lecteur et le tag :

$$\begin{aligned} Z_{in} &= Z_{11} - \frac{Z_{12}^2}{Z_{22} + Z_{chip}} = r_1 + j\omega L_1 + \frac{\omega^2 M^2}{r_2 + j\omega L_2 + Z_{chip}} \\ Z_{out} &= Z_{22} - \frac{Z_{21}^2}{Z_{11} + Z_L} = r_2 + j\omega L_2 + \frac{\omega^2 M^2}{r_1 + j\omega L_1 + r_L} \end{aligned} \quad (II.43)$$

Ces paramètres changent avec l'ajout d'un résonateur. Ils deviennent comme suit :

$$Z_{ineq} = Z_{11eq} - \frac{Z_{12eq}^2}{Z_{22eq} + Z_{chip}} = j \text{Im}(Z_{ineq}) + \text{re}(Z_{ineq})$$

$$Z_{outeq} = Z_{22_{eq}} - \frac{Z_{12_{eq}}^2}{Z_{11_{eq}} + r_L} = j \operatorname{Im}(Z_{outeq}) + \operatorname{re}(Z_{outeq}) \dots\dots\dots (II.44)$$

Où :

$$\operatorname{Im}(Z_{in}) = \operatorname{Im}(Z_{11_{eq}}) - \frac{\left[\left(\operatorname{Im}(Z_{12_{eq}}) \right)^2 - \left(\operatorname{re}(Z_{12_{eq}}) \right)^2 \right] \left(\operatorname{Im}(Z_{22_{eq}} + Z_{chip}) \right)^2}{\left(\operatorname{Im}(Z_{22_{eq}} + Z_{chip}) \right)^2 + \left(\operatorname{Re}(Z_{22_{eq}} + Z_{chip}) \right)^2} + \frac{\left[2 \left(\operatorname{Im}(Z_{12_{eq}}) \right) \left(\operatorname{Re}(Z_{12_{eq}}) \right) \right] \left(\operatorname{Re}(Z_{22_{eq}} + Z_{chip}) \right)}{\left(\operatorname{Im}(Z_{22_{eq}} + Z_{chip}) \right)^2 + \left(\operatorname{Re}(Z_{22_{eq}} + Z_{chip}) \right)^2}$$

$$\operatorname{Re}(Z_{in}) = \operatorname{Re}(Z_{11_{eq}}) - \frac{\left[\left(\operatorname{Re}(Z_{12_{eq}}) \right)^2 \left(\operatorname{re}(Z_{22_{eq}} + Z_{chip}) \right)^2 \right]}{\left(\operatorname{Im}(Z_{22_{eq}} + Z_{chip}) \right)^2 + \left(\operatorname{Re}(Z_{22_{eq}} + Z_{chip}) \right)^2} + \frac{\left[2 \left(\operatorname{Im}(Z_{12_{eq}}) \right) \left(\operatorname{Re}(Z_{12_{eq}}) \right) \right] \left(-\operatorname{Im}(Z_{22_{eq}} + Z_{chip}) \right)}{\left(\operatorname{Im}(Z_{22_{eq}} + Z_{chip}) \right)^2 + \left(\operatorname{Re}(Z_{22_{eq}} + Z_{chip}) \right)^2}$$

$$\operatorname{Im}(Z_{out}) = \operatorname{Im}(Z_{22_{eq}}) - \frac{\left[\left(\operatorname{Im}(Z_{12_{eq}}) \right)^2 - \left(\operatorname{re}(Z_{12_{eq}}) \right)^2 \right] \left(\operatorname{Im}(Z_{11_{eq}} + Z_L) \right)^2}{\left(\operatorname{Im}(Z_{11_{eq}} + Z_L) \right)^2 + \left(\operatorname{Re}(Z_{11_{eq}} + Z_L) \right)^2} + \frac{\left[2 \left(\operatorname{Im}(Z_{12_{eq}}) \right) \left(\operatorname{Re}(Z_{12_{eq}}) \right) \right] \left(\operatorname{Re}(Z_{11_{eq}} + Z_L) \right)}{\left(\operatorname{Im}(Z_{11_{eq}} + Z_L) \right)^2 + \left(\operatorname{Re}(Z_{11_{eq}} + Z_L) \right)^2}$$

$$\operatorname{Re}(Z_{out}) = \operatorname{Re}(Z_{22_{eq}}) - \frac{\left[\left(\operatorname{Re}(Z_{12_{eq}}) \right)^2 \left(\operatorname{re}(Z_{11_{eq}} + Z_L) \right)^2 \right]}{\left(\operatorname{Im}(Z_{11_{eq}} + Z_L) \right)^2 + \left(\operatorname{Re}(Z_{11_{eq}} + Z_L) \right)^2} + \frac{\left[2 \left(\operatorname{Im}(Z_{12_{eq}}) \right) \left(\operatorname{Re}(Z_{12_{eq}}) \right) \right] \left(-\operatorname{Im}(Z_{11_{eq}} + Z_L) \right)}{\left(\operatorname{Im}(Z_{11_{eq}} + Z_L) \right)^2 + \left(\operatorname{Re}(Z_{11_{eq}} + Z_L) \right)^2}$$

Dans cette partie, nous étudions l'évolution de l'impédance et de l'impédance équivalente vue du lecteur (Z_{in} et Z_{ineq}) et du tag (Z_{out} et Z_{outeq}) en amplitude et en phase. La distance entre la boucle du lecteur et celle du tag est fixée à 10 mm. Les résultats sont présentés pour un déplacement latéral de la boucle du tag de -100 mm à 100 mm et pour deux configurations spatiales : parallèle et perpendiculaire.

II.4. Conclusion du chapitre II

Dans ce chapitre nous avons modélisé électriquement un système RFID multi-boucles et multi tags. Cette étude nous a permis d'identifier les problèmes auxquels nous allons être confrontés lors des tests en environnement réel. La présence des résonateurs sur la partie antennaire du lecteur est bénéfique en termes d'efficacité de transmission lecteur-tag. D'autre part, les résonateurs, selon leurs propriétés électriques et leurs positionnements sur la boucle du lecteur, engendrent un décalage de fréquence plus ou moins important sur la boucle du lecteur. Pour résoudre ce problème, nous proposons une méthode de commande automatique d'un banc de capacités via des commutateurs sur la boucle du lecteur.

Egalement, le décalage de fréquence peut aussi apparaître sur les tags à cause du couplage tag-tag. Dans ce cas, la solution du banc ne peut pas être appliquée. Le seul moyen d'éviter ce décalage de fréquence est de faire résonner les tags à une fréquence autre que 13.56 MHz, et faire en sorte que le décalage de fréquence puisse ramener la résonance à la fréquence voulue. Ces problèmes sont formulés par des équations basées sur la matrice impédance équivalente. Cela nous a permis, dans la suite de ces travaux, de savoir sur quel paramètre agir afin d'améliorer les performances du système complet.

II.5. Bibliographie du chapitre II :

- [II.1] A.Berger,M.Agostinelli,S.Vesti,J.Olivier,J.Cobos,M.Huemer,“ A Wireless Charging System Applying Phase-Shift and Amplitude Control to Maximize Efficiency and Extractable Power”,*IEEE transaction on power electronic*”,vol. 30,pp.6336-6348, November 2015.
- [II.2] C. S. Wang, O. H. Stielau, G. A. Covic, “Design Considerations for a Contactless Electric Vehicle Battery Charger”, *IEEE Transaction on Industrial. Electronics*, vol. 52, pp. 1308–1314, May 2005..
- [II.3] Y. Jang and M. M. Jovanovic, “A Contactless Electrical Energy Transmission System for Portable-Telephone Battery Chargers”, *IEEE on Industrial. Electronics*”, vol. 50, pp. 520–527, Jun. 2003.
- [II.4] M.Ettorre,A.Grbic,“ATransponder-Based,Nonradiative Wireless Power Transfer”, *IEEE antennas and wireless propagation letters* ,vol.11, pp.1150 - 1153 , september2012.
- [II.5] A.Berger,M.Agostinelli,S.Vesti,J.Olivier,J.Cobos,M.Huemer,“A Planar Magnetically Coupled Resonant Wireless Power Transfer System Using Printed Spiral Coils”,*IEEE antennas and wireless propagation letters*, vol. 13,pp.1648 – 1651, 2014
- [II.6] M.Zargham,P.G. Gulak, “Maximum Achievable Efficiency in Near Field Coupled Power Transfer System”,*IEEE transaction on biomedical circuits and systems*, vol.6,pp.228-245,June 2012
- [II.7] H.Hwang,J.Moon,B.Lee,C.Jeong,S.Kim,“An Analysis of Magnetic Resonance Coupling Effects on Wireless Power Transfer by Coil Inductance and Placement,”*IEEE transaction on consumer electronics*,Vol 60,pp.203 – 209, May 2014.
- [II.8] k.fotopoulou, B.W.Flynn,“Wireless Power Transfer in Loosely Coupled Links: Coil Misalignment Model,” *IEEE transaction on magnetics*,vol.47,NO.2,pp.416-430, februray 2011.
- [II.9] A. A. Eteng, S. K. A. Rahim, C. Y. Leow, M. I. Sabran, M. F. M. Yusof, “Loop Antenna Design for Lateral H-Field Uniformity in Misaligned HF-RFID Links”, *IEEE Symposium on Wireless Technology & Applications (ISWTA)*,pp: 92-95,2014.
- [II.10] K.D'hoel,J.Goemaere,N.Stevens,B.Nauwelaers,L.Strycker ,“Automated Design of an HF RFID Loop Antenna Based on Parametric Geometry Modification”, *IEEE International Conference on RFID*, pp. 1-7,2014.
- [II.11] G. Eason, B. Noble, and I.N. Sneddon, “On certain integrals of S.I. Babic, F. Sirois, C. Akyel, “Validity check of mutual inductance formulas for circular filaments with lateral and angular misalignments”, *Progress in Electromagnetics Research M*, Vol.8, pp.15-26, 2009.
- [II.12] S. Babic, C. Akyel, “New formulas for mutual inductance and axial magnetic force between magnetically coupled coils: thick circular coil of the rectangular cross-section-thin disk coil (pancake)”, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol.49, No.2, 2013,pp.860-868,2013.

- [II.13] S. Hackl, C. Lanschützer, P. Raggam, W.L. Randeu, "A Novel Method for Determining the Mutual Inductance for 13.56MHz RFID Systems", *Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing*, pp. 297-300, 200
- [II.14] S. Hackl, C. Lanschützer, P. Raggam, W.L. Randeu, "A Novel Method for Determining the Mutual Inductance for 13.56MHz RFID Systems", *Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing*, pp. 297-300, 2008
- [II.15] A. Diet et al. 'Improving LF Reader Antenna volume of detection for RFID token tag thanks to Identical Coaxial Loops (ICLs) and in/out-of phase multiple-loops structures' *IEEE Int. Conference on RFID-Technology and Applications*, 2014 September 8-9, Tampere, Finland.
- [II.16] Z.Zhang,K.T.Chau, "Quantitative Analysis of Mutual Inductance for Optimal Wireless Power Transfer via Magnetic Resonant Coupling," in *IEEE Transaction on Magnetics*, vol .50,no.11,november 2014
- [II.17] Kiani. M.; Jow. U.M.; Ghovanloo. M. "Design and Optimization of a 3-Coil Inductive Link for Efficient Wireless Power Transmission". *IEEE Transaction. on Biomedical. Circuits and Systems*. vol-5,pp.579–591,2011.
- [II.18] Dukju. A.; Songcheol. H. "Effect of Coupling between Multiple Transmitters or Multiple Receivers on Wireless Power Transfer". *IEEE Tranaction on . Industrial. Electronics*,vol 60, pp.2602–2613,2013.
- [II.19] Imura. T.; Hori. Y, "Maximizing air gap and Efficiency of Magnetic Resonant Coupling for Wireless Power Transfer using Equivalent Circuit and Neumann formula", *IEEE Transaction. on Industrial. Electronics.*, vol.58, pp.4746–4752, 2011
- [II.20] H. Hu ;V. Georgakopoulos, "Analysis and Design of Conformal SCMR WPT Systems with Multiple Resonators, Antennas and Propagation Society". *IEEE,International Symposiumon Antennas and Propagation (APSURSI)*, pp.1347 – 1348,2014
- [II.21] M.Benamara, M.Grzeskowiak, A.Diet, Y. Le Bihan and G.Lissorgues, "matrice d'impédance équivalente d'un système RFID avec résonateurs " *JNM , Saint-malo, Mai 2017*
- [II.221] A. DIET, M. GRZESKOWIAK, Y. LE BIHAN, M. BIANCHERI-ASTIER, C. CONESSA, F. ALVES, M.BENAMARA, G.Lissorgues " Design of 1cm² coils for HF RFID instruments tracking with detection range improvement", *RFID TA, Warsaw, 2017*
- [II.23] Megdouda BENAMARA, Marjorie GRZESKOWIAK, Antoine DIET, Gaëlle LISSORGUES, Yann LE BIHAN, Equivalent Input and Output Impedances in HF RFID System Including Resonator, *EuCAP, paris, 2017*
- [II.24] Megdouda BENAMARA, Marjorie GRZESKOWIAK, Antoine DIET, Gaëlle LISSORGUES, Yann LE BIHAN, « «Reader Antenna Including Resonators for HF RFID Detection », *LAPC, UK, 2016*
- [II.25] Megdouda BENAMARA, Marjorie GRZESKOWIAK, Antoine DIET, Gaëlle LISSORGUES, Yann LE BIHAN, "Calculation of the Equivalent Mutual Impedance in Complex HF RFID Systems", *icecom, Dubrovnik, 2016*

Chapitre III :

Structures antennaires du lecteur RFID HF

La détection RFID est réalisée lorsque l'influence du tag sur l'impédance équivalente vue par le lecteur/interrogateur est correctement interprétée, selon le principe de la modulation de charge, ou « load modulation ». Ceci est possible si le couplage magnétique entre les boucles du lecteur et du tag est suffisamment fort et que la bande passante de la fonction de transfert équivalente du système n'est pas trop sélective. La transmission maximale de puissance entre le lecteur et le tag survient quand les lignes de champ magnétique générées par la boucle du lecteur sont le plus possible perpendiculaires à la surface (effective) du tag [III.1-III.10]. Dans notre étude, plusieurs facteurs affectent la détection comme le rapport de taille important entre les surfaces équivalentes des boucles ainsi que les différentes configurations spatiales possibles entre elles. Nous proposons deux structures d'antennes « lecteur » permettant de confiner ces lignes de champ en certains points privilégiés de la surface du lecteur, à l'aide de résonateur(s), ou de modifier l'orientation de ces lignes à l'aide d'une antenne torsadée selon le principe des antennes boucles complémentaires. Ces deux structures seront étudiées par des simulations sous HFSS et confirmées par des mesures de détection de tags RFID, pour deux types de configurations spatiales entre le tag et la boucle du lecteur : parallèle et perpendiculaire. Ces résultats seront comparés avec des calculs analytiques basés sur les équations présentées dans le chapitre précédent.

III.1. Structure antennaire avec résonateurs

III.1.1. Cas conventionnel (sans résonateurs)

La communication dans un système RFID en hautes fréquences est basée sur le couplage magnétique entre deux antennes boucles : celle du lecteur et celle du tag. Plusieurs facteurs limitent la communication telle que la distance entre les boucles, leurs orientations spatiales ainsi que le rapport de tailles entre les surfaces respectives (cf. étude théorique dans le chapitre II)[III.11-III.17]. Le prototype étudié dans cette partie correspond au système conventionnel de la Figure. III.1 : une boucle pour le lecteur et une boucle pour le tag. La structure est constituée d'une boucle de lecteur d'un rayon de 50 mm, et d'un tag circulaire d'un rayon de 15mm, soit 9 % de la surface de la boucle du lecteur. Dans le cadre de cette étude, nous travaillons sur deux configurations spatiales du tag par rapport à la boucle du lecteur : parallèle et perpendiculaire. La première, est considérée comme la configuration de détection idéale sachant que la détection est observée quand les lignes de champs générées par la boucle du lecteur sont perpendiculaires à la surface du tag. La deuxième est la configuration de détection orthogonale, ce qui permet de déterminer toutes les combinaisons de position aléatoire dans un plan (2D) par une décomposition selon ces deux orientations. .

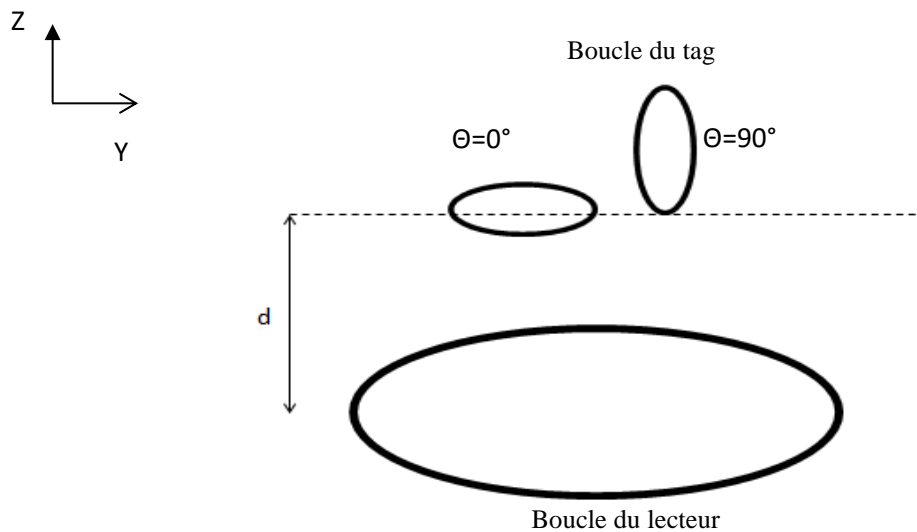


Figure III. 1 : Système -boucle du lecteur et boucle du tag

A. Champ magnétique généré par la boucle du lecteur

Les boucles de la structure de la figure III.1 sont conçues et simulées sous HFSS avec du PEC (*Perfect Electric Conductor*). Les pistes du PEC ont une largeur de 2mm et une épaisseur de 0,017 mm. Elles présentent les propriétés électriques du tableau II.1 où les boucles du lecteur et du tag sont respectivement représentées par les inductances (L_1, L_2), les résistances internes (r_1, r_2) et les capacités d'accord (C_1, C_2).

Pour comprendre le fonctionnement d'une telle structure pour une application RFID en couplage magnétique, nous nous intéressons à ses paramètres physiques : champ magnétique et inductance mutuelle. Dans la Figure. III.2, est reporté la distribution du champ magnétique (amplitude et lignes de champ) générée par la boucle du lecteur dans les plans (X, Y) et (Y, Z). Conformément à la théorie, l'amplitude du champ magnétique généré par la boucle du lecteur présente des maxima autour de ses bords. Cette amplitude diminue dans la direction du centre de la boucle. Ainsi, nous pouvons visualiser les lignes du champ magnétique qui « tournent » autour des bords de la boucle. Cette distribution correspond à celle d'une boucle conventionnelle conductrice parcourue par un courant électrique.

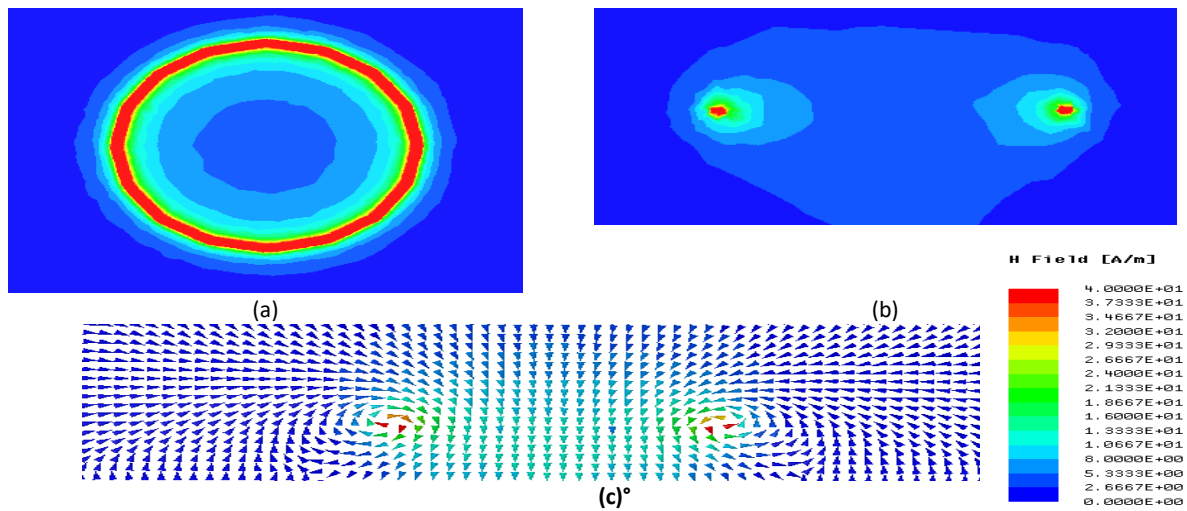


Figure III. 2: champ magnétique généré par une boucle : amplitudes (a, b) et lignes de champs (c)

B. Inductance mutuelle

Dans le cas d'un système passif, la valeur de l'inductance mutuelle M_{12} entre la boucle du lecteur (boucles 1) et la boucle du tag (boucle 2) est déterminée à partir du paramètre du couplage (Z_{12}) de la matrice d'impédance (équation II.3):

$$M_{12} = \frac{Im(Z_{12})}{\omega} \quad (III.1)$$

Cette méthode de calcul est utilisée dans le cas de simulation HFSS ou chacune des boucles est alimentée par un 'lumped port' à la fréquence de 13.56 MHz.

B. 1. Variation du rayon de tag

Sur la figure.III.3, pour une configuration parallèle, nous faisons une étude sur l'évolution de l'inductance mutuelle en fonction du rayon R_2 du tag ($10 \text{ mm} < R_2 < 50 \text{ mm}$). Le rayon « R_1 » et la distance « d » entre les boucles 1 et 2 sont respectivement fixés à 50 mm et 10 mm. L'inductance mutuelle entre le tag et le lecteur est évaluée en fonction du déplacement latéral du tag, le long de l'axe Y, pour une variation de -100 mm à +100 mm.

Pour des rayons des boucles R_1 et R_2 comparables, l'inductance mutuelle est maximale au centre de la boucle 1 : 110 nH et 72 nH respectivement pour $R_2=50 \text{ mm}$ et $R_2=40\text{mm}$.

Pour des rapports R_1/R_2 supérieurs à $5/4$, le maximum de l'inductance mutuelle apparaît sur les bords de la boucle 1 : 40nH, 18nH et 5nH respectivement pour $R_2=30\text{mm}$, 20mm et 10mm . D'après ces résultats, nous pouvons remarquer que le rapport de taille entre la boucle du lecteur et celle du tag affecte à la fois la valeur de l'inductance mutuelle mais aussi la position de l'optimum de couplage. Ainsi, nous déduisons que pour une structure conventionnelle RFID avec un rapport de taille élevé entre la boucle du lecteur et celle du tag, la détection ne peut être envisageable que sur les bords de la boucle du lecteur.

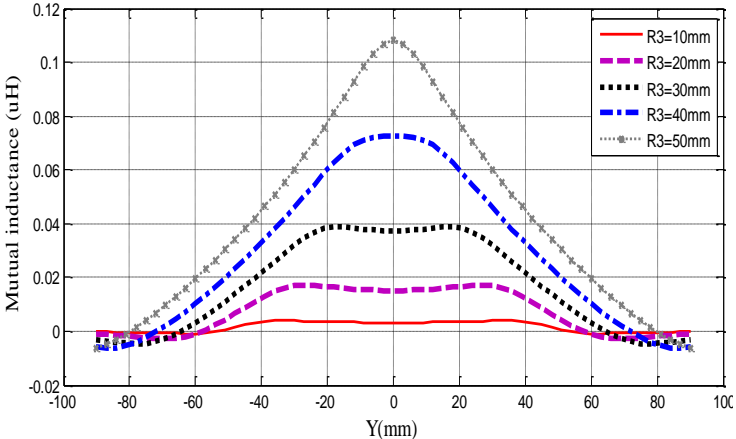
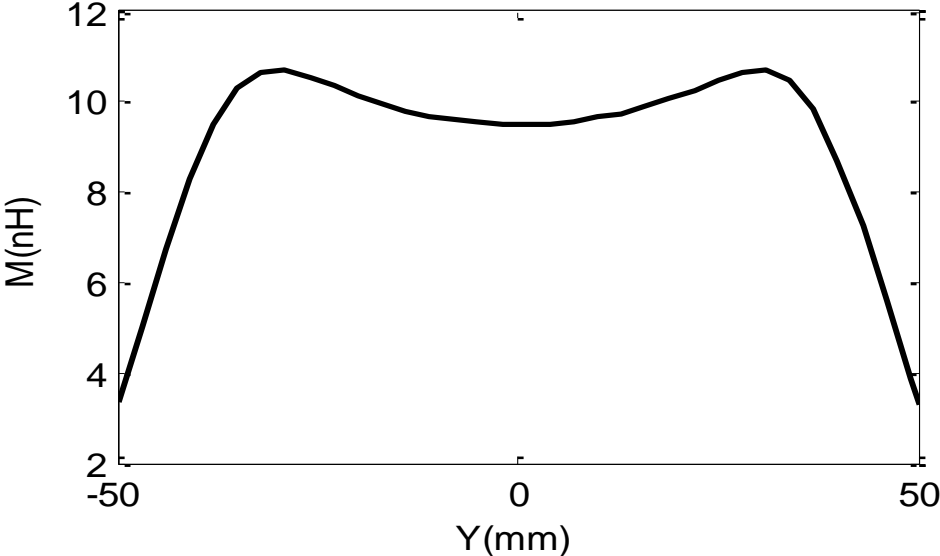


Figure III. 3: Inductance mutuelle pour différentes tailles de la boucle du tag

B. 2. Effet de variation de la configuration spatiale du tag

Sur la Fig. III.4.a et b, l'inductance mutuelle du système (une boucle du lecteur et une boucle du tag) est évaluée pour un déplacement latéral ($-50\text{mm} < Y < 50\text{mm}$) et angulaire (parallèle et perpendiculaire) de la boucle du tag. Son rayon est fixé à 15 mm.



(a)

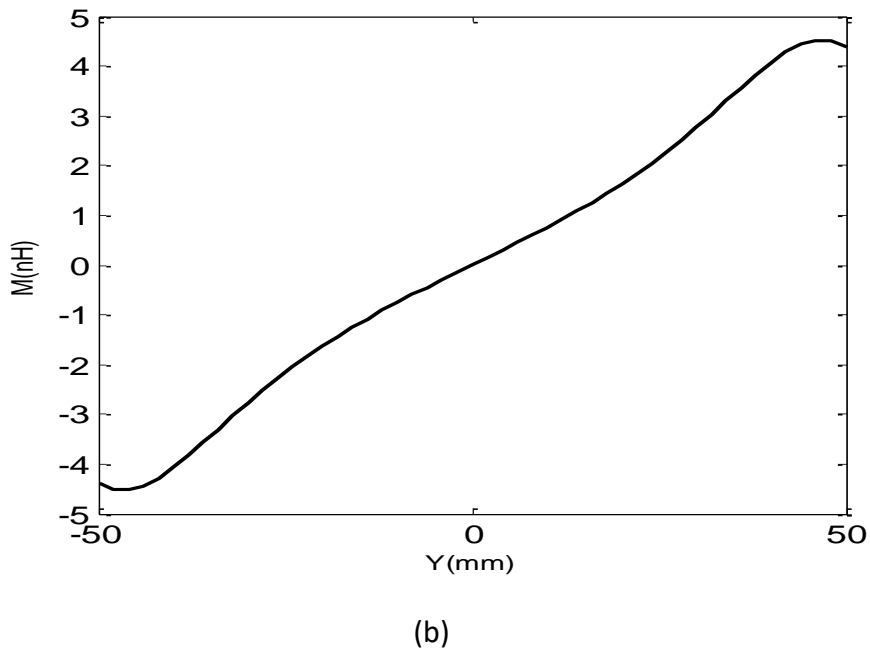


Figure III. 4 inductance mutuelle en configuration parallèle (a) et perpendiculaire (b)

En configuration parallèle l'inductance mutuelle présente deux maximums correspondant aux zones proches des bords de la boucle du lecteur : 10.5 nH à $Y = \pm 40$ mm. Cette valeur se dégrade quand le tag se déplace vers le centre de la boucle du lecteur et atteint une valeur minimale de 9 nH à $Y = 0$ mm. En configuration perpendiculaire l'inductance mutuelle présente deux maxima de ± 4.5 nH proches des bords de la boucle du lecteur et un nul à son centre. Ces résultats coïncident avec ceux de la fig.III.2, où la distribution du champ magnétique est maximale sur les bords de la boucle du lecteur. Aussi l'orientation des lignes de champ est déterminante à la fois pour le signe de l'inductance mutuelle (positive ou négative) et également pour l'intensité: pour chacune des configurations parallèle et perpendiculaire, le maximum d'inductance mutuelle apparaît sur les zones où la boucle du tag est perpendiculaire aux lignes du champ. En comparant les résultats des figures. III.4 (a) et III.4 (b), la configuration parallèle semble être la configuration la plus adaptée pour les applications RFID qui nécessitent un déplacement du tag sur la surface de la boucle du lecteur.

Le contexte difficile de l'application de la RFID aux instruments chirurgicaux nous imposera de faire l'étude du déplacement latéral et angulaire du tag avec comme contrainte un rapport de taille élevé entre la boucle du lecteur et celle du tag. Nous allons proposer plusieurs structures nouvelles afin d'optimiser la détection RFID.

III.1.2. Structure antennaire avec résonateurs

Le principe d'ajout de résonateurs est étudié dans cette partie. Une antenne bi-boucle du lecteur RFID est proposée [III.17-III.22].

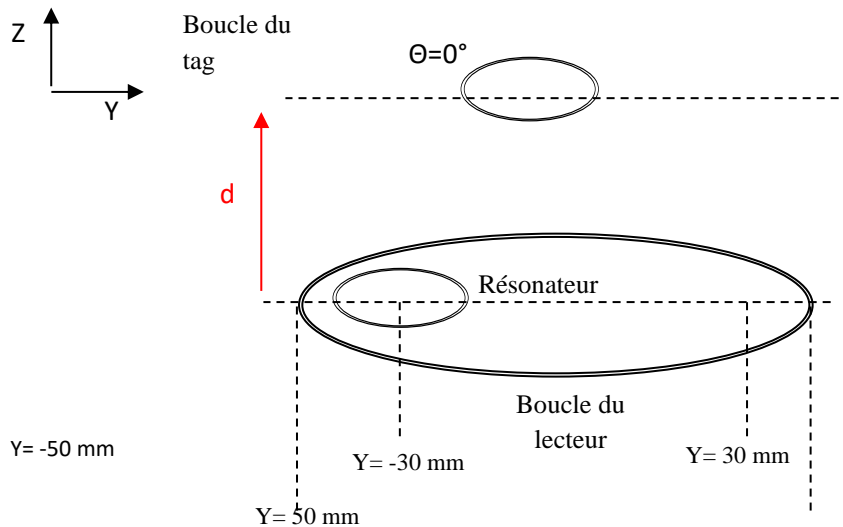


Figure III. 5 : Système -boucle du lecteur et boucle du tag

Le prototype correspond au système de la fig. III.5 : système conventionnel (une boucle du lecteur et boucle du tag) pour lequel on ajoute un résonateur sur la surface de la boucle du lecteur. Le résonateur a des dimensions et propriétés électriques similaires à celles de la boucle du tag. L'ajout du résonateur sur la surface de la boucle du lecteur a pour but de maximiser localement le couplage entre le tag et la boucle du lecteur, car le tag est mobile. Le couplage est déterminé à partir de l'inductance mutuelle équivalente entre le lecteur bi-boucles et le tag.

Nous faisons une étude numérique électromagnétique à l'aide du logiciel HFSS et en mesure à l'aide d'un analyseur de réseau vectoriel. En mesure, le système bi-boucles et le tag sont alimentés par les deux ports du VNA. Pour faire le lien entre mesures et simulations, nous allons utiliser les transformations matricielles du chapitre II.

Dans le cas d'un système passif composé exclusivement de boucles non chargées, la valeur de l'inductance mutuelle équivalente M_{eq} entre la bi-boucle du lecteur (boucles 1 et res) et la boucle du tag (boucle 2) est déterminée par la somme des inductances mutuelles entre les boucles 1- 2 et les boucles 2- res.

$$M_{eq} = \frac{Im(Z_{12})}{\omega} + \frac{Im(Z_{res2})}{\omega} \quad (III.3)$$

Cette méthode de calcul est utilisée dans le cas de simulation HFSS

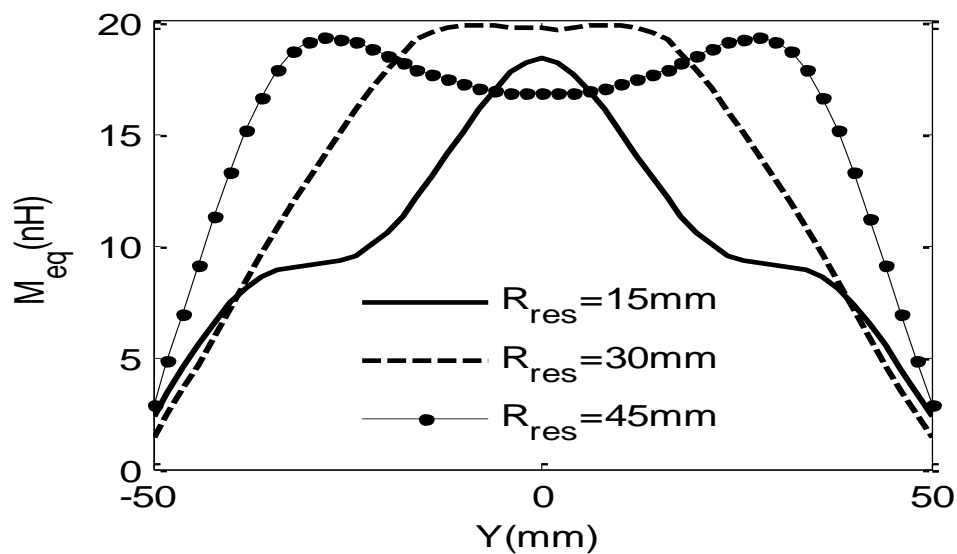
A. Effet du résonateur

Pour la structure bi-boucle du lecteur et boucle du tag, nous allons effectuer une étude paramétrique pour avoir le meilleur positionnement du résonateur sur la boucle du lecteur

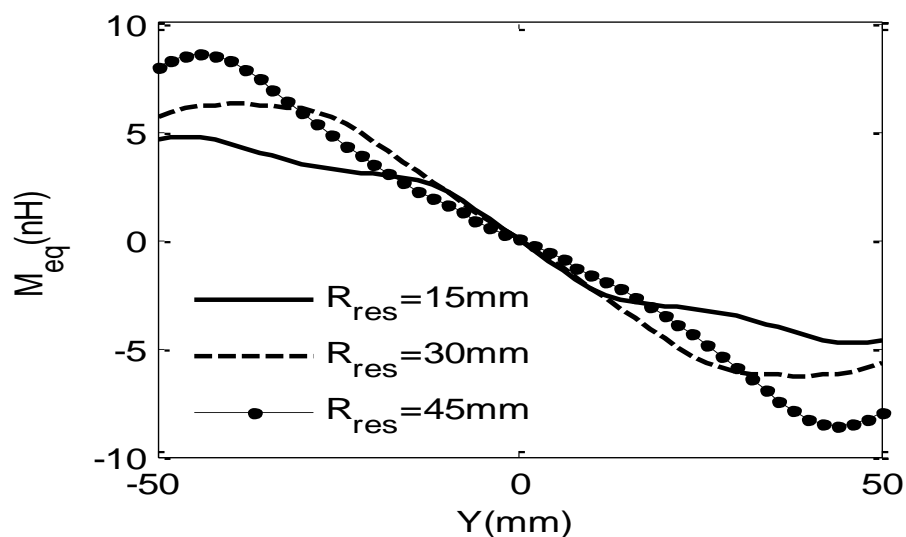
ainsi que l'influence de sa taille en utilisant les différents termes de couplage de l'équation (III.3).

A.1. Taille du résonateur :

Sur la figure III.6, l'effet de la taille du résonateur sur l'inductance mutuelle équivalente du système est étudié. L'étude est faite pour un résonateur positionné au centre et dans la surface de la boucle du lecteur ($Y_{res} = 0$ mm). Sa taille varie pour trois différentes valeurs : $R_{res} = 15$ mm (même dimension que la boucle du tag), $R_{res} = 30$ mm (la taille du résonateur est supérieure à celle de la boucle du tag) et $R_{res} = 45$ mm (la taille du résonateur est comparable à celle du lecteur).



(a)



(b)

Figure III. 6 : Inductance mutuelle équivalente entre la bi-boucle du lecteur et le tag en parallèle (a) et perpendiculaire (b) pour différentes tailles du résonateur

Les résultats sont présentés pour un déplacement latéral ($-50 \text{ mm} < Y_{\text{tag}} < 50 \text{ mm}$) et angulaire (parallèle et perpendiculaire) de la boucle du tag. La distance « d » est fixée à 10 mm.

En configuration parallèle, l'inductance mutuelle équivalente présente deux maxima correspondants aux bords du résonateur. Pour $R_{\text{res}} = 45 \text{ mm}$, les maxima d'inductance mutuelle équivalente sont observés à $Y = -45 \text{ mm}$ et $Y = 45 \text{ mm}$ et ont une valeur de 19 nH. Cette valeur se dégrade quand le tag se déplace vers le centre de la boucle du lecteur et atteint une valeur minimale de 16.5 nH à $Y = 0 \text{ mm}$. Pour cette taille de résonateur, l'évolution de l'inductance mutuelle est comparable à celle de la Figure.III.4.a (système conventionnel : une boucle du lecteur et une boucle de tag). L'influence du résonateur sur l'inductance mutuelle équivalente est interprétée par une augmentation de 8 nH et 7.5 nH par rapport au système sans résonateur respectivement proche des bords de la boucle du lecteur et à son centre. Pour $R_{\text{res}} = 30 \text{ mm}$, l'inductance mutuelle équivalente est relativement constante sur une certaine longueur, en regard de la surface du résonateur (20 nH). Pour $R_{\text{res}} = 15 \text{ mm}$, l'inductance mutuelle équivalente présente une valeur maximale de 17 nH au centre du résonateur. Dans ce cas, le pic d'inductance mutuelle est concentré sur la surface du résonateur.

En configuration perpendiculaire, l'inductance mutuelle équivalente présente deux maxima correspondants aux bords de la boucle du lecteur et du résonateur. Pour $R_{\text{res}} = 45 \text{ mm}$, les extrema d'inductance mutuelle équivalente se situent à $Y = -45 \text{ mm}$ et $Y = 45 \text{ mm}$ et ont une valeur de, respectivement, 8.5 nH et -8.5 nH. Cette valeur se dégrade quand le tag se déplace vers le centre de la boucle du lecteur et s'annule à $Y = 0 \text{ mm}$. De $Y = 0 \text{ mm}$ à $Y = 45 \text{ mm}$ l'inductance mutuelle équivalente présente des valeurs négatives dues à l'orientation vectorielle de la surface effective sur laquelle est effectué le calcul (symétrie et passage à zéro pour la configuration perpendiculaire). Pour cette taille de résonateur, l'évolution de l'inductance mutuelle est comparable à celle de la Figure.III.4.b. Pour des tailles plus petites du résonateur ($R_{\text{res}} = 30 \text{ mm}$ et $R_{\text{res}} = 15 \text{ mm}$), l'inductance mutuelle équivalente évolue d'une manière relativement constante (entre $-50 \text{ mm} < y < 0 \text{ mm}$ et $0 \text{ mm} < y < 50 \text{ mm}$) en regard de la surface du résonateur. Elles présentent respectivement des maxima de 7 nH et 5 nH à 10 mm de la surface du résonateur.

