

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la technologie

Département d'Electronique

Mémoire

Présenté pour obtenir

LE DIPLOME DE MASTER

FILIERE : Télécommunications

Spécialité : Systèmes des Télécommunications

Par

- **MOUHOUB Yousra**
- **DJABALLAH Ghozlane**

Intitulé

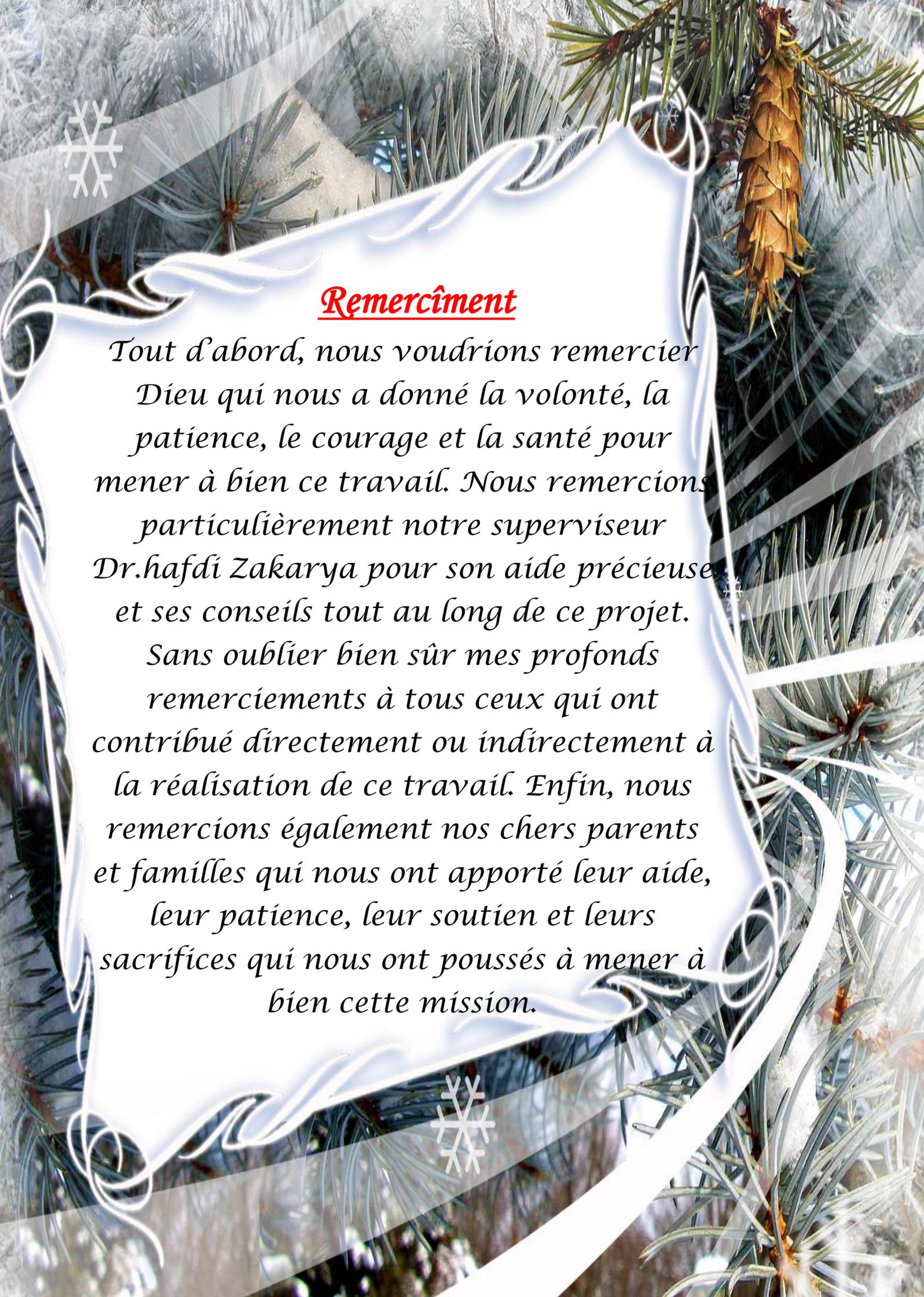
***Conception et réalisation de Métamatériau non linéaire
pour application de capteur de liquides***

Soutenu le : 26/06/2024

Devant le Jury composé de :

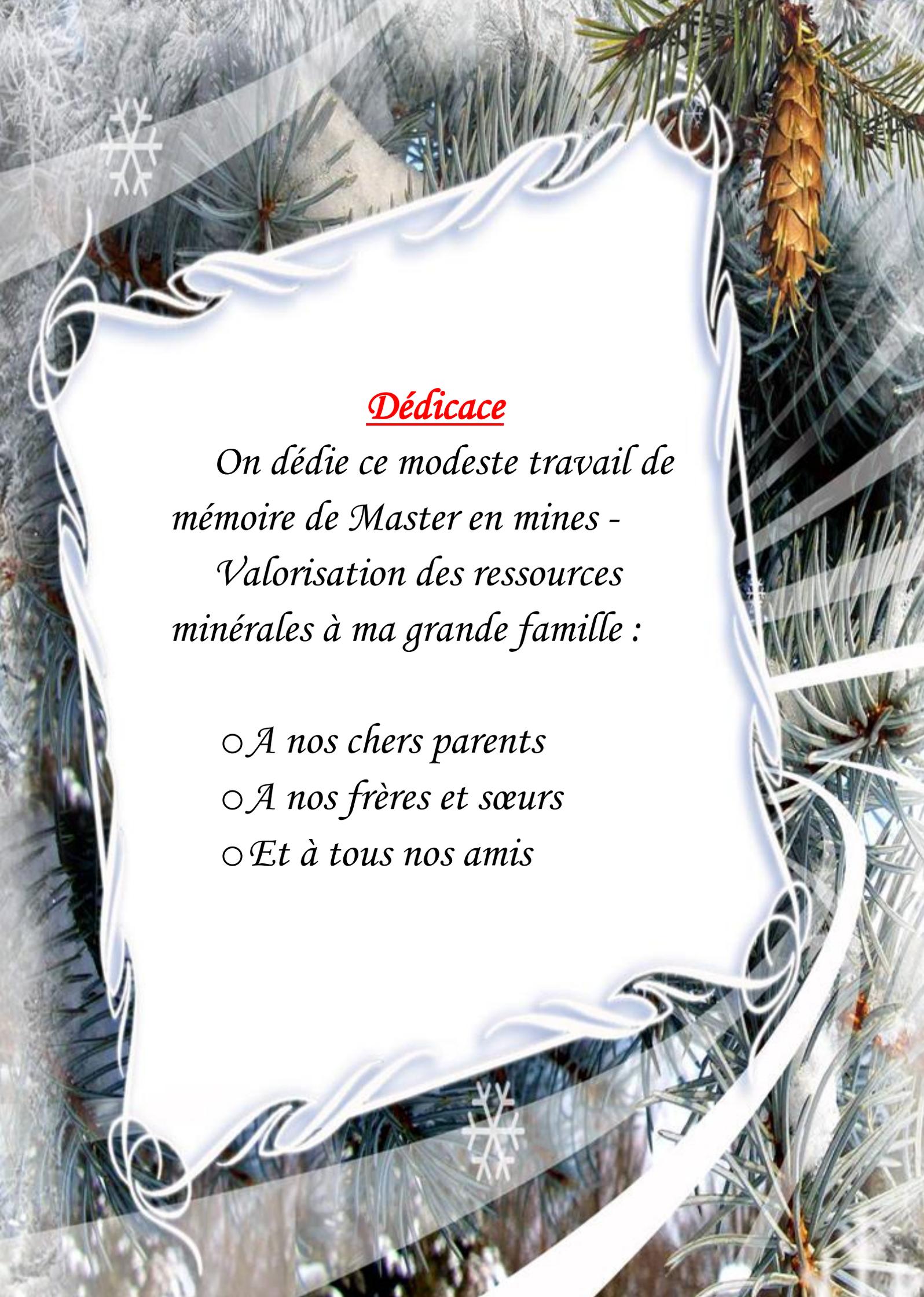
<i>Nom & Prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Etablissement</i>
<i>Mr. BEHIH Mohamed</i>	<i>MAA</i>	<i>Président</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>Dr. HAFDI Zakarya</i>	<i>MAB</i>	<i>Encadreur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>Dr. BRAHIMI Abdelhalim</i>	<i>MAB</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>

Année Universitaire 2023/2024



Remercîment

Tout d'abord, nous voudrions remercier Dieu qui nous a donné la volonté, la patience, le courage et la santé pour mener à bien ce travail. Nous remercions particulièrement notre superviseur Dr.hafdi Zakarya pour son aide précieuse et ses conseils tout au long de ce projet. Sans oublier bien sûr mes profonds remerciements à tous ceux qui ont contribué directement ou indirectement à la réalisation de ce travail. Enfin, nous remercions également nos chers parents et familles qui nous ont apporté leur aide, leur patience, leur soutien et leurs sacrifices qui nous ont poussés à mener à bien cette mission.



