

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université 8Mai 1945 – Guelma
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département d'Electronique et Télécommunications



Mémoire de Fin d'Etude
Pour l'Obtention du Diplôme de Master Académique

Domaine : **Sciences et Techniques**
Filière : **Télécommunications**
Spécialité : **Systèmes de Télécommunications**

Développement d'un biocapteur à base d'un
résonateur méta-matériau

Présenté par :

Ammar REBAI
Amina FADLA

Sous la direction de :
Dr. Larbi BENKHAOUA

Juillet 2019

Remerciements

En premier lieu, je remercie Allah soubhanouhou wataala qui nous a donné la volonté, pour terminer ce travail dans les meilleures conditions.

Nous tenons à remercier très sincèrement avec notre profonde gratitude le Docteur BENKHAOUA Larbi. Qui nous a encadré tout au long de ce travail, et pour sa disponibilité et sa grande compréhension.

Nous remercions les membres du jury qui nous 'ont fait l'honneur d'examiner notre travail.

Nous tenons à remercier tous les enseignants de notre département TLC & ELN qui ont contribué à notre formation.

Un grand Merci à tous nos amis et nos collègues de TLC Guelma

Merci à toute personne ayant contribué de près ou de loin à la concrétisation de ce projet.

Merci à tous

Résumé

Au cours des dernières années, les nouveaux matériaux appelés (méta-matériaux) ont des caractéristiques qui permettent à développer de nouveaux composants micro-ondes pour des nouvelles applications.

Dans ce mémoire, nous nous sommes concentrés sur la simulation et la réalisation d'un biocapteur micro-ondes à l'aide des résonateurs méta-matériaux. La simulation a été réalisée à l'aide de HFSS et les résultats de la simulation ont été discutés et comparés avec les résultats expérimentaux.

Mots-clés : biocapteur, résonateur, Méta-matériaux, perméabilité négative, SRR, miniaturisation.

ملخص

في السنوات الأخيرة ، تحتوي المواد الجديدة المسماة (méta-materials) على ميزات تتيح تطوير مكونات ميكروويف جديدة للتطبيقات الجديدة. في هذه الأطروحة ، ركزنا على محاكاة وإدراك جهاز استشعار الميكروويف باستخدام مرنانات المواد الفوقية. تم إجراء المحاكاة باستخدام HFSS وتمت مناقشة نتائج المحاكاة ومقارنتها بالنتائج التجريبية.

الكلمات المفتاحية: جهاز استشعار حيوي ، مرنان ، méta-materials ، نفاذية سلبية ، SRR ،

ABSTRACT

In recent years, new materials called (meta-materials) have features that allow to develop new microwave components for new applications.

In this thesis, we focused on the simulation and realization of a microwave biosensor using meta-materials resonators. The simulation was performed using HFSS and the results of the simulation were discussed and compared with the experimental results.

Keywords: biosensor, resonator, Meta-materials, negative permeability, SRR, miniaturization.

Sommaire

Liste des figures

Liste des abréviations

Glossaire des symboles

INTRODUCTION GENERALE1

CHAPITRE I : Biocapteur micro-ondes

I.1. Généralité.....	4
I.1.1.Historique.....	4
I.1.2. Définition d'un biocapteur.....	4
I.1.3.Caractéristiques d'un biocapteur	5
I.2. Techniques hyperfréquences pour la caractérisation de liquides.....	5
I.2.1.Techniques de mesure en réflexion.....	6
I.2.1.a Câble coaxial.....	6
I.2.1.b Guide d'onde volumique.....	6
I.2.2 Techniques de mesure en transmission.....	7
I.2.2.a Câble coaxial.....	7
I.2.2.b Guide d'onde volumique.....	8
I.2.2.c. Guide d'onde miniature.....	9
I.3. Dispositifs résonants.....	10
I.3.a. Cavité résonantes	10
I.3.b. Résonateurs miniatures.....	11
I.4.Capteurs à base de méta matériaux.....	12
I.5.Conclusion.....	13

CHAPITRE II: Théorie des Résonateur méta-matériaux

Introduction.....	15
II.1. Historique.....	15
II.2. Définition des méta-matériaux.....	16
II.3. milieu avec perméabilité négative.....	20
II. 4. Les Paramètres S	24
II.5. Type des résonateurs à activité magnétique.....	26
II.5.1. SRR carré	27

II.5.2. SRR circulaire	28
II.5.3. broadside coupled SRR « BC-SRR »	30
II.5.4. BC-SRR circulaire.....	30
II.5.5. C-SRR	32
II.6. Les méta-matériaux et leurs applications de filtrage.....	33
II.7. La technologie micro ruban.....	35
II.8. Conclusion	36

Chapitre III : Capteurs à base d'un résonateur méta-matériau (Simulation et réalisation)

Introduction.....	38
III.2. Présentation de logiciel HFSS (High Frequency Structure Simulator).....	38
III.3.structures résonante a base d'une ligne micro-ruban et un résonateur méta-matériau.....	39
III.4. Résultats de simulation.....	40
III.4.1. Conception et réalisation des cellules méta-matériaux SRR.....	40
III.4.2.La cellule SRR carrée.....	40
III.4.3.La cellule SRR carrée en deux anneaux.....	42
III.4.4.La cellule SRR spirale.....	45
III.5. REALISATION.....	46
III.6.1. Analyseur de réseau vectoriel (VNA).....	46
III.7.Fabrication et mesure.....	47
III.8. test expérimental.....	48
III.8.1. Liquides de test.....	50
III.9. Conclusion	51
CONCLUSION GENERALE	53
REFERENCE.....	55

Résumés

Liste Des Figures

Chapitre I : Biocapteur micro-ondes

Figure I.1 : Schéma du principe de fonctionnement d'un biocapteur.....	4
Figure I.2 : Représentation lignes de champ électrique se propageant dans un câble coaxial.	6
Figure I.3 : Présentation du montage expérimental pour la caractérisation de liquides par un guide d'onde rectangulaire -utilisé en réflexion.....	7
Figure I.4: Illustration du câble coaxial mesuré en transmission pour la caractérisation de liquides.....	7
Figure I.5: Illustration du dispositif expérimental mis au point par Toropaine et al. [9] pour la caractérisation diélectrique hyperfréquence de liquides par sonde coaxial en transmissio..	8
Figure I. 6 : Illustration du dispositif expérimental mis au point par Esteban et al. [10] pour la caractérisation diélectrique hyperfréquence de liquides à l'aide d'un guide d'onde rectangulaire mesuré en transmission.....	9
Figure I.7 : (a) guide d'onde coplanaire miniature. (b) Lignes de champ électrique et magnétique se propageant dans la ligne coplanaire.....	9
Figure I.8: Exemple de ligne coplanaire et de canaux micro fluidiques développés par l'équipe MH2F pour l'analyse hyperfréquence de liquides biologiques [10].....	10
Figure I.9: cavité résonante dans laquelle se propage un mode TM ₀₁₀	11
Figure I.10 : Résonateur de type « split ring » excité par couplage magnétique via une ligne micro ruban pour l'analyse hyperfréquences de liquide [11].....	12
Figure I.11: (a) Biocapteur de micro-onde, model biotine-streptavidin.....	13

Chapitre II: Théorie des résonateurs méta-matériaux

Figure II.1 : propagation d'une onde à travers un milieu selon le signe de ces paramètres constitutifs (permittivité et perméabilité).....	17
Figure II.2 : (a) Trièdre direct (matériaux main droite) et (b) trièdre indirect (matériaux main gauche).....	19
Figure II.3 : Loi de snell-descartes lors du passage d'une onde d'un milieu man droite (a)vers un milieu main droite (angle positif), (b) vers un milieu main gauche (angle négatif).....	19
Figure II.4. (a) Le rouleau suisse (Swiss-Roll) de Pendry. (b) la variation de la perméabilité effective réelle et imaginaire en fonction de la fréquence.....	20
Figure II.5: la structure rouleau de suisse introduite par pendry. (a) vue de face et (b) vue de profile.....	21
Figure II.6 : SRR typique circulaire et carré.....	22
Figure II.7. Résonateur en Anneau Fendu « RAF » (Split Ring Résonateur « SRR ») introduit	

Par Pendry.....	22
Figure II.8. Représentation de la perméabilité effective en fonction de la fréquence selon L'équation (2.12).....	23
Figure II.9. (a) Premier Prototype méta-matériau proposé par l'équipe de D.R.Smith (b) prototype amélioré.....	24
Figure II.10: Signaux aux bornes d'une composante micro-onde.....	24
Figure II .11: Graphe de fluence d'un quadripôle.....	25
Figure II.12: Le circuit équivalent de SRR.....	27
Figure II.13. Représentation et dimensions d'une unité de cellule du SRR carré.....	27
Figure II.14. Coefficients de réflexion et transmission en dB: (a) \vec{E} selon l'axe y. (b) \vec{E} selon l'axe z.....	28
Figure II.15. Représentation et dimensions d'une unité de cellule du SRR circulaire.....	28
Figure II.116. Coefficients de réflexion et transmission en dB: (a) \vec{E} selon l'axe y. (b) \vec{E} selon l'axe z.....	29
Figure II.17 : Représentation et dimensions d'une unité de cellule du BC- SRR.....	30
Figure II.18 : Représentation d'une unité de cellule de BC-SRR circulaire.....	31
Figure II.19 : BC-SRR circulaire avec \vec{E} selon z : (a) Réflexion et transmission en dB (b) Parties réelle et imaginaire de la perméabilité effective.....	31
Figure II.20. Représentation et dimensions d'une unité de cellule d'un raf en double c.....	32
Figure II.21 : SRR en double C avec \vec{E} selon z : (a) Réflexion et transmission en dB. (b) Parties réelle et imaginaire de la perméabilité effective.....	33
Figure II.22 : SRRs associés à une ligne micro-ruban de 50Ω [27].....	33
Figure II.23 Résultats de simulation pour les SRRs associés à une ligne micro-ruban de 50Ω	34
Figure II.24 : SRRs associés aux résonateurs micro-rubans [27].....	34
Figure II.25 : Structure de filtres à ligne couplée (a) filtre à ligne couplée associée à des cellules SRR(b) Filtre à ligne couplée chargée par des cellules CSRRs [28].....	35
Figure II.26. configuration d'une ligne en technologie micro ruban.....	35
Figure II.27 : configuration des champs électrique (E) et magnétique (H) pour une ligne de transmission en technologie micro	36

Chapitre III : Capteurs à base d'un résonateur méta-matériau (Simulation et réalisation)

Figure III.1: Fenêtre de HFSS.....	39
---	----

Lise des figures

Figure III.2 : (a) split ring résonateur (SRR) et (b) SRR-loaded ligne micro-ruban.....	39
Figure III.3 : SRR couplé à un micro-ruban. (a) Schéma du SRR et du micro ruban (b) circuit équivalent.....	41
Figure III.4 : capteur proposé à base du SRR carré	41
Figure III.5: résultat de simulation S21 du capteur à base du SRR carré.....	42
Figure III.6 : Représentation et dimensions d'une unité de cellule du SRR carré.....	43
Figure III.7: configuration du filtre coupe bande basé sur l'association de la ligne micro ruban 50Ω à une cellule Méta matériau SRR.....	43
Figure III .8 : Géométrie de cellule du SRR carrée deux anneaux.....	44
Figure III .9 résultat de simulation S21 du SRR carrée à deux anneaux.....	44
Figure III .10 : Géométrie de cellule de la spiral	45
Figure III .11 : résultat de simulation S21 de la structure à base du résonateur spirale.....	46
Figure III.12: Analyseur de réseau vectoriel (photo et schéma de principe).....	47
Figure III.13 : SRR le capteur fabriqué avec deux connecteurs SMA.....	47
Figure III .14: le capteur connecter avec l'analyseur de réseaux vectoriel pour caractériser des liquides.....	48
Figure III.15. Photos de maquette du filtre coupe bande basé sur l'association de la ligne micro ruban 50Ω chargé par un réseau de cellules Méta matériau SRR carré. (a) vue de dessus (b) vue de dessous.....	48
Figure III.16 : S21 mesurée du capteur sans la couche du plastique d'isolation.....	49
Figure III.17 : S21 lors l'huile est placée au-dessus le SRR.....	50
FIGURE III.18 : S21 lors de l'eau est placée au-dessus le SRR.....	51

Liste des abréviations

Liste des abréviations

MTM : Méta matériaux

MNG: Magnétique Négative

ENG : Electrical Négative

LHM : Left Handed material

DPS : Double Positive

DNG : Double Négative

MMG : Matériaux Main Gauche

RAF : Résonateur en Anneau Fendu

SRR : Split Ring Résonateur

FEM: Finite Element Method

SMA: Sub miniature version A

CSRR: Complementary-split-ring-resonator

BC-SRR: Broadside-coupled split ring resonator

Glossaire des symboles

ε : Perméabilité

μ : Permittivité

λ : vecteur d'onde

ω : Pulsation angulaire

ρ : Densité des électrons

S_{11} : Coefficient de réflexion

S_{21} : Coefficient de transmission

\vec{E} : Vecteur champ électrique

\vec{H} : Vecteur champ magnétique

\vec{S} : Vecteur poyntinge

\vec{K} : Vecteur d'onde

n : indice de réfraction

V_g : vitesse de groupe

v_φ : vitesse de phase



Introduction Générale

Introduction Générale

Les instruments classiques d'analyse pour la détection d'une espèce (bio) chimique sont généralement complexes, coûteux, volumineux et souvent difficiles à mettre en œuvre. De plus, les phases de préparation des échantillons, d'incubation, et d'exploitation des résultats augmentent souvent très fortement la durée totale d'analyse. Depuis une trentaine d'années, ils font face à l'avènement des capteurs biochimiques appelés plus couramment biocapteurs [1]. Ceux-ci sont des dispositifs souvent simples et compacts transformant le signal (bio) chimique en un signal électrique facilement exploitable. Ils sont pour la plupart issus des techniques de la microélectronique. Ils sont en général seulement constitués d'une partie bio sélective (couche sensible), et d'un système transducteur transformant en signal électrique les modifications physicochimiques induites par la reconnaissance dans la couche sensible. Ils disposent aussi d'un environnement d'exploitation qui permet notamment le traitement électrique des signaux.

Les performances des circuits et des dispositifs hyperfréquences sont directement liés aux propriétés intrinsèques des matériaux de fabrication. De plus, les contraintes de coût et d'intégration exigent des propriétés intrinsèques plus attractives que celles des matériaux usuels. L'arrivée d'une nouvelle catégorie de matériaux innovants, appelés «méta-matériaux » a incité la communauté des scientifiques à étudier la possibilité d'affranchir les limites technologiques en exploitant les propriétés non naturelles de ces matériaux.

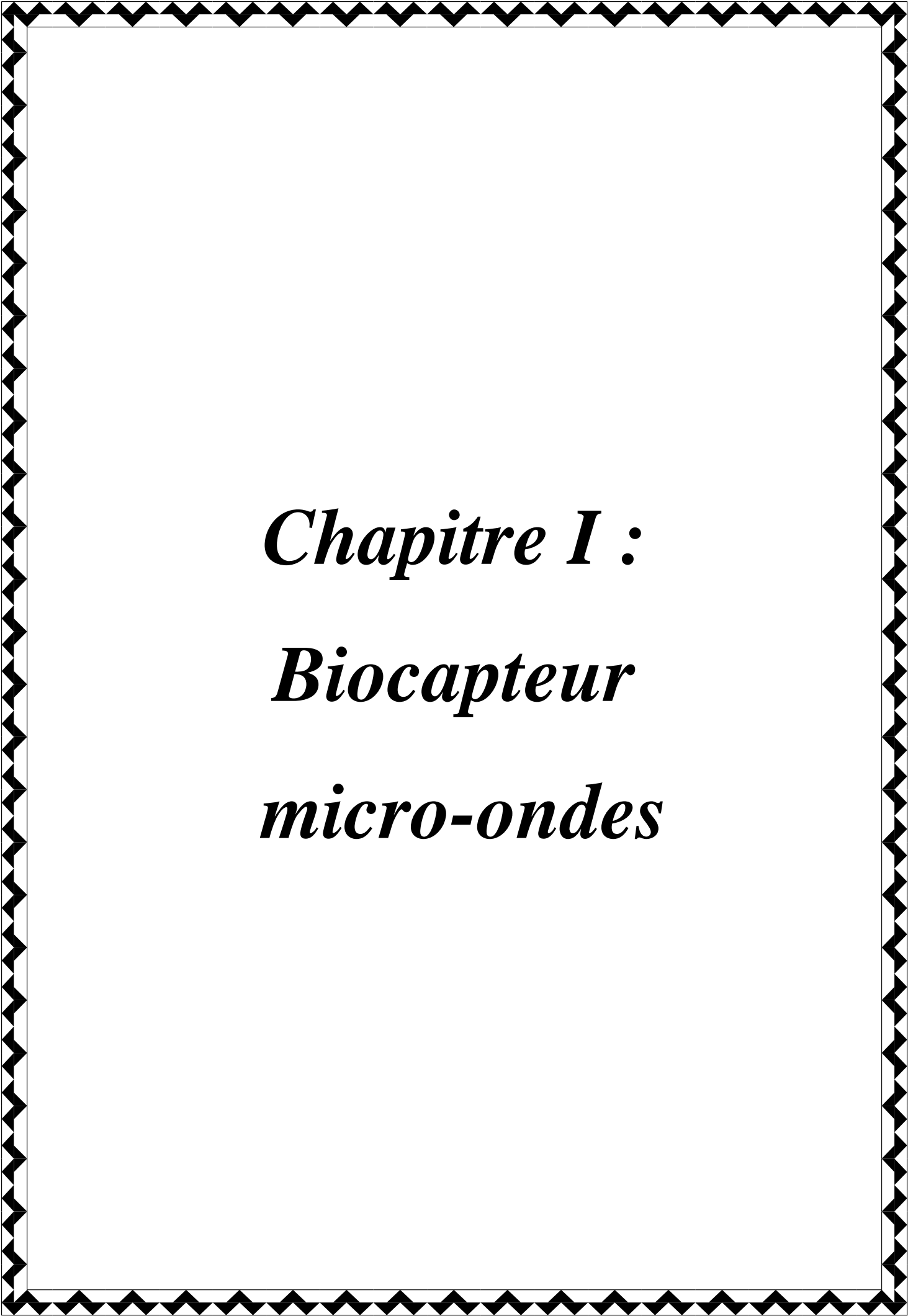
L'objectif de ce mémoire est de comprendre et de mettre en évidence les propriétés intéressantes d'un résonateur méta-matériau (SRR) en vue l'application comme un biocapteur. Il s'agit aussi d'étudier des cellules méta-matériaux (SRR circulaire et carré) de faible encombrement et de performances élevées. Ces travaux sont menés en bande X [1 GHz ; 3 GHz].

Ce manuscrit se compose en trois chapitres :

- Dans le premier chapitre l'état de l'art des biocapteurs micro-ondes micro-fluidiques pour l'analyse de fluides biologiques a été présenté.
- Le deuxième chapitre est consacré à l'étude des méta-matériaux. Nous présentons, en premier lieu, la définition ainsi qu'un bref historique des méta-matériaux. Ensuite l'étude des résonateurs méta-matériaux
- Le troisième chapitre est dédié tout d'abord à la simulation des structures à base d'une ligne micro-ruban et des résonateurs méta-matériaux telles que : le SRR carrée et SRR carrée en deux anneaux, le SRR spiral. Ensuite, nous nous intéresserons à la conception d'un capteur à base des lignes micro ruban et des résonateurs SRR. Toutes

Introduction Générale

ces structures sont simulées à l'aide de HFSS. Ces simulations permettent d'extraire le paramètre de transmission S_{21} . Ensuite, nous utilisons l'analyseur de réseaux vectoriels pour vérifier la faisabilité d'utiliser les structures proposer comme des capteurs fluidiques.



Chapitre I :
Biocapteur
micro-ondes

I.1. Généralités

I.1.1. Historique

En 1950, le premier biocapteur a été créé par L'éland Clark pour mesurer la concentration de l'oxygène dissous dans le sang. En 1962, ce biocapteur est adapté à la mesure de la concentration de glucose dans le sang [1]. Dans les années qui ont suivi, de nombreuses études ont été réalisées afin de mieux comprendre le fonctionnement de ce premier biocapteur à glucose ou dans le but d'appliquer son principe au développement d'autres biocapteurs enzymatiques. On peut ainsi citer par exemple le biocapteur potentiométrique proposé par Guilbault et Montalvo en 1969 pour la détection de l'urée [2]. Mais ce n'est qu'en 1975 que le premier biocapteur à glucose basé sur la détection ampérométrique du peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) fut commercialisé par la société Yellow Springs Instrument (Ohio, Amérique). [3]

I.1.2. Définition d'un biocapteur

Un biocapteur est un outil ou système analytique conçu pour transformer une réponse biologique en un signal électrique [4]. Ce dispositif est basé sur l'accouplement spatial direct d'un composé biologiquement actif immobilisé, appelé "biorécepteur" ou "élément de reconnaissance biologique", avec un transducteur qui agit en tant que détecteur et un amplificateur électronique [5] [3].