D'après ces résultats, nous avons choisi pour la suite de cette étude une taille du résonateur $R_{\text{res}} = 15 \text{ mm}$. Ce choix est basé sur l'homogénéisation de l'inductance mutuelle équivalente sur toute la surface du résonateur pour un petit tag en déplacement latéral.

A.2 . Positionnement du résonateur

Une fois que le choix de la taille du résonateur est fait, nous nous intéressons à l'optimisation de l'inductance mutuelle équivalente du système suivant la position du résonateur. Dans l'équation II.21, l'inductance mutuelle équivalente dépend des différents couplages entre la boucle du lecteur et celle du tag, le résonateur et la boucle du lecteur, le résonateur et la boucle du tag mais aussi de ses propriétés électriques. Etant donné que la

taille du résonateur est fixée à 15 mm, seuls les termes de couplage sont développés dans cette étude :

- inductances mutuelles M_{1res} entre le résonateur et la boucle du lecteur
- M_{2res} entre le résonateur et la boucle du tag.

Les résultats sont présentés pour un tag positionné à $Y= 0\text{mm}$ et un résonateur qui se déplace de $Y= -30\text{ mm}$ à $Y= 30\text{ mm}$. Les deux configurations parallèle et perpendiculaire sont traitées.

Sur la figure III.7, l'inductance mutuelle entre le résonateur et la boucle du lecteur est rapportée. Pour les deux configurations, parallèle et perpendiculaire, le même comportement et les mêmes valeurs sont observés pour l'inductance mutuelle selon le positionnement du résonateur: une valeur maximale de 13.5 nH pour un résonateur positionné près des bords de la boucle du lecteur ($Y_{res}= \pm 30\text{mm}$), cette valeur diminue quand le résonateur s'éloigne des bords de la boucle du lecteur et atteint son minimum de 8.5 nH au centre de la boucle du lecteur ($Y_{res}= 0\text{ mm}$).

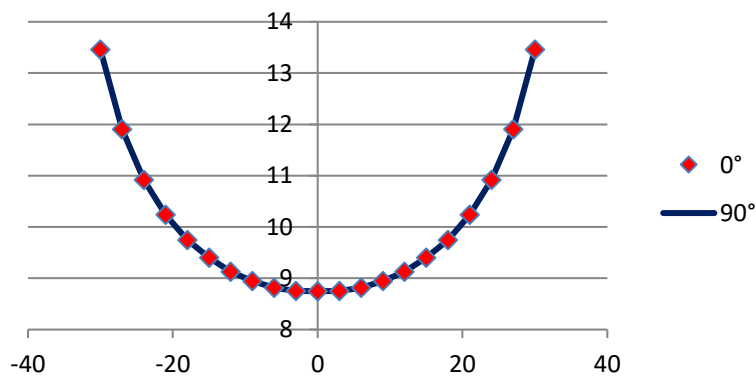


Figure III. 7 : inductance mutuelle entre le résonateur et la boucle du lecteur

Par ailleurs, les résultats de la figure III.7, montrent que la variation de l'inductance mutuelle entre la boucle du lecteur et le résonateur n'est pas affectée par la présence du tag : l'évolution de l'inductance mutuelle M_{1res} est similaire pour les deux cas parallèle et perpendiculaire.

(Fig.III.8.a) et (Fig.III.8.b) présentent respectivement l'inductance mutuelle entre le résonateur et la boucle du tag pour les configurations parallèle et perpendiculaire. La position du tag est fixe, au centre de la boucle du lecteur ($Y = 0\text{ mm}$).

En configuration parallèle, l'inductance mutuelle entre le résonateur et le tag présente deux zéros pour les positions du résonateur correspondantes à $\pm 30\text{ mm}$. Cette valeur augmente quand le résonateur se déplace vers le centre de la boucle du lecteur et atteint sa valeur maximale de 11 nH à $Y_{res}= 0\text{ mm}$. En configuration perpendiculaire, l'inductance mutuelle entre le résonateur et le tag a deux extrema de $\pm 15\text{ nH}$ correspondants à $Y_{res} = \pm 15\text{ mm}$ et deux zéros pour les positions $\pm 30\text{ mm}$ du résonateur.

Dans ce cas l'inductance mutuelle présente un passage par zéro à $Y=0\text{mm}$. D'autre part, les valeurs d'inductance mutuelle en configuration parallèle sont supérieures à celles en configuration perpendiculaire.

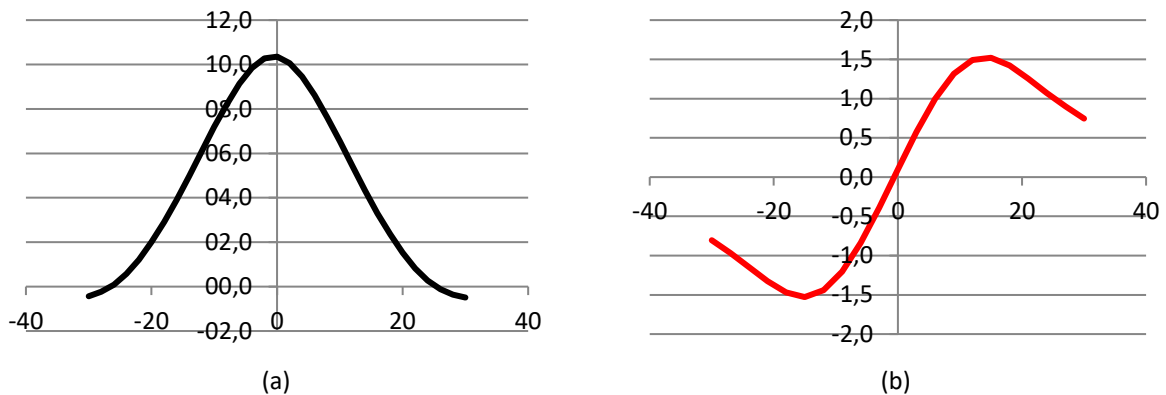


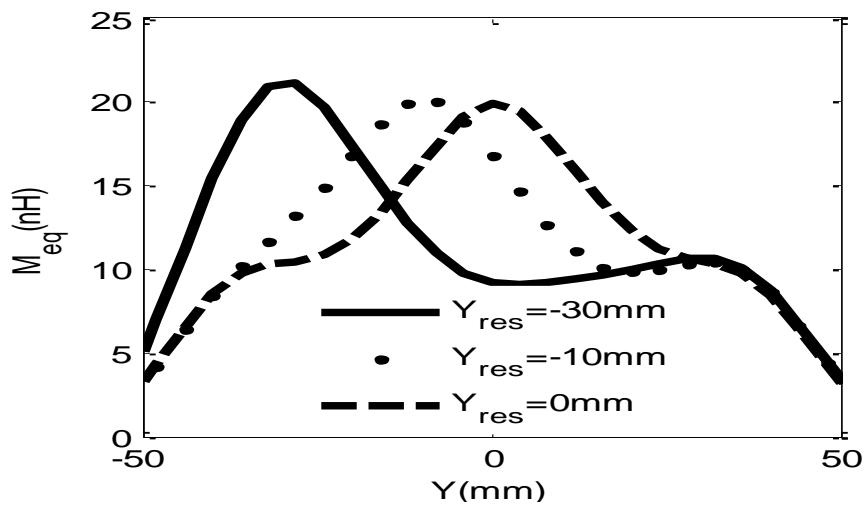
Figure III. 8 : inductance mutuelle entre le résonateur et la boucle du tag en positions parallèle (a) et perpendiculaire (b)

Les différentes inductances mutuelles étudiées par la suite sont les termes liés à l'inductance mutuelle équivalente du système. Cette dernière est évaluée sur la figure III.9 pour un tag positionnée à -30 mm, -10 mm et 0 mm. Compte tenu de la symétrie de la structure, des allures comparables peuvent être obtenues pour un résonateur positionné à 30 mm et 10 mm. Le tag se déplace de $Y= -50\text{ mm}$ à $Y= 50\text{ mm}$ et sa distance par rapport à la bi-boucles du lecteur est fixée à 10 mm. Comme montré précédemment l'ajout du résonateur et sa position agit de manière très remarquable sur tous les termes de couplages : entre la boucle du lecteur et le résonateur, entre la boucle du tag et le résonateur. L'inductance mutuelle équivalente étant calculée à partir de ces différents couplages, son évolution sur la figure III.9, varie en fonction de la position du résonateur.

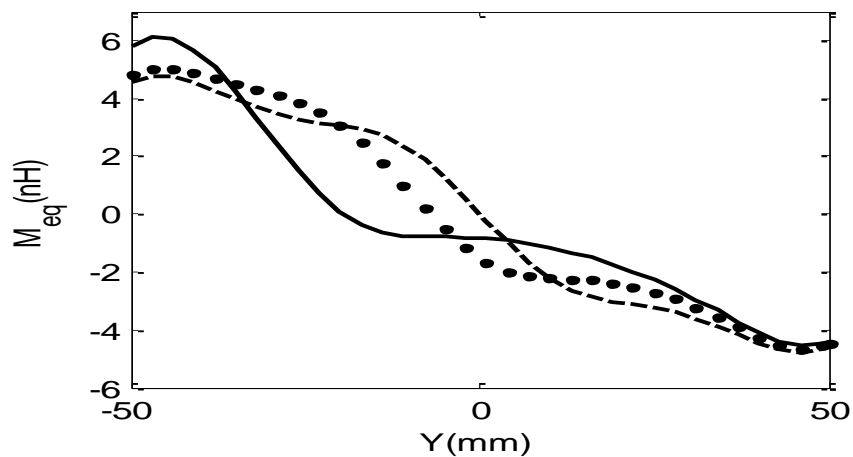
En configuration parallèle, les valeurs maximales d'inductance mutuelle équivalente (22 nH, 20 nH, 19.5 nH) sont atteintes respectivement à $Y_{res}=-30\text{ mm}$, $Y_{res}=-10\text{ mm}$ et $Y_{res}=0\text{ mm}$ qui correspondent au centre du résonateur pour ses différentes positions. L'inductance mutuelle équivalente est augmentée respectivement de 11 nH, 9 nH et 8.5 nH pour $Y_{res}= -30\text{ mm}$, $Y_{res}= -10\text{ mm}$ et $Y_{res}= 0$ (par comparaison au cas de l'inductance mutuelle d'un système sans résonateur (Figure III.4.a)). Pour un résonateur positionné à $Y_{res}= -30\text{ mm}$, son influence est la plus importante. Ces résultats confirment ceux de la figure III.7 où le maximum d'inductance mutuelle entre la boucle du lecteur et le résonateur est obtenue à $Y_{res}= -30\text{ mm}$, ainsi que, en configuration parallèle, le meilleur couplage entre le résonateur et le tag correspond au centre du résonateur (figure III.8).

En configuration perpendiculaire (Figure III.9.b), un décalage du zéro apparaît sur l'évolution de l'inductance mutuelle équivalente pour toutes les positions du résonateur. Cela est dû à l'influence du résonateur sur la distribution vectorielle des lignes de champ magnétique générée par la boucle du lecteur. Pour un résonateur positionné à -30 mm, l'inductance mutuelle équivalente est augmentée de 2nH (Figure.III.4.b). Pour les positions -

10 mm et 0 mm du résonateur, l'inductance mutuelle varie légèrement sur les bords de la boucle du lecteur (+0.5nH par rapport au cas sans résonateur Figure.III.4.b) mais présente une augmentation significative sur toute la surface du résonateur.



(a)



(b)

Figure III. 9 : inductance mutuelle équivalente pour différentes positions du résonateur en configuration parallèle (a) et perpendiculaire (b)

Pour la suite de ces travaux, nous avons choisi de positionner le résonateur au plus près du bord de la boucle du lecteur, ce qui correspond à $Y = -30\text{mm}$.

B. Distribution des lignes de champ magnétique

La figure.III.11, présente le champ magnétique généré par la bi-boucle du lecteur dans les plans (X, Y) et (Y, Z) . L'ajout du résonateur change la distribution du champ magnétique généré par une boucle conventionnelle (Figure.III.2). L'amplitude du champ magnétique est maximale sur les bords de la boucle du lecteur et du résonateur. Entre les bords du

résonateur et le centre de la boucle du lecteur, on distingue un zéro du champ magnétique généré. Ceci est dû à la somme vectorielle du champ magnétique généré, en raison du sens et de la direction du courant (Biot et Savart), dans la boucle du lecteur et du résonateur.

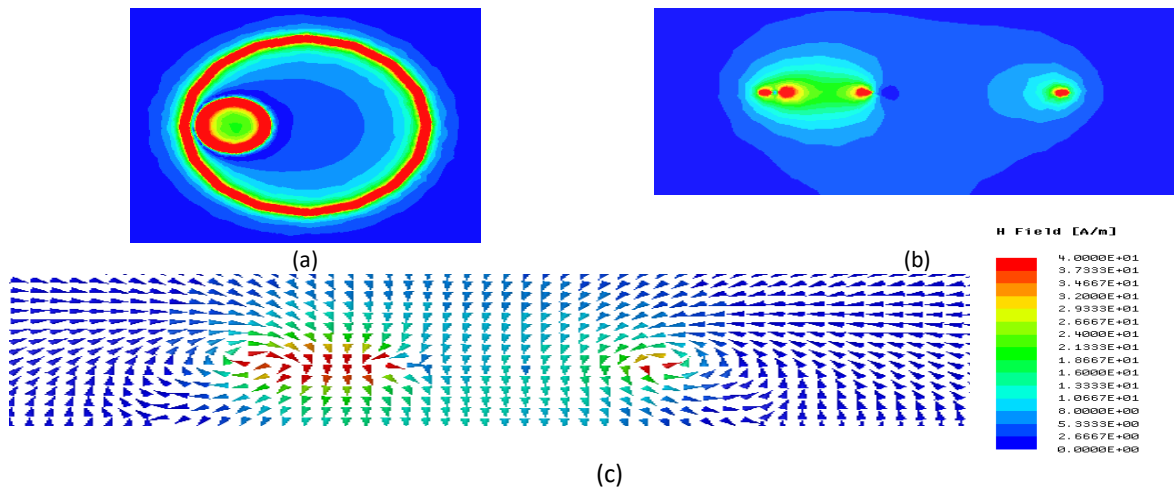


Figure III. 10 : Amplitude et lignes du champ magnétique généré par la bi-boucles du lecteur

Sur la fig.III.10.c, nous pouvons visualiser les lignes du champ magnétique avec un résonateur coplanaire. L'addition du résonateur modifie la distribution vectorielle des lignes du champ magnétique générée par la boucle du lecteur : dans le cas d'une boucle conventionnelle, les lignes du champ magnétique tournent autour des bords de la boucle. Cette distribution explique clairement l'évolution de l'inductance mutuelle dans les deux cas parallèle et perpendiculaire.. Ainsi, une modification de la variation de l'évolution de l'inductance mutuelle équivalente est observée par l'ajout du résonateur.

La structure proposée est désormais étudiée par simulations et mesures pour un prototype boucle du lecteur avec un résonateur positionné à -30mm. La structure simulée est conçue sur HFSS en utilisant un conducteur parfait. En mesures, le prototype est réalisé à l'aide d'une micro graveuse sur cuivre (gravure à l'anglaise) comme le montre la figure III.11.

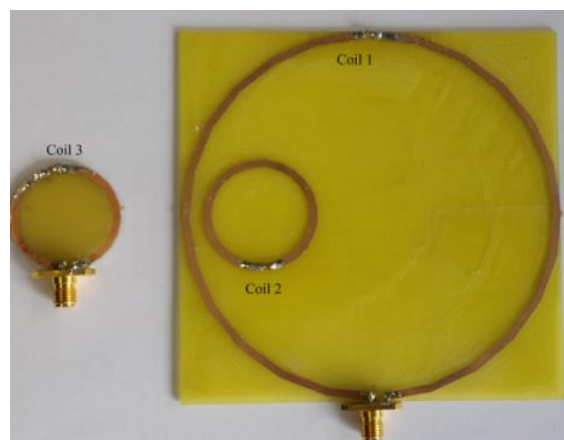


Figure III. 11 : prototype réalisé : bi-boucles di lecteur et boucle du tag

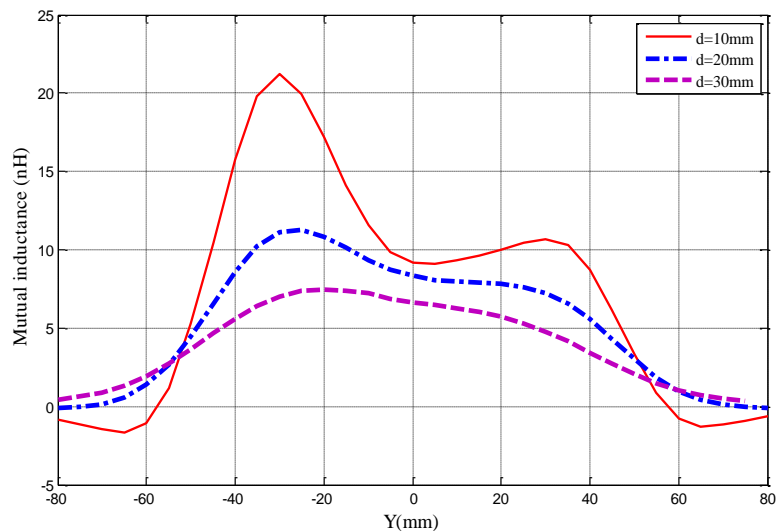
III.2.3 Etude numérique et mesure du système :

La structure proposée est étudiée numériquement dans cette partie en utilisant HFSS. Les résultats de simulations et les calculs du chapitre II sont confirmés par des mesures.

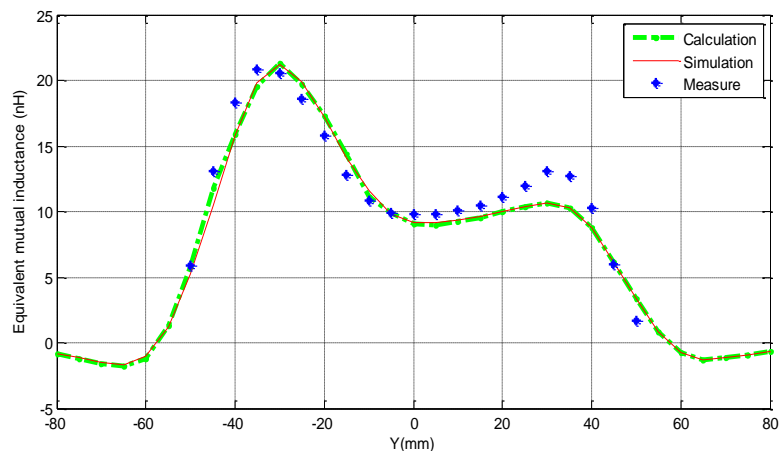
A. Configuration parallèle :

A.1. Inductance mutuelle avec variation de la distance entre le lecteur et le tag

Dans cette partie nous évaluons l'influence de la distance entre la boucle du lecteur et celle du tag, sur l'inductance mutuelle équivalente : la variation de la distance entre la boucle du lecteur (bi-boucle) et le tag est de 10 mm à 30 mm et le déplacement latéral Y est de -100 mm à 100 mm. Les résultats de simulations numériques sont comparés à l'équation (II.21 : calcul d'inductance mutuelle équivalente du chapitre II) ainsi qu'aux résultats de mesures (Figure.III.12).



(a)



(b)

Figure III. 12 : Inductance mutuelle équivalente simulée et mesurée du système lecteur bi-boucle et tag en fonction du déplacement latéral : Variation de la distance (a) et comparaison calcul, simulation et mesure (b)

A une distance de 10 mm, l'inductance mutuelle équivalente présente deux pics : le premier à $Y = -30\text{mm}$ correspond au centre de résonateur et le deuxième, vers le bord de la boucle lecteur dû au couplage avec le tag (inductance mutuelle entre la boucle 1 et 2). Cependant, l'ajout du résonateur augmente l'inductance mutuelle équivalente de 10 nH (11nH à 21nH) « au-dessus » du résonateur. Ces résultats de simulation sont validés par le calcul donné par l'équation(II.21). La comparaison montre une bonne concordance ce qui permet de valider l'équation(II.21). En revanche, les résultats de mesures présentent un décalage latéral sur le bord de la bi-boucle du lecteur. Ce décalage peut être dû à l'utilisation des pistes en cuivre (de 2 mm de largeur) sur un substrat FR4. En simulation, les boucles sont conçues avec du PEC : Perfect Conductor et sans substrat pour limiter le temps de calcul.

L'inductance mutuelle équivalente est proportionnelle au flux généré par le lecteur : elle diminue avec l'augmentation de la distance. Ce principe est modélisé analytiquement par la loi de Biot-Savart et vérifié dans notre cas pour trois distances différentes (10, 20 et 30 mm). Pour 20 mm et 30 mm, l'inductance mutuelle équivalente se dégrade par comparaison à la distance de 10mm. Les pics d'inductance mutuelle équivalente sont moins visibles sur le bord de la bi-boucle du lecteur (pour les distances de 20 mm et 30 mm). L'influence du résonateur apparaît à -30 mm (centre du résonateur) par une augmentation d'inductance mutuelle équivalente de 4 nH et 1.5 nH, respectivement, pour 20 mm et 30 mm.

A.2. Résistance mutuelle

Pour étudier l'influence du résonateur sur la partie réelle de l'impédance mutuelle et afin de valider l'équation (II.22), nous traçons sur la figure.III .13, la résistance mutuelle pour une distance de 10 mm et une variation latérale du tag de -80 mm à 80 mm.

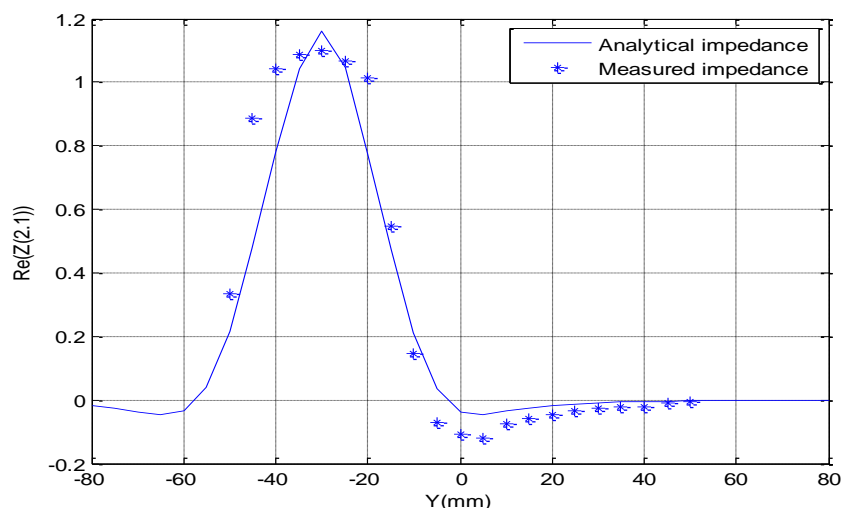


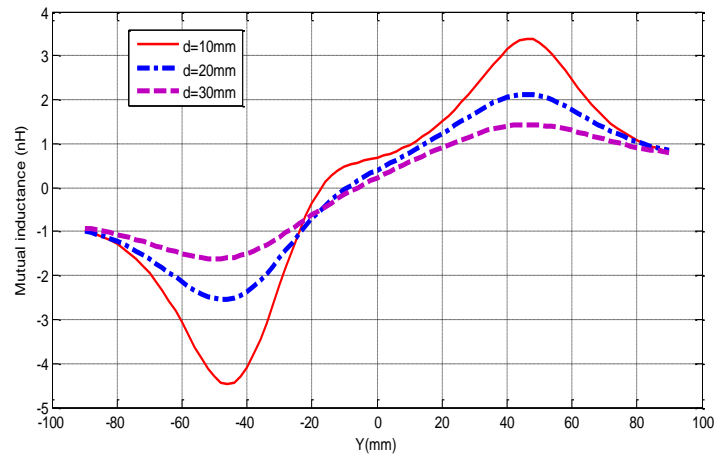
Figure III. 13 : : Partie réelle de l'impédance équivalente entre la bi-boucle du lecteur et le ta

La résistance mutuelle calculée concorde avec la mesure et nous pouvons noter un pic de résistance mutuelle qui correspond au centre du résonateur.

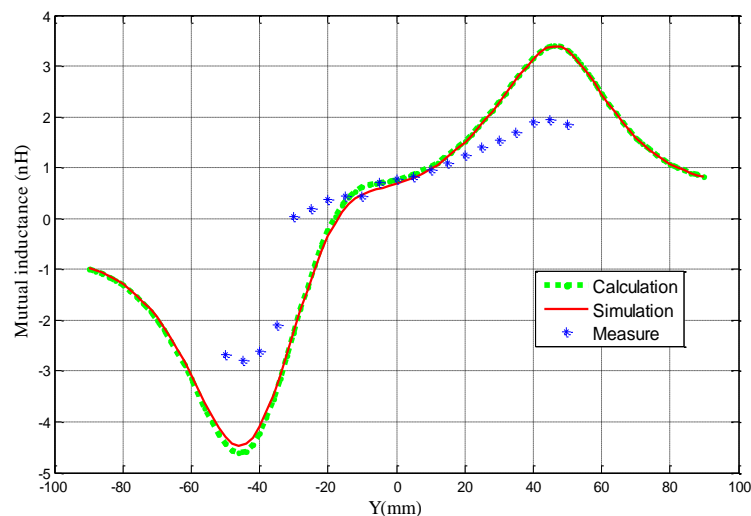
B. Configuration perpendiculaire

B. 1. Inductance mutuelle avec variation de la distance entre le lecteur et le tag

Pour la configuration perpendiculaire, nous avons tracé sur la figure (Fig. III.14) la variation d'inductance mutuelle en fonction de la distance « d » pour un déplacement latéral de tag de -100 mm à 100 mm.



(a)



(b)

Figure III. 14: Inductance mutuelle équivalente simulée et mesurée en fonction de la distance (a) et du déplacement latéral (b)

Dans le cas de la configuration perpendiculaire, l'inductance mutuelle équivalente présente un nul au centre de la boucle du lecteur et des maximums sur ses bords. Cette allure peut être expliquée par la distribution des lignes de champ magnétique générée par une boucle circulaire. L'ajout du résonateur perturbe ce fonctionnement, cela peut être vu dans la figure.III.14 par un décalage du zéro d'inductance mutuelle équivalente vers le bord

du résonateur ainsi qu'une augmentation de 2 nH « au-dessus » du résonateur pour une distance de 10mm. D'autre part, l'inductance mutuelle équivalente diminue avec l'augmentation de la distance. Dans le cas de cette configuration, les valeurs d'inductance mutuelle équivalente sont faibles par comparaison avec le cas de la configuration parallèle. Pour une distance de 10 mm, les résultats de simulation sont comparés avec les résultats de la mesure et du calcul analytique. Les résultats de simulation et de calcul montrent une très bonne concordance tandis que la mesure présente un décalage du zéro d'inductance mutuelle vers le centre de résonateur ainsi qu'une chute d'inductance mutuelle équivalente (à cause de l'influence du substrat qui n'est pas considéré en simulation).

B. 2. Résistance mutuelle

Une comparaison de la partie réelle de l'impédance mutuelle avec et sans la présence de résonateur est reportée sur la figure. III.15. Dans le cas sans résonateur, la résistance mutuelle est nulle. A contrario, l'ajout de résonateur crée une variation importante de cette dernière « au niveau » de la surface du résonateur. Dans notre cas, les valeurs de la résistance mutuelle sont cependant très faibles (dépendance de l'inductance mutuelle qui est aussi faible) ce qui ne nous a pas permis d'avoir une mesure fiable avec le VNA.

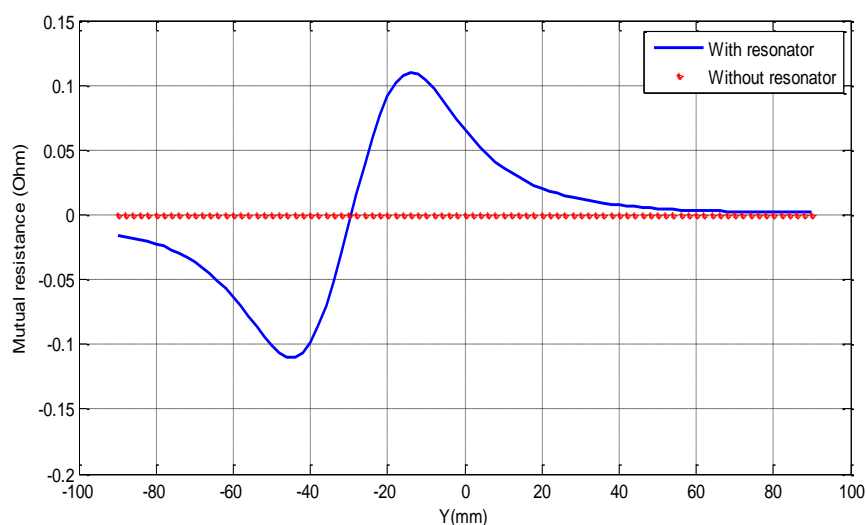


Figure III. 15 : : Résistance mutuelle avec et sans résonateur

b. Paramètres d'impédance propre équivalente du lecteur bi-boucle et tag

Dans l'équation (II.43), l'impédance d'entrée dépend des impédances propres équivalentes de la boucle du lecteur et du tag ainsi que de l'impédance mutuelle équivalente entre les deux circuits. Les parties réelles et imaginaires des impédances propres équivalentes sont reportées sur la figure III.16 en présence d'un résonateur sur la boucle du lecteur. (L'inductance mutuelle équivalente a été vérifiée précédemment). Ces résultats montrent la dépendance des impédances propres en fonction de l'inductance mutuelle entre chacune des boucles du lecteur et tag avec le résonateur et confirment les équations

de l'étude analytique. Dans la partie qui suit, l'influence de l'ajout du résonateur sur tous les termes de la matrice impédance est étudiée par simulation et mesure.

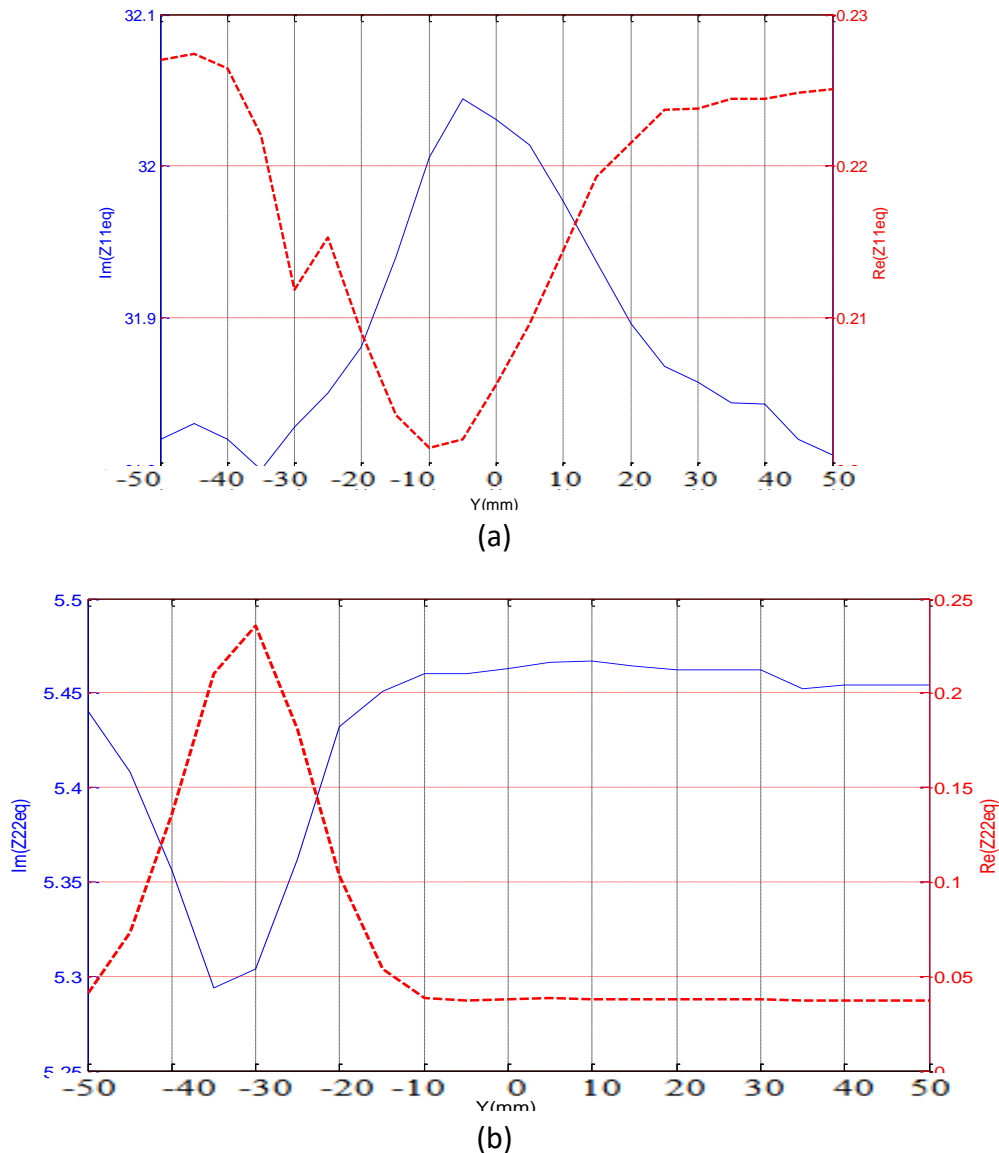


Figure III. 16: Paramètres d'impédance propre équivalente du lecteur et tag

III.2.4. Effet sur la matrice impédance

Dans le chapitre II, nous avons développé différents calculs de la matrice impédance d'un système en champ proche en présence ou non des résonateurs. Ces calculs sont confirmés dans cette partie par l'étude de l'évolution de la matrice impédance dans le cas d'un système « champ proche » conventionnel et d'un tel système incluant un résonateur. Les résultats sont présentés pour un déplacement latéral de la boucle du tag (en configuration parallèle) et pour une distance de 10 mm entre la boucle du lecteur (avec et sans résonateur) et celle du tag.

Les résultats simulés concernent la structure où les boucles sont conçues avec un conducteur parfait PEC) pour réduire le temps de calcul sous HFSS. En mesure, les résultats sont présentés pour des boucles réalisées avec du cuivre. Les différents matériaux utilisés

respectivement en simulation (sans substrat) et en mesure (avec substrat FR4) génèrent différentes propriétés électriques (par conséquent, différentes fréquences de résonance). Le but de cette partie est de confirmer le modèle électrique développé par la comparaison de l'évolution des paramètres d'impédance équivalente autour de la fréquence de résonance.

A. Impédance propre du lecteur : Z_{11} et Z_{11eq}

Pour trois positions de la boucle du tag: $Y = -50$ mm, $Y = -30$ mm et $Y = 0$ mm correspondantes respectivement aux positions où la boucle du tag est au-dessus des bords de l'antenne du lecteur, du centre du résonateur et du centre de l'antenne du lecteur, nous avons tracé sur la figure III.16 , l'évolution de la partie imaginaire et réelle de l'impédance de la boucle du lecteur dans les deux cas sans (Z_{11}) et avec résonateur (Z_{11eq}).