Dédicace

*On dédie ce modeste travail de
mémoire de Master en mines -
Valorisation des ressources
minérales à ma grande famille :*

- A nos chers parents*
- A nos frères et sœurs*
- Et à tous nos amis*

Résumé

Ce travail vise à étudier la conception et la réalisation d'un capteur biochimique à base métamatériaux. La première partie se concentre sur la caractérisation des structures à métamatériaux, discutant leurs historique, notions de bases, propriétés différentes classes de métamatériaux. Pour la deuxième partie, un rappel sur les matériaux et leurs classes est suivi de structures à métamatériaux avec des perméabilités ou permittivités négatives. Les méthodes d'extraction des paramètres effectifs, de la procédure classique Nicolson-Ross-Weir avec deux approches dérivées de cette méthode, sont présentées. Différentes structures résonantes sont analysées à l'aide de simulations électromagnétiques avec HFSS. La troisième partie porte sur l'étude d'un capteur de liquides à base de métamatériaux, aboutissant à un capteur formé d'un multi-résonateur à anneaux fendus couplé à une ligne microruban linéaire. L'insertion d'une diode varactor est enfin testée pour confirmer l'effet non linéaire et accordable sur la structure réalisée. Le capteur montre une haute sensibilité et un faible coût de fabrication, avec des dimensions miniaturisées.

Mots clés : métamatériau, paramètres effectifs, SRR, capteur, diode varicap, non linéaire

Abstract

This work aims to study the design and implementation of a biochemical sensor based on metamaterials. The first part focuses on the characterization of metamaterial structures, discussing their history, basic concepts, properties, and different classes of metamaterials. The second part includes a review of materials and their classes, followed by metamaterial structures with negative permeabilities or permittivities. Methods for extracting effective parameters, including the classic Nicolson-Ross-Weir procedure and two approaches derived from this method, are presented. Various resonant structures are analyzed using electromagnetic simulations with HFSS. The third part studies a metamaterial-based liquid sensor, resulting in a sensor composed of a multi-resonator with split rings coupled to a linear microstrip line. The insertion of a varactor diode is tested to confirm the non-linear and tunable effect on the realized structure. The sensor demonstrates high sensitivity and low manufacturing cost, with miniaturized dimensions.

Keywords: metamaterial, effective parameters, SRR, sensor, varactor diode, non linear

المخلص:

يهدف هذا العمل إلى دراسة تصميم وإنتاج جهاز استشعار كيميائي حيوي يعتمد على المواد الخارقة. يركز الجزء الأول على توصيف هياكل المواد الخارقة، ويناقد تاريخها، والمفاهيم الأساسية، وخصائص فئات مختلفة من المواد الخارقة. بالنسبة للجزء الثاني، يتبع التذكير بالمواد وفئاتها هياكل المواد الخارقة ذات النفاذية أو السماحية السلبية. يتم عرض طرق استخراج المعلمات الفعالة، من إجراء نيكولسون-روس-وير الكلاسيكي مع نهجين مشتقين من هذه الطريقة. ويتم تحليل هياكل الرنين المختلفة باستخدام عمليات المحاكاة الكهرومغناطيسية مع أش أف أس أس. أما الجزء الثالث فيتعلق بدراسة مستشعر السائل المعتمد على المواد الاصطناعية، مما يؤدي إلى مستشعر يتكون من مرنان متعدد الحلقات مقسم إلى خط خطي دقيق. تم أخيرًا اختبار إدخال الصمام الثنائي المتغير للتأكد من التأثير غير الخطي والقابل للضبط على الهيكل المنتج. يُظهر المستشعر حساسية عالية وتكلفة تصنيع منخفضة، مع أبعاد مصغرة.

الكلمات المفتاحية: المواد الخارقة، المعلمات الفعالة، المستشعر، الصمام الثنائي فاركتور، غير خطية

Symboles & Abréviations

i. Liste des symboles

D	déplacement électrique
E	champ électrique (V/m)
ε	permittivité (F/m)
ε_0	permittivité du vide. $\varepsilon_0 = 8,8541878176 \times 10^{-12}$ (F/m)
ε_r	permittivité relative
H	champ magnétique (A/m)
k	nombre d'onde (rad/m)
μ	perméabilité (H/m)
μ_0	perméabilité du vide. $\mu_0 = 1,2566370614 \times 10^{-6}$ (H/m)
μ_r	perméabilité relative
n	indice de réfraction
ω	fréquence angulaire
P(ω)	polarisabilité électrique
r	coefficient de réflexion
σ	conductivité électrique (S/m)
V	vitesse de propagation élastique (élastique)

ii. Abréviations

Abréviations en français

EM	ElectroMagnétique
MMG	Materiau Main gauche
MMD	Materiau Main Droite
MP	Métamatériau Photonique
MST	Materiau Sous Test
NRW	Nicolson-Ross-Weir

Abbreviations en Anglais

BC-SRR	Broadside Coupled Split Ring Resonator
CPW	Coplanar Waveguide

DNG	Double Negative (medium)
DPS	Double Positive (medium)
ENG	Epsilon Negative
MEMS	Micro-ElectroMechanical Systems
MNG	Mu Negative
NEMS	Nano-ElectroMechanical Systems
PPR	Postif Poisson Ratio
NPR	Negatif Poisson Ratio
ZPR	Zero Poisson Ratio
SRR	Split Ring Resonator
TE	Transverse Electric
TM	Transverse Magnetic

Table des matières

Chapitre 1 Généralités sur métamatériaux

Introduction générale.....	1
I. PRINCIPES ET FONDAMENTAUX SUR LES METAMATERIAUX.....	17
I.1. Propagation d'onde dans une structure périodique.....	2
I.2. Structures à métamatériaux.....	2
I.2.1. Historique sur des métamatériaux.....	2
I.3. Paramètres physiques agissants sur les structures à métamateriaux.....	3
I.3.1. La perméabilité.....	3
I.3.2. La permittivité.....	4
I.3.3. Vitesse de phase et vitesse de groupe.....	4
I.4. Les métamatériaux.....	5
I.4.1. Définition.....	5
I.4.2. Propriétés électromagnétiques des métamatériaux.....	6
I.4.2.1.L'inversion de la loi de snell-Descartess.....	6
I.4.2.2.L'inversion de l'effet doppler.....	7
I.4.3.Types des métamateriaux.....	8
I.4.3.1 Selon la fréquence :.....	8
I.4.3.2.Selon le phénomène physique.....	10
I.5.Conclusion.....	14

Chapitre 2: Etude et caractérisation des structures à métamateriau

II.1 Introduction.....	17
II.2 CARACTERISATION DES METAMATERIAUX.....	17
II.2.1. Approche de Veselago.....	17
II.2.1.1. Vecteur de Poyting.....	18
II.3. Métamatériaux avec une permittivité et /ou perméabilité négative.....	19
II.3.1. Milieux avec une Permittivité Négative (ENG).....	19
II.3.2. Milieux avec une Perméabilité Négative (MNG).....	19
II.3.3. Milieux avec une Permittivité et Perméabilité Négative (DNG).....	21
II.4. Méthodes de calcul des paramètres effectifs.....	22
II.4.1 Méthode de Smith (Méthode 1).....	22

II.4.2 Méthode de Ziolkowski (Méthode 2)	23
II.4.3. Exemple d'extraction de paramètres effectifs	23
II.4.3.1. Structure en double Oméga.....	24
II.5. Métamatériaux dans des nouvelles technologies	26
a) Cape d'invisibilité.....	26
b) Antennes pour communication 5G	26
c) Métamatériau pour application anti-séismique	27
d) Capteur à métamatériau pour détection de cancer.....	269
II.6 Conclusion.....	30

