

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur Et de la Recherche Scientifique

جامعة قاصدي مرباح ورقلة

Université Kasdi Merbah – Ouargla –

Faculté des Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication

Département d'Electronique et de Télécommunications



## Mémoire

Présenté pour l'obtention du diplôme de MASTER ACADIMIQUE

Spécialité : Systèmes des télécommunications

Thème

**Conception et analyse d'une cellule  
métamatériau pour les applications RFID**

Présenté par

Korichi Mebarka

Louaar Amani

Devant le jury

Mr. CHEBBARA Fouad

Professeur Président

UKM Ouargla

Mr. MEKIMAH Boualem

MCA

Examineur

UKM Ouargla

Mr. BELHEDRI Abdelkrim

MAA

Encadrant

UKM Ouargla

## *Remerciement :*

*Avant tout, j'adresse mes remerciements, en premier lieu, à Allah tout-puissant pour la volonté, la santé, le courage et la patience qu'il m'a donnée durant toutes ces longues années d'études.*

*Nous remercions tout particulièrement nos parents pour leur soutien inconditionnels tout au long.*

*Nos remerciements et notre haute considération s'adressent particulièrement à : **M. BELHEDRI Abdelkrim**, Maître conférence (A) à l'université Kasdi Merbah Ouargla, pour avoir assuré l'encadrement de ce travail et pour son aide précieuse, ses conseils judicieux, son expérience, et ses qualités humaines ont été déterminantes dans l'aboutissement de ce travail.*

*Nous lui assurons le témoignage de notre profonde reconnaissance.*

*Nous sommes sensibles à l'honneur que nous a fait **Mr. CHEBBARA Fouad**, professeur à l'université Kasdi Merbah Ouargla, en acceptant de présider le jury de ce mémoire de master.*

*Nous exprimons nos vifs remerciements à **Mr MEKIMAH Boualem**, Maître conférence (A) à l'université Kasdi Merbah Ouargla, pour avoir voulu examiner ce modeste travail.*

*Nous tenons également à remercier **M. BELHEDRI Abdennour** et aussi, à présenter nos remerciements et notre gratitude à tous nos enseignants de département d'Électronique et Télécommunications, qu'ont toujours enrichi de leurs savoirs et qu'ont contribué à notre formation durant toute la période de nos études.*

*Enfin, nous tenons à remercier tous ceux qui nous ont aidées et contribuées à ce travail, même avec un mot gentil.*

## Résumé :

La théorie des métamatériaux a été commencée par le développement de matériaux artificiels avec des réponses électromagnétiques inhabituelles. Qui peuvent être présentés en plusieurs types, les plus connus sont ceux susceptibles d'avoir à la fois une perméabilité et une permittivité négatives dans certaines bandes de fréquence. Cette théorie a été développée par le physicien russe Victor Veselago en 1967. Dans ce projet de fin d'étude, nous proposons la conception et l'analyse d'une cellule métamatériau pour les applications RFID de profil original, et de caractère reconfigurable. La méthode de Nicolson-Rose-Weir (NRW) et Smith est exploitée pour le calcul des paramètres effectifs. Cette cellule est appliquée sur une antenne comme un élément rayonnant connecté avec un circuit d'adaptation pour obtenir l'adaptation entre l'antenne et la puce RFID. L'étude est portée sur l'exploitation des logiciels électromagnétiques performants tels que : CST Microwave Studio qui repose sur la méthode d'intégration finie FIT, le logiciel ADS et le logiciel de programmation MATLAB.

## Mots clés :

RFID, Métamatériaux, T-Match, CST-MWS, Nicolson-Ross-Weir NRW, ADS, paramètres effectifs.

## Abstract:

The theory of metamaterials began with the development of artificial materials with unusual electromagnetic responses. Which can be presented in several types, the best known being those likely to have both negative permeability and permittivity in certain frequency bands. This theory was developed by Russian physicist Victor Veselago in 1967.

In this end-of-study project, we propose the design and analysis of a metamaterial cell for RFID applications, with an original profile and reconfigurable character. The Nicolson-Rose-Weir (NRW) and Smith method is used to calculate the effective parameters. This cell is applied to an antenna as a radiating element connected with a matching circuit to obtain the match between the antenna and the RFID chip. The study is based on the use of high-performance electromagnetic software such as CST Microwave Studio, based on the FIT finite integration method, ADS software and MATLAB programming software.

## Key words:

RFID, Metamaterial, T-Match, CST-MWS, Nicolson-Ross-Weir NRW, ADS, effective parameters.

## ملخص :

بدأت نظرية المواد الخارقة بتطوير مواد اصطناعية ذات استجابات كهرومغناطيسية غير عادية. و التي يمكن تقديمها في عدة أنواع، أشهرها تلك التي يحتمل أن يكون لها نفاذية و سماحية سلبية في نطاقات تردد معينة. طور الفيزيائي الروسي فيكتور فيسيلاجو هذه النظرية عام 1967.

في مشروع نهاية الدراسة، نقترح تصميم و تحليل خلية المادة الفوقية لتطبيقات RFID بملف تعريف أصلي و طابع قابل لإعادة التكوين. تم استغلال طريقة Smith و Nicolson-ROSS-Weir (NRW) لحساب المعلمات الفعالة. يتم تطبيق هذه الخلية على هوائي كعنصر إشعاع متصل بدائرة تكيف للحصول على التوافق بين الهوائي و شريحة RFID. تركز الدراسة على استغلال البرامج الكهرومغناطيسية عالية الأدلء مثل CST Microwave Studio الذي يعتمد على طريقة التكامل المحدود FIT، و برنامج البرمجة MATLAB و برنامج ADS.

## الكلمات المفتاحية :

المواد الفوقية، RFID، المعلمات الفعالة، Nicolson-Ross-Weir (NRW)، T-Match، ADS، CST-MWS.

## Table des matières :

Remerciements.....	I
Résumé.....	II
Table des matières.....	III
Liste des figures.....	VI
Liste des tableaux.....	VIII
Liste d'acronymes et abréviations .....	IX
Glossaires des symboles .....	X
Introduction générale .....	1
Référence bibliographique .....	3

### *Chapitre I : généralité sur les systèmes RFID.*

I.1 Introduction :.....	6
I.2 Historique :.....	6
I.3 Définition :.....	7
I.4 Fonctionnement de système RFID :.....	8
I.4.1 Le tag RFID : .....	9
I.4.1.1 Les composants de tag RFID :.....	9
I.4.1.2 Les types de tag RFID :.....	10
I.4.2 Le Lecteur RFID :.....	11
I.4.2.1 Le lecteur RFID fixe :.....	12
I.4.2.2 Le lecteur RFID portable :.....	12
I.5 Les fréquences d'utilisations: .....	13
I.6 Les domaines d'applications de la RFID :.....	13
I.6.1 Santé:.....	13
I.6.2 Logistique et gestion des stocks : .....	14
I.6.3 Sécurité et identification : .....	14
I.6.4 Systèmes de paiement sans contact :.....	15
I.7 Les avantages et les inconvénients de RFID :.....	15
I.7.1 Les avantages : .....	16
I.7.2 Les inconvénients : .....	17
I.8 Conclusion :.....	18
<b>Référence bibliographique :.....</b>	<b>19</b>

## *Chapitre II: les métamatériaux et leurs applications*

II.1	Introduction :	22
II.2	Historique de métamatériaux :	22
II.3	Définition de métamatériaux :	23
II.4	Classification de métamatériaux :	23
II.5	But d'utilisation les métamatériaux :	24
II.6	Les caractéristiques générales de métamatériaux :	25
II.6.1	Approche de Veselago :	25
II.6.2	Vecteur de poynting :	25
II.7	Les types de métamatériaux :	27
II.7.1	Matériaux à bande interdite photonique (cristaux photonique) :	27
II.7.2	Matériaux à indice négative:	27
II.7.3	Composants à inclusions :	28
II.7.3.1	Résonateur en anneaux fendus RAF ou SRR (Split Ring Resonator) :	28
II.7.3.2	Cellule RAF Complémentaire RAFC ou (CSRR) :	30
II.8	Propriétés des métamatériaux :	30
II.8.1	Propriétés physiques :	31
II.8.2	Propriétés électromagnétiques :	31
II.9	Extraction de la permittivité effective $\epsilon_r$ et de la perméabilité effective $\mu_r$ :	31
II.9.1	Méthode de Nicolson-Rose-Weir (NRW) :	31
II.9.2	Méthode de Smith:	33
II.9.3	Méthode de TR (Transmission-Réflexion) :	34
II.10	Les applications des métamatériaux dans le domaine de télécommunications :	35
II.10.1	Applications des métamatériaux dans le domaine d'antennes :	35
II.10.2	Applications des métamatériaux dans le domaine des filtres :	37
II.11	Conclusion :	41
	<b>Référence bibliographique :</b>	<b>42</b>

### *Chapitre III : Résultats et discussions*

III.1 Introduction .....	47
III.2 La démarche méthodologique de conception de cellules métamatériaux.....	48
III.3 Condition aux limites .....	50
III.4 Résultats et simulation .....	51
III.4.1 Les étapes de conception de la cellule .....	51
III.4.2 Etude paramétrique sur la cellule spirale modifiée .....	52
III.4.3 Structure et géométrie .....	53
III.4.4 Distribution de courant dans la cellule RAF de forme spirale modifiée..	55
III.4.5 Circuit équivalent de la cellule RAF de forme spirale modifiée .....	56
III.4.6 Paramètres effectifs de la cellule RAF de forme spirale modifiée.....	59
III.4.7 La reconfigurabilité de la cellule RAF de forme spirale modifiée.....	61
III.5 Conception d'une antenne à base de la cellule spirale modifiée.....	65
III.5.1 La puce utilisée sur cette antenne .....	65
III.5.2 Circuit d'adaptation.....	66
III.6 Conclusion .....	72
<b>Référence bibliographique .....</b>	<b>73</b>
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>75</b>

## Liste des figures

### *CHAPITRE I : Généralité sur le système RFID.*

Figure I.1 :	Les composants d'un système RFID.....	10
Figure I.2 :	Eléments constitutifs du système RFID [6].....	12
Figure I.3 :	Les différents types de tag RFID.....	13
Figure I.4 :	Exemple d'un lecteur RFID fixe.....	14
Figure I.5 :	Exemple d'un lecteur RFID portable.....	14
Figure I.6 :	Les bandes de fréquence utilisée pour le RFID.....	15
Figure I.7 :	Le RFID et le corps humain.....	16
Figure I.8 :	Exemple de système d'inventaire et de suivi RFID [15].....	16
Figure I.9 :	Système de contrôle d'accès RFID.....	17
Figure I.10 :	Les cartes bancaires et le paiement sans contact.....	17

### *CHAPITRE II: Les métamatériaux et leurs applications.*

Figure II.1 :	Classification des métamatériaux.....	33
Figure II.2 :	Trièdre indirect caractérisé par la règle de la main gauche de Veselago [3].....	34
Figure II.3 :	Trièdre $(\vec{E}, \vec{H}, \vec{K})$ pour une onde électromagnétique se propageant (a) dans un MMD et (b) dans un MMG [3] .....	35
Figure II.4 :	Cristaux photoniques à une, deux et trois dimensions. ....	36
Figure II.5 :	Géométries planaires des cellules unitaires d'un résonateur d'anneaux fendus. a-RAF circulaire; b- RAF carré.....	38
Figure II.6 :	Différence entre une conception RAF et une conception complémentaire.....	39
Figure II.7 :	Vitesse de phase et vitesse de groupe, (a) : Milieu à matériau conventionnel, (b) : Milieu à méta matériau (main-gauche) [36].....	40
Figure II.8 :	(a) antenne patch à large bande et leur S11, (b) antenne patch avec trois cellules unitaires de type CDRR et leurs S11 [45] .....	45
Figure II.9 :	Photo d'une antenne patch miniaturisée grâce à une couche de métamatériau. (Buell <i>et al.</i> 2014 [19]) .....	46
Figure II.10 :	Configuration du filtre coupe bande basé sur une ligne micro-ruban $50 \Omega$ chargée par une cellule RAFC rectangulaire [47] .....	47
Figure II.11 :	Résultats de simulation des paramètres S11 et S21.....	47

<b>Figure II.12 :</b>	Configuration du filtre coupe bande constitué d'une ligne micro-ruban 50 $\Omega$ chargée par un réseau de trois cellules CSRR rectangulaires [47]	48
<b>Figure II.13 :</b>	Résultats de simulation des paramètres S21 des différentes configurations du filtre coupe bande chargé par un réseau de cellules CSRR rectangulaires [47].	48
<b>Figure II.14 :</b>	RAFs associés aux résonateurs micro-rubans [47].	49
<b>Figure II.15 :</b>	Réponses simulées en réflexion et en transmission de la structure faite de RAFs et de résonateurs micro-rubans [47].	49

### *CHAPITRE III: Résultats et discussions.*

<b>Figure III.1 :</b>	Conditions aux limites de la cellule finale.	50
<b>Figure III.2 :</b>	Les étapes de conception la cellule finale.	51
<b>Figure III.3 :</b>	Coefficient de transmission S21 pour les trois cellules (a), (b) et (C)	52
<b>Figure III.4 :</b>	La variation de S2.1 en fonction de fréquence	53
<b>Figure III.5 :</b>	Cellule de forme spirale modifiée.	54
<b>Figure III.6 :</b>	Coefficient de transmission S21 de la cellule spirale modifié	55
<b>Figure III.7 :</b>	Distribution du courant dans la cellule spirale modifiée.	56
<b>Figure III.8 :</b>	Circuit équivalent de la structure spirale modifié.	57
<b>Figure III.9 :</b>	(a) Comparaison du coefficient de réflexion S11 entre CST et ADS (b) Comparaison du coefficient de transmission S21 entre CST et ADS.	58
<b>Figure III.10 :</b>	Paramètres effectifs, (a) La méthode de Smith, (b) La méthode NRW.	60
<b>Figure III.11 :</b>	Les modifications appliquées sur la cellule de forme spirale modifiée, (a) la fréquence 868 MHz, (b) la fréquence 915 MHz et 2.4 GHz.	62
<b>Figure III.12 :</b>	Le coefficient de transmission S2.1	62
<b>Figure III.13 :</b>	Paramètres effectifs de la cellule reconfigurable 915 MHz.	63
<b>Figure III.14 :</b>	Coefficient de transmission pour la deuxième reconfiguration.	63
<b>Figure III.15 :</b>	Paramètres effectifs de la cellule reconfigurable 2.4 GHz	64
<b>Figure III.16 :</b>	la géométrie finale de circuit d'adaptation T-Match.	66
<b>Figure III.17 :</b>	la structure finale d'antenne.	66
<b>Figure III.18 :</b>	Effet du paramètre Lx sur l'impédance d'entrée de l'antenne, (a) partie réelle, (b) partie imaginaire.	67



<b>Figure III.19 :</b> Effet du paramètre $W_2$ sur l'impédance d'entrée de l'antenne, (a) partie réelle, (b) partie imaginaire.....	69
<b>Figure III.20 :</b> Impédance d'entrée de l'antenne conçue.....	71

## Liste des tableaux

### *CHAPITRE III : Résultats et discussion.*

<b>Tableau III.1 :</b>	Paramètres géométriques de RAF de forme spirale modifiée.....	54
<b>Tableau III.2 :</b>	Tableau récapitulatif des résultats obtenu.....	65
<b>Tableau III.3 :</b>	Les dimensions du circuit d'adaptation (T – Match) .....	70
<b>Tableau III.4 :</b>	Paramètres de l'antenne.....	70

## Liste d'acronymes et abréviations

<b>ADS</b>	<b>A</b> dvanced <b>D</b> esign <b>S</b> ystem.
<b>CSRR</b>	<b>C</b> omplementary <b>S</b> plit <b>R</b> ing <b>R</b> esonator.
<b>CST</b>	<b>C</b> omputer <b>S</b> imulation <b>T</b> echnology.
<b>DNG</b>	<b>D</b> ouble- <b>N</b> égatif.
<b>DPS</b>	<b>D</b> ouble- <b>P</b> ositif.
<b>ENG</b>	<b>E</b> psilon— <b>N</b> égatif.
<b>FDTD</b>	<b>F</b> inite <b>D</b> ifference <b>T</b> ime <b>D</b> omaine.
<b>HF</b>	<b>H</b> igh <b>F</b> requency.
<b>IFF</b>	<b>I</b> nternational <b>F</b> lavours and <b>F</b> ragrances.
<b>LF</b>	<b>L</b> ow <b>F</b> requency.
<b>LHM</b>	<b>L</b> eft- <b>H</b> anded <b>M</b> aterials.
<b>MEF</b>	<b>M</b> éthode des <b>E</b> léments <b>F</b> inis.
<b>MIT</b>	<b>M</b> assachusetts <b>I</b> nstitut of <b>T</b> echnology.
<b>MMD</b>	<b>M</b> atériau <b>M</b> ain <b>D</b> roite.
<b>MMG</b>	<b>M</b> atériau <b>M</b> ain <b>G</b> auche.
<b>MNG</b>	<b>M</b> u- <b>N</b> égatif.
<b>MTM</b>	<b>M</b> etamaterial <b>M</b> odeling.
<b>NRW</b>	<b>N</b> icolson <b>R</b> oss <b>W</b> eir.
<b>PEC</b>	<b>P</b> erfect <b>E</b> lectric <b>C</b> onductor.
<b>PMC</b>	<b>P</b> erfect <b>M</b> agnetic <b>C</b> onductor.
<b>RAF</b>	<b>R</b> ésonateur en <b>A</b> nneau <b>F</b> endu.
<b>RAFC</b>	<b>R</b> ésonateur en <b>A</b> nneau <b>F</b> endu <b>C</b> omplémentaire.
<b>RF</b>	<b>R</b> adio <b>F</b> requency.
<b>RFID</b>	<b>R</b> adio <b>F</b> requency <b>I</b> dentification.
<b>SHF</b>	<b>S</b> uper <b>H</b> igh <b>F</b> requency.
<b>SNG</b>	<b>S</b> imple- <b>N</b> égatif.
<b>SRR</b>	<b>S</b> plit <b>R</b> ing <b>R</b> esonator.
<b>TR</b>	<b>T</b> ransmission <b>R</b> éflexion.
<b>UHF</b>	<b>U</b> ltra <b>H</b> igh <b>F</b> requency.

## Glossaires des symboles

$\varepsilon$	Permittivité.
$\mu$	Perméabilité.
$\vec{K}$	Vecteur d'onde.
$\vec{E}$	Vecteur champ électrique.
$\vec{H}$	Vecteur champ magnétique.
$\vec{S}$	Vecteur de poynting.
$n$	Indice de réfraction.
$Z$	Impédance d'onde.
$S_{11}$	Coefficient de réflexion en dB.
$S_{21}$	Coefficient de transmission.
$\varepsilon_{eff}$	Permittivité effective.
$\mu_{eff}$	Perméabilité effective.
$\varepsilon_r$	Permittivité relative.
$\mu_r$	Perméabilité relative.
$\omega$	Pulsation angulaire.
$V_\varphi$	Vitesse de phase.
$V_g$	Vitesse de groupe.
$c$	Vitesse de la lumière dans le vide.



*Introduction générale*



## **Introduction Générale :**

Ces dernières années, la technologie des télécommunications a connu un développement rapide, grâce au développement des dispositifs hyperfréquences, tels que : les antennes miniatures, les filtres, etc., en termes de périmètre fonctionnel qu'il couvre et de performances techniques qu'il atteint. L'un de ces développements est les antennes dites RFID [1].

La technologie RFID peut réaliser une communication de données bidirectionnelles sans contact à travers un signal de radiofréquences sans fil. Par rapport au code à barres traditionnel et au code QR, il présente les avantages d'une plus grande capacité de stockage de données, d'une plage de communication plus large et d'une transmission sans visibilité directe, avec le prix le plus bas et le développement rapide des technologies de fabrication [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9].

Le terme « métamatériaux » a suscité beaucoup d'intérêt parmi les chercheurs dans le domaine de micro-ondes [10,11].

Ce matériau est utilisé dans la conception de nombreux dispositifs hyperfréquences [12,13], grâce à ses avantages majeurs comme la facilité d'intégration et le faible coût de fabrication.

Ces matériaux révolutionnaires réalisés artificiellement à partir de motifs métalliques et diélectriques de dimensions très inférieures à la longueur d'onde permettent d'obtenir des propriétés uniques, fascinantes, et extraordinairement impossibles à obtenir avec des matériaux naturels. Certaines de ses propriétés ont ouvert des voies prometteuses à des applications surprenantes dans le domaine des radiofréquences afin de perfectionner les performances des composants tels que les filtres, les coupleurs et les antennes tout en offrant la potentialité de les miniaturiser, minimiser les pertes d'énergie, élargir la bande de fréquences et étendre la portée [14].

L'objectif de cette étude est de concevoir une antenne RFID basée sur une cellule métamatériaux avec une meilleure performance.

Ce mémoire se divise en trois chapitres, dont la première porte sur la généralité sur le système RFID. , le deuxième sur les métamatériaux et leur application.

Dans le troisième chapitre, toutes les simulations seront faites par le logiciel CST MWS, donner et commenter sur les résultats obtenus.

Dans le premier chapitre, nous présentons un historique et la définition sur les systèmes RFID et comment fonctionnent, les composants de tags RFID et leurs différents types de tags, les fréquences d'utilisation de RFID, leurs domaines d'application. Enfin, les avantages et les inconvénients de la technologie RFID.

Le second chapitre est consacré à la présentation d'un état de l'art sur les métamatériaux. Au début, nous donnons une définition et historique des métamatériaux et caractéristiques générales des MTM, ensuite quelque différent type et classifications selon le signe de la permittivité et la perméabilité, On terminera ce chapitre par la citation de différentes applications des métamatériaux dans le domaine de télécommunications.

Dans le dernier chapitre, nous avons traité de la conception et de l'analyse d'une cellule de métamatériau par le simulateur CST-Microwave dans la bande de fréquences [700-1000 MHz].

Nous avons proposé une cellule avec une forme spirale modifiée à laquelle nous avons appliqué des conditions aux limites à travers deux ports de guide d'ondes. Ensuite, les résultats du coefficient de transmission S21 et de la distribution de courant ont été obtenus à la fréquence de résonance de 868 MHz. Ces résultats nous ont aidés à mettre en œuvre le circuit équivalent de cellule proposée à l'aide du logiciel ADS.

Après validation des résultats de simulation, les paramètres effectifs ont été extraits de deux manières : Par CST, qui est basé sur la méthode Smith, et le second par MATLAB, basé sur la méthode NRW.

À la fin de ce chapitre, nous avons copié la cellule que nous avons créée afin d'obtenir deux cellules identiques avec les mêmes caractéristiques, puis nous les avons connectées à l'aide de T-Match. Ainsi, on a conçu l'antenne RFID basée sur deux cellules métamatériaux connectées par T-Match.

Notre travail s'achève par une conclusion générale.

## Référence bibliographique :

[1]: H ABBAD, G LAIRET, S MAHJOUB" L'adoption de la RFID à l'ère de l'internet des objets : application à la grande distribution alimentaire" L'Harmattan « Marché et organisations » 2022/3 n° 45 pages 33 à 47.

[2]: MSCET: A Multi-Scenario Offloading Schedule for Biomedical Data Processing and Analysis in Cloud-Edge-Terminal Collaborative Vehicular Networks IEEE/ACM Trans. Comput. Biol. Bioinform.

[3]: Cardinality Estimation Using Collective Interference for Large-scale RFID Systems.J. Netw. Comput. Appl.