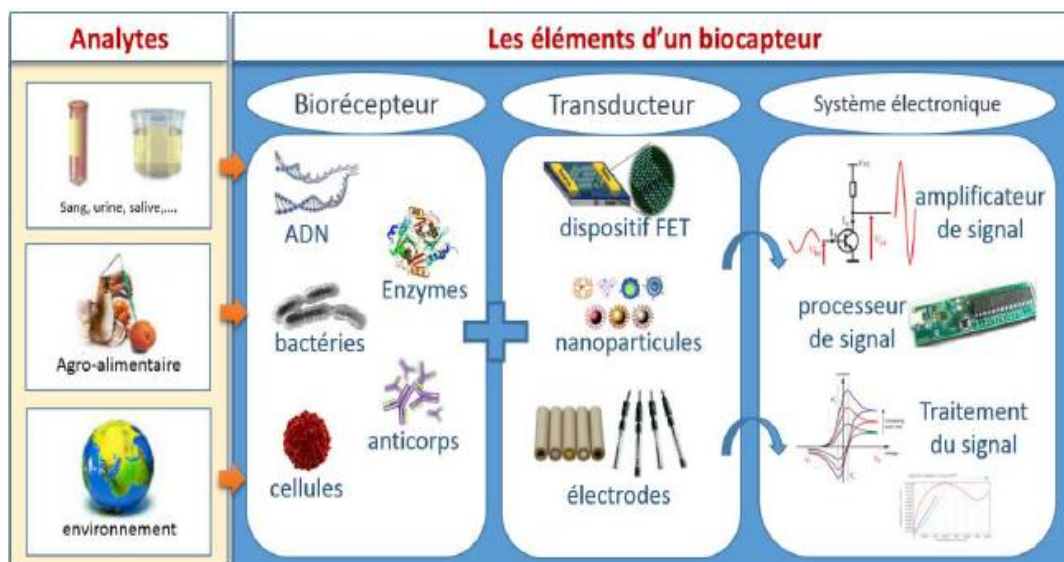


Figure I.1 : Schéma du principe de fonctionnement d'un biocapteur.

I.1.3. Caractéristiques d'un biocapteur :

Les principales caractéristiques d'un capteur sont définies de la manière suivante :

Sensibilité : elle est le rapport entre la variation de la réponse du capteur et la variation de la concentration en glucose en solution aqueuse auquel il est soumis. Un capteur très sensible sera apte à détecter les plus faibles variations. Cette caractéristique dépend essentiellement du matériau sensible et de son affinité avec la molécule cible [6].

Temps de réponse : la rapidité est caractérisée par le temps que met le capteur à réagir à une variation brusque du mesurande. Cependant la valeur finale étant le plus souvent atteinte de manière asymptotique, elle correspond au temps nécessaire pour que le capteur délivre une certaine portion α de la pleine amplitude du signal.

La connaissance du temps de réponse d'un capteur est un élément essentiel lors de la réalisation de mesures [3].

Sélectivité : un capteur est dit sélectif, si la variation du signal de sortie est due uniquement à la seule grandeur (physique, chimique, biologique...) qu'on veut mesurer [3]. Elle représente par conséquent la capacité du capteur à détecter une molécule cible indépendamment des autres molécules en présence [6].

Stabilité : elle définit la propension du capteur à conserver une réponse constante au cours du temps [6].

I.2. Techniques hyperfréquences pour la caractérisation de liquides :

Les techniques de mesures des propriétés diélectriques de matériaux ont été étendues à la caractérisation de liquides, dans un premier temps ces techniques ont été classées en trois catégories [7] :

- les techniques réflectométriques.
- les techniques en transmission.
- les techniques résonantes.

I.2.1. Techniques de mesure en réflexion

I.2.1.a Câble coaxial

Les sondes coaxiales sont très largement utilisées pour l'analyse non-invasive de liquides.

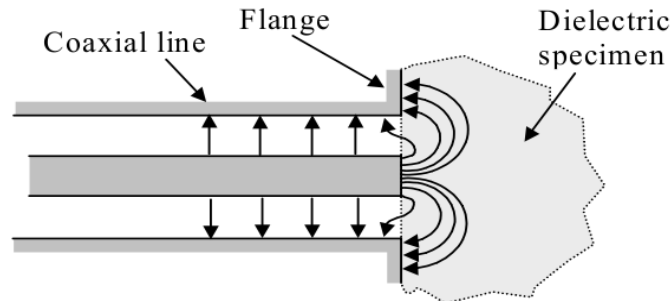


Figure I.2 : Représentation des lignes de champ électrique se propageant dans un câble coaxial.

Des effets de bord à l'extrémité du câble (lignes de champ électrique pénétrant dans le matériau placé en bout de câble).

Le principe de fonctionnement de ces sondes coaxiales est le suivant: quand une onde TEM se propage dans le câble. Elle est réfléchi à l'extrémité du coaxial (laissée en circuit ouvert) ou les lignes de champ électrique pénètrent dans le matériau placé à l'extrémité du câble. Le coefficient de réflexion Γ dépend donc de la permittivité complexe ϵ^* du dit matériau [7].

Cependant, malgré les avantages d'une telle technique de caractérisation (rapidité de mise-en-œuvre ; existence de solutions clés-en-main), les sondes coaxiales souffrent d'un niveau d'incertitude sur la mesure de la permittivité complexe [7].

I.2.1.b Guide d'onde volumique

Un autre choix consiste en l'utilisation de guide d'onde volumique (guide rectangulaire, par exemple).

La Figure I.3. (a) montre une représentation du dispositif de mesure avec l'analyseur de réseau vectoriel, le câble coaxial, le guide d'onde rectangulaire et le matériau sous test placé à l'extrémité ouverte du guide d'onde. Le principe de fonctionnement de ces guides d'ondes volumique est le suivant : le liquide placé à l'extrémité du guide d'onde volumique modifie la réactance et la conductance terminales (l'onde réfléchi est lu par l'analyseur placé) [7].

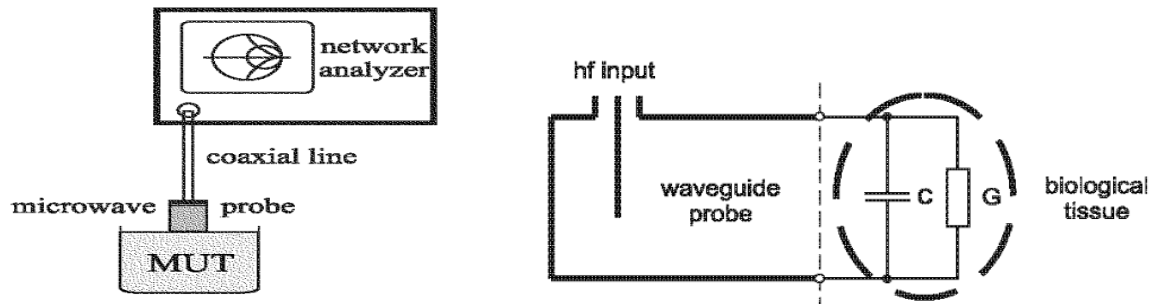


Figure I.3: Présentation du montage expérimental pour la caractérisation de liquides par un guide d'onde rectangulaire -utilisé en réflexion.

Les guides d'onde volumiques sont cependant moins utilisés que les lignes coaxiales car ils sont plus limités en largeur de bande fréquentielle et plus volumineux (ce qui requiert des volumes de fluides sous test plus importants) [7].

I.2.2 Techniques de mesure en transmission

I.2.2.a Câble coaxial

Le principe de mesure ici repose simplement sur la caractérisation en transmission d'un câble coaxial dont le diélectrique a été remplacé par le matériau sous test séparant les conducteurs intérieur et extérieur sur une section de longueur l_d [7].

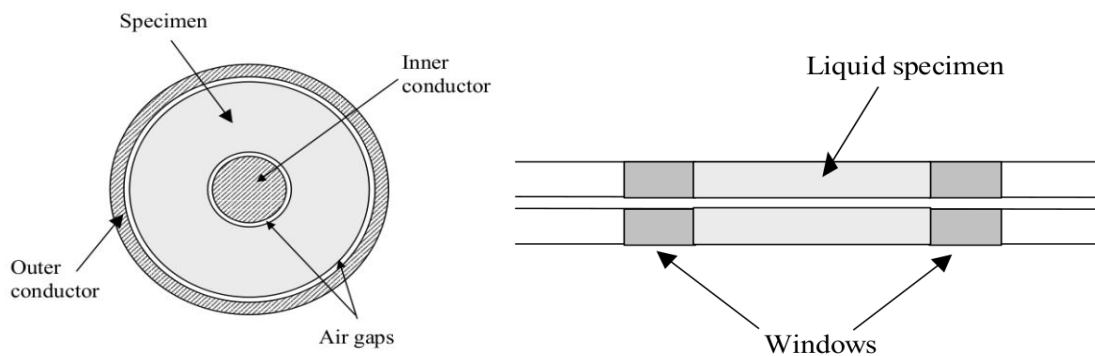


Figure I. 4: Illustration du câble coaxial mesuré en transmission pour la caractérisation de liquides.

Aussi, Toropaine et al. [8] ont développés une technique de caractérisation de liquides aux propriétés diélectriques proches de certains tissus humains. La Figure I.5 montre une représentation du dispositif expérimental avec l'analyseur de réseau vectoriel, la sonde de température et le câble coaxial dont le diélectrique est formé par le liquide sous test [7].

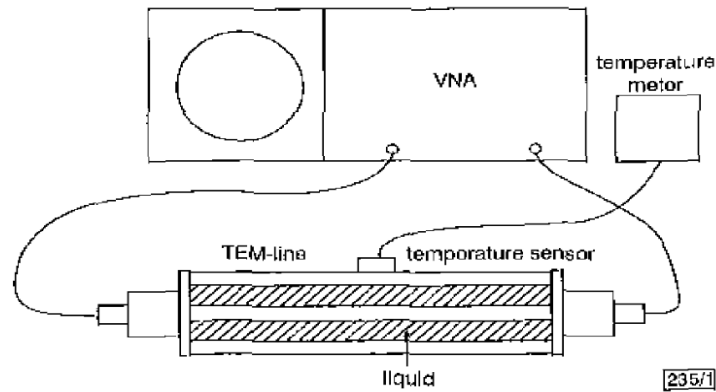


Figure. I.5: Illustration du dispositif expérimental mis au point par Toropaine et al. [8] pour la caractérisation diélectrique hyperfréquence de liquides par sonde coaxiale en transmission.

Les sondes coaxiales en transmission possèdent néanmoins un inconvénient essentiel par rapport aux sondes coaxiales en réflexion : leur mise en œuvre n'est pas aussi aisée puisqu'elles nécessitent la mise en œuvre de câbles coaxiaux pour lesquels l'espace entre conducteurs intérieur et extérieur doit être rempli/vidé du liquide sous test. En outre, tout comme les sondes coaxiales en réflexion, les sondes coaxiales utilisées en transmission ne sont pas intégrables sur puce [7].

I.2.2.b Guide d'onde volumique

H. Esteban et al. [9] ont mis au point un guide d'onde rectangulaire traversé orthogonalement par un tube rempli du liquide sous test. Ils ont atteint un niveau de précision satisfaisant pour la détermination de la permittivité complexe des liquides présents dans le tube grâce à une méthode de caractérisation du dispositif et de traitement numérique des données de mesures. La Figure I.6 présente une vue du guide rectangulaire et du cylindre placé dans le guide. Les guides d'onde volumiques restent des dispositifs encombrants, et donc incompatibles avec des applications de type « laboratoire-sur-puce » [7].

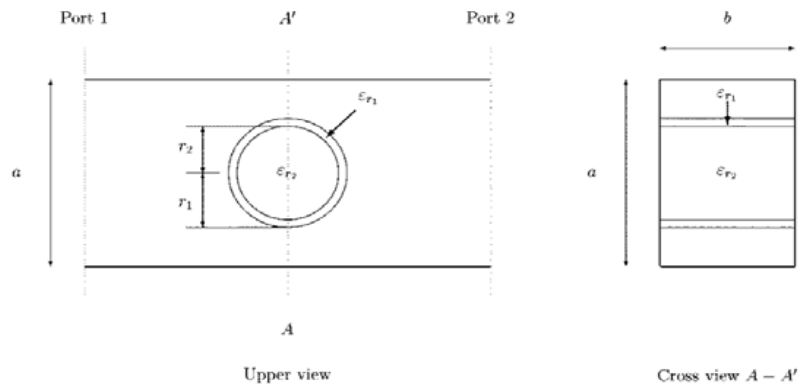


Figure I. 6 : Illustration du dispositif expérimental mis au point par Esteban et al. [9] pour la caractérisation diélectrique hyperfréquence de liquides à l'aide d'un guide d'onde rectangulaire mesuré en transmission.

I.2.2.c. Guide d'onde miniature

Les guides d'onde plans miniatures ont permis de mesurer la permittivité complexe de matériaux qui se présentaient sous forme de « film mince » et destinés à être utilisés comme diélectriques. L'utilisation des guides miniatures pour la caractérisation diélectrique a donc pu s'étendre aux liquides [7].

La Figure I.7. (a) montre une ligne coplanaire en perspective cavalière et en (b) les lignes de champ électrique et magnétique se propageant dans une telle structure. Cette figure montre qu'en plaçant un échantillon fluide sur la face supérieure de la ligne ou dans le volume du diélectrique (la solution la plus simple techniquement étant la première), la propagation du champ électromagnétique sera perturbée par la présence de l'échantillon fluide, aux propriétés diélectriques différentes de celles de l'air ou du substrat [7].

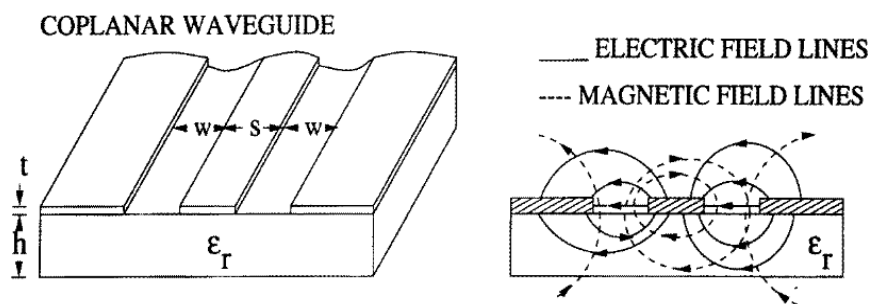


Figure I.7 : (a) guide d'onde coplanaire miniature. (b) Lignes de champ électrique et magnétique se propageant dans la ligne coplanaire.

T. Chen et al. [10] a développé un exemple de guide d'onde miniature pour mener des analyses sur des échantillons fluidiques. Le dispositif, est constitué d'un guide d'onde coplanaire et d'une capacité inter-digitée en série. Un canal micro fluidique en polymère permet de guider le fluide sous test sur la capacité inter-digitée, là où le champ électrique est le plus intense. La Figure I.8 montre un exemple d'un tel dispositif [7].

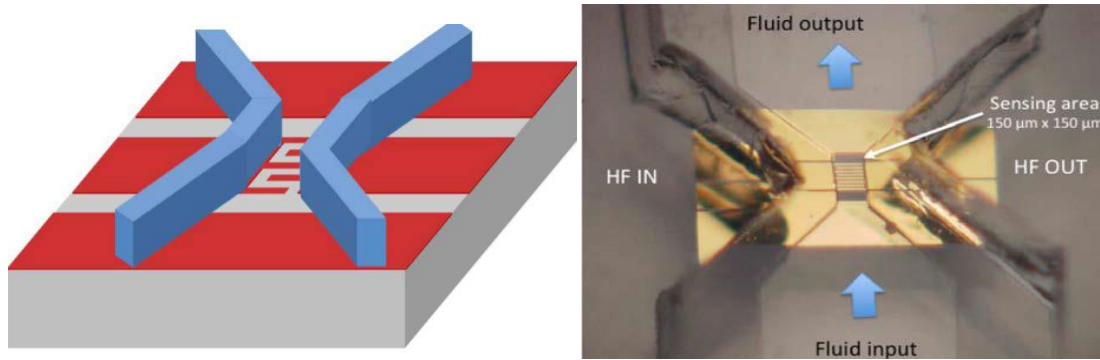


Figure I.8: Exemple de ligne coplanaire et de canaux micro fluidiques développés l'équipe pour l'analyse hyperfréquence de liquides biologiques [10].

I.3 Dispositifs résonants

Les structures hyperfréquences résonantes sont réputées plus sensibles que les dispositifs large bande pour la caractérisation diélectrique de matériaux en général, et pour la caractérisation de liquides en particulier. La contrepartie à la sensibilité tient au fait que les dispositifs résonants ne peuvent déterminer la permittivité complexe du matériau sous test qu'à la fréquence de résonance de la structure (ainsi qu'aux éventuelles fréquences harmoniques) ; contrairement aux guides d'onde qui permettent de caractériser les matériaux dans une bande de fréquence complète [7].

I.3.1. Cavité résonantes

Les cavités résonantes sont constituées de cylindres aux parois métalliques permettant de confiner le champ électromagnétique à l'intérieur du volume de la cavité. Deux accès placés sur le flanc du cylindre permettent d'exciter le champ électromagnétique dans la structure. Différents modes peuvent exister dans une cavité résonante : modes TM_{0n0} (n est un entier), modes TE [7].

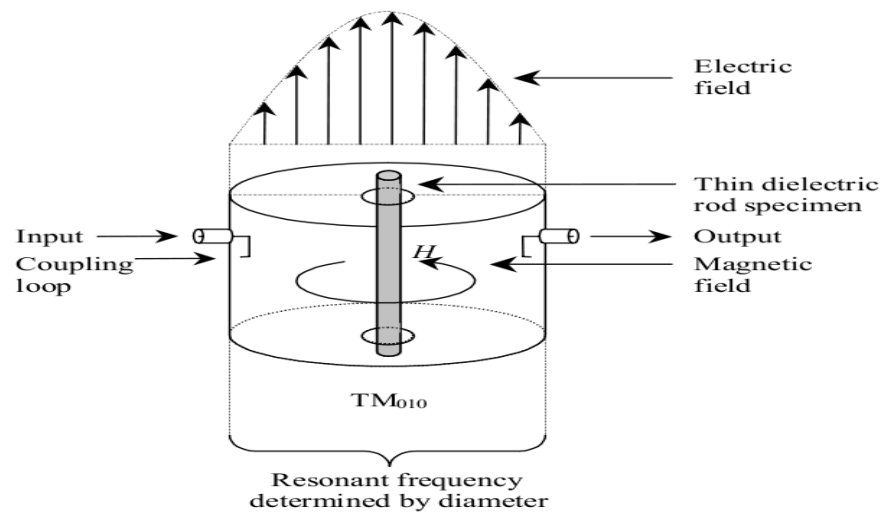


Figure I.9: cavité résonante dans laquelle se propage un mode TM_{010} .

La Figure I.9 montre un exemple de cavité résonante dans laquelle se propage un mode transverse magnétique TM_{010} pour l'analyse hyperfréquence de liquides. L'échantillon de fluide sous test est placé dans un tube au centre de la cavité [7].

I.3.2. Résonateurs miniatures

La dernière famille de dispositifs hyperfréquences utilisés pour la caractérisation diélectrique rassemble les résonateurs implémentés dans des guides d'onde miniatures (coplanaires ou micros trips) [7].

W. Withayachumnankul et al. [11] ont, quant à eux, proposé un résonateur de type « splitring » implémenté en technologie micro ruban. A la fréquence de résonance, le champ électrique est maximal au niveau du gap capacitif de l'anneau. Les échantillons fluidiques sous test sont ainsi placés dans cette zone pour l'analyse. La Figure I.10. (a) montre une vue schématique (de dessus) du résonateur (« split ring ») excité par couplage magnétique via une ligne micro ruban. La Figure I.10. (b) montre une photographie du dispositif expérimental avec les deux câbles coaxiaux connectés aux deux ports de l'analyseur de réseau, les connecteurs SMA, la ligne micro ruban et le « split ring » équipé du canal micro fluide et du système de vidage/remplissage [7].

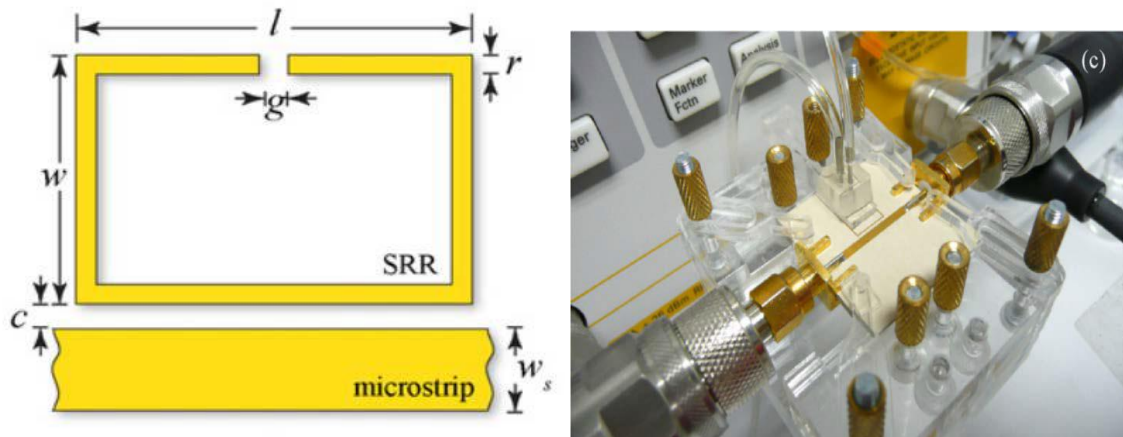


Figure I.10 : Résonateur de type « split ring » excité par couplage magnétique via une ligne micro ruban pour l'analyse hyperfréquences de liquides [11].

W. Withayachumnankul et al. [11] ont ainsi montré la possibilité de discriminer différents mélanges eau/éthanol à différentes fractions volumiques en éthanol à partir d'une telle structure. Un modèle empirique a, en outre, été développé de façon à déterminer les écarts de permittivité complexe entre les différents fluides à partir de la mesure d'écarts de fréquence de résonance et de facteur de qualité en charge [7].