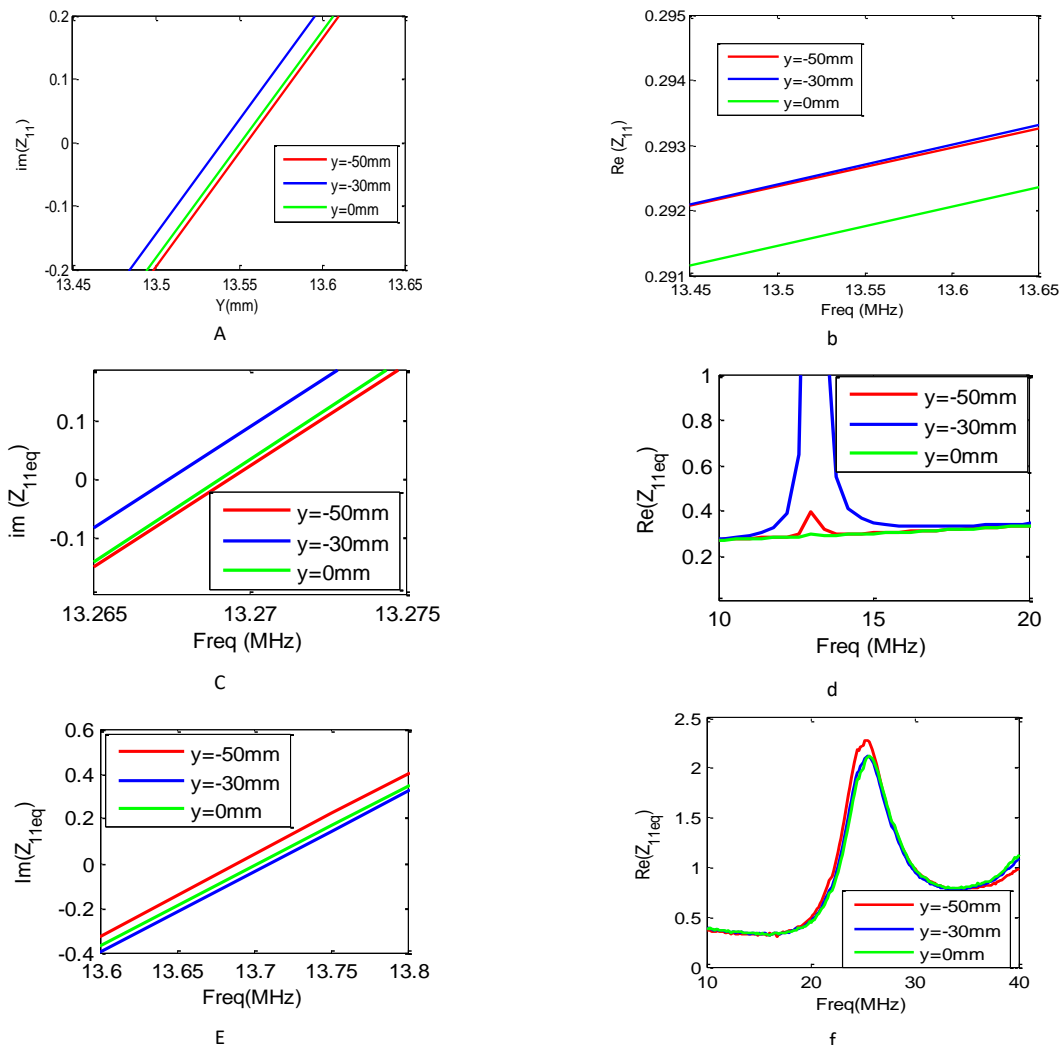


Figure III. 17: Paramètres d'impédance conventionnelle et équivalente pour la boucle du lecteur

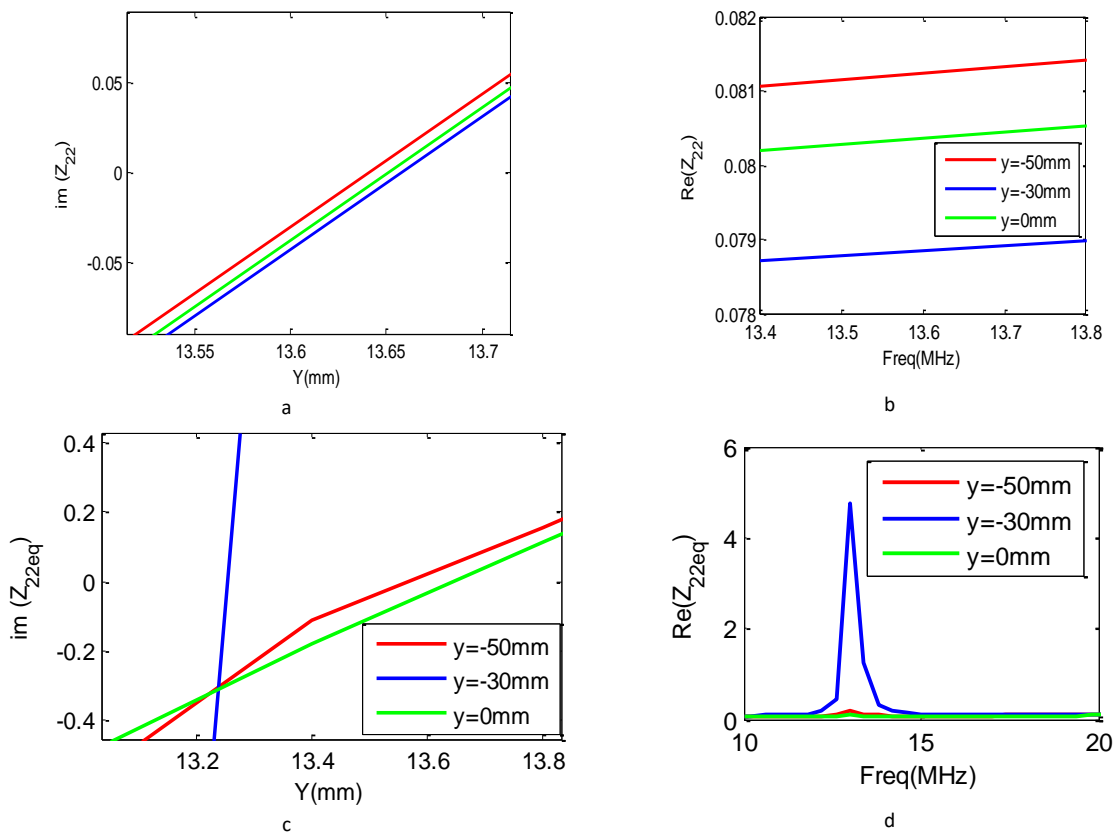
Dans le cas sans résonateur (Fig.III.17 a, b), la fréquence de résonance est décalée en fonction de la position du tag, mais le décalage de fréquence, dans ce cas, peut être négligeable : la fréquence de résonance de la boucle du lecteur est de 13,55 MHz. L'ajout du résonateur génère un décalage de fréquence; la fréquence de résonance de la boucle du lecteur est de 13,27 MHz pour les différentes positions latérales du tag. L'amplitude de la

partie réelle est modifiée en fonction du déplacement de la boucle du tag. Son maximum dans le cas sans résonateur est de $0,29 \Omega$. Cette valeur est augmentée avec l'ajout du résonateur. En effet, à $y = 0 \text{ mm}$, la variation de la partie réelle est négligeable par rapport au cas $y = -50 \text{ mm}$ et $y = -30 \text{ mm}$, où la partie réelle de l'impédance Z_{11eq} est fortement influencée par l'ajout du résonateur. En outre, les résultats sont confirmés par des mesures. Dans les résultats mesurés (Fig.III.17 E, F), le décalage de fréquence selon le déplacement du tag est confirmé. Les résultats de l'impédance équivalente de la boucle du lecteur (partie réelle et imaginaire de Z_{11eq}) présentent la même allure et le même comportement par rapport aux résultats de simulations (tracés à partir des calculs du chapitre II).

B. Impédance propre du tag : Z_{22} et Z_{22eq}

De la même manière, sur la figure III.18, la variation de la partie réelle et imaginaire de l'impédance du tag est évaluée pour un système conventionnel (Z_{22}) et un système avec un résonateur (Z_{22eq}).

Dans le système conventionnel (sans résonateur), la fréquence de résonance de la boucle du tag est autour de $13,6 \text{ MHz}$. Suivant le positionnement de la boucle du tag, la fréquence de résonance et l'amplitude de la partie réelle de l'impédance équivalente du tag sont modifiées. Cette variation est négligeable par rapport à la variation dans le cas du système avec résonateur. La variation maximale des parties réelle et imaginaire de l'impédance de la boucle du tag est notée pour $y = -30 \text{ mm}$ (lorsque la boucle du tag est au-dessus du résonateur). Les résultats des équations calculées sont confirmés par des mesures, où la fréquence de résonance mesurée de la boucle du tag est de 15 MHz .



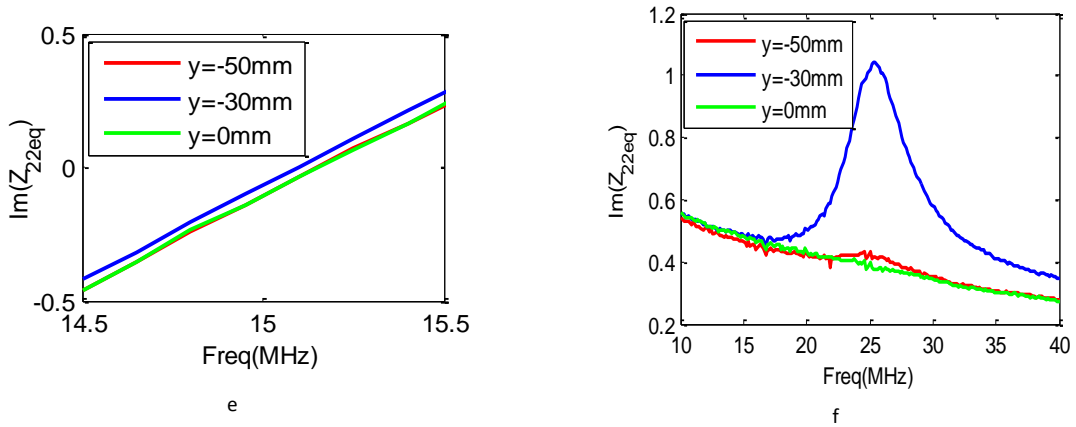
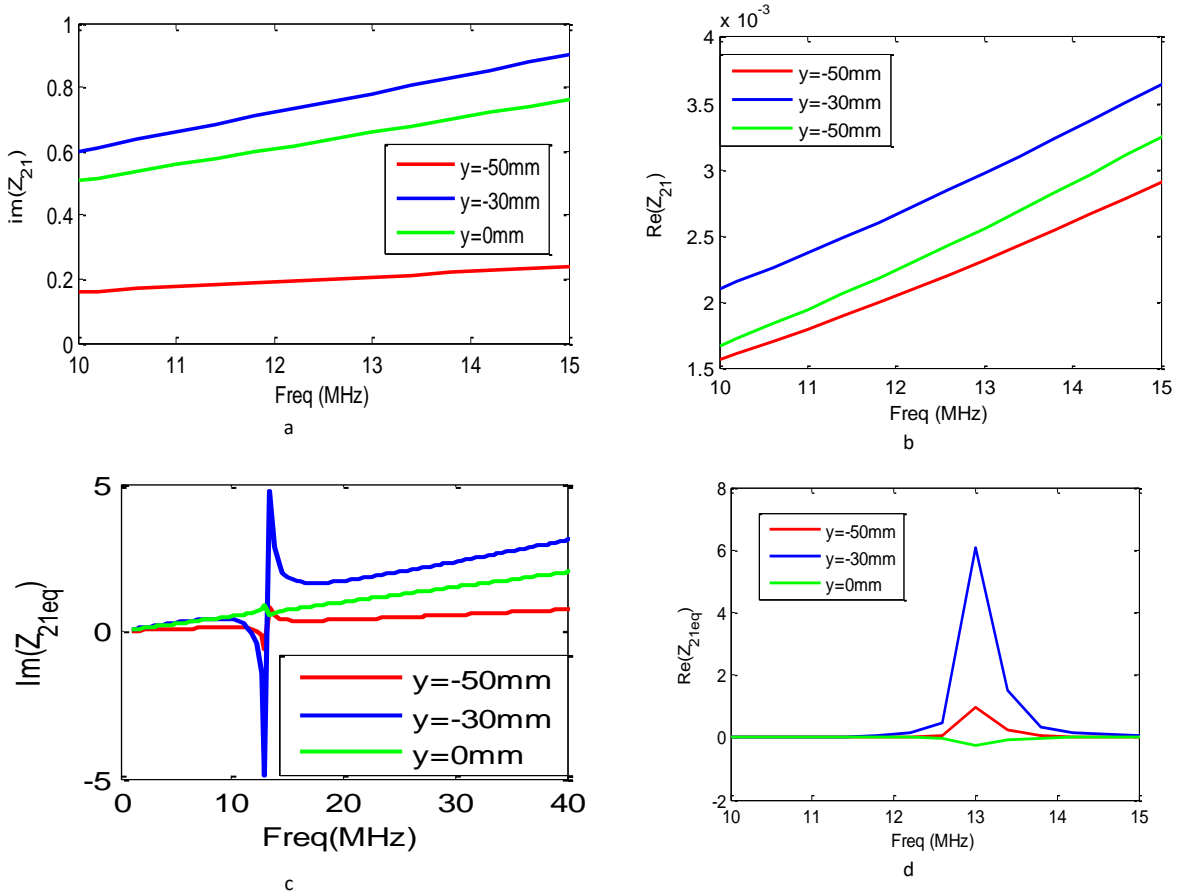


Figure III. 18: Paramètres d'impédance conventionnelle et équivalente pour la boucle du tag

C. Impédance mutuelle du système : Z_{12} et Z_{12eq}

Dans cette partie, nous nous intéressons aux paramètres d'impédance mutuelle. Dans le système conventionnel (figure III.19.a et b), la partie imaginaire est utilisée pour calculer l'inductance mutuelle entre la boucle du lecteur et celle du tag, tandis que la partie réelle est très faible et proche de zéro.



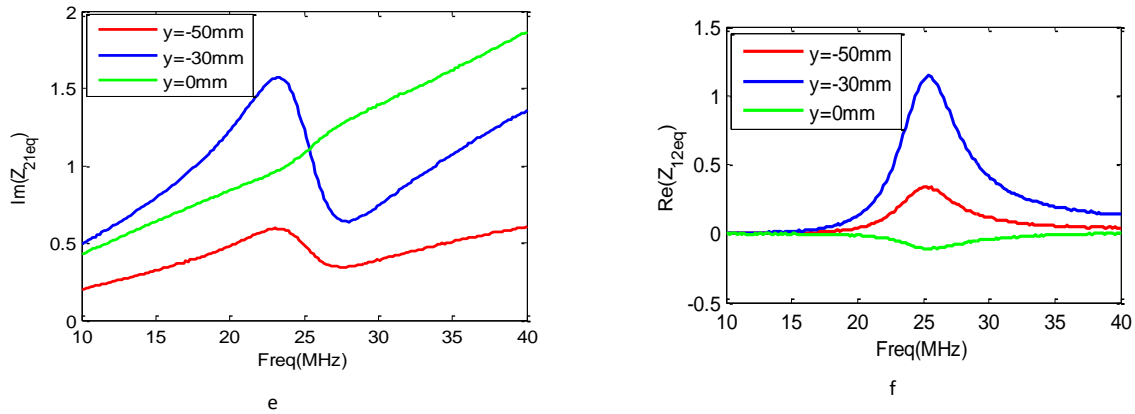


Figure III. 19: Partie imaginaire et réelle de l'impédance mutuelle conventionnelle (a,b) et équivalente simulée (c,d) et mesurée (e,f)

Quelques variations de ces paramètres apparaissent en fonction du déplacement de la boucle du tag. Alors que dans le système avec résonateur, les parties réelles et imaginaires de l'impédance Z_{12} sont modifiées. En simulation (figure III.19.c et d), le maximum de cette variation est observé autour de 13 MHz pour $y = -30$ mm. En mesures (Figure III.19.e et f), cette variation atteint son maximum à 25 MHz.

Ces résultats confirment que l'ajout du résonateur modifie tous les paramètres de la matrice impédance. Les impédances équivalentes des boucles du lecteur et du tag sont modifiées. Le calcul développé dans l'équation (II.18) est validé par comparaison entre les simulations et les mesures. L'intérêt de l'ajout du résonateur est représenté par l'augmentation du module de l'impédance mutuelle du système. Un décalage de fréquence est généré si la partie imaginaire est modifiée. Selon le positionnement latéral de la boucle du tag, la variation des paramètres d'impédance est plus ou moins importante lorsque la boucle du tag est au-dessus du résonateur ($y = -30$ mm).

III.2.5 Effet sur les impédances vues du lecteur et tag

Comme énoncé par calcul (équation II.43), les impédances vues du lecteur et du tag sont modifiées avec l'ajout du résonateur. Dans cette partie, l'effet du résonateur sur ces impédances est étudié par simulation dans les deux configurations parallèle et perpendiculaire.

A. Cas parallèle :

En configuration parallèle, les amplitudes des impédances équivalentes d'entrée et de sortie sont respectivement augmentées de 7Ω et 4.6Ω (sur la surface de la boucle du lecteur incluant le résonateur : de $Y=-50$ mm à $Y=0$ mm). Dans le cas du système conventionnel, les amplitudes des impédances d'entrée et sortie présentent deux maxima correspondant aux bords de la boucle du lecteur.

l'évolution de la phase de l'impédance d'entrée et de sortie dépend du positionnement de la boucle du tag par le biais de l'inductance mutuelle entre la boucle du lecteur et celle du tag, alors que, dans la structure avec un résonateur, l'évolution de la phase de l'impédance équivalente d'entrée et de sortie dépend non seulement du couplage

mutuel entre la boucle du lecteur et celle du tag, mais aussi des propriétés électriques du résonateur (γ) et les inductances mutuelles équivalentes ajoutées (M_{1res} et M_{2res}). Les déphasages dans ce cas sont plus élevés que ceux d'une structure conventionnelle. Ceci signifie un changement de fréquence dû aux impédances transformées.

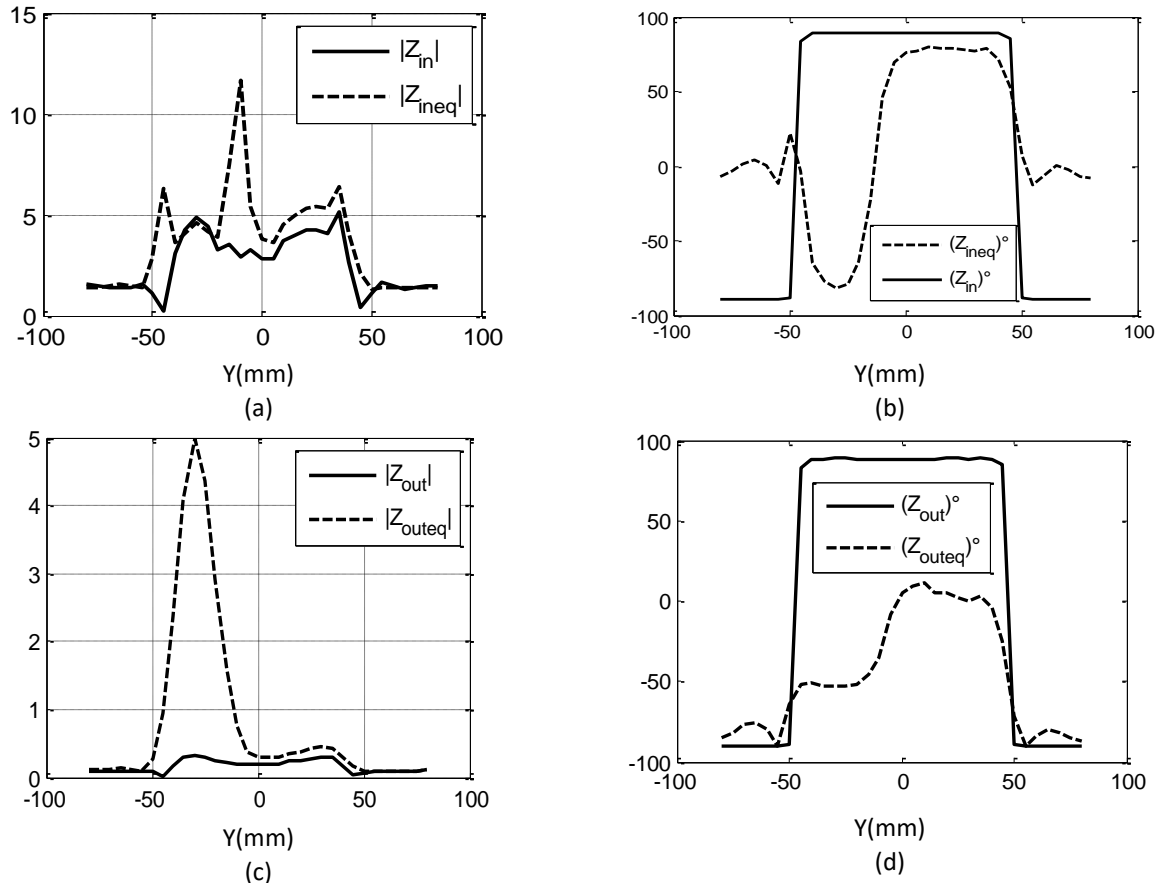


Figure III. 20: Amplitude et phase des impédances et impédances équivalentes d'entrée (a, b) et sortie (c, d)

B. Cas perpendiculaire :

En configuration perpendiculaire, les amplitudes des impédances équivalentes d'entrée et de sortie sont respectivement augmentées de 2.1 Ω et 0.2 Ω . Ces valeurs sont comparées à celles des bords de la boucles du lecteur : 2.2 Ω et 0.42 Ω respectivement pour l'impédance d'entrée et celle de sortie (valeur maximale aux bords du lecteur $y = -50$ mm en raison des meilleures conditions de couplage entre la boucle du lecteur et celle du tag dans cette zone). Dans le système conventionnel, les amplitudes des impédances d'entrée et sortie comportent deux minima de 0,5 Ω et 0.1 Ω correspondantes au centre de la boucle du lecteur. Pour les zones surface et bords de la boucle du lecteur ($0 \text{ mm} < Y < 100 \text{ mm}$), les amplitudes des impédances ne sont pas affectées par la présence du résonateur. Les phases des impédances d'entrée et de sortie sont également modifiées par l'ajout du résonateur. Dans ce cas, l'évolution de la phase de l'impédance d'entrée équivalente comporte deux parties, valeurs positives et négatives. La limite de ces deux parties est un zéro proche du centre de la boucle du lecteur ($Y = 0 \text{ mm}$).

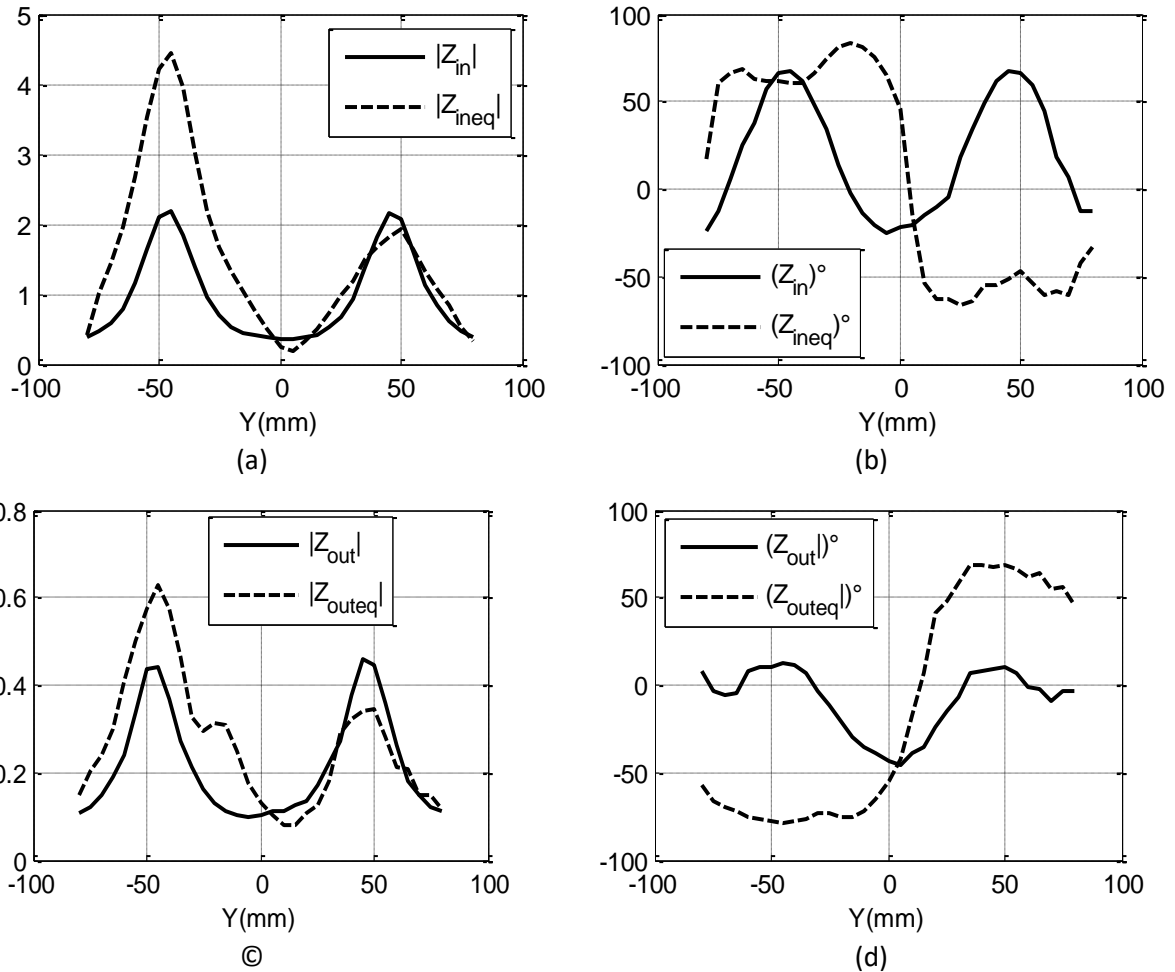


Figure III. 21: Amplitude et phase des impédances et impédances équivalentes d'entrée (a, b) et sortie (c, d)

L'amplitude et la phase de l'impédance d'entrée et celle de sortie en configuration parallèle et perpendiculaire sont modifiées. Cette variation est due à l'ajout du résonateur (en raison de la variation des paramètres de la matrice d'impédance). Par ailleurs, nous pouvons noter que l'impédance d'entrée et celle de sortie varient aussi en fonction du positionnement de la boucle du tag; cette variation est négligeable en configuration parallèle par rapport à l'effet de l'ajout du résonateur. L'influence du déplacement de la boucle du tag sur l'impédance d'entrée est plus importante dans le cas d'une configuration perpendiculaire.

Dans cette partie, nous déduisons que l'ajout du résonateur améliore le couplage mutuel entre la boucle du lecteur et celle du tag, mais crée un décalage de phase sur les impédances équivalentes d'entrée et de sortie. L'utilisation d'un tel système exige la modification du circuit électrique du lecteur et du tag, en fonction des propriétés électriques du résonateur (accord,...) et de son positionnement à l'intérieur de la surface de la boucle du lecteur. Le travail en cours concerne un circuit d'adaptation automatique basé sur les équations (5 et 6). La fréquence de décalage dans la RFID HF sera étudiée et corrigée en utilisant des capacités à commutation automatique.

III.2.3 Système antenne multi résonateurs :

Afin d'exploiter toute la surface de la boucle du lecteur, plusieurs résonateurs peuvent être ajoutés. Comme vu précédemment, le résonateur modifie la répartition du champ magnétique ainsi que les paramètres de la matrice impédance équivalente du système, et crée par conséquent un décalage de fréquence de la boucle du lecteur. Dans cette partie, nous abordons l'effet de l'ajout de plusieurs résonateurs sur la surface de la boucle du lecteur en nous limitant à deux cas: (i) deux résonateurs puis (ii) le cas général (avec plus de deux résonateurs). Nous présentons pour chacun de ces cas les éléments de la matrice impédance équivalente, que nous utilisons par la suite pour évaluer l'inductance équivalente du système ainsi que le décalage de fréquence.

A. Cas de deux résonateurs

Sur la figure.III.22 est montré le prototype réalisé avec deux résonateurs ainsi que son modèle électrique équivalent.

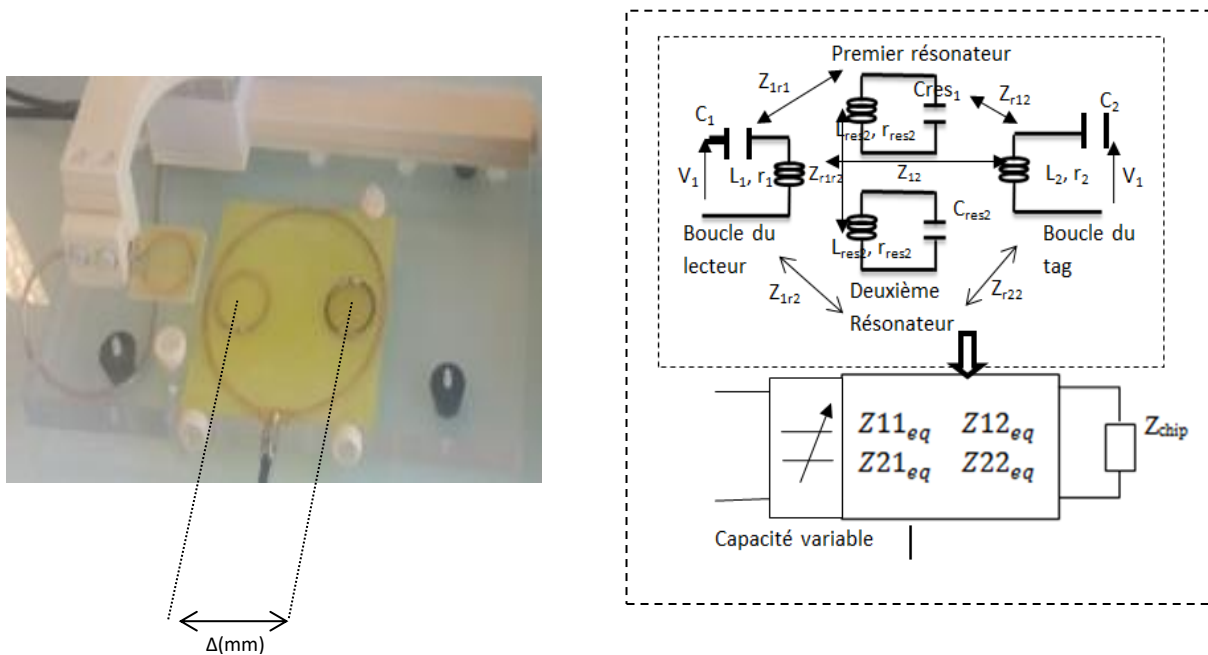


Figure III. 22: Prototype réalisé avec deux résonateurs ainsi que son modèle électrique équivalent

Le prototype est constitué d'une boucle sur la surface de laquelle on ajoute deux résonateurs. L'ajout du résonateur 2, crée d'autres termes de couplage mutuels par rapport au cas « à un résonateur », comme le couplage entre les résonateurs par exemple.

Dans le cas de deux résonateurs, les éléments de la matrice impédance équivalente sont exprimés par (III.4). Où :

Z_{11} , Z_{22} : sont les impédances de la boucle du lecteur et celle du tag (sans éléments couplés dans leur voisinage)

Z_{1r1} (ou Z_{r11}), Z_{1r2} (ou Z_{r12}): sont respectivement les impédances mutuelles entre la boucle du lecteur et le premier résonateur, la boucle du lecteur et le deuxième résonateur.

Z_{r1r2} (ou Z_{r1r2}) est l'impédance mutuelle entre le premier et le deuxième résonateur.

Z_{cr1} , Z_{cr2} , Z_{r1} et Z_{r2} sont respectivement les parties imaginaires et réelles des impédances des résonateurs.

Dans l'équation III.4, les paramètres d'impédance équivalente sont modifiés en fonction des propriétés électriques du deuxième résonateur, de l'impédance mutuelle entre le deuxième résonateur et la boucle du lecteur, de l'impédance mutuelle entre le deuxième résonateur et la boucle du tag ainsi que de l'impédance mutuelle entre les deux résonateurs.

$$\begin{aligned}
 \left(Z_{11}^{eq} \right)_{n=2} &= \left(Z_{11} + \frac{Z_{1r1}^2}{Z_{cr1} - Z_{r1}} \right) + \frac{\left(Z_{1r2} + \frac{Z_{2r1}Z_{r1}r_2}{Z_{cr1} - Z_{r1}} \right)^2}{Z_{cr2} - \left(Z_{r2} + \frac{Z_{r1}r_2}{Z_{cr1} - Z_{r1}} \right)} \\
 \left(Z_{12}^{eq} \right)_{n=2} &= \left(Z_{12} + \frac{Z_{1r1}Z_{r1}r_2}{Z_{cr1} - Z_{r1}} \right) + \frac{\left(Z_{1r2} + \frac{Z_{1r2}Z_{r2}r_1}{Z_{cr1} - Z_{r1}} \right) \left(Z_{r2}^2 + \frac{Z_{r2}r_1Z_{r1}r_2}{Z_{cr1} - Z_{r1}} \right)}{Z_{cr2} - \left(Z_{r2} + \frac{Z_{r1}r_2}{Z_{cr1} - Z_{r1}} \right)} \\
 \left(Z_{21}^{eq} \right)_{n=2} &= \left(Z_{21} + \frac{Z_{r1}r_2Z_{1r1}}{Z_{cr1} - Z_{r1}} \right) + \frac{\left(Z_{2r1} + \frac{Z_{r1}r_2Z_{r2}r_2}{Z_{cr1} - Z_{r1}} \right) \left(Z_{r11} + \frac{Z_{r1}r_2Z_{r2}r_1}{Z_{cr1} - Z_{r1}} \right)}{Z_{cr2} - \left(Z_{r2} + \frac{Z_{r1}r_2}{Z_{cr1} - Z_{r1}} \right)} \\
 \left(Z_{22}^{eq} \right)_{n=2} &= \left(Z_{22} + \frac{Z_{2r1}^2}{Z_{cr1} - Z_{r1}} \right) + \frac{\left(Z_{2r2} + \frac{Z_{2r1}Z_{r1}r_2}{Z_{cr1} - Z_{r1}} \right)^2}{Z_{cr2} - \left(Z_{r2} + \frac{Z_{r1}r_2}{Z_{cr1} - Z_{r1}} \right)}
 \end{aligned} \tag{III.4}$$

Afin d'évaluer le couplage entre les résonateurs dans une structure multi-résonateurs, nous optons pour une méthode comparative des inductances mutuelles équivalentes dans deux cas de figure : en négligeant et en tenant compte du couplage entre résonateurs. Supposons que le couplage entre les résonateurs est négligeable, les éléments de la matrice impédance équivalentes deviennent :

$$\begin{aligned}
\left(Z_{11}^{eq} \right)_{n=2} &= \left(Z_{11} + \frac{Z_{1r_1}^2}{Z_{cr1} - Z_{r1}} \right) + \frac{\left(Z_{1r_2} \right)^2}{Z_{cr2} - \left(Z_{r_2} \right)} \\
\left(Z_{12}^{eq} \right)_{n=2} &= \left(Z_{12} + \frac{Z_{1r_1} Z_{r_1 2}}{Z_{cr1} - Z_{r1}} \right) + \frac{\left(Z_{1r_2} \right) \left(Z_{r_2 2} \right)}{Z_{cr2} - \left(Z_{r_2} \right)} \\
\left(Z_{21}^{eq} \right)_{n=2} &= \left(Z_{21} + \frac{Z_{r_1 2} Z_{1r_1}}{Z_{cr1} - Z_{r1}} \right) + \frac{\left(Z_{r_2 1} \right) \left(Z_{r_1 1} \right)}{Z_{cr2} - \left(Z_{r_2} \right)} \\
\left(Z_{22}^{eq} \right)_{n=2} &= \left(Z_{22} + \frac{Z_{2r_1}^2}{Z_{cr1} - Z_{r1}} \right) + \frac{\left(Z_{2r_2} \right)^2}{Z_{cr2} - \left(Z_{r_2} \right)}
\end{aligned} \tag{III.5}$$

L'optimisation du couplage mutuelle (inductance mutuelle équivalente) est faite sur la Figure.III.23 pour différentes valeurs de Δ (distance entre les deux résonateurs) en utilisant l'équation III.4 (en tenant compte du couplage entre résonateurs). D'après les résultats, la l'évolution de l'inductance mutuelle équivalente entre la structure multi-boucles du lecteur et le tag (qui se déplace pour $-50 \text{ mm} < Y < 50 \text{ mm}$) varie en fonction de la distance Δ entre les résonateurs.

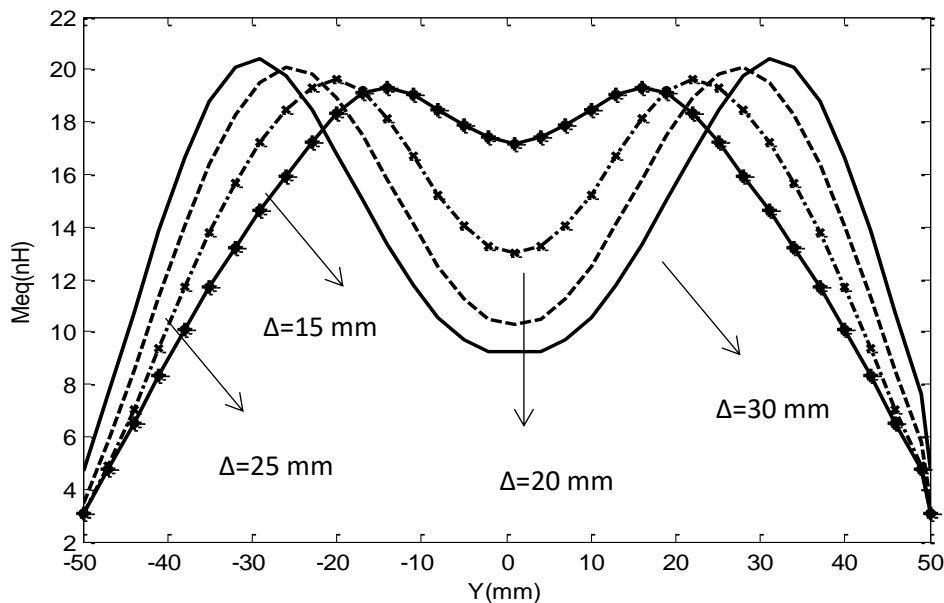


Figure III. 23. inductance mutuelle équivalente pour différentes valeurs de Δ (distance entre résonateurs).

Suite à ces résultats, nous déduisons que l'inductance mutuelle équivalente dépend du couplage entre les résonateurs. Ce terme de couplage ne peut être négligé que pour des distances entre résonateurs suffisamment élevées.

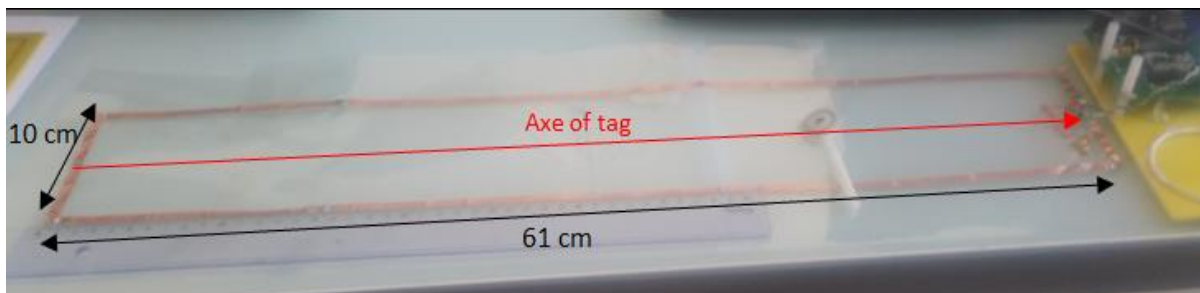
III.2.5. Validation expérimentale

Plusieurs prototypes d'antennes du lecteur avec résonateurs ont été développés dans la section précédente. L'amélioration de l'inductance mutuelle (équivalente) est confirmée par simulation et mesure. En revanche, ces structures présentent un déphasage des paramètres d'impédance, lié à la présence du ou des résonateurs sur la boucle du lecteur. Ceci est interprété par un décalage de la fréquence de fonctionnement du système accordé. La validation expérimentale est consacrée aux mesures du décalage de fréquence et de détection RFID.

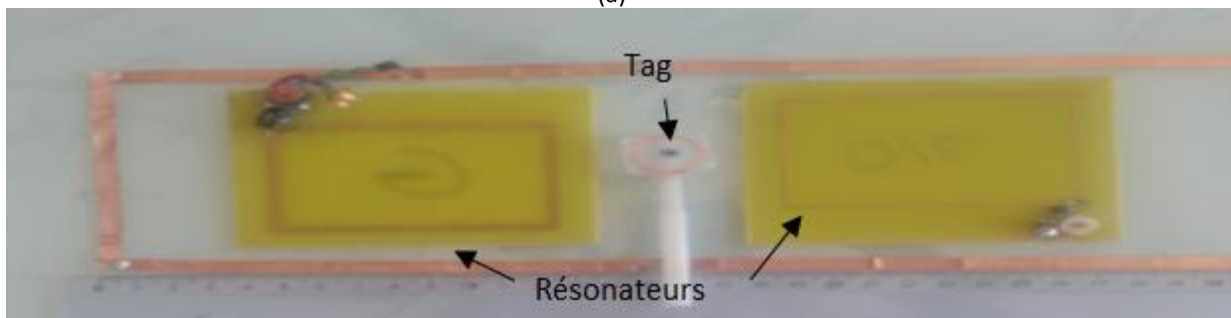
A. Décalage de fréquence

Une antenne pour le lecteur, de forme rectangulaire ($10 \times 61 \text{ cm}^2$), est fabriquée à l'aide d'un ruban de cuivre collant. Le tag est représenté par une boucle de forme circulaire avec un rayon de 1,2 cm. Les résonateurs ont une forme rectangulaire de ($8 \times 5,7 \text{ cm}^2$) (Fig.III.24). La boucle du tag et les résonateurs correspondent respectivement à 0,74% et à 7,37% de la surface de la boucle du lecteur. L'ajout du résonateur réduit le rapport de taille entre le tag et la boucle du lecteur: la boucle du tag correspond à 10% de la surface du résonateur.

Dans la partie mesure, une structure du lecteur comprenant deux résonateurs est étudiée. Le problème du décalage de fréquence en fonction du nombre de résonateurs est étudié.



(a)



(b)

Figure III. 24: structure fabriquée du lecteur RFID sans (a) et avec (b) résonateur

4.1. Changement de fréquence dans le système RFID

Dans cette première partie de mesures, le décalage de fréquence de résonance de la boucle du lecteur (le déphasage du terme Z_{11eq}) est évalué en fonction du nombre de résonateurs. Comme le prouvent les résultats de l'étude analytique et la simulation, l'ajout

du résonateur modifie tous les paramètres de la matrice d'impédance. Un déphasage de l'impédance d'entrée est constaté dans la configuration parallèle et perpendiculaire. Deux résonateurs sont utilisés pour valider la partie expérimentale.