[4]: DAP: Efficient Detection Against Probabilistic Cloning Attacks in Anonymous RFID Systems IEEE Trans. Ind. Inf.

[5]: Efficient Polling-Based Information Collection in RFID Systems IEEE / ACM Trans. Netw.

[6]: Efficient Information Sampling in Multi-Category RFID Systems IEEE / ACM Trans. Netw.

[7]: Q. Xiao, S. Chen, M. Chen, Joint Property Estimation for Multiple RFID Tag Sets Using Snapshots of Variable Lengths.

[8]: Nowhere to Hide: Efficiently Identifying Probabilistic Cloning Attacks in Large-Scale RFID Systems IEEE Trans. Inf. Forensics Secur.

[9]: Pain-FL: Personalized Privacy-preserving Incentive for Federated Learning IEEE J. Sel. Areas Commun.

[10]: Tahar Bougoutaia "ANALYSE ET CONCEPTION DES ANTENNES MICROSTRIP A BASE DE METAMATERIAUX" Thèse Présentée pour l'obtention du diplôme de DOCTORAT LMD Spécialité : Electronique, Option : Micro-ondes et Télécommunications, Université Mohamed Boudiaf - M'sila.

[11]: O. Acher, "Copper vs. iron: Microwave magnetism in the metamaterial age", Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 321 (2009), 2093-2101.

[12]: Z. M. Razi, P. Rezaei and A. Valizade, "A novel design of Fabry-Perot antenna using metamaterial superstrate for gain and bandwidth enhancement", International Journal of Electronics and Communication 69 (2015) 1525-1532.



[13]: K. Rambabu, M. Y. W Chia, K. M. Chan and J. Boremann, “Design of multiple-stopband filters for interference suppression in UWB applications”, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 54 (2006), 3333-3338.

[14] : Savitri, Betty (2017). Conception d’un réseau d’antennes adaptatif en utilisant les métamatériau. Thèse. Gatineau, Université du Québec en Outaouais, Département d’informatique et d’ingénierie, 94 p.



*Chapitre I :*  
*Généralité sur les systèmes*  
*RFID*



## **I.1 Introduction :**

RFID signifie identification par radiofréquence, c'est une technologie de collecte de données automatisées, qui utilise des ondes radio pour localiser, suivre et identifier des animaux, des objets ou des personnes. La technologie RFID s'est développée rapidement ces dernières années, elle peut être appliquée dans de nombreuses industries de services, distribution, gestion des déchets, contrôle des animaux, sécurité, logistique, entreprises manufacturières...etc.

Plusieurs bandes de fréquences ont été attribuées aux applications RFID. Cependant, la bande UHF est préférée dans de nombreuses applications en raison des mérites d'un taux de transfert de données élevé, une large gamme lisible. Dans la bande RFID UHF, chaque pays à sa propre allocation. Par exemple, 866-869 MHz en Europe, 902-928 MHz en Amérique du Nord et du Sud, 950-956 MHz au Japon et dans certains pays asiatiques.

## **I.2 Historique :**

À partir des années 40, l'idée de l'identification radio fréquence commence à germer avec les travaux d'**Harry Stockman** dans l'ouvrage "La communication par les moyens du pouvoir réfléchi" en 1948, suivi des travaux de **F. L. Vernon** en 1952 et ceux de **D.B. Harris**, leurs articles sont considérés comme les fondements de la technologie RFID et décrivent les principes qui sont toujours utilisés aujourd'hui.

En 1975, la démonstration de la rétrodiffusion des étiquettes (tags) RFID, à la fois passive et semi-passive a été réalisée par **Steven Depp**, **Alfred Koelle** et **Robert Freyman** au laboratoire scientifique de **Los Alamos**. Cette technique est utilisée par la majorité des transpondeurs (tags) RFID fonctionnant en UHF (Ultra Hautes Fréquences) et micro-onde.

À la fin des années 70, l'utilisation de la RFID pour l'identification de bétail commence en Europe et aux États-Unis.

L'année 1999 a connu la création du centre « auto-ID Center », formé par le MIT (Massachusetts Institut of Technology) et des partenaires industriels, une

organisation sans but lucratif ayant pour mission la standardisation et la construction d'une infrastructure pour un réseau mondial d'une RFID.

En 2010-2013, il a été prévu dans le projet de loi sur la santé que tous les Américains se verront implanter une micro-puce dans le but de créer un registre national d'identification, pour permettre un meilleur suivi des patients en ayant toutes les informations relatives à leur santé [2].

### **I.3 Définition :**

L'abréviation RFID signifie « Radio Frequency Identification », en français, « Identification par Radiofréquence ». Cette technologie permet d'identifier un objet, suivre son acheminement et de connaître sa position dans un environnement interne en temps réel grâce à une étiquette émettant des ondes radio, attachées ou incorporées à l'objet (étiquette RFID) [2].

Cette technologie a pour avantage de faire gagner du temps aux usagers et de permettre une lecture rapide des données. Mais savez-vous vraiment ce qu'est la RFID ?

La RFID est une méthode permettant de mémoriser et de récupérer des données à distance. Le système est activé par un transfert d'énergie électromagnétique entre une étiquette radio et un émetteur RFID. L'étiquette radio composée d'une puce électronique et d'une antenne reçoit le signal radio émis par le lecteur, lui aussi équipé d'une technologie RFID. Les composants permettent à la fois de lire et de répondre aux signaux.

Tous les jours, nous utilisons des produits RFID sans le savoir : à travers des cartes de transports, des étiquettes antivols dans les magasins, des badges RFID, badges de sécurité ou plus récemment des clés sans contact pour les voitures [2].

Dans un système RFID, les données sont stockées dans un dispositif électronique : le transpondeur. Cependant, au contraire des cartes intelligentes, le transfert de données ne s'effectue pas par contact métallique, mais via les ondes (électriques, magnétiques, électromagnétiques, même acoustiques).

## I.4 Fonctionnement de système RFID :

Le système RFID fonctionne comme suit :

Une fois les informations transmises au lecteur RFID équipé d'une antenne intégrée ou externe, les ondes radio sont converties en données pour que le logiciel RFID puisse les lire.

Le système d'identification sans contact s'appuie sur la transmission de données via des signaux électromagnétiques à radio fréquence (EM) et par conséquent les données sont lues en ligne de vue directe, contrairement aux codes à barres avec détection automatique et avec des distances de lecture plus importantes (de 10 à 200 m selon le type de puce).

Le système de RFID se compose de trois éléments principaux, comme illustré dans la figure figureI.1 ci-dessous :

1. Un transpondeur RFID (ou tag) qui transporte les données d'identification.
2. Un lecteur RFID qui interroge l'étiquette et en extrait les données.
3. Logiciel d'application agissant comme une interface entre l'utilisateur et le système RFID.

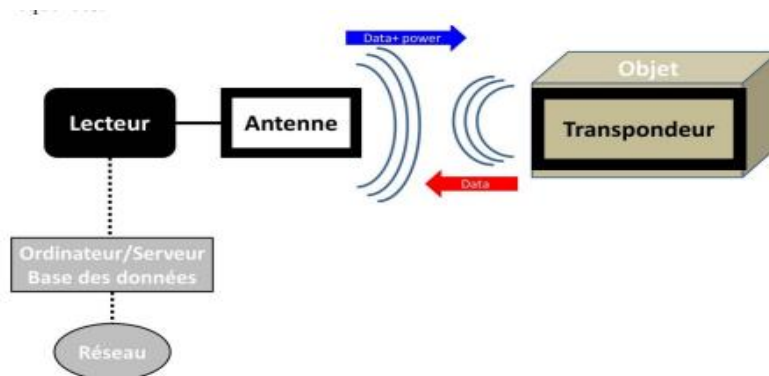


Figure I.1: Les composants d'un système RFID.

En bref, la technologie RFID utilise des ondes radio pour transmettre des données du lecteur à l'étiquette, puis elle utilise le lecteur pour recevoir les échos modulés renvoyés par l'étiquette. Le transpondeur module l'onde EM, et transmet les données vers le lecteur, où elles sont traitées pour une identification en temps réel. Ils ne nécessitent pas de piles et peuvent être utilisés pendant de nombreuses années.

### **I.4.1 Le tag RFID:**

Une des méthodes d'identification les plus utilisées est d'abriter un numéro de série ou une suite de données dans une puce (Chip) et de relier cette dernière à une petite antenne. Ce couple (puce silicium + antenne) est alors encapsulé dans un support (RFID Tag). Ces "tag" peuvent alors être incorporés dans des objets ou être collés sur des produits. Le tout est alors imprimé sur un support pliable, souvent adhésif [4].

#### **I.4.1.1 Les composants de tag RFID :**

Le tag RFID se compose de trois éléments et peut être en lecture seule ou en lecture-écriture [4].

- Une antenne.
- Un circuit contenant la mémoire de stockage (généralement une puce).
- Un matériel d'encapsulation (substrat).

#### **✚ L'antenne:**

L'antenne c'est l'élément le plus imposant du tag. Elle est responsable de la transmission et de la réception des ondes RF. Selon le type d'étiquette, l'antenne transmet ou réfléchit le signal qu'elle reçoit de l'interrogateur. Sa géométrie dépend du type de couplage (champ proche, champ lointain) et de la fréquence de fonctionnement [5].

#### **✚ La puce:**

Les caractéristiques électriques des puces sont d'une grande importance pour la suite de notre étude, car ce sont elles qui déterminent une partie du design des antennes auxquelles elles sont couplées. Par exemple, l'impédance des puces varie suivant le modèle choisi, la valeur de cette impédance permet d'effectuer les calculs et simulations qui donneront lieu à la conception des antennes adaptées à celles-ci.

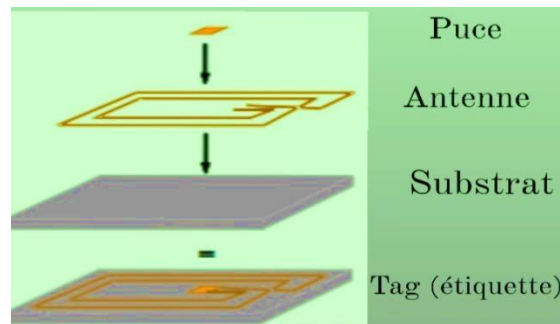
Les puces RFID sont composées de trois parties principales :

- La première, l'interface radiofréquence (RF), comprenant les blocs de redressement, de modulation/démodulation, de filtrage ...etc.

- Ensuite, la partie de contrôle numérique, comprenant des fonctionnalités telles que l'anticollision, le contrôle de lecture-écriture, le contrôle d'accès, le cryptage, la gestion mémoire et le contrôle RF.
- Enfin, la partie mémoire EEPROM permettant de stocker les informations, réparties en plusieurs blocs [5].

**✚ Substrat :**

Le substrat est le support de l'antenne et de la puce RFID. Le substrat peut être rigide ou flexible ou organique en fonction de l'application.



**Figure I.2:** Éléments constitutifs du tag RFID [6].

**I.4.1.2 Les types de tag RFID :**

Il est essentiel d'avoir le lecteur approprié pour utiliser les informations sur ces étiquettes. Cela émet des ondes radio dans la direction de la capsule, ce qui lui permet de l'alimenter en énergie (alimentation en énergie par induction électromagnétique), c'est-à-dire pour l'activer (la puce renvoie ensuite des données), pour extraire les informations qu'elle contient. Ces puces ne peuvent renvoyer que des données statiques, mais peuvent également effectuer un traitement dynamique [7, 8]. On distingue trois types de tags RFID :

**✚ Les tags passifs :**

La plupart des tags RFID opèrent de façon passive (sans énergie propre, sans pile ou courant continu), car ils tirent leur énergie des lecteurs RFID. Le lecteur RFID envoie des ondes électromagnétiques à l'antenne du tag, qui va réagir (se « réveiller ») et renvoyer un signal au lecteur en utilisant l'énergie de ces ondes [7,

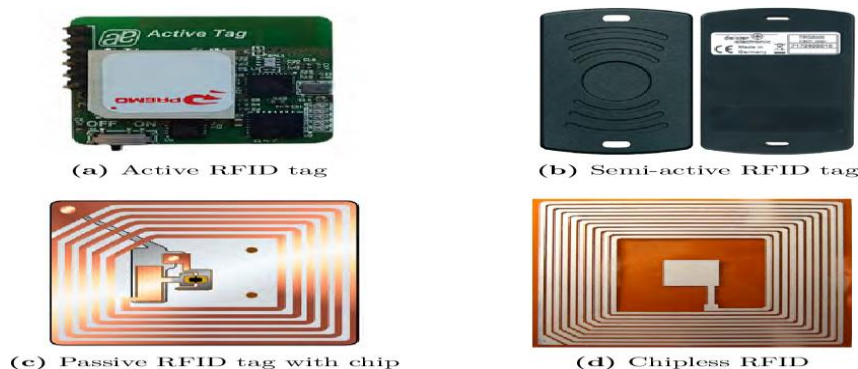
8]. C'est le tag le plus économique et le plus généralement utilisés dans les applications de la chaîne logistique.

**✚ Les tags actifs :**

À la différence des tags actifs, ils sont équipés d'une pile interne c'est à dire qu'ils utilisent leur propre énergie pour émettre leurs ondes à l'aide d'une pile interne. Ils peuvent ainsi avoir une très longue distance de lecture. Ils sont plus onéreux que les tags passifs et sont donc généralement utilisés pour tracer des articles de valeur [7, 8].

**✚ Les tags semi-passifs :**

Petits et légers, sont des tags intermédiaires entre les tags actifs et les tags passifs. Ils utilisent généralement une pile comme source d'énergie (comme les tags actifs), mais ils peuvent également transmettre des données en utilisant l'énergie générée par les ondes des lecteurs RFID (comme les tags passifs) [7, 8].



**Figure I.3:** Les différents types de tag RFID.

#### **I.4.1 Le lecteur RFID :**

Le lecteur RFID est un ensemble d'équipements fixes ou mobiles, constitué essentiellement d'une antenne et d'un module RF. Dès lors que le tag se retrouve dans la zone d'action du lecteur, une énergie est fournie au tag pour qu'il puisse fonctionner. Il envoie des commandes spécifiques et reçoit en retour des informations contenues dans la puce. Dans un autre cas de figure, le lecteur peut lire et écrire, ainsi les informations reçues sont envoyées vers un autre dispositif qui va se charger du traitement des données (ordinateur) [18]. Deux types de lecteurs sont distingués :



#### **I.4.1.1 Le lecteur RFID fixe :**

Comme son nom l'indique, il est installé de manière fixe et ne peut donc pas être transporté pour la lecture des puces à distance, il prend la forme de portiques ou de bornes [19]. Un exemple du lecteur RFID fixe est illustré par la figure I.3.



**Figure I.4:** Exemple d'un lecteur RFID fixe.

#### **I.4.1.2 Le lecteur RFID portable :**

Le lecteur portable prend la forme d'un flashé portative qui permet de lire les étiquettes manuellement, les objets n'ont plus besoin d'être transportés à proximité du lecteur, c'est le lecteur qui se déplace [19]. Le lecteur RFID mobile est illustré par la figure I.4.



**Figure I.5:** Exemple d'un lecteur RFID portable.

## I.5 Les fréquences d'utilisations:

Suivant la fréquence de fonctionnement utilisée on peut différencier entre les systèmes RFID et selon les bandes de fréquences la communication peut se faire plus ou moins grande distance les ondes magnétiques [10] :

- LF : 125 KHz et 134 KHz (bande basse fréquence).
- HF : 13.56 MHz (bande haute fréquence).
- UHF : 860 MHz – 960 MHz (bande ultra haute fréquence).
- SHF : 2.45-5.8 GHz (bande micro-onde).

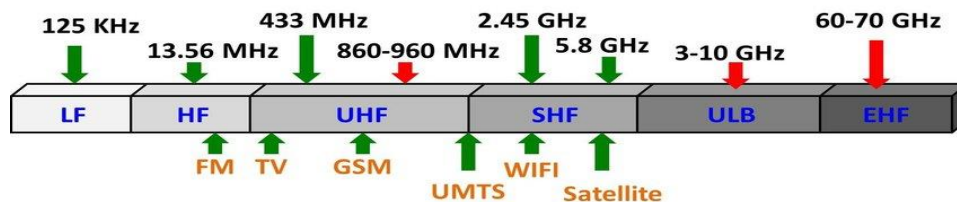


Figure I.6: Les bandes de fréquence utilisée pour le RFID.

## I.6 Les domaines d'applications de la RFID :

Depuis longtemps, la RFID a trouvé de nombreux domaines d'application comme l'industrie du transport, l'élevage ou les systèmes de contrôle des bibliothèques. Nous allons montrer certaines de ces applications que nous pouvons voir dans la réalité actuelle :

### I.6.1 Santé:

La technique de RFID est utilisée dans les soins de santé, car c'est une technique qui aiderait le corps médical dans les exercices, leurs fonctions et à réduire les erreurs médicales [13].

Les organisations et les équipes médicales travaillent sur un projet visant à mettre en œuvre une technologie de RFID dans les centres de soins de santé dans le but de contrôler l'accès du personnel et des patients afin que les deux reçoivent une carte RFID qui enregistre leurs autorisations d'accès et que le centre de contrôle puisse les localiser.



Figure I.7: Le RFID et le corps humain.

### I.6.2 Logistique et gestion des stocks :

Le RFID offre la possibilité de lire un tag à plusieurs mètres sans nécessité de contact visuel. Cette caractéristique du RFID augmente sensiblement l'efficacité d'entreprise. Une passe suffit pour scanner toutes les palettes se trouvant dans un conteneur et le statut des stocks peut être vérifié en temps réel. Dans les inventaires, RFID peut réduire les ruptures d'inventaire de saisie automatique d'une liste de produits achetés ou sortis du stock [14].



Figure I.8: Exemple de système d'inventaire et de suivi RFID [15].

### I.6.3 Sécurité et identification :

La sécurité de l'information au sein des RFID est définie par l'ensemble des moyens techniques, organisationnels, juridiques et humains nécessaires à la sécurité des systèmes d'information qui exploitent des technologies de radio-identification telle que les étiquettes électroniques (parfois appelées TAG), les passeports électroniques et plus généralement les cartes à puce sans contact [16].

Certaines applications de haute sécurité permettant d'identifier les personnes leur en injectent des puces RFID sous la peau pour une utilisation dans une variété de milieux, notamment la sécurité financière et des transports, l'armée et la sécurité du gouvernement pour contrôler les accès aux zones sécurisées [16].



**Figure I.9:** Système de contrôle d'accès RFID.

#### **I.6.4 Systèmes de paiement sans contact :**

Depuis, le début de la technologie RFID, des cartes à puce tels que (MasterCard-Visa Contactless-ExpressPay...etc.) et des transpondeurs sans contact ont été utilisés pour payer des biens et des services.

Un système de paiement fermé ne fonctionne pas à la plage opérationnelle du fournisseur et ne peut être utilisé que pour acheter des biens ou des services auprès de ce fournisseur particulier.



**Figure I.10:** Les cartes bancaires et le paiement sans contact.

### **I.7 Les avantages et les inconvénients de RFID :**

L'application RFID offre différentes avantages et inconvénients par rapport aux autres secteurs [7, 8]:

### **I.7.1 Les avantages :**

➤ **Une plus grande capacité de contenu :**

Dans une étiquette radiofréquence une capacité de 1000 caractères est aisément stockable sur 1 mm<sup>2</sup>, et peut atteindre sans difficulté particulière 10000 caractères.

➤ **Possibilité de modification de données :**

Pour les étiquettes à lecture et écriture multiples, les données gravées peuvent subir des modifications à tout moment par les personnes autorisées. Ce qui peut permettre la mise à jour de données dans une étiquette favorisant ainsi la traçabilité. Toutes les étiquettes RFID à portée peuvent être détectées instantanément et associées aux informations de votre base de données.

➤ **Une sécurité d'accès au contenu :**

Comme tout support numérique, l'étiquette radiofréquence peut être protégée par mot de passe en écriture ou en lecture. Les données peuvent être chiffrées. Dans une même étiquette, une partie de l'information peut-être en accès libre et l'autre protégée. Cette faculté faite de l'étiquette RF, un outil adapté à la lutte contre le vol et la contrefaçon.

➤ **Durée de vies :**

Les étiquettes RFID peuvent avoir une durée de vie de dizaines d'années. Les données au cours de ces années peuvent subir des modifications plus d'un million des fois selon le type de l'étiquette avec un maximum de fiabilité.

➤ **Meilleure accessibilité et résistante aux effets extérieurs :**

Les étiquettes de la technologie RFID fonctionnant avec les ondes électromagnétiques n'ont pas besoin de contact ou de viser optique. Leur liaison avec le système est établant dès qu'elles entrent dans les champs électromagnétiques. Ainsi, les personnes, les produits et équipements pourvus des étiquettes RFID se trouvant dans le rayon couvert par le champ électromagnétique du lecteur peuvent être sujets à une traçabilité en temps réel et de manière permanente. Les lecteurs RFID peuvent lire plusieurs étiquettes RFID simultanément, offrant une efficacité accrue. Les étiquettes RFID sont

insensibles à la poussière, aux taches, aux frottements, à l'humidité. De plus, la lecture peut être effectuée en vrac, permettant la lecture simultanée de plusieurs étiquettes.

### **I.7.2 Les inconvénients :**

En dépit d'offrir de nombreux avantages, le système RFID a même certains des inconvénients, qui sont énumérés ci-dessous [7, 8]:

➤ **Le coût:**

Le coût d'implantation d'un système RFID est relativement élevé, ce qui suscite des préoccupations concernant le retour sur investissement. Bien que les coûts d'acquisition des étiquettes RFID soient élevés, elles sont facilement rentabilisées sur les produits à grand coût et grande importance. Les prix des étiquettes RFID varient entre 25 cents et 250 dollars et ceux des lecteurs coûtent des centaines de dollars, ce qui est largement supérieur au seuil de rentabilité pour les fabricants de produits à faibles coûts.

➤ **La perturbation par l'environnement physique:**

La lecture des étiquettes radiofréquences est perturbée par la présence, par exemple, de métaux dans leur environnement immédiat. Des solutions doivent être étudiées au cas par cas pour minimiser ces perturbations, comme cela a été fait par exemple pour l'identification des bouteilles de gaz.

➤ **La sensibilité aux ondes électromagnétiques parasites :**

Les systèmes de lecture RFID ils sont dans certaines circonstances sensibles aux ondes électromagnétiques parasites émis par des équipements informatiques (des écrans d'ordinateurs) ou des systèmes d'éclairages plus généralement par les équipements électriques. Leur emploi doit donc être testé en tenant compte de l'environnement.

## **I.8 Conclusion :**

Ce chapitre donne un aperçu de la technologie RFID. Il présente brièvement le fonctionnement de cette technologie et la description de leurs composants à savoir : le tag et Le Lecteur RFID.

Il donne également un aperçu de nombreux domaines d'application de la technologie RFID telle qu'application de le RFID dans la santé, logistique et gestion de stockage, sécurité et identification... etc. Il décrit également les principaux avantages et les inconvénients de cette technique.

La technologie RFID a révolutionné le monde des télécommunications à courte portée. Grâce à l'étude de cette avancée, le RFID a amélioré certaines applications dans le domaine scientifique.