Chapitre 3: Conception et optimisation des capteurs à métamatériau

III.1 Introduction	34
III.2 DEFINITION D'UN CAPTEUR.....	34
III.2.1.Introduction aux techniques de caractérisation de liquides	35
III.2.1.1. Techniques de caractérisation de capteurs.....	35
III.2.1.2. Caractéristiques d'un capteur	35
III.2.1.3. Métamatériaux non linéaires	37
III.3. Etude des structures résonantes à base des SRR.....	38
III.3.1.Couplage entre une structure résonante et une ligne de transmission	39
III.3.1.1. Étude paramétrique de la structure proposée	40
III.4. Capteur à base d'SRR	43
III.4.1. Structure multi résonateurs.....	43
III.4.1.1 Conception et fabrication.....	43
III.5 RESULTATS ET DISCUSSIONS.....	46
III.5.1. Expérimentation avec un mélange eau-éthanol.....	49
III.5 .2. Insertion de la Diode varactor	50
III.5.2.1. La diode varactor.....	50
III.5.2.2. Simulation et expérimentale	51 μ
III.5.2.3. Résultats et discussion	51
III.5.3. Analyse du capteur	52
III.6 Conclusion	56
Conclusion générale	59

Liste des Figures

Figure.I.1	Modèle de Newton de l'onde élastique.....	2
Figure.I.2	Classification des matériaux en fonction de leur permittivité et perméabilité.....	5
Figure.I.3:	Réfraction d'une onde électromagnétique (a) Cas de réfraction positive (b) cas de réfraction négative.....	7
Figure .I.4	Bande de fréquences	8
Figure.I.5	Métamatériau de Smith	9
Figure.I.6	Réseau de paires de nanotiges	9
Figure.I.7	Métamateriaux Téraherz (a) SRR configuration (b)perméabilité relative complexe.....	10
Figure.I.8	a) structure d'un SRR chiral (b) cellule unitaire d'un métamteriau chiral (c) métamatériau chiral fabriqué	10
Figure.I.9	Illustration conceptuelle des métamateriaux non linéaire (a)1ère approche (b) 2ème approche (c) 3ème approche	11
Figure .I.10	Ligne CRLH contrôlée à l'aide d'un MEMS	12
Figure.I.11	Classement des matériaux acoustiques en fonction de leur masse volumique ρ et leur compressibilité C	13
Figure.I.12	(a) structure cubique composée de billes de plomb (b) : métamatériau acoustique capable de bloquer des ondes sonores	13
Figure.I.13	Exemples de métamatériaux mécanique	14
Figure.II.1	Trièdre indirect caractérisé par la règle de la main gauche de Veselago.	18
Figure .II.2	Trièdre (\vec{E} , \vec{H} , \vec{K}) pour une onde électromagnétique se propageant (a) dans un MMD et (b) dans un MMG.	18
Figure II. 3	Réseau de tiges métalliques minces	19
Figure.II.4	La structure rouleau suisse introduite par Pendry.	20
Figure.II.5	Anneaux métalliques doubles fendus.....	20
Figure.II.6	Métamateriau proposé par Smith et al.....	21
Figure.II.7	Structure BC-SRR proposée par R. Marqués	22
Figure.II.8	Structure en double Oméga.....	24
Figure.II.9	Cellule unitaire de résonateur en double Oméga. (a) Coefficients de réflexion et transmission (b) Partie réelle et imaginaire de l'impédance d'onde (c) Partie réelle et imaginaire de la perméabilité (d) Partie réelle et imaginaire de la permittivité.....	25
Figure.II.10	La cape d'invisibilité de J.Pendry.....	26

Figure.II.11 Antenne à métamatériau.....	27
Figure .II.12 Diagrammes de bandes de métamatériaux auxétique générés avec des cellules élémentaires (10 m*10 m*10 m) avec fabrication de barres (béton) un angle (a) a = 0° ; b) a = 30° ; c) a = 45°.....	28
Figure.II.13 Comparaison de fréquences de résonance et de coefficients de réflexion entre (a) sérum tumoral et cancer type pctm2 (b) côlon sain et côlon cancéreux	29
Figure.III.1 Structure d'un capteur.....	34
Figure.III.2 Exemple de linéarisation de caractéristiques.	36
Figure.III.3 exemple de fonction de transfert.....	37
Figure.III.4 (a) Métamatériau constitué de résonateurs à anneau fendu avec diodes varicap (b)réseaux de fils et d'SRR intégrés dans un diélectrique non linéaire (c) cristal liquide à métamatériau non linéaire sous forme de fishnet.....	379
Figure.III.5 Les différentes structures SRR qui sont utilisés dans cette étude.....	38
Figure.III.6 Couplage entre une structure résonante et une ligne de transmission.....	39
Figure.III.7 Coefficient de transmission pour les différentes étapes de conception.....	40
Figure.III.8 Coefficient de transmission pour les différentes étapes de conception autour de fréquence de résonance.....	40
Figure.III.9 Coefficient de transmission S21 en fonction de la fréquence pour des orientations différentes.....	41
Figure.III.10 Coefficient de transmission S21 en fonction de la fréquence.....	42
Figure.III.11 Coefficient de transmission S21 en fonction de la fréquence pour une ouverture d'anneau différente.....	43
Figure.III.12 Ligne de transmission.....	44
Figure.III.13 Les dimensions de ligne de transmission.	44
Figure.III.14 (a) Design de la structure à réaliser (b) dimensions résonateur.....	45
Figure.II.15 (a) Photo du capteur réalisé (b) manip de mesure	46
Figure.III.16 Simulation et mesures de la transmission dans le cas du vide.....	47
Figure.III.17 Mesures de transmission de l'eau, de l'éthanol et du vide.	48
Figure.III.18 Mesures de coefficient de transmission d'échantillons de mélange de l'eau-éthanol pour le calibrage du capteur. La fraction volumique de l'eau est changée de 0% à 100% avec un pas variable 25%(a) entre 2 et 3GHz (b) autour de fréquence de résonance.....	50
Figure.III.19 Symbole de la diode Varactor	51
Figure.III.20 (a) diode varactor insérée dans le circuit (b) diode varactor en HFSS.....	51

Figure.III.21	Circuit équivalente de la diode varac tor SMV2203-040LF.....	52
Figure.III.22	Réponses S ₂₁ pour une capacité variable C = (0,1, 0,3, 0,5, 0,7, 0,9) pF.....	53
Figure.III.23	Réponses S ₂₁ en fonction de la tension inverse V _R de la diode.....	54
Figure.III.24	Courbe d'ajustement (fitting) de la permittivité relative du mélange ε _m en fonction de la fréquence de résonance fr.	55

Liste des Tableaux

Tableau.II.1	Comparaison des paramètres effectifs de la structure de Omega.....	26
Tableau.III.1	Etat de l'art des techniques d'analyse RF et hyperfréquences sur les liquides.....	35
Tableau.III.2	Dimensions de capteur conçu	38
Tableau.III.3	Coefficient de transmission pour les différentes étapes de conception	39
Tableau.III.4	Comparaison entre les différentes orientations	39
Tableau.III.5	Influence de l'espacement S _f	42
Tableau.III.6	Influence de l'ouverture.....	43
Tableau.III.7	Les différentes longueurs de la structure.....	45
Tableau.III.8	Résumé des résultats de simulation et de mesures de la transmission dans le cas du vide.....	47
Tableau.III.9	Résumé des résultats de mesures de la transmission dans le cas de vide, de l'eau et de l'éthanol.....	48
Tableau.III.10	Décalage de résonance après le dépôt de l'eau et de l'éthanol pure.	49
Tableau.III.11	Mesures de coefficient de transmission d'échantillons de mélange de l'eau-éthanol.....	50
Tableau.III.12	Paramètres de la diode SMV2203-040LF.....	52
Tableau.III.13	Réponses S ₂₁ pour une capacité variable	53
Tableau.III.14	Réponses S ₂₁ en fonction de la tension inverse V _R de la diode SMV2203.....	54
Tableau.III.15	Comparaison entre les caractéristiques du capteur	55

Introduction générale

Les métamatériaux sont des structures artificielles pseudo-homogènes qui possèdent des propriétés électromagnétiques non disponibles dans la nature. Ce qui distingue les métamatériaux est la capacité d'avoir à la fois une perméabilité et une permittivité négatives.