Les mesures sont effectuées à la fréquence de résonance de la boucle du lecteur ($f_1=15,18$ MHz) à l'aide d'un analyseur de réseau vectoriel (VNA). Le changement de fréquence de résonance (Δf) est indiqué dans le tableau 2. (en pratique Δf est calculé par la mesure de l'écart qui sépare f_1 et f_2 : $\Delta f = f_2 - f_1$)

Prototype	Avec un résonateur	Avec deux résonateurs
Δf (MHz)	0. 197 MHz	0.384 MHz
f_2 (MHz)	15. 38 MHz	15.57 MHz

Tableau III.1: décalage de fréquence dans le système RFID

L'ajout du premier résonateur crée un décalage de fréquence de 0,19 MHz dans la boucle du lecteur, le second résonateur augmente ce décalage à 0,38 MHz. L'effet de l'ajout des résonateurs est borné entre 12,6 MHz et 14,9 MHz autour de la fréquence de résonance des résonateurs. D'après les résultats, nous confirmons la nécessité de la correction du décalage de fréquence. Dans notre cas, une capacité variable est ajoutée à la boucle du lecteur. Elle est utilisée pour réadapter le système afin de rétablir/conservé l'accord à 13,56 MHz, après avoir ajouté tous les résonateurs.

Une autre méthode pour limiter le décalage de fréquence consiste à optimiser le positionnement des résonateurs sur la boucle du lecteur. L'optimisation est principalement effectuée pour limiter le décalage de fréquence dû au couplage magnétique entre les résonateurs. À partir de cette étude, les résonateurs sont positionnés respectivement à 6 cm et 19 cm des bords de la boucle du lecteur. La distance entre eux est fixée à 5 cm.

4.2 Détection RFID

L'approche proposée est validée par des mesures de détection RFID avec et sans l'ajout de résonateurs sur la boucle du lecteur. Un test expérimental d'augmentation du volume de détection a été réalisé à l'aide d'un lecteur RFID d'IB Technologies: distance de détection à différentes positions sur la surface de la boucle du lecteur. Les prototypes de (Fig.III.24.a) et (Fig.III.24.b) sont utilisés dans nos tests.

Les mesures sont présentées sur la Fig.III.26 pour les deux configurations parallèle et perpendiculaire. Les axes (X, Y) correspondent respectivement au déplacement du tag par rapport au centre de la boucle du lecteur ($x=0$ et $y=0$) le long de l'axe (Ox) pour $y=0$ à différentes distances de détection RFID. Le résultat de la détection du tag en configuration parallèle et perpendiculaire sans résonateurs (a), avec un résonateur (b) et avec deux résonateurs (c) est reporté sur la Figure.III.25.

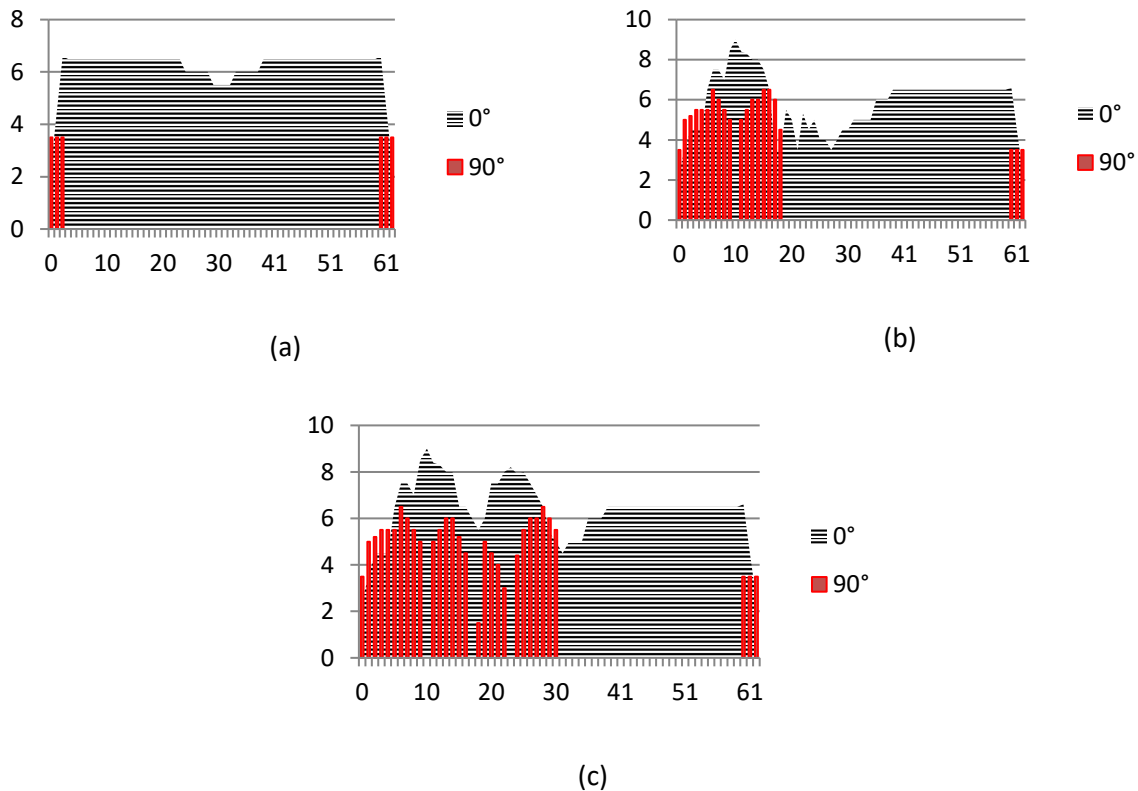


Figure III. 25 : Tests de détection RFID avec un prototype conventionnel (a), un prototype avec un résonateur (b) et un prototype avec deux résonateurs (c) en configuration parallèle et perpendiculaire

Pour un système conventionnel (Figure.III.25 (a)), le tag est détecté sur toute la surface de la boucle du lecteur en configuration parallèle. Dans ce cas, la distance de détection atteint une valeur maximale de 6,5 cm, à partir des bords de la boucle du lecteur jusqu'à son centre, où elle atteint une valeur minimale de 5,5 cm. En configuration perpendiculaire, le tag est uniquement détecté au-dessus des bords de la boucle du lecteur à une distance de 3.5 cm.

Pour un prototype comprenant un résonateur (Figure.III.25 (b)), le volume et la surface de détection en configuration parallèle et perpendiculaire sont augmentés. En configuration parallèle, la distance de détection est augmentée à la surface du résonateur (de 6,5 cm à 9 cm). La valeur minimale de la distance de détection est réduite de 2 cm (de 5,5 cm à 3,5 cm). Ceci est dû à la perturbation des lignes du champ magnétique autour du résonateur. En configuration perpendiculaire, la surface de détection est augmentée; La détection est effectuée à partir des bords de la grande boucle du lecteur (0 mm) jusqu'au-dessus de la surface interne du résonateur à 19 cm. Un zéro de détection apparaît au centre du résonateur à 10 cm et à la surface de la boucle du lecteur qui ne contient pas le résonateur (de 20 cm à 61 cm).

Pour un prototype avec deux résonateurs (Figure.III.25 (c)), en configuration parallèle, trois maxima de détection apparaissent à la surface de la boucle du lecteur: 9 cm,

8 cm et 6,5 cm correspondant respectivement à la surface du premier résonateur, au second résonateur et à la surface de la boucle du lecteur qui n'inclut pas les résonateurs. En configuration perpendiculaire, la distance de détection a des maxima de 6,5 cm aux bords des résonateurs et présente quatre zéros correspondant aux centres des deux résonateurs, la surface entre eux et la surface de la boucle du lecteur qui n'inclut pas les résonateurs. Au bord de la boucle du lecteur (61 cm), la distance de détection correspond à celle d'un système d sans résonateur.

D'après les résultats, la solution d'ajout de résonateur à la structure antennaire du lecteur est confirmée. Le volume et la surface de détection sont augmentés en configuration parallèle et perpendiculaire. D'autres résonateurs peuvent être ajoutés à la surface de la boucle du lecteur (de 30 cm à 61 cm) pour assurer la continuité de la détection. D'autres prototypes utilisant le principe d'ajout de résonateurs sont testés pour optimiser la détection des tags de très petite taille. Cette solution présente des limites de détection liées aux différentes orientations spatiales de tag mais aussi au décalage de fréquence. La détection RFID étant liée à l'orientation des lignes de champ magnétique, nous allons, par la suite, proposer une deuxième solution qui consiste à modifier l'orientation des lignes de champ magnétique en utilisant des antennes boucles torsadées du lecteur.

III.2. Antenne torsadée :

III.2.1 Lignes de champ magnétique

Dans le cas de la détection RFID, le tag est davantage détecté aux bords de la boucle du lecteur et plus ou moins détecté au-dessus de la surface intérieure, ou encore loin de la boucle du lecteur. Pour tenter de trouver une solution à ce problème de détection, nous avons proposé une structure qui permet d'avoir un maximum du champ magnétique à la fois aux bords et au centre de la boucle du lecteur.

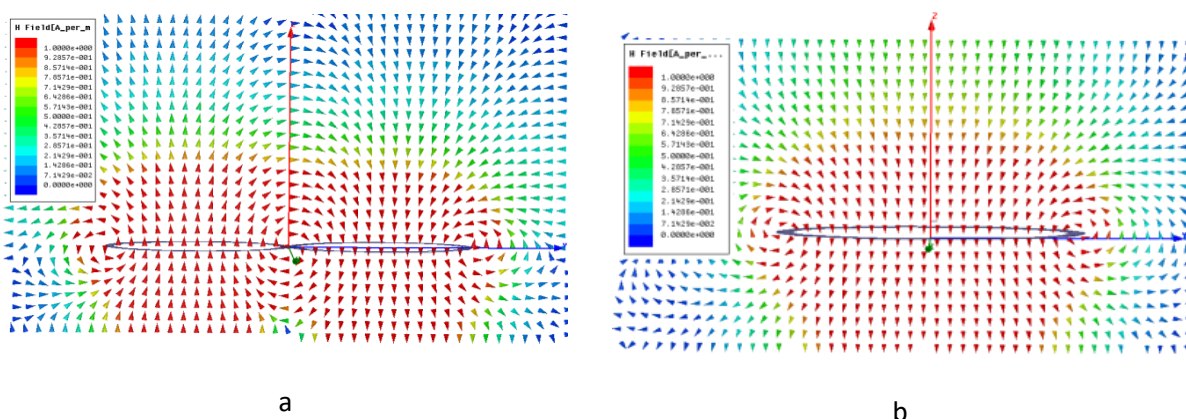


Figure III. 26: distribution des lignes du champ magnétique pour une boucle torsadé (a) et une boucle classique (b)

Il s'agit de modifier l'orientation des lignes du champ par inversion du sens du courant à l'aide d'une boucle lecteur torsadée (de forme '8') [III.23-III.28]. La figure III.26 montre les

lignes du champ magnétique généré par une antenne torsadée traversée par un courant électrique ainsi qu'une antenne boucle classique ayant les mêmes propriétés électriques que le la boucle torsadée.

Les lignes du champ magnétique font une rotation au niveau du centre de l'antenne torsadée. Son intérêt est l'apparition de nouvelles zones de détection dans le cas de la configuration perpendiculaire.

III.2.2. Principe de fonctionnement

L'antenne '8' est constituée de deux boucles: son fonctionnement est donc similaire à celui de deux boucles juxtaposées et traversées par des courants dans le sens opposé. Pour assurer le passage du courant électrique d'une boucle à l'autre, nous avons choisi de l'alimenter en son centre (Figure.III.27).

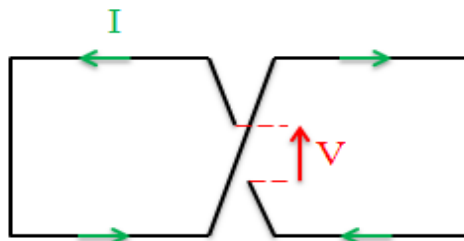


Figure III. 27 : antenne torsadée

Electriquement, l'antenne torsadée est modélisée par la mise en série de deux bobines traversées par des courants en sens opposés. La communication avec le tag se fait par couplage inductif. Le schéma électrique d'une telle structure est donné par la Figure.III.28.

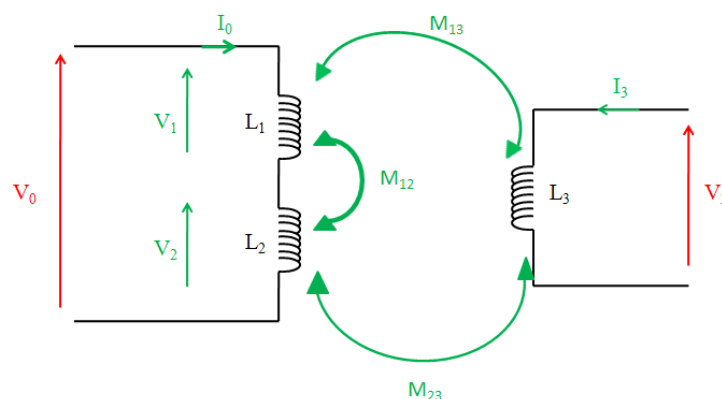


Figure III. 28: modèle électrique de la boucle torsadée en présence d'un tag

Les tensions V_1 et V_2 aux bords des bobines 1 et 2 sont exprimées par :

$$V_1 = j\omega(L_1 + M_{12})I_0 + j\omega M_{13}I_3 \quad (IV.4)$$

$$V_2 = j\omega(L_2 + M_{21})I_0 + j\omega M_{23}I_3$$

La tension V_0 de l'antenne torsadée est la somme des deux tensions V_1 et V_2 . V_3 est la tension aux bords du tag est V_3

$$V_0 = j(L_2 + L_1 + 2 * M_{12})\omega I_0 + j(M_{23} + M_{13})\omega I_3$$

$$V_3 = jL_3\omega I_3 + jM_{eq}I_0 \quad (IV.5)$$

L'inductance totale d'un tel système est donnée par:

$$M_{eq} = M_{13} + M_{23} \quad (IV.6)$$

III.2.3. Etude théorique :

Pour valider l'intérêt de la structure torsadée, nous avons fait une étude comparative de deux structures sur Matlab : une structure rectangulaire ($10 \times 20 \text{ cm}^2$) et une autre constituée par deux boucles carrées ($10 \times 10 \text{ cm}^2$) traversées par des courants en sens opposés (Figure.III.29).

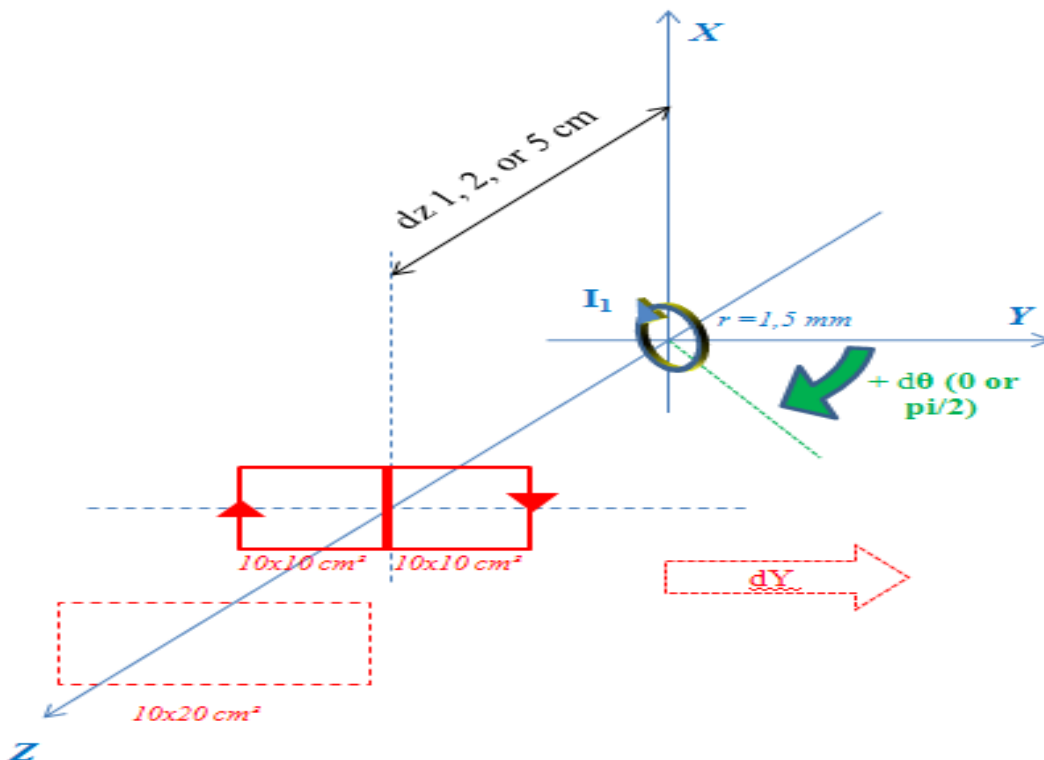


Figure III. 29 : structures antennaires, déplacement latérale (dY), distance (dZ) et orientation spatiale du tag ($d\theta$)

Pour un déplacement latéral dY , nous avons fait des études paramétriques sur la distance entre l'antenne du lecteur et le tag, la configuration spatiale entre elles (configuration parallèle ou perpendiculaire) ainsi que sur le rayon du tag. Le calcul de l'inductance mutuelle

sur Matlab est basé sur le flux du champ magnétique (B_r , B_θ , B_y) généré par la circulation du courant électrique I_1 sur la boucle du tag.

$$\left\{ \begin{array}{l} B_r = \frac{I_1 \mu_0 y}{2\pi[(R+r)^2 + y^2]^{1/2} r} \left[\frac{R^2 + r^2 + y^2}{[(R-r)^2 + y^2]} E(\rho) - K(\rho) \right] \\ B_\theta = 0 \\ B_y = \frac{I_1 \mu_0}{2\pi[(R+r)^2 + y^2]^{1/2} r} \left[\frac{R^2 - r^2 - y^2}{[(R-r)^2 + y^2]} E(\rho) + K(\rho) \right] \\ \rho^2 = \frac{4Rr}{[(R+r)^2 + y^2]} \end{array} \right. \quad (III.5)$$

où :

r : est la distance entre des deux antennes du lecteur et celle du tag

R : est le rayon de la boucle excitatrice

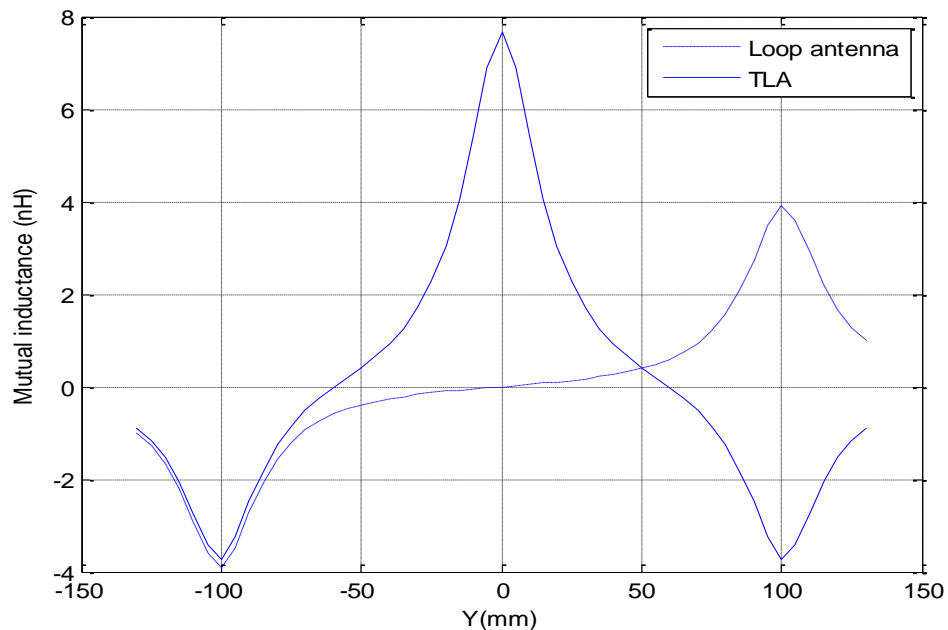
y : la position spatiale de la boucle sur l'axe des Y

$K(\rho)$ et $E(\rho)$: sont respectivement les intégrales elliptiques de Bessel du premier ordre et du second ordre

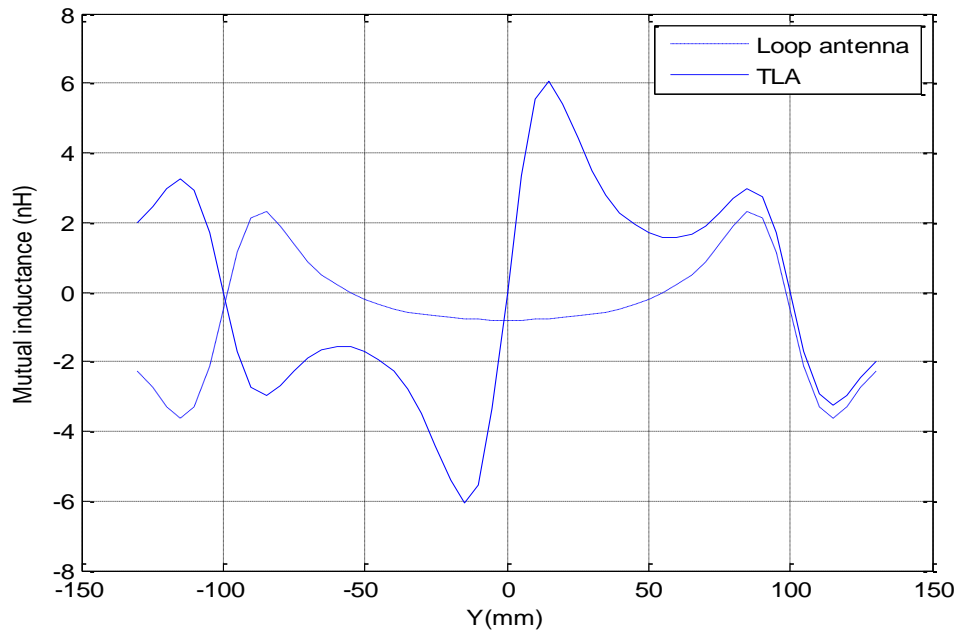
La discrétisation de l'équation (III .5), nous donne l'inductance mutuelle sur Matlab.

a. Comparaison des structures selon la configuration

Des résultats comparatifs des deux structures sont présentés sur la figure (Fig.III.30) pour les configurations parallèle et perpendiculaire.



(a)



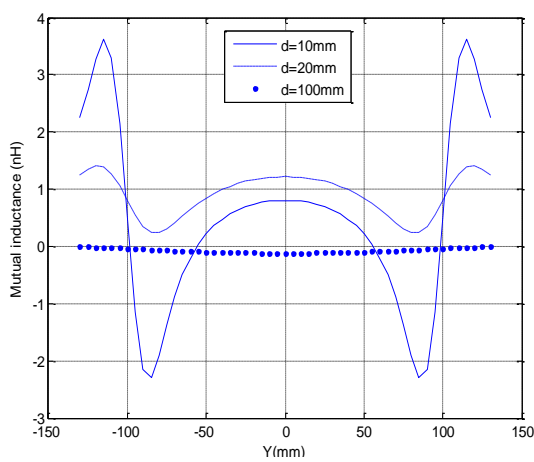
(b)

Figure III. 30: comparaison des deux antennes rectangulaire et torsadée pour la configuration parallèle (b) et perpendiculaire (a)

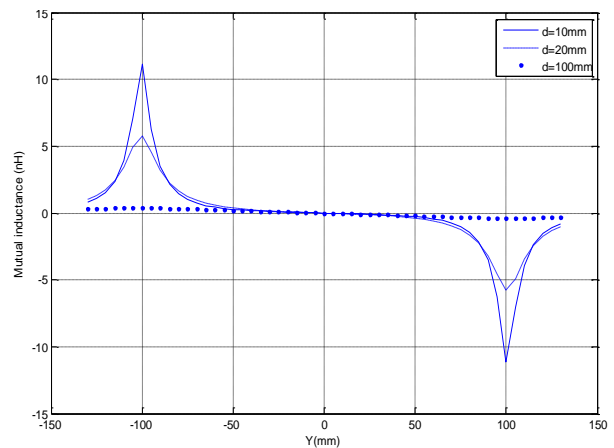
Le couplage est plus important entre la TLA (Twisted Loop Antenna) et le tag pour les deux cas de configurations parallèle et perpendiculaire. Le maximum d'inductance mutuelle est au centre de la TLA avec une augmentation, respectivement, de 8 nH et de 6.5 nH par comparaison à une boucle classique (rectangulaire) en configuration perpendiculaire et parallèle.

b. Variation de la distance entre le lecteur et le tag

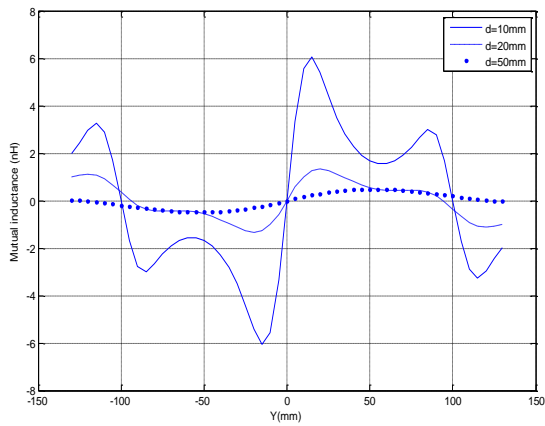
Pour valider l'intérêt de la structure en volume de détection, nous avons évalué l'inductance mutuelle pour différentes distances entre l'antenne du lecteur et le tag. Les résultats sont reportés sur la Figure.III.31.



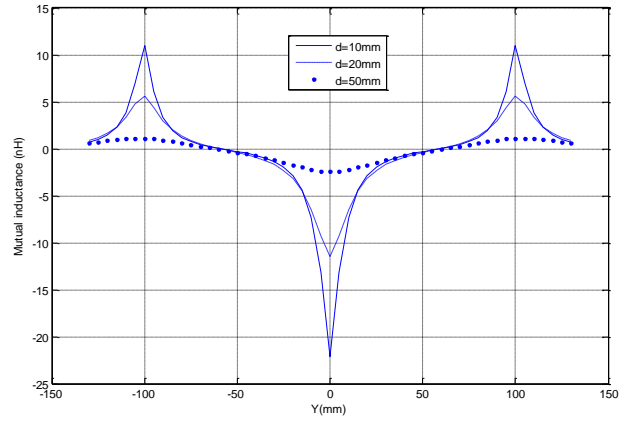
a°



b



c



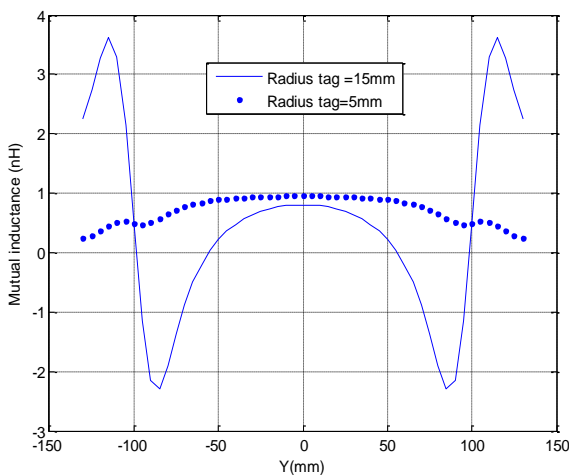
d

Figure III. 31: variation de la distance pour boucle classique en configuration parallèle (a) et perpendiculaire (b) et de la TLA en configuration parallèle (c) et perpendiculaire (d)

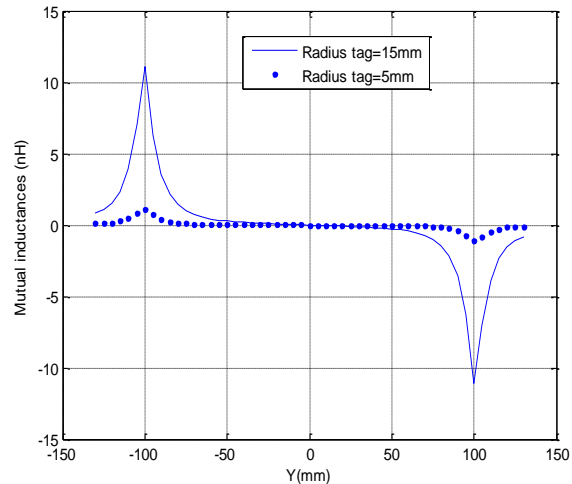
Pour les distances de 10 mm et 20 mm, la TLA a des valeurs plus élevées en son centre, pour toutes les distances et configurations considérées. Sur les bords, les valeurs d'inductance mutuelle sont comparables à la boucle classique. A une distance de 10 mm, le maximum d'inductance mutuelle pour la boucle classique est au centre et au-dessus des bords, respectivement, en configuration parallèle et perpendiculaire (Figure. III.31). Tandis que, la TLA a deux maxima au centre de chacune des sous boucles et trois maxima/extrema en configuration perpendiculaire qui correspondent au centre et aux bords de la TLA.

c. Variation du rayon de tag

La Figure. III.32 montre l'évolution de l'inductance mutuelle entre la boucle classique et le tag ainsi que la TLA et le tag, pour un déplacement latéral de $-150 \text{ mm} < Y < 150 \text{ mm}$ et deux rayons de tag de 5 mm et 15 mm correspondant respectivement à 0.39% et 3.53% de la surface de la boucle conventionnelle et à 0.78% et 7.06% de la surface de chacune des sous-boucles de la TLA . La distance entre la TLA et le tag est fixée à 10mm.



a



b

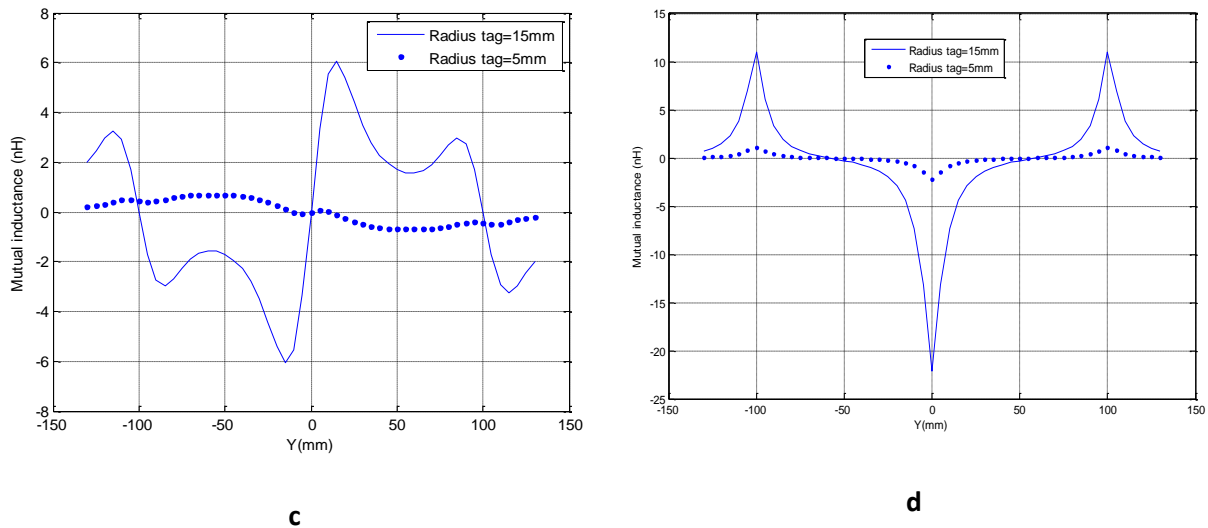


Figure III. 32: variation du rayon de tag pour boucle classique en configuration parallèle (a) et perpendiculaire (b) et de la TLA en configuration parallèle (c) et perpendiculaire (d)

L'inductance mutuelle se dégrade pour un rayon de 5mm pour les deux structures et les deux configurations étudiées. Les positions des maxima ne varient pas dans le cas de la configuration perpendiculaire pour les deux structures, tandis que, en configuration parallèle, les maxima/extrema apparaissent au centre de la boucle pour la boucle classique et au centre des sous boucles pour la TLA.

IV.2.4 Réalisation et mesures

Les structures antennaires étudiées numériquement ont été réalisées (avec du ruban de cuivre collant sur des feuilles en plastique transparent) et mesurées à l'aide de l'analyseur de réseau (Figure. III.33).

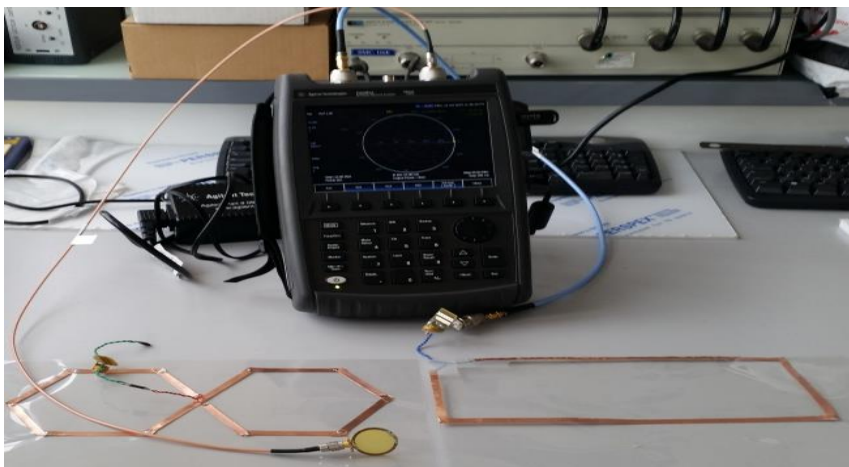


Figure III. 33 : Banc de mesure des structures antennaires

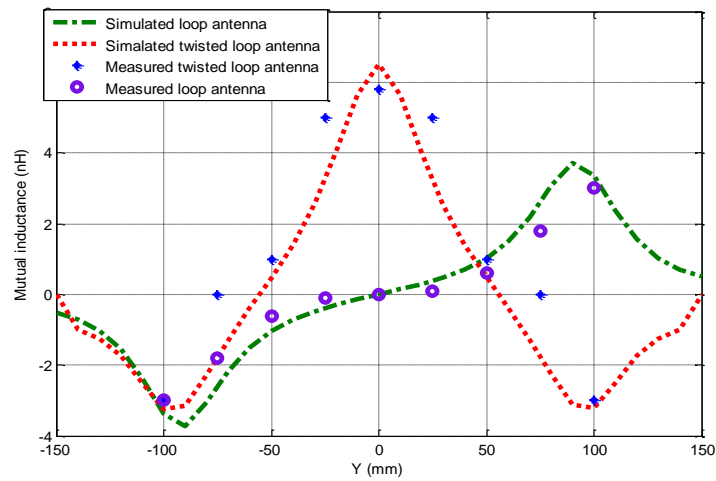
Les propriétés électriques des deux structures sont présentées dans le tableau III.3

	Boucle rectangulaire	TLA	Tag
Inductance 'L'	47.85nH	49.29nH	5.79nH
Résistance 'R'	0.20Ω	0.23Ω	5.62Ω

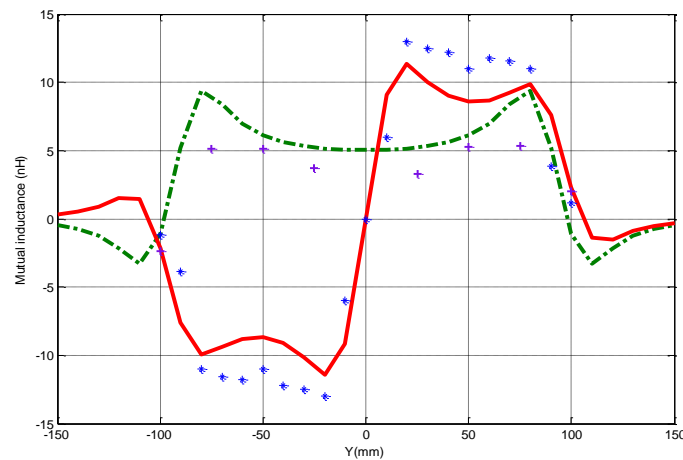
Tableau. III. 2: propriétés électriques des structures boucles rectangulaire et TLA

Pour les deux configurations parallèle et perpendiculaire, et pour une variation latérale du tag de $-150 \text{ mm} < Y < 150 \text{ mm}$, nous avons tracé sur la Figure. III.34, les résultats de simulation et de mesure pour une comparaison entre les deux structures.

Les résultats de mesures coïncident avec les simulations pour les deux structures. Pour les mesures de la TLA, les valeurs d'inductances mutuelles sont supérieures à la simulation en configuration parallèle et légèrement inférieures en configuration perpendiculaire. Ces résultats confirment les résultats de l'étude analytique sur Matlab (Figure. III.34).



(a)



(b)

Figure III. 34: comparaison de résultats de simulation et mesure en configuration perpendiculaire (a) et parallèle (b)

IV.2.5. Détection RFID :

La performance de la TLA, dans le cadre de la détection RFID, a été vérifiée dans cette partie avec des mesures comparatives des deux structures à l'aide d'un lecteur RFID HF. Le tag utilisé pour la mesure a un rayon de 15mm (Figure. III.35).

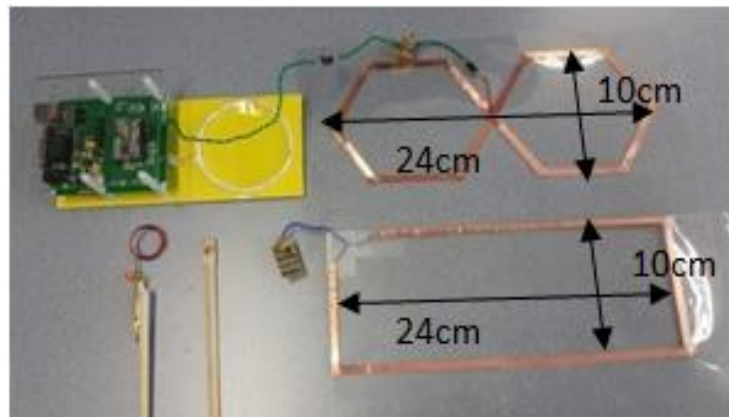


Figure III. 35 : banc de mesures de détection RFID

Les résultats de détection montrent que, pour les deux configurations parallèle et perpendiculaire, la TLA permet d'avoir une surface de détection plus grande mais aussi des distances de détection plus grandes en son centre (Figure. III.36).