## Référence bibliographique :

- [1] New Miniature Microstrip Antenna Based on Metamaterial for RFID Applications Ennajih, A ; Zbitou, J ; Latrach, M ; Errkik, A ; El Abdellaoui, L ; et al. TELKOMNIKA; Yogyakarta Vol. 16, Iss. 1, (Feb 2018): 174-181
- [2] Fatmi Abdelkarim Koulla Abdelkader (2022) Mémoire « Etude et réalisation d'un système de présence par la technologie RFID et GSM géré par arduino », ÉTUDE ET CONCEPTION D'UN SYSTEME DE PRÉSENCE AUTOMATIQUE PAR RFID, promotion2014, dirigé par ZIANI-KERARTI Samir, KADI Oussama
- [3] <https://www.dipolerfid.fr/blog-rfid/Comment-fonctionne-Systeme-RFID-UHF>  
<https://www.myrfidsolution.com/comment-fonctionne-un-systeme-rfid/>
- [4] ALILI Thanina et AIT IZEM Radhia "Gestion des commandes par les Tags RFID" Memoire De fin d'études 2013/2014
- [5] Yassin Belaizi. ETUDE ET CONCEPTION D'UN CAPTEUR-RFID PASSIF EN BANDE UHF APPLICATION A L'AGROALIMENTAIRE. Electromagnétisme. Université de montpellier, 2018. Français. ffNNT : ff. fftel-02057950
- [6] ALCOM Consulting et Newton Vaureal, Etude sur les étiquettes électroniques et la traçabilité des objets, panorama stratégique, Ministère de l'Economie, des Finances et l'Industrie, France, 2007
- [7] NDIAYE Khadidiatou et LEBORGNE Aymeric, RAPPORT DE PROJET DUT Réseaux et Télécommunications: COMPRENDRE LA TECHNOLOGIE RFID .Rapport RFID Télécom Sud Paris 2013
- [8] PAULIN ILUNGA KATAMBA, Technologie RFID (Radio Frequency Identification): concepts et stratégie de mise en œuvre
- [9] DECOUVERTE DE LA TECHNOLOGIE RFID EN STI2D SIN LYCEE JEAN FAVARD - GUERET, RFID /NFC
- [10] Centre national RFID (CNR RFID). Les gammes de frequencies RFID figure:file:///C:/Users/DELL/Downloads/Contribution\_to\_the\_development\_of\_Near\_Field\_read.pdf
- [11] ROBERTO MARANI and ANNA GINA PERRI. "RFID TECHNOLOGY FOR BIOMEDICAL APPLICATIONS: STATE OF ART AND FUTURE DEVELOPMENTS".
- [12] H. Aubert H., (2011). "RFID Technology for Human Implant Devices, Comptes rendus à l'Académie des Sciences". Special issue on Nano sciences/nano technologies, pp. 1-18



[13] Cangialosi, A., Monaly, J., S.C., Yang: Leveraging RFID in hospitals: patient life cycle and mobility perspectives. *IEEE Commun. Mag.* 45(9), 18–23

[14] BOUREZZANE Bisma. MANSOURI Ahmed Elamine "Conception d'une antenne de tag RFID passif Sur la bande UHF ". Présentée pour l'obtention du diplôme MASTER ACADEMIQUE Spécialité : Systèmes des télécommunications Université Ouargla UKMO.

[15] fresh2022.com

[16] Weinstein, R.: A technical overview and its application to the enterprise. *IT Prof.* 7(3), 27–33

[17] *RFID Handbook: Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards, Radio Frequency Identification and Near-Field Communication, Third Edition.* Klaus Finkenzeller 2010 John Wiley & Sons, Ltd

[18] Ziada Abdennour : "Conception et Réalisation des Antennes RFID" thèse présenté pour l'obtention du diplôme de master académique, réseau et télécommunications, université 8 Mai 1945 – Guelma –



*Chapitre II :*  
*Les métamatériaux et leurs applications*



## **II.1 Introduction :**

La science et la technologie ont une soif insatiable de matériaux meilleurs et plus performants et qui peuvent promettre des perspectives sans limites, parmi ces matériaux se trouvent ce que l'on appelle "les métamatériaux".

Les métamatériaux sont des matériaux artificiels qui présentent des propriétés électromagnétiques singulières que nous ne retrouvons pas dans la nature ou dans leurs constituants pris séparément [2]. Les métamatériaux sont utilisés pour améliorer les performances qui leur permettent de résoudre certains problèmes des antennes, des filtres et des coupleurs [1].

Ce chapitre introductif sera consacré à la présentation théorique des métamatériaux. Pour cela, nous présentons, en premier lieu, la définition et un bref historique des métamatériaux, afin de cerner leurs évolutions historiques, en tenant compte des différents travaux réalisés et qu'ont participé au développement de ce concept. Nous distinguons ensuite les propriétés et la classification des métamatériaux, en matière de paramètres effective.

## **II.2 Historique de métamatériaux :**

La première tentative pour explorer le concept de matériaux artificiels semble remonter à la fin du 19-ème siècle [3], le principe de métamatériau a été commencé par le développement de matériaux artificiels avec des réponses électromagnétiques désirées, au début du 20-ème siècle, de nombreux chercheurs se sont concentrés sur le phénomène des ondes à indice de réfraction négatif [4] [3,4].

En 1898, **J.C. Bose** a procédé à la première expérience en micro-ondes, où il a utilisé des fibres synthétiques torsadées pour faire tourner la polarisation des ondes électromagnétiques produites par un liquide comme une solution de sucre [3].

En 1967, le fondateur **Victor Veselago** a tranché qu'un matériau à permittivité et perméabilité simultanément négative possède des caractéristiques extraordinaires [4]. Longtemps, cette double condition a été difficile à réaliser, même si l'on connaissait de longues dates des milieux présentant une

permittivité négative (par exemple les plasmas). Et à partir de là, par **Victor Veselago** la théorie des métamatériaux a été développée.

Les premières réalisations pratiques d'un métamatériau datent de 2000 par **David Smith** et **John Pendry** en optique (2006). Cette propriété d'indice de réfraction négative a encouragé les laboratoires à exploiter ces matériaux exotiques [4]. Depuis, ces nouveaux matériaux sont abondamment étudiés par les laboratoires universitaires et par certains grands groupes industriels.

### **II.3 Définition de métamatériaux :**

Qu'est-ce qu'un métamatériau ? Ce terme un peu barbare, composé du mot matériau est du préfixe méta (qui, en grec ancien, signifie au-delà) désigne des milieux artificiels [6].

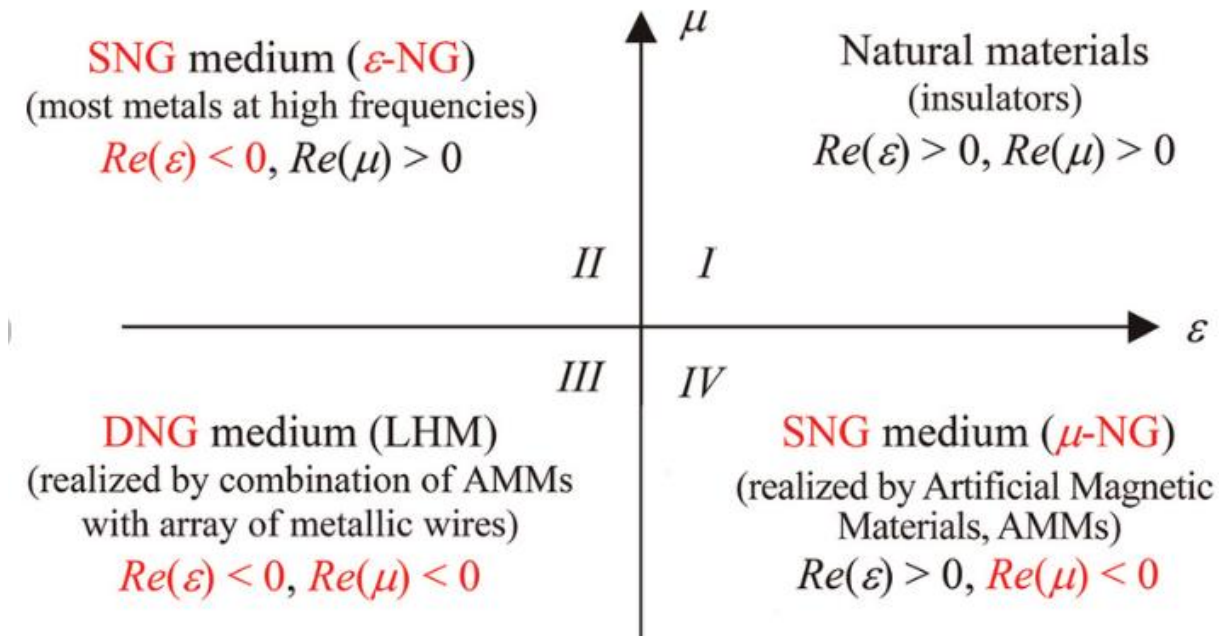
En physique, les métamatériaux électromagnétiques en tant que matériau artificiel est défini comme une structure électromagnétique avec des propriétés inhabituelles qui ne sont pas disponibles dans la nature [7, 9]. La propriété particulière qui a fait la renommée des métamatériaux est la possibilité d'avoir une perméabilité et une permittivité simultanément négatives [8].

La propagation des ondes électromagnétiques à travers un milieu est contrôlée par la permittivité électrique ( $\epsilon$ ) et la perméabilité magnétique ( $\mu$ ) du milieu. Aux fréquences, micro-ondes, la permittivité et la perméabilité sont positives dans les matériaux naturels. Les métamatériaux sont des matériaux artificiels dont les propriétés électromagnétiques peuvent être conçues pour être effectivement négatives.

### **II.4 Classification de métamatériaux :**

Les métamatériaux peuvent être classés en fonction de leur permittivité et de leur perméabilité, la classification est illustrée graphiquement par la figure II.2. Le lieu supérieur droit de la figure contient les matériaux normaux, qui ont à la fois une permittivité positive et une perméabilité positive ( $\epsilon > 0$ ,  $\mu > 0$ ). DPS signifie "double positif" qui représente la majorité des matériaux se trouvant dans la nature [11]. En revanche, le lieu inférieur gauche contient le double milieu négatif (DNG) ou ce qu'on appelle le milieu gauche (LHM), qui à la fois une permittivité négative et une perméabilité négative ( $\epsilon < 0$ ,  $\mu < 0$ ) est appelé un

milieu double négatif. Ce lieu ne correspond à aucun milieu naturel [4]. Ces matériaux présentent des propriétés physiques contraires aux attentes. Dans le deuxième quadrant, les matériaux avec  $\epsilon$  ou  $\mu$  négatifs uniquement sont appelés matériaux SNG (simple négatif) et divisés en deux classes en fonction du paramètre effective négatif : ENG (epsilon-négatif) et MNG (mu-négatif) [17]. Matériau Epsilon négatif (ENG), si un matériau a une permittivité inférieure à zéro et une perméabilité supérieure à zéro ( $\epsilon < 0, \mu > 0$ ) [18], matériau Mu négatif (MNG), si un matériau a une permittivité supérieure à zéro et une perméabilité inférieure à zéro ( $\epsilon > 0, \mu < 0$ ) [18].



**Figure II.1:** Classification des métamatériaux.

## II.5 But d'utilisation les métamatériaux :

En général, les métamatériaux sont utilisés pour améliorer les performances des dispositifs micro-ondes telles que les antennes, les filtres, les résonateurs, les coupleurs, les câbles de transmission... etc. La principale caractéristique est de générer un milieu avec un indice de réfraction accordable qui peut être négatif à certaines fréquences de miniaturisation ces dispositifs.

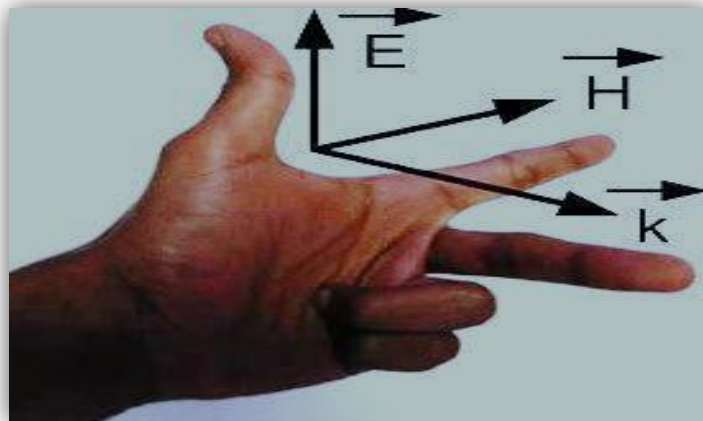
De plus, ces métamatériaux dans le domaine des antennes permettent la fabrication de surfaces partiellement réfléchissantes, qui à leur tour permettent la construction d'antennes directives très fines (typiquement 1 mm à 10 GHz) [19].

## II.6 Les caractéristiques générales de métamatériaux :

### II.6.1 Approche de Veselago :

Dans les diélectriques classiques, la permittivité et la perméabilité sont toutes deux positives et le champ électrique, le champ magnétique et le vecteur d'onde forment un trièdre régulier (direct) [3].

**Vesselago** a dit que les ondes électromagnétiques puissent se propager dans des milieux linéaires, homogènes et isotropes avec simultanément une permittivité et une perméabilité négative. [20] Ces matériaux ont ensuite été identifiés comme main gauche (Left-Handed Materials LHM). Le terme vient du fait que le champ électrique  $\vec{E}$ , le champ magnétique  $\vec{H}$  et le vecteur d'onde  $\vec{K}$  forme un trièdre indirect caractérisé par la règle de la main gauche comme est bien montrée sur la figure II.3.

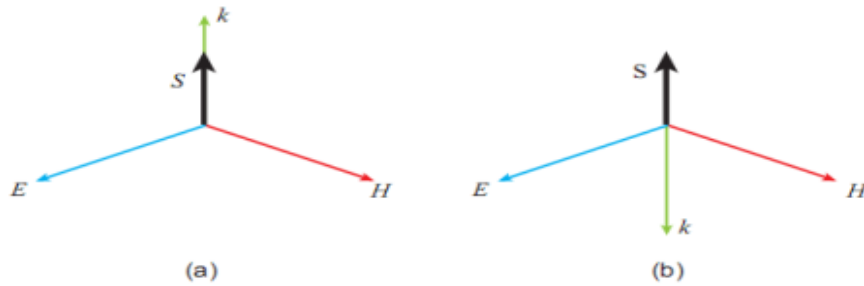


**Figure II.2 :** Trièdre indirect caractérisé par la règle de la main gauche de Veselago [3].

### II.6.2 Vecteur de poynting :

La Figure II.4 montre la propagation des ondes électromagnétiques dans deux matériaux différents : (a) un matériau "MMD" Main Droite (b) un matériau "MMG" Main gauche.

Le vecteur de poynting est une des caractéristiques fondamentales des matériaux (MMG) [3]. Comme la montre la figure ci-dessous : dans ce cas (a), le vecteur d'onde et le vecteur de poynting sont dans la même direction. Or, dans le cas (b), les directions de ces deux vecteurs seraient opposées.



**Figure II.3 :** Trièdre  $(\vec{E}, \vec{H}, \vec{K})$  pour une onde électromagnétique se propageant (a) dans un MMD et (b) dans un MMG [3].

$\vec{E}$  : Vecteur de champ électrique.

$\vec{K}$  : Vecteur d'onde.

$\vec{H}$  : Vecteur de champ magnétique.

$\vec{S}$  : Vecteur de poynting.

Le vecteur de Poynting est donné par la formule suivante, selon [21] :

$$\vec{S} = \frac{1}{2} \vec{E} \times \vec{H}^* \quad (1)$$

Le fait que les trois vecteurs  $(\vec{E}, \vec{H}, \vec{K})$  forment un trièdre indirect implique que la vitesse de phase  $V_\phi$  et la vitesse du groupe  $V_g$  de l'onde électromagnétique à des directions opposées [3, 21].

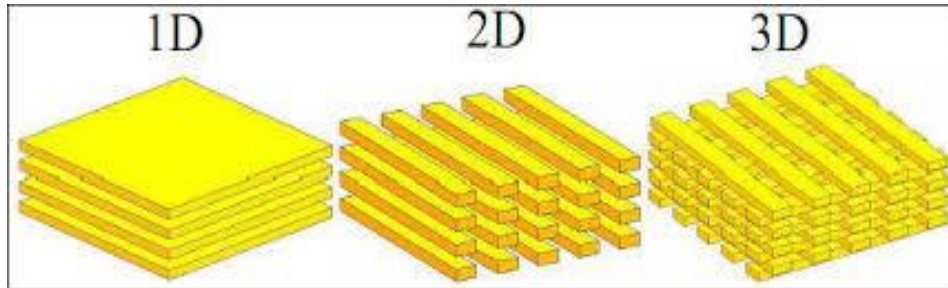
Selon **Veselago** ses propriétés engendreront l'inversion des lois de la physique classique telles que :

- ❖ Inversion de la loi de **Snell-Descartes** : lors de passages d'une onde électromagnétique d'un milieu main droite (milieu conventionnel) vers un milieu main gauche l'onde réfractée sera transmise du même côté de la normale que l'onde incidente [3].
- ❖ Inversion de l'effet doppler [3].

## II.7 Les types de métamatériaux :

### II.7.1 Matériaux à bande interdite photonique (cristaux photonique) :

Les cristaux photoniques sont des structures dont l'indice de réfraction varie périodiquement dans une, deux ou trois dimensions.



**Figure II.4 :** Cristaux photoniques à une, deux et trois dimensions.

Ce milieu périodique produit sur la lumière qui se propage dans le cristal photonique un effet analogue à celui du potentiel périodique sur les électrons dans un cristal. Par conséquent, le déplacement des électrons est affecté en créant des bandes interdites et des bandes autorisées. Par ailleurs, les ondes qui peuvent se propager dans un cristal se nomment “modes” et les groupes de mode autorisés se nomment des “bandes” [4].

Il existe pour les électrons des bandes d'énergie permise et des bandes interdites, il existe des bandes photoniques d'états permis et des bandes photoniques interdites. Une bande photonique correspond à un mode qui se propage dans le cristal photonique. Une bande interdite photonique correspond à un intervalle d'énergie où la propagation de la lumière est interdite dans certaines directions du cristal photonique. Les cristaux photoniques offrent la possibilité de contrôler la propagation de la lumière et ceci, sur la dimension de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde dans le matériau. C'est notamment cette propriété qui les rend intéressants pour de nombreuses applications [25].

### II.7.2 Matériaux à indice négative:

L'indice de réfraction détermine à quel point le chemin de la lumière est courbé ou réfracté lorsqu'il pénètre dans un matériau. Ceci est décrit par la loi de



réfraction de **Snell**,  $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$ , où  $\theta_1$  et  $\theta_2$  sont respectivement l'angle d'incidence et l'angle de réfraction d'un rayon traversent l'interface entre deux milieux d'indices de réfraction,  $n_1$  et  $n_2$ . Les indices de réfraction déterminent également la quantité de lumière qui est réfléchi lorsqu'elle atteint l'interface, ainsi que l'angle critique pour la réflexion interne totale, leur intensité (équation de Fresnel) et l'angle de Brewster [26].

Des recherches récentes ont ainsi démontré l'existence de matériaux avec un indice de réfraction négative, ce qui peut se produire si la permittivité  $\epsilon$  et la perméabilité  $\mu$  ont des valeurs négatives simultanées dans certaines bandes de fréquences [27]. Ceci peut être réalisé avec des métamatériaux construits périodiquement. Par conséquent, il est maintenant concevable d'utiliser un milieu avec un indice de réfraction négative, la permittivité et la perméabilité sont des caractéristiques des matériaux. Ces paramètres ont des valeurs positives pour les matériaux ordinaires (matériaux du côté droit du MMD), La permittivité et la perméabilité effective montrent des valeurs négatives pour certaines structures artificielles, qui sont appelées « matériaux main gauche (MMG) ». Les propriétés électriques et magnétiques des métamatériaux sont déterminées par la permittivité diélectrique qui peut être obtenue par un réseau de fils métalliques et la perméabilité magnétique qui peut être obtenue par les résonateurs à anneau fendu SRR.

## II.7.1 Composants à inclusions :

### II.7.1.1 Résonateur en anneaux fendus RAF ou SRR (Split Ring Resonator) :

**Pendry** et al ont suggéré pour la première fois la conception de SRR en 1999 [32]. Pour une utilisation en tant que métamatériaux, parce qu'il présente une perméabilité magnétique effective qui est inférieure à zéro lorsqu'il est placé dans un champ magnétiques oscillant. Des conceptions SRR ils ont depuis été mises au point pour des applications d'antenne. La fréquence de résonance d'un seul SRR et son diagramme de rayonnement en champ lointain ont été expérimentalement établis par **Alici** et **Ozby** [33].

Les résonateurs à anneau fendu (SRR) sont constitués de deux anneaux métalliques concentriques de forme circulaire [31] découpée selon un diamètre ou carrée, d'où le nom de résonateur "Split Ring" [29], grave sur le substrat diélectrique. Ils ont des fentes ou des lacunes aux extrémités opposées.

La figure II.6 schématise deux formulaires de géométries planaires de cellules unitaires RAF.

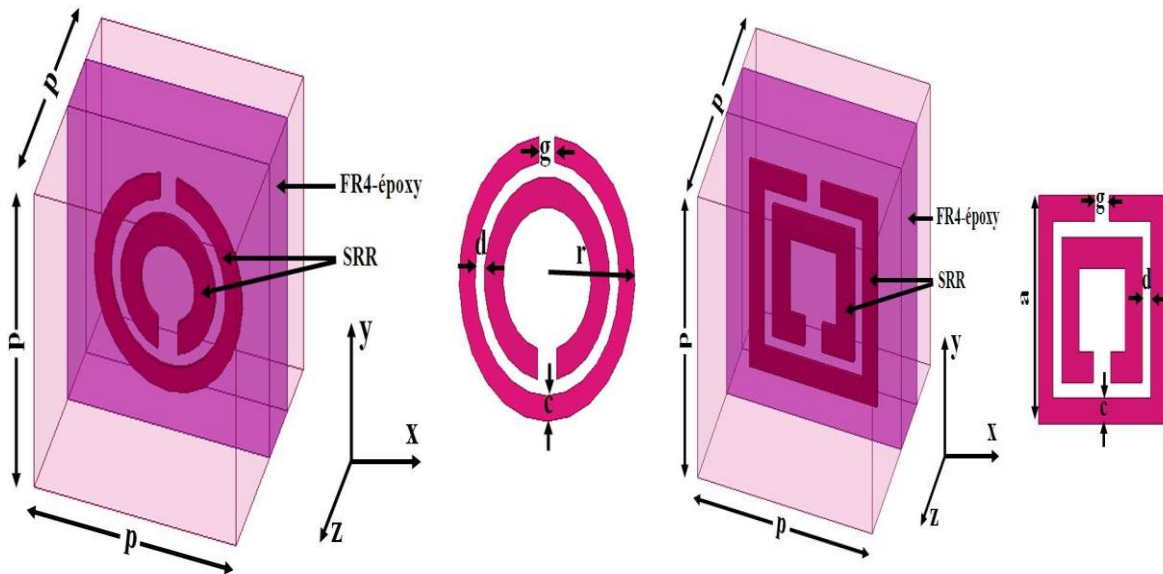


Figure II.5 : Géométries planaires des cellules unitaires d'un résonateur d'anneaux fendus. a-RAF circulaire; b- RAF carrée.

Son but est de produire la susceptibilité magnétique souhaitée (réponse magnétique) dans divers types de métamatériaux jusqu'à 200 Téra hertz.