Les métamatériaux non linéaires sont des matériaux qui présentent des effets non linéaires lorsqu'ils sont exposés à des signaux électriques ou des champs magnétiques. Ils incluent une variété de matériaux tels que les cristaux optiques et les semi-conducteurs. L'objectif de cette mémoire est de faire la conception et réalisation de métamatériaux non linéaires pour appliquer des condensateurs liquides.

Note travail est essentiellement effectué dans une gamme de fréquences [0,5 GHz, 4 GHz] Dans cette bande de fréquences, on trouve de nombreuses applications : Applications Industrielles, Scientifiques et Médicales (ISM) (Équipements Médicaux, Communication de Données Industrielles), Communications Mobiles et Sans Fil (GSM, 3G, 4G), Réseaux Domestiques (Wi-Fi, Bluetooth).

Ce manuscrit est divisé en trois chapitres :

➤ Le premier chapitre commence par un bref historique sur les structures périodiques, après nous passerons aux structures à métamatériaux, leur historique et leurs paramètres physiques, ensuite nous présentons leur définition, propriétés électromagnétiques et leurs types.

➤ Le deuxième chapitre nous présente les caractéristiques des métamatériaux et les métamatériaux avec une permittivité et/ou perméabilité négative. Après nous étudions les milieux avec une permittivité et perméabilité négative (DNG), enfin nous donnons les méthodes de calcul des paramètres effectifs.

➤ Dans le troisième chapitre nous présentons les résultats de la simulation à l'aide du logiciel commercial HFSS. Nous commençons par la définition du capteur et ses caractéristiques et nous parlons aussi de métamatériaux non linéaires. Puis nous passons à l'étude des structures et conception des capteurs à base de SRR et nous fournissons l'expérience et la simulation. Finalement, nous testons l'effet de la structure avec la diode varactor.

Nous terminerons la mémoire par une conclusion générale.

Chapitre I

Généralités sur métamatériaux

I. Principes et fondamentaux sur les métamatériaux

I.1. Propagation d'onde dans une structure périodique

Depuis un certain temps déjà, les structures périodiques ont fait l'objet d'études, que ce soit pour le son, les ondes mécaniques ou électromagnétiques. La propagation d'une onde dans une structure périodique était déjà étudiée par Newton au XVIIe siècle, qui cherchait notamment un modèle pour calculer la vitesse du son. L'étude de la propagation des ondes dans des structures périodiques a été développée en mécanique, optique, électronique, physique des solides et électromagnétisme de la fin du XVIe au XXe siècle, en parallèle avec le développement des mathématiques et de la physique [1] [2].

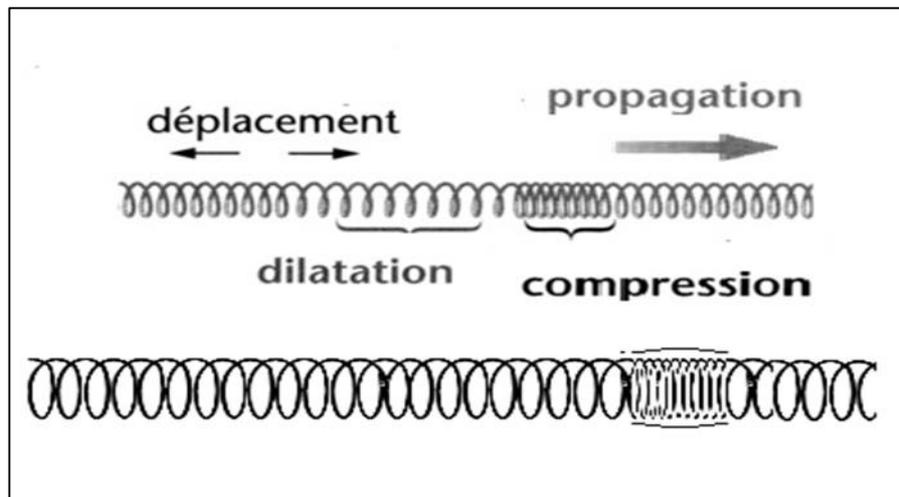


Figure I.1 : Modèle de Newton de l'onde élastique

Les structures périodiques sont réputées pour leur capacité de filtrage dans ces divers domaines. Par exemple, le miroir de Bragg, employé dans le domaine de l'optique, est le cas le plus célèbre. Le problème de la propagation dans un milieu périodique est résolu par le théorème de Floquet-Bloch (1883 et 1928) qui réalise les calculs sur une cellule du réseau. Brillouin (1931) a simplifié l'analyse des bandes passantes et des bandes interdites en définissant les zones. L'espace réciproque, le diagramme de Brillouin et la zone de Brillouin ont été créés par Brillouin. [1]

I.2. Structures à métamatériaux

I.2.1. Historique sur des métamatériaux

Voici un chronogramme qui résumé l'historique d'évolution des métamatériaux :

- 1968 : Veselago introduit la théorie de matériaux doublement négatifs au niveau de la perméabilité et de la permittivité.
- 1999 : Pendry montre qu'il est possible d'obtenir des perméabilités négatives ($\mu < 0$) avec des structures « Split Ring Resonator » (SRR)
- 2000: Smith montre théoriquement la faisabilité d'un métamatériau
- 2001: Validation expérimentale de la réfraction négative par Smith
- 2002: Concept de lentille parfaite de Pendry
- 2005: Approche ligne de transmission par Caloz et Itoh
- 2006: Application métamatériaux : antenne, coupleur, ... [3]

R.A. Schelby est l'auteur de la première réalisation effective d'un matériau (milieu) à paramètres négatifs. Il est intéressant de souligner que les deux composantes de cette réalisation sont connues depuis longtemps, mais aucune tentative de les combiner n'a été réalisée.

I.3. Paramètres physiques agissants sur les structures à métamatériaux

I.3.1. La perméabilité

- * La perméabilité représente l'opposition d'un matériau au passage du champ d'excitation.
- * Un milieu amagnétique tel que l'eau, le cuivre, l'air sont peu perturbés par l'excitation Magnétique, la perméabilité est alors voisine de la perméabilité absolue du vide μ_0

$$\mu \cong \mu_0 \quad (\text{I.1})$$

Contrairement au milieu amagnétique, un milieu ferromagnétique est fortement modifié Par l'excitation magnétique, et sa perméabilité n'est pas constante ; elle varie en fonction ,

de B :

$$\mu_r = \frac{B}{\mu_0 H} \quad (\text{I.2})$$

Ceci provient du fait que B et H ne sont pas proportionnels.

Dans le domaine microondes, certains matériaux ferromagnétiques [4] et composites antiferromagnétiques tels que MgF2 et FeF2 [5] peuvent présenter une perméabilité

négative. Cependant, ces matériaux sont lourds et présentent de fortes pertes magnétiques. La possibilité de créer un magnétisme artificiel ; c'est-à-dire un magnétisme sans constituant magnétique est alors très intéressant.

I.3.2. La permittivité

Dans les diélectriques, le champ électrique incident induit une polarisation du milieu qui est une fonction dépendante du champ électrique mais qui peut être développé en séries de Taylor [6].

Le vecteur déplacement électrique D prend en compte les charges et les courants liés par:

$$D = \varepsilon_0 E + P(E) \quad (I.3)$$

La polarisation exprime à quel point le champ est capable de séparer les charges positives et négatives dans le matériau. Pour chaque fréquence la réponse sera différente et ceci est exprimé par : $P(\omega) = \varepsilon_0 \chi(\omega) E(\omega) \dots\dots (I.4)$ où χ est la susceptibilité électrique.

En combinant les équations : $\varepsilon(\omega) = \varepsilon_0 (1 + \chi(\omega)) \quad (I.5)$

Pour les conducteurs, la permittivité est exprimée par : $\varepsilon(\omega) = \varepsilon_0 + \frac{\sigma(\omega)}{j\omega} \quad (I.6)$

où σ est la conductivité.

Quand la permittivité effective prend des valeurs négatives, l'amplitude de l'onde plane décroît exponentiellement en traversant la structure. Pour une source avec une fréquence loin de n'importe quelle fréquence de résonance, ou supérieure à la fréquence du plasma, ε dans le milieu est positif [6].

Pour les métamatériaux, une permittivité effective négative peut être observée dans le cas d'un milieu filaire constitué de matériaux artificiels formés par des rangées électriquement denses de fils de conducteurs minces.

I.3.3. Vitesse de phase et vitesse de groupe

La vitesse de phase est la vitesse pour laquelle la phase de l'onde se propage dans L'espace.

Elle est donnée par [6] : $V_p = \frac{\omega}{k} \quad (I.7)$

Avec : k étant le vecteur d'onde.

La vitesse de groupe représente le dérivé de la fréquence angulaire de l'onde par rapport au

nombre d'onde k . Elle est définie par : $V_g = \frac{\partial \omega}{\partial k} \quad (I.8)$

I.4. Les métamatériaux

I.4.1. Définition

Les métamatériaux sont des structures artificielles pseudo-homogènes possédant des propriétés électromagnétiques non disponibles dans la nature. La propriété particulière qui a fait la renommée des métamatériaux est la possibilité d'avoir une perméabilité et une permittivité simultanément négatives. Ces structures présentent une structuration (cellule de base constituant le matériau) très petite devant la longueur d'onde guidée. Il est admis que la limite d'homogénéité est fixée à des tailles inférieures à $\lambda_g/4$ [3].

Les paramètres constitutifs sont la perméabilité μ et la permittivité ϵ qui sont reliés à l'indice de réfraction par : $n = \pm\sqrt{\epsilon_r\mu_r}$ (I.9)

La Figure I.2 montre le diagramme permittivité-perméabilité et indice de réfraction.

Les trois premières configurations ne sont pas nouvelles. En effet la zone (+, +) où les milieux sont doublement positifs (DPS) correspond aux matériaux classiques dits matériaux main droite (MMD), comme par exemple les matériaux diélectriques isotropes.

Les milieux avec une permittivité (ENG, (-, +) : 'epsilon négatif') ou une perméabilité (MNG, (+,-) : 'mu négatif') négative sont aussi connus depuis longtemps dans l'électromagnétisme.

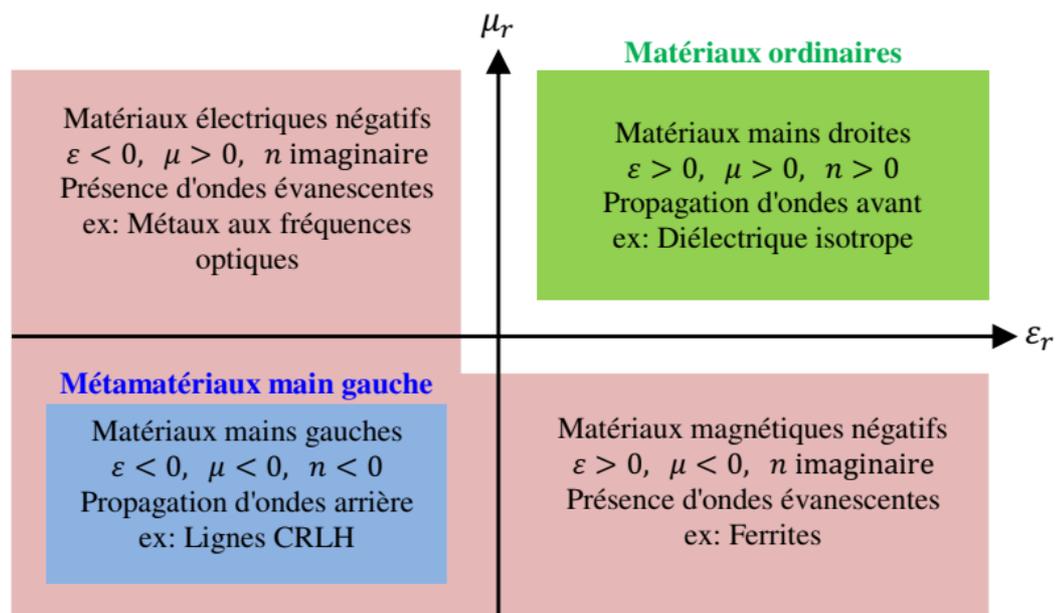


Figure I.2 : Classification des matériaux en fonction de leur permittivité et perméabilité

Le modèle de Drude-Lorentz qui s'applique à la plupart des matériaux prévoit les régions au-dessous de la fréquence plasmas où la permittivité est négative. Les matériaux ferrimagnétiques produisent des régions de perméabilité négative due aux fortes interactions magnétiques dans ces matériaux.

Les trois classes de matériaux (DPS, ENG et MNG) peuvent être trouvées dans la nature, par contre les milieux doublement négatifs (DNG, (-,-)) sont inexistantes dans la nature mais physiquement ils sont réalisables.

Dans la littérature ils existent plusieurs synonymes de métamatériaux pour désigner les matériaux (milieux) main gauche (MMG), ils se résument comme suit :

Matériaux main gauche (MMG) (left-handed materials) : ce terme souligne la propriété fondamentale des métamatériaux, qui est l'opposition entre la vitesse de phase et la vitesse de groupe.

Matériaux à indice de réfraction négatif (negative refraction index materials) : cette appellation décrit les milieux 2D et 3D.

Matériaux doublement négatif (double negative materials) : cette appellation mentionne les signes de la permittivité et la perméabilité du matériau, donc elle ne peut pas être utilisée hors contexte.

Milieu de Veselago (Veselago medium) : cette appellation ne donne aucune propriété physique du matériau mais elle rend hommage au scientifique considéré comme le père des métamatériaux.

Matériaux à onde inversée (backward wave materials) : cette appellation souligne une autre propriété des métamatériaux.

I.4.2. Propriétés électromagnétiques des métamatériaux

I.4.2.1. L'inversion de la loi de Snell-Descartes

Une des remarquables propriétés des milieux main gauche est leurs indices de réfraction négatifs. Dans le cas où la loi de Snell n'est pas inversée, c'est-à-dire que les deux milieux ont le même indice de réfraction (les deux milieux sont positifs ou les deux sont négatifs), les rayons incidents se réfractent avec un angle θ_t vecteur de poynting S_2 et le vecteur d'onde K_2 sont dans la même direction [1]. La loi de Snell est donnée par :

$$n_i \sin \theta_i = n_t \sin \theta_t \quad (\text{I.10})$$

La Figure I.3 (b) montre l'interface entre un milieu main droite et un milieu main gauche, dans ce cas, l'angle d'incidence θ_i et l'angle de réfraction θ_t ont des signes opposés. Le vecteur de poynting \vec{S}_2 et le vecteur d'onde \vec{k}_2 se retrouvent dans deux directions opposées et la loi de Snell peut être écrite sous une forme plus générale :

$$S_1 / n_i / \sin \theta_i = S_2 / n_t / \sin \theta_t \quad (I.11)$$

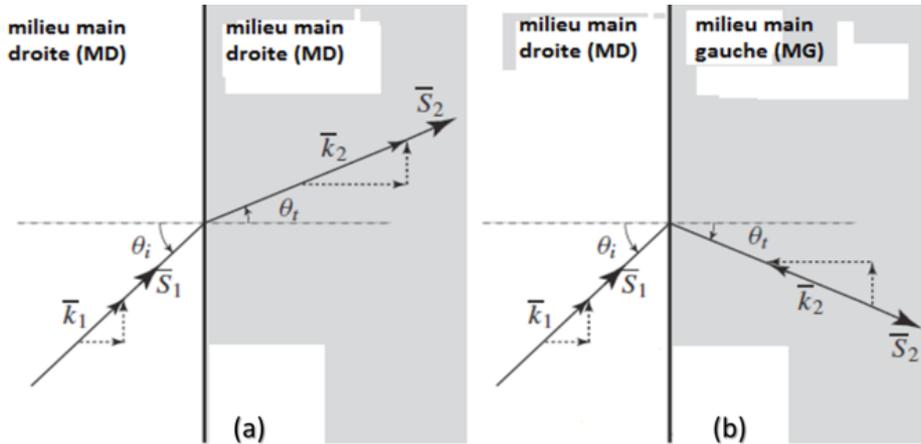


Figure I.3 : Réfraction d'une onde électromagnétique (a) Cas de réfraction positive (b) cas de réfraction négative

I.4.2.2. L'inversion de l'effet doppler

Quand le récepteur mobile détecte le rayonnement de la source, la fréquence détectée du rayonnement dépend de la vitesse relative de l'émetteur et du récepteur. C'est l'effet de Doppler bien connu.