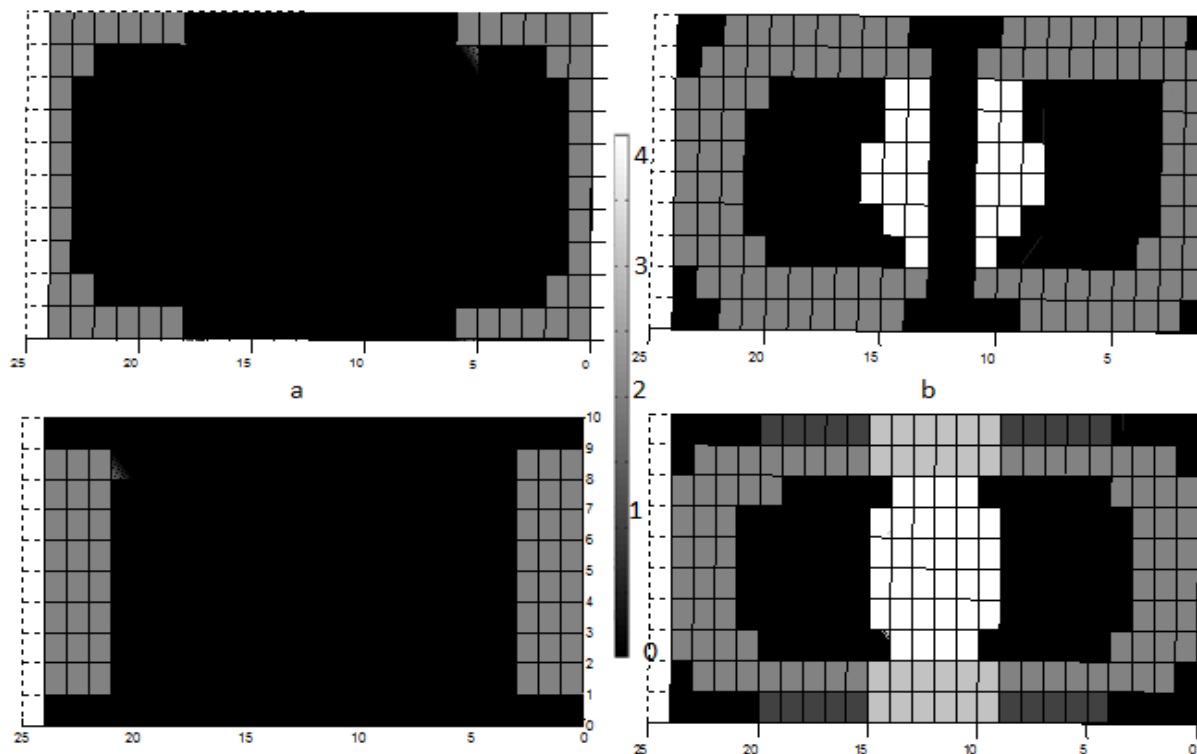


Figure III. 36 mesures de détection RFID pour Configuration parallèle pour la boucle rectangulaire (a) et la TLA (b) Configuration perpendiculaire pour la boucle rectangulaire (a) et la TLA (b)

La structure TLA est validée par simulation HFSS, calcul sur Matlab ainsi que par des mesures de distance de détection de tag. Cette structure permet l'augmentation de la surface et du volume de détection pour les deux configurations perpendiculaire et parallèle. Par la suite plusieurs boucles torsadées seront mises en série afin d'améliorer la détection RFID puis associées à l'utilisation des résonateurs.

Nous avons montré précédemment que la détection RFID peut être améliorée en utilisant le principe de la TLA. Notre objectif par la suite, sera d'optimiser cette structure pour maximiser le taux de détection de tags de petite taille pour les deux configurations spatiales pour une antenne lecteur plus grande (rapport de taille plus élevé entre la boucle du lecteur et celle du tag). D'autre part, nous avons montré l'intérêt de l'utilisation des résonateurs pour améliorer la détection RFID. La combinaison de ces deux solutions est étudiée par la suite.

III. 3 Antenne multi-boucles torsadée (MTLA) avec résonateurs :

Pour les deux configurations parallèle et perpendiculaire la détection du tag est améliorée en utilisant la TLA mais des zéros de détection apparaissent toujours sur la surface des sous-boucles de la TLA. Une solution est proposée pour minimiser ces limites en utilisant une antenne boucle torsadée comprenant des résonateurs. Les structures étudiées dans cette partie sont : deux antennes du lecteur: rectangulaire de $50 \times 10 \text{ cm}^2$ et multi-boucles (trois sous-boucles de $10 \times 16,6 \text{ cm}^2$) et boucle de tag de rayon de 1.2 cm. (la boucle du tag correspond à 0,7% de la surface du lecteur)

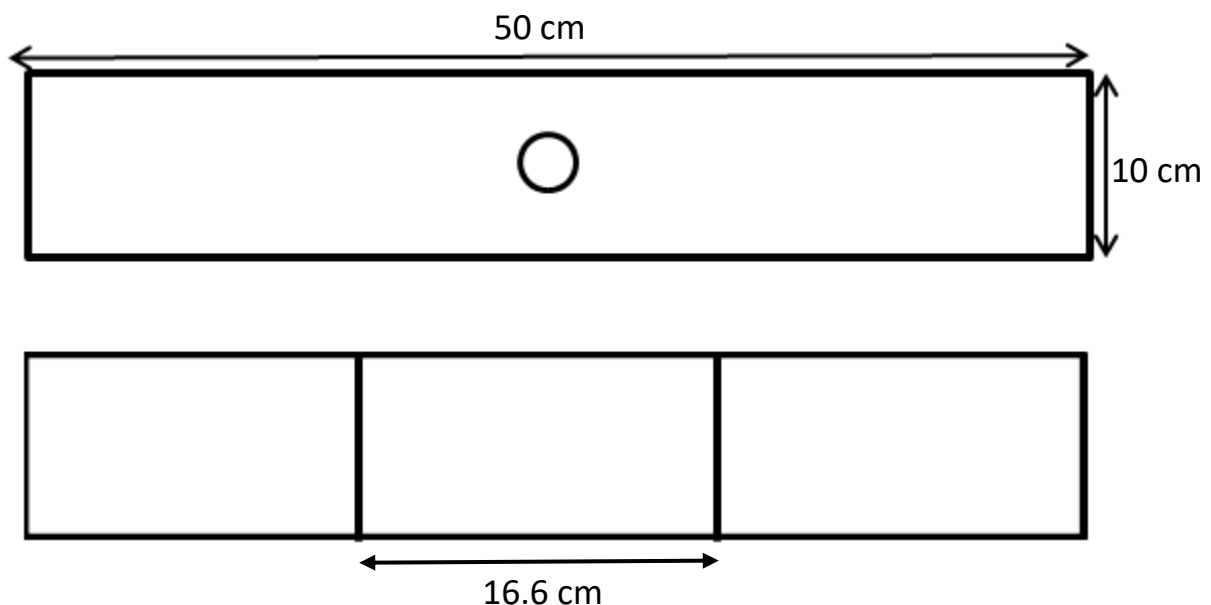


Figure III. 37 : structure antennaire du lecteur : rectangulaire (a) et multi-boucles (b)

La répartition du champ magnétique (amplitude) est reportée sur la Figure.III.38. D'après les résultats, nous constatons, que la distribution du champ magnétique est plus dense autour des bords des antennes mais aussi au niveau des bords et des zones de transitions dans le cas de l'antenne multi-boucles et seulement au niveau des bords de la boucle dans le cas de la structure rectangulaire. Cela peut être expliqué par la répartition des lignes de champ magnétique : l'orientation des lignes du champ varie en utilisant les multi-boucles (alimentées par un courant dans le sens opposé pour des sous-boucles consécutives) : une rotation des lignes du champ magnétique autour des bords des antennes (rectangulaire et multi-boucles) et au niveau des zones de transition entre les sous-boucles (pour le cas d'une antenne multi-boucles). Cette orientation des lignes du champ agit sur l'amplitude du champ magnétique.

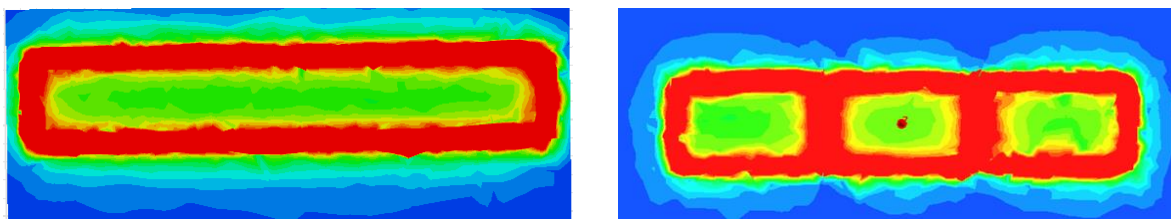


Figure III. 38 : Amplitude et lignes du champ magnétique de la structure rectangulaire et multi-boucles

Afin d'évaluer l'inductance mutuelle du système, nous utilisons le modèle électrique pour une antenne multi-boucles. Chaque boucle est modélisée par une inductance L_i avec sa résistance série r_i . L_1 , L_2 et L_3 sont respectivement les inductances des sous-boucles de l'antenne multi-boucles du lecteur. L_T est l'inductance de la boucle du tag. C_1 et C_T sont respectivement les capacités d'accord à 13,56 MHz de l'antenne multi-boucles du lecteur et le tag.

Le calcul est similaire à celui d'une antenne TLA : l'inductance mutuelle d'un système avec une antenne lecteur multi-boucles et un tag se calcule par la somme des inductances mutuelles entre chacune des sous-boucles et le tag. Dans le cas de l'antenne du lecteur à trois sous-boucles, l'inductance mutuelles se calcule par :

$$M_{RT} = M_{1T} + M_{2T} + M_{3T} \quad \text{III.6}$$

Avec :

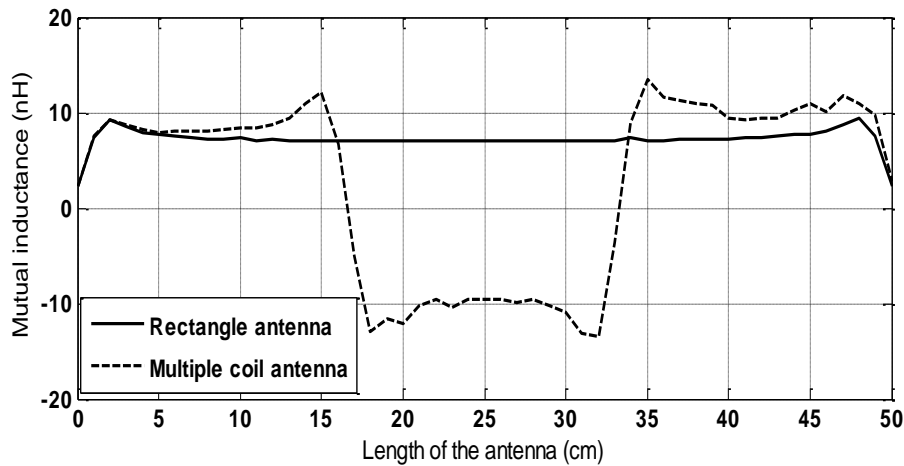
M_{1T} : inductance mutuelle entre la sous-boucle 1 et le tag

M_{2T} : inductance mutuelle entre la sous-boucle 2 et le tag

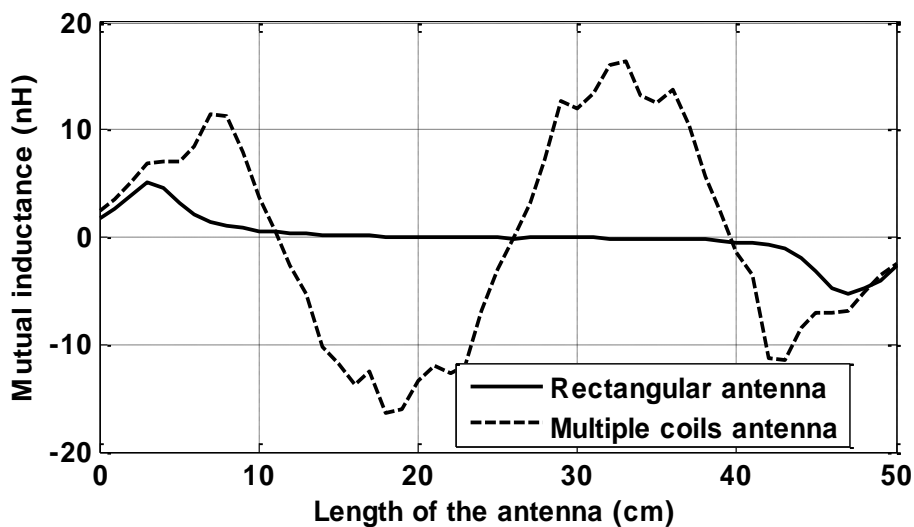
M_{3T} : inductance mutuelle entre la sous-boucle 3 et le tag

L'évolution de l'inductance mutuelle pour un tag qui se déplace sur la surface des antennes rectangulaires et multi-boucles est reportée sur la Figure.III.39. Les résultats sont présentés pour les deux configurations parallèle et perpendiculaire. L'inductance mutuelle dans les configurations parallèles et perpendiculaires est augmentée dans le cas d'une

antenne multi-boucle (par rapport au cas antenne rectangulaire). Les maxima sont au-dessus des zones de transition entre chacune des sous-boucles en configuration perpendiculaire avec une augmentation de 16 nH par rapport à l'antenne rectangulaire. En configuration parallèle, le maximum d'inductance apparait sur la surface de la sous-boucle numéro 2 (augmentation de l'inductance mutuelle de 20 nH). Cette augmentation d'inductance mutuelle est due à la modification de la distribution des lignes du champ magnétique.



(a)



(b)

Figure III. 39 : inductance mutuelle pour une antenne rectangulaire et multi-boucles en configuration parallèle (a) et perpendiculaire (b)

Dans le but d'optimiser la détection des tags RFID nous proposons d'associer les deux structures rectangulaire et multi-boucles avec des résonateurs. Pour déterminer théoriquement l'inductance mutuelle équivalente avec la présence de résonateurs, nous utilisons le modèle électrique équivalent de la Figure.III.40 . L_{r1} , L_{r2} et L_{r3} sont les inductances des résonateurs et C_{r1} , C_{r2} et C_{r3} sont les capacités d'accord des résonateurs à 13.56 MHz.

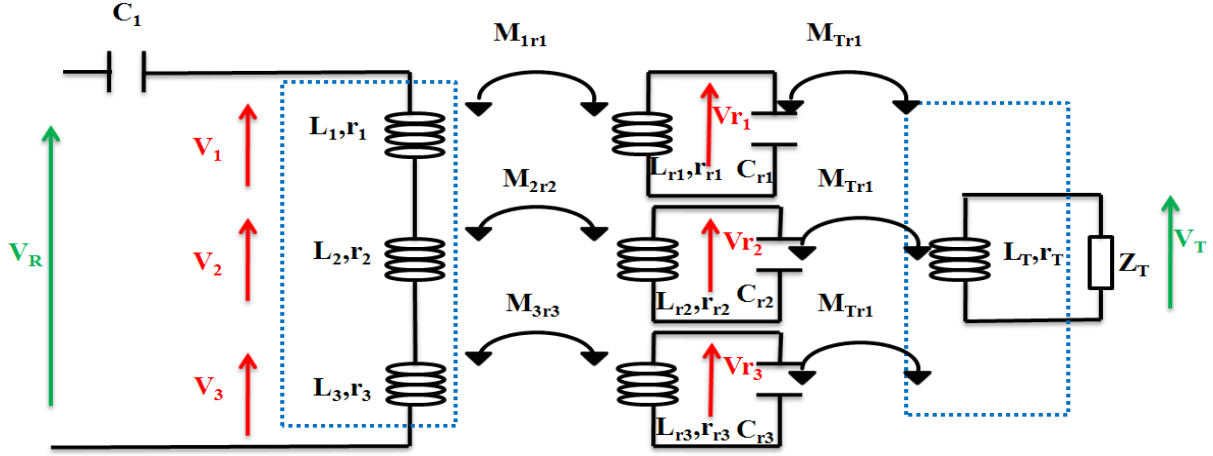


Figure III. 39 : Modèle électrique du système multi-boucles du lecteur avec résonateur et le tag

Comme l'antenne multi-boucles est définie par trois inductances en série, les tensions V_1 , V_2 et V_3 dans le circuit satisfont peuvent être écrite dans le régime harmonique (à la fréquence $\omega = 2\pi f$) :

$$\begin{aligned}
 V_1 &= \left(r_1 + \frac{\omega^2 (M_{1r1})^2}{\alpha_{r1}} + j\omega(L_1 + M_{12}) \right) I_R + \left(j\omega M_{1T} + \frac{\omega^2 M_{1r1} M_{Tr1}}{\alpha_{r1}} \right) I_T \\
 V_2 &= \left(r_2 + \frac{\omega^2 (M_{2r2})^2}{\alpha_{r2}} + j\omega(L_2 + M_{21} + M_{23}) \right) I_R + \left(j\omega M_{2T} + \frac{\omega^2 M_{2r2} M_{Tr2}}{\alpha_{r2}} \right) I_T \\
 V_3 &= \left(r_3 + \frac{\omega^2 (M_{3r3})^2}{\alpha_{r3}} + j\omega(L_3 + M_{32}) \right) I_R + \left(j\omega M_{3T} + \frac{\omega^2 M_{3r3} M_{Tr3}}{\alpha_{r3}} \right) I_T
 \end{aligned} \quad \text{III.6}$$

Avec :

$M_{ij} = M_{ji}$ sont les inductances mutuelles entre les sous-boucles de l'antenne du lecteur ($1 < i, j < 3$),

M_{1r1} , M_{2r2} et M_{3r3} sont les Inductances mutuelles entre le résonateur et la sous-boucle du lecteur.

M_{Tr1} , M_{Tr2} et M_{Tr3} sont les inductances mutuelles entre les résonateurs et la boucle du tag.

α_{ri} est lié à l'impédance du résonateur r_i avec : $\alpha_{ri} = \frac{j}{\omega C_{ri}} - (j\omega L_{ri} + r_{ri})$

L'impédance mutuelle équivalente entre le tag et l'antenne multi-boucles du lecteur incluant les résonateurs peut être exprimée par :

$$Z_{RT} = j\omega M_{1T} + \frac{\omega^2 M_{1r1} M_{Tr1}}{\alpha_{r1}} + j\omega M_{2T} + \frac{\omega^2 M_{2r2} M_{Tr2}}{\alpha_{r2}} + j\omega M_{3T} + \frac{\omega^2 M_{3r3} M_{Tr3}}{\alpha_{r3}} \quad \text{III.7}$$

Enfin, l'inductance mutuelle équivalente entre l'antenne multi-boucles du lecteur et le tag (la partie imaginaire du Z_{RT} divisée par ω) s'écrit par :

$$M_{RT} = j\omega M_{1T} + \omega^2 M_{1r1} M_{Tr1} \gamma_{r1} + j\omega M_{2T} + \omega^2 M_{2r2} M_{Tr2} \gamma_{r2} + j\omega M_{3T} + \omega^2 M_{3r3} M_{Tr3} \gamma_{r3} \quad \text{III.8}$$

Avec :

$$\gamma_{ri} = \frac{\frac{1}{C_{ri}\omega} - \omega L_{ri}}{\left(\frac{1}{C_{ri}\omega} - \omega L_{ri}\right)^2 + r_{ri}}$$

Les calculs d'inductance mutuelle équivalente sont utilisés pour évaluer l'inductance mutuelle et l'inductance mutuelle équivalente en absence et présence de résonateurs. L'inductance mutuelle dépend des inductances mutuelles entre les sous-boucles du lecteur et les résonateurs, la boucle du tag et les résonateurs, mais aussi des paramètres électriques des résonateurs.

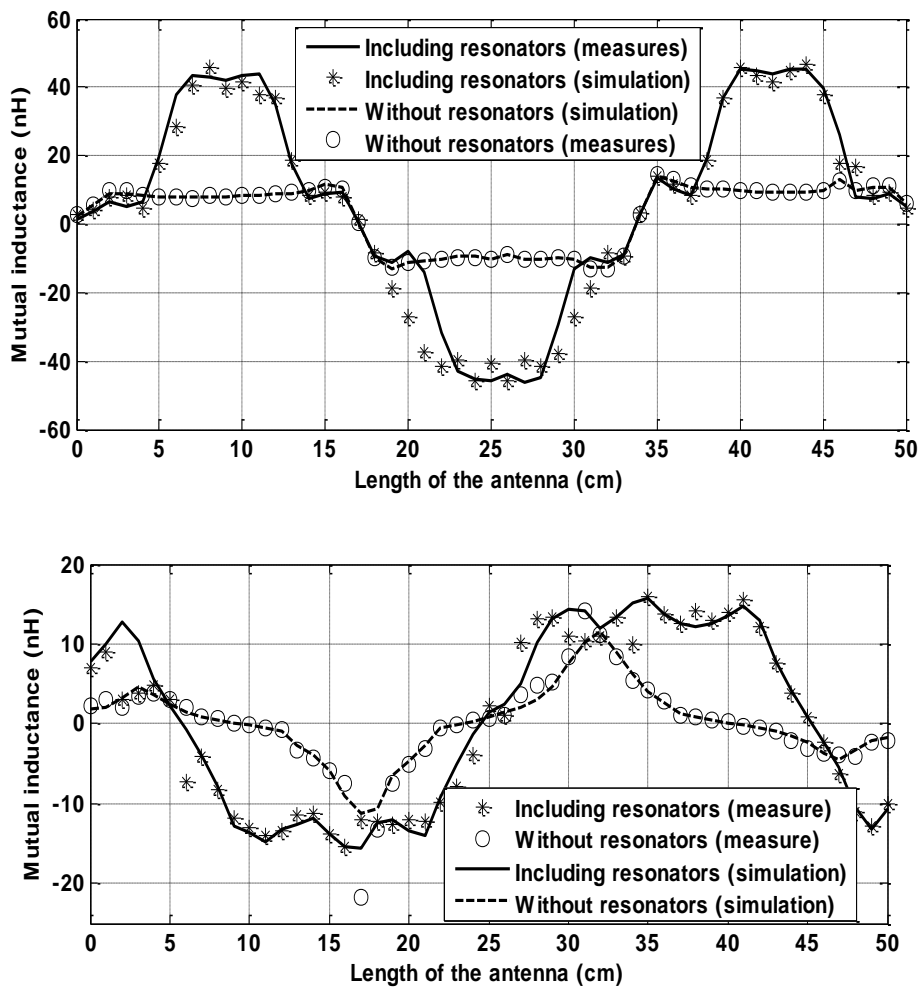


Figure III. 40 : Inductance mutuelle et inductance mutuelle équivalente en configuration parallèle (a) et perpendiculaire (b)

Dans cette étude, les résonateurs ont les mêmes propriétés électriques, leur impédance est égale à $1,5 + j124$. Chacun des résonateurs est ajouté à l'intérieur de la surface d'une sous-boucle. L'antenne multi-boucles est fabriquée et mesurée. L'inductance mesurée de l'antenne est de $L_1 = 1,46 \mu\text{H}$. La comparaison des résultats de l'inductance mutuelle et l'inductance mutuelle équivalente simulé et mesuré est rapportée sur la Figure. III.41 pour les deux configurations parallèle et perpendiculaire pour une distance de 1 cm entre l'antenne multi-boucles et le tag.

Pour un déplacement latéral du tag au centre des structures antennaires (avec et sans résonateurs) ($x = 0\text{cm}$, $0\text{ cm} < Y < 50\text{cm}$), l'ajout des résonateurs augmente, en configuration parallèle, l'inductance mutuelle équivalente de 30 nH (de 13 nH à 43 nH) et au-dessus de chacune des sous-boucles. Cependant, l'inductance mutuelle équivalente présente trois pics correspondant à la surface des résonateurs. En configuration perpendiculaire, l'inductance mutuelle est augmentée par l'ajout des résonateurs, de 8 nH et 5 nH respectivement aux bords de l'antenne multi-boucles et au centre des sous-boucles (bords des résonateurs). Les résultats simulés concordent avec la mesure dans les deux configurations parallèle et perpendiculaire. Ces résultats sont liés à la répartition du champ magnétique. L'addition d'un résonateur à la surface de chaque sous-bobine de l'antenne du lecteur concentre et modifie la distribution du champ magnétique généré (Figure. III.42).

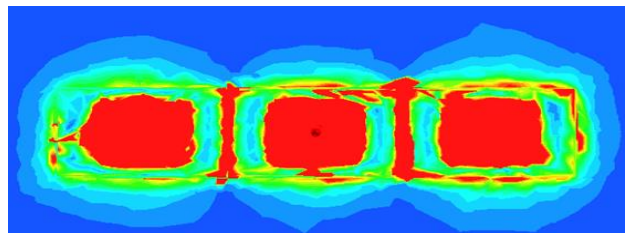


Figure III. 41 : amplitude du champ magnétique de l'antenne multi-boucles avec résonateurs

➤ Mesures et validation expérimentales

Un test expérimental d'augmentation du volume de détection et de la surface avec l'ajout de résonateur a été réalisé à l'aide d'un lecteur RFID d'IB Technologies. Le principe d'ajout du résonateur sur la surface de la boucle du lecteur est appliqué (Figure.III.43).

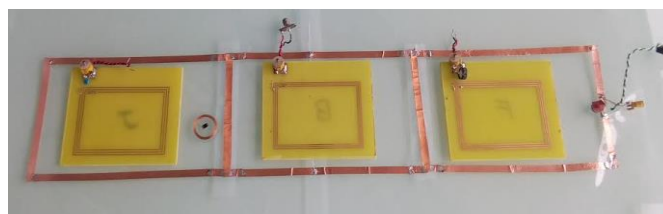


Figure III. 42 : Antenne multi-boucles fabriquée avec des résonateurs

Le volume et la surface de détection RFID sont évalués pour un déplacement latéral et angulaire du tag les différentes distances entre le tag et l'antenne multi-boucles du lecteur.

Les résultats de détection du tag en configuration parallèle et perpendiculaire pour un prototype sans résonateurs (a, c) et avec des résonateurs (b, d) sont rapportés sur la (figure. III.44). Les axes (X, Y) correspondent respectivement à un déplacement latéral du tag selon la longueur et la largeur de l'antenne multi-boucle du lecteur, l'échelle de couleur définit la distance de détection.

Pour un résonateur d'une taille correspondant à 27% de la surface de chaque sous-boucle, le volume et la surface de détection en configuration parallèle et perpendiculaire sont augmentés. La surface de détection est augmentée de 18% (de 70% sans résonateurs à 88% avec des résonateurs) et de 29% (de 16% sans résonateurs à 45% avec des résonateurs) respectivement en configuration parallèle et perpendiculaire. De plus, de nouvelles zones de détection apparaissent au-dessus des résonateurs. Cependant, les distances maximales de détection correspondent au centre des résonateurs en configuration parallèle (4 cm) et aux bords des résonateurs et des sous-boucles dans le cas de la configuration perpendiculaire (1,3 cm).

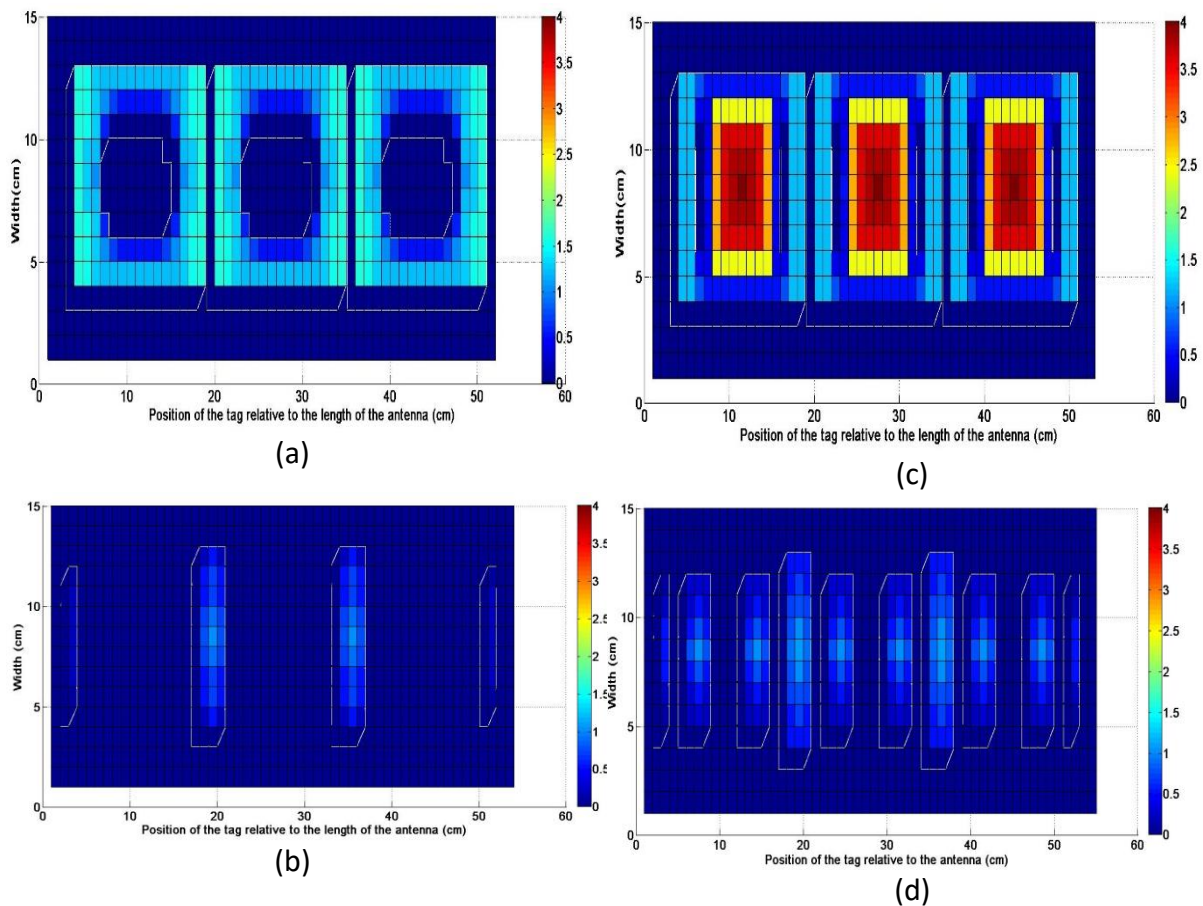


Figure III. 43 : résultats de détection sans et avec résonateurs en configuration parallèle (a, c) et perpendiculaire (b, d)

Les résultats de la détection RFID montrent l'amélioration des performances du système RFID HF, telles que le volume et la surface de détection du tag dans les deux configurations parallèle et perpendiculaire avec l'utilisation d'un prototype multi-boucle incluant des résonateurs.

III.4. Etude du décalage de fréquence

Afin d'évaluer le décalage de fréquence causé par l'ajout de résonateurs, nous allons dans cette partie, étudier ce phénomène par simulation HFSS, en se basant sur les paramètres d'impédance équivalente. L'étude est faite sur les deux structures rectangulaire et multi-boucles du lecteur. Notre méthode consiste à calculer le décalage de fréquence (par rapport à la fréquence de résonance des structures sans résonateurs) pour quatre différentes positions de résonateurs sur la surface des structures antennaires. Nous représentons par les Figures III.45 et III.46, les quatre différentes positions de résonateurs dans le cas antenne rectangulaire et antenne multi-boucles du lecteur.

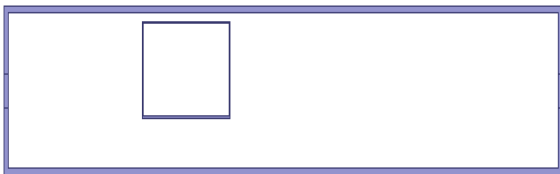
Position 1



Position 2



Position 3



Position 4

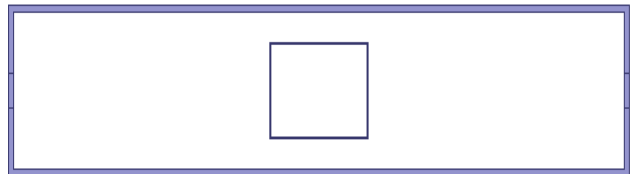
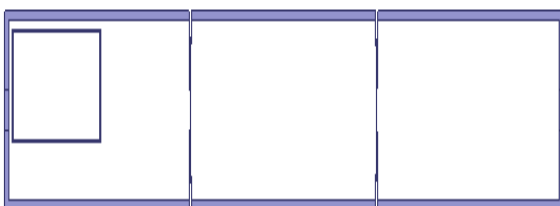
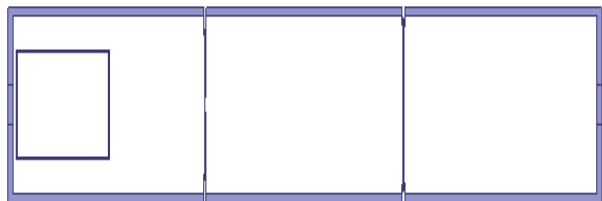


Figure III. 44 : différentes positions du résonateur sur la boucle du lecteur

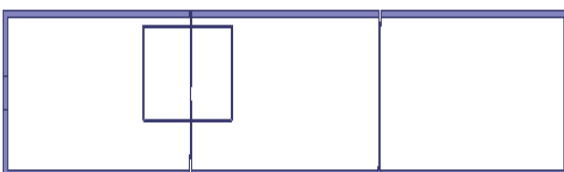
Position1



Position 2



Position 3



Position 4

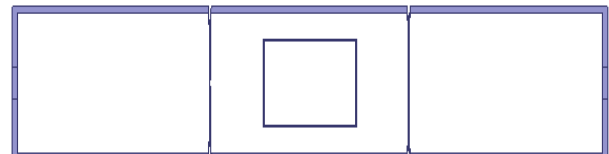


Figure III. 45 : différentes positions du résonateur sur la multi- boucle du lecteur

Pour évaluer le décalage de fréquence, nous avons simulé sur HFSS la variation de la partie imaginaire de Z11, en fonction de la fréquence, pour une bande de fréquence entre 10 et 20 MHz, pour les deux structures antennaires. Les résultats sont présentés sur la Figure. III.47 :

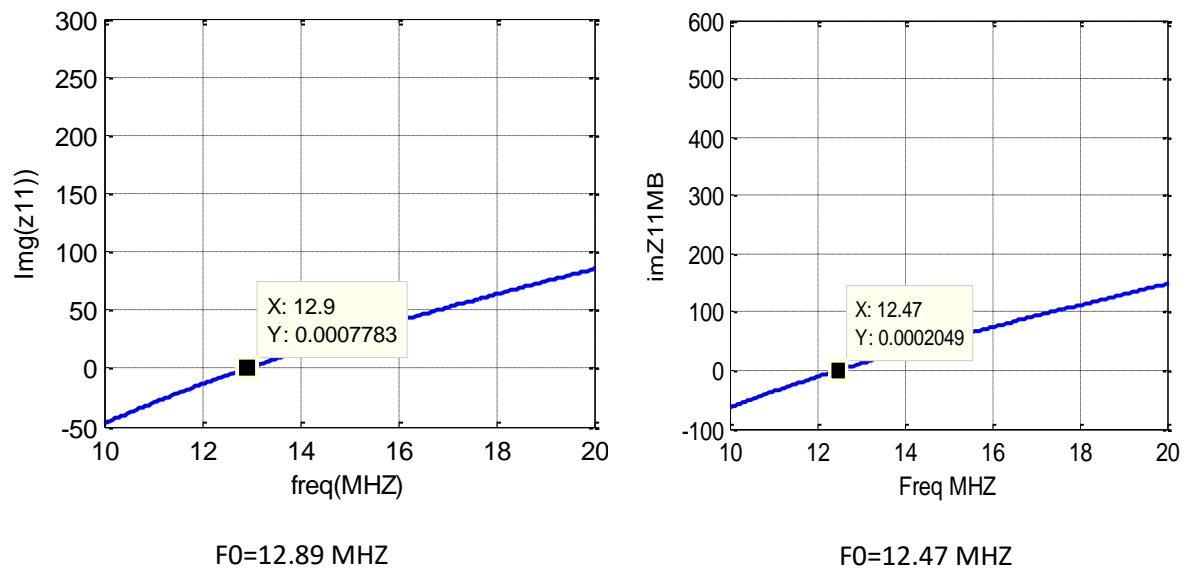
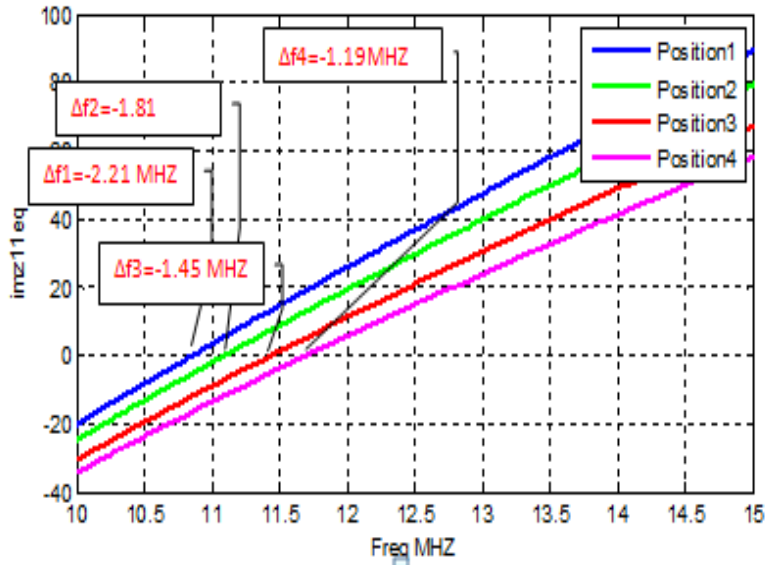
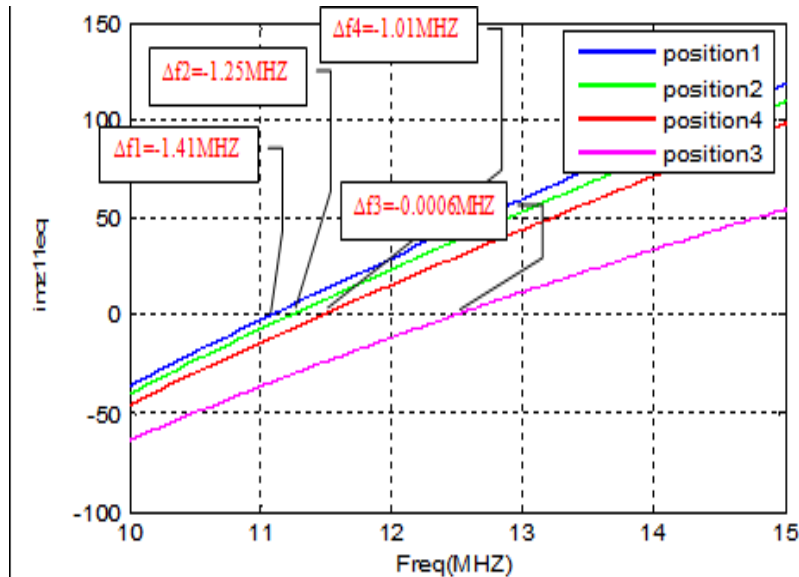


Figure III. 46 : Variation de la partie imaginaire de Z11 (sans résonateur) en fonction de la fréquence pour la structure rectangulaire (a) et multi-boucles (b)

Les fréquences de résonances sont de 12.89 MHz et 12.47 MHz respectivement pour la structure rectangulaire et multi-boucles. Ces deux fréquences sont donc notre repère d'évaluation du décalage de fréquence. Par la suite nous présentons les résultats simulés de la variation de la partie imaginaire de l'impédance équivalente Z_{11eq} , pour les quatre positions de résonateur, les deux types de structures antennaires. Le but est de calculer à chaque fois le Δf (tel que $\Delta f = F_0 - F_{0eq}$) (F_0 étant la fréquence de résonance d'une structure sans résonateur et F_{0eq} est la fréquence de résonance de la même structure en présence d'un résonateur sur sa surface). Les résultats sont présentés sur la Figure. III.48.