Le circuit équivalent du résonateur divisé se compose d'une inductance (L) et d'une capacité (C). La fréquence de résonance dépend des valeurs LC est donnée par [31] :

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2)$$

L'expression approximative de la perméabilité effective d'une cellule SRR donnée par l'expression suivante, selon [34] :

$$\mu_{eff} = 1 - \frac{\frac{\pi r^2}{a}}{1 + \frac{2\sigma_i}{\omega r \mu_0} - \frac{3d}{\pi^2 r^2 \epsilon_0 \epsilon \omega^2}} \quad (3)$$

$a$ : Longueur de la cellule unitaire.

$\sigma_i$ : Conductivité électrique.

$r$ : Rayon de l'anneau antérieur.

$\omega$ : Largeur de l'anneau.

$d$ : Distance radiale entre les anneaux intérieur et extérieur.

### II.7.1.2 Cellule RAF Complémentaire RAFC ou (CSRR) :

Le résonateur en anneau fendu complémentaire est un élément de dimensions très inférieures à la longueur d'onde, dérivé du résonateur en anneaux fendus RAF ou SRR (Split Ring Resonator), introduit par Pendry.

Le résonateur en anneaux fendus complémentaire (RAFC) (CSRR en anglais) est donc le complémentaire du RAF. Au lieu de cela d'avoir deux anneaux interrompus concentriques en métal gravés sur un support diélectrique dans le cas du RAF, nous avons ici deux fentes en forme d'anneaux interrompus concentriques dans le plan conducteur (en cuivre dans notre cas), disposé sur un substrat. La figure II.7 montre la différence qui existe entre une conception RAF et une conception complémentaire RAFC. En fait, toute la partie conductrice (les anneaux) et la partie diélectrique (les fentes) du RAF ils sont respectivement remplacés par des fentes et du cuivre dans le RAFC [30].

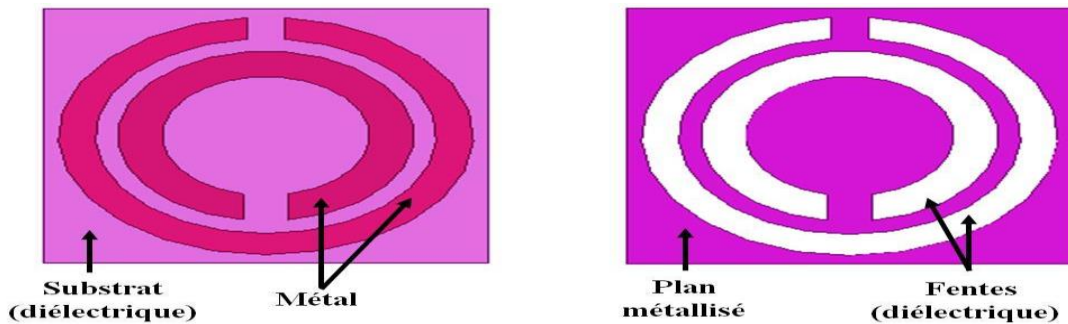


Figure II.6 : Différence entre une conception RAF et une conception complémentaire.

## II.8 Propriétés des métamatériaux :

Les métamatériaux ont des propriétés physiques et électromagnétiques différentes de celles des matériaux physiques classiques, notamment :

### II.8.1 Propriétés physiques :

- Permittivité négative [4].
- Perméabilité négative [4].
- Indice de réfraction négatif [36].

### II.8.2 Propriétés électromagnétiques :

▪ Lors de la propagation d'une onde plane dans un métamatériau, le trièdre formé par les trois vecteurs  $(\vec{E}, \vec{H}, \vec{K})$ , est inversé [4] ; donc le vecteur de poynting,  $\vec{S}$  existe à l'opposé de la direction du vecteur d'onde  $\vec{K}$  [35].

▪ Dans les milieux métamatériaux, les vitesses de phase  $V_\phi$  et la vitesse du groupe  $V_g$  sont dans des directions opposées (Figure II. 8) par contre, elles sont de même sens dans un milieu conventionnel [35] [4].

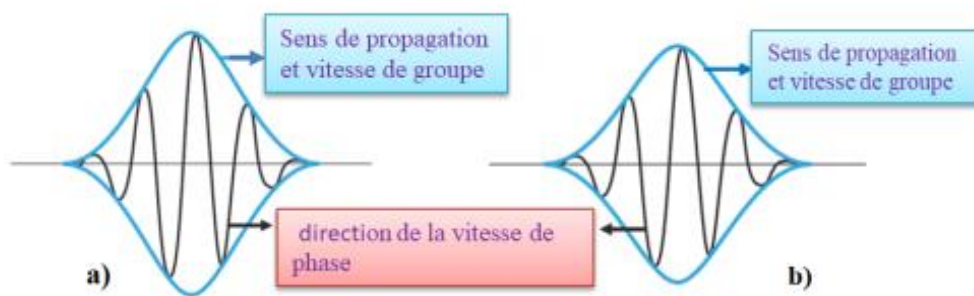


Figure II.7 : Vitesse de phase et vitesse de groupe, (a) : Milieu à matériau conventionnel, (b) : Milieu à méta matériau (main-gauche) [36].

## II.9 Extraction de la permittivité effective $\epsilon_r$ et de la perméabilité effective $\mu_r$ :

Il existe de nombreuses méthodes et approches qui permettent d'extraire des paramètres des métamatériaux (la permittivité effective, la perméabilité effective, l'indice de réfraction  $n$  et l'impédance  $Z$ ), à savoir : méthode de Nicolson-Rose-Weir (NRW), méthode de Smith, méthode de TR Transmission – Réflexion...etc.

### II.9.1 Méthode de Nicolson-Rose-Weir (NRW) :

La méthode la plus largement utilisée pour la caractérisation des matériaux est la méthode Nicolson-Ross-Weir. Elle est aussi appelée technique d'inversion

[38], [39] car elle permet d'obtenir la permittivité et la perméabilité à partir de l'une des deux paires de coefficients de transmission et de réflexion (S11, S21) ou (S22, S12).

L'un des avantages de la méthode est la rapidité de calcul est applicable aux guides d'ondes et à la ligne coaxiale [37].

La première phase de l'inversion passe par le calcul du coefficient de réflexion  $\Gamma$ :

$$\Gamma = \frac{(Z_0-1)}{(Z_0+1)} \quad (4)$$

$Z_0$  : Est l'impédance relative qui a été créé en fonction de la permittivité et la perméabilité effective :

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \quad (5)$$

Nous pouvons calculer les paramètres S (S11 et S21) à travers le coefficient de réflexion en suivant l'équation suivante:

$$S_{11} = \frac{(1-\Gamma^2)Z}{1-\Gamma^2Z^2} \quad (6)$$

$$S_{21} = \frac{(1-Z^2)\Gamma}{1-\Gamma^2Z^2} \quad (7)$$

À partir de ces paramètres, les deux vecteurs V1 et V2 sont créés comme suivent :

$$V_1 = S_{21} + S_{11} \quad (8)$$

$$V_2 = S_{21} - S_{11} \quad (9)$$

La méthode Nicolson-Rose-Weir (NRW) est utilisée pour séparer les paramètres effectifs (permittivité et perméabilité) du coefficient de réflexion S11 et du coefficient de transmission S21 [3]. Ainsi, les paramètres effectifs sont calculés comme suivent :

$$\epsilon_r = \frac{c}{j\pi f d} \times \frac{(1-V_1)}{(1+V_1)} \quad (10)$$

$$\mu_r = \frac{c}{j\pi f d} \times \frac{(1-V_2)}{(1+V_2)} \quad (11)$$

Selon les paramètres S, on peut calculer l'indice de réfraction à partir de la relation suivante :

$$n = \frac{c}{j\pi f d} \times \sqrt{\frac{(S_{21}-1)^2 - S_{11}^2}{(S_{21}+1)^2 - S_{11}^2}} \quad (12)$$

Avec :

**f** : Bande de fréquences en GHz.

**d** : Epaisseur de substrat en m.

### II.9.2 Méthode de Smith:

L'approche de **Smith** et al consiste à remplacer le métamatériau, qui représente un milieu hétérogène, par un milieu hypothétique, continu et homogène qui lui serait équivalent et qui aurait la même réponse électromagnétique. Ce milieu est caractérisé par son indice de réfraction et son impédance  $Z$ , que nous pouvons facilement déduire à partir des paramètres de la matrice S [40] [41] [42].

La méthode de Smith consiste à inverser les coefficients de transmission et de réflexions mesurées de l'onde incidente atteignant le métamatériau, pour déterminer les paramètres effectifs du milieu, à savoir son indice de réfraction  $n$  et son impédance  $Z$ . La permittivité  $\varepsilon$  et la perméabilité  $\mu$  du milieu seront calculées ultérieurement [41].

La technique d'extraction des paramètres effectifs se fait, selon les étapes suivantes [40] :

$$S_{11} = S_{22} = \frac{1}{\cos(nkd) - \frac{i}{2}(Z + \frac{1}{Z}) \sin(nkd)} \quad (13)$$

$$S_{21} = S_{12} = \frac{i}{2}(\frac{1}{Z} - Z) \sin(nkd) \quad (14)$$

Les équations (13) et (14) sont ensuite inversées dans le but de déterminer  $Z$  et  $n$  :

$$Z = \sqrt{\frac{(1+S_{11})^2 - S_{21}^2}{(1-S_{11})^2 - S_{21}^2}} \quad (15)$$

$$\mathbf{n} = \frac{1}{kd} \cos^{-1} \left[ \frac{(1-S_{11}^2+S_{21}^2)}{2 S_{21}} \right] \quad (16)$$

Avec :

$\mathbf{k}$  : Vecteur d'onde en espace libre.

$d$  : Épaisseur de substrat en mètres.

Par conséquent, la permittivité effective  $\epsilon_r$  et la perméabilité effective  $\mu_r$  sont calculées en fonction de  $Z$  et  $n$ , tel que ci-dessous :

$$\epsilon = \frac{n}{Z} \quad (17)$$

$$\mu = n \times Z \quad (18)$$

### II.9.3 Méthode de TR (Transmission-Réflexion) :

La méthode TR est l'une des méthodes prometteuses et populaires utilisées pour le calcul et la récupération directe de l'indice de réfraction  $n$  des métamatériaux à partir des paramètres de réflexion et de transmission.  $S_{ij}$  [43] [37].

Cette méthode comprend la détermination de l'impédance du matériau  $Z$  et l'indice de branchement  $m$ . Les équations utilisées dans cette méthode elles sont données ci-dessous.

L'impédance  $Z$  et l'indice de réfraction  $n$  sont calculés par les relations suivantes :

$$Z = \pm \sqrt{\frac{(1+S_{11})^2+S_{21}^2}{(1-S_{11})^2+S_{21}^2}} \quad (19)$$

$$\mathbf{n} = \frac{1}{k_0 d} \left\{ \left[ \ln(e^{ink_0 d}) \right]'' + 2m\pi \right\} - i \left[ \ln(e^{ink_0 d}) \right]' \quad (20)$$

Avec:

$$e^{ink_0 d} = \frac{S_{21} \frac{Z-1}{Z+1}}{1-S_{11} \frac{Z-1}{Z+1}} \quad (21)$$

$[\ ]''$  : Représente un nombre complexe.

$[\ ]'$  : Représente la partie réelle du nombre complexe.

$m$  : Indice des branchements.

$k_0$  : Vecteur d'onde.

$d$  : Épaisseur du substrat en mètres (m).

À partir des équations précédentes, nous pouvons calculer les paramètres effectifs avec les relations suivantes :

$$\epsilon = \frac{n}{Z} \quad (22)$$

$$\mu = n \times Z \quad (23)$$

## II.10 Les applications des métamatériaux dans le domaine de télécommunications :

### II.10.1 Applications des métamatériaux dans le domaine d'antennes :

Depuis quelques années, on assiste à un regain d'intérêt pour de nombreuses applications utilisant les métamatériaux dans le domaine des micro-ondes et des antennes. Les applications d'antenne sur lesquelles nous nous concentrons ici sont l'élargissement de la bande passante, le rejet de bande, l'augmentation de la directivité, l'amélioration du gain et la miniaturisation [20].

#### ✓ Les métamatériaux pour l'élargissement de la bande passante :

L'élargissement de la bande passante peut être obtenu en utilisant différentes techniques basées sur des métamatériaux, par exemple des antennes patch démétallisé sur le patch et le plan de masse peuvent être conçues par des structures périodiques bidimensionnelles constituées d'anneaux fendus de résonateur ou d'autres types de cellule unitaire A avec un métamatériau [44,45]. Comme représenté dans la figure II. 9 (a).

Chaque cellule unitaire représente une fente qui peut générer de nouvelles résonances [5]. Le choix de la forme et de la taille de ces fentes déterminera la fréquence de fonctionnement et l'impédance d'entrée de l'antenne. La corrélation de la résonance des fentes avec la résonance de l'élément métallique va ici faciliter l'élargissement de la bande passante. De plus, pour ce type d'antenne, le lobe principal du diagramme de rayonnement change de direction vers une



position horizontale au lieu d'une position verticale en raison du métamatériau [20].

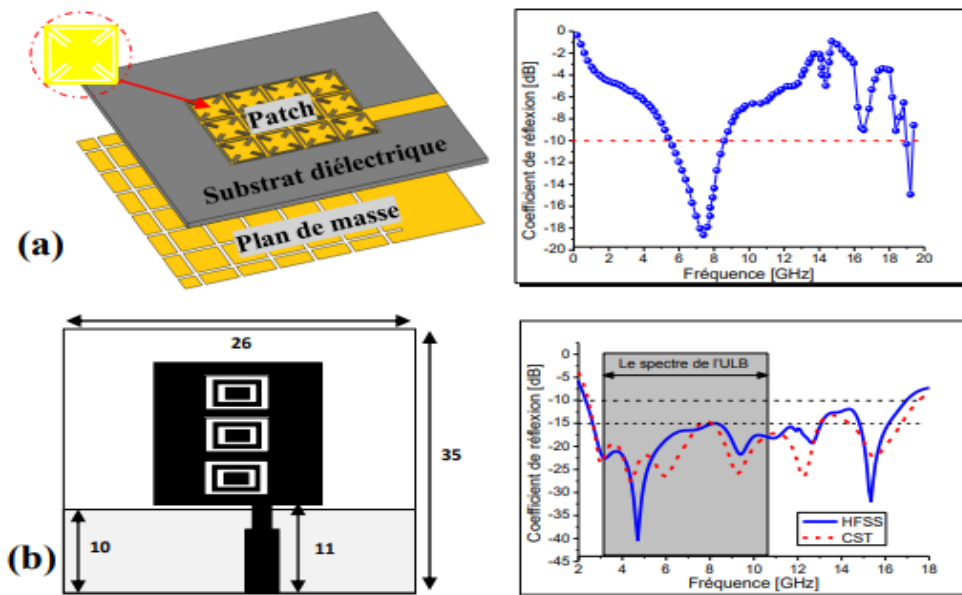
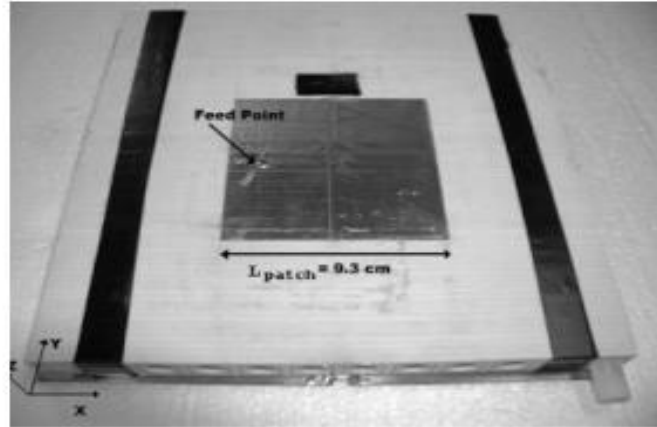


Figure II.8 : (a) antenne patch à large bande et leur S11 [20], (b) antenne patch avec trois cellules unitaires de type CDRR et leurs S11 [45].

✓ La miniaturisation :

Les métamatériaux permettent la miniaturisation de la plupart des appareils électroniques conventionnels, y compris les antennes [46].

La Figure II.10 montre une antenne patch amélioré grâce au placement d'une couche de métamatériau sur le dessus avec une perméabilité bien supérieure à un car résonant. Les chercheurs ont montré que les dimensions de telles antennes étaient réduites du facteur trois à six par rapport aux antennes classiques sans métamatériaux [19]. Désormais, grâce aux métamatériaux, les antennes deviennent de plus en plus petites, atteignant des dimensions nanométriques.



**Figure II.9 :** Photo d'une antenne patch miniaturisée grâce à une couche de métamatériau. (Buell *et al.* 2014 [19]).

### II.10.2 Applications des métamatériaux dans le domaine des filtres :

✓ Conception d'un filtre coupe-bande à base de cellules Métamatériaux de type RAFC ou CSRR :

Dans l'une des études menées par le chercheur **H. Lalj** et al, dans le domaine des filtres, ils ont présenté un exemple de conception d'un filtre coupe-bande à base d'une cellule métamatériaux du type RAFC rectangulaire [47].

Ce filtre est constitué d'une simple ligne micro-ruban de  $50\Omega$  avec une cellule RAFC rectangulaire, la fréquence de résonance est autour de 6.0 GHz. La géométrie de la ligne micro-ruban à  $50\Omega$  et les résultats des paramètres S (S11, S21) de ce filtre sont présentés dans les figures II. 11 et II. 12 respectivement.

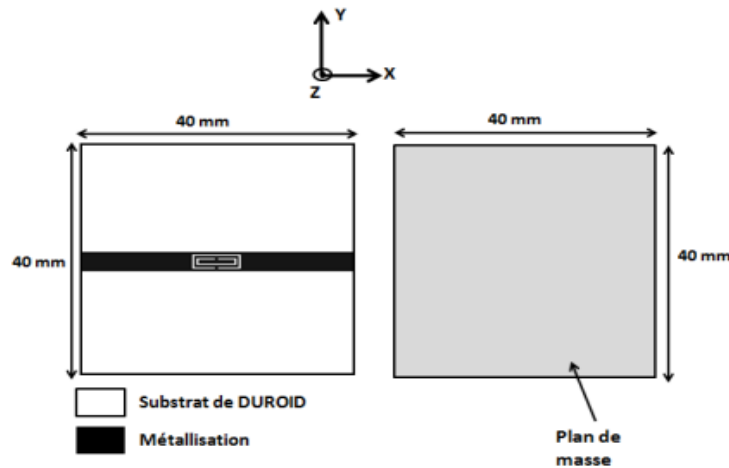


Figure II.10 : Configuration du filtre coupe bande basé sur une ligne micro-ruban  $50 \Omega$  chargée par une cellule RAFC rectangulaire [47].

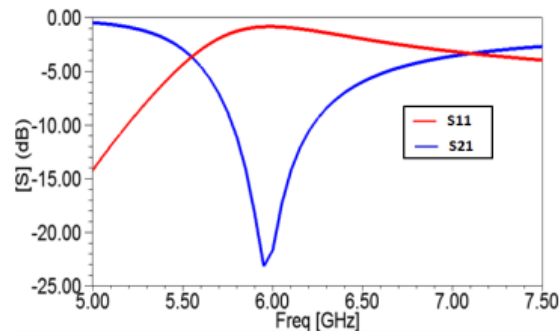
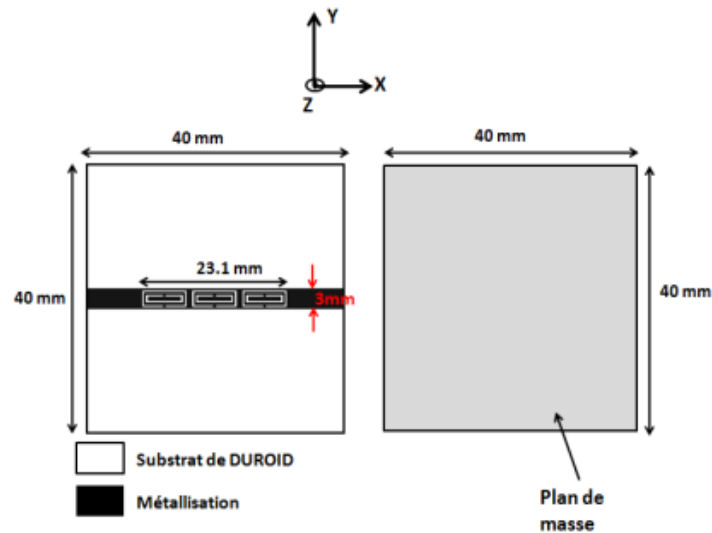


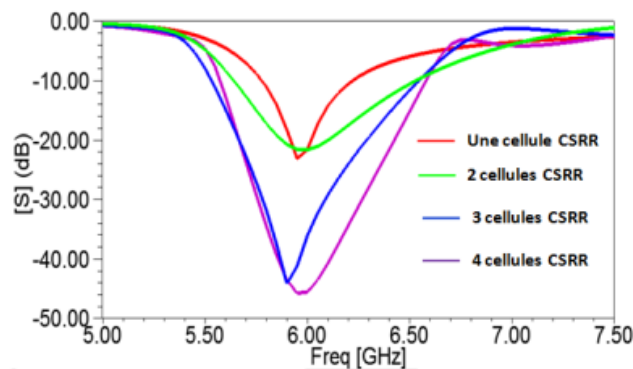
Figure II.11 : Résultats de simulation des paramètres S11 et S21 [48].

Les résultats de simulation des paramètres S (Fig. II. 12) montrent un comportement coupe bande autour de la fréquence de 6,0 GHz avec une transmission (S21) d'environ -25 dB. La bande de fréquences rejetée est de 1,2 GHz [5,60 ; 6,80] GHz. La réponse de transmission présente également une faible perte d'insertion inférieure à 1 dB en dehors de la bande de réjections [47].

Prochaine étape, le chercheur **H. Lalj** a étudié la ligne micro-ruban chargé par un réseau de cellules CSRR rectangulaire au lieu d'une seule cellule [47], et les résultats que vous obtenez sont présentés dans les deux figures suivantes (Les figures II. 13 et II. 14).



**Figure II.12 :** Configuration du filtre coupe bande constitué d'une ligne micro-ruban  $50 \Omega$  chargée par un réseau de trois cellules CSRR rectangulaires [47].



**Figures II.13 :** Résultats de simulation des paramètres  $S_{21}$  des différentes configurations du filtre coupe bande chargé par un réseau de cellules CSRR rectangulaires [47].

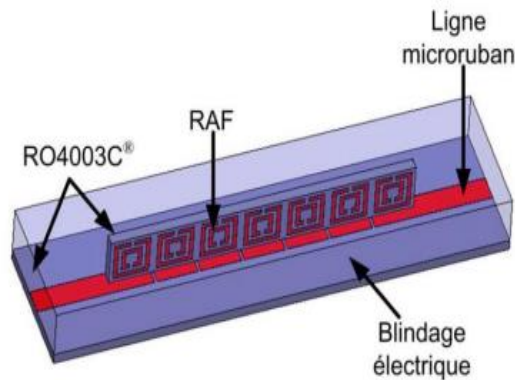
D'après les résultats de simulation des paramètres  $S_{21}$ , nous notons qu'à mesure que le nombre de cellules augmente, la bande rejetée du filtre devient plus étroite, avec un niveau de réjection plus accentué.