I.4. Capteurs à base des méta-matériaux

Les capteurs à base de méta-matériaux ont suscité un regain d'intérêt grâce au développement de la microélectronique qui offre de nouvelles perspectives et capacités biomédicales. La des capteurs biologiques nous a permis d'opérer à une échelle proche d'une cellule en contrôlant et en traitant les ondes avec précision à l'échelle nanométrique, facilitant ainsi la compréhension de nombreux phénomènes biologiques. L'une des principales préoccupations de ces capteurs est la possibilité de développer des méthodes de détection directe ne nécessitant pas l'utilisation de marques spécifiques. En raison de leur petite taille, de leur facilité d'utilisation, de leur grande sensibilité et de la possibilité de les utiliser sur site, ils constituent des éléments d'analyse particulièrement utiles et intéressants. Le principe de découverte biologique de ces capteurs repose sur l'utilisation de dispositifs à plan résonant, intrinsèquement sensibles aux petites variations de paramètres. Ainsi, l'introduction d'espèces à tester sur ces résonances implique un décalage de la fréquence de résonance.

Certaines études de premier plan sur les capteurs SRR basés sur différentes configurations ont été développées et peuvent représenter un sujet état de l'art pour notre travail. Lee et al [12] - [14] ont proposé biocapteurs à base de SRR pour la détection de la biotine-streptavidine

[12], ADN [13], marqueur du cancer de la prostate, prostate l'antigène spécifique (PSA) et l'hormone de stress du cortisol. [14] Tous ces biocapteurs sont basés sur un double anneau fendu résonateur (DSRR). Les basses fréquences de fonctionnement peuvent être réalisées par l'utilisation de ce type de résonateur méta-matériau, en raison de leur taille électrique relativement petite. Withayachumnankul et al ont mis en œuvre le résonateur à anneau fendu boucle (SRR-boucle) comme capteur multicanaux à couches minces dans [15] et capteur micro fluide dans [16]. à la fréquence de résonance, la boucle SRR localise un champ électrique intense principalement dans la petite région de gap. Le résonateur à anneau divisé complémentaire (CSRR) est également impliqué dans le travail de Ebrahimi et al [17], qui fondamentalement proposé un capteur micro-fluide pour l'identification précise des échantillons liquides chimiques et biologiques. Haute sensibilité était montrée en raison du fort confinement du champ électrique dans le bord inférieur du CSRR à la fréquence de résonance [18].

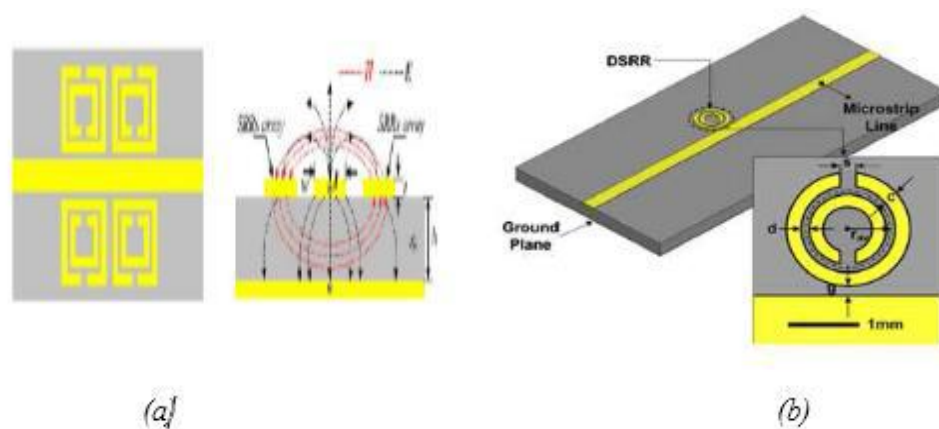


Figure I.11: (a) Biocapteur de micro-onde, model biotine-streptavidin.

I.5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les principes de fonctionnements des capteurs micro-ondes et ses principales caractéristiques pour l'obtention des meilleurs résultats : sensibilité, sélectivité, stabilité, rapidité. Particulièrement, nous nous sommes concentrés sur les biocapteurs micro-ondes pour la caractérisation des liquides.



*Chapitre II:
Théorie des
résonateurs
méta-matériaux*

Introduction

Les méta-matériaux sont des matériaux artificiels qui présentent des propriétés électromagnétiques singulières que nous ne retrouvons pas dans la nature ou dans leurs constituants pris séparément. La caractéristique la plus intéressante est la possibilité de contrôler ou de modifier la permittivité et la perméabilité du matériau pour obtenir un comportement adapté à une application spécifique. Les méta-matériaux sont utilisés pour améliorer les performances des antennes, des filtres et des coupleurs. Leur principal avantage est la miniaturisation des dispositifs grâce à un indice de réfraction assez facilement ajustable qui peut même être négatif à certaines fréquences. [1]

En général les méta-matériaux sont fabriqués à partir d'inclusions métalliques noyées dans un substrat diélectrique. Parmi les structures les plus connues nous trouvons le split ring résonateur (SRR) ou résonateur en anneau fendu et les métasolénoïdes. L'interaction des champs électromagnétiques avec les inclusions produit le comportement résonant typique qui caractérise les méta-matériaux. Le champ magnétique induit un courant dans les anneaux métalliques produisant un effet inductif. Un effet capacitif apparaît également entre les parties métalliques placées à différents potentiels. Ces interactions sont à l'origine de valeurs négatives de l'indice de réfraction lorsque la permittivité et la perméabilité du matériau sont simultanément négatives. [2]

L'objectif principal de ce deuxième chapitre est l'étude d'un ensemble de configurations de cellules méta-matériaux unitaires notamment les SRR.

II.1. Historique

En 1967 Victor Vesselago était convaincu qu'un matériau qui a une perméabilité et une permittivité négatives simultanément donne des caractéristiques extraordinaires. Cette double condition a été difficile à réaliser, même si l'on connaissait de longue date des milieux présentant une permittivité négative (par exemple les plasmas). En 1998, John Pendry, de l'Imperial College, a proposé des structures périodiques métalliques formées d'anneaux concentriques coupés, appelés split-ring résonateurs (SRR), et de fils métalliques continus. Il avait démontré, dans deux articles successifs, qu'un arrangement périodique de fils métalliques continus parallèles présentait une permittivité négative en basse fréquence, et qu'un réseau périodique de SRR présentait une perméabilité négative autour d'une fréquence de résonance. En réunissant les deux réseaux dans une structure périodique composite, on peut réaliser le milieu proposé par V. Veselago. Ce milieu présentait alors un indice de réfraction négatif au voisinage de la fréquence de résonance des SRR [3].

Cette propriété d'indice de réfraction négatif était déjà remarquable, mais elle aurait pu rester une curiosité de laboratoire. Ce qui a réellement attiré l'attention sur ces matériaux exotiques c'est la possibilité de réaliser une super lentille dont la résolution ne serait plus limitée par les lois classiques de l'optique. Enfin, en 2006, pour couronner ce sujet, John Pendry et U. Leonhardt proposaient la réalisation d'une cape d'invisibilité utilisant des méta-matériaux [3].

Des tentatives de réalisation de ces méta-matériaux, en infrarouge et dans le domaine visible, ont été également proposées. Par exemple, dans le visible, si la longueur d'onde est 500 nm, la période est de l'ordre de 50 nm, avec des largeurs de motifs métalliques de l'ordre de la dizaine de nanomètres. La difficulté vient donc du fait qu'il faut obtenir des structures très petites afin de créer des réseaux à faible période. Actuellement, les méta-matériaux sont réalisés par micro-gravure ou nano-gravure. Certains groupes de recherche espèrent trouver une solution en changeant la méthode de fabrication, c'est-à-dire en réalisant ces méta-matériaux par auto-assemblages dirigés, ces derniers se fabriquant alors de manière quasi-naturelle. D'autre part, le problème de l'élaboration d'un tel matériau provient de la difficulté à obtenir des matières premières de grande pureté [3].

II.2. Définition des méta-matériaux

Les méta-matériaux sont des structures composites qui peuvent présenter des propriétés électromagnétiques singulières que nous ne retrouvons pas dans la nature ou dans leurs constituants pris séparément. Généralement les méta-matériaux sont fabriqués à partir d'inclusions métalliques noyées dans un substrat diélectrique, ce qui leur confère une structure hétérogène. La représentation électromagnétique de ces milieux à partir d'une permittivité ϵ et d'une perméabilité μ effective, est limitée aux cas des cellules élémentaires dont les dimensions sont très largement inférieures à la longueur d'onde. [4] le terme «méta-matériaux» regroupe donc tous les matériaux périodiques artificiels ayant des propriétés électromagnétiques particulières. Néanmoins, cette appellation est employée principalement pour les structures présentant un indice de réfraction négatif. Pour qu'un matériau présente un indice de réfraction négatif, il doit révéler à la fois une permittivité et une perméabilité relatives négatives:

$$n = \pm\sqrt{\epsilon\mu} \quad (\text{II.1})$$

La première spéculation sur l'existence des matériaux à indice de réfraction négatif et la prévision de leurs propriétés fondamentales a été faite par le physicien russe Victor Veselago en 1967 [5].

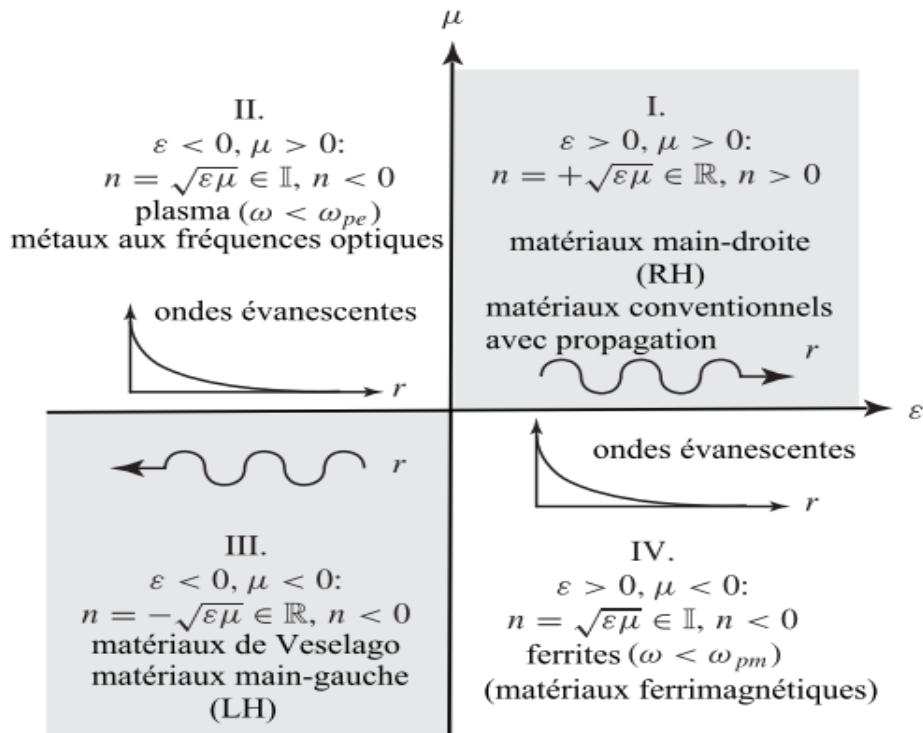


Figure II.1 : propagation d'une onde à travers un milieu selon le signe de ces paramètres constitutifs (permittivité et perméabilité).

Dans la nature, il n'existe aucun matériau de ce type. Il existe des matériaux de permittivités négatives ou de perméabilités négatives, mais aucun ne présente les deux phénomènes simultanément. Pour le créer, il a fallu associer deux structures que J. Pendry explicite en 1998 à travers les deux articles fondateurs des matériaux à indice de réfraction négatif. Le premier montre qu'un réseau de fils métalliques parallèles a un comportement de type plasma et présente ainsi une permittivité négative [6]. Le deuxième présente un arrangement de résonateurs à anneaux fendus, ou Split Ring Résonateur (SRR) qui ont des réponses du type de celles des matériaux magnétiques et donc révèle une perméabilité négative [7].

En général. La réponse électromagnétique d'un matériau quelconque face à une onde Électromagnétique incidente est déterminée par ses deux paramètres intrinsèques ϵ_r et μ_r , donc, selon les signes de ϵ_r et μ_r , quatre combinaisons sont possibles. La Figure II.1 représente les différents types de matériaux selon ces combinaisons.

Les cadrans 1 et 4 sont les zones qui satisfont l'équation de propagation :

$\mathbf{k} \times \mathbf{E} = \omega\mu\mathbf{H}$ et $\mathbf{K} \times \mathbf{E} = -\omega\mu\mathbf{H}$. L'un est donc propagative. Le cas où $\epsilon_r > 0$ et $\mu_r > 0$ (main droite) représente le cas des matériaux classique comme les diélectriques. Le cas où $\epsilon_r < 0$ et $\mu_r < 0$ (main gauche) représente le cas de méta- matériaux.

Les zones 2 et 3 sont des zones où l'onde ne se propage pas (onde évanescente). Le cas où $\epsilon_r > 0$ et $\mu_r < 0$ représente le cas des ferrites. Le cas où $\epsilon_r < 0$ et $\mu_r > 0$ représente le cas des plasmas. Revenons au cas qui nous intéresse (cadran 4), comme noté auparavant, les méta-matériaux appelés également matériaux main gauche ou encore matériaux doublement négatifs n'existent pas dans la nature.

La vitesse de phase est définie par l'équation (II.2) et la vitesse de groupe par l'équation (II.3)

$$v_\varphi = \frac{\omega}{k} \quad (\text{II.2})$$

$$v_g = \frac{\partial\omega}{\partial k} \quad (\text{II.3})$$

Le fait que les trois vecteurs $\vec{E} \cdot \vec{H} \cdot \vec{K}$ forment un trièdre indirect implique que la vitesse de phase et la vitesse de groupe de l'onde sont dans des directions opposées:

Milieu main droite : $v_\varphi > 0$ ($k > 0$) et $v_g > 0$

Milieu main gauche : $v_\varphi < 0$ ($k < 0$) et $v_g > 0$

Le fait que ϵ_r et μ_r soit toutes les deux négatives implique réfraction n du milieu est négatif, car:

$$n = \pm\sqrt{\epsilon\mu} \quad (\text{II.4})$$

Comme nous concluons qu'avec ϵ et μ simultanément positives, Les vecteurs $\vec{E} \cdot \vec{H} \cdot \vec{K}$ forment un trièdre direct ou main droite (Figure II.2. a). les énergie est décrit par le vecteur de poyting qui s'écrit :

$$\vec{p} = \vec{E} \times \vec{H} \quad (\text{II.5})$$

Par conséquent \vec{P} et \vec{K} suivent la même direction.

Nous pouvons également déduire qu'une autre possibilité satisfait cette équation. C'est le cas où ϵ et μ sont simultanément négative. Dans ce cas, les vecteurs $\vec{E} \cdot \vec{H} \cdot \vec{K}$ forment un trièdre in direct ou main gauche (Figure II.2.b). C'est l'hypothèse théorique qui était introduite pour la première fois en 1964 par Veselago [8]. Le chercheur russe a exposé

plusieurs propriétés physique d'un tel matériau qui n'existe pas dans la nature d'où le nom de méta matériau. Ces propriétés seront exposées par la suite.

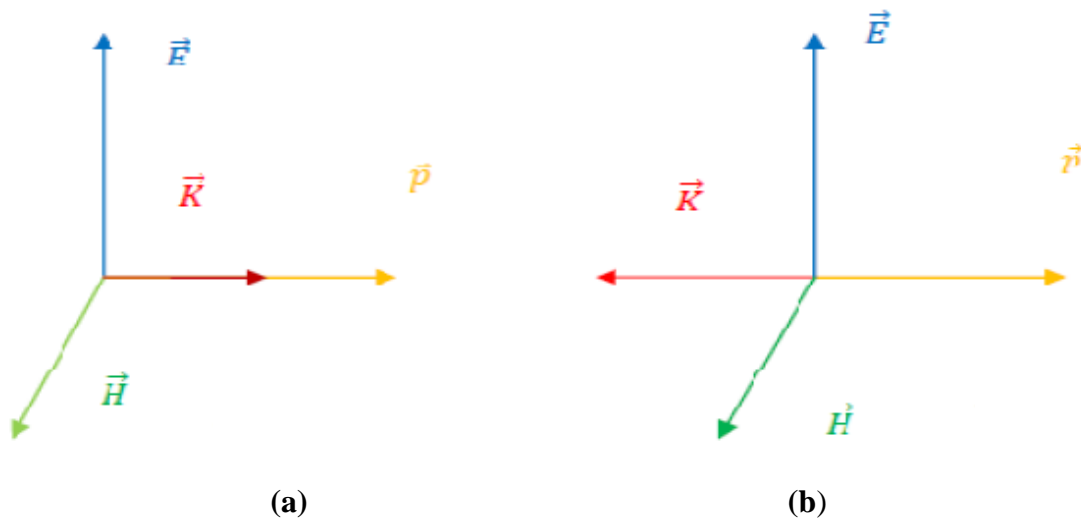


Figure II.2: (a) Trièdre direct (matériaux main droite) et (b) trièdre indirect (matériaux main gauche)

Cela provoque l'inversion de la loi de snell-descartes .car lors du passage d'un milieu man droite à un milieu gauche. L'onde réfractée sera transmise du même côté de la normal que l'onde incident [9].Figure (II.3)

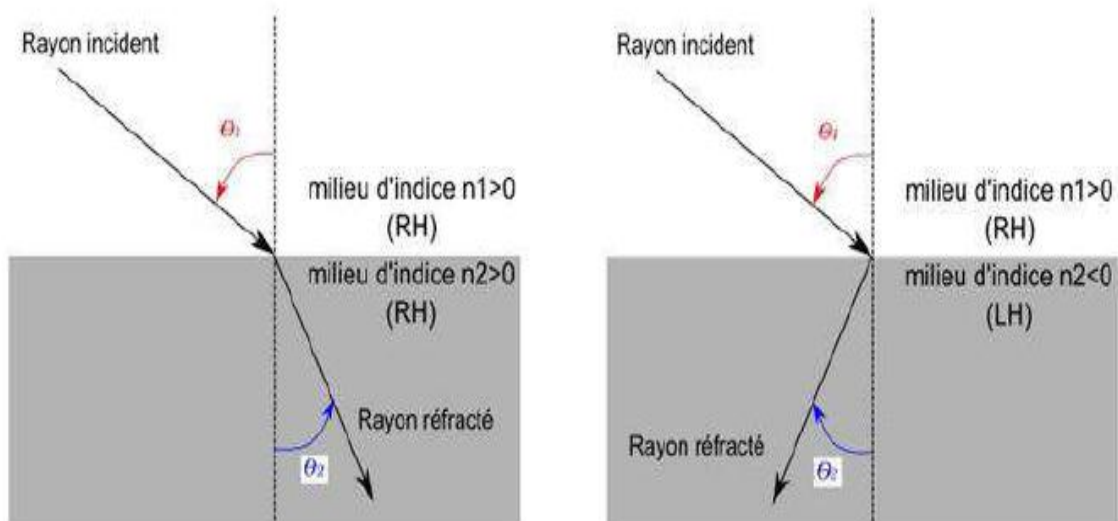


Figure II.3 : Loi de snell-descartes lors du passage d'une onde d'un milieu man droite (a) vers un milieu main droite (angle positif), (b) vers un milieu main gauche (angle négatif).

Les matériaux main gauche impliquent d'autres changements sur des phénomènes physiques bien connus, comme l'inversion de l'effet doppler, l'inversion de l'effet cerenkovet l'inversion de la convergence et de la divergence dans les lentilles concaves et convexes respectivement [8].

II.3. Milieu à perméabilité négative

L'idée innovante derrière la mise en place des matériaux à perméabilité négative réalisée par des matériaux ordinaires métallo-diélectrique n'ayant pas forcément une activité magnétique tels que les ferromagnétiques [9], est l'exploitation des courants de conduction générés à la surface des métaux lorsque ceux-ci sont soumis à une onde incidente émanant d'une source électromagnétique. Pour certaines configurations, les courants générés dans le conducteur peuvent être suffisamment importants pour assurer un phénomène méta-matériau même si la taille des motifs vérifie la condition d'homogénéité ($\ll \lambda$). En 1999, J. Pendry [10] a été le premier à exploiter l'idée en introduisant une configuration originale incluant un réseau de structures métalliques sous la forme d'un rouleau suisse (Swiss-Roll) Figure II.4.

C'est une structure artificielle à résonance magnétique sans avoir recours à un matériau magnétique.

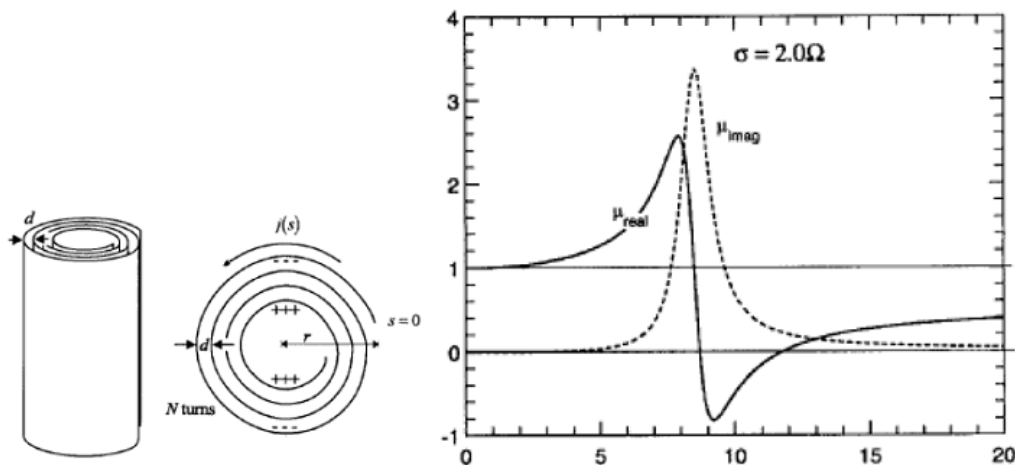


Figure II.4 :(a) Le rouleau suisse (Swiss-Roll) de Pendry. (b) la variation de la perméabilité Effective réelle et imaginaire en fonction de la fréquence [7].