(a)



(b)

Figure III. 47 : Variation de la partie imaginaire de Z_{11eq} (avec résonateur) en fonction de la fréquence pour la structure rectangulaire (a) et multi-boucles (b)

D'après ces résultats, nous pouvons constater que les positions de résonateur 1 et 2 génèrent un décalage de fréquence plus important. Les différents décalages de fréquences sont reportés sur la Figure III.49.

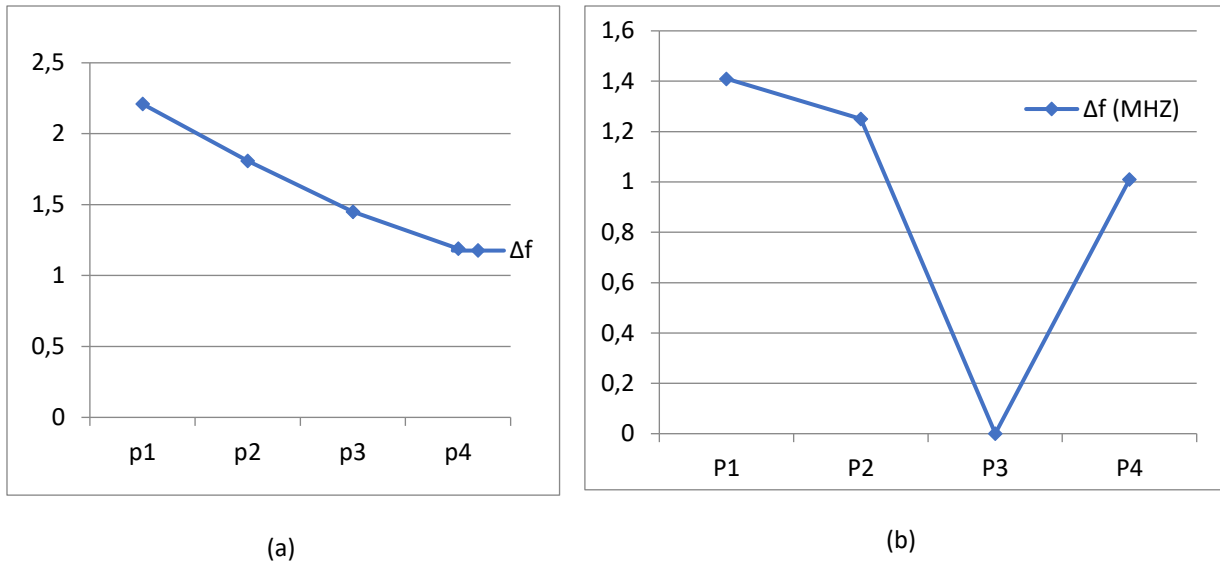


Figure III. 48 : décalage de fréquence de résonance en fonction des différentes positions de résonateurs pour la structure rectangulaire (a) et multi-boucles (b)

Ces résultats sont liés à la variation du couplage (inductance mutuelle M_{1res}) entre la boucle du lecteur et le résonateur. D'après ces résultats, nous pouvons déduire que la meilleure position du résonateur sur la structure rectangulaire est celle du milieu et pour la multi-boucle lorsque le résonateur est placé sur la zone d'intersection.

III.5. Conclusion du chapitre III

Le principe d'ajout de résonateur dans la structure boucle du lecteur a été validé par simulations, calculs et mesures. Dans le cas parallèle, ce principe peut être suffisant pour augmenter le volume de détection ainsi que la surface, contrairement à la configuration perpendiculaire pour laquelle une structure a été dessinée pour modifier la répartition des lignes du champ magnétique. Cette structure TLA a été validée par simulation HFSS, calculs sous Matlab ainsi que par mesures. Elle permet l'augmentation de la surface et du volume de détection pour les deux configurations perpendiculaire et parallèle. Par la suite plusieurs boucles torsadées seront mises en série afin d'améliorer la détection RFID.

III.6 Bibliographie du chapitre III

- [III.1] W. Kwon, Y.-G.Gim, H.Park ,S.Kim, a magnetic resonant loop to enhance the operating distance of 13.56 MHz RFID system, ,IEEE ISOC (2013), DOI:, Page(s): 013 - 014
- [III.2] M. Grzeskowiak, A. Diet, P. S. Diao, S. Protat, C. Bourcier, Y. Le Bihan, G. Lissorgues. Pebbles Tracking Thanks to RFID LF Multi-loops Inductively Coupled Reader. Progress In Electromagnetics Research, PIER C, ISSN: 1937-8718, Vol. N°55, pp. 129-137, 2014.
- [III.3] K. Finkenzeller. RFID Handbook. third edition, Wiley.

- [III.4] C. Zierhofer, E. Hochmair, "Geometric approach for coupling enhancement of magnetically coupled coils". *IEEE transactions on Biomedical Engineering*, pp.708-714,1996.
- [III.5] C. Reinhold, P. Schohl, W. John, U. Hilleringmann. Efficient antenna design of inductive coupled RFID-system with heigh power demand. *Journal of communication*, Vol.2,NO.6, ,pp.14-23, November 2007.
- [III.6] C. Liu, Y. Dong. Resonant coupling of a passive inductance-capacitance-resistor loop in coil-based sensing system.*IEEE sensors journal*, Vol, 12, NO. 12.pp.3417-3423,2012
- [III.7] E. WAFFENSCHMIDT. Homogeneous Magnetic Coupling for free positioning in inductive wireless power system. *IEEE journal of emerging and selected topics in power electronics*, Vol. 3, NO. 1.,pp.226-233,2015
- [III.8] M. Grzeskowiak, A. Diet, P. S. Diao, S. Protat, C. Bourcier, Y. Le Bihan, G. Lissorgues. Pebbles Tracking Thanks to RFID LF Multi-loops Inductively Coupled Reader. *Progress In Electromagnetics Research, PIER C*, ISSN: 1937-8718, Vol. N°55, pp. 129-137, 2014.
- [III.9] A. Diet, M. Grzeskowiak, Y. Le Bihan, C. Conessa, Improving LF Reader Antenna volume of detection, for RFID token tag, with a combination of ICLs and in/out-of phase multiple-loops structures, *IEEE RFID-TA*,pp. 208-213,2014.
- [III.10] K.D'hoel,J.Goemaere,N.Stevens,B.Nauwelaers,L.Strycker ,Automated Design of an HF RFID Loop AntennaBased on Parametric Geometry Modification, *IEEE International Conference on RFID (2014)*, DOI:, Page(s): 1 - 7
- [III.11] Hiroshi Hirayama, Yu Satake, Nobuyoshi Kikuma, KunioSakakibara ,Improvement of Null Zone Avoidance Capabilityfor HF-band RFID using Diversity Combiningof Loop Antennas, *EuCAP 2009*, Page(s): 1594 - 1597
- [III.12] A. A. Eteng, S. K. A. Rahim, C. Y. Leow, M. I. Sabran, M. F. M. Yusof, Loop Antenna Design for Lateral H-Field Uniformity in Misaligned HF-RFID Links, *IEEE ISWTA (2014)*, , Page(s): 92 - 95
- [III.13] S.I.Babic, F.Sirois, C.Akyel, Validity check of mutual inductance formulas for circular filaments with lateral and angular misalignments, *Progress in Electromagnetics Research M*, Vol.8, pp.15-26, 2009, DOI:10.2528/PIERM09060105
- [III.14] A .Diet, M.Grzeskowiak, Y.LeBihan, C.Conessa, Improving LF Reader Antenna volume of detection, for RFID token tag, with a combination of ICLs and in/out-of phase multiple-loops structures, *IEEE RFID-TA*, (2014), 208-213.
- [III.15] Marjorie Grzeskowiak, Antoine Diet, Megdouda Benamara, Patrick Poulichet, Christophe Conessa, Stéphane Protat, Marc Biancheri-Astier, Franciso de Oliveira Alves, Yann Le Bihan, Gaele Lissorgues, " Distributed Diameter sub-Coil Twisted Loop Antenna in non-radiative WPT", *IEEE Antennas and Wireless Propagation*, 2017
- [III.16] M.Benamara, M.Grzeskowiak, M.Salhi, A.Diet, G.Lissorgues, Y. Le Bihan " Array Sub-Loops Reader Antenna for HF RFID Tracking", *RFID TA*, Warsaw, 2017
- [III.17] A. DIET, M. GRZESKOWIAK, Y. LE BIHAN, M. BIANCHERI-ASTIER, C. CONESSA, F.

ALVES, M.BENAMARA, G.Lissorgues “ Design of 1cm² coils for HF RFID instruments tracking with detection range improvement”, RFID TA, Warsaw, 2017

[III.18] Megdouda BENAMARA, Marjorie GRZESKOWIAK, Antoine DIET, Gaëlle LISSORGUES, Yann LE BIHAN, Equivalent Input and Output Impedances in HF RFID System Including Resonator, EuCAP, paris, 2017

[III.19] Megdouda BENAMARA, Marjorie GRZESKOWIAK, Antoine DIET, Gaëlle LISSORGUES, Yann LE BIHAN, « «Reader Antenna Including Resonators for HF RFID Detection », LAPC, UK, 2016

[III.20] Megdouda BENAMARA, Marjorie GRZESKOWIAK, Miyassa SALHI Antoine DIET, Gaëlle LISSORGUES, Yann LE BIHAN, “Improvement of HF RFID Detection for Small and Misaligned Tag” icecom, Dubrovnik, 2016

[III.21] Megdouda BENAMARA, Marjorie GRZESKOWIAK, Antoine DIET, Gaëlle LISSORGUES, Yann LE BIHAN, “Calculation of the Equivalent Mutual Impedance in Complex HF RFID Systems”, icecom, Dubrovnik, 2016

[III.22] A.Diet, M.Grzeskowiak, M.Benamara, Y.Le Bihan, C.Conessa, G.Lissorgues, F.Alves, “Detection tube for small HF RFID tags, thanks to mutual coupling with a coil resonator”, European Microwave Conference, Septembre 2015, Paris, France,

[III.23] A.Diet, M.Grzeskowiak, Y.Le Bihan, C.Conessa, F.Alves, M. BIANCHERI-ASTIER, A. POZZEBON, M.Benamara, G.Lissorgues “LF RFID Chequered Loop Antenna for pebble detection”, European Microwave Conference, UK, 2016

[III.24] M.Grzeskowiak, A. Diet, M.Benamara, P.Poulichet, P.Protat G.Lissorgues, M. Biancheri-Astier, Y. Le Bihan, C. Conessa, F. Alve “ Sub-coil in reader antenna for HF RFID volume detection improvment”, RFID TA, Warsaw, 2017

[III.25] A. DIET, M. GRZESKOWIAK, M. BIANCHERI-ASTIER, Y. LE BIHAN, F. ALVES, Koffi Gbafa, M.BENAMARA, C. CONESSA, G.Lissorgues, Alessandro Pozzebon “ A switched reader complementary-loops structure for detecting LF RFID tagged pebbles”, RFID TA, Warsaw, 2017

[III.26] M. Grzeskowiak, F. El Hatmi, A.Diet, M.Benamara, Y. Le Bihan, G.Lissorgues “ Coaxially Distributed Diameter sub-Coil Twisted Loop Antenna in HF RFID”, Eucap, Paris, 2017

[III.27]Megdouda BENAMARA, Marjorie GRZESKOWIAK, Antoine DIET, Gaëlle LISSORGUES, Yann LE BIHAN, A twisted loop antenna to enhance HF RFID detection areas for different tag positioning, EuCAP, Davos, 2016

[III.28] Megdouda BENAMARA, Marjorie GRZESKOWIAK, Miyassa SALHI Antoine DIET, Gaëlle LISSORGUES, Yann LE BIHAN, « «3D HF RFID Reader Antenna for Tag Detection in Different Angular Orientations », LAPC, UK, 2016

Chapitre IV

Prototypage et environnement métallique

La plupart des instruments chirurgicaux sont métalliques. Le système que nous proposons doit fonctionner parfaitement dans un environnement réel. Le métal étant conducteur, sa présence dans un système fonctionnant par couplage magnétique crée des courants de Foucault (dus à la variation du champ qui l'entoure). Dans ce chapitre, nous allons évaluer la variation de l'inductance mutuelle et de l'inductance mutuelle équivalente du système étudié précédemment en fonction de la présence du métal à proximité des antennes. Deux solutions sont proposées : une structure d'antenne lecteur à deux étages et un tag entouré de ferrite (comme séparateur entre l'instrument métallique et le tag). Dans la seconde partie de ce chapitre, nous présentons deux structures antennaires développées pour le projet ARTIC. Les deux structures reprennent tous les points développés dans ces travaux de thèse : la première structure est une antenne basée sur l'utilisation de résonateurs, la seconde est basée sur la réorientation des lignes de champs (structure torsadée). Des premiers tests de détection sont présentés qui valident l'ensemble de la démarche proposée dans ces travaux.

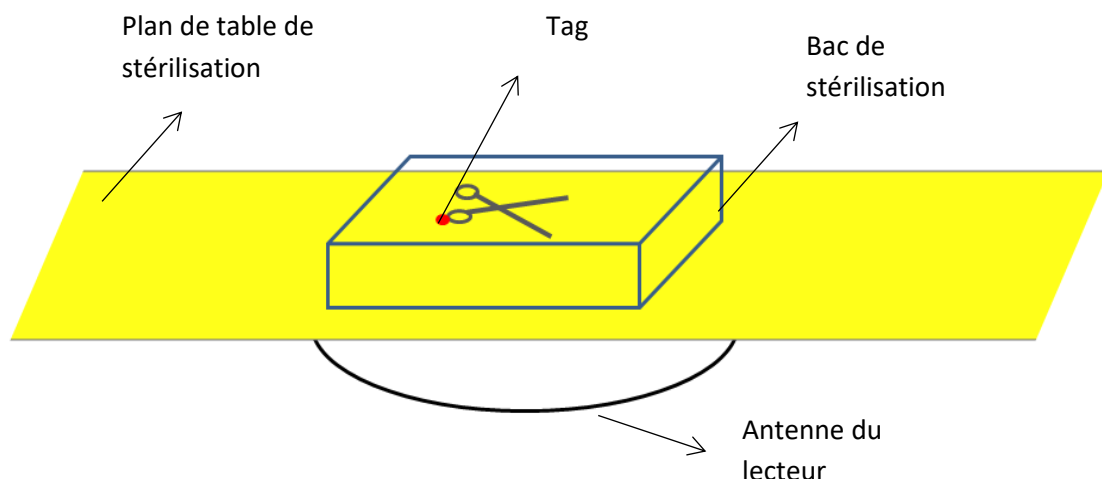
IV.1. Effet de l'environnement métallique sur le système RFID

Dans un environnement hospitalier les instruments chirurgicaux ainsi que les bacs de stérilisation sont métalliques. Afin de pouvoir mettre en œuvre notre solution de traçabilité automatisée, nous devons assurer son fonctionnement dans un tel environnement. Dans cette partie, nous allons développer l'effet de la présence du métal sur le fonctionnement du système RFID (antenne boucle du lecteur et tag) et particulièrement sur les phénomènes de courant de Foucault [IV.1-IV-4].

IV.1.1 Influence des plaques métalliques sur la structure

Quand un matériau conducteur est placé dans une zone de variation d'un champ magnétique, des courants induits se créent à l'intérieur du matériau conducteur. Ce phénomène est appelé courant de Foucault. La distribution des courants dans le matériau dépend de ses propriétés physiques et diélectriques mais aussi du champ magnétique qui le crée (source d'excitation). La circulation des courants de Foucault dans le matériau crée un champ magnétique opposé au champ d'excitation.

La solution proposée par le projet ARTIC est basée sur la détection des tags associés aux objets métalliques (instruments chirurgicaux). En salle de stérilisation, ces instruments sont manipulés en vrac et se trouvent dans un bac en métal grillagé. Notre système de traçabilité RFID (antenne du lecteur et tag) doit donc fonctionner en présence des objets métalliques à proximité des tags mais aussi en présence du métal (bac métallique) entre l'antenne du lecteur et le tag. La figure IV.1 montre un récapitulatif de la solution de traçabilité proposée en présence du métal.



(a)

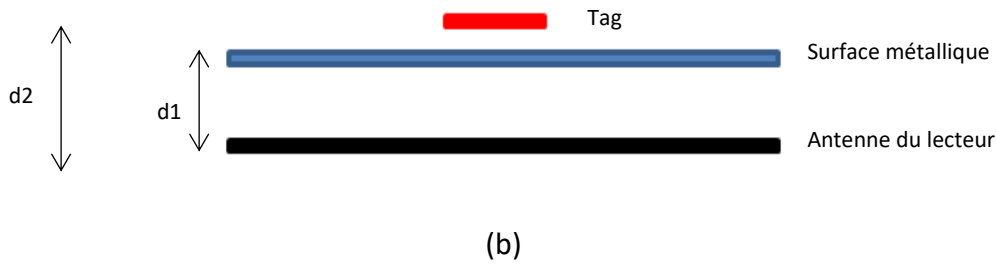


Figure IV. 1 : solution de traçabilité proposée en présence du métal dans le plan (X, Y) (a) et (Y, Z) (b)

Afin d'étudier l'influence du métal sur le fonctionnement du système RFID, nous étudions dans cette partie, par simulation HFSS, l'influence de la présence d'une plaque métallique sur le système étudié précédemment. La plaque métallique, a pour dimensions (longueur, largeur et hauteur) 100 mm, 100 mm et 5 mm. Elle couvre donc toute la surface de l'antenne du lecteur (antenne boucle circulaire de 50 mm de rayon). La distance entre le tag est la boucle du lecteur est de 10 mm et la plaque métallique est équidistante de la boucle du lecteur et du tag.

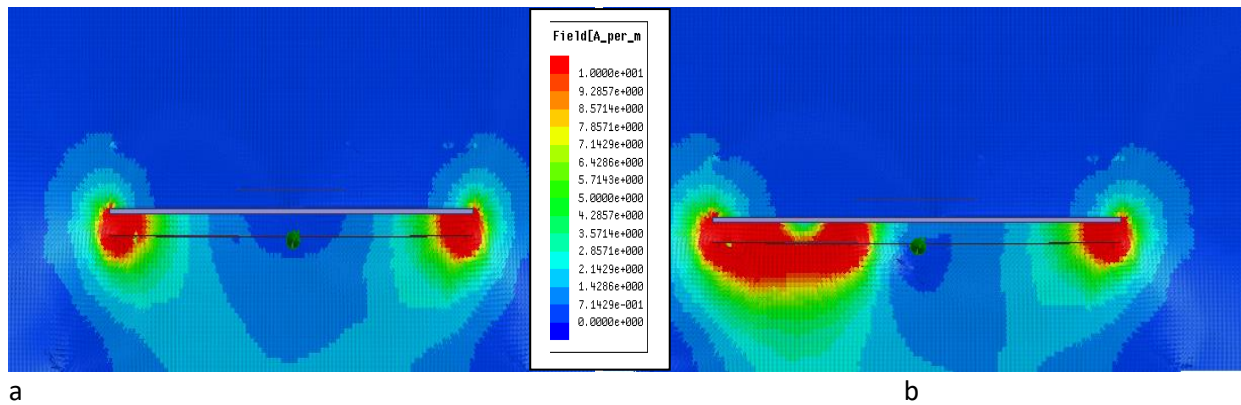
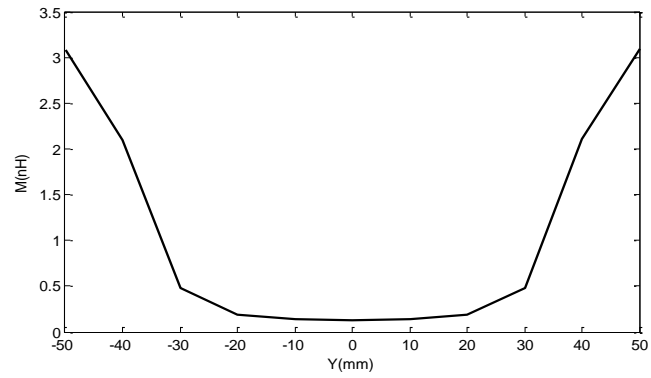


Figure IV. 2 : champ magnétique en présence du métal pour une structure avec (b) et sans résonateur (a)

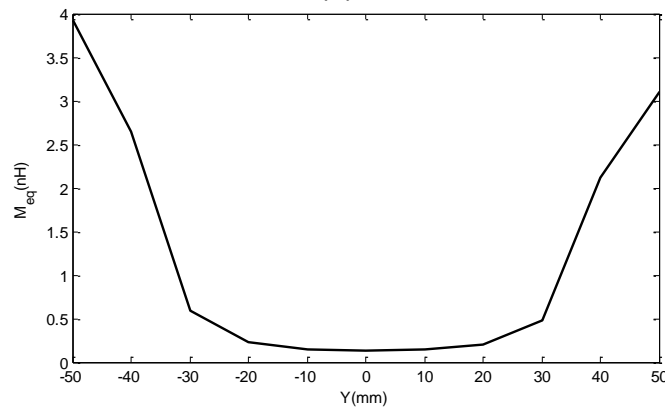
La Figure IV.2, montre la distribution du champ magnétique lors de la présence du métal entre la boucle du lecteur (avec et sans résonateur) et le tag. Pour les deux structures, avec ou sans résonateur, le champ magnétique est fortement atténué par la plaque métallique. Les seules zones où le tag peut capter de l'énergie sont sur les bords de la boucle du lecteur. Dans ces zones, les lignes de champ magnétique « tournent » et peuvent atteindre la zone en face arrière du métal.

IV.1.1. Effet sur l'inductance mutuelle équivalente :

Pour un déplacement latéral du tag de -50 mm à 50 mm, nous avons reporté sur la Figure.IV.3, l'évolution de l'inductance mutuelle (équivalente) avec et sans présence du résonateur. L'inductance mutuelle (équivalente) est réduite dans les deux cas, avec et sans résonateur. La diminution importante est localisée principalement sur la surface de la boucle du lecteur. Sur les bords de la boucle du lecteur, l'inductance mutuelle (équivalente) reste élevée (mais dégradée par comparaison au cas sans métal). Il y a une différence de niveau entre les deux bords à cause de la présence du résonateur.



(a)

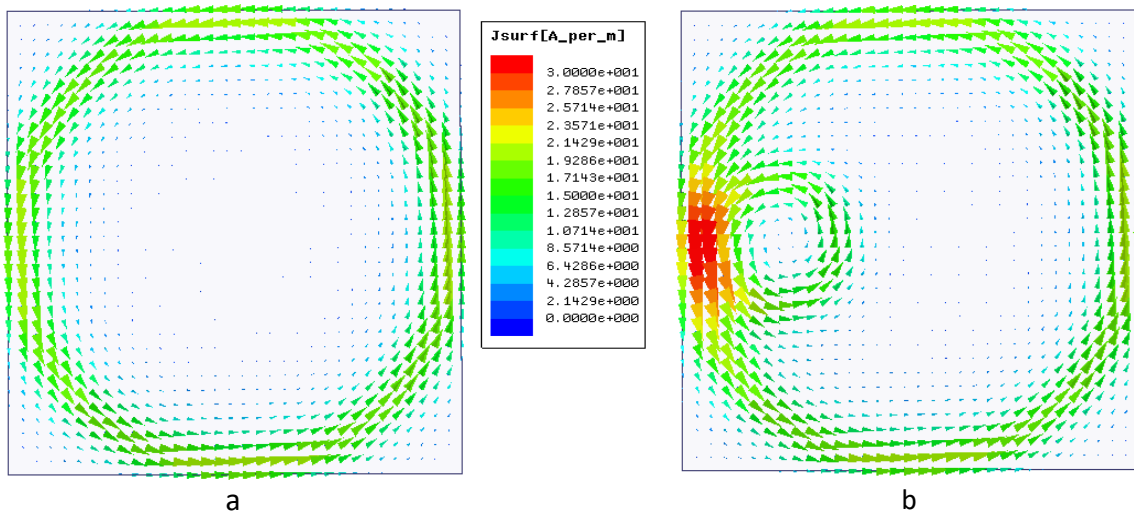


(b)

Figure IV. 3 : inductance mutuelle (équivalente, en H) en présence du métal pour une structure avec (b) et sans résonateur (a)

IV.1.2. Courant de Foucault et le champ généré :

La diminution de la valeur d'inductance mutuelle est due au courant de Foucault. La plaque métallique dissipe une partie de l'énergie du champ magnétique généré par la boucle du lecteur. Elle fonctionne donc comme une charge en parallèle du tag. Les courants induits dans le métal sont présentés sur la Figure IV.4.



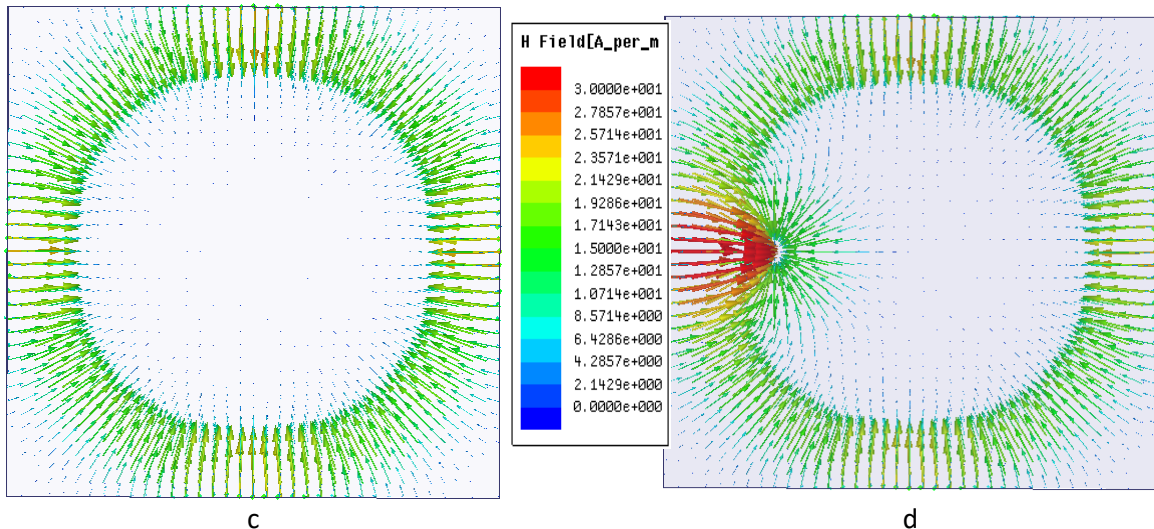


Figure IV. 4 : Courant induit et champ généré sur le métal pour une structure avec et sans résonateur

- a : courant induit dans le métal pour une structure sans résonateur
- b : courant induit dans le métal pour une structure avec résonateur
- c : champ généré sur le métal pour une structure sans résonateur
- d : champ généré sur le métal pour une structure avec résonateur

La distribution du courant dans la plaque métallique suit une trajectoire circulaire. Le courant dans la plaque métallique est maximum sur les bords de la plaque pour une structure sans résonateur. L'ajout d'un résonateur affecte la distribution du courant dans le métal (donc également son intensité). Nous pouvons identifier une répartition du courant qui « suit » les contours de la boucle du lecteur ainsi que ceux du résonateur. Le courant atteint sa valeur maximale sur la zone qui correspond au bord de la boucle du lecteur le plus proche du résonateur. Cette zone correspond vraisemblablement au plus fort couplage entre la boucle du lecteur et le résonateur. La circulation du courant sur la plaque métallique crée un champ magnétique que nous avons représenté sur la Figure IV.4.a et la Figure IV.4.b.

Le champ magnétique étant proportionnel au courant qui le crée, il est maximal sur les bords du métal et s'affaiblit en direction du centre de la plaque métallique. En cas de présence du résonateur, le champ magnétique est maximal sur le bord le plus proche du résonateur. En comparaison des deux cas avec et sans résonateur, le champ magnétique est plus important avec la présence du résonateur. Les lignes du champ magnétique s'opposent à celles créées par la boucle du lecteur. Cela explique pourquoi il y a une diminution importante de la valeur de l'inductance mutuelle avec la présence du résonateur (Figure IV.3.a et Figure IV.3.b).

IV.1.3. Solution d'antenne du lecteur en deux étages

La dégradation de la performance du système, due à la diminution de la valeur de la mutuelle inductance, dans le cas de la présence du métal est importante. Pour cela nous avons proposé une structure en deux étages (Figure. IV.5) qui limite cet effet [IV.5-IV.10]. En pratique, ce système a la forme d'un tunnel (dont la matière de réalisation n'est pas

absorbante vis-à-vis des ondes RF). Les antennes sont positionnées sur la partie haute et basse du tunnel.

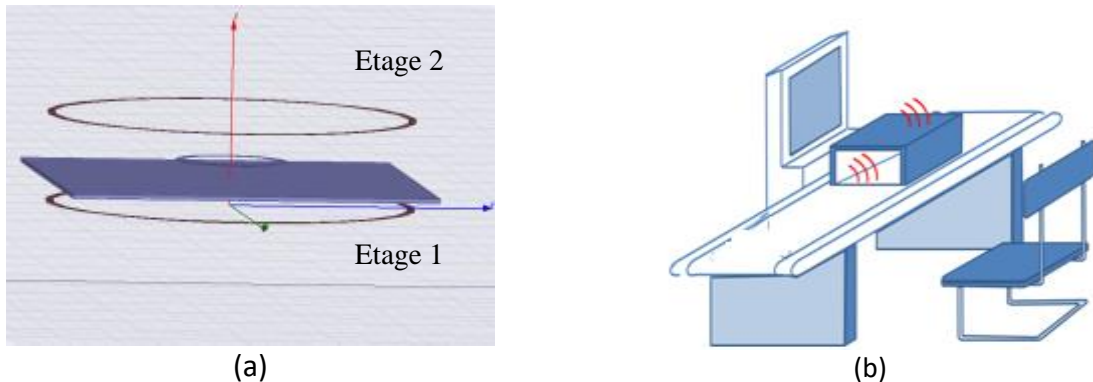


Figure IV. 5 : structure de l'antenne du lecteur en deux étages : (a) système simulé sur HFSS, avec plaque métallique au milieu, (b) système proposé par le projet ARTIC

Le champ généré par l'étage 1 de l'antenne du lecteur est très perturbé par la présence du métal. L'ajout de l'étage 2 engendre un champ supplémentaire à la structure. La Figure.IV.6, montre le champ magnétique total généré par la structure dans le cas d'absence et de présence de résonateur sur chacune des faces. Nous observons que l'ajout d'un résonateur sur l'étage du bas n'est pas bénéfique pour la transmission, à cause de la présence du métal. En revanche, sur l'étage 2, le résonateur créé un couplage avec l'étage 1 (sur le bord). Ainsi, l'intérêt de l'ajout du résonateur apparaît clairement en comparant les figures (Figure. IV.6(a)) et (Figure.IV.6(b))

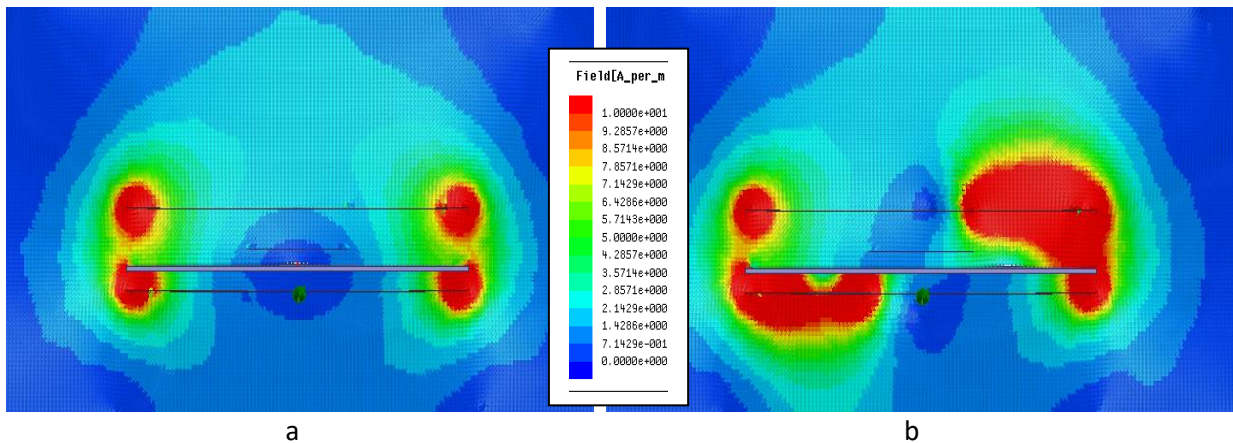


Figure IV. 6: champ magnétique en présence du métal pour une structure en deux étages avec (b) et sans résonateur (a)

a. Effet sur l'inductance mutuelle équivalente

L'inductance mutuelle équivalente, dans ce cas, est définie par la somme des inductances mutuelles entre l'étage 1 et le tag ainsi que l'étage 2 et le tag. Dans la Figure. IV.7, nous avons reporté les résultats de calculs d'inductance mutuelle équivalente en présence de l'étage 2. Ces résultats sont comparés à ceux correspondants au cas à un seul étage (l'étage 1) (Figure. IV.3.(b)).

L'inductance mutuelle équivalente est améliorée sur toute la surface de l'antenne du lecteur (en comparant ces résultats aux résultats de simulation à un seul étage (Figure. IV.3).

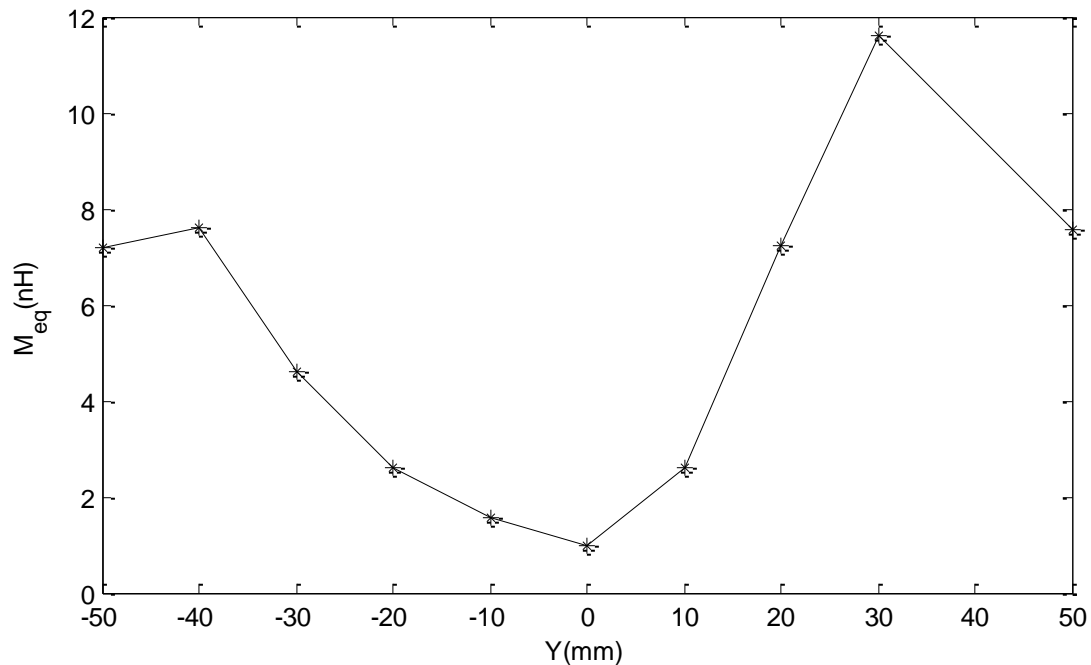


Figure IV. 7 : inductance mutuelle équivalente en présence du métal pour une structure à deux étages

L'inductance mutuelle du système avec résonateur diminue de 16 nH (de 21nH à 5 nH) sur l'axe du résonateur (à $y=-30$ mm) et de 8 nH sur l'axe du centre de la boucle du lecteur (à $y=0$ mm). A $y=30$ mm, ce qui correspond au centre du résonateur sur l'étage 2, l'inductance mutuelle équivalente est augmentée de 1 nH (de 11 nH à 12 nH). L'ajout de résonateur sur l'étage 2 est donc potentiellement bénéfique en termes de performances du système.

b. Effet sur les courants de Foucault

Dans la Figure.IV.8 , sont reportés les courants de Foucault ainsi que les champs magnétiques générés sur la plaque métallique dans le cas d'un système à deux étages et d'un système à un seul étage (étage 1).

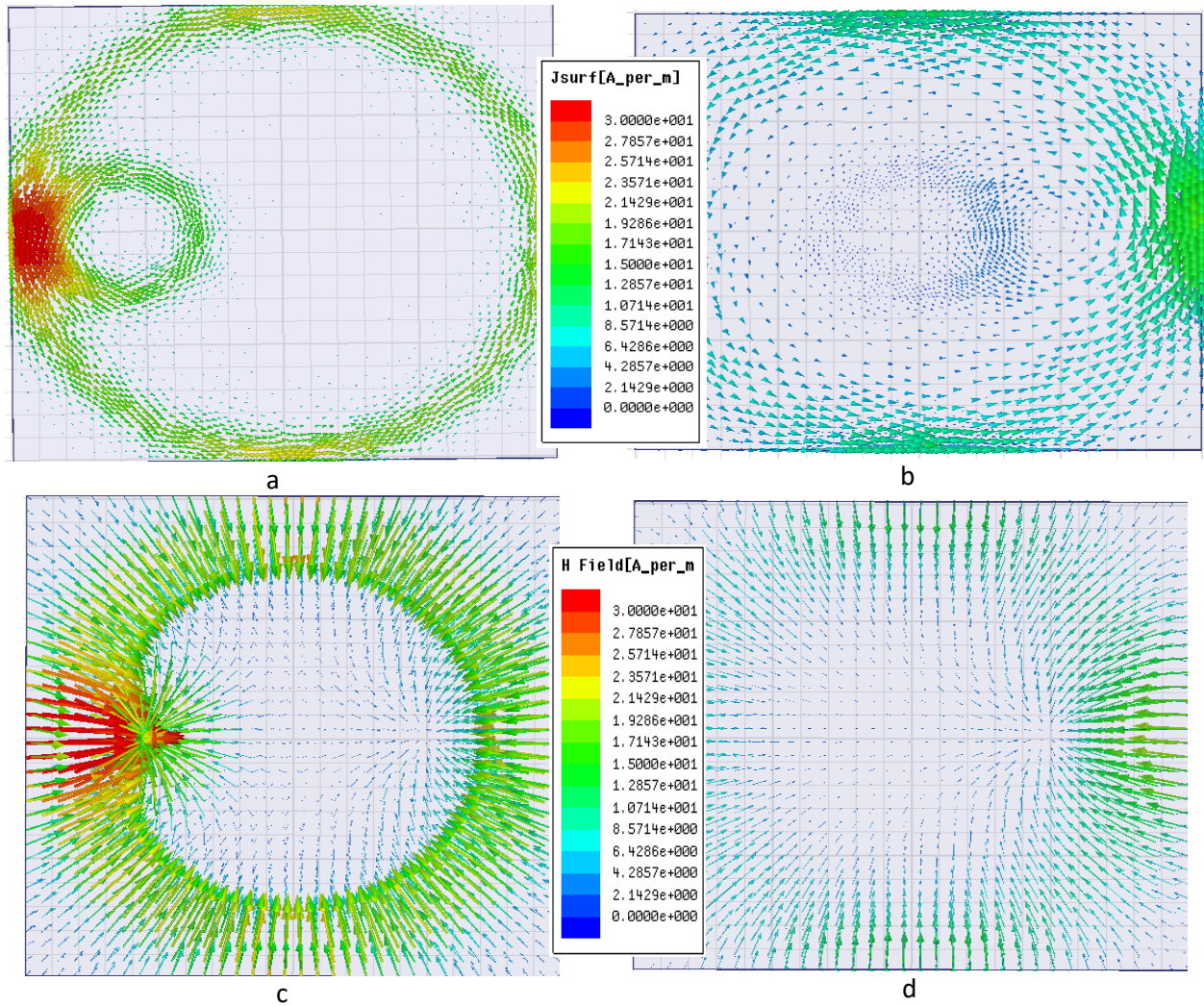


Figure IV. 8: courant induit et champ généré sur le métal :

- a : courant induit dans le métal pour une structure à deux étages
- b : courant induit dans le métal pour une structure avec un seul étage (étage 1)
- c : champ généré sur le métal pour une structure à deux étages
- d : champ généré sur le métal pour une structure avec un seul étage (étage 1)

Le résonateur de l'étage 2 affecte la distribution des courants de Foucault et les lignes de champ associées. Cette influence apparait, sur le champ généré sur la plaque métallique, quand on compare ces résultats à la Figure. IV.4.