✓ **Conception d'un filtre coupe-bande à basé sur un réseau de cellules métamatériaux de type RAF (SRR) :**

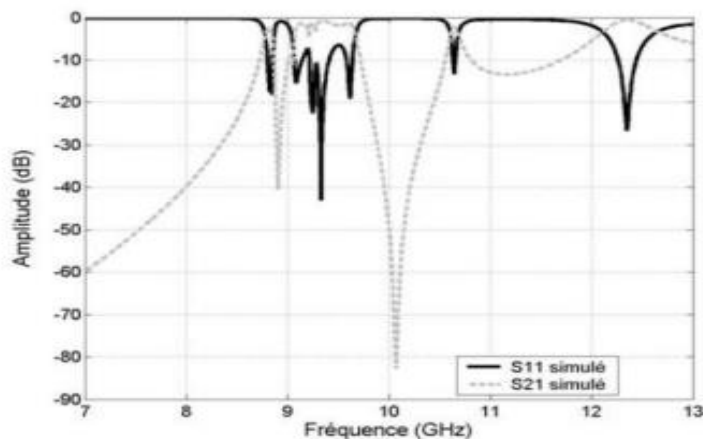
Les chercheurs en 2001, ont proposé des structures de filtres à base de cellules de métamatériaux dans le but de produire des filtres plus compacts et reconfigurables.

Les premiers travaux de l'équipe de **M.Burokur** ont été de réaliser un filtre coupe-bande basé sur un réseau de cellules RAF (SRR) et une ligne de transmission de  $50 \Omega$ . Les résultats obtenus par cette équipe montrent un phénomène coupe-bande autour de la fréquence de résonance de la cellule RAF [47, 5].

Un autre travail du même groupe a été de réaliser un filtre passe-bande basée sur un réseau de cellules RAF (SRR) et de résonateurs micro-rubans [47] (Figures II. 15), les résultats obtenus par ce groupe ont montré un filtre passe-bande autour de la fréquence de résonance de la cellule RAF (Figures II. 15).



**Figures II.14** : RAFs associés aux résonateurs micro-rubans [47].



**Figures II.15** : Réponses simulées en réflexion et en transmission de la structure faite de RAFs et de résonateurs micro-rubans [47].

## II.11 Conclusion :

Métamatériau a reçu un grand intérêt au cours des dix dernières années dans un domaine distinct, en raison de ses caractéristiques clé telles que l'amélioration de la bande passante, de la puissance rayonnée, de la directivité et du contrôle de la direction du rayonnement électromagnétique. Il s'agit d'une classe intelligente ou d'une nouvelle classe de matériaux inventés par l'homme qui pourraient atteindre des propriétés électromagnétiques qui ne se produisent pas naturellement, telles que la couverture électromagnétique ou l'indice de réfraction négative. Ces matériaux présentent une valeur négative de permittivité, de perméabilité et d'indice de réfraction.

L'objectif de ce chapitre est de fournir un aperçu complet des métamatériaux, du développement historique, où nous avons mis en évidence la première tentative le **Dr Smith** qui a rendu possible une nouvelle classe de matériaux artificiels aux caractéristiques électromagnétiques exceptionnelles. De plus, on a couvert les principes et la classification des métamatériaux et l'objectif d'utilisation. En outre, nous avons discuté des types et les propriétés des métamatériaux (physique, électromagnétique),...etc. Et pour extraire les paramètres effectifs, il a proposé trois méthodes différentes. Les méthodes présentées se basent sur un ensemble d'équations bien définies. Les méthodes étudiées sont les suivantes : méthode de **Nicolson-Ross-Weir** (NRW), la méthode de transmission et de réflexion (TR) et la méthode de **Smith**.

Nous avons conclu notre chapitre par la présentation de quelques exemples d'intégration de métamatériaux dans le domaine des antennes et des filtres.

## Référence bibliographique :

- [1] Savitri, Betty (2017). Conception d'un réseau d'antennes adaptatif en utilisant les métamatériau. Thèse. Gatineau, Université du Québec en Outaouais, Département d'informatique et d'ingénierie, 94 p.
- [2] DJERROUD Tarik, Métamatériau, applications aux antennes pour la téléphonie mobile. Thèse présentée en Vue d'obtention du diplôme master recherche, université Abderrahmane MIRA-Béjaia faculté de Technologie, département de Génie électrique
- [3] BELHEDRI Abdennour, FADHEL Abderraouf, "Conception et Analyses des cellules originaux ENG, MNG, DNG : Application satellitaire", THÈSE Présenté pour l'obtention du diplôme de MASTER ACADÉMIQUE, Systèmes des télécommunications, Université Kasdi Merbah – Ouargla –
- [4] Saïd MOSBAH," Modélisation et réalisation d'un capteur micro-onde à base de métamatériaux ", THÈSE Présentée au Département d'Electronique Pour l'obtention du diplôme de DOCTORAT, Sciences et Technologie, Réseaux et Télécommunication, UNIVERSITÉ FERHAT ABBAS - SÉTIF 1
- [5] Z. Troudi, S. Naoui, L. Latrach et L. Osman "Amélioration des performances d'un filtre passe-bande à base d'une nouvelle structure de RAF" Département de physique, U.R CSEHF 13ES37 Faculté des Sciences de Tunis, Université de Tunis El Manar, 2092 Tunisie
- [6] Sébastien Guenneau, partenaire du Forum du CNRS le journal 2017
- [7] BETTY SAVITRI,«Conception d'un réseau d'antennes adaptatif en utilisant les métamatériaux»,Thèse présentée au département d'informatique et d'ingénierie pour l'obtention du grade de philosophiae Doctor (Ph.D.) en Science et technologies de l'information,UNIVERSITÉ DU QUÉBEC EN OUTAOUAIS.
- [8] Aziza ZERMANE, « Contribution à l'étude et la faisabilité de micro-résonateurs en structure planaire », thèse présentée en vue de l'obtention du diplôme de Doctorat en Optique Photonique et Hyperfréquences, Université de Constantine. Juin 2011
- [9] Anju Pradeep, S. Mridula, and P. Mohanan, "Design of an Edge-Coupled Dual-Ring SplitRing Resonator", IEEE Antennas and Propagation Magazine, Vol. 53, No. 4, August 2011.
- [10] V. G. Veselago, "The Electrodynamics of Substances with Simultaneously Negative Values of  $\epsilon$  and  $\mu$ ," Soviet Physics Uspekhi.
- [11]Zhou, X. and Hu, G., 2006. Design for electromagnetic wave transparency with metamaterials. Physical Review E, 74(2),p.026607
- [12] Abdelaziz Qarchi , Hicham Belkebir , Abdellah Mir "Extraction of effective parameters of double omega shaped metamaterial . J. Mater. Environ.
- [13] Baudrand, H.; Raveu, N.; Sboui, N.; Fontgalland, "Applications of multiscale waves concept iterative procedure", IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics

Conference

[14] M. Ayari T. Aguilu H. Baudrand “An EM Simulation Software Based on Transverse Wave Approach (TWA) for EM Field Modeling of Planar Structures “. IJCSS, Vol.1, No.1, 2009 ISSN: 1803-8336 © USAR Publications

[15] Toufik Ziar, Mourad Zaabat and Henri Baudrand. “ The study of packaging miniaturization effect on the characteristics of an active planar circuit by using the iterative method” -International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields-Volume 26, Issue 6, November/December 2013, Pages: 521 532

[16] Toufik Ziar, Saida Mellal, Farh Hichem, Mourad Zaabat and Chérifa Azizi. “ The study of the miniaturisation effect on the characteristics of patch antenna using the WCIP method” Journal of New Technology and Materials JNTM

[17] [https://jnep.sumdu.edu.ua/download/numbers/2016/4/articles/en/jnep\\_2016\\_v8\\_4088.pdfq](https://jnep.sumdu.edu.ua/download/numbers/2016/4/articles/en/jnep_2016_v8_4088.pdfq)

[18] Gurwinder Singh, Rajni, Anupma Marwaha. “ A Review of Metamaterials and its Applications ”.International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)

[19] Buell, K., Mosallaei, H., & Sarabandi, K. (2006). A substrate for small patch antennas providing tunable miniaturization factors .IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 54 (1), 135-146.

[20] Bougoutaia Tahar "ANALYSE ET CONCEPTION DES ANTENNES MICROSTRIP A BASE DE METAMATERIAUX" THÈSE Présenté pour l'obtention du diplôme de DOCTORAT LMD Spécialité : Electronique, Option : Micro-ondes et Télécommunications Université Mohamed Boudiaf - M'sila 2018

[21] Mondher LABIDI, « Conception et application des métamatériaux pour des circuits RF». Thèse présentée en vue de l'obtention du diplôme de doctorat en technologies de l'information et de communications, école supérieure des communications, Tunis. 2012

[22] E. Yablonovitch. Physical Review Letters 58(20), 2059-2062 (1987).

[23] S. John. Physical Review Letters 58, 2059 (1987).

[24] E. Yablonovitch, T.J. Gmitter, and K.M. Leung. Physical Review Letters 67(17), 2295–2298.

[25] Benaissa fatima, «Etude et Simulation de la Propagation des Ondes Electromagnétiques dans les guides à Cristaux Photoniques-Application aux Fibres Optiques» , Thèse présentée a à L'UNIVERSITE ABOU-BAKR BELKAÏD – TLEMCEN Pour obtenir le grade deMagister en Physique en filière Physique Electronique

[26] Hecht, Eugene (2002). Optics. Addison-Wesley. ISBN 978-0-321-18878-6.

[27] Veselago, V. G. (1968). "The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of  $\epsilon$  and  $\mu$ ". Soviet Physics Uspekhi. 10 (4) : 509–514. Bibcode :1968SvPhU. 10..509V. doi :10.1070/PU2003v046n07ABEH001614. S2CID 250862458.



- [28] Nutan Reddy A. Split ring resonator and its evolved structures over the past decade. IEEE International Conference on Emerging Trends in Computing, Communication and Nanotechnology (ICECCN 2013)
- [29] Erika Pittella , Raissa Schiavoni;Giuseppina Monti ;Antonio Masciullo ,Marco Scarpetta ,Andrea Cataldo and Emanuele Piuizzi ; Split Ring Resonator Network and Diffused Sensing Element Embedded in a Concrete Beam for Structural Health Monitoring,. Sensors 2022, 22, 6398.<https://doi.org/10.3390/s22176398>
- [30] Mohammed El amine CHAIB, « Modélisation et caractérisation de fonctions électroniques générées par des dispositifs à métamatériaux ». Thèse de Magister en Systèmes des Réseaux de Télécommunication, université de Tlemcen, 2012.
- [31] <https://resources.systemanalysis.cadence.com/blog/msa2021-single-split-ring-resonator-design>
- [32] Pendry, J.B.; Holden, A.J.; Robbins, D.J.; Stewart, W.J. Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena. IEEE Trans. Microw. Theory Tech. 1999, 47, 2075–2084.
- [33] Alici, K.B.; Ozbay, E. Electrically small split ring resonator antennas. J. Appl. Phys. 2007, 101, 083104
- [34] Yassine BENACHOUR, « Optimisation de cristaux photoniques pour l'optique non linéaire ». Thèse de doctorat en physique, université de Paris-Sud, 2008.
- [35] M. Gamouh Samia, " ETUDE DES METAMATERIAUX ET LEURS APPLICATIONS DANS LES SYSTEMES MICRO-ONDES " Pour l'obtention du diplôme de Doctorat en Electronique Option Biocapteurs.
- [36] Lippens, D. (2005). Electromagnétisme des matériaux gauchers.
- [37] ASHRAF, F., ULLAH, M. A., ALAM, M. S., et al. Mathematical characterization of coupled Pi-shaped DNG metamaterial structure. In: 2017 International Conference on Electrical, Computer and Communication Engineering (ECCE). IEEE, 2017. p. 794-797.
- [38] W. B. Weir. Automatic measurement of complex dielectric constant and permeability at microwave frequencies. IEEE Proceedings, 62(4):33–36, 1974.
- [39] A. M. Nicolson and G. F. Ross. Measurement of the intrinsic properties of materials by time-domain techniques. Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on, 19(4):377–382, 1970.
- [40] D. R. Smith, S. Schultz, P. Markoš, et C. M. Soukoulis, «Determination of effective permittivity and permeability of metamaterials from reflection and transmission coefficients», Physical Review B, vol. 65, no19, avr. 2002
- [41] HAFDI Zakarya « Etude et optimisation des caractéristiques de structures à nanomatériaux et métamatériaux » THESE en codirection Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Doctorat troisième cycle en Electronique Option: Micro et nanotechnologies Université des Frères Mentouri Constantine1 28/10/2021

[42] D. R. Smith, D. C. Vier, Th. Koschny, et C. M. Soukoulis, «Electromagnetic parameter retrieval from inhomogeneous metamaterials», *Physical Review E*, vol. 71, no3, mars 2005, doi: 10.1103/PhysRevE.71.036617.

[43] ISLAM, Sikder Sunbeam, FARUQUE, Mohammad Rashed Iqbal, et ISLAM, Mohammad Tariqul. A new direct retrieval method of refractive index for the metamaterial. *Current Science*, 2015, p. 337-342.

[44] L.W. Li, Y.N. Li, T.S. Yeo, J.R. Mosig and O.J.F. Martin, “A broadband and high-gain metamaterial microstrip antenna”, *Applied Physics Letters*, 96 (2010), 164101.

[45] H. XIONG, J. S. HONG, and Y.H. PENG, “Impedance bandwidth and gain improvement for microstrip antenna using metamaterials”, *Radio Eng*, 21 (2012), 993-998.

[46] Simon Marcellin. « Métamatériaux ”tout-diélectrique” pour le térahertz ». *Science des matériaux*. Université Paris Saclay Thèse de doctorat de l’université paris-sacl 24 Mai 2016

[47] Hicham Lalj, «Conception et caractérisation de filtres et systèmes antennaires reconfigurables chargés par des résonateurs Métamatériaux sub-longueurs d’onde ». Thèse présentée en vue de l’obtention du diplôme de doctorat en physique, université de Rennes, Avril 2014.



*Chapitre III :*  
*Résultats et discussions*



### III.1 Introduction :

Les métamatériaux sont des matériaux artificiels conçus pour présenter des propriétés physiques qui ne sont pas rencontrées dans la nature. Ils sont utilisés dans les domaines des micro-ondes et de térahertz, pour des dispositifs tels que les antennes, les filtres, les capteurs de réseau intégrés ou les nouvelles super couches qui peuvent améliorer certains paramètres des équipements dans les différents domaines de la science et de la technologie.

Dans le cadre de notre mémoire de fin d'étude, nous proposons des solutions originales qui peuvent contribuer à l'amélioration des systèmes et dispositif RFID.

Notre objectif vise à la conception et l'analyse d'une cellule métamatériau de profil original et d'une taille miniature avec des performances meilleurs dans la bande de fréquences [700-1000 MHz]. Afin d'atteindre nos objectifs ciblés par notre cahier de charge, nous nous servons de logiciels de simulation CST Microwave studio, il est connu comme un outil de simulation très puissant et parfaitement adapté à ce genre de structures.

L'environnement de programmation MATLAB est aussi exploité, afin d'implémenter la méthode de Nicolson-Rose-Weir (NRW), qui va nous servir au calcul des paramètres effectifs, et le logiciel (ADS) pour la conception des circuits équivalent L'exploitation de ces logiciels de simulation, nous a facilité la complémentarité entre les tâches.

Notre troisième chapitre est divisé en trois grandes parties. La première partie vise à présenter la méthodologie de la conception d'une cellule originale, dédiées aux applications RFID ainsi que leur analyse. Notons que l'analyse de la cellule de profil original comprend en premier lieu la présentation du coefficient de transmission S21 dans la bande fréquence [700-1000 MHz], afin d'extraire les résonances de la cellule. Les paramètres effectifs (permittivité  $\epsilon_{eff}$  et la perméabilité effective  $\mu_{eff}$ ) attribués par la méthode NRW et Smith pour notre cellule sont schématisés dans la bande de fréquences suscitée. Dans la deuxième partie, on va analyser les résultats de la reconfigurabilité de cette cellule, et à la

fin de ce chapitre, on va faire une conception d'une antenne à base de notre cellule métamatériau.

### **III.2 Démarche méthodologique de conception des cellules métamatériaux [1] :**

La conception d'une cellule métamatériau implique plusieurs étapes. Voici un aperçu général du processus :

- ✓ Définir les propriétés souhaitées : Commencez par déterminer les propriétés spécifiques que nous souhaitons obtenir avec notre cellule de métamatériau. Cela peut inclure des caractéristiques telles que l'indice de réfraction négatif, l'absorption améliorée ou des réponses électromagnétiques uniques.
  
- ✓ Sélectionner la plage de fréquences de fonctionnement : Identifiez la plage de fréquences sur laquelle nous souhaitons que notre cellule de métamatériau présente les propriétés souhaitées. Cela influencera les paramètres de conception et la sélection des matériaux.
  
- ✓ Choisir le matériau : Sélectionnez un matériau approprié capable de manipuler les ondes électromagnétiques dans la plage de fréquences souhaitée. Les métamatériaux sont généralement conçus à l'aide de matériaux artificiellement structurés avec des cellules unitaires de sous-longueur d'onde. Selon notre application, nous pouvons choisir des métaux, des diélectriques ou une combinaison des deux.
  
- ✓ Déterminer la géométrie de la cellule unitaire : Concevez la structure de la cellule unitaire, qui est le bloc de construction fondamental de notre métamatériau. La géométrie de la cellule unitaire dictera la réponse électromagnétique du métamatériau. Elle peut impliquer des structures de sous-longueur d'onde telles que des anneaux divisés, des fils ou d'autres éléments résonants.

- ✓ Simuler la cellule unitaire : Utilisez un logiciel de simulation électromagnétique, tel que la méthode des éléments finis (MEF) ou la méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD), pour analyser les propriétés électromagnétiques de la cellule unitaire. Cette étape permet d'évaluer les performances de la cellule et d'optimiser ses paramètres.
- ✓ Caractériser et valider la cellule unitaire : Fabriquez un prototype de la cellule unitaire et effectuez des mesures ou des validations expérimentales. Cette étape permet de s'assurer que les performances réelles correspondent aux résultats simulés.
- ✓ Répéter et optimiser : Sur la base des résultats mesurés, itérez et affinez les paramètres de conception pour optimiser les performances de la cellule de métamatériau. Cela peut impliquer d'ajuster les dimensions, les propriétés des matériaux ou l'agencement des éléments au sein de la cellule unitaire.
- ✓ Mise à l'échelle de la structure du métamatériau : Une fois que nous avons une cellule unitaire bien optimisée, reproduisons-la et disposons-la selon un motif périodique pour former la structure de métamatériau souhaitée. L'agencement peut être bidimensionnel (2D) ou tridimensionnel (3D) selon l'application spécifique.

### III.3 Condition aux limites :

Pour la simulation de la cellule métamatériau, les conditions aux limites employées pour la propagation des ondes électromagnétiques par deux ports de guides d'onde sont définies : c'est-à-dire on définit le comportement du champ électrique et magnétique à l'interface vide du RAF carré. Pour la polarisation suivant l'axe X, on a :

- Perfect Magnetic Conductor (PMC) : elle est définie sur les deux murs perpendiculaires à l'axe Y (murs en haut et en bas), Dans ce cas tous les champs magnétiques tangentiels et les flux électriques normaux sont mis à zéro.
- Perfect Electric Conductor (PEC) : elle est définie sur les deux murs perpendiculaires à l'axe X (murs avant et arrière), Dans ce cas tous les champs électriques tangentiels et les flux magnétiques normaux sont mis à zéro. En conséquence, le champ E sera orienté selon l'axe X et le champ H sera orienté selon l'axe Y et l'onde incidente se propage selon l'axe Z. Afin de répondre aux besoins d'une simulation en espace libre, le solveur en domaine fréquentiel est un bon choix [1].

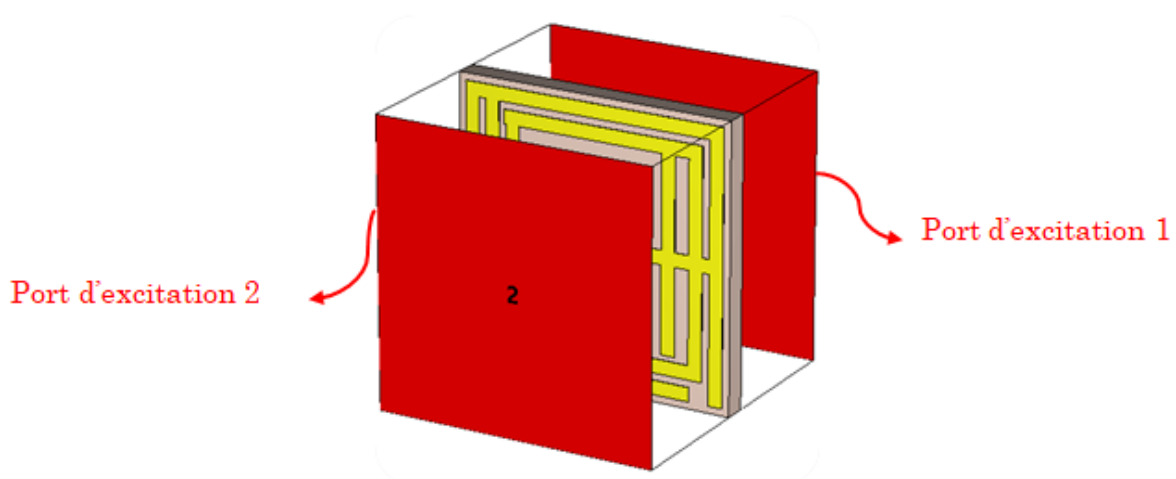
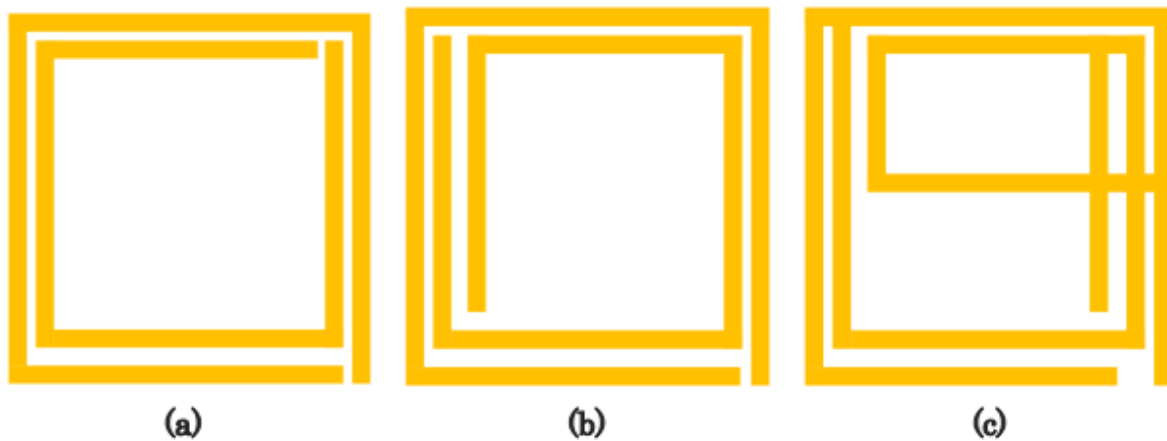


Figure III.1 : Conditions aux limites de la cellule.

### III.4 Résultats et simulation :

#### III.4.1 Étapes de conception de la cellule :

Dans le but d'obtenir une cellule qui correspond aux propriétés spécifiques que nous souhaitons, nous avons passé par trois étapes (a), (b) et (c), la figure ci-dessus montre les 3 conceptions :



**Figure III.2** : étapes de conception la cellule finale.

La cellule conventionnelle illustrée à la figure (a) n'a pas fourni des résultats satisfaisants dans une certaine mesure, pour l'obtention d'une réponse électromagnétique dans la bande de fréquences [700-1000 MHz], nous avons apporté quelques modifications à la structure de la cellule conventionnelle, il en a résulté une autre cellule modifiée présentée dans la figure (b).