Chaque élément unitaire est basé sur un cylindre de rayon R sur lequel est enroulée une spirale conductrice isolée de N tours. L'espacement entre deux tours consécutifs est noté d . quand un champ magnétique excite la structure, un courant est induit dans le conducteur et

une capacité équivalente est créé. La structure (Swiss-Roll) est considérée comme un milieu homogène puisque la plus grande dimension de cette inclusion est très inférieure à la longueur d'onde d'excitation.

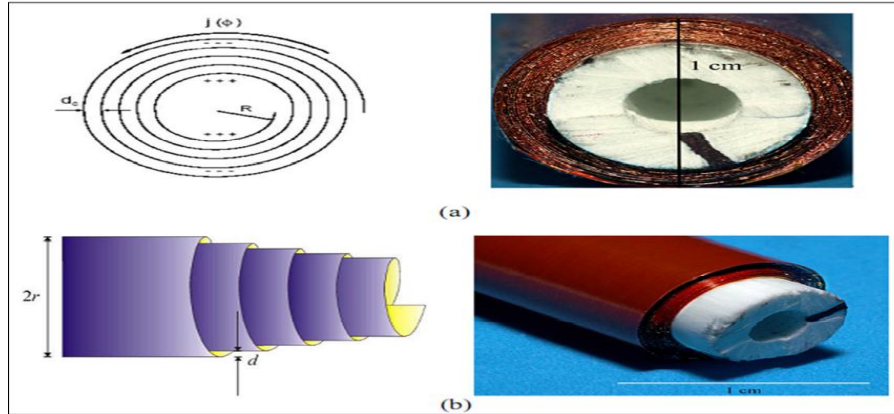


Figure II.5: la structure rouleau de suisse introduite par pendry. (a) vue de face et (b) vue de profile [7].

Comme mentionné précédemment, Pendry a montré que la synthèse d'une résonance annulaire est réalisée avec des dimensions beaucoup plus petites que la longueur d'onde (permettant ainsi un milieu efficace) capable de réagir au micro-rayonnement en polarisant et de produire un μ négatif dans un champ de fréquence donné comme si celui-ci avait une perméabilité magnétique effective [11]:

$$\mu_{eff} = 1 - \frac{F}{1 + \frac{2\sigma_i}{\omega R \mu_0 (N-1)} - \frac{dc^2_0}{2\pi^2 \omega^2 R^3 (N-1)}} \quad (II.6)$$

Avec :

C_0 : La célérité de la lumière dans le vide.

σ : La conductivité du métal de la spire.

ϵ : La permittivité de la matière isolante.

μ_0 ; La perméabilité du vide.

F : Le volume de la structure

a, r, w, d : Dimensions physiques de l'unité de base comme dans la figure II.6

Le SRR typique créé par un pendry se compose de deux anneaux concentriques entrecoupés d'un petit éclat et plusieurs formes quadratiques apparaissent, mais les

approximations d'anneaux circulaires peuvent être utilisées pour les carrés. Le SRR illustre de figure II .6 circulaires et carrés typiques.

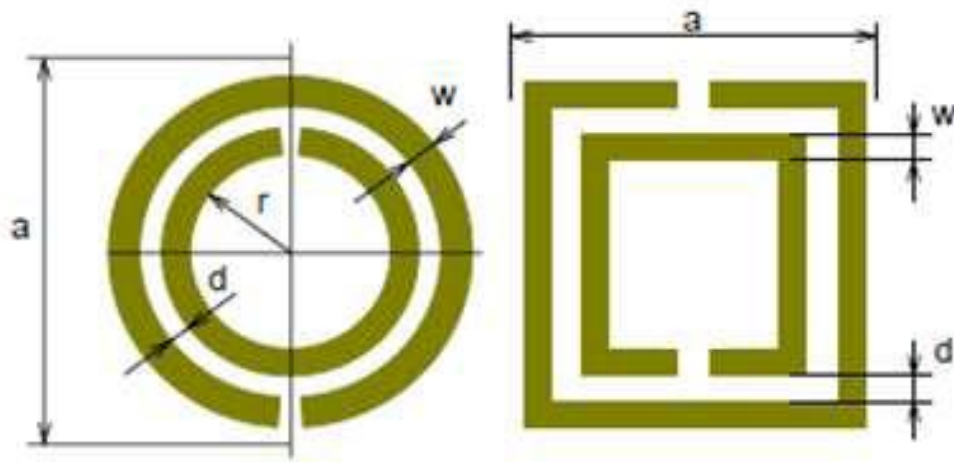


Figure II.6 : SRR typique circulaire et carré

Dans le but de remédier aux imperfections de la structure (Swiss-Roll) en termes d'absorption qui est liée au facteur de remplissage. Une optimisation de la structure a été ensuite proposée par la même équipe. Il s'agit de la structure SRR (Split Ring Résonateur) (Figure II.7). La structure SRR est composée de deux résonateurs en boucles métalliques imbriquées sous forme de la lettre C. Quand un champ magnétique \vec{H} est appliqué en parallèle à l'axe des boucles, Un courant est ensuite induit sur les résonateurs et une activité magnétique apparaît.

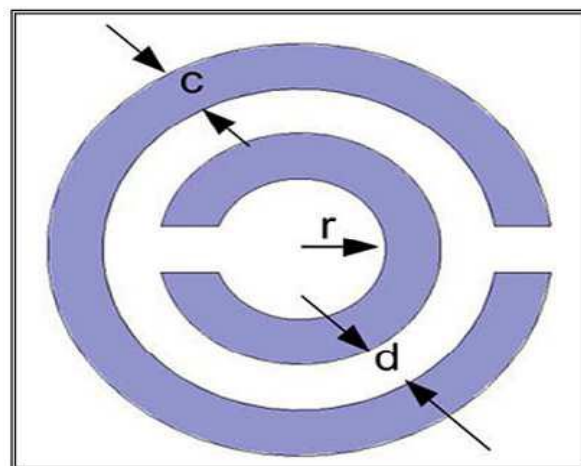


Figure II.7 : Résonateur en Anneau Fendu « RAF » (Split Ring Résonateur « SRR »)

introduit Par Pendry.

Un développement de l'équation (II.7) conduit à une expression de la perméabilité effective simplifiée en fonction principalement de la pulsation de résonance ω_0 et la pulsation du plasma magnétique ω_{pm} :

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{3ac_0^2}{\pi \ln(2\omega/d)r^3}} \quad (\text{II.7})$$

c_0 : La célérité de la lumière dans le vide.

a : Splitter entre les fils

r : Rayon du fil

d : distance de fil

Les SRRs présentent au-dessus de leurs fréquences de résonance une bande étroite pour laquelle la perméabilité passe en dessous de zéro (Figure II.8). Le phénomène méta matériau magnétique est observé entre la fréquence de résonance ω_0 et la fréquence du plasma magnétique ω_{pm} .

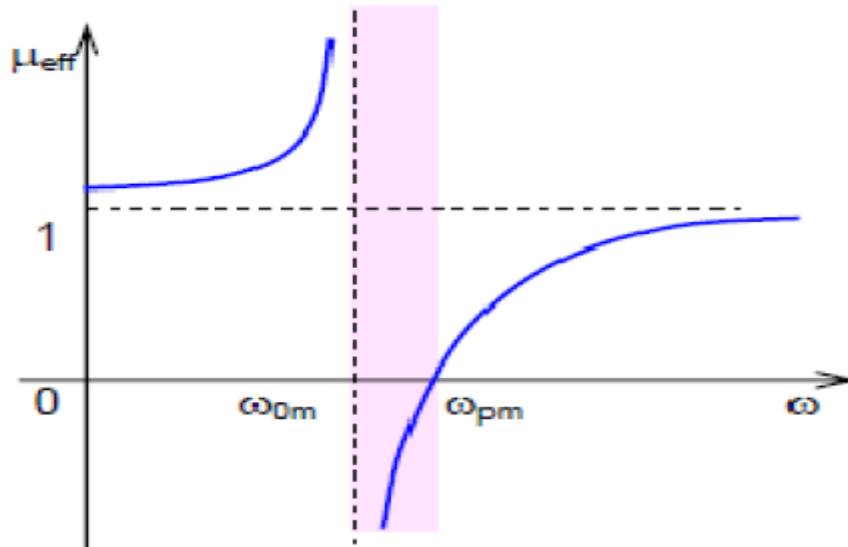


Figure II.8 : Représentation de la perméabilité effective en fonction de la fréquence selon l'équation (II.7)

En se basant sur les structures originales de J.Pendry, les chercheurs ont espéré alors réaliser et caractériser expérimentalement ces matériaux mystérieux. Et ce n'est qu'en 2001 qu'une structure méta- matériau a vus le jour (Figure II.9(a)). L'équipe de D.R.Smith a réalisé une structure à base d'un réseau de SRR avec des tiges métalliques, elle a ensuite proposé une structure planaire améliorée fonctionnant dans le domaine des microondes (Figure II.9.(b)) [12- 13], pour proposer après une méthodologie de caractérisation expérimentale des propriétés de méta matériau sur la base de la mesure des paramètres S [14].

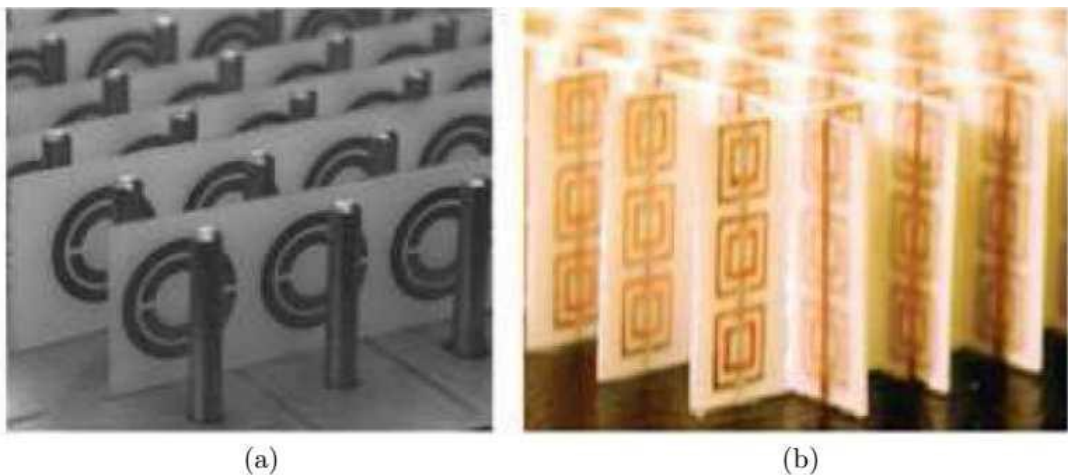


Figure II.9 :(a) Premier Prototype méta-matériau proposé par l'équipe de D.R.Smith
(b) prototype amélioré [12- 13].

II. 4. Paramètres S

Une façon de quantifier la puissance réfléchi est l'utilisation des paramètres S. En effet, les paramètres S définissent comme étant les paramètres de réflexion et de transmission entre l'onde réfléchi et incidente aux bornes d'une composante. En fait, ils décrivent le comportement d'une composante dans le spectre micro-ondes. La figure II.10 permettra de définir les paramètres S. [15]



Figure II.10: Signaux aux bornes d'un dispositif micro-onde.

Soi :

a_1 : Champs électriques de l'onde entrante à l'entrée de la composante.

a_2 : Champs électriques de l'onde entrante à la sortie de la composante.

b_1 : Champs électriques de l'onde sortante à l'entrée de la composante.

b_2 : Champs électriques de l'onde sortante à la sortie de la composante.

À partir de ces variables, on définit les paramètres S :

$$S_{11} = \frac{b_1}{a_1} \cdot s_{21} = \frac{b_2}{a_1} \cdot S_{12} = \frac{b_1}{a_2} \cdot S_{22} = \frac{b_2}{a_2} \quad (\text{II.8})$$

Tel que :

S_{11} = coefficient de réflexion à l'entrée.

s_{21} = coefficient de transmission.

S_{12} = isolation.

S_{22} = coefficient de réflexion à la sortie.

Dans le domaine des hyperfréquences, un quadripôle est généralement défini par ses paramètres S (Scattering Paramètres : paramètres de répartition) qui permettent de définir complètement les caractéristiques d'un multi-pôle linéaire ne comportant pas de sources d'énergie internes et en particulier d'un quadripôle linéaire passif tel qu'un filtre (passif). Le graphe de fluence des paramètres S est présenté sur la figure II.11 [16_17]

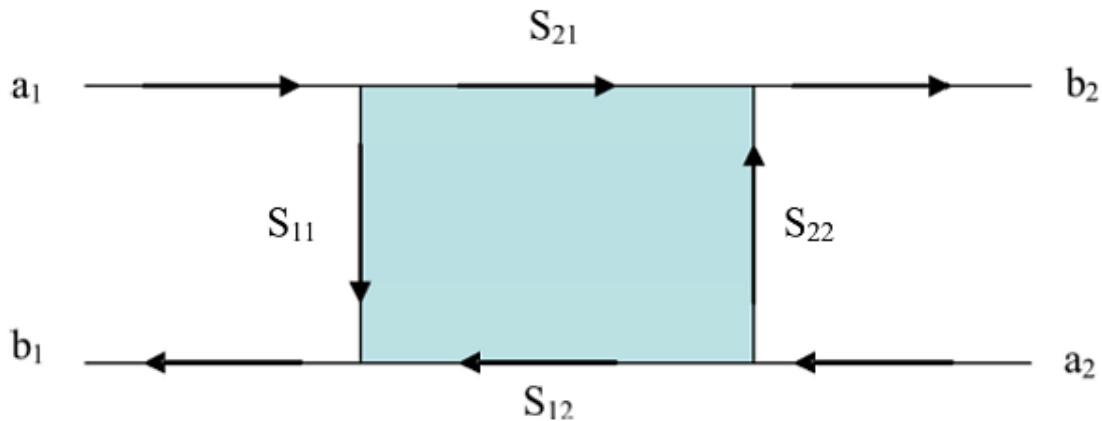


Figure II .11: Graphe de fluence d'un quadripôle.

Les ondes sortantes b_i sont liées aux ondes entrantes a_i par :

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = [S] \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix}$$

- Le coefficient S_{12} représente le coefficient de transmission à l'entrée lorsque la sortie est adaptée
- Le coefficient s_{21} représente le coefficient de transmission à la sortie lorsque l'entrée est adaptée.
- Le coefficient S_{11} représente le coefficient de réflexion en entrée lorsque la sortie est adaptée.
- Le coefficient S_{22} représente le coefficient de réflexion à la sortie lorsque l'entrée est adaptée.

II.5. Types des résonateurs à activité magnétique

Le résonateur SRR est un anneau métallique avec une fente gravée sur la structure et fonctionne comme une structure résonnante LC [18]. Ces SRRs peuvent être arrangés dans une rangée pour former un matériau qui montre des valeurs négatives de μ et ainsi des valeurs négatives de l'indice de réfraction. Cette structure montre une résonance magnétique à une fréquence particulière. La position de cette fréquence de résonance peut être variable en changeant les différents paramètres géométriques de SRR [19]. Le SRR peut avoir différents types de structures. Il peut avoir des anneaux simples ou doubles avec des fentes simples ou multiples. L'anneau peut être circulaire ou carré, et que ce soit sur une ou deux faces du substrat.

Comme il est mentionné ci-dessus, le SRR est constitué d'un ou plusieurs anneaux métalliques avec une fente présentée dans un certain bras de sa structure. Quand un courant circule dans l'anneau nous avons un moment dipolaire magnétique. Le moment dipolaire vectoriel produit est perpendiculaire au plan de l'anneau. L'anneau métallique agit en tant qu'enroulement (l'inductance L) et la fente dans l'anneau crée un condensateur parallèle (capacité C). La combinaison d'un enroulement avec un condensateur nous donne un circuit LC [20,21]. Donc les SRRs se comportent comme des circuits LC.

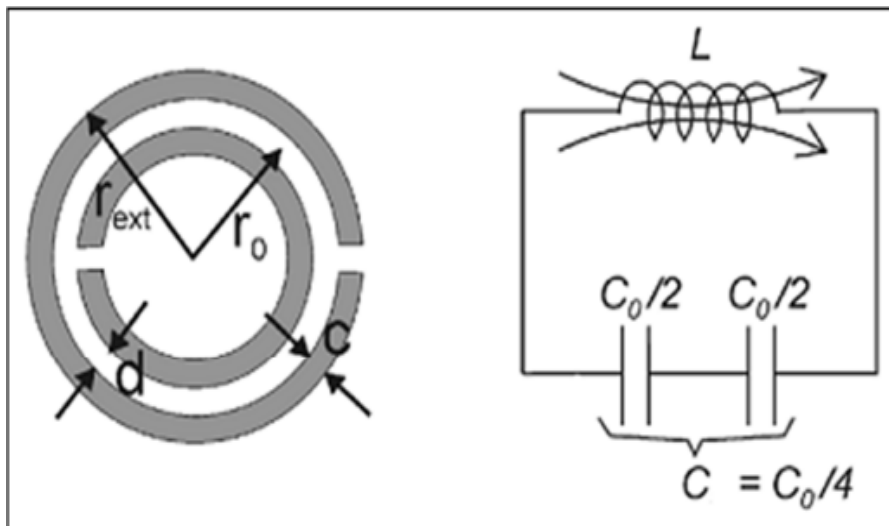


Figure II.12 : Le circuit équivalent de SRR [20].

II.5.1. SRR carré

Le résonateur en anneau fendu carré ou circulaire introduit par pendry [22] a été dimensionné pour un fonctionnement en bande x [8,2 GHz ; 12,4 GHz]. Le côté externe du carré est égal à 3 mm, la largeur de la piste en cuivre est de 0,33 mm, la largeur de la coupure des anneaux est de 0,33 mm et l'espacement entre les deux anneaux est de 0,33 mm (figure II.13). Le substrat utilisé est le RO4003C de chez Rogers qui présente une permittivité relative de 3,38, des pertes tangentielles de l'ordre de 0,0027 et une épaisseur de 0,81 mm ce substrat sera aussi utilisé pour la plupart des autres résonateurs dans ce chapitre [23].

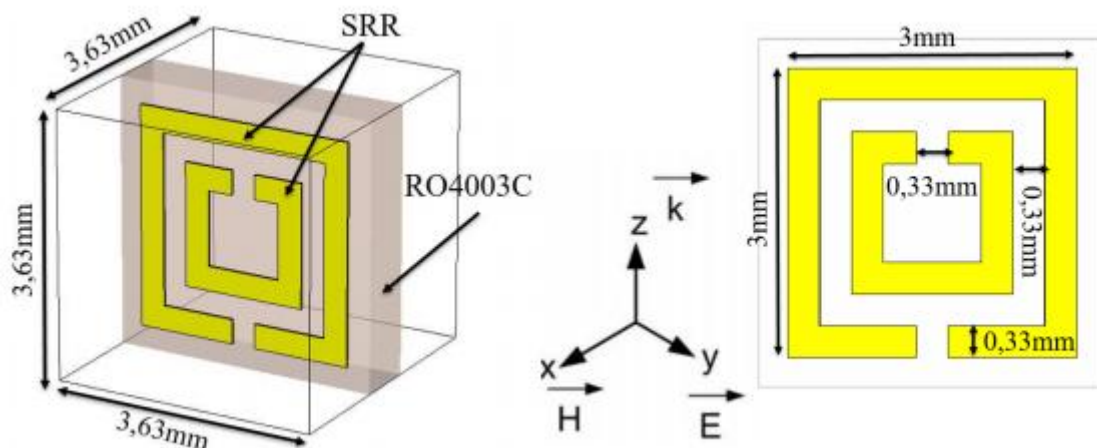


Figure II.13 : Représentation et dimensions d'une unité de cellule du SRR carré [23].

La figure II.14 représente les coefficients de réflexion S_{11} et de transmission S_{21} en dB du SRR carré présenté dans la figure II.13. Nous remarquons que le SRR présente une transmission de -24,38 dB pour une fréquence de 7,0 GHz dans le premier cas où le champ \vec{E}

est orienté selon l'axe y. cette résonance est une résonance magnétique et électrique obtenue suite à une pénétration du champ à travers les anneaux et produit un courant induit circulant sur les anneaux et aussi excite les coupures des anneaux.

Pour le deuxième cas qui présente un champ électrique \vec{E} orienté suivant l'axe z, les résultats montrent une fréquence de résonance de 6.71 GHz avec une transmission de -23,42 dB [23].