IV.1.4 Structure grillagée

Pour une plaque métallique grillagée, de dimensions 100 mm x 100 mm, le champ magnétique est aussi perturbé (Figure. IV.9). Ainsi, la solution utilisant des structures à deux étages peut aussi être appliquée dans le cas plus réel des plateaux grillagés pour en limiter l'influence. Les résultats seront similaires.

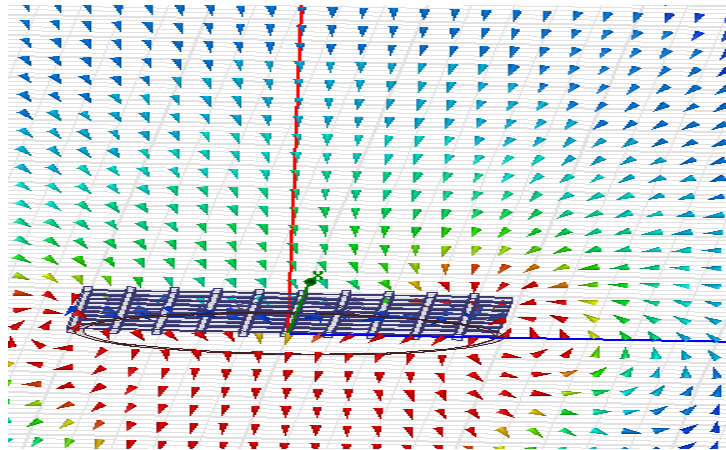


Figure IV. 9 : : champ magnétique en présence du métal grillagé

IV.2. La RFID à proximité des instruments chirurgicaux

IV.2.1. Présentation du matériel :

Pour associer un tag RFID à un instrument, une étude de la forme optimale est nécessaire. Selon leurs formes et l'ergonomie d'utilisation par et pour les médecins, chaque instrument doit avoir un endroit idéal pour positionner le tag. La Figure. IV.10 montre différents instruments usuels de différentes tailles et formes.



Figure IV. 10 : instruments chirurgicaux

IV.2.2. Influence sur le champ magnétique

Dans cette partie nous allons étudier l'influence de l'instrument chirurgical sur les communications entre le tag et la boucle du lecteur. Dans ce cas, l'instrument (des ciseaux sur la Figure IV.11) a des dimensions plus petites par rapport à l'antenne du lecteur. Les lignes de champ ne sont pas très perturbées par la présence de l'instrument métallique.

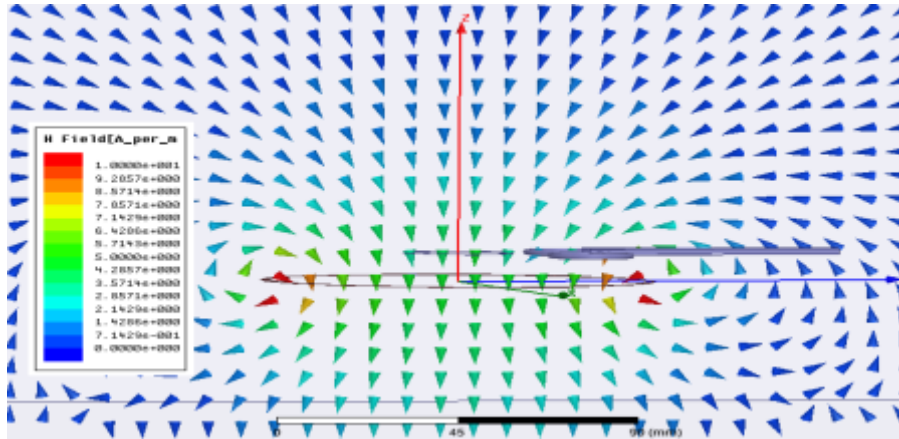


Figure IV. 2 : : champ magnétique en présence des ciseaux

L'instrument étant métallique, la variation du champ magnétique de la boucle du lecteur crée un courant induit dans le métal. Ce courant est plus important sur le côté appartenant à la surface interne de la boucle du lecteur et il diminue sur le côté externe de la boucle du lecteur (l'extrémité droite du ciseau) (Figure. IV.12).

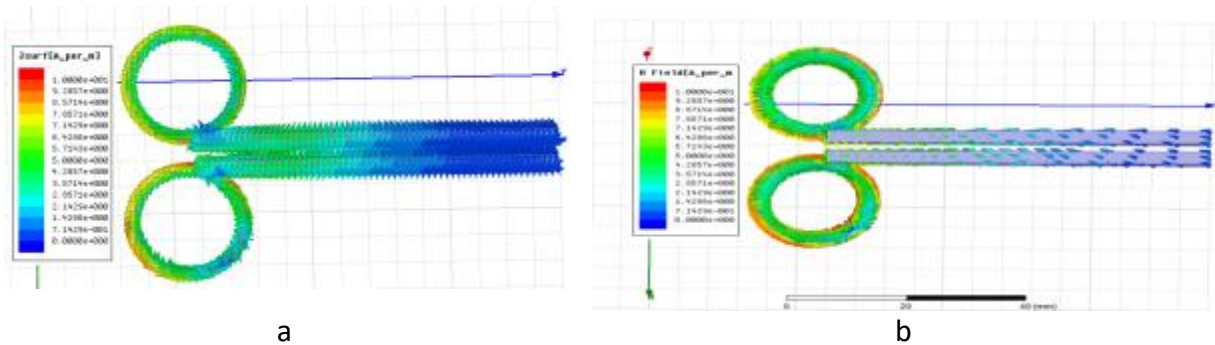


Figure IV. 3: courant induit (a) et champ généré sur le métal (b) pour une structure sans résonateur

La circulation du courant de Foucault sur les ciseaux crée un champ magnétique. Ce champ magnétique est aussi important sur la partie des ciseaux appartenant à la surface de la boucle du lecteur et diminue sur la partie externe, à l'image des courants.

IV.2.3. Influence sur l'inductance mutuelle équivalente :

Les ciseaux sont positionnés à 3mm de la boucle du tag et à une distance de 10 mm par rapport à la boucle du lecteur (même distance entre le tag et la boucle du lecteur). Pour une variation latérale du tag de -50 mm à 50 mm, nous avons reporté, sur la Figure.IV.13, l'inductance mutuelle (équivalente) pour deux structures avec et sans résonateur.

En comparant ces résultats aux résultats de simulation sans métal, le maximum d'inductance mutuelle du système diminue de 6 nH (de 11 nH à 5 nH) pour la structure sans résonateur ($Y=\pm 30\text{mm}$). Concernant la structure avec résonateur (placé à $y= -30\text{mm}$), la dégradation est de 13.5 nH (de 21 nH à 7.5 nH), pour $y=-30\text{mm}$.

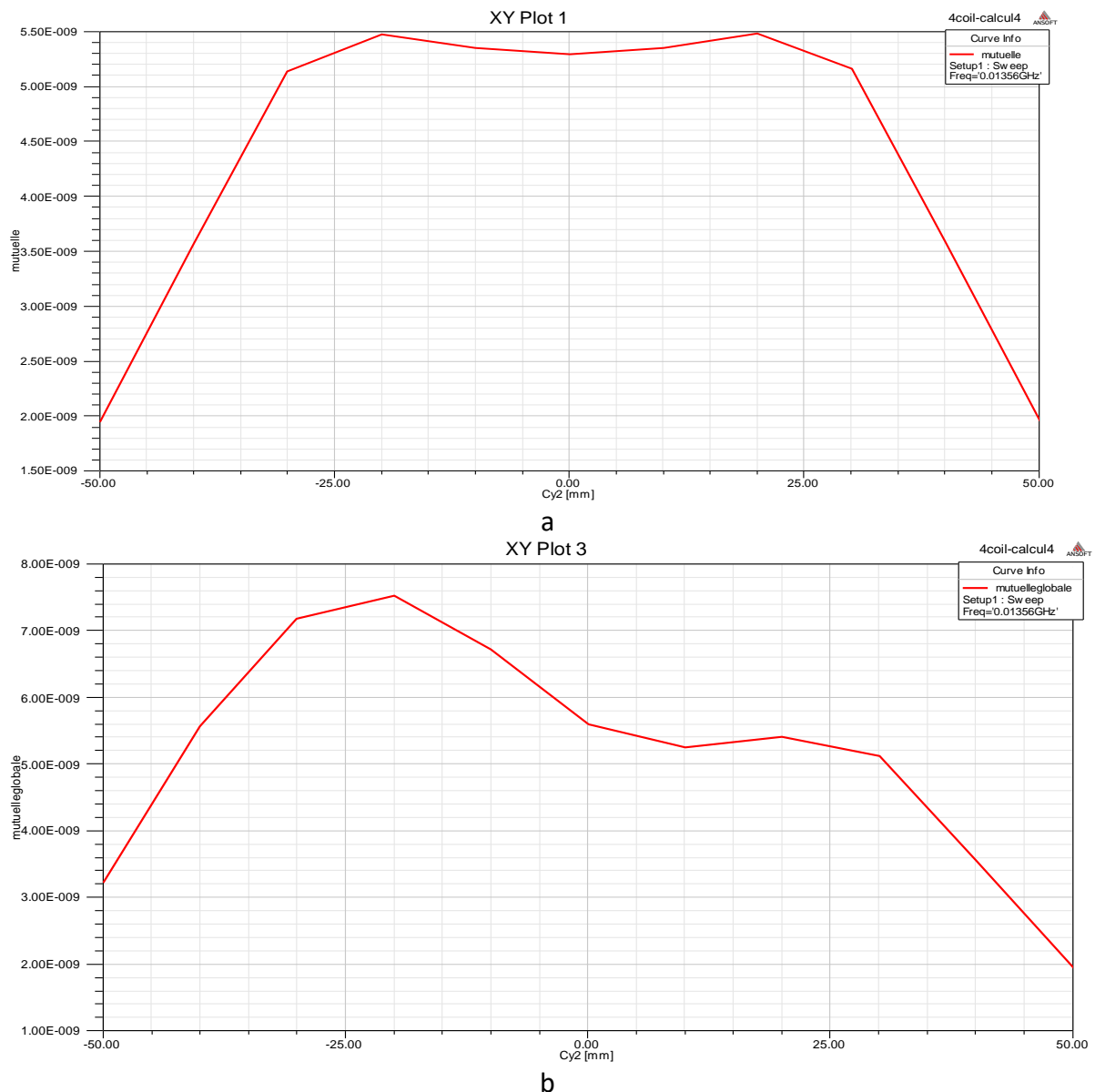
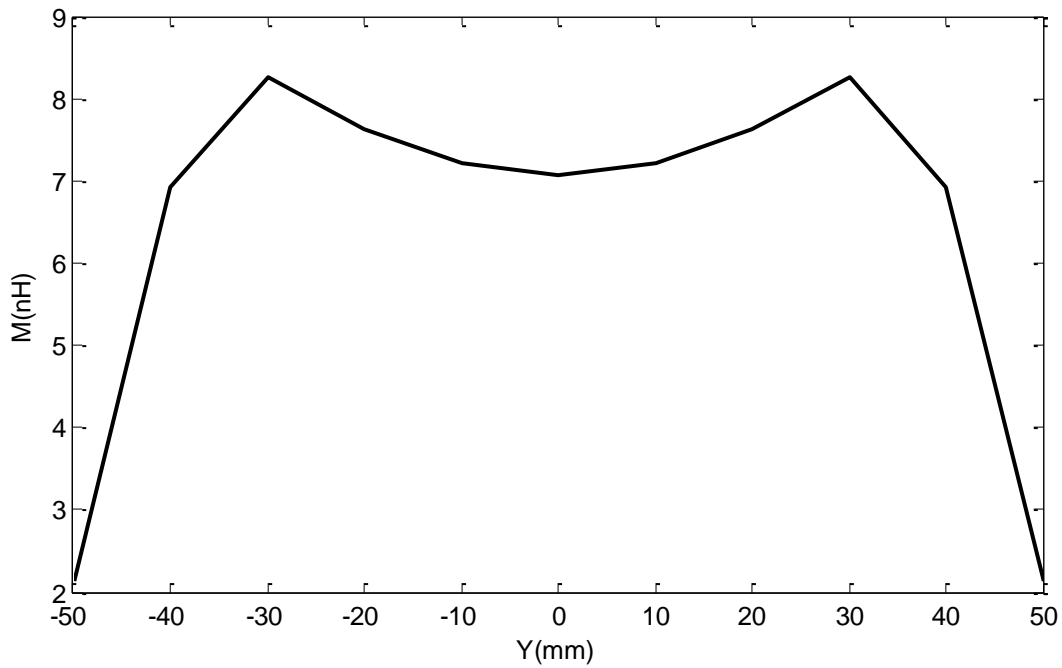


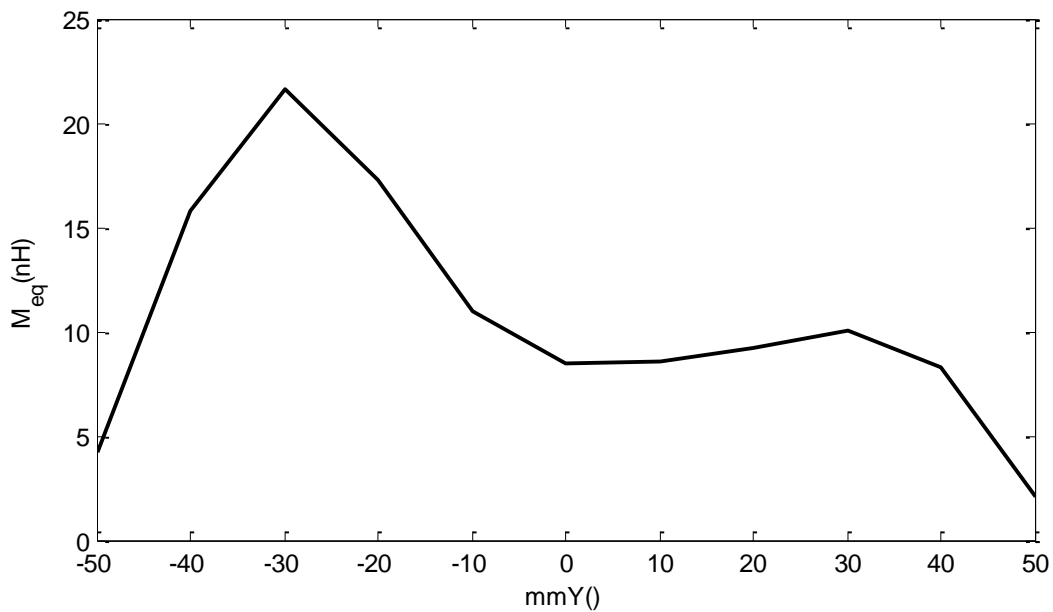
Figure IV. 4: inductance mutuelle (équivalente) en présence du métal pour une structure avec (b) et sans résonateur (a) en présence des ciseaux

IV.3. Solution à base de ferrite :

Le tag doit être associé aux instruments. La communication avec l'antenne du lecteur sera donc perturbée par l'instrument lui-même mais aussi par la boîte ou le panier grillagé sur lequel il sera mis. L'idéal est de proposer une solution qui permet de limiter les dégradations dues aux boîtes et aux paniers (telle que la structure à deux étages qui répond bien à ces exigences) et une solution pour limiter les dégradations dues aux instruments eux-mêmes. La solution que nous proposons est de mettre de la ferrite entre le tag et l'instrument. Ainsi, les lignes de champs seront plus concentrées localement dans cette ferrite et l'influence du métal sera minimisée. L'inductance mutuelle en présence de la ferrite est reportée sur la Figure IV.14.



a



b

Figure IV. 5: inductance mutuelle (équivalente) en présence du métal et de la ferrite entre tag et instrument pour une structure avec (b) et sans résonateur (a)

L'utilisation de la ferrite permet aussi d'augmenter l'inductance mutuelle (équivalente) des structures, avec ou sans résonateurs. Les résultats trouvés concordent avec le cas sans métal.

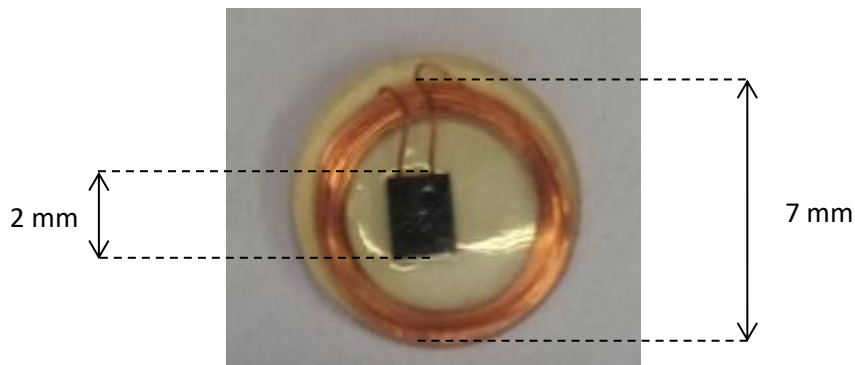
IV.3 Prototypage

Dans ce travail, les verrous techniques du projet ARTIC sont liés aux structures antennaires ainsi que à la présence du métal. Les deux structures proposées précédemment correspondent le plus à nos attentes. Afin d'étudier les performances de nos différents

systèmes, nous utilisons des instruments chirurgicaux tagués. Pour cette partie prototypage nous présentons les instruments utilisés dans nos tests ainsi que les prototypes du lecteur RFID que nous avons étudié.

➤ **Marquage des instruments chirurgicaux :**

La faisabilité de notre solution passe aussi par une confirmation de la possibilité de marquage (tag) des instruments chirurgicaux. Leur identification nécessite comme précisée précédemment l'utilisation d'un tag RFID sur chacun des instruments. Pour se faire, nous avons utilisé des tags du commerce (ICODE SLI) pour faire des premiers tests de détection (Figure IV.15).



Figure

Figure IV. 6 : tag RFID HF à utiliser sur les instruments chirurgicaux

Ce tag est ensuite utilisé à proximité des instruments chirurgicaux pour faire des premiers tests du prototype ARTIC (Figure IV.16). Sa fixation préliminaire est faite avec du « scotch » et respecte les contraintes de l'ergonomie. Pour chaque instrument il est crucial de choisir le bon endroit pour positionner le tag. Le tag utilisé a une forme circulaire, son diamètre est de 7mm. Cette petite dimension provoque une difficulté dans l'approche de détection multiple : le tag étant de très petite taille par rapport aux instruments chirurgicaux, il peut facilement se retrouver dans une configuration où sa surface est complètement couverte par un instrument chirurgical. En prenant comme exemple un instrument chirurgical de forme ciseau (80% des instruments chirurgicaux utilisés sont de forme ciseau), nous pouvons distinguer deux parties, la partie haute et la partie basse de l'instrument, séparées par un pivot.

La partie basse est une partie semi couverte du métal ; elle comporte deux poignées de forme ovales ou circulaires d'un diamètre de 30 mm en moyenne. La partie basse est composée de deux lames (supérieure et inférieure). Elle est plus épaisse par rapport à la partie haute et présente une largeur totale (les deux lames superposées) de 5mm à 10mm. Lors de la stérilisation et du lavage, les instruments sont posés en vrac dans les bacs grillagés, cela peut entraîner un risque que la surface d'un tag (d'un instrument A) se trouve complètement couverte par les lames de l'instrument au-dessus (instrument B), étant donné que la surface globale du tag utilisé est plus petite que la largeur des lames. Ce critère de

différence de tailles entre le tag et l'instrument est contraignant et va forcément limiter le nombre d'instruments à mettre dans le bac de stérilisation.

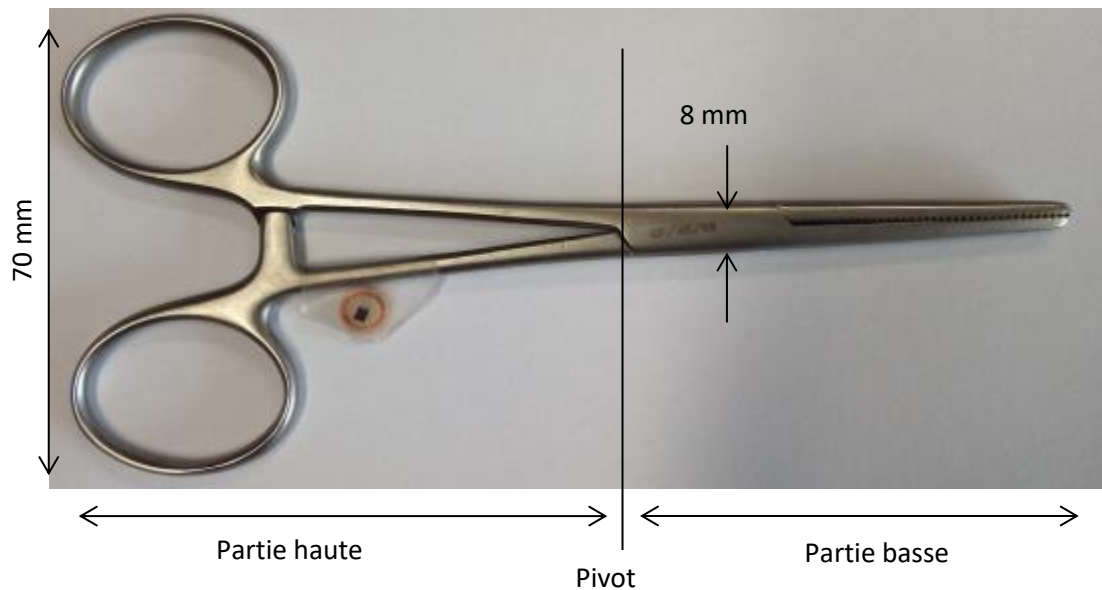


Figure IV. 7 : tag RFID accroché à un instrument chirurgical

La dernière étape qui concerne le marquage de l'instrument est l'encapsulation. C'est l'étape la plus importante dans le procédé du marquage.

D'un point de vue ergonomie la solution proposée doit répondre à certains critères :

- Une taille la plus réduite possible, ceci dépendant évidemment de la taille de l'antenne.
- Forme adaptée (préhension optimum de l'instrument par le chirurgien)
- protubérance la plus petite et la plus légère possible.
- distance minimale à imposer entre le tag et l'instrument de chirurgie. Cette distance doit permettre d'atténuer les perturbations dues au métal.
- Tests de rigidité (résister aux chocs entre instruments) et conditions de stérilisation (température et pression).

Pour intégrer la protubérance sur l'instrument une solution basée sur une protubérance de résine est proposée dans le brevet [WO2012/146867]. La solution finale correspond à celle de la Figure IV.17



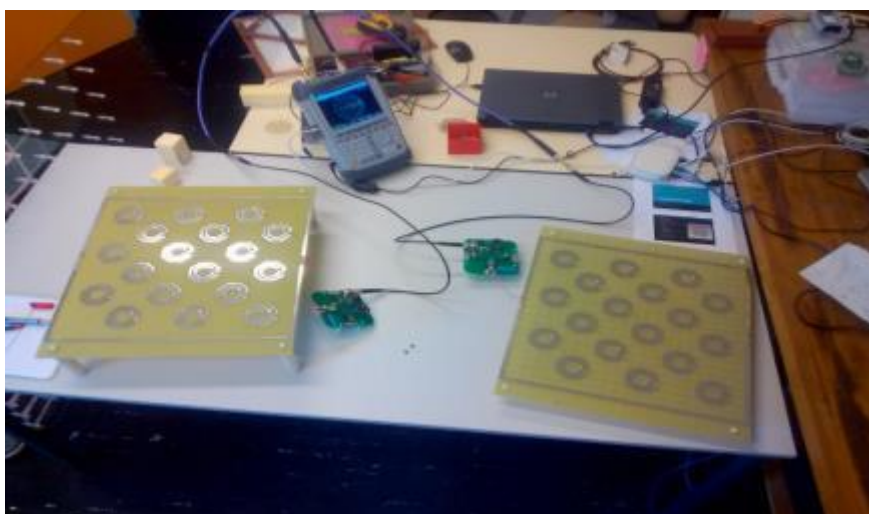
Figure IV. 8 : encapsulation du tag associé à un instrument chirurgical

➤ Prototypes du lecteur RFID

Deux structures sont étudiées et proposées pour le projet ARTIC. La première est une antenne boucle avec des résonateurs, et la seconde est une antenne torsadée avec des résonateurs. Les deux prototypes sont utilisés en mode à deux étages pour former le tunnel d'identification des instruments chirurgicaux.

IV.3.1. Structure avec résonateurs

La structure antenne carrée avec résonateurs est composée de deux étages (étage du bas et du haut séparés par une distance de 10 cm). Chaque étage est formé par une antenne carrée (une piste en cuivre) d'une taille de 42x42 cm et comporte 18 résonateurs. La distance entre les résonateurs est fixée suite à une étude paramétrique faite sur CST. Les résonateurs ont une forme hexagonale et sont constitués de deux tours de cuivre, gravés sur du FR4, leur adaptation se fait à l'aide d'une capacité soudée en parallèle. Les structures à un étage et deux étages sont présentées sur la Figure IV.18.



(a)

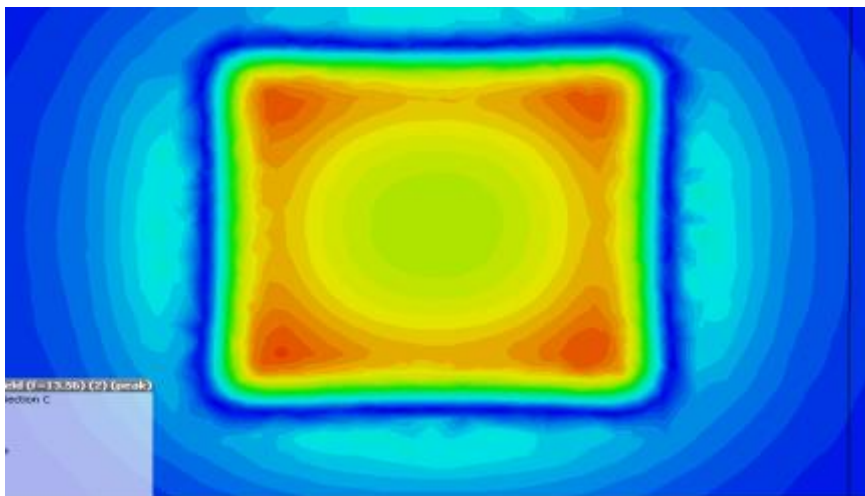


(b)

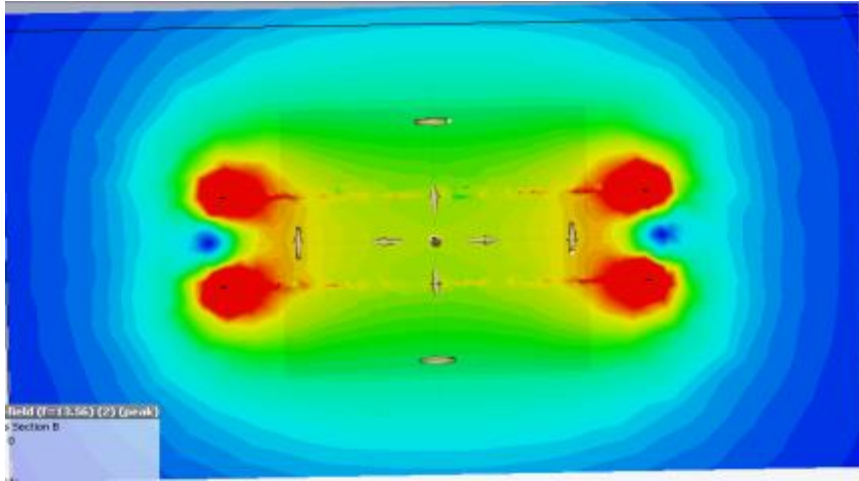
Figure IV. 9: Structure antenne carrée avec résonateur : sur un étage (a) et sur deux étages (b)

Les plaques présentent séparément des impédances équivalentes à $Z_1=3.08+j183$ Ohms et $Z_2=3.11+j199$ Ohms. Le résonateur a une inductance $L= 245.8$ nH.

La structure proposée est simulée sur CST. Sur la Figure IV.19, nous visualisons la répartition du champ magnétique dans le plan (X,Y) (vue de haut) et (Y,X) (vue de face). Comme nous pouvons le constater, l'amplitude du champ magnétique est maximale au niveau de la piste de l'antenne et diminue en se dirigeant vers le centre de l'antenne. Ces résultats correspondent au cas où les résonateurs ne sont pas connectés.



(a)



(b)

Figure IV. 10 : amplitude du champ magnétique dans les plan (X,Y) (a) et (Y, Z) (b) pour une structure à deux étages

Afin de modifier la répartition du champ magnétique, nous ajoutons les résonateurs à la structure simulée. Une étude paramétrique est nécessaire pour estimer la valeur optimale des capacités des résonateurs. Nous utilisons le principe de famille de résonateurs : une famille est constituée des résonateurs positionnés d'une manière symétrique par rapport aux bords de l'antenne carrée. Nous avons distingué six familles différentes (représentées par différentes couleurs sur la Figure IV.20).

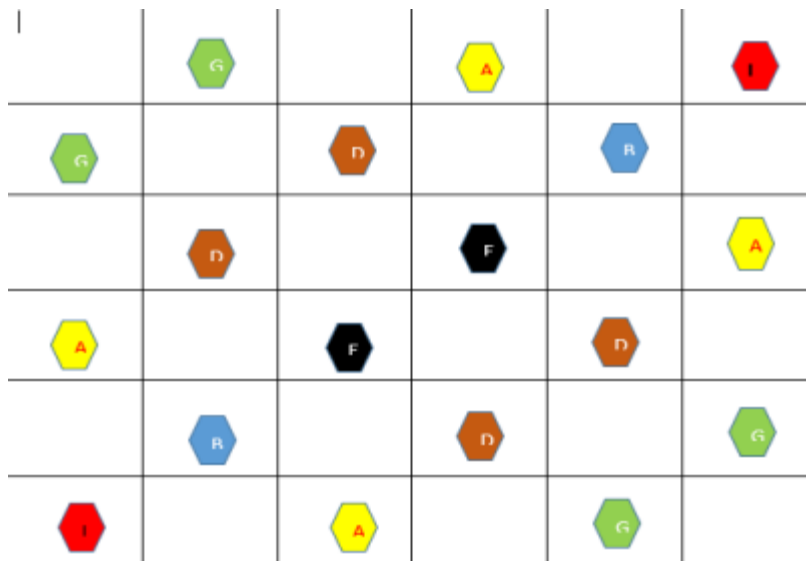
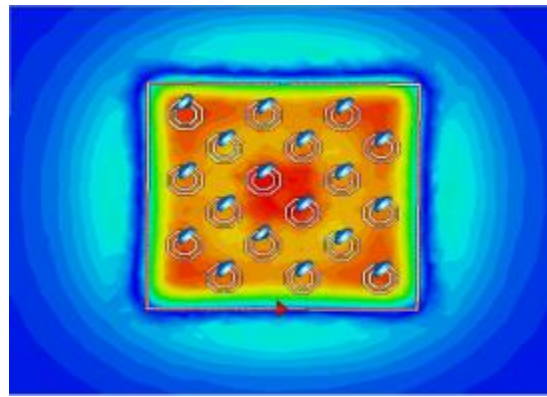
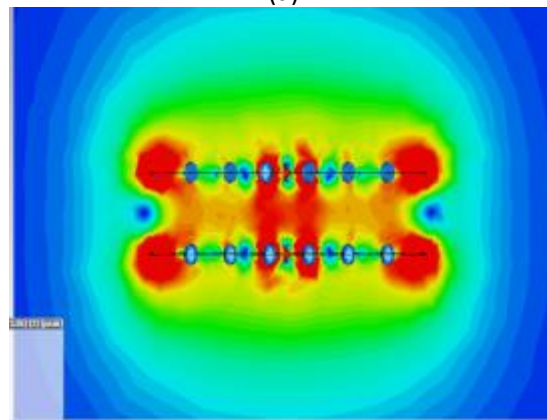


Figure IV. 20 : famille de résonateurs

Le but de cette étude paramétrique est d'obtenir la meilleure configuration (fréquence d'accord des résonateurs : valeurs des capacités) qui nous permette d'avoir un champ magnétique confiné/concentré dans un endroit donnée. Dans notre étude, cet endroit correspond au centre de la structure. Les résultats de la répartition du champ magnétique sont présentés sur la Figure IV.21.



(a)



(b)

Figure IV. 11 : Répartition du champ magnétique (amplitude) dans la structure incluant les résonateurs dans les plan (X, Y) et (Y, Z)

Les résultats montrent que le champ magnétique présente des amplitudes maximales au niveau des pistes de l'antenne carrée mais aussi au centre de l'antenne. Nous pouvons aussi constater une augmentation de l'amplitude du champ magnétique sur toute la surface interne de la structure, à comparer avec le cas où les résonateurs sont déconnectés. Cette structure est utilisée par la suite pour faire des tests de détection RFID.

Validation expérimentale

Pour valider la première structure proposée au projet ARTIC, nous avons utilisé le banc de test de la Figure IV.22. Dans ce montage, nous utilisons l'antenne carrée avec les résonateurs (pour former le tunnel d'identification RFID), et un lecteur RFID HF pilotés par un ordinateur pour afficher les instruments détectés en fonction de la configuration. Une adaptation à 50 Ohms est faite pour assurer la détection multi-tags (Connectiques SMA vers lecteur RFID, via une carte d'adaptation).

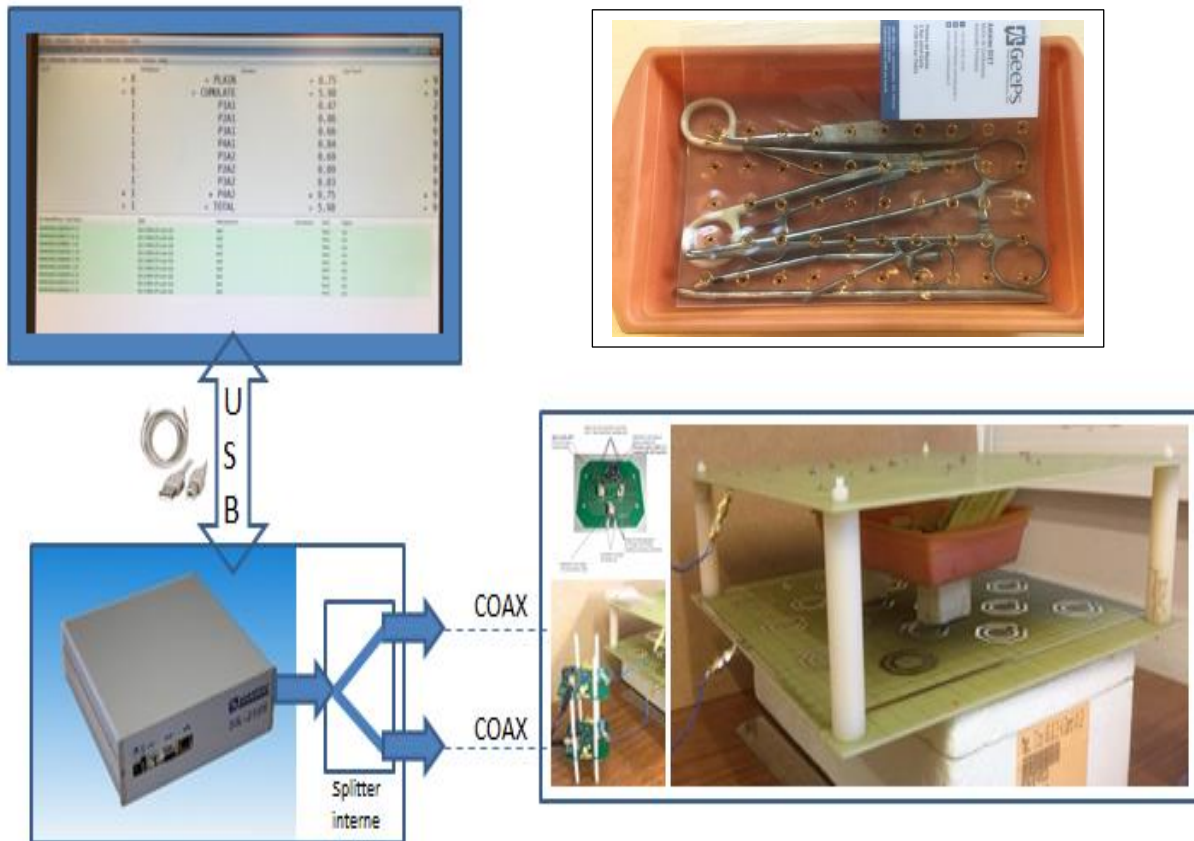


Figure IV. 12 : banc de mesures du prototype ARTIC avec résonateur

Les tests de détection RFID sont faits en utilisant 50 tags placés à proximité des instruments chirurgicaux. La détection est privilégiée à une distance de 5 cm (centre de la structure). A l'issue de ces tests de détection, nous avons pu détecter 21 tags à proximité des instruments chirurgicaux.

IV.3.2. Structure multi-boucle avec résonateurs

Le deuxième prototype proposé pour le projet ARTIC est une antenne multi-boucles basée sur des boucles torsadées [IV.11-IV.13]. Son principe est la division de la surface de l'antenne du lecteur en quatre sous-boucles alimentées par des courants dans le sens opposé (le même principe que la TLA (Twisted Loop Antenna) vue au chapitre III). Le défi consiste à modifier la forme de l'antenne du lecteur ainsi que la taille des sous-boucles afin d'assurer le couplage mutuel minimal (inductance mutuelle minimale) requis pour permettre une bonne communication entre la boucle du lecteur et le tag. D'autre part, la conception proposée est une MLTA (Multi-Twisted Loop Antenna), le principe de sous-boucles permettant la détection de plusieurs tags en déplacement latéral et angulaire. La figure de mérite est la maximisation de l'impédance mutuelle à la fréquence de fonctionnement (13,56 MHz). L'étude est faite en utilisant un tag de 11 mm de rayon dans les deux

configurations parallèle et perpendiculaire. La structure MTLA proposée correspond à quatre sous-boucles rectangulaires de 79 x 58 mm² (Figure IV.23). Elle est alimentée par le courant I, la connexion entre les différentes sous-boucles est présentée par différentes couleurs: rouge pour connecter les sous-boucles 1 et 2, vert pour connecter les sous-boucles 2 et 4, violet pour connecter les sous-boucles 4 et 3 et bleu pour connecter les sous-boucles 3 et 1. Ce type de connexion entre sous-boucles permet de changer la direction du courant entre les sous-boucles juxtaposées.