La figure (c) montre la structure finale de la cellule conçue après des améliorations apportées à la cellule précédente.

Les résultats de simulation du coefficient de transmission pour les trois cellules sont indiqués à la figure III. 3 :



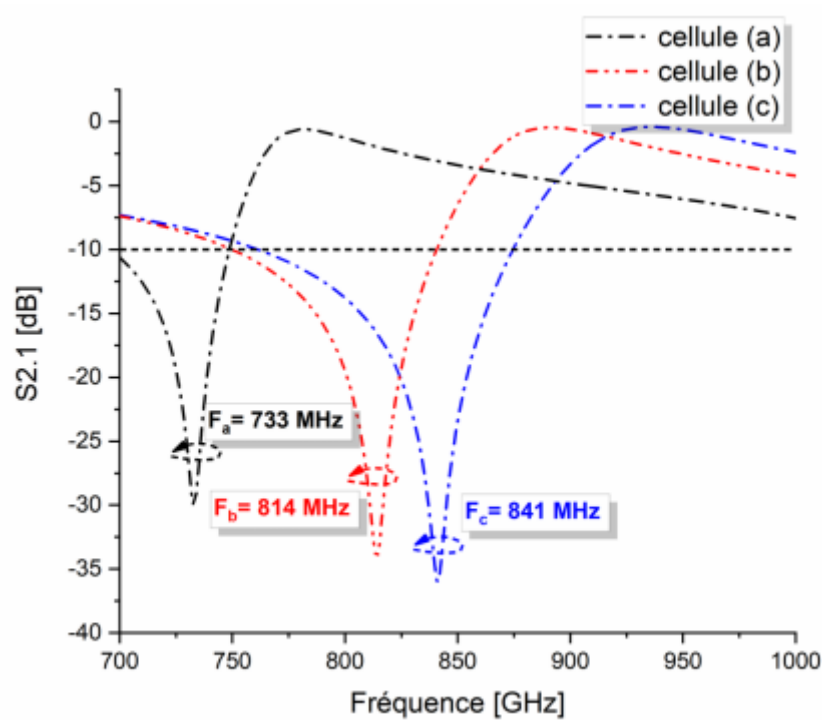


Figure III.3 : coefficient de transmission S21 pour les trois cellules (a), (b) et (C).

### III.4.2 Etude paramétrique de la cellule spirale modifiée :

Premièrement, on a effectué une étude paramétrique de la cellule finale en vue d'obtenir les résultats désirés.

La figure III.4 montre comment le coefficient S21 réagit selon la variation de du paramètre G1.

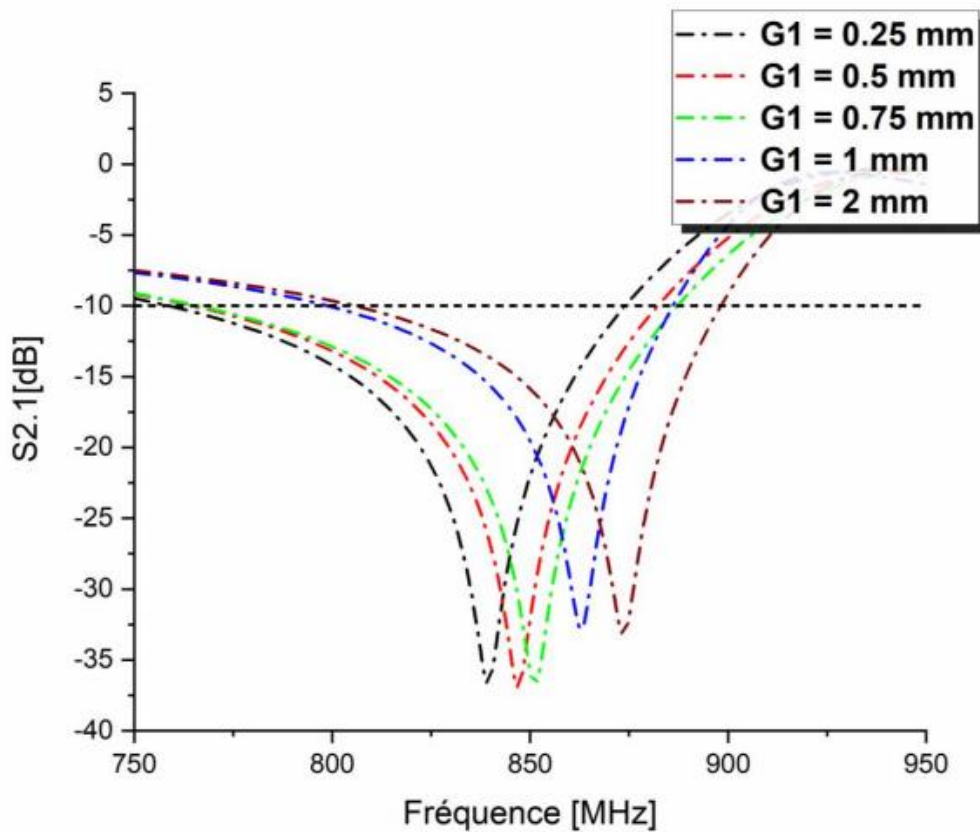


Figure III.4: Variation de S2.1 en fonction de fréquence.

Nous remarquons que les trois premières courbes sont proches car le pas d'augmentation du paramètre étudié est petit par rapport aux deux autres courbes, on voit aussi un déplacement des courbe vers la droite (augmentation de la fréquence) lorsque le paramètre G1 augmente. On constate donc que la fréquence est proportionnelle à ce paramètre.

### III.4.3 Structure et géométrie :

Dans cette partie, nous allons étudier le résonateur de forme spirale modifiée RAF en cuivre avec une épaisseur  $t = 0.035$  mm, qui est la cellule de forme spirale modifiée. Les dimensions de la cellule sont  $L \times W$ , la largeur du conducteur est de 1.00 mm, une ouverture dans l'un de ses cotés présente un gap G2. Le premier et le deuxième conducteur sont espacés de D3 et le conducteur interne est espacé de D2 à partir du deuxième conducteur. Cette structure a été

créée sur un substrat en Silicium qui a une permittivité diélectrique égale à 11.9 , et d'une conductivité égale à 0.00025 [S/m] avec une épaisseur de 1.6 mm.

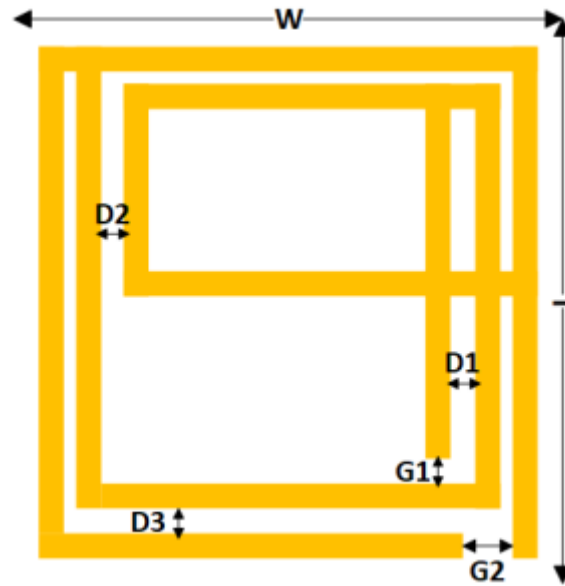


Figure III.5 : Cellule de forme spirale modifiée.

Les valeurs des dimensions sont regroupées dans le tableau III.1

Tableau III.1 : Paramètres géométriques de RAF de forme spirale modifiée.

Paramètres	Dimensions (mm)
W	20
L	20
G1	0.29
G2	1.45
D1	0.95
D2	0.45
D3	0.75

Après l'excitation de notre cellule finale, nous avons tracé le coefficient de transmission S21 de la cellule. Il est représenté par la figure III.6

Nous remarquons que la cellule métamatériau présente un comportement de coupe bande durant son excitation.

On d'après la courbe que le coefficient de transmission est de l'ordre de -36.98 dB à la fréquence de résonance 868 MHz.

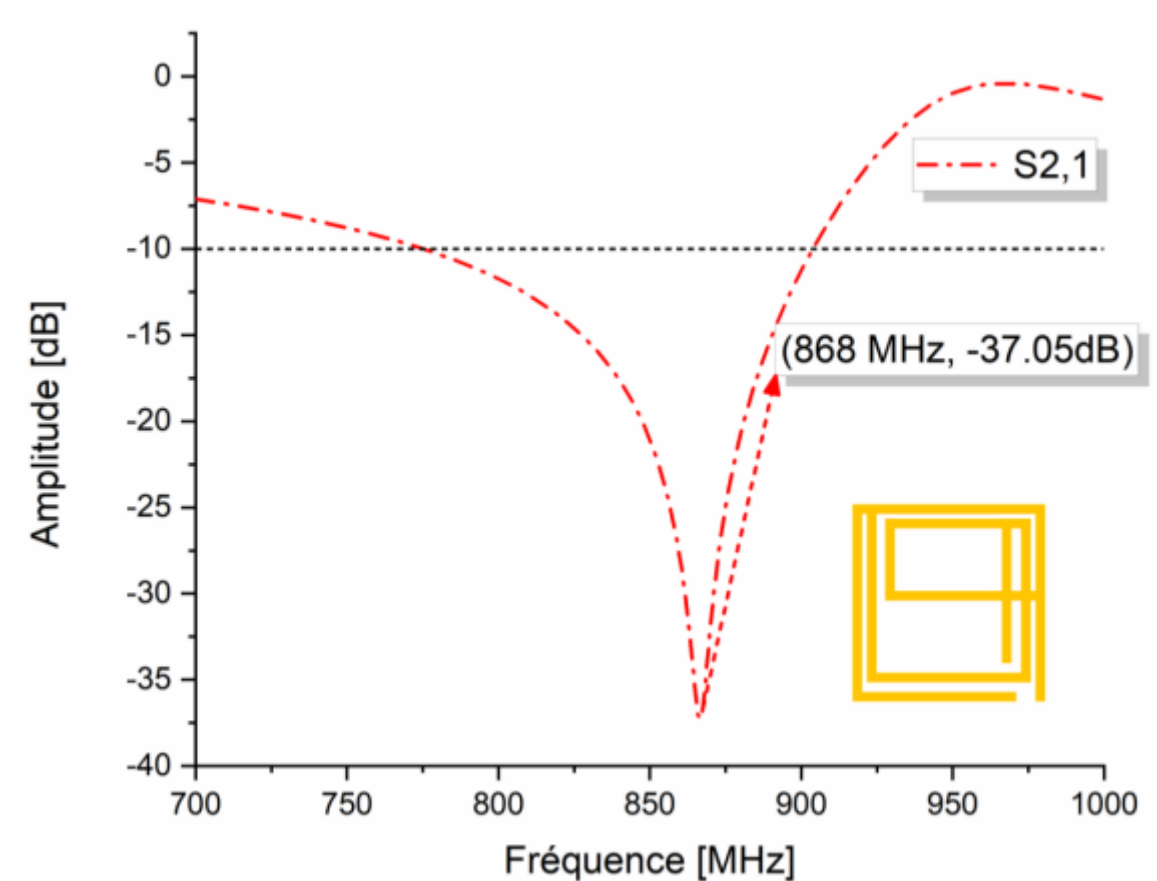
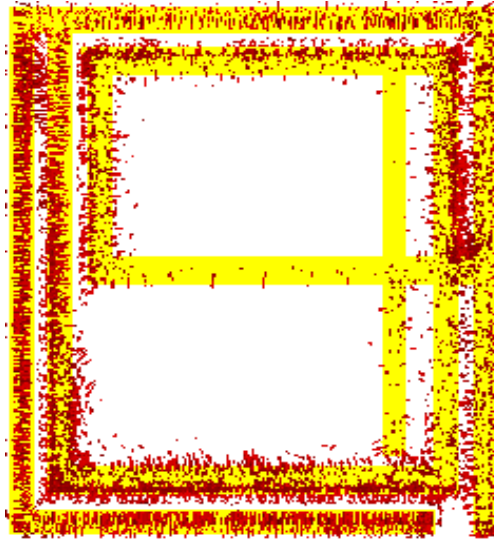


Figure III.6 : Coefficient de transmission  $S_{21}$  de la cellule spirale modifiée.

#### III.4.4 Distribution du courant dans la cellule RAF de forme spirale Modifiée :

La distribution du courant pour la fréquence de résonance 868 MHz est représentée par la figure III.7 :



**Figure III.7 :** Distribution du courant dans la cellule spirale modifiée.

On remarque que la concentration de courant est plus forte dans le conducteur externe que dans celui du conducteur interne. Le courant est concentré en abondance sur le côté bas gauche de la cellule de forme spirale, contrairement au côté haut droit, et on note aussi que le courant électrique diminue à chaque fois qu'il se déplace vers le conducteur intérieur jusqu'à ce qu'il disparaisse, et il y a une section dans cette cellule que le courant n'atteint pas.

Le flux de courant prend des directions opposées dans la cellule de la structure en raison de la nature géométrique de cette structure.

### III.4.5 Circuit équivalent de la cellule RAF de forme spirale modifiée :

La fréquence de résonance peut être décrite par la relation suivante :

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_0}}$$

Où

$L$  : Inductance cumulative ;

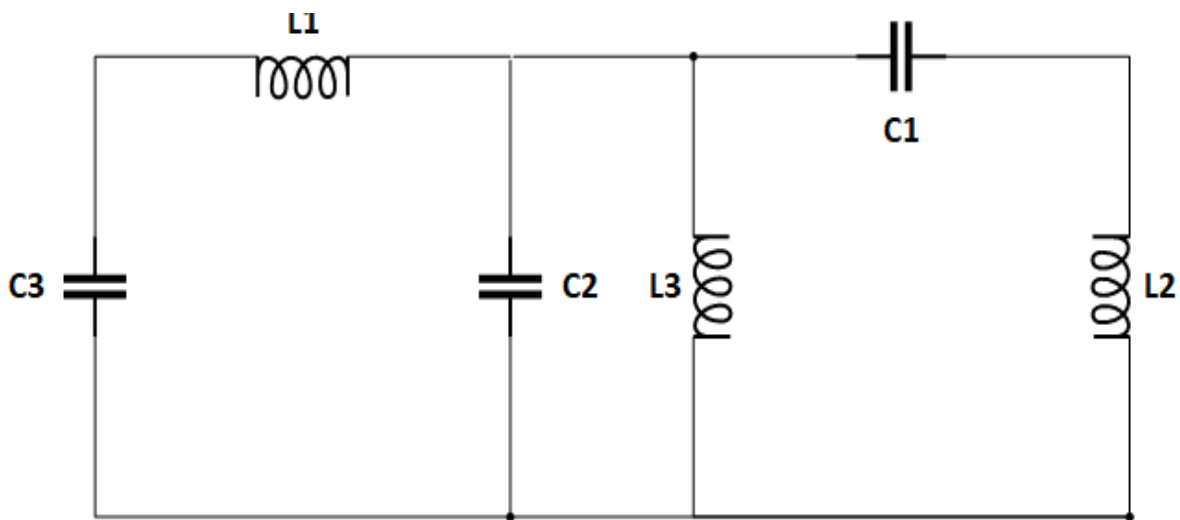
$C$  : Capacité cumulative ;

$C_0$  : Capacité requise qui se forme entre deux cellules unitaires adjacentes.

Un circuit équivalent peut être défini comme un modèle qui permet de simplifier grandement l'analyse du circuit d'origine.

Nous pouvons créer tout type de circuit équivalent avec toutes sortes de composants grâce au logiciel ADS et d'extraire le schéma de principe de leurs paramètres.

L'ADS nous permettra de concevoir un circuit équivalent pour notre cellule comme il est illustré par la figure III.8 :

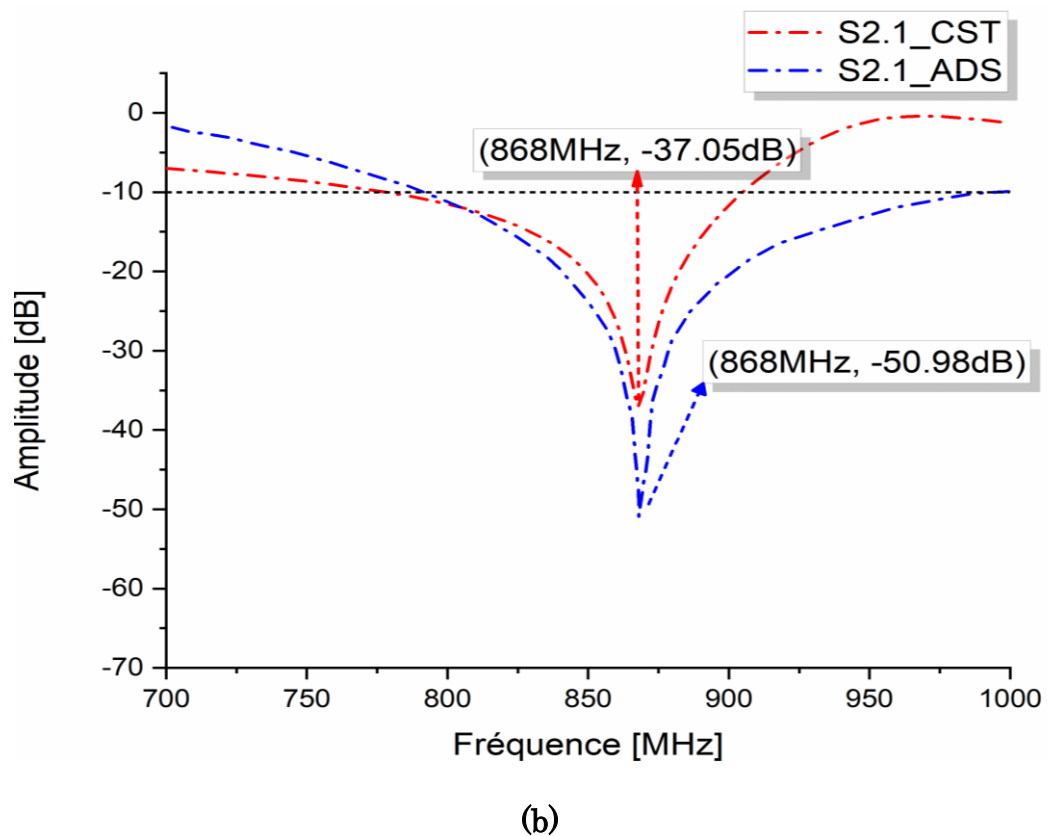
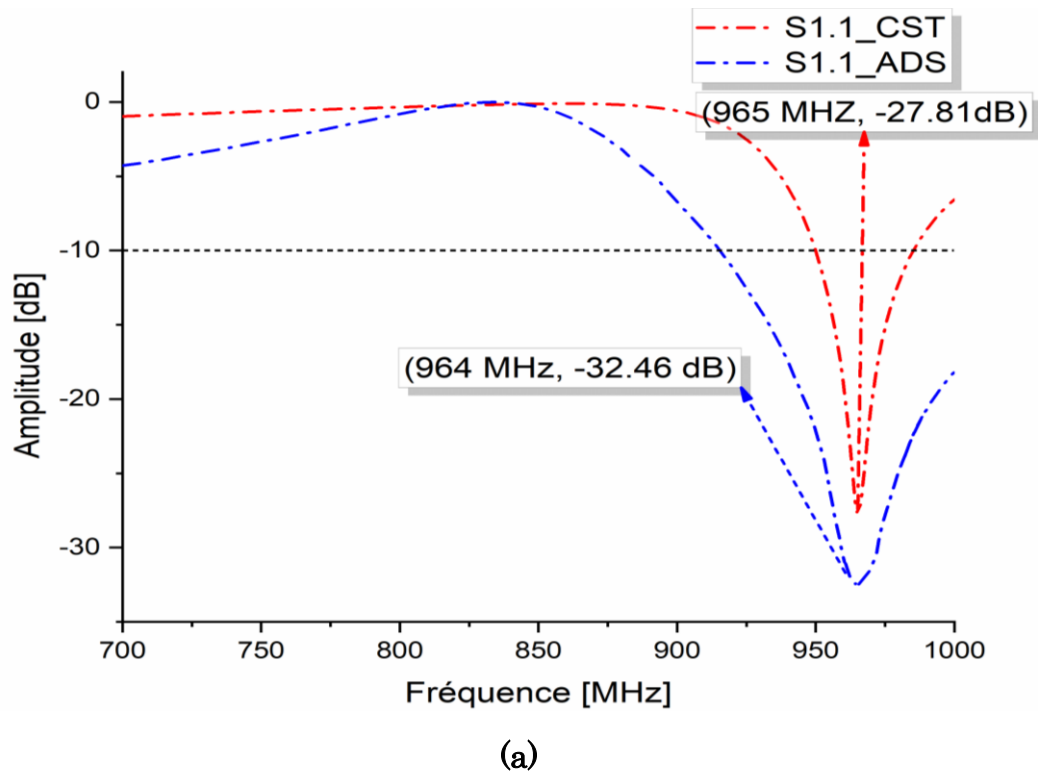


**Figure III.8 :** Circuit équivalent de la structure spirale modifiée.

Les conducteurs métalliques créent l'inductance et les ouvertures (splits) créent la capacité. Lorsque les ondes électromagnétiques sont appliquées à la structure de cellule métamatériau, deux types de couplage se résultent.

Les résonances électriques sont engendrées en raison de la formation d'un couplage entre les espaces et le champ électrique. Les résonances magnétiques sont générées par les conducteurs et le champ magnétique.

La figure III.9 représente une comparaison entre les résultats des deux logiciels de simulations (CST et ADS) :



**Figure III.9 :** (a) Comparaison du coefficient de réflexion S11 entre CST et ADS(b), Comparaison du coefficient de transmission S21 entre CST et ADS.

La figure III.9 présente une comparaison entre les résultats de simulation par logiciel CST et celles obtenues à l'aide de l'ADS.

Nous avons remarqué un excellent accord entre les deux outils de simulation (CST, ADS), dans la bande de fréquence [700-1000 MHz].

Nous observons, un pic de  $-37.05$  dB à 868 MHz, résultat donné par le CST. Un décalage d'amplitude est mentionné par ADS, où nous avons enregistré un pic de  $-50.98$  dB à 868 MHz.