$\Delta\omega$ est la différence entre la fréquence détectée au récepteur et la fréquence d'oscillation de la source: $\Delta\omega = \omega_{\text{source}} - \omega_{\text{récepteur}}$ (I.12)

$\Delta\omega$ s'écrit en fonction de la fréquence émise par le rayonnement de la source ω_0 , la vitesse à laquelle le récepteur se déplace envers la source V , la vitesse de phase de la lumière dans le milieu V_p .

Le signe \pm s'applique pour un milieu ordinaire ou un milieu main gauche :

$$\Delta\omega = \pm \omega_0 (V/V_p) \quad (I.13)$$

Pour des indices de réfraction négative, le décalage de fréquence devient négatif pour v positif (récepteur se déplaçant vers la source). L'équation précédente peut être écrite sous la forme :

$$\Delta\omega = \omega_0 n (V/c) \quad (I.14)$$

I.4.3. Types des métamatériaux

I.4.3.1 Selon la fréquence :

On peut distinguer trois catégories de métamatériaux classifiés selon leur fréquence de fonctionnement : [7]

- * Les métamatériaux microondes
- * Les métamatériaux optiques
- * Les métamatériaux térahertz

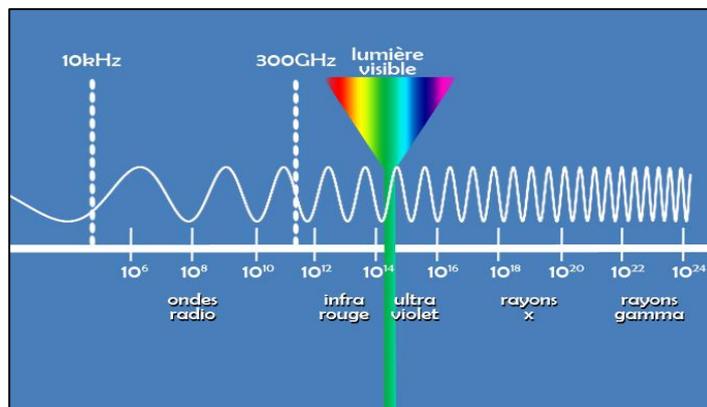


Figure I.4 : Bande de fréquences

a) Métamatériaux micro-ondes

Les métamatériaux micro-ondes sont des structures artificielles conçues pour interagir avec les ondes électromagnétiques dans la gamme des micro-ondes, typiquement de 1 à 300 GHz. Ces métamatériaux présentent des propriétés électromagnétiques uniques qui ne sont pas observées dans les matériaux naturels, comme une permittivité et une perméabilité négatives simultanées. Ces propriétés permettent de manipuler les ondes électromagnétiques de manière innovante, ouvrant la voie à de nombreuses applications technologiques.

Les métamatériaux micro-ondes peuvent être conçus pour avoir un indice de réfraction négatif, ce qui signifie que les ondes électromagnétiques se plient dans la direction opposée à celle attendue lorsqu'elles traversent le matériau.

En utilisant des résonateurs à anneaux fendus (SRR) et des tiges métalliques, les métamatériaux peuvent être ajustés pour afficher des valeurs négatives de permittivité (ϵ) et de perméabilité (μ).

La fabrication des métamatériaux micro-ondes est relativement accessible grâce aux techniques de lithographie et d'impression. Le premier métamatériau fonctionnel à micro-ondes a été réalisé par Smith et al. en 2000, opérant à 5 GHz.

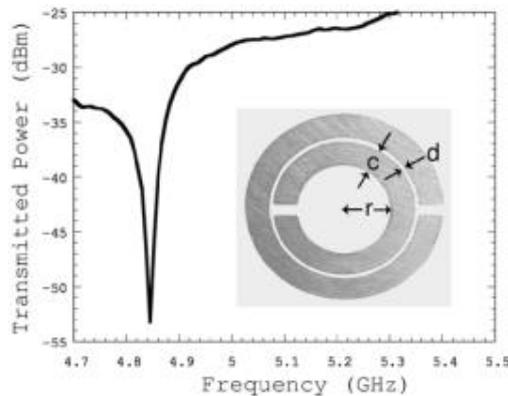


Figure I.5 : Métamatériau de Smith [8]

b) Métamatériaux optiques :

Un métamatériau optique, également connu sous le nom de métamatériau photonique (MP), est un matériau artificiel qui intervient dans le spectre térahertz, infrarouge, visible et dans certains cas l'ultraviolet.

La vérification expérimentale des métamatériaux optiques à indice négatif est bien plus complexe que celle en micro-ondes. Malheureusement, jusqu'à présent, la plupart des métamatériaux optiques rapportés se présentent sous la forme de couches planes d'épaisseurs inférieures à la longueur d'onde, fabriquées par lithographie optique ou par faisceau d'électrons [9].

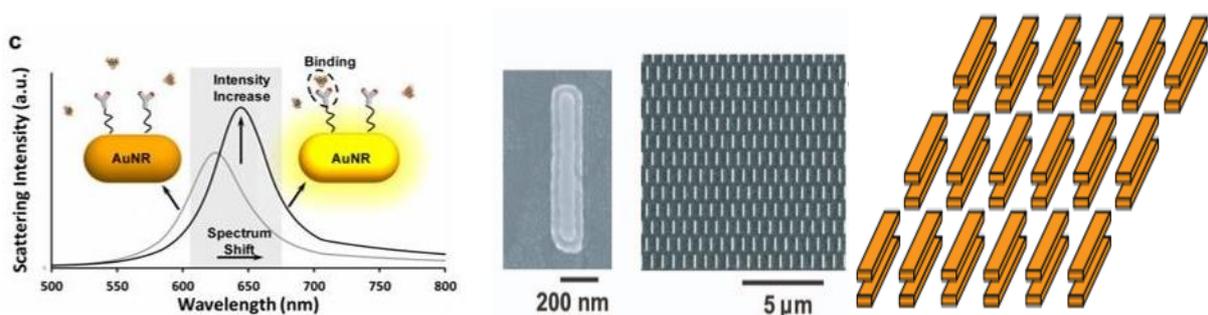


Figure I.6 Réseau de paires de nanotiges [9]

c) Métamatériaux TéraHertz

Les métamatériaux dans la bande térahertz sont des structures artificielles conçues pour réagir aux ondes électromagnétiques dans la bande de fréquences térahertz (THz), généralement de 0,1 à 10 térahertz.

Le processus de fabrication des métamatériaux dans la gamme térahertz tire parti des techniques avancées de lithographie et de dépôt en couches minces. Les premières expériences de métamatériaux fonctionnels dans la gamme térahertz ont montré des comportements étranges tels qu'une précision supérieure et un camouflage.

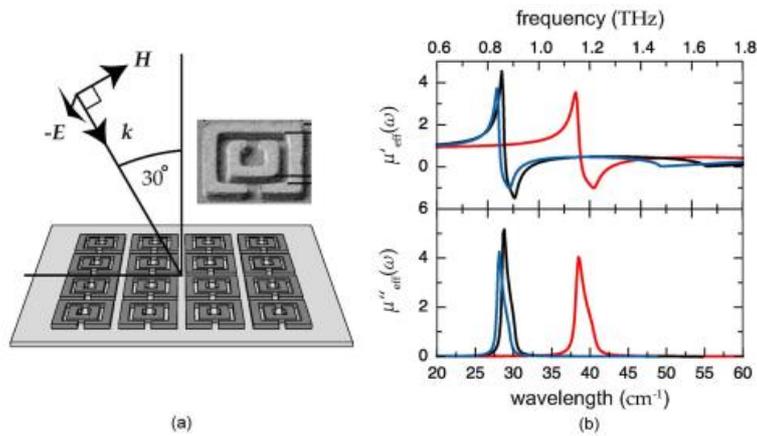


Figure I.7 :Métamatériaux Térahertz (a) SRR configuration (b)perméabilité relative complexe[10]

I.4.3.2 Selon le phénomène physique

a) Les métamatériaux chiraux

Les métamatériaux chiraux sont des matériaux artificiels développés pour exploiter leur caractéristique de chiralité, ce qui leur permet d'interagir différemment avec les ondes électromagnétiques que les métamatériaux achiraux. Ces structures engendrent des conséquences comme la rotation optique et la biréfringence circulaire.