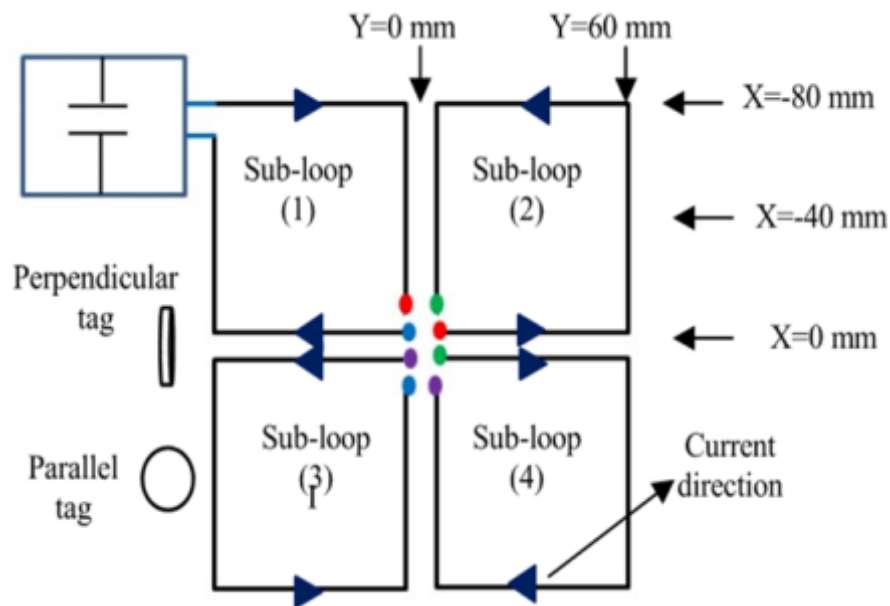


Figure IV. 13 : structure multi-boucles torsadées et tag en position parallèle ou perpendiculaire

La structure proposée a été étudiée sur HFSS, une optimisation de la taille des sous-boucles est faite. Nous présentons par la suite le champ magnétique généré par la structure, l'inductance mutuelle ainsi que des mesures de détection RFID.

➤ Champs magnétique

Sur la Figure IV. 24, le champ magnétique généré par la MTLA est rapporté. L'amplitude du champ magnétique dans les plans (X, Y) a des maxima aux bords des sous-boucles de la MTLA et des minima à la surface des sous-boucles. Au centre de la MTLA ($X = 0\text{mm}$, $Y = 0\text{mm}$), l'amplitude du champ magnétique généré est nul en raison de la somme du champ magnétique généré par chaque sous-boucle. En effet, les amplitudes du champ magnétique généré par chaque sous-boucle sont égales mais leur somme est nulle en raison des directions opposées (Figure IV. 24.a). Dans les plans (Y, Z) (Figure IV. 24.b), le champ magnétique généré à $X = -40\text{ mm}$ est plus important par rapport à $X = 0\text{mm}$ (Fig.2.b). La distribution du champ magnétique généré par le MTLA dépend de l'orientation des lignes de champ magnétique entre les boucles fermées. Entre chaque sous-boucle fermée, nous pouvons constater une courbure des lignes du champ magnétique (voir Fig2.d). Par exemple,

entre les sous-boucles (1 et 2), la courbure des lignes de champs magnétiques peut être vue sur le plan (X, Y), tandis qu'entre les sous-boucles (1 et 3), la courbure des lignes de champ magnétique ne peut être vue que dans le plan (X, Z). L'optimisation de la détection RFID se fait en ayant la surface du tag le plus perpendiculaire possible aux lignes de champ magnétique générées par la MTLA, et dans ce cas de figure, la structure proposée MTLA peut être bénéfique pour toute configuration possible du tag.

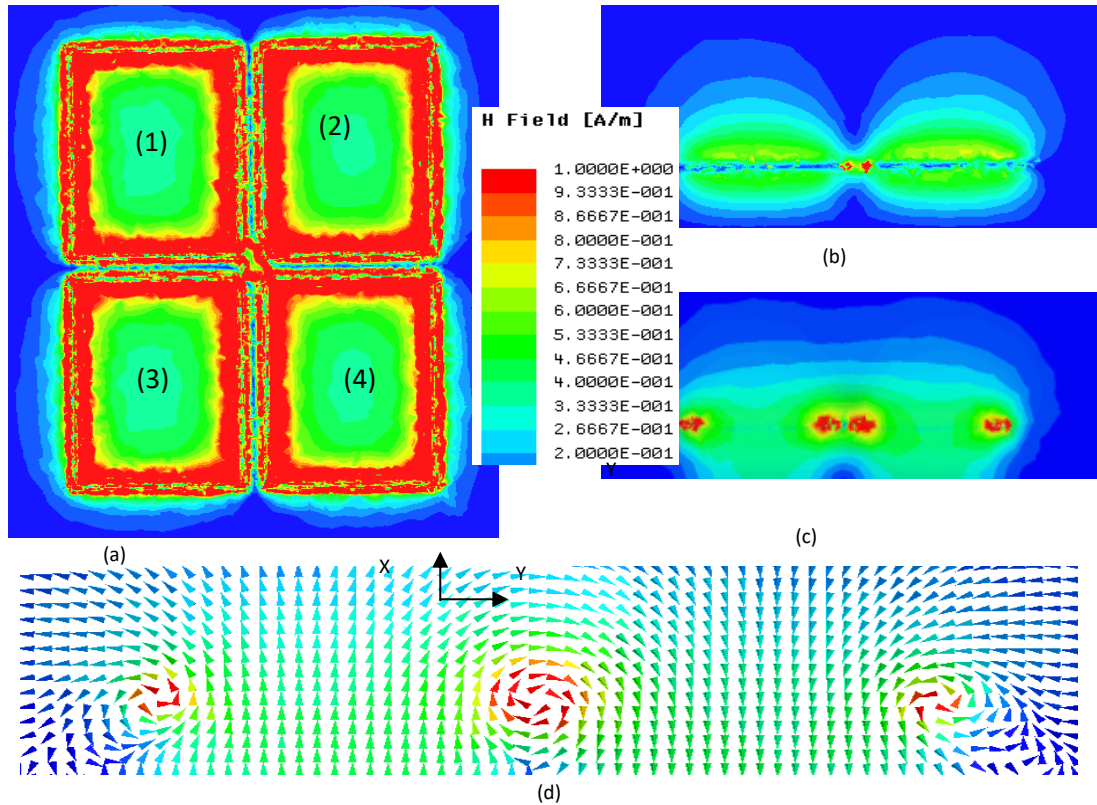


Figure IV. 14 Amplitude du champ magnétique dans les plans (X, Y) (a) et (Y, Z) (b, c, d).

- a. Structure multi-boucle dans le plan (X,Y)
- b. Amplitude du champ magnétique à X=0mm dans le plan (Y,Z)
- c. Amplitude du champ magnétique à X=-40mm dans le plan (Y,Z)
- d. Lignes du champ magnétique à X=-40mm dans le plan (Y,Z)

➤ Inductance mutuelle

Pour calculer l'inductance mutuelle entre la structure MTLA et le tag, nous utilisons le modèle électrique du système donné à la Figure IV.24. Les boucles du lecteur et le tag sont modélisées par des inductances L_i et leur résistance série r_i (dans le système MTLA, l'inductance du système correspond à la somme de quatre inductances). Une capacité (Cr) est ajoutée pour accorder le système à la fréquence de 13,56 MHz. Le tag est représenté par une inductance en série avec l'impédance de la puce. Les inductances et les résistances en série sont respectivement 7 μ H et 9 Ω pour MTLA et 58 nH et 0,075 Ω pour la boucle du tag.

D'après les calculs théoriques de l'inductance mutuelle équivalente dans le cas de la TLA du chapitre III, nous pouvons déduire l'expression de l'inductance mutuelle dans le cas de la MLTA. Elle peut être calculée par (IV.1):

$$M_{RT} = M_{1T} + M_{2T} + M_{3T} + M_{4T} \quad (IV.1)$$

Où: M_{1T} , M_{2T} , M_{3T} et M_{4T} sont les inductances mutuelles entre chaque sous-boucle de la MTLA et le tag.

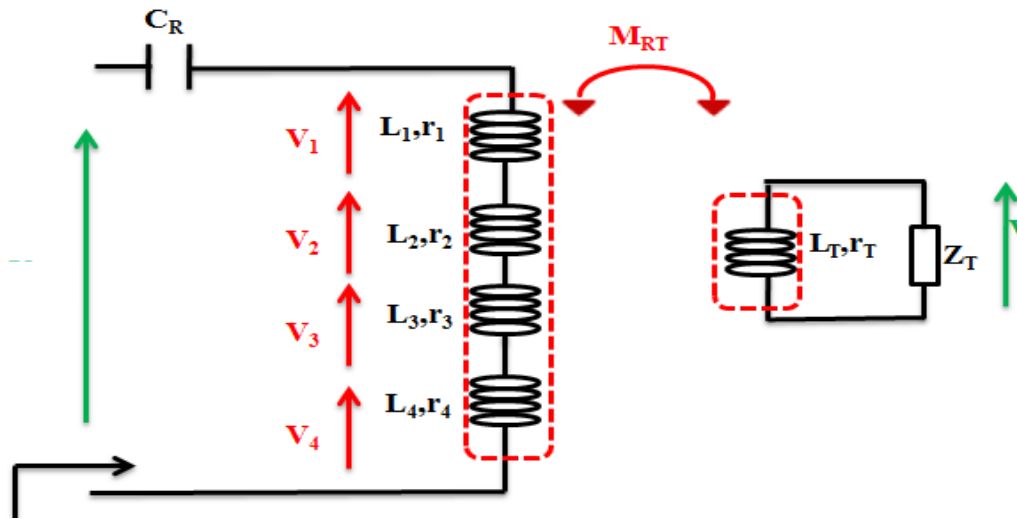


Figure IV. 15 : modèle électrique équivalent du système multi-boucles du lecteur et tag

L'équation (IV.1) est utilisée pour évaluer l'inductance mutuelle par simulation HFSS. Les résultats sont présentés dans la Figure IV.26. L'inductance mutuelle est calculée pour un déplacement de tag selon Y (de -80 mm à 80 mm) ainsi qu'un déplacement selon X (trois positions différentes de X: $X = -80$ mm, $X = -40$ mm et $X = 0$ mm correspondant respectivement aux bords de la MTLA, au centre des sous-boucles 1 et 2 et au centre de la MTLA (entre les sous-boucles 1 et 3, 2 et 4)) (les axes X et Y sont indiqués sur la Figure.IV.23).

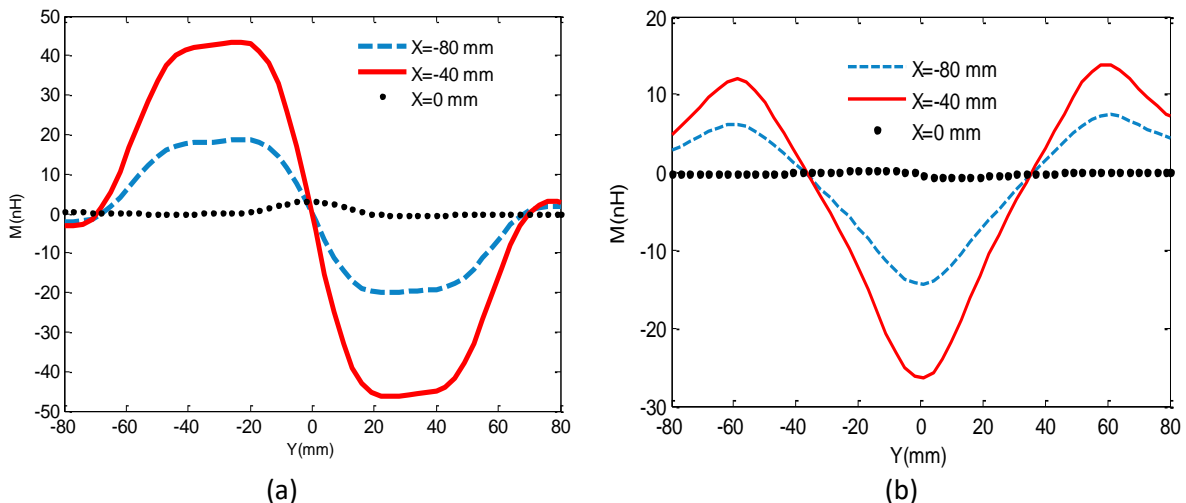


Figure IV. 16 : Inductance mutuelle en configuration parallèle (a) et perpendiculaire (b)

À partir des résultats, en configuration parallèle, l'inductance mutuelle a des valeurs homogènes autour de 45 nH et 20 nH respectivement pour $X = -40$ mm et $X = -80$ mm. Au centre de la MTLA ($X = 0$ mm), l'inductance mutuelle est nulle pour les différentes valeurs d'un déplacement selon Y (sauf l'intervalle de $Y = -10$ mm à $Y = 10$ mm, où l'inductance mutuelle a une valeur de 2nH). Le signe opposé de l'inductance mutuelle entre les deux sous-boucles juxtaposées [de -80 mm à 0 mm et de 0 mm à 80 mm] s'explique par la direction de courant opposée entre elles (principe des boucles complémentaires). En effet, la MTLA permet d'améliorer l'inductance mutuelle à la zone d'intersection (entre chaque deux sous-boucles). Dans cette configuration, le maximum d'inductance mutuelle est obtenu au centre des sous-boucles ($X = -40$ mm) et le minimum est obtenu au centre ($X = 0$ mm).

En configuration perpendiculaire, l'inductance mutuelle comporte trois maxima correspondant aux bords de la MTLA ($Y = \pm 60$ mm) et son centre ($Y = 0$ mm). La meilleure configuration est obtenue à $Y = 0$ mm où l'inductance mutuelle correspond à la somme des inductances mutuelles entre le tag et les sous-boucles juxtaposées. Pour la variation X, l'inductance mutuelle est maximale pour $X = -40$ mm correspondant au centre des sous-boucles. Au centre du MTLA ($X = 0$ mm), l'inductance mutuelle est négligeable (environ 0 nH).

➤ Détection RFID

L'antenne MTLA est fabriquée par une gravure du cuivre sur un substrat FR4 (Figure IV.27). Les dimensions de l'antenne correspondent à celle simulée. La réalisation est faite pour une antenne ayant des pistes de 1 mm de large et chaque sous-boucle est constituée de trois tours de cuivre, avec un interspire de 1 mm. Pour les tests de détection RFID un tag de 22mm de diamètre est utilisé.

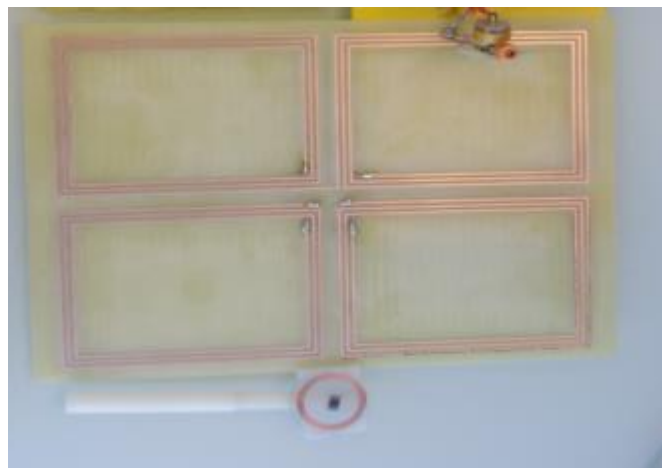


Figure IV. 17 : structure multi-boucles torsadée et tag pour mesure en détection

Les résultats de la figure IV.28 sont présentés pour un déplacement de tag à $X = -30$ mm et $X = 0$ mm. Les axes (X, Y) de la figure présentent respectivement le déplacement latéral du tag (Y en cm) et la distance de détection (d) en cm.

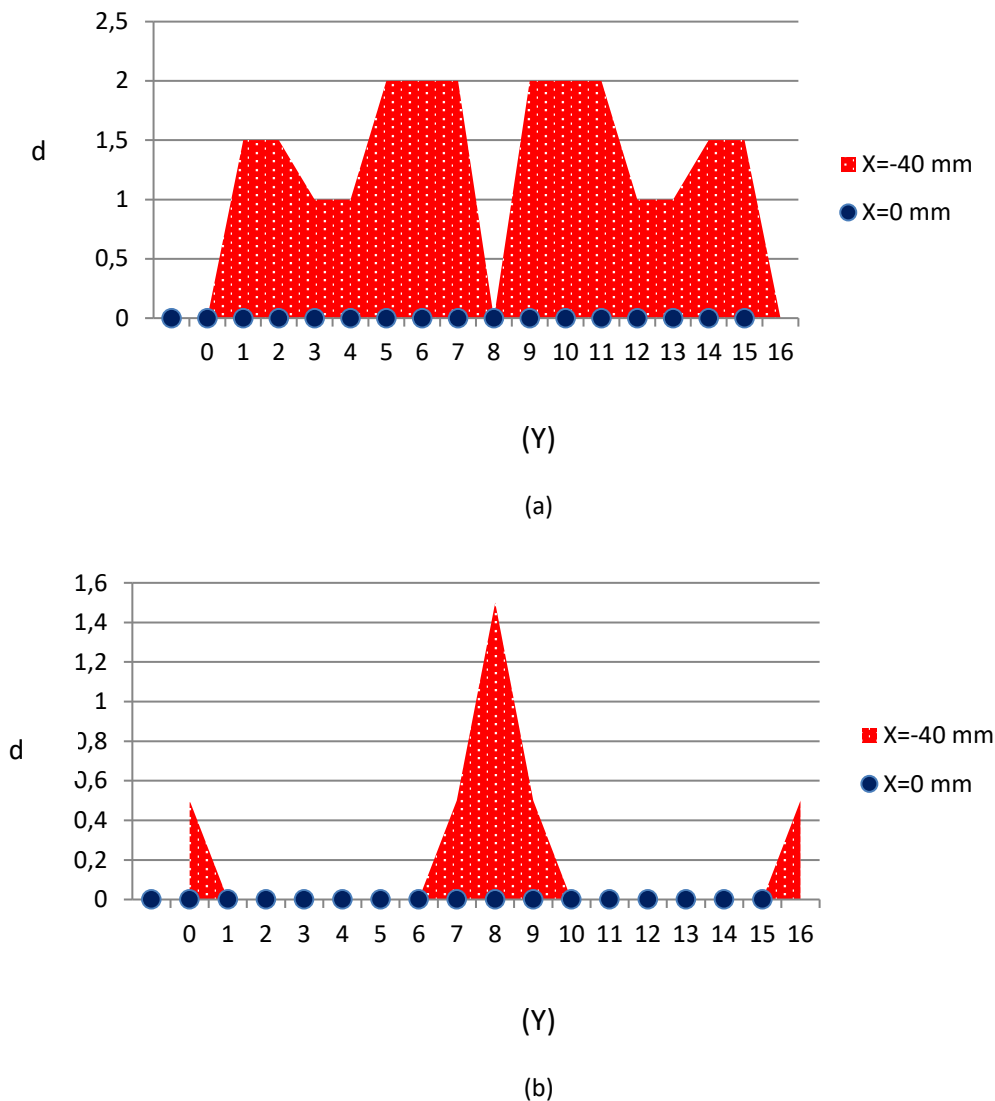


Figure IV. 18: distance de détection RFID en configuration parallèle(a) et perpendiculaire (b)

A partir des résultats de détection, la surface et la distance de détection sont nettement meilleures en configuration parallèle. Pour $X = -30\text{mm}$, la distance de détection a un maximum de 2 cm, correspondant à la surface des sous-boucles (près de la zone de transition entre les sous-boucles). Au centre de la MTLA la détection est nulle. Ce résultat était attendu d'après les résultats de la simulation concernant la répartition des lignes du champ magnétique et l'inductance mutuelle. En configuration perpendiculaire, trois maxima de détection de 1,4 cm et 0,5 cm sont observés autour des zones de transition entre les sous-boucles, juxtaposées et les bords des sous-boucles. Pour $X = 0\text{mm}$, un zéro de détection apparaît en configuration parallèle et perpendiculaire.

Les résultats de détection confirment les résultats obtenus sur le champ magnétique simulé et l'inductance mutuelle. Le design MLTA présente l'avantage de la courbure des lignes de champ magnétique entre les sous-boucles juxtaposées, ce qui améliore la possibilité de détection du tag dans différentes orientations spatiales. Cependant, comme le montrent les résultats de détection, au centre de la MTLA la détection n'est pas effectuée (a et b).

Pour éviter ce problème, nous avons proposé d'associer La structure MTLA à des résonateurs (Figure IV.29) [IV.13]. Une première proposition est d'ajouter un résonateur rectangulaire au centre de la structure MTLA. Selon son angle d'orientation, le résonateur peut améliorer la détection RFID.

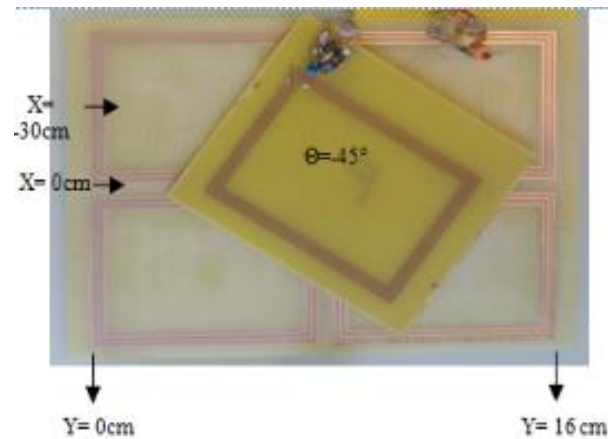


Figure IV. 19 : Prototype structure multi-boucles avec un résonateur

Ces travaux sont validés par une étude expérimentale confirmant que l'angle de 45° du résonateur supplémentaire nous permet d'assurer la continuité de la détection sur toute la surface de la structure MTLA et dans les différentes configurations parallèle et perpendiculaire. Une deuxième solution est d'ajouter un résonateur à la surface de chacune des sous-boucles de la TLA. Pour cela, nous utilisons un plus petit résonateur afin d'assurer la détection des tags de très petites tailles (ceux que nous utilisons sur les instruments chirurgicaux dans le cadre du projet ARTIC). Cette solution a été testée expérimentalement et nous permet d'atteindre la hauteur de 10 cm de détection en utilisant le prototype à deux étages.

Cette dernière structure est utilisée comme un mini prototype pour le projet ARTIC Figure IV.30. Un banc de mesures est fabriqué avec du plexi glass pour présenter :

- L'aspect prototype antennaire du lecteur à deux étages (former le tunnel de détection du projet ARTIC)

Un système de déplacement entre les deux étages antennaires (comme le déplacement des instruments chirurgicaux dans un tunnel de détection). Ce système de déplacement est équivalent au tapis roulant dans le prototype final.

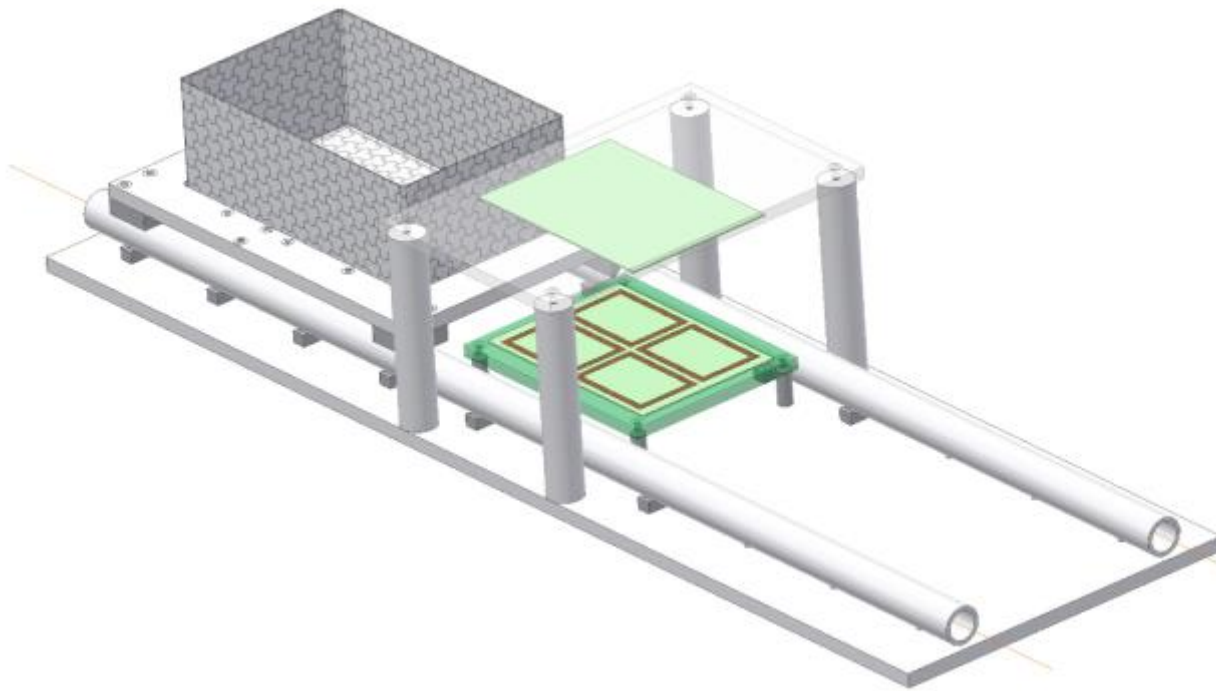


Figure IV. 30 : mini prototype ARTIC avec une antenne multi-boucles torsadée, et 2 étages pour réaliser le tunnel

IV.4. Conclusion du chapitre IV

Des premières mesures en environnement métallique ont été faites et elles confirment la dégradation des performances du système à un étage. Une solution d'amélioration est proposée en utilisant des structures antennaires du lecteur à deux étages. Du côté du tag, une solution d'encapsulation en ferrite a été proposée. Des mesures de détection des tags RFID en présence des instruments chirurgicaux ont été effectuées, 21 tags ont été détectés. Ces tests de détection sont effectués en configurations parallèle. Pour améliorer la détection dans les différentes configurations spatiales, une structure multi-boucles du lecteur est proposée. Des mesures de détection en utilisant des instruments chirurgicaux sont en cours.

IV.5. Bibliographie du chapitre IV

- [IV.1] G. Carron de la Morinais, G. Meunier et C. Kieny ,“ Calcul des courants de Foucault en trois dimensions par une formulation utilisant le potentiel vecteur magnétique et le potentiel scalaire électrique” ”,REVUE DE PHYSIQUE APPLIQUÉE. T. 25, N 7, JUILLET 1990.
- [IV.2] X. Qing, Z.N. Chen ,“ Proximity Effects of Metallic Environments on High Frequency RFID reader Antenna: Study and applications” ”,IEEE Transaction on antennas and propagation, VOL.55,NO.11,2007

- [IV.3] J. Bonne, K. D'hoë, T. Hamelinckx, N. Stevens, J. Goemaere, L. D. Strycker, "Design of an RFID antenna Gate with multiple loop antenna", IEEE RFID Technology and Applications Conference, 2014.
- [IV.4] I. FINIS, V. Popa, A. Lavric, C. Males, S. Sfichi, "Performance Evaluation of 13.56 MHz RFID Antenna Operating in metallic environments", IEEE Telecommunication Forum TELFOR, 2012
- [IV.5] K. Finkenzeller. RFID Handbook. third edition, Wiley.
- [IV.6] C. Zierhofer, E. Hochmair, "Geometric approach for coupling enhancement of magnetically coupled coils". IEEE transactions on Biomedical Engineering, pp.708-714, 1996.
- [IV.7] C. Reinhold, P. Schohl, W. John, U. Hilleringmann. Efficient antenna design of inductive coupled RFID-system with high power demand. Journal of communication, Vol.2, NO.6, pp.14-23, November 2007.
- [IV.8] S. Babic, C. Akyel, "New formulas for mutual inductance and axial magnetic force between magnetically coupled coils: thick circular coil of the rectangular cross-section-thin disk coil (pancake)", IEEE Transactions on Magnetics, Vol.49, No.2, 2013, pp.860-868, 2013.
- [IV.9] M. y. Ahmed and A.S. Mohan, "Multi-loop_Bridge Antenna for improved positioning using HF RFID", Asia-Pacific Microwave Conference, 2011
- [IV.10] H. Hirayama, Y. Satake, N. Kikuma, K. Sakakibara, "Improvement of Null Zone Avoidance Capability for HF-band RFID using Diversity Combining of Loop Antennas," in Eucap 2009, Berlin, 1963, pp. 1594 - 1597.
- [IV.11] S.-y. Gong and G.j. Xie, "Three Overlapping Loop Antennas for 3D RFID, 13.56MHz Access Control Gate", International Journal of Computer Theory and Engineering, Vol. 4, No. 3, June 2012.
- [IV.12] M. Benamara, M. Grzeskowiak, A. Diet, G. Lissorgues, Y.L. Bihan, "A twisted loop antenna to enhance HF RFID detection areas for different tag positioning," Eucap 2016, Davos
- [IV.13] M. Benamara, M. Grzeskowiak, M. Salhi, A. Diet, G. Lissorgues, Y. Le Bihan "Array Sub-Loops Reader Antenna for HF RFID Tracking", RFID TA, Warsaw, 2017

Conclusion

Depuis plusieurs années, le monde hospitalier cherche à mettre en œuvre une solution technique permettant de tracer le flux important des instruments chirurgicaux. Le besoin de contrôle de ces instruments est lié à la réduction de risque d'infections nosocomiales. La possibilité d'amélioration de la traçabilité touche le service de la stérilisation et du bloc opératoire et impacte fortement les coûts liés à la gestion du temps des personnels qualifiés et à l'équipement des salles d'opération.

Le domaine de l'électromagnétisme permet d'étudier l'application et la validation potentielle d'une solution de type *RFID*, répondant au cahier des charges actuel en milieu hospitalier, à savoir : résistance à la stérilisation, traçabilité et ergonomie. La solution proposée consiste à associer un tag *RFID* à chaque instrument chirurgical. Le tag sera fixé et encapsulé par une résine protectrice. Cette validation étant en accord avec les directives de la *Haute Autorité de Santé (HAS)* depuis 2009. Cette mise au point fait intervenir de multiples domaines liés à l'utilisation des *RFID*, à la conception des antennes boucles et leur miniaturisation, ainsi qu'à l'étude des phénomènes de couplages multiples.

Les travaux menés dans cette thèse ont été consacrés à la partie antennaire du système *RFID* proposé. Plusieurs verrous ont été levés à savoir :

La distance de détection : la structure antennaire du lecteur avec des résonateurs a été validée par des simulations et des mesures. La structure améliore la distance et la surface de détection. Elle présente des limites concernant le décalage de fréquence dû à la présence du résonateur ainsi que la faible détection en configuration perpendiculaire. Le décalage de fréquence a été défini par le développement d'un modèle électrique de la structure pour des nombres différents de résonateurs et de tags. L'ajout de capacités commutées sur la structure antennaire du lecteur permet de résoudre ce problème.

Configuration de détection : une autre structure a été proposée pour améliorer la détection dans le cas de la configuration perpendiculaire. La structure est une antenne torsadée qui permet d'avoir différentes orientations du champ magnétique.

Détection multiple : lors de la détection multiple des problèmes de décalage de fréquence sur les tags apparaissent. Ces problèmes sont liés au couplage entre les tags. Pour résoudre ce problème nous avons étudié les positionnements des tags sur les paniers de détection. Le positionnement qui minimise le plus les risques de couplages tag-tag est le positionnement juxtaposé des tags. D'autre part, nous avons proposé de faire résonner les étiquettes à une

fréquence supérieure à 13.56 MHz. La présence de plusieurs tag et/ou résonateurs engendre un décalage de l'impédance du tag et cela va faire ramener la résonance à la fréquence voulue.

Environnement métallique : pour limiter la dégradation de la performance du système due à la présence du métal, nous avons proposé deux solutions. La première est une structure antennaire du lecteur à deux étages. L'ajout des résonateurs à l'étage supérieur améliore le couplage avec le tag. Sur la partie antennaire du tag, une solution d'encapsulation dans la ferrite a été proposée. Cette solution permet de limiter les perturbations ramenées par la présence de l'instrument chirurgical à proximité du tag.

Les différents verrous scientifiques levés pendant ces travaux de thèse ont conduit à la réalisation de deux prototypes dédiés à la stérilisation des instruments chirurgicaux. Ces prototypes seront présentés et testés dans un environnement réel.

En perspectives, la miniaturisation des tags est envisagée en passant par une proposition d'une autre forme de tag. Le but est d'adapter la forme du tag à la forme de l'instrument chirurgical. Du côté de l'antenne du lecteur, les équations analytiques développées dans ce rapport peuvent être utilisées pour minimiser et corriger d'une manière automatique le décalage de fréquence lié à l'ajout de résonateurs sur la surface de la boucle du lecteur.

Bilan personnel

I. Revues internationales

1. **M.Benamara**, M.Grzeskowiak, A.Diet, G.Lissorgues, C.Conessa, Y. Le Bihan " Effect of Added Resonators in RFID System at 13.56 MHz ", IET Microwave, and Propagation, under review
2. M.Salhi, **M.Benamara**, M.Grzeskowiak, A.Diet, G.Lissorgues, Y. Le Bihan " Antenna array in 3D HF RFID to improve tracking small tag", IET Microwave, and Propagation, under review
3. Marjorie Grzeskowiak, Antoine Diet, **Megdouda Benamara**, Christophe Conessa, Stéphane Protat, Marc Biancheri-Astier, Franciso de Oliveira Alves, Yann Le Bihan, Gaëlle Lissorgues a, Y. Le Bihan " Enhanced HF RFID detection area of mobile small tag via Distributed Diameter Coil resonator", Journal of Radio Frequency Identification, major revision
4. **M.Benamara**, M.Grzeskowiak, A.Diet, G.Lissorgues, C.Conessa, Y. Le Bihan "Maximizing Power Transfer Efficiency for Inductive Link with Small Moving Receiver", article à soumettre à IEEE Antennas and Wireless Propagation
5. Marjorie Grzeskowiak, Antoine Diet, **Megdouda Benamara**, Patrick Poulichet, Christophe Conessa, Stéphane Protat, Marc Biancheri-Astier, Franciso de Oliveira Alves, Yann Le Bihan, Gaëlle Lissorgues, " Distributed Diameter sub-Coil Twisted Loop Antenna in non-radiative WPT", IEEE Antennas and Wireless Propagation, 2017
6. A. Diet, M. Grzeskowiak, Y. Le Bihan, M. Biancheri-Astier, M. Lahrar, C. Conessa, **M. Benamara**, G. Lissorgues, F. Alves, "Improvement of RFID HF tags detection with a distributed diameter coil", IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2016
7. M. Grzeskowiak, F. El Hatmi, A.Diet, **M.Benamara**, Y.D.Delcroix, T.Alvez, S. Protat, Shermila Mostarshedi, O.Picon, Y. Le Bihan, G.Lissorgues "Antenne boucle pour gélule ingérable: bilan de liaison en champ proche Comptes Rendus Physiques de l'Académie des Sciences, 2016

II. Actes de congrès internationaux

8. **M.Benamara**, M.Grzeskowiak, M.Salhi, A.Diet, G.Lissorgues, Y. Le Bihan " Array Sub-Loops Reader Antenna for HF RFID Tracking", RFID TA, Warsaw, 2017
9. M.Grzeskowiak, A. Diet, **M.Benamara**, P.Poulichet, P.Protat G.Lissorgues, M. Biancheri-Astier, Y. Le Bihan, C. Conessa, F. Alve " Sub-coil in reader antenna for HF RFID volume detection improvment", RFID TA, Warsaw, 2017
10. A. DIET, M. GRZESKOWIAK, M. BIANCHERI-ASTIER, Y. LE BIHAN, F. ALVES, Koffi Gbafa, **M.BENAMARA**, C. CONESSA, G.Lissorgues, Alessandro Pozzebon " A switched reader complementary-loops structure for detecting LF RFID tagged pebbles", RFID TA, Warsaw, 2017
11. A. DIET, M. GRZESKOWIAK, Y. LE BIHAN, M. BIANCHERI-ASTIER, C. CONESSA, F. ALVES, **M.BENAMARA**, G.Lissorgues " Design of 1cm² coils for HF RFID instruments tracking with detection range improvement", RFID TA, Warsaw, 2017

12. M. Grzeskowiak, F. El Hatmi, A.Diet, **M.Benamara**, Y. Le Bihan, G.Lissorgues “ Coaxially Distributed Diameter sub-Coil Twisted Loop Antenna in HF RFID”, Eucap, Paris, 2017
13. **Megdouda BENAMARA**, Marjorie GRZESKOWIAK, Antoine DIET, Gaëlle LISSORGUES, Yann LE BIHAN, Equivalent Input and Output Impedances in HF RFID System Including Resonator, EuCAP, paris, 2017
14. **Megdouda BENAMARA**, Marjorie GRZESKOWIAK, Antoine DIET, Gaëlle LISSORGUES, Yann LE BIHAN, A twisted loop antenna to enhance HF RFID detection areas for different tag positioning, EuCAP, Davos, 2016
15. **Megdouda BENAMARA**, Marjorie GRZESKOWIAK, Miyassa SALHI Antoine DIET, Gaëlle LISSORGUES, Yann LE BIHAN, « «3D HF RFID Reader Antenna for Tag Detection in Different Angular Orientations », LAPC, UK, 2016
16. **Megdouda BENAMARA**, Marjorie GRZESKOWIAK, Antoine DIET, Gaëlle LISSORGUES, Yann LE BIHAN, « «Reader Antenna Including Resonators for HF RFID Detection », LAPC, UK, 2016
17. **Megdouda BENAMARA**, Marjorie GRZESKOWIAK, Miyassa SALHI Antoine DIET, Gaëlle LISSORGUES, Yann LE BIHAN, “Improvement of HF RFID Detection for Small and Misaligned Tag” icecom, Dubrovnik, 2016
18. **Megdouda BENAMARA**, Marjorie GRZESKOWIAK, Antoine DIET, Gaëlle LISSORGUES, Yann LE BIHAN, “Calculation of the Equivalent Mutual Impedance in Complex HF RFID Systems”, icecom, Dubrovnik, 2016
19. A.Diet, M.Grzeskowiak, **M.Benamara**, Y.Le Bihan, C.Conessa, G.Lissorgues, F.Alves, “Detection tube for small HF RFID tags, thanks to mutual coupling with a coil resonator”, European Microwave Conference, Septembre 2015, Paris, France,
20. A.Diet, M.Grzeskowiak, Y.Le Bihan, C.Conessa, F.Alves, M. BIANCHERI-ASTIER, A. POZZEBON, **M.Benamara**, G.Lissorgues “LF RFID Chequered Loop Antenna for pebble detection”, European Microwave Conference, UK, 2016

III. Actes de congrès nationaux

21. **M.Benamara**, M.Grzeskowiak, A.Diet, G.Lissorgues, “Amélioration de volume de détection d’un lecteur RFID LF/FH basé sur une antenne multi-boucles” JNM , Bordeaux, juin 2015
22. **M.Benamara**, M.Grzeskowiak, M. Salhi, A.Diet, Y. Le Bihan and G.Lissorgues, “ Structure 3D pour la détection RFID à 13.56 MHz s” JNM, saint-malo, Mai 2017
23. **M.Benamara**, M.Grzeskowiak, A.Diet, Y. Le Bihan and G.Lissorgues, “matrice d’impédance équivalente d’un système RFID avec résonateurs ” JNM , Saint-malo, Mai 2017

IV. Participation à des workshops

24. M.Grzeskowiak, A.Diet, **M.Benamara**, Y.Le Bihan, G.Lissorgues, « Les RFID LF et HF », Workshop traceurs poissons/sédiments, le 3 Avril 2015, Lyon