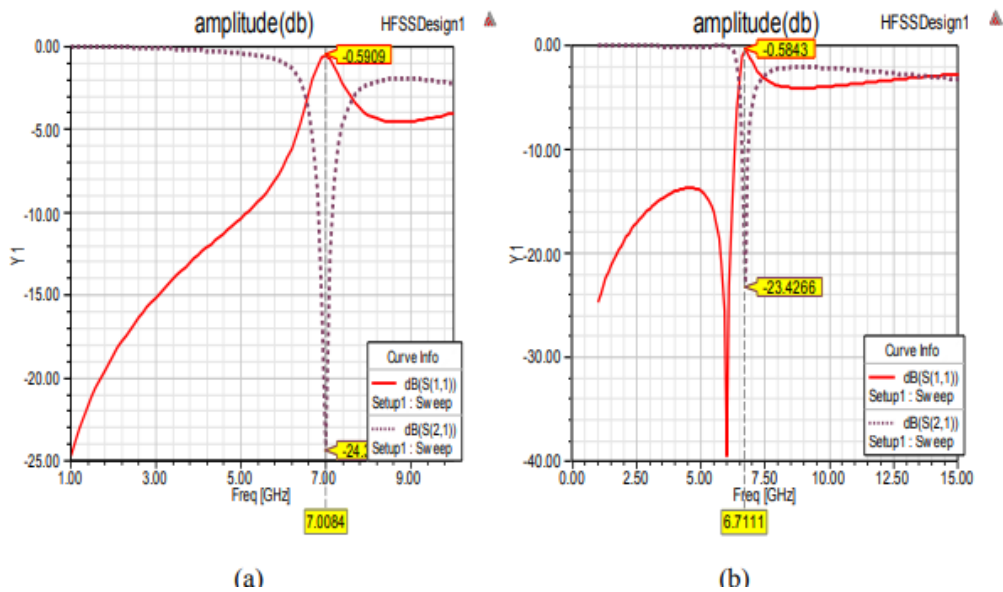


Figure II.14 : Coefficients de réflexion et transmission en dB: (a) \vec{E} selon l'axe y. (b) \vec{E} selon l'axe z [23].

II.5.2. SRR circulaire

Dans cette partie nous allons présenter un autre motif métallique qui permet d'avoir une perméabilité négative autour de sa fréquence de résonance f_{res}

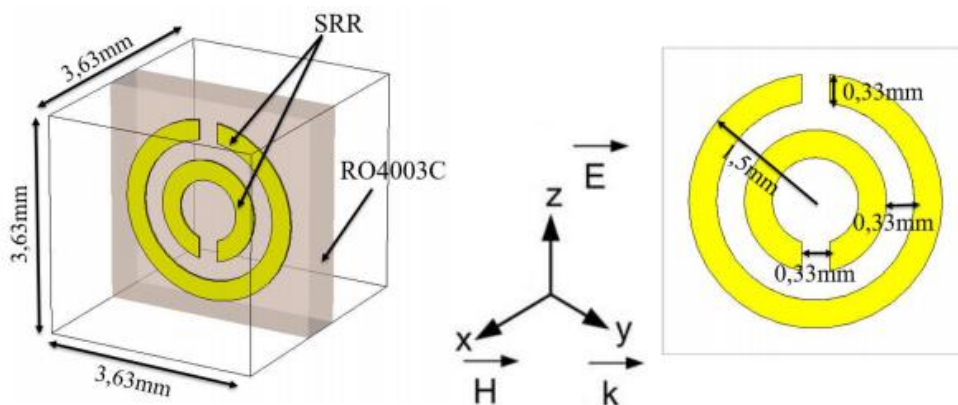


Figure II.15 : Représentation et dimensions d'une unité de cellule du RAF circulaire [23].

La figure II.15 présente un résonateur circulaire formé par deux anneaux concentriques de diamètres extérieurs de 3 mm et de 2.34 mm respectivement. Le SRR est déposé sur un substrat de type RO4003C de ROGERS de permittivité relative 3.38 et de pertes tangentielles de 0.00197.

La figure II.16(a) présente les coefficients de transmission et de réflexion en dB. Pour le premier cas où le champ électrique \vec{E} est polarisé suivant l'axe y et le vecteur d'onde \vec{K} est orienté suivant l'axe z, cette structure présente une fréquence de résonance de 11.09 GHz et une transmission de -26.95 dB. Pour le deuxième cas, le champ \vec{E} est orienté suivant l'axe z est la propagation se fait suivant l'axe y comme le montre la figure II.16 (b). Dans ce cas le SRR circulaire présente un coefficient de transmission de l'ordre de -23.50 dB avec une fréquence de résonance de 10.61 GHz [23].

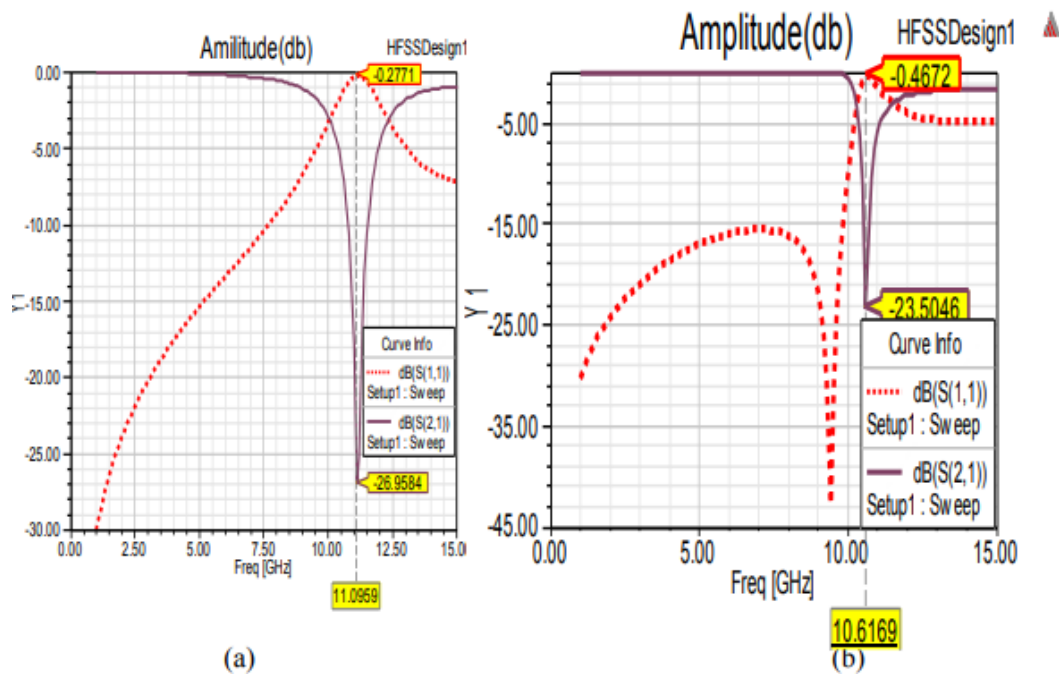


Figure II.16 : Coefficients de réflexion et transmission en dB: (a) \vec{E} selon l'axe y. (b) \vec{E} selon l'axe z [23].

Tout comme le SRR, ce motif est équivalent à un circuit LC en série, et la fréquence de résonance peut s'écrire alors :

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (\text{II.9})$$

II.5.3. Broadside coupled SRR « BC-SRR »

Dans [24], marqués a étudié la bi-anisotropie existant dans les SRRs. Les résonateurs carrés ou circulaires présentent un couplage électromagnétique dans le cas où le vecteur d'onde \vec{k} ne respecte pas la symétrie de la structure. Les motifs introduisaient par marqués devraient donc éliminer le phénomène de couplage magnéto-électrique. Le résonateur à activité magnétique présenté est appelé donc broadside-coupled SRR « BC-SRR » qui peut être carré ou circulaire [23].

La figure II.17 présente une unité de cellule du BC-SRR carré. Notons que le BC-SRR est composé de deux anneaux déposés sur les deux faces du substrat diélectrique chacun

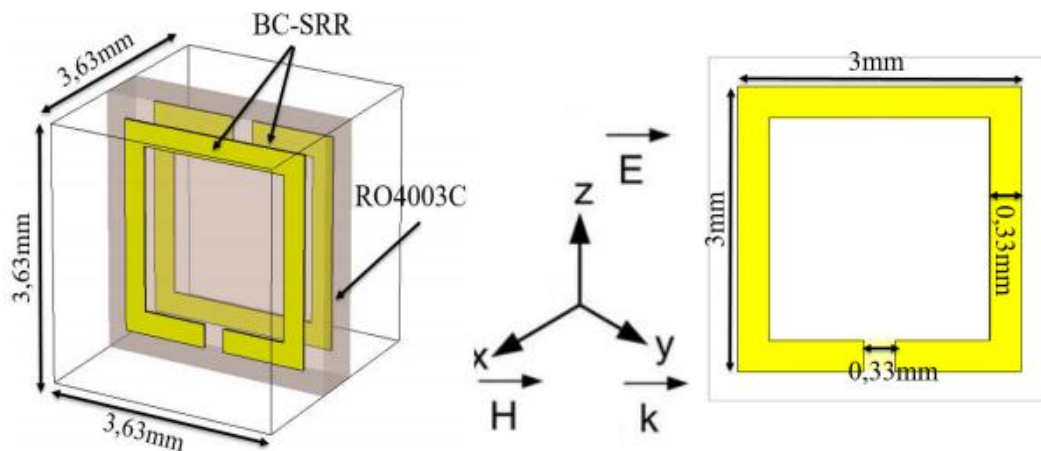


Figure II.17 : Représentation et dimensions d'une unité de cellule du BC-SRR [23].

II.6.4. BC-SRR circulaire

Le BC-SRR circulaire est identique à celui carré, ils ont les mêmes caractéristiques, il est composé de deux anneaux circulaire déposés sur les deux faces du substrat. Les dimensions des anneaux sont celles de la structure étudiée du SRR circulaire (figure II.15).

La configuration du BC-SRR circulaire est donnée par la figure II.18 les résultats de simulation montrent une transmission de -24.95 dB avec une fréquence de résonance de 9. 21 GHz [23].

Le BC-SRR circulaire est caractérisée aussi par une partie réelle de la perméabilité négative dans une bande étroite autour de la fréquence de résonance qui varie de 0 à -6.92. En dehors de cette bande, la partie réelle de la perméabilité est positive comme le montre la figure II.18 (b) [23].

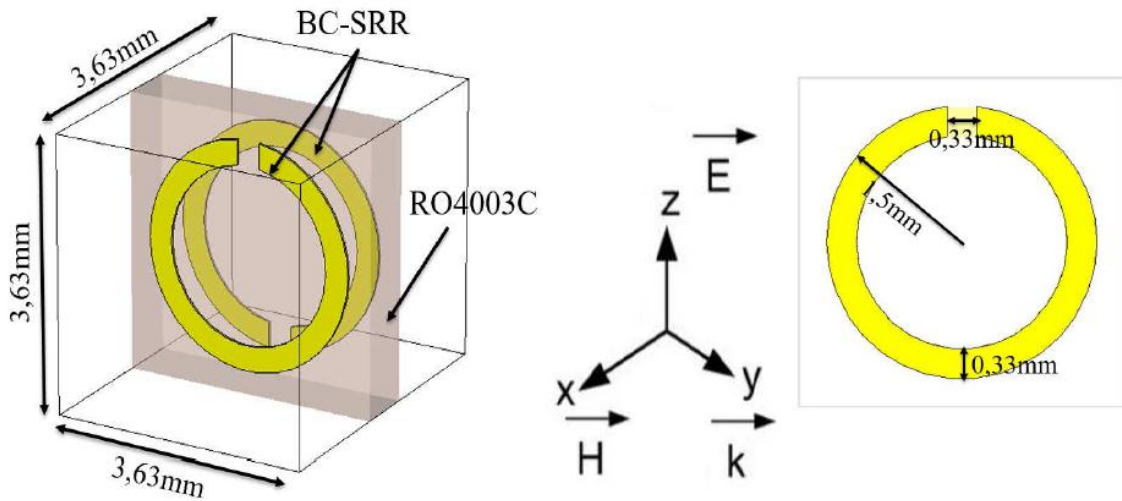


Figure II.18 : Représentation d'une unité de cellule de BC-SRR circulaire [23].

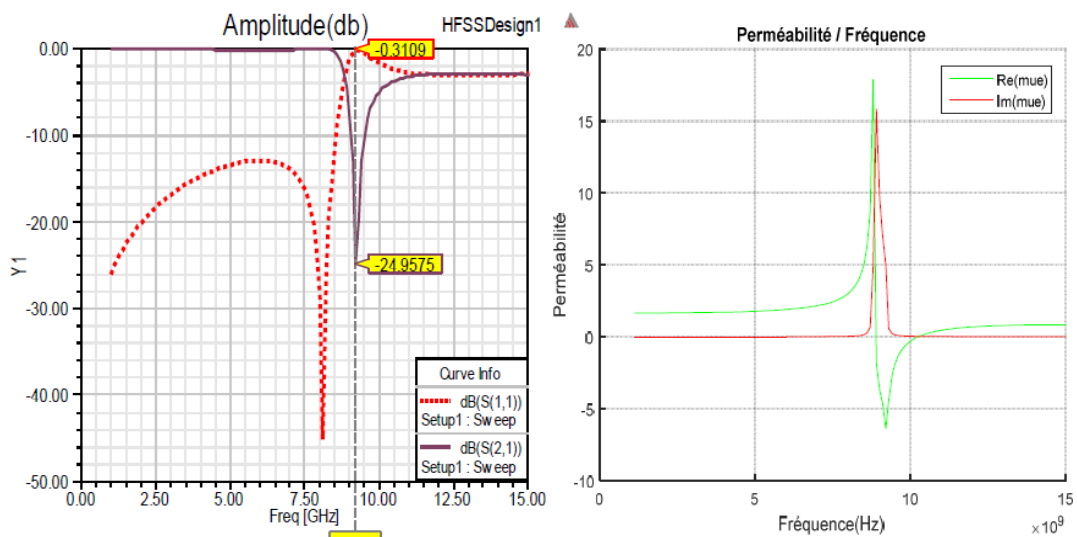


Figure II.19 : BC-SRR circulaire avec \vec{E} selon z : (a) Réflexion et transmission en dB.
 (b) Parties réelle et imaginaire de la perméabilité effective [23].

II.5.5. C-SRR

La C-SRR en anglais a été introduite par O'Brien [25]. Cette structure est composée de deux SRRs en C déposés sur une face du substrat comme le montre la figure II.120. Pour la simulation, nous nous intéressons seulement au cas où le champ électrique

\vec{E} Est polarisé suivant l'axe \mathbf{z} et le vecteur d'onde \vec{k} est suivant l'axe \mathbf{y} . les coefficients de transmission et de réflexion sont présentés dans la figure II.21 (a). Nous pouvons noter qu'à la fréquence de résonance $f_{res}=13.29$, le C-SRR présente une transmission de -24,52db.

Les variations de la partie réelle et imaginaire de la perméabilité effective du C-SRR sont illustrées dans La figure II.21 (b), ces paramètres sont calculés par la méthode de Smith.

Nous pouvons constater que cette méthode donne une valeur de -3.9 de la partie réelle de la Perméabilité à la fréquence de résonance et pour une bande étroite. En dehors de cette bande $Re(\mu_{eff})$ est positif [23].

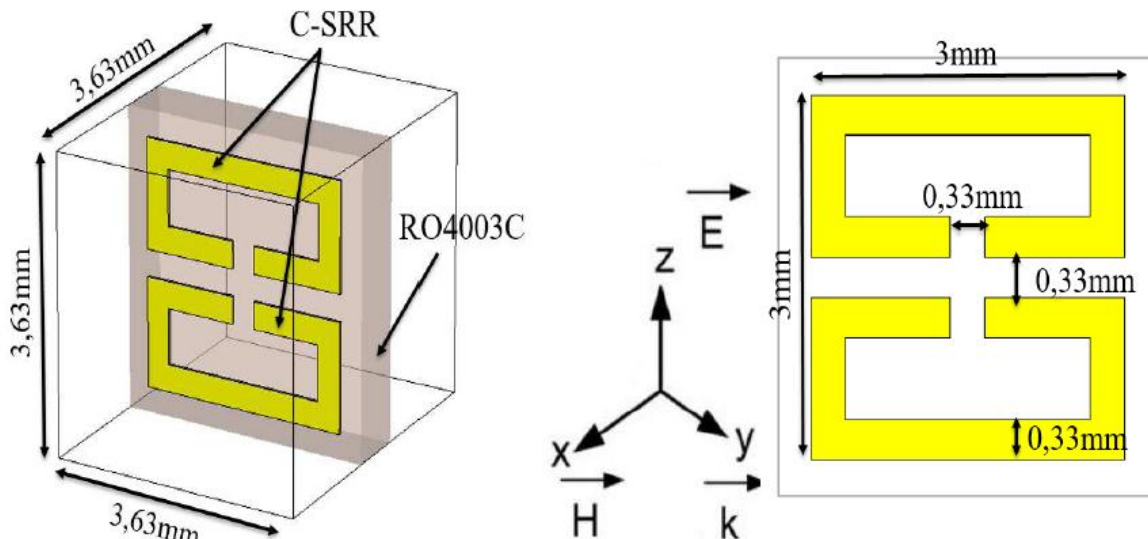


Figure II.120 : Représentation et dimensions d'une unité de cellule d'un SRR en double c [23].

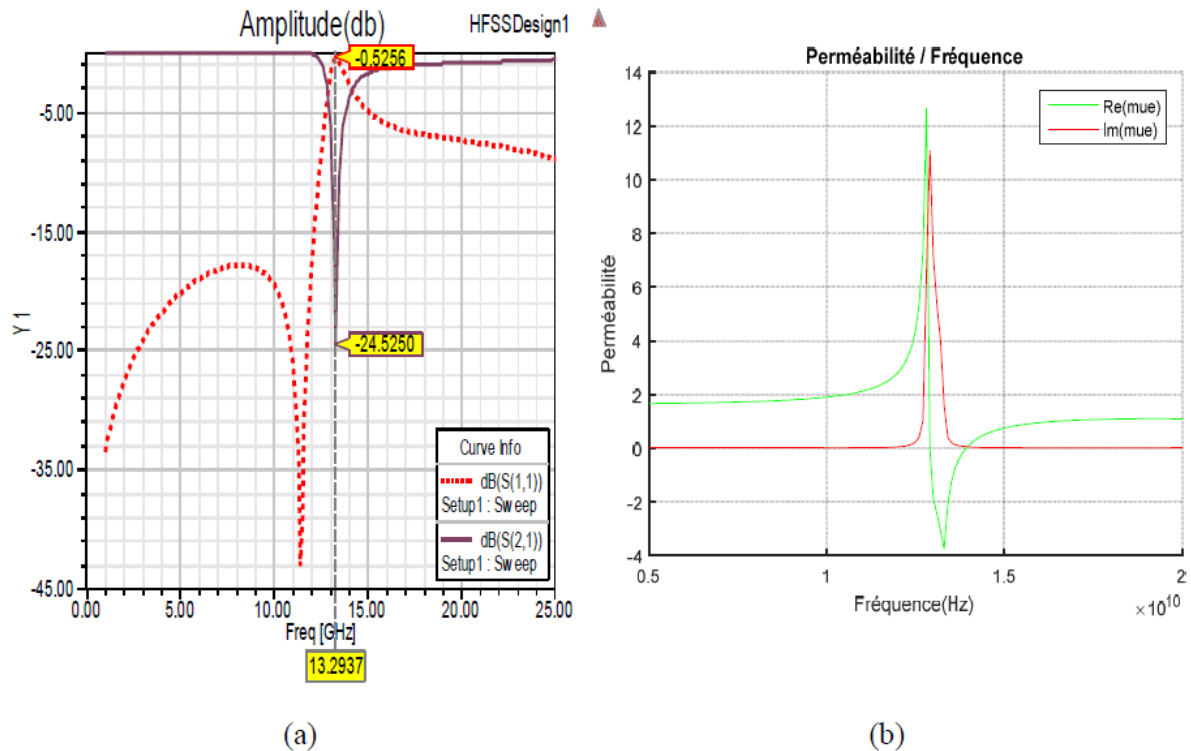


Figure II.21 : SRR en double C avec \vec{E} selon z : (a) Réflection et transmission en dB. (b) Parties réelle et imaginaire de la perméabilité effective [23].

II.6. Les méta-matériaux et leurs applications de filtrage

Le premier travail de l'équipe de M.Burokur était la simulation d'un filtre coupe bande basé sur un réseau de cellules SRR (résonance anneau divisé) et une ligne de transmission 50 Ω (figure II.22), les résultats obtenus par cette équipe montrent un phénomène coupe bande autour de la fréquence de résonance de la cellule SRR [26].

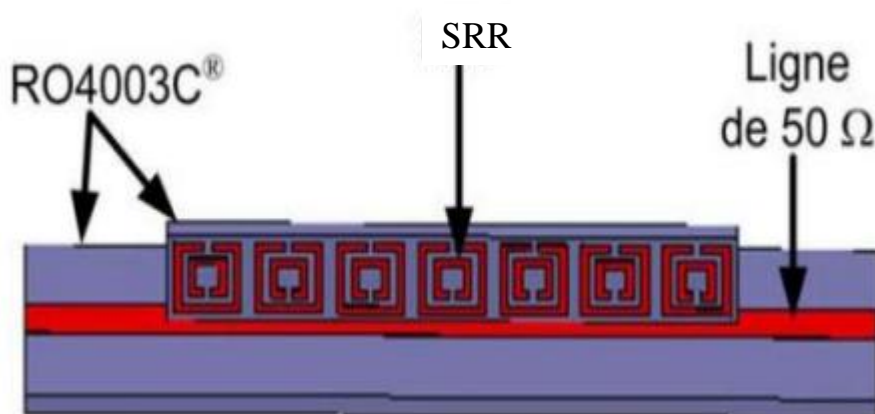


Figure II.22: SRRs associés à une ligne micro-ruban de 50 Ω [26].

La structure est simulée en utilisant le HFSS et la matrice [S] est extraite pour une bande de fréquences allant de 7 GHz à 13 GHz. Les amplitudes normalisées de S11 et de S21 sont données sur la figure .II.23

Les résultats de simulation montrent la valeur de coefficient de transmission S21 a -19 dB pour la fréquence 9.8 GHz.