La rotation de la polarisation : peut être effectuée grâce aux métamatériaux chiraux, ce qui est bénéfique dans des appareils tels que les polariseurs et les isolateurs optiques. En utilisant la biréfringence circulaire, ces matériaux ont la capacité de réguler de manière précise l'état de polarisation des ondes électromagnétiques, ce qui leur permet d'être utilisés dans les systèmes de communication et les capteurs optiques.

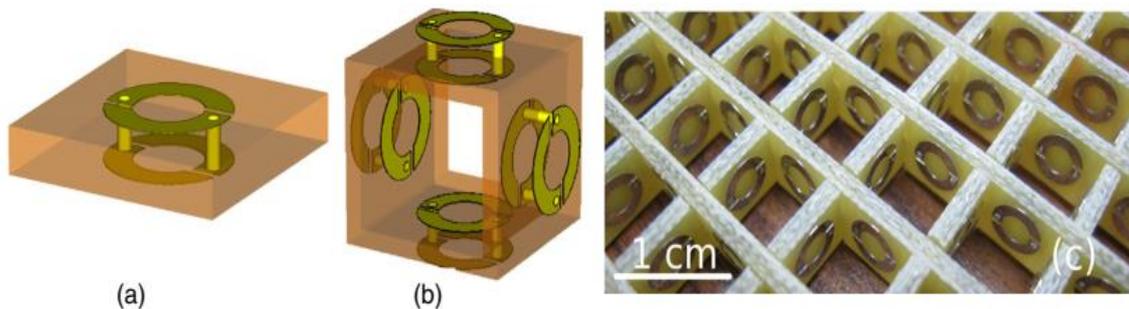


Figure I.8 :(a) structure d'un SRR chiral (b) cellule unitaire d'un métamteriau chiral (c) métamatériau chiral fabriqué [11]

Les indices de réfraction négatifs peuvent être observés chez certains métamatériaux chiraux pour une polarisation circulaire particulière, ce qui offre des applications novatrices en optique et en télécommunications.

b) Les métamatériaux non linéaires

Les matériaux structurés appelés métamatériaux non linéaires ont une réponse électromagnétique non linéaire, c'est-à-dire que leurs caractéristiques varient en fonction de l'intensité du champ électromagnétique appliqué. La grande variété de méthodes fournissant aux métamatériaux une réponse non linéaire peut être divisée, en trois approches :

La première est, structurellement, la plus simple, découlant directement de l'analogie avec les cristaux optiques. Une manière très naturelle d'atteindre la non-linéarité est donc d'ajouter un composant linéaire (comme une diode) au contour linéaire, c'est-à-dire de l'insérer dans l'élément structurel, et cela a été suggéré en 2003. Cela est connu par la méthode d'insertion (Figure a).

La deuxième approche est appelée méthode d'immersion, visant à compléter la réponse linéaire des éléments métamatériaux avec les propriétés non linéaires du milieu hôte, dans laquelle les champs, améliorés par résonance au sein des éléments métamatériaux, deviennent couplés de manière non linéaire. L'idée fondamentale suggère essentiellement d'exploiter les propriétés avantageuses des métamatériaux.

Il existe plusieurs approches pour fabriquer des métamatériaux non linéaires tout en incluant l'insertion d'éléments non linéaires, milieu hôte non linéaire, amélioration du champ local, lignes de transmission non linéaires, non-linéarité structurelle intrinsèque et non-linéarité basée sur des cristaux liquides [12].

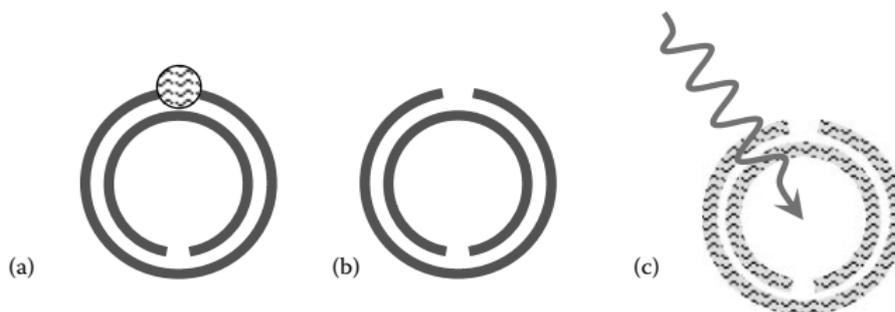


Figure I.9 : Illustration conceptuelle des métamatériaux non linéaire (a) 1^{ère} approche (b) 2^{ème} approche (c) 3^{ème} approche [12]

c) Les métamatériaux accordables

L'accordabilité est une caractéristique essentielle des matériaux métalliques qui permet de changer de manière indépendante la fréquence de l'indice de réfraction. On obtient cette capacité

en modifiant la forme, la taille et la composition des résonateurs individuels ou en interagissant entre eux.

Dans les résonateurs à anneau fendu (SRR), les diodes Varicap sont utilisées pour réguler dynamiquement les caractéristiques de transmission du métamatériau en ajustant la puissance d'entrée. Leurs propriétés de non-linéarité quantique permettent aux jonctions Josephson d'obtenir une accordabilité fine.

Les structures des métamatériaux peuvent être reconfigurées physiquement grâce aux systèmes micro-électromécaniques (MEMS) et nano-électromécaniques (NEMS), ce qui offre une grande souplesse dans l'adaptation des propriétés électromagnétiques [13].

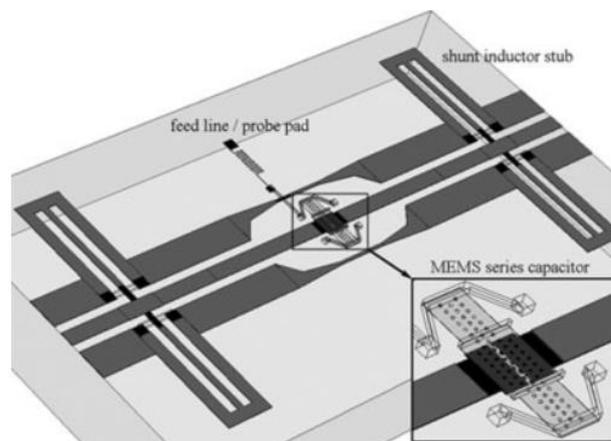


Figure I.10 : Ligne CRLH contrôlée à l'aide d'un MEMS [13]

d) Métamatériaux acoustiques

Les matériaux ont une influence sur les ondes longitudinales liées aux vibrations, ce qui permet de réaliser facilement des métamatériaux acoustiques tant que les ondes acoustiques sont très grandes par rapport aux ondes EM.

Les ondes acoustiques sont régies par la loi du mouvement de Newton, l'équation de continuité du fluide et l'équation thermodynamique d'état, ce qui permet d'utiliser des métamatériaux acoustiques.

Les classes des matériaux acoustiques sont présentées dans la Figure I.11. Dans ce cas le coefficient de compressibilité est l'équivalent de la permittivité et la masse volumique est l'équivalente de la perméabilité.