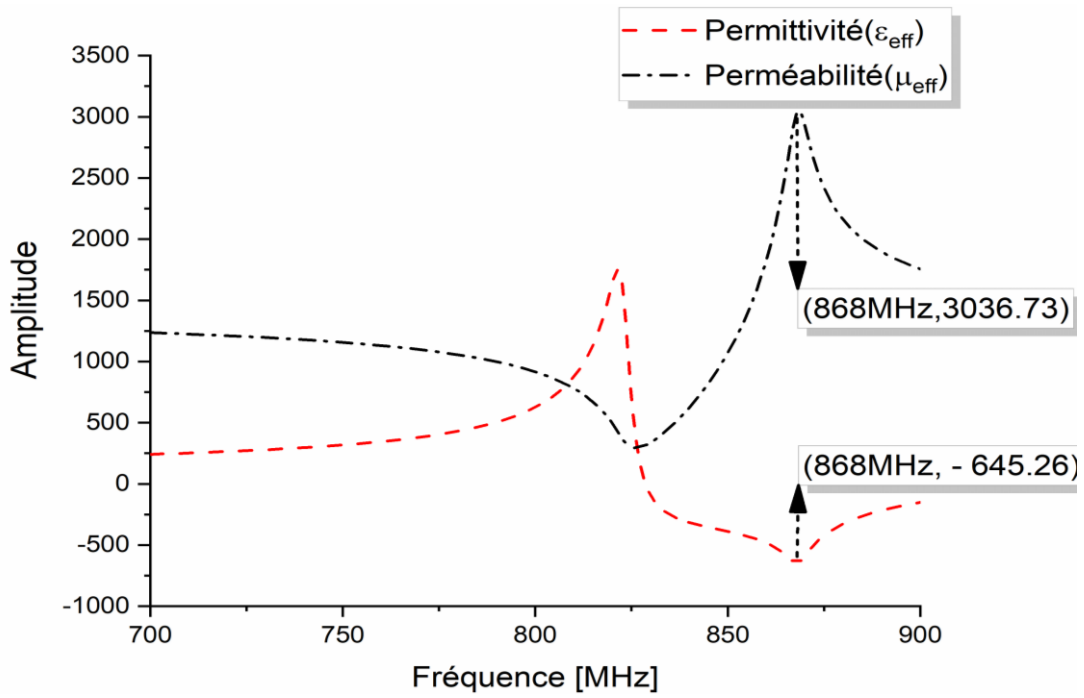
#### **III.4.6 Paramètres effectifs de la cellule RAF de forme spirale modifiée :**

Les paramètres effectifs sont extraits avec deux méthodes, la méthode de Smith et la méthode de Nicolson-Ross-Weir, Les paramètres effectifs de la cellule métamatériaux sont calculés à partir des paramètres S ( $S_{1.1}$ ,  $S_{2.1}$ ).

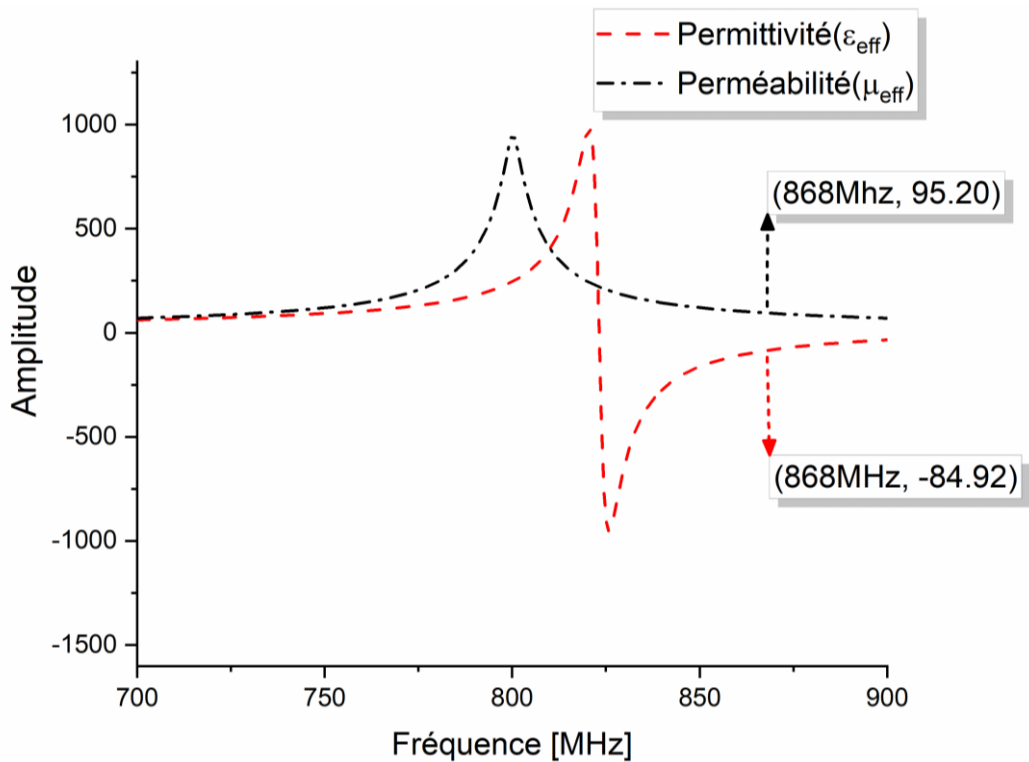
Pour la méthode de Smith, on a utilisé l'outil de simulation CST, par contre, l'extraction des paramètres effectifs ( $\epsilon_{eff}$ ,  $\mu_{eff}$ ) avec la méthode de Nicolson Ross Weir a été faite par l'élaboration d'un programme MATLAB.

La permittivité et la perméabilité effective du milieu avec les deux méthodes mentionnées ci-dessus sont présentées par la figure III.10 (a-b), dans la bande de fréquences [700-900 MHz].





(a)



(b)

Figure III.10 : Paramètres effectifs, (a) La méthode de Smith, (b) La méthode NRW.

D'après les résultats schématisés dans la figure III.70 (a), on voit que la permittivité est négative dans la bande [827 MHz – 900 MHz] par contre, la perméabilité est positive sur cette bande de fréquence.

La deuxième méthode (NRW) représentée dans la figure III.10 (b), nous observons aussi que la permittivité est négative [824 MHz – 900 MHz], mais par rapport à la perméabilité, elle est positive sur toute la bande.

On conclut de cette comparaison qu'il y'a un très bon accord entre les deux méthodes d'extraction, les résultats indiquent que cette cellule est d'un caractère métamatériaux (ENG).

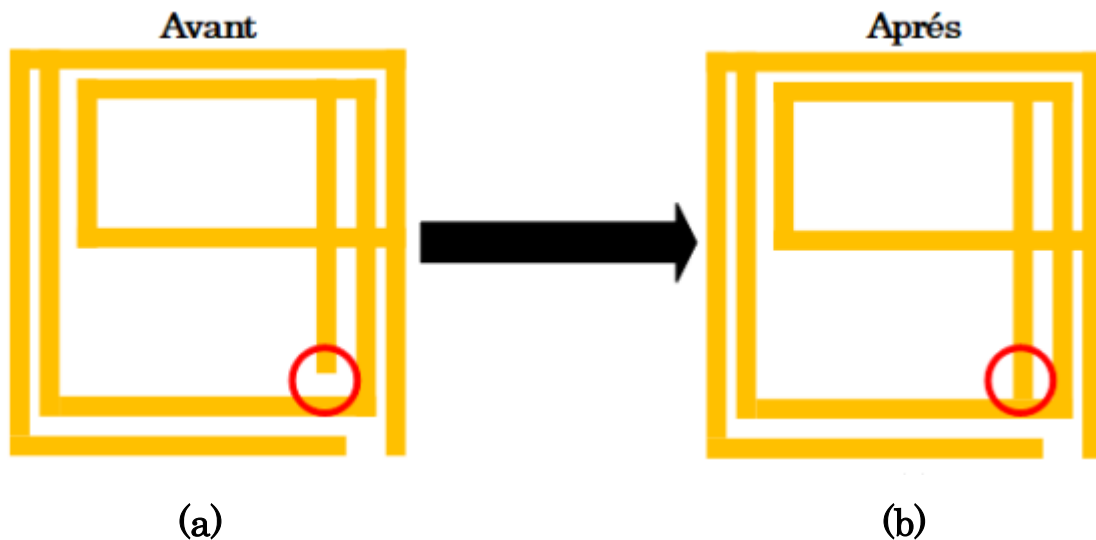
#### **III.4.7 Reconfigurabilité de la cellule RAF de forme spirale modifiée :**

Pour parvenir à une reconfiguration de la fréquence, on peut jouer sur la géométrie du RAF avec des modifications mineures afin de l'activer ou de le désactiver.

En effet, la permittivité négative obtenue est due à la disposition spécifique de deux résonateurs à anneau fondue encastrés l'un dans l'autre, comme la montre la figure III.5.

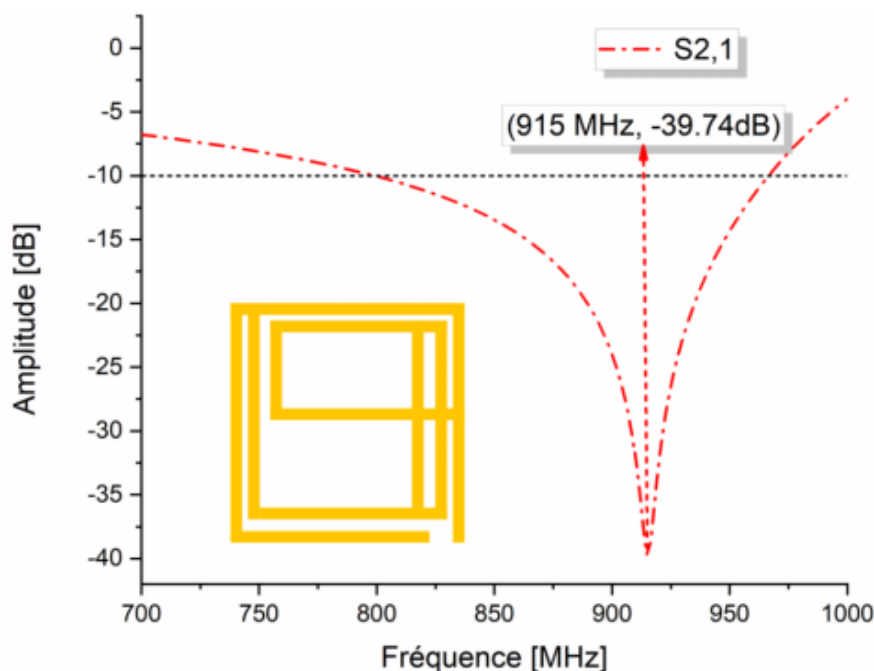
Cette cellule est reconfigurable pour deux autres fréquences : 915 MHz et la bande WLAN 2.4 GHz avec une seule modification sur la cellule originale.

La figure III.11 présente notre cellule avec les modifications appliquées pour obtenir une résonance à la fréquence 915 MHz et à la fréquence 2.4 GHz.



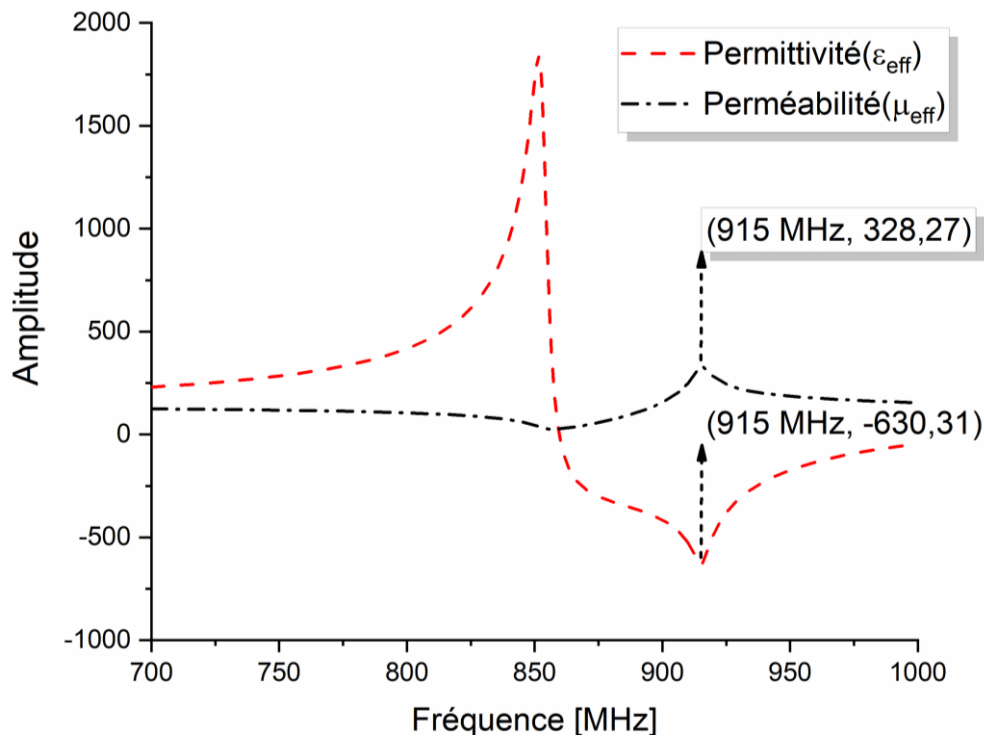
**Figure III.11** : Les modifications appliquées sur la cellule de forme spirale modifiée, (a) la fréquence 868 MHz, (b) la fréquence 915 MHz et 2.4 GHz.

Comme on voit sur la figure précédente, En fermant le gap (G1), ce qui peut être fait au moyen d'un interrupteur, cette modification fait un décalage de la fréquence de 868 MHz à 915 MHz. Cette nouvelle structure conserve tout le comportement métamatériau, la permittivité est négative à la fréquence de résonance  $F_r = 915$  MHz, par contre, La perméabilité est positive ce qui signifie que cette reconfiguration est d'un caractère métamatériau (ENG). La figure III.12 présente le coefficient de transmission pour la cellule modifiée :



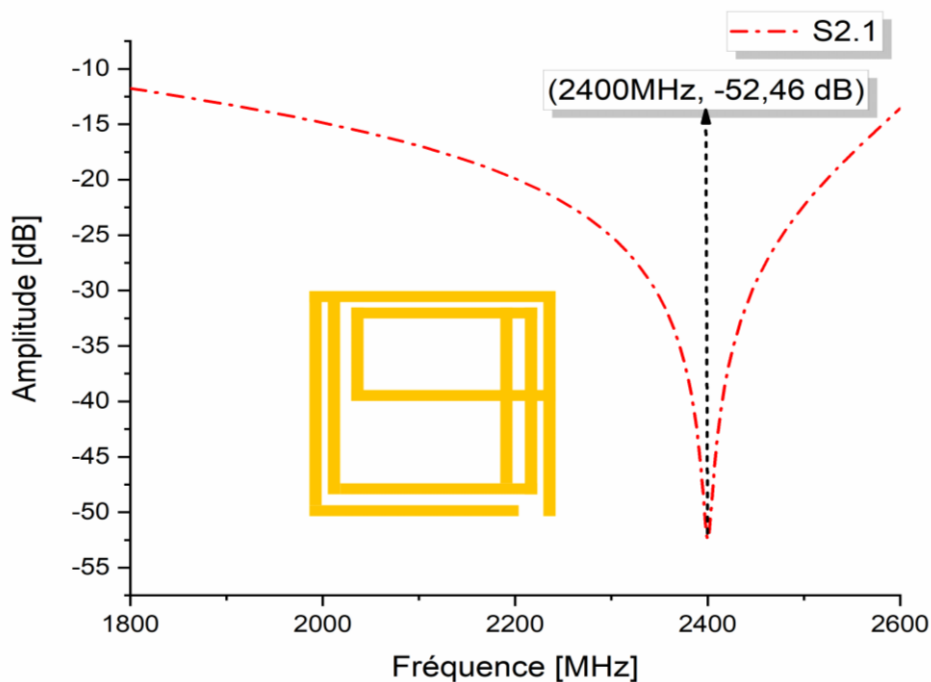
**Figure III.12** : Le coefficient de transmission S2.1.

La figure III.13 montre les paramètres effectifs extraire avec la méthode de Smith :



**Figure III.13 :** Paramètres effectifs de la cellule reconfigurable 915 MHz.

Maintenant on modifie la bande de fréquence de simulation à [1800 MHz – 2600 MHz] pour voir la deuxième reconfiguration de cette cellule. La figure III.14 présente la courbe du coefficient de transmission S2.1.

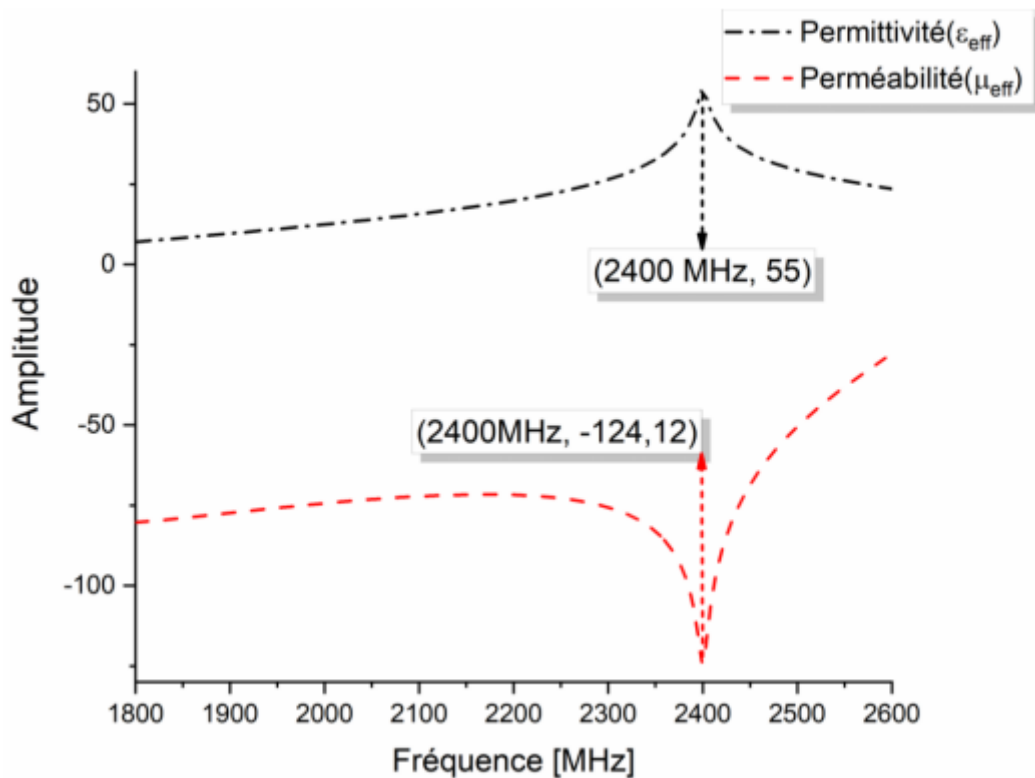


**Figure III.14 :** Coefficient de transmission pour la deuxième reconfiguration.

Nous remarquons qu'il y a des améliorations au niveau de la bande passante et au niveau de l'amplitude du coefficient de transmission  $S_{2.7}$  par rapport aux autres configurations de notre cellule de forme spirale modifiée.

Cette cellule unitaire présente à nouveau un caractéristique métamatériau différent de celle des simulations précédentes.

Les résultats des paramètres effectifs de cette configuration seront présentés dans la figure III.15.



**Figure III.15 :** paramètres effectifs de la cellule reconfigurable 2.4 GHz.

Nous remarquons que la permittivité de cette reconfiguration est supérieure à zéro par contre sa perméabilité est inférieure à zéro, donc on peut dire que ce résultat présente un caractère métamatériau (MNG).

Pour mieux illustrer les résultats obtenus, le tableau III.2 résume les performances obtenues par la cellule RAF de forme spirale modifiée :

**Tableau III.2 :** Tableau récapitulatif des résultats obtenu :

Configuration	Fréquence de résonance [MHz]	Bande de Fréquence [MHz]	Coefficient de transmission [dB]	Type de métamatériaux
1 - ère	868	[778 – 905]	-37.05	ENG
2 -ème	915	[799 – 966]	-39.74	ENG
3 -ème	2400	[1660 – 2700]	-52.46	MNG

### III.5 Conceptions d'une antenne à base de la cellule spirale modifiée :

Les antennes des étiquettes RFID sont des antennes non standard. Les étiquettes sont constituées d'une puce, d'un élément rayonnant et d'un circuit d'adaptation d'impédance. Dans les sections suivantes, nous allons présenter la description de la puce RFID, le circuit d'adaptation et, enfin, la géométrie finale de notre antenne.

#### III.5.1 La puce utilisée sur cette antenne :

Dans ce travail, nous avons utilisé la puce RFID "**Alien Higgs-3**" qui est caractérisée par une impédance d'entrée de **8-j142 Ohms** à la fréquence de 868 MHz.

Cette fréquence est attribuée en Afrique du Nord et en Europe pour la bande UHF RFID. La puce RFID proposée est conforme à la norme EPC Class one de deuxième génération et présente les caractéristiques suivantes une puissance d'activation minimale d'environ -20 dbm.

### III.5.2 Circuit d'adaptation :

Après avoir conçu la cellule métamatériau, nous avons commencé à concevoir un circuit d'adaptation entre la cellule qui sert d'élément rayonnant et la puce Alien Higgs-3.

Nous rappelons que pour maximiser le transfert de puissance entre l'antenne et la puce, il est nécessaire que l'impédance d'entrée de l'antenne  $Z_a$  soit égale au conjugué de l'impédance de la puce RFID  $Z_p$ . Cependant,  $Z_p = 8 - j142$  Ohms est une impédance très capacitive, l'antenne doit donc être inductive. Le circuit d'adaptation que nous allons proposer et s'appelle le "T-Match", comme la montre la figure III.16. La géométrie finale de l'antenne étiquette conçue est présentée par figure Figure III.17.

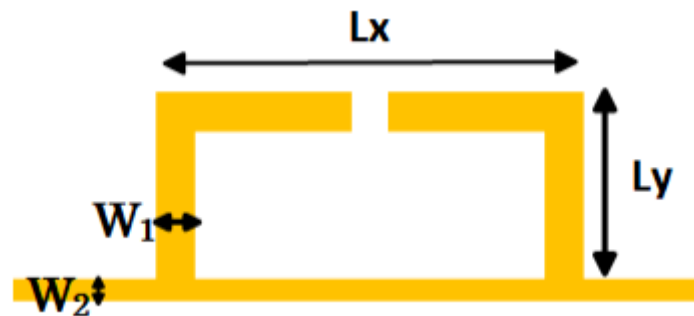


Figure III.16 : la géométrie finale de circuit d'adaptation T-Match.