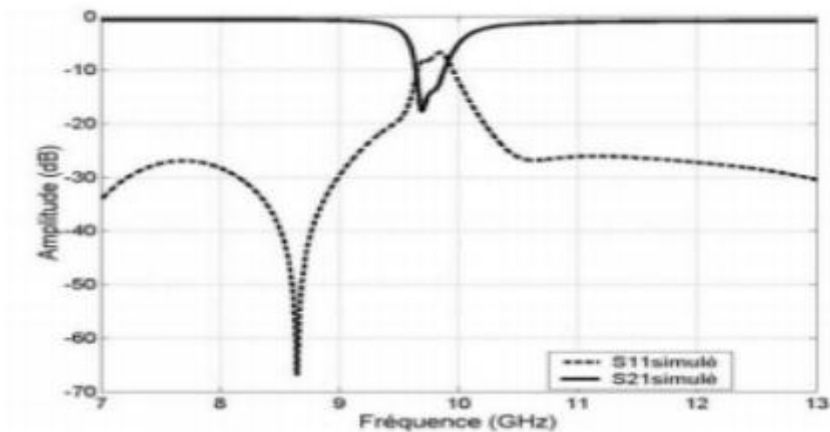


Figure II.23: Résultats de simulation pour les SRRs associés à une ligne micro-ruban de 50Ω [26].

D'autres travaux impliquent la réalisation d'un filtre basé sur un réseau de cellules SRR (résonance anneau divisé) et de petits résonateurs à bande (Fig. II.24) [26]. Les résultats obtenus montrent ce comportement de la bande passante autour de la fréquence de résonance de la cellule SRR. (Figure II.24).

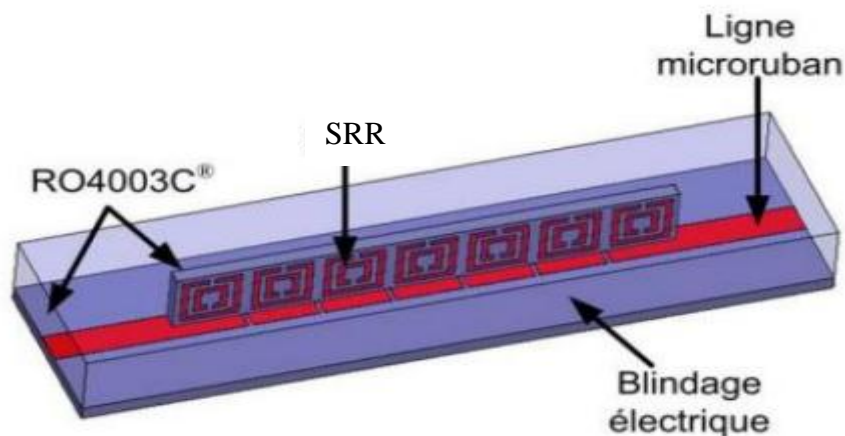


Figure II.24: SRRs associés aux résonateurs micro-rubans [26].

Dans une autre approche de conception, il existe deux structures traditionnelles de filtres associées aux résonateurs SRR et au CSRR afin d'éliminer les plages parasites de filtres et d'améliorer le rejet. [28] La première structure est basée sur un filtre de ligne interconnecté fabriqué à partir de la technologie de bande SRR imprimée à proximité des lignes (Fig. II.25 (a)). La seconde structure est également basée sur un filtre de ligne de conjugaison, Avec les cellules CSRR (Fig. II.25 (b)).

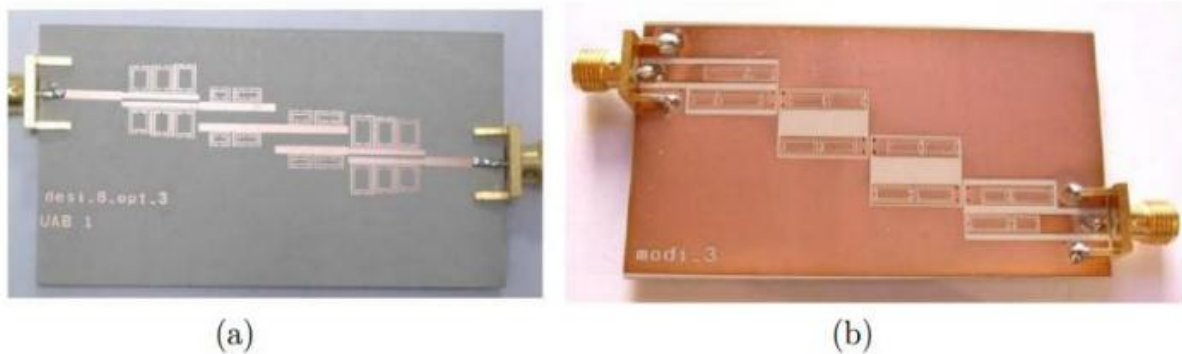


Figure II.25: Structure de filtres à ligne couplée (a) filtre à ligne couplée associée à des cellules SRR (b) Filtre à ligne couplée chargée par des cellules CSRRs [27].

II.7. La technologie micro ruban

Cette technologie est constituée d'un ruban métallique situé sur une face du substrat, le plan de masse étant déposé sur l'autre face du substrat (Figure II.26). Le mode propagé est un mode quasi-TEM dont la distribution des lignes de champs est présentée sur la figure II.27. Cette technologie est très utilisée par les concepteurs de dispositifs hyperfréquences à base du méta matériaux car elle permet une grande souplesse topologique. En effet, la fabrication des circuits est bien maîtrisée et le report d'éléments discrets est assez facilement réalisable. De plus, les circuits micro ruban sont assez aisément reproductibles [28].

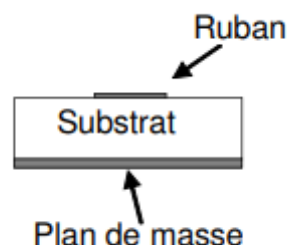


Figure II.26 : configuration d'une ligne en technologie micro ruban

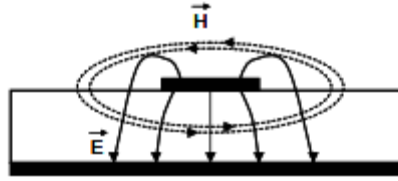


Figure II.27 : configuration des champs électrique (E) et magnétique (H) pour une ligne de transmission en technologie micro ruban.

II.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes concentrés sur les définitions des structures méta-matériaux, qui possèdent des propriétés intrinsèques (perméabilité négative).

Dans la première partie, basée sur la théorie de Vissilago, nous avons d'abord défini les concepts de base régissant les méta-matériaux. Nous avons analysé les travaux les plus importants de l'état de la technique en matière de filtrage.

Les moyens les plus usités pour créer une perméabilité artificielle sont les SRR (split ring remontoirs). Ces derniers sont des boucles métalliques fendues créant une résonance LC assimilable à la résonance ferromagnétique. Pour la permittivité négative. Le principe consiste à utiliser un réseau de fils métalliques .ce qui crée une résonance à la fréquence de plasma. La combinaison des deux structures conduit à des métras matériaux présentant des permittivités et des perméabilités simultanément négatives.

Chapitre III :
Capteurs à base d'un
résonateur
méta-matériau
(Simulation et
réalisation)

III.1.Introduction

Dans ce chapitre, nous allons d'abord étudier et concevoir des structures à base d'un SRR et une ligne micro-ruban qui présentent respectivement une perméabilité négative. Les paramètres « S » du ligne de transmission sont extraits de la simulation électromagnétique sous HFSS. Nous allons d'abord passons à la conception d'un filtre passe-bande à base de l'association d'une cellule SRR carrée et spiral et deux SRR carrée par le biais du logiciel HFSS qui utilise les éléments finis comme méthode de calcul, puis utiliser l'appareil de mesure (Victor network Analyzer) pour mesurer les paramètres S de la structure expérimentalement. Nous déposons trois substances liquides afin de caractériser ces liquides et de prouver la faisabilité d'utiliser la structure proposer comme un biocapteur miniaturisé pour la détection des liquides inconnus. Nous avons aussi fait des comparaisons entre les résultats de simulations et les résultats expérimentales.

III.2. Présentation du logiciel HFSS (High Frequency Structure Simulator)

Le logiciel **HFSS v11.0 (High Frequency Structure Simulator)** d'une soft corporation est un logiciel commercial basé sur la méthode des éléments finis **FEM**. Qui calcule les champs électromagnétiques dans le domaine fréquentiel en résolvant localement les équations de maxwell. Pour cela, il faut construire des objets en trois dimensions (3D) et leur assigner des caractéristiques (type de matériau, taille, épaisseur,...). Il est ensuite nécessaire de spécifier le type des sources électromagnétiques. Il est possible de paramétrer le système et varier ces paramètres lors de la simulation. Les résultats sont visibles sous forme des graphes, un des intérêts de HFSS est sa capacité de donner directement les paramètres S en fonction de la fréquence. L'environnement de développement d'ansoft HFSS fournit une interface intuitive et facile à utiliser pour développer les modèles passifs de circuits RF pour la conception. Celle-ci nécessite les étapes suivantes:

- Génération paramétrique de modèle : créer la géométrie, les bondaries et les Excitations.
- Analyses setup : définir des domaines de fréquence et initialiser de la solution.
- Résultats : créer les rapports 3D, 2D et les tracés des champs.
- Solvloop : l'évolution de solution est complètement automatisée.

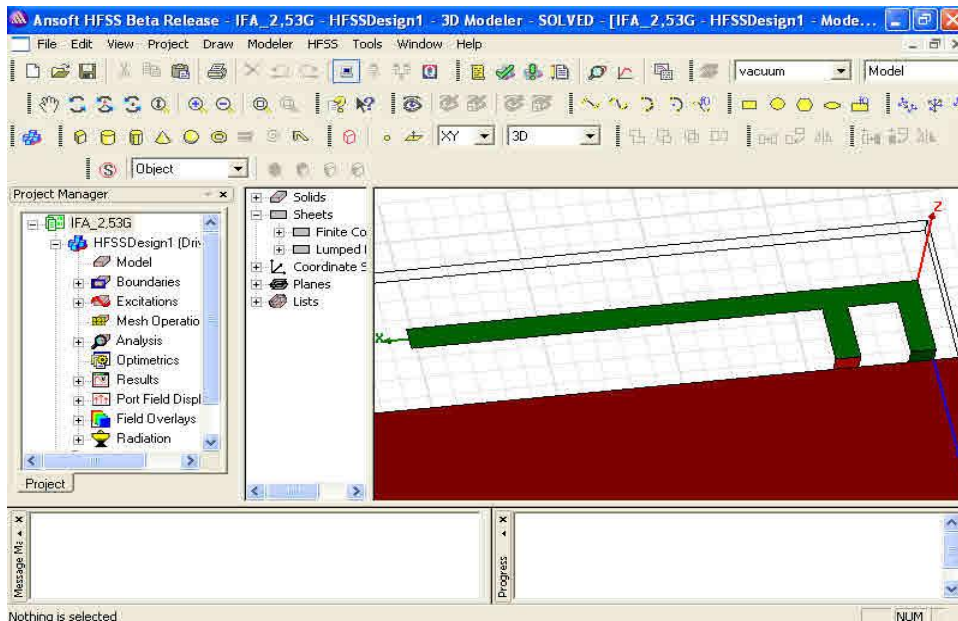


Figure III.1: Fenêtre de HFSS

III.3. Structures résonante à base d'une ligne micro-ruban et un résonateur méta-matériau

Pour produire un comportement main gauche, deux structures différentes doivent être combinées dans une même unité, une qui fournit la permittivité négative et l'autre présente une perméabilité négative.

L'approche résonante est basée sur l'application des cellules SRR, comme montré sur la figure (III.2), lorsqu'elles sont excitées par un champ magnétique axial, présentent des valeurs extrêmes de perméabilité effective dans le voisinage de la fréquence de résonance des anneaux, à savoir très positif/négatif.

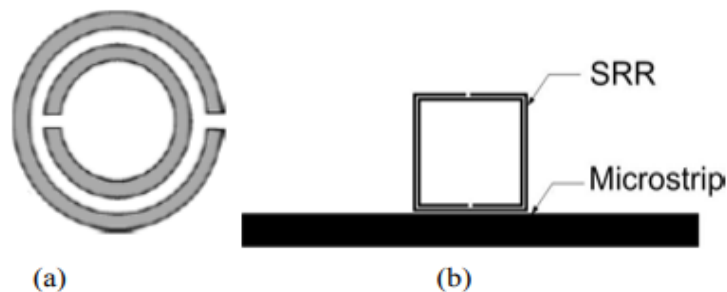


Figure III.2: (a) split ring résonateur (SRR) et (b) SRR-loaded ligne micro-ruban.

Dans la technologie micro ruban, les SRRs ne peuvent être gravées dans le coté du substrat supérieur, à côté de la ligne de transmission, figure(III.2.b), Pour améliorer le couplage, la distance entre la ligne et les anneaux doit être aussi petite que possible. Cette disposition géométrique est adéquate, parce que dans de nombreuses applications la miniaturisation est la demande principale. Bien qu'ayant une plage de fréquences étroites avec la perméabilité négative, les configurations à l'aide des SRRs ont poussé beaucoup d'attention.

III.4. Résultats de simulation

III.4 .1. Conception et réalisation des cellules méta-matériaux SRR

Dans ce chapitre, nous sommes intéressés à l'étude de l'association d'une ligne micro-ruban 50Ω et des résonateurs méta-matériaux pour avoir un biocapteur. Les résonateurs sont situés à proximité de la ligne micro-ruban. L'objectif est de réaliser un filtrage coupe bande autour de la fréquence de résonance du résonateur.

- La première étape vise à concevoir une cellule (SRR) résonnante à une fréquence donnée de travail.
- La deuxième étape consiste à implémentée une ligne micro-ruban 50Ω , cette ligne jouera le rôle de l'excitation des résonateurs.
- L'étape suivante est de déterminer la position optimale de la cellule résonante par rapport à la ligne micro-ruban : le but est de satisfaire les conditions d'excitation requises pour avoir une bonne résonance.
- La quatrième étape consiste à étudier l'association de la ligne micro-ruban au résonateur, la simulation de la structure sous HFSS, ainsi que l'analyse des résultats obtenus.
- La cinquième étape consiste à réaliser la structure et la tester comme un biocapteur avec une comparaison entre les résultats de simulation et les résultats expérimentaux

III.4.2.La cellule SRR carrée

Nous allons traiter dans un premier temps, les cellules unitaires de type SRRs introduites Premièrement par J. Pendry en forme carrée et ensuite reprises par l'équipe de Dr. Smith en forme double carrée.

Ces structures ont le pouvoir de présenter une perméabilité négative dans une bande de fréquence bien déterminée et ont une réponse similaire aux matériaux ferromagnétiques.

La première structure proposée est basée sur des carrés de cuivre et une microbande se couplant (Fig. III.3). Les dimensions sont améliorées et leurs valeurs sont données comme suit:

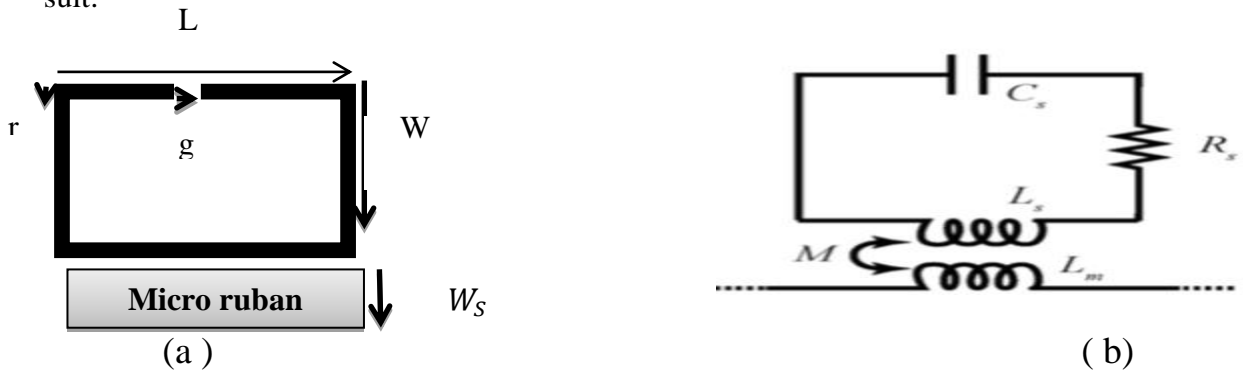


Figure III.3: SRR couplé à un micro-ruban. (a) Schéma du SRR et du micro ruban
(b) circuit équivalent

Le substrat ($L= 30\text{mm}$; $w= 30\text{mm}$; $h=1.9\text{mm}$)

le SRR carrée ($L=7\text{mm}$; $w= 7.5$; $r=0.2 \text{ mm}$; $g= 0.15\text{mm}$)

La ligne Micro-ruban ($L= 30\text{mm}$; $w_s = 1.7\text{mm}$)

Le substrat est du RT / duroid 6010.2LM qui présente une permittivité relative de 10.2

La ligne micro-ruban à une l'impédance caractéristique de 50Ω .

La géométrie et les dimensions du capteur proposé sont illustrées sur la figure III.4.

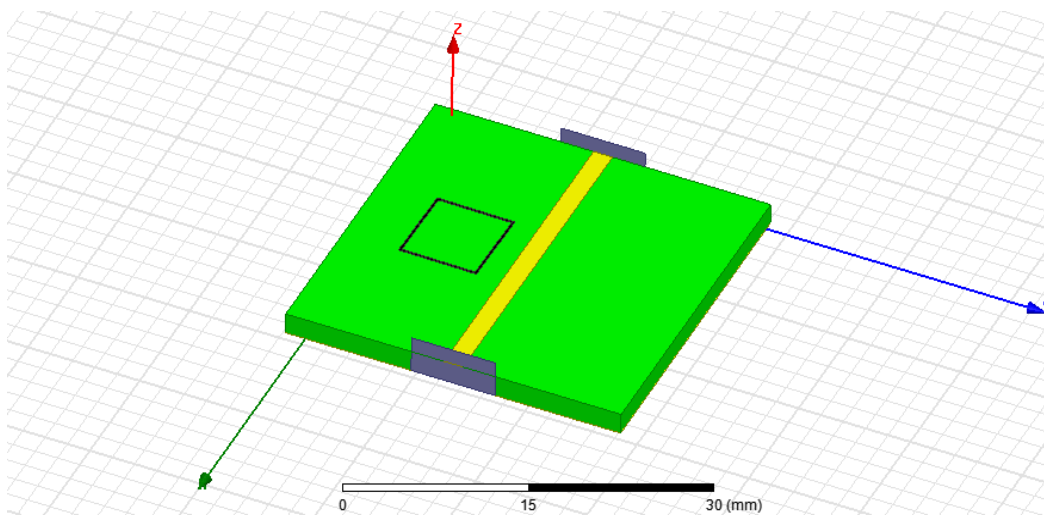


Figure III.4 : capteur proposé à base du SRR carré.

Dans notre travail, nous nous intéressons tout particulièrement au paramètre S21 de transmission.

La figure III. 5. montre l'évolution des coefficients de transmission S21 en fonction de la fréquence. Ces résultats montrent clairement un comportement bande rejetée autour de la fréquence de résonance du résonateur [1.5 GHz].

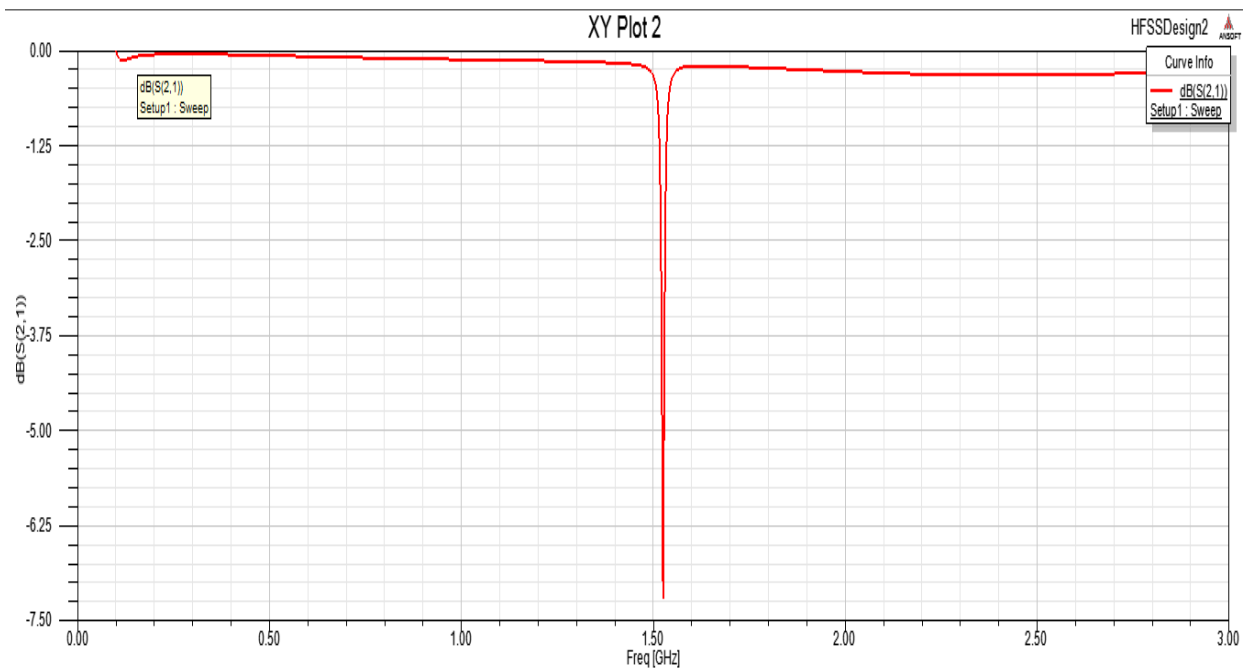


Figure III.5: résultat de simulation S21 du capteur à base du SRR carrée.