Les matériaux acoustiques normaux sont concernés par le quadrant supérieur droit. Dans les autres quadrants, un ou les deux paramètres présentent des valeurs négatives. La réalisation de la densité ou de la compressibilité négative ne peut être réalisée que de façon dynamique [14]

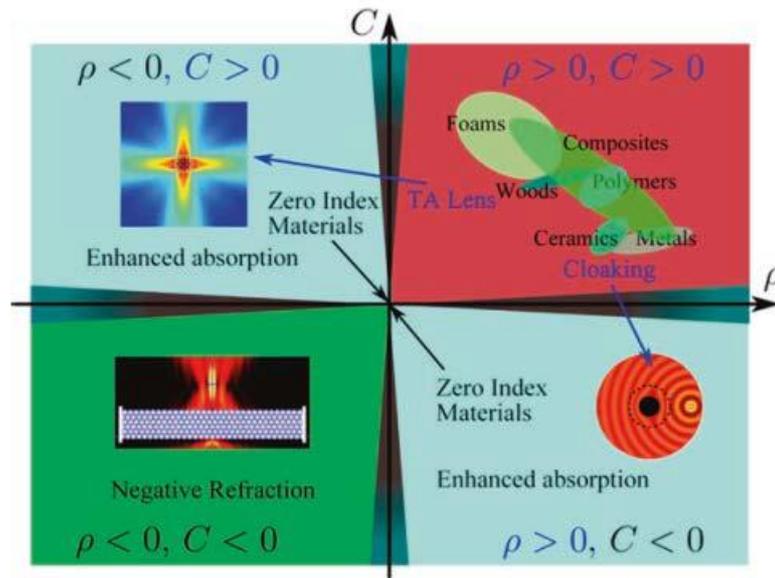


Figure I.11 : Classement des matériaux acoustiques en fonction de leur masse volumique ρ et leur compressibilité C

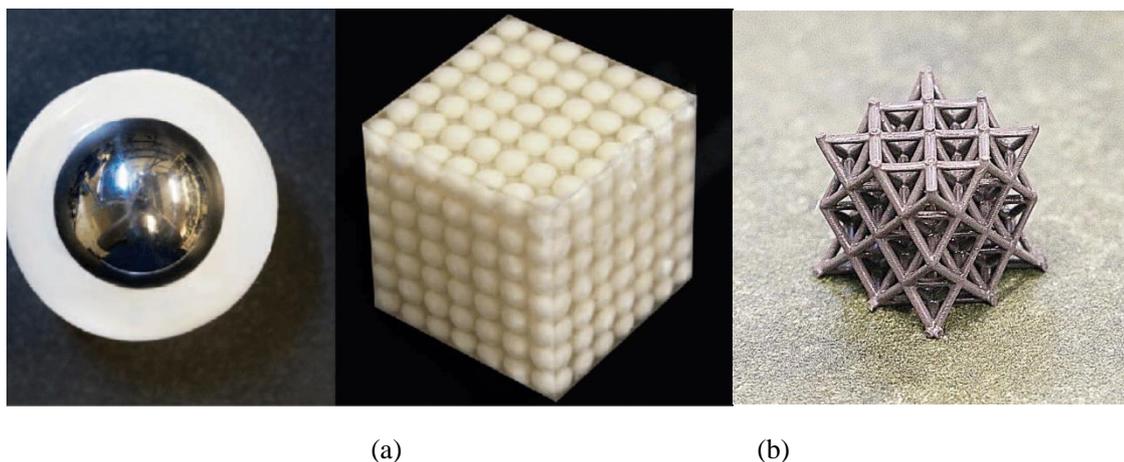


Figure I.12 : (a) structure cubique composée de billes de plomb (b) : métamatériau acoustique capable de bloquer des ondes sonores [14]

e) Les métamatériaux mécaniques

Les métamatériaux mécaniques sont des structures artificielles avec propriétés mécaniques définies par leurs structures plutôt que leurs compositions. Ils sont conçus et développés par des unités répétitives de sous-structures mécaniques [15].

Ces propriétés mécaniques inhabituelles comprennent des coefficients de Poisson, élasticité négative, rigidité négative, compressibilité négative et coefficient de dilatation thermique négatif [16].

Les métamatériaux mécaniques sont divisés en plusieurs groupes principaux, y compris les structures à coefficient de Poisson positif (PPR) telles que les nids d'abeilles, les structures à

coefficient de Poisson nul (ZPR) et les structures à coefficient de Poisson négatif (NPR), appelées auxétiques. [17]

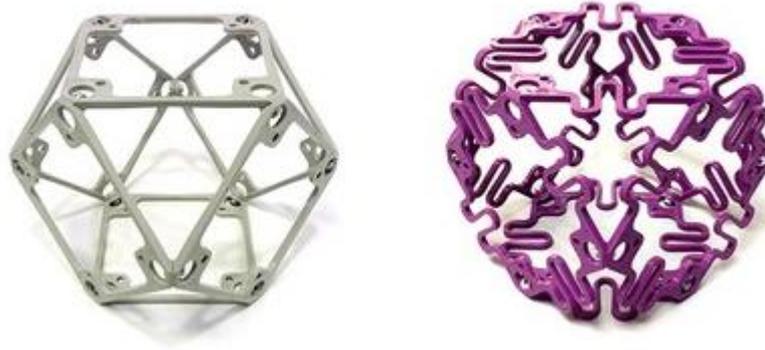


Figure I.13 : Exemples de métamatériaux mécaniques

I.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exploré les avancées dans le domaine des métamatériaux, des structures artificielles conçues pour manipuler les ondes électromagnétiques et acoustiques. Nous avons abordé différentes catégories de métamatériaux, telles que les métamatériaux micro-ondes, optiques, et acoustiques, en mettant en lumière leurs propriétés uniques et leurs applications potentielles. Parmi les sujets discutés, figuraient la réfraction négative, l'absorption électromagnétique, la non-linéarité, et l'accordable, démontrant ainsi la diversité des fonctionnalités offertes par ces matériaux. Nous avons également examiné l'utilisation de structures périodiques dans des applications pratiques telles que les capteurs optiques et les antennes à ultra-large bande. En résumé, ce chapitre offre un aperçu complet des métamatériaux et de leur importance croissante dans divers domaines de la science et de la technologie.

Bibliographie du Chapitre I

- [1] L. Brillouin, “Wave propagation in periodic structures,” Mc Graw-Hill, New-York, 1946.
- [2] C. R. Burrows, “The History of Radio Wave Propagation up to the End of World War I,” in Proceedings of the IRE, vol. 50, no. 5, pp. 682-684, May 1962.
- [3] Patrice Tchofo Dinda, Pierre Mathey , “Electromagnétisme: Ondes et propagation guidée,” Dunod, ISBN 978-2-10-076850-9, 2017.
- [4] J. B. Andersen, “History of Communications/Radio Wave Propagation from Marconi to MIMO,” in IEEE Communications Magazine, vol. 55, no. 2, pp. 6-10, February 2017.
- [5] André Authier, “Une découverte qui a changé le monde: la diffraction des rayons X, ” Magasine Reflets de la Physique n° 39, 2013.
- [6] Christophe Adessi, Cours de Physique du Solide, “Matériaux et Ingénierie des Surfaces, ” Université de Claude Bernard, Lyon, 2020.
- [7] S. Guenneau, A. Nicolet, F. Zolla, and S. Lasquelléc, “Numerical and Theoretical Study of Photonic Crystal Fibers, ” Progress In Electromagnetics Research, Vol. 41, 271-305, 2003.
- [8] D. R. Smith, W. J. Padilla, D. C. Vier, S. C. Nemat-Nasser, and S. Schultz, “Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity,” *Phys. Rev. Lett.*, 84(18):4184–4187, 2000.
- [9] Shalaev VM, Cai W, Chettiar UK, Yuan HK, Sarychev AK, Drachev VP, Kildishev AV. “Negative index of refraction in optical metamaterials”. *Optical Letters*, vol. 30, no. 24, pp. 3356-3358, 2005.
- [10] Yen TJ, Padilla WJ, Fang N, Vier DC, Smith DR, Pendry JB, Basov DN, Zhang X. Terahertz magnetic response from artificial materials. *Science*. 2004 ; 303(5663):1494-6
- [11] Wang B, Zhou J, Koschny T and Soukoulis C M Nonplanar Chiral Metamaterials with Negative Index, *Applied Physics Letters* 94, 151112 2009
- [12] M Lapine Maxim Gorkunov Theory and Phenomena of Metamaterials , pp.35-1-35-19, *Nonlinear Metamaterials*, 2017
- [13] J. Perruisseau-carrier, T. Lisec, and A. K. Skrivervik, “Circuit Model and Design of

- Analogically Controlled by MEMS,” *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 44, no. 12, pp. 2496–99, 2006.
- [14] Yu K, Fang NX, Huang G, Wang Q. Magnetoactive Acoustic Metamaterials. *Adv Mater.* 2018 May;30(21):e1706348.
- [15] Zhang, W.; Zhang, M.; Yan, Z.; Zhao, X.; Cheng, J.; Liu, A.Q. Single mode to dual mode switch through a THz reconfigurable metamaterial. *