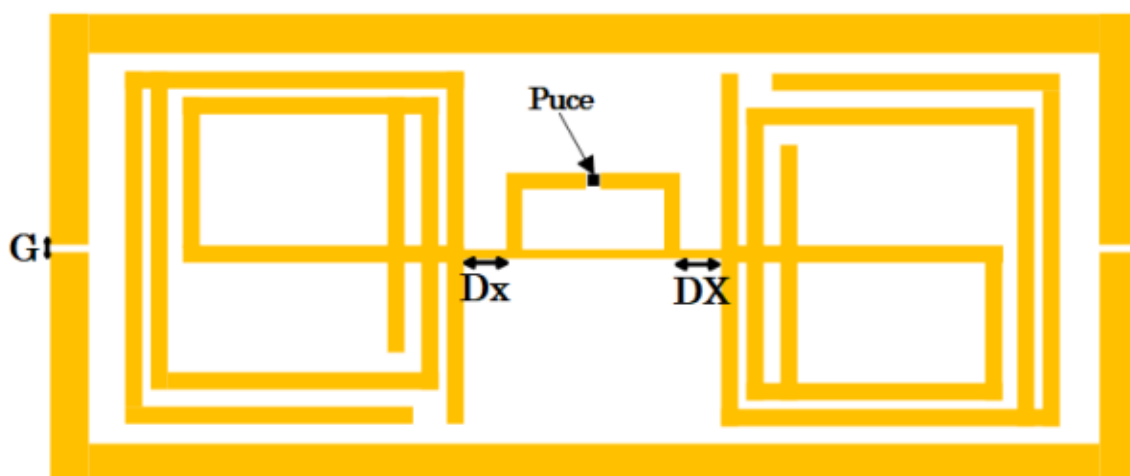
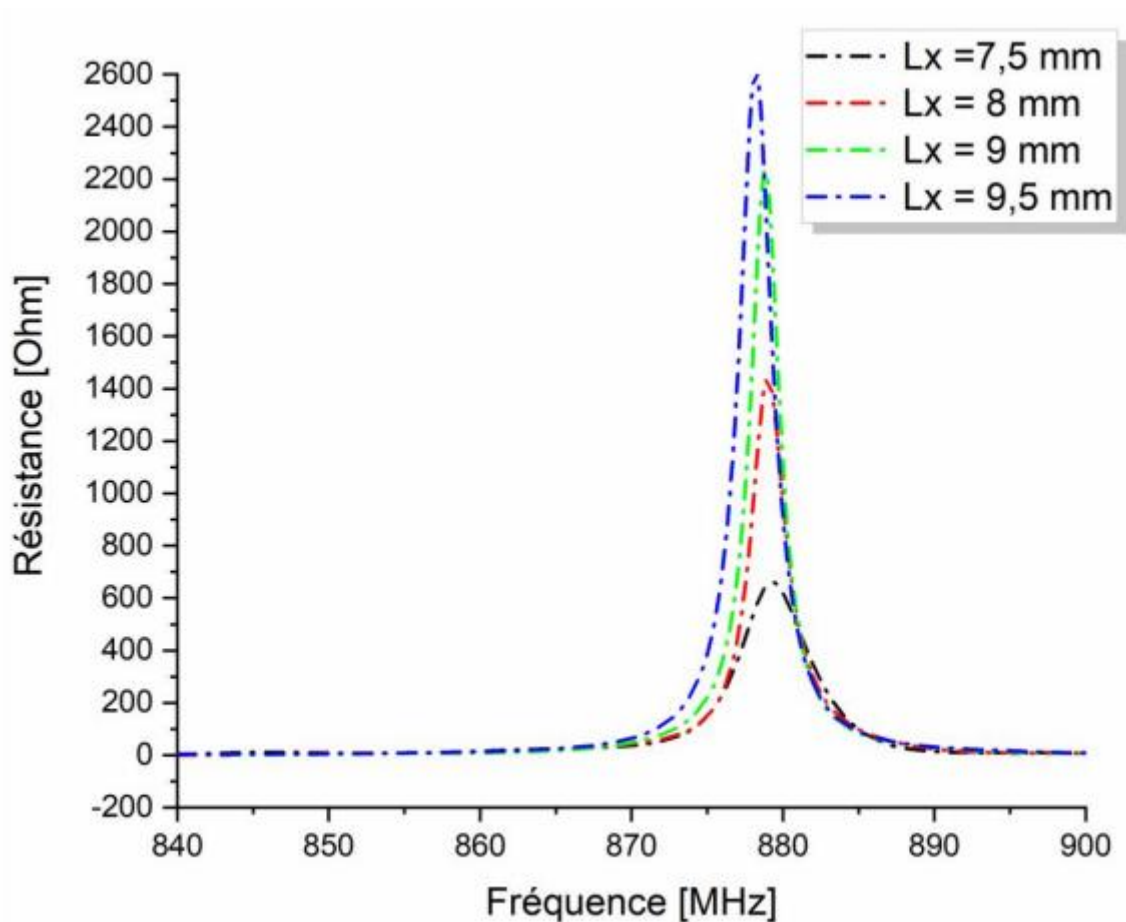


Figure III.17 : La structure finale d'antenne.

Les dimensions de cette antenne est de 60 x 28 x 1.635 mm<sup>3</sup>, formé par deux cellules connectées par un circuit d'adaptation (T-Match) et encadrer avec un plan de masse fendu sur les deux cotés (droite et gauche).

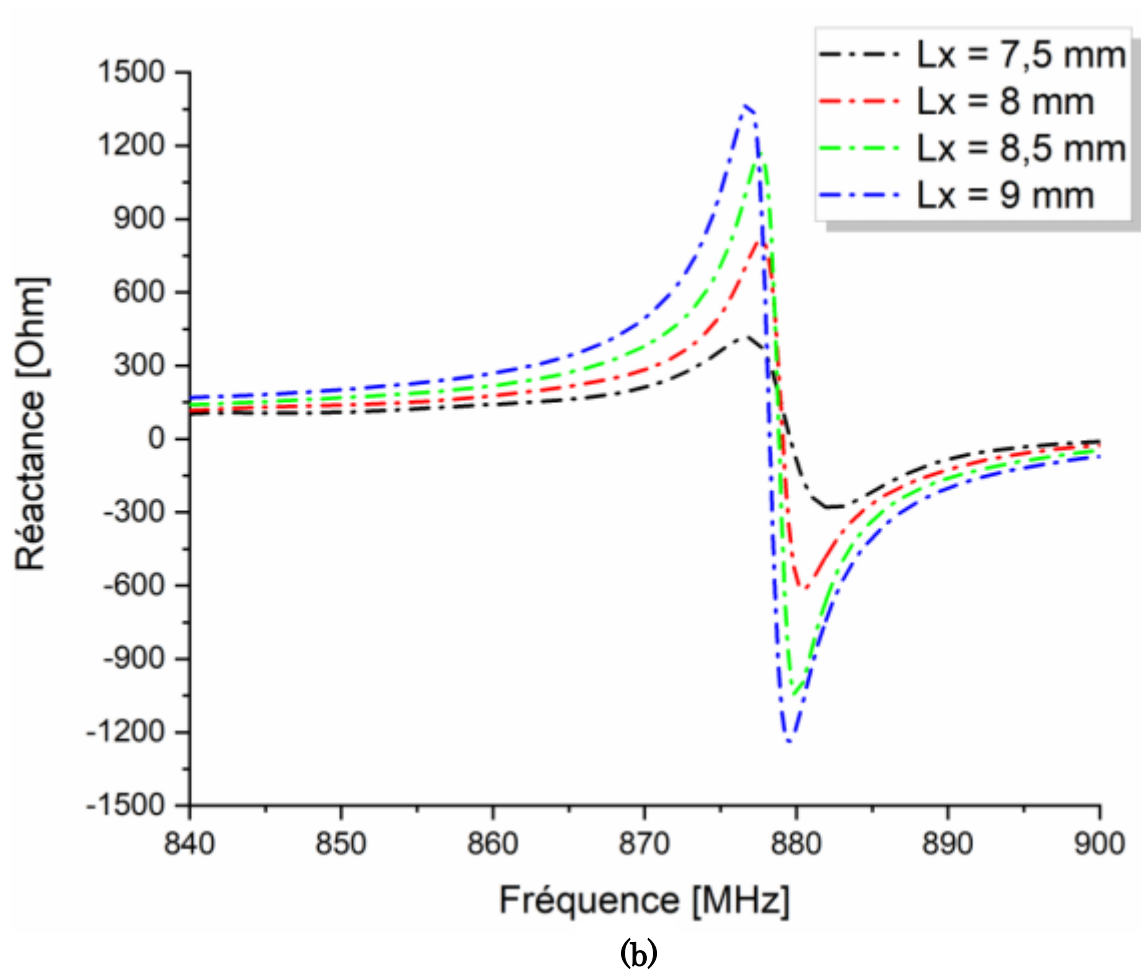
Les paramètres optimaux sont obtenus à l'aide d'une étude paramétrique sur ses paramètres en modifiant seulement un paramètre tout en gardant tous les autres paramètres constants.

Pour illustrer cette étude, nous allons présenter, dans cette partie, deux paramètres **L<sub>x</sub>** et **W<sub>2</sub>** pour voir leurs effets sur l'impédance d'entrée de l'antenne ces effets sont représentés par la figure III.18 (a) et (b).



(a)



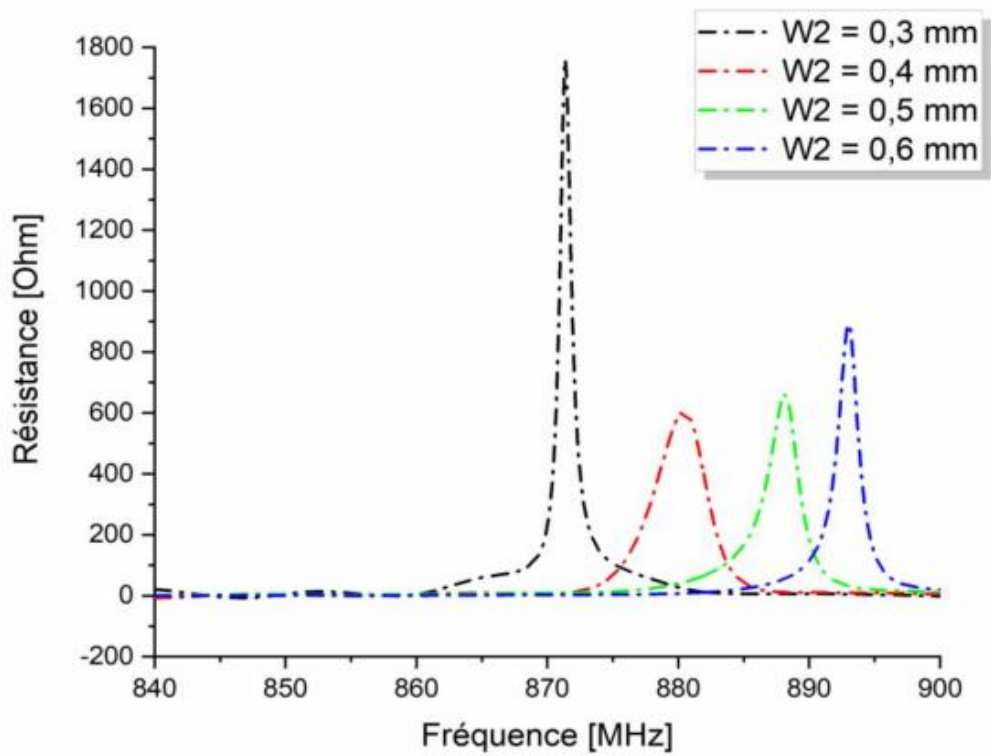


**Figure III.18 :** Effet du paramètre  $L_x$  sur l'impédance d'entrée de l'antenne, (a) partie réelle, (b) partie imaginaire.

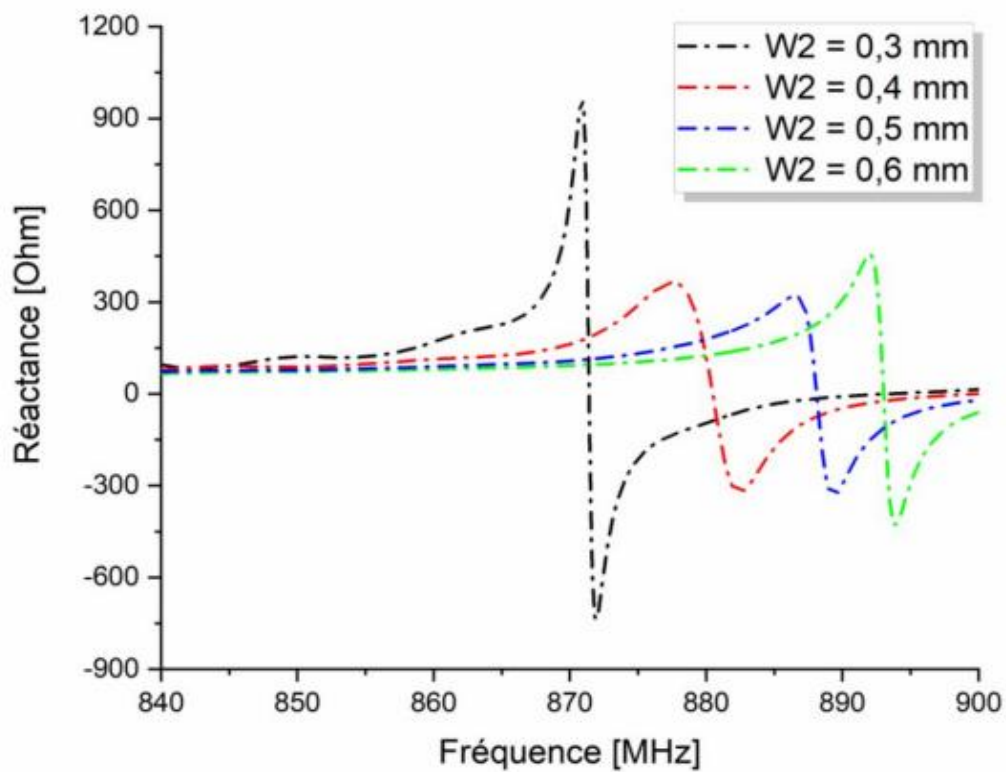
On constate que le paramètre  $L_x$  a un effet important sur l'impédance d'entrée de l'antenne. La résistance et la réactance augmentent avec l'augmentation du paramètre  $L_x$ .

D'autre part, l'impédance varie différemment avec la variation du paramètre  $W_2$  de telle sorte que la partie réelle et la partie imaginaire de  $Z_a$  se déplace à droite avec l'augmentation de " $W_2$ ".

La figure III.19 montre la variation de l'impédance d'entrée en fonction de paramètre  $W_2$ .



(a)



(b)

Figure III.19 : Effet du paramètre  $W2$  sur l'impédance d'entrée de l'antenne, (a) partie réelle, (b) partie imaginaire.

Cela signifie que nous pouvons contrôler l'impédance de l'antenne en contrôlant les paramètres du circuit d'adaptation. Le tableau 3 et le tableau 4 présentent les dimensions finales du T-match et celles de l'antenne :

**Tableau III.3** : les dimensions du circuit d'adaptation (T – Match) :

Paramètre	Dimension [mm]
Lx	7
Ly	4.75
W1	1
W2	0.4

**Tableau III.4** : Paramètres de l'antenne :

Paramètre	Dimension [mm]
W	7
L	4.75
G	1
Dx	0.4

Après optimisation de l'antenne à l'aide de l'étude paramétrique sur logiciel CST, nous avons noté les résultats de la simulation en termes d'impédance d'entrée qui sont reportés dans la figure III.20.

On constate que, l'impédance de l'antenne est  $Z_a = 7.89 + j141.82$  Ohms, cette valeur est très proche de l'impédance conjuguée de la puce.

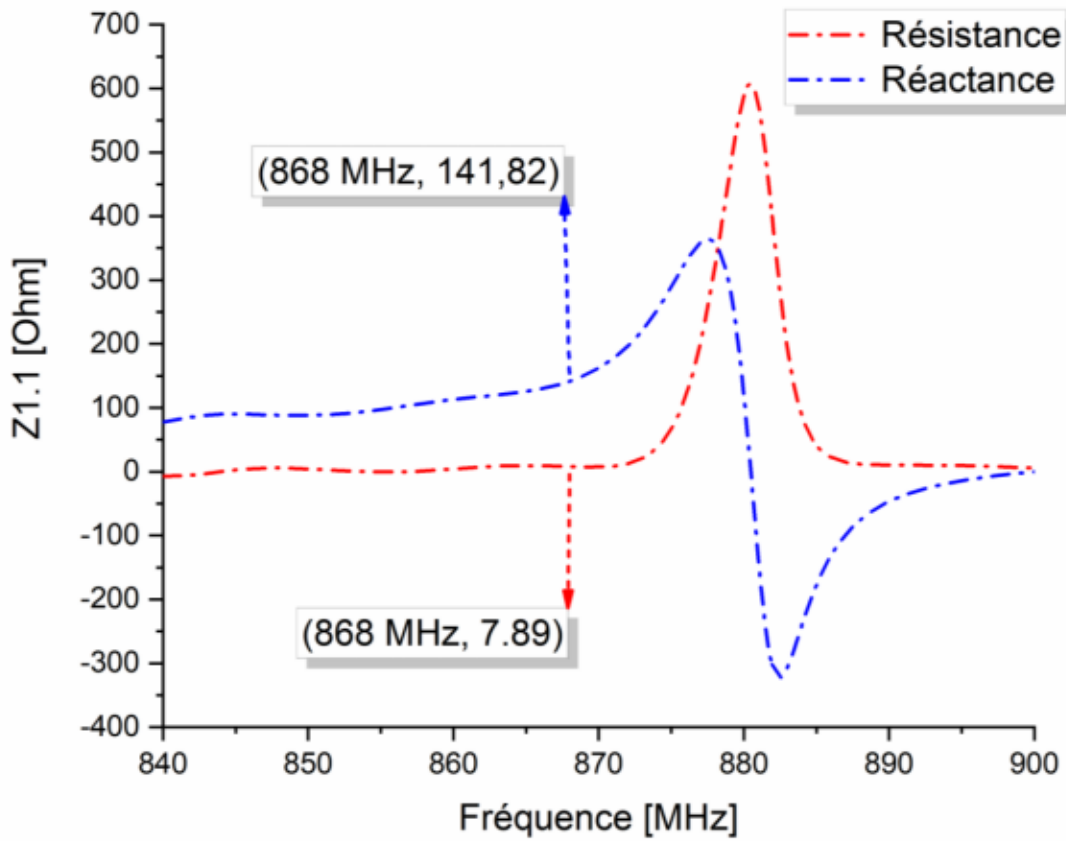


Figure III.20 : Impédance d'entrée de l'antenne conçue.

### III.6 Conclusion :

Dans ce chapitre, de nouvelle conception de cellule métamatériaux et la formation d'antenne sont présentées. Une analyse détaillée pour chaque configuration est abordée. Les paramètres S sont calculés au moyen du logiciel CST, en outre les paramètres effectifs ( $\epsilon_{eff}$ ,  $\mu_{eff}$ ) sont calculés au moyen de la méthode de NRW, dans la bande de fréquences [700-900 MHz]. Les résultats révèlent les caractéristiques des métamatériaux, la structure a montré les caractères : ENG, MNG, pour la cellule de forme spirale modifié. En revanche, la cellule a montré aussi le caractère de reconfigurabilité pour deux autres fréquences (915 MHz et 2.4 GHz) avec la conservation du caractère métamatériau. Après avoir conçu la cellule métamatériau, nous avons commencé à concevoir un circuit d'adaptation entre la cellule qui sert d'élément rayonnant et la puce, cette configuration est optimisée dans le but d'adapter l'impédance de l'antenne avec celle de la puce. Après une étude paramétrique, nous avons atteint notre objectif.

## Références bibliographiques

[1] "Metamaterials and Plasmonics: Fundamentals, Modelling, Applications" by Stefan A. Maier.

[ 2 ]. Shah Nawaz BUROKUR ,(MISE EN ŒUVRE DE MÉTAMATÉRIAUX EN VUE D'APPLICATION AUX CIRCUITS MICROONDES ET AUX ANTENNES) ,Thèse de Doctorat ,Spécialité Électronique , UNIVERSITE DE NANTES ÉCOLE DOCTORALE SCIENCES ET TECHNOLOGIES ,DE L'INFORMATION ET DES MATERIAUX



*Conclusion générale*



## **Conclusion générale :**

La science et la technologie ont des performances électriques sans cesse améliorées, une sélectivité plus grande, un encombrement et un cout réduit, mais restent toujours sur une soif insatiable de matériaux meilleurs et plus performants qui peuvent pousser les limites possibles. Ces métamatériaux sont des matériaux artificiels, possédant des propriétés électromagnétiques ne pouvant être obtenus par des matériaux qu'on trouve dans la nature. A partir de 2002, les métamatériaux sont utilisés pour la réalisation des dispositifs des télécommunications. L'objectif principal de ce travail était de proposer une structure métamatériaux originale pour satisfaire aux moins deux types de caractères : ENG, MNG, et/ou DNG dans la bande de fréquence [700-1000 MHz] dédiée aux applications RFID. Pour analyser et étudier la structure, on a eu recours au logiciel de simulation CST Microwave studio et ADS et l'environnement de programmation MATLAB pour calculer et extraire les paramètres effectifs des cellules proposées.

Dans le premier chapitre, nous avons présentés une vue générale sur les systèmes RFID en commençant par un bref historique et la définition sur les systèmes RFID et comment fonctionnent, ensuite la présentation des composants de étiquettes RFID et leurs différents types, les fréquences d'utilisation de RFID, leurs domaines d'application. Enfin, les avantages et les inconvénients de la technologie RFID.

Le deuxième chapitre, dresse un état de l'art sur les métamatériaux qui présentent des propriétés intrinsèques exceptionnelles (permittivité  $\epsilon_{eff}$  et la perméabilité effective  $\mu_{eff}$ ). Durant la première partie de ce chapitre et en se basant sur la théorie de Veselago, nous avons défini au départ les notions de base qui régissent les matériaux dits à main gauche (LHM). Une classification des métamatériaux a été ensuite présentée en fonction du signe des paramètres effectifs des cellules métamatériaux (ENG, MNG et DNG). Les fameuses



méthodes d'extraction des paramètres effectifs des métamatériaux (Smith, NRW) à travers des coefficients de réflexion et de transmission ( $S_{11}$  et  $S_{21}$ ) sont présentées. Les méthodes présentées se basent sur un ensemble d'équation bien définies. Nous avons terminé le chapitre par l'application dans le domaine micro-onde (les filtres et les antennes) et donner des exemples pour voir l'intérêt d'utiliser les métamatériaux dans le domaine des antennes et des filtres. Selon l'objectif de conception, différents types de cellules unitaires et différentes méthodes d'intégration des métamatériaux sont utilisés. Cette intégration a contribué au développement des performances de dispositifs microondes. Nous avons noté une augmentation de gain de l'antenne patch due à l'utilisation d'une nouvelle cellule métamatériaux DNG et l'application des métamatériaux en tant que superstrat, et un élargissement de la bande passante en utilisant une cellule métamatériaux de type RAFC. Dans la conception des antennes, on peut avoir une antenne multi bande, et une antenne a dimensions compacte grâce à l'utilisation des métamatériaux. Et aussi la conception d'un simple filtre coupe bande à base d'une cellule RAF, et la conception d'un filtre multi bande à base des cellules RAFC.

Dans le troisième chapitre, la cellule métamatériaux de type RAF de profil original et d'une taille miniature avec des performances meilleurs est proposée. La cellule est de forme spirale modifiée. L'analyse du coefficient de transmission  $S_{21}$  de la structure, montre qu'elle présente le phénomène coupe bande autour de fréquence 868 MHz. La cellule proposée est reconfigurable pour deux autres fréquences (915 MHz et 2.4 GHz). Les résultats de simulation du circuit équivalent avec ADS montrent un bon accord avec ceux obtenus avec CST. L'analyse des paramètres effectifs (permittivité  $\epsilon_{eff}$  et la perméabilité effective  $\mu_{eff}$ ) attribués par la méthode NRW et la méthode de smith montrent que la cellule proposée RAF de forme spirale modifiée a montré le caractère main gauche ENG pour la fréquence 868 MHz et 915 MHz et MNG pour la fréquence 2.4 GHz. Après, nous avons présenté une antenne miniature pour l'étiquette RFID basée sur cette cellule métamatériaux, l'antenne proposée a été conçue et

optimisée par le logiciel CST MWS, finalement on a fait une adaptation entre l'antenne et la puce RFID avec d'impédance 8-j142 (Ohm).

En perspectives, les résultats obtenus lors de ce mémoire de fin d'étude peuvent être exploitées selon de multiples axes de recherches. La cellule métamatériaux proposée est valable pour l'application RFID en raison de la taille compacte, de la gamme de fréquences de travail et de la rentabilité. Elle peut également constituer un choix prometteur pour la double négativité (DNG).