Dans ce cas, nous notons que le résonateur carré que nous avons conçu assure une transmission égale de -7,35 dB à une fréquence de 1,53 GHz. Ce phénomène peut être utilisé dans le domaine de la détection biologique et fluïdique.

III.4.3. La cellule SRR carrée deux anneaux

De la figure III.6 le côté externe du carré est égal à $L=7$ et $w=7,5$ mm, la largeur de la piste en cuivre est de 0,20 mm, la largeur de la coupure des anneaux est de 0,2 mm et l'espacement entre les deux anneaux est de 0,20 mm. Le substrat utilisé pour la simulation est le RT / duroid 5880(tm) de chez Rogers qui présente une permittivité relative de 2,2, des pertes tangentielles de l'ordre de 0,0009 et une épaisseur de 1,6 mm et une ligne micro-ruban avec une impédance caractéristique de 50Ω ($L=30$ mm ; $W_S=4,9$ mm) ce substrat sera aussi utilisé dans la plupart des autres simulations.

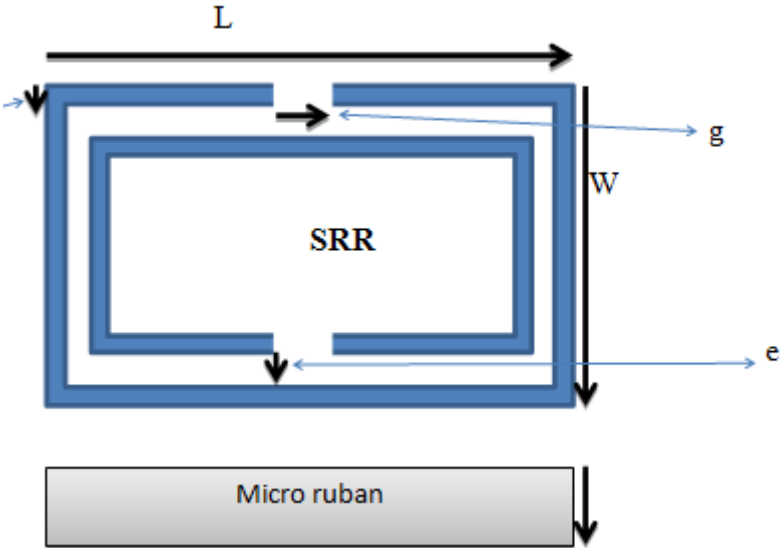


Figure III.6 : Représentation et dimensions d'une unité de cellule du SRR carré.

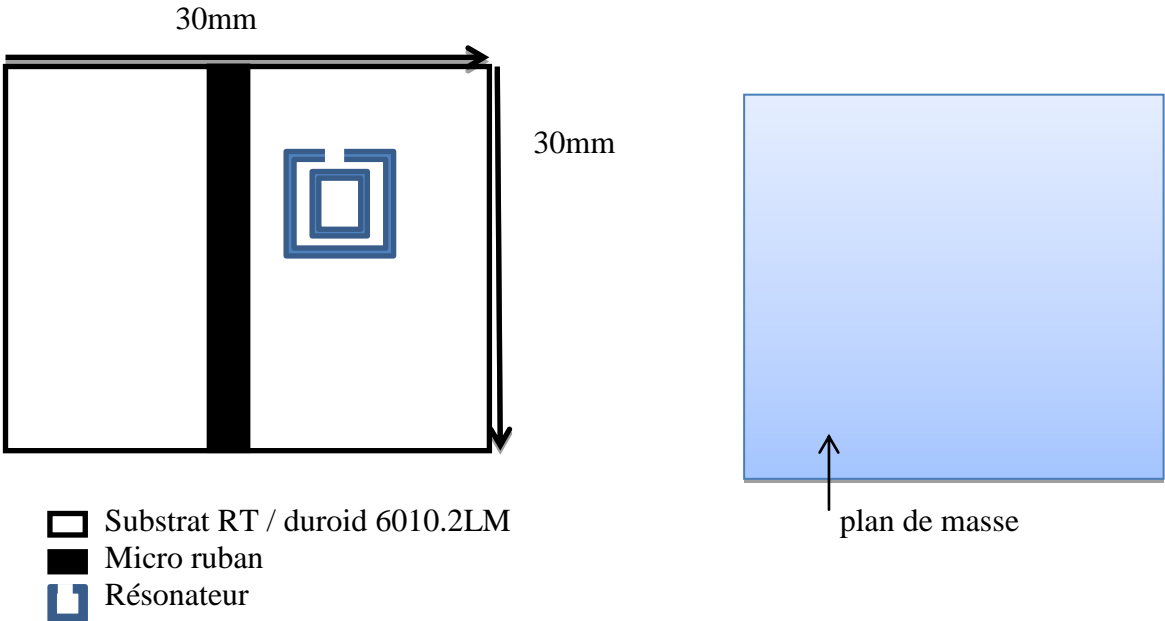


Figure III.7: configuration du filtre coupe bande basé sur l'association de la ligne micro ruban 50 Ω à une cellule Méta matériau SRR.

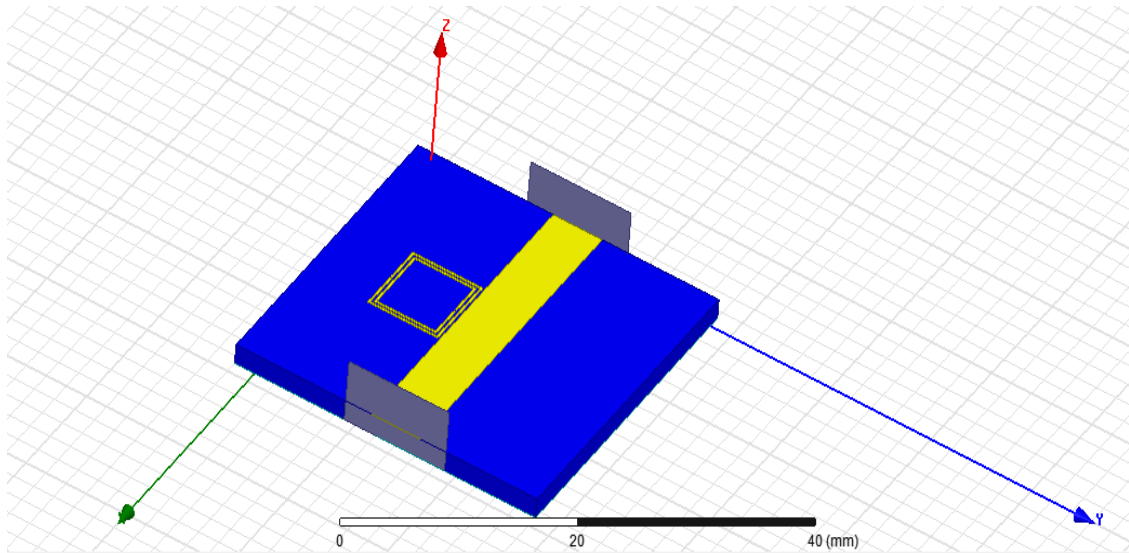


Figure III .8 : Géométrie de cellule du SRR carrée deux anneaux.

La Figure III.9 présente les coefficients de transmission en dB, ces résultats sont obtenus à l'aide de logiciel HFSS.

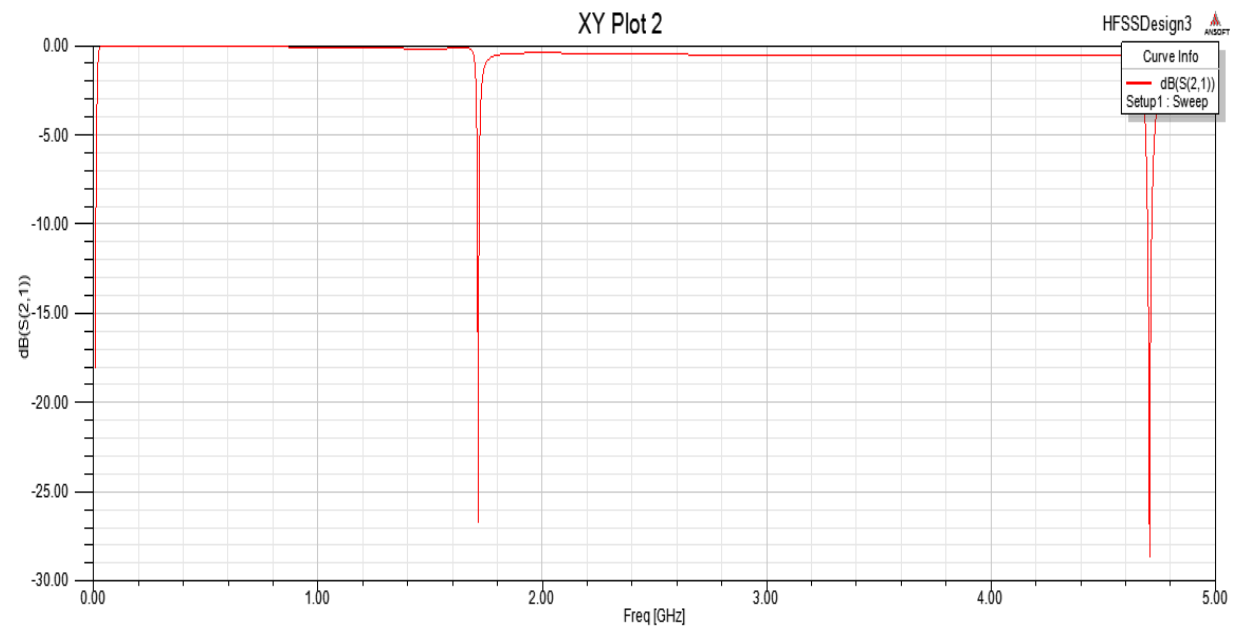


Figure III .9: résultat de simulation S21du SRR carrée à deux anneaux.

Dans ce cas, nous notons que le résonateur carré que nous avons conçu assure une transmission égale -27 dB à une fréquence de 1.70 GHz.

Le mode d'excitation est décrit par un courant oscillant le long de la bande et par un champ magnétique circulant autour de la bande. Le champ magnétique peut stimuler le courant dans le SRR proche lorsque la composante magnétique est parallèle à l'axe du SRR. La résonance se produit lorsque l'énergie électrique stockée dans la capacitance C du SRR est égale à l'énergie magnétique stockée dans la boucle L du SRR. Un champ électrique puissant est confiné dans l'espace C du SRR.

III.3.4. La cellule spirale

Dans cette section, nous allons étudier le capteur avec un résonateur spiral. La structure a été définie sur un substrat de type "Rogers RT/duroid 5880 (tm)" caractérisé par une permittivité de 2.2 et de pertes tangentielles de 0.0009 avec une épaisseur de 1.6 mm. Les dimensions ont été données comme suit :

La taille de substrat : $h = 1.6$ mm.

- La largeur de gap entre les anneaux : $g_a = 0.2$ mm ;
- La largeur de fente : $g_f = 0.15$ mm ;
- La largeur de la ligne micro ruban : $w = 4.9$ mm)

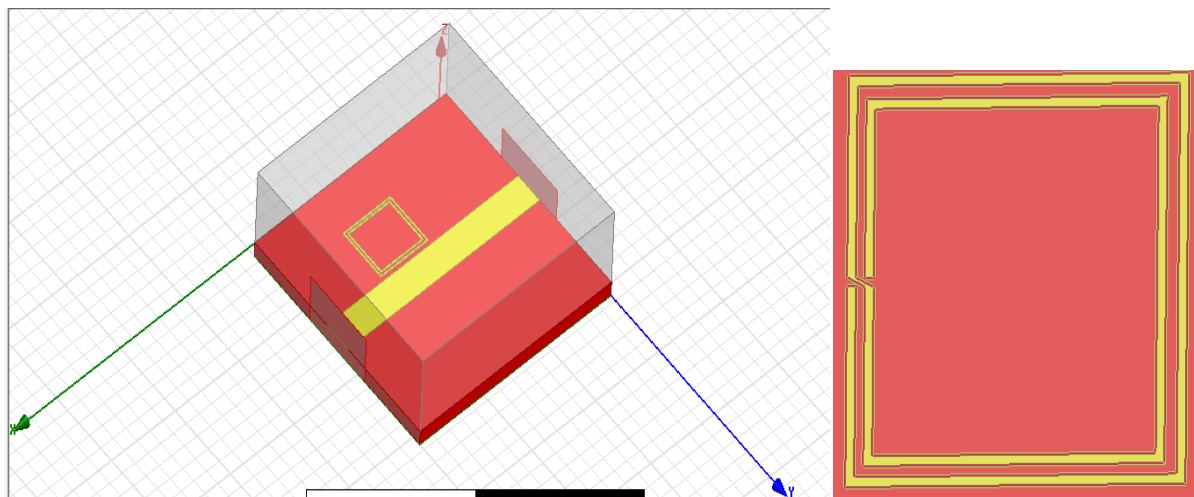


Figure III .10 : Géométrie de la cellule spirale.

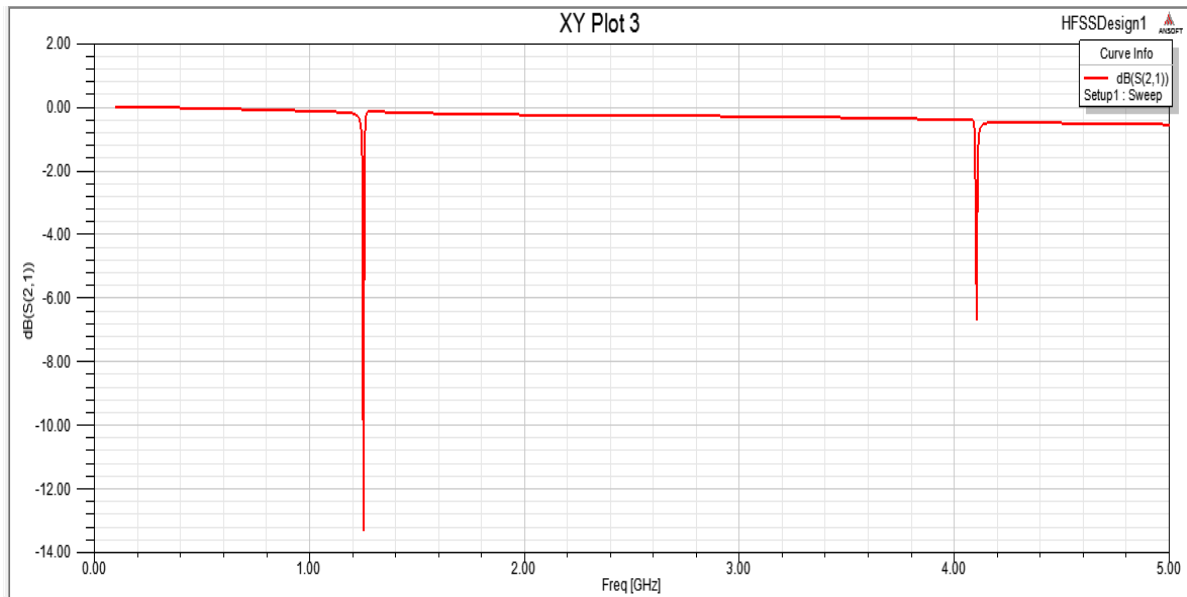


Figure III .11 : résultat de simulation S_{21} de la structure à base du résonateur spirale.

La Figure III.11 représente les coefficients de transmission (S_{21}). La fréquence de résonance obtenue est de 1.22 GHz, avec une atténuation de l'ordre de -13.9 dB.

III.5. REALISATION

Parmi les structures étudiées nous avons choisi la deuxième structure proposée pour la réaliser par la gravure mécanique à l'aide d'une machine CNC au niveau du département d'électronique et de télécommunications, afin de valider les résultats de simulation et de tester cette structure expérimentalement comme un biocapteur et pour mesurer le coefficient de transmission S_{21} par l'analyseur de réseaux vectoriel.

III.6.1. Analyseur de réseau vectoriel (Victor Network Analyzer VNA)

Un analyseur de réseau vectoriel est l'appareil de mesure de référence pour caractériser un quadripôle sous la forme d'une matrice de paramètres S. Il constitue l'équipement de base pour la caractérisation des équipements haute fréquence. Cet appareil présente deux terminaux de sortie qui sont connectés aux deux ports du quadripôle. Chacun des terminaux du VNA transmet successivement un signal harmonique, sépare l'onde incidente de l'onde réfléchie et en mesure l'amplitude et la phase. Ainsi, selon l'endroit où l'excitation est appliquée et le rapport entre ondes effectué, les 4 paramètres S peuvent être calculés à une fréquence donnée. Ce processus est répété pour plusieurs fréquences sur une bande de fréquence donnée.

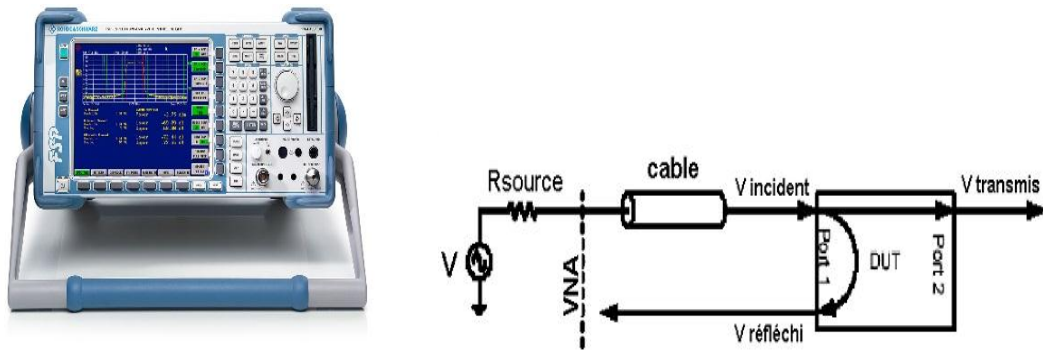


Figure III.12: Analyseur de réseau vectoriel (photo et schéma de principe)

Il est préférable que les équipements utilisés aient la même impédance caractéristique (VNA, câbles, n dispositifs RF ...) (50Ω en général) afin d'éviter des réflexions parasites liées aux désadaptations d'impédance.

III.7.Fabrication et mesure

Afin de démontrer la performance de la structure proposée pour la caractérisation des matériaux liquides, et pour illustrer la relation entre la fréquence de résonance et le liquide à caractériser le capteur montré à la figure III.13 est fabriqué avec les dimensions données à la Figure. Le substrat utilisé est le duroïde 5880(tm), avec une constante diélectrique 2.2, la perte tangente 0.0009, une épaisseur 1.6 mm. La Figure III .14 Montre le capteur fabriqué connecté avec le VNA.



Figure III.13 : le capteur fabriqué avec deux connecteurs SMA.



Figure III .14: le capteur connecter avec l'analyseur de réseaux vectoriel pour caractériser des liquides.

III.6. test expérimentale

Pour la validation expérimentale du principe de détection de notre capteur, nous avons placé des fluides sur le résonateur et enregistré les résultats.

SRR Carrée

Plan de masse

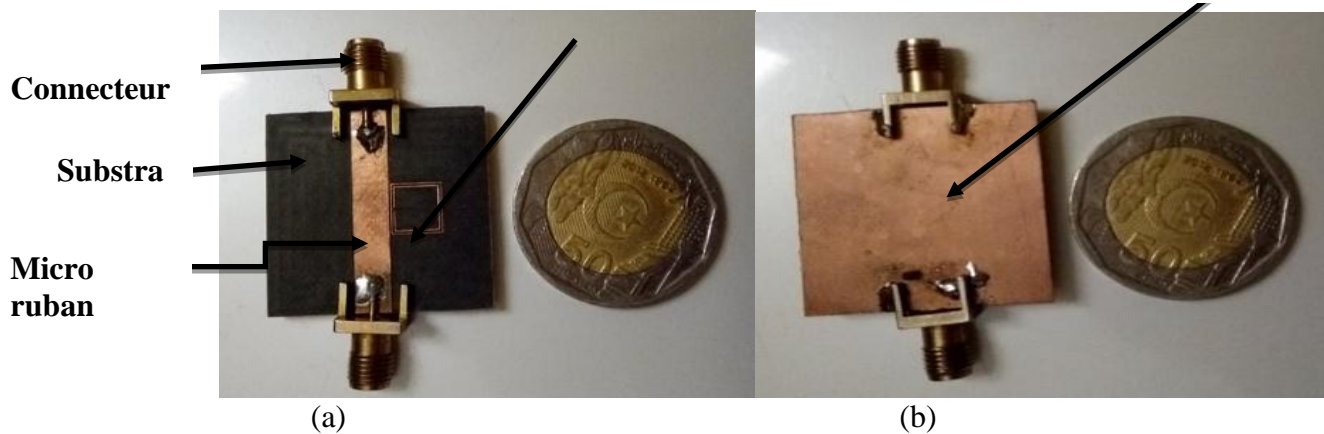


Figure III.15. Photos du capteur basé sur l'association de la ligne micro ruban 50Ω chargé par un résonateur méta-matériau SRR. (a) vue de dessus (b) vue de dessous.

Les résultats de mesure pour les paramètres S21 du capteur sont illustrés à la figure III.16-18. Les réponses mesurées confirment les résultats de simulation. Tout fois, un décalage peut être indiqué par rapport aux résultats de la simulation, en raison des transitions entre la ligne micro ruban et les connecteurs SMA et des incertitudes de fabrication, sans parler de l'incertitude de la simulation. La fréquence de résonance est plus élevée lorsque le SRR est laissé entièrement exposé à l'espace libre (à vide) sans liquide au-dessus. Lors de l'ajout d'une couche de plastique sur le résonateur pour l'isolation un petit décalage vers les fréquences basse.

Par ailleurs, les réponses mesurées convergent avec les résultats attendus puisque nous remarquons un comportement coupe bande autour dans ce cas, nous notons que le résonateur carré que nous avons conçu assure une transmission égale de -8 dB à une fréquence de 3.3 GHz.

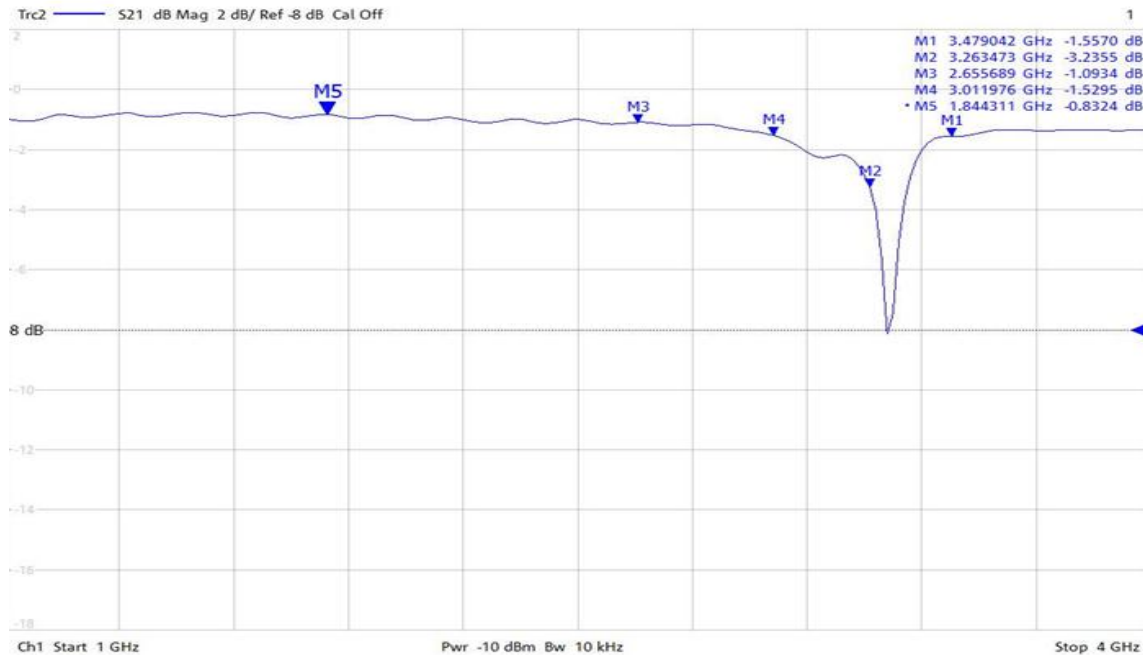


Figure III.16 :S21 mesurée du capteur sans la couche du plastique d'isolation.

III.7.1. Liquides de teste

Pendant la mesure, la réponse du capteur est surveillée en temps réel via l'analyseur de réseau vectoriel avec le rempli de l'échantillon de liquide sur le résonateur. Afin de vérifier expérimentalement, nous allons fait les tests sur les deux liquides suivants, l'huile et l'eau distillée.

a. huile

Nous avons mettre de l'huile de la table sur le résonateur nous observons une fréquence de résonance égale 3.01GHZ avec une atténuation de l'ordre de -4.85 dB

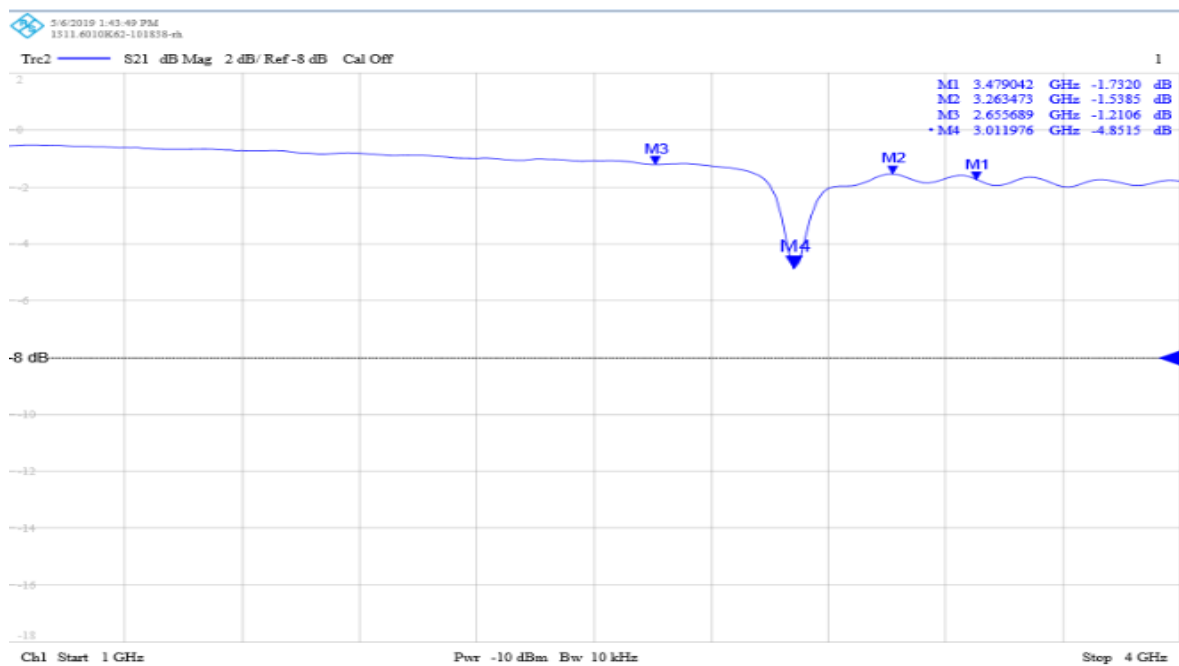


Figure III.17 : S21 lors l'huile est placée au-dessus le SRR.

b. Eau distillée

Nous avons mettre de l'eau distillée sur le résonateur. Nous observons un décalage vers les fréquences basses avec une fréquence de résonance égale 1.84GHZ et une atténuation de l'ordre de -2.29 dB.

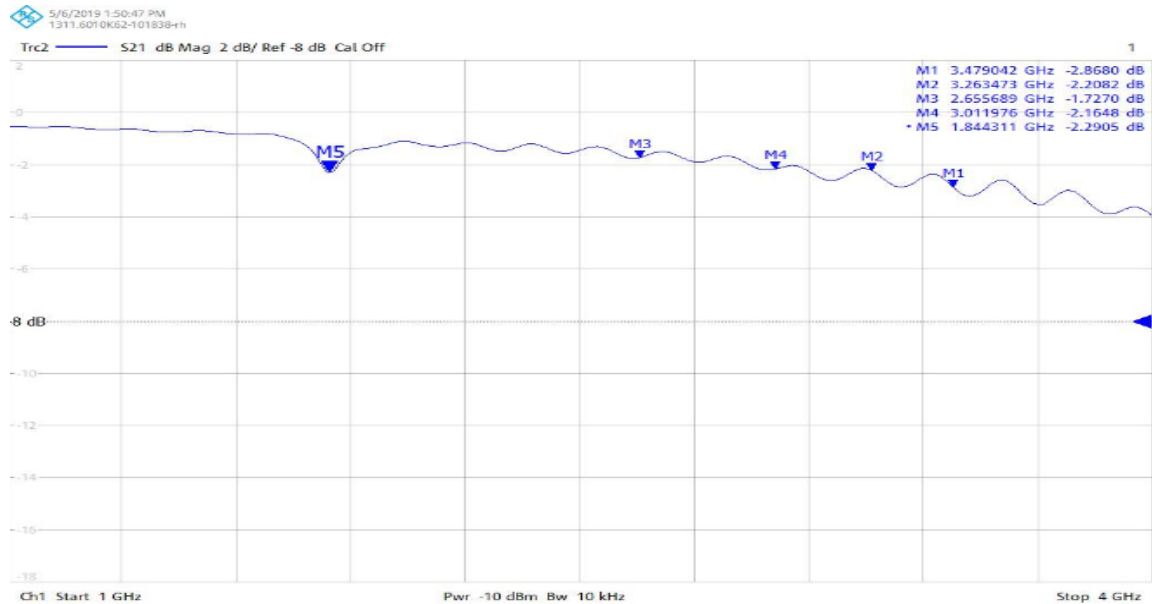


Figure III.18 : S21 lors de l'eau est placée au-dessus le SRR.

Au cours de ces trois tests, nous avons vu que chaque liquide testé à sa propre fréquence de résonance ce qui pour nous aider à le caractériser au future par cette fréquence de résonance.

III.8. Conclusion

Dans un premier temps, nous avons présenté les capteurs à base des cellules SRR (carré et spiral) de J. Pendry qui appartient à la famille des résonateurs méta-matériaux. Par la suite, nous avons présenté pour chaque structure, le coefficient de transmission S21 de la simulation et de l'expérimentale.

Et finalement nous avons testé le capteur proposé par deux liquides. Ces tests prouvent qu'un petit changement du diélectrique sur le résonateur peut provoquer un grand changement dans la fréquence de résonance.



Conclusion Générale

Conclusion Générale

L'objectif de ce mémoire était d'étudier développer les biocapteurs SRR sur différentes est une conception de biocapteur dynamique qui dépend du résonateur à anneau résonant "SRR" avec plusieurs emplacements. L'objectif principal du développement de ce biocapteur est d'accroître la sensibilité de détection des molécules biologiques dans une solution à très basse concentration. Le principe de fonctionnement dépend de la transformation de la fréquence de résonance due à la différence de capacité entre les deux anneaux. Le SRR peut être considéré comme un circuit de résonance LC. A la résonance, il développe un champ électrique intense, réservé et confiné à la zone de gap. Cela rend la fréquence de résonance sensible aux petites modifications du tampon permittif. . Est lié à un système de conversion (biocapteur) qui convertit la réponse biochimique en un signal électrique.

Un biocapteur en temps réel de haute sensibilité basé sur la détection électromagnétique est démontré aux fréquences micro-ondes. Le composant principal du capteur est un SRR, un composant de base en méta matériaux.

Nous avons présenté dans le chapitre 1, l'intérêt du sujet Etude de développement biocapteur et leurs caractéristiques

Nous avons présenté des résultats de simulation d'une cellule unitaire pour chaque modèle. Ces résultats (coefficients de transmission) ont été utilisés, par la suite, afin d'extraire les différents paramètres effectifs S21 Les structures sont conçues à l'aide d'un résonateur (SRR carré et SRR carrée deux anneaux et SRR carrée en spiral). Résonateur fonctionnant dans la gamme de fréquences, appartient au spectre de gauche, de 1GHz à 3GHz, avec un bon ajustement jusqu'à -27 dB et un gain élevé. De plus c'est mini et moins compliqué.

Nous avons testé aussi le biocapteur proposé par deux liquides. Ce test prouve qu'un petit changement du diélectrique posé sur le résonateur peut provoquer un grand changement dans la fréquence de résonance du capteur.



Références

Référence introduction général

[1]. Clark, L.C., Lyon, C., Electrode system for continuous monitoring of cardi vascular surgery. Ann. NY Acad. Sci. 102(1962) 29-45.

Référence chapitre I

[1] Clark Jr, L.C. Trans. Am. Soc. Arti. Intern. Organs 1956, 2, 41-48.

[2] Clark Jr, L.C, Lyons. C. Ann. Ny Acad. Sci. 1962, 102, 29-45.

[3]. ZEHANI Nedjla, Etude et développement de biocapteurs électrochimiques pour la détection de polluants dans un milieu aqueux ,16/10/2015

[4] D'Souza, S.F. Biosens & Bioelectron 2001, 16, 337-353.

[5] Thereunto D.R., Toth K., Durst R.A., Wilson G.S., Biosens & Bioelectron.2001, 16, 121-127.

[6] Guillaume Bailly, «Développement de la transduction microonde appliquée à la détection d'ammoniac. Du nanomatériau au capteur large bande, compréhension des mécanismes et influence des traces d'eau», 07 décembre 2017

[7] Thomas CHRETIENNOT, Biocapteurs hyperfréquences résonants pour l'analyse non-invasive de liquides biologiques, vendredi 20 septembre 2013

[8] A. Toropainen, P. Vainikainen et A. Drossos "Method for accurate measurement of complex permittivity of tissue equivalent liquids" Electronic Letters, vol. 36, n°1, pp.32-34, janvier 2000

[9] H. Esteban, J.M. Catal-Civera, S. Cogollos et V.E. Boria "Characterization of complex permittivity properties of materials in rectangular waveguides using a hybrid iterative method" IEEE Microwave and Guided Wave Letters, vol. 10, n°5, pp.186-188, mai 2000

[10] T. Chen, D. Dubuc, M. Poupot, J.J. Fournié et K. Grenier "Accurate nanoliter liquid characterization up to 40 GHz for biomedical applications: toward noninvasive living cells monitoring" IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 60, n° 12, pp.4171-4177, décembre 2012

[11] W. Withayachumnankul, K. Jaruwongrungee, A. Tuantranont, C. Fumeaux et D. Abbott "Metamaterial-based microfluidic sensor for dielectric characterization" Sensors and Actuators, vol. 189, pp.233-237, 2013.

[12] H.-J. Lee, H.-S. Lee, K.-H. Yoo, and J.-G. Yook, "On the possibility of biosensors based on split ring resonators," in *Proc. 38th Eur. Microw. Conf. (EuMC)*, Oct. 2008, pp. 1222–1225.

[13] H.-J. Lee, H.-S. Lee, K.-H. Yoo, and J.-G. Yook, "DNA sensing using split-ring resonator alone at microwave regime," *J. Appl. Phys.*, vol. 108, no. 1, p. 014908, 2010.

Références

- [14] H.-J. Lee *et al.*, “A planar split-ring resonator-based microwave biosensor for label-free detection of biomolecules,” *Sens. Actuators B, Chem.*, vol. 169, pp. 26–31, Jul. 2012.
- [15] W. Withayachumnankul, K. Jaruwongrungee, C. Fumeaux, and D. Abbott, “Metamaterial-inspired multichannel thin-film sensor,” *IEEE Sensors J.*, vol. 12, no. 5, pp. 1455–1458, May 2012.
- [16] W. Withayachumnankul, K. Jaruwongrungee, A. Tuantranont, C. Fumeaux, and D. Abbott, “Metamaterial-based microfluidic sensor for dielectric characterization,” *Sens. Actuators A, Phys.*, vol. 189, pp. 233–237, Jan. 2013.
- [17] A. Ebrahimi, W. Withayachumnankul, S. Al-Sarawi, and D. Abbott, “High-sensitivity metamaterial-inspired sensor for microfluidic dielectric characterization,” *IEEE Sensors J.*, vol. 14, no. 5, pp. 1345–1351, May 2014.
- [18] Larbi Benkhaoua, *Student Member, IEEE*, Mohamed Taoufik Benhabiles, Smail Mouissat, and Mohamed Lahdi Riabi, Miniaturized Quasi-Lumped Resonator for Dielectric Characterization of Liquid Mixtures, *IEEE SENSORS JOURNAL*, VOL. 16, NO. 6, MARCH 15, 2016

Référence chapitre II

- [1] K. Buell, H. Mosallaei, and K. Sarabandi, “A substrate for small patch antennas providing tunable miniaturization factors,” *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 54, p. 1350–1356, 2006.
- [2] Maslovski, P. Ikonen, I. Kolmakov, and S. Tretyakov, “Artificial magnetic materials based on the new magnetic particle: Metasolenoid,” *Progress in Electromagnetics Research (PIER)*, vol. 54, p. 61-81, 2005.
- [3] J. B. Pendry, A. J. Holden, W. J. Stewart and I. Youngs: « Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructures, » *Physical Review Letters*, Vol. 76, No. 25, pp. 4773-4776, 17 June 1996.
- [4] Cui, T. et al, «Metamaterials». Theory, Design, and Applications», Springer, 2010.
- [5] V. Veselago: «The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of μ and ϵ », *Soviet Physics Uspekhi*, Vol. 92, no. 3, pp. 517-526, 1967.
- [6] J.B. Pendry, A.J. Holden, D.J. Robbins, W.J. Stewart. «Low frequency plasmons in thin-wire structures», *J. Phys. Cond. Matter*. 10, pp.4785-4809, 1998.
- [7] J.B. Pendry, A.J. Holden, D.J. Robbins, W.J. Stewart. «Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena», *IEEE Trans. Microwave Theory Techn.* 47, pp. 2075-2084, 1999.

Références

- [8] V. G. Veselago, "The Electrodynamics of Substances with Simultaneously Negative Values of Epsilon and μ ," *Soviet Physics Uspekhi*, vol. 10, no. 4, pp. 509–514, 1968.
- [9] Hicham Lalj. Conception et caractérisation de filtres et systèmes antennaires Reconfigurables chargés par des résonateurs Méta-matériaux sub-longueur d'onde. Science de l'ingénieur [physics] INSA de Rennes, avril 2014. Français.
- [10] Weiglhofer, W.S., Lakhtakia, A. "Introduction to complex mediums for optics and Electromagnetics". SPIE Press, Bellingham, WA, USA (2003).
- [11] JAKSIC,Z, DALARSSON,N and MAKSIMOVIC, M. "Electromagnetic Structures Containing Negative Refractive Index Metamaterials", IEEE, Serbia and Montenegro, 2005, pp.145-155.
- [12] D. R. Smith, W. J. Padilla, D. C. Vier, S. C. Nemat -Nasser, and S. Schultz, "Composite medium with μ and permittivity", *Phys. Rev. Lett.*, vol. 84, no. 18, May 2000, pp. 4184-4187.
- [13] R. A. Shelby, D. R. Smith et S. Schultz, « Experimental verification of a negative index of refraction », *Science*, vol. 292, p. 77/79, 2001.
- [14] D.R. Smith, W.J. Padilla, D.C. Vier, S.C. Nemat-Nasser, S. Schultz. « Composite Medium with simultaneously negative permability and permittivity.» *Phys. Rev. Lett.* .84, 2000: 4184-4187.
- [15] Chen, Xudong, Grzegorzczuk, Tomasz M., Wu, Bae-Ian, Pacheco Jr., Joe, & Kong, Jin Au, "Robust Method to Retrieve the Constitutive Effective Parameters of Metamaterials," *Phys. Rev. E.*, 70, 016608, (2004).
- [16] S. Moraud, " Etude et conception de nouvelles topologies de filtres destinés à être intégrés aux différents niveaux de la charge utile d'un satellite de télécommunications", Université de Limoges, thèse 1998.
- [17] E. Hanna, "Synthèse et Réalisations avec des Zéros de Transmission de Filtres Planaires Miniaturisés à Topologies Fractales en Substrat Suspendu", thèse à l'Université de Bordeaux 1, Juillet 2006.
- [18] J.B.PENDRY, A.J.HOLDEN, D.J ROBBINS, et W.J.STEWART, "Magnetism from conductors and enhanced non-linear phenomena". *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* 47, p.2075-2084 (1999).
- [19] K.Aydin, I.Bulu, K.Guven, M.Kafesaki, C.M.Soukoulis, and E.Ozby, "Investigation of magnetic resonances for different split-ring resonator parameters and designs," *New Journal of Physics* 7. 168 .2005.
- [20] J. D. Baena, J. Bonache, F. Martín, S. R. Marqués, F. Falcone, T. Lopetegui, A. G. M. Laso, J. García-García, I. Gil, M. F. Portillo, and M. Sorolla, "Equivalent-Circuit Models for

Références

Split- Ring Resonators and Complementary Split-Ring Resonators Coupled to Planar Transmission”, IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES, VOL. 53, NO.4,pp.1451-1461,april 2005 .

[21]. N. Katsarakis, M. Kafesaki, I. Tsiapa, E. N. Economou, and C. M. Soukoulis, “High transmittance left-handed materials involving symmetric split-ring resonators,” *Photon. and Nanostruct.: Fundam. and Appl.* 5, 149 (2007).

[22] J.B.PENDRY, A.J. HOLDEN, D.J.ROBBINS, et W.J.STEWART, “Extremely Low Frequency Plasmons in Metallic Meso structures”, *Phys. Rev. Lett*, vol. 25, pp.4773-4776, 1996.

[23] BERRIAH AMIN BELGUIDOUM DJABER. ‘Etude et développement de prototypes d’antennes souples à base de méta-matériaux’ Soutenu le 15 juin 2016

[24] R. Marqués, F. Mesa, J. Martel, and F. Medina, “Comparative analysis of edge- and broadside-coupled split ring resonators for metamaterial design - theory and experiments”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 51, pp. 2572–2581, October 2003.

[25] S. O’Brien and J. B. Pendry, “Magnetic activity at infrared frequencies in structured Metallic photonic crystals”, *Journal of Physics: Condensed Matter*, vol. 14, no. 25, pp. 6383–6394, July 2002.

[26]. Shah Nawaz Burokur, " Mise en œuvre de méta-matériaux en vue d’application aux circuits microondes et aux antennes", Thèse de doctorat, Université de Nantes, 2008.

[27]. Hicham Lalj, "Conception et caractérisation de filtres et systèmes antennaires reconfigurables chargés par des résonateurs Méta-matériaux sub-longueurs d’onde," thèse sous le sceau de l’Université européenne de Bretagne pour obtenir le titre de docteur de l’INSA de Rennes Spécialité : Electronique et télécoms, 2014.

[28] J.-S Hong et M.J.Lancaster, "Microstrip Filters for RF/ Microwave Application", John Wiley and Sons, Inc., 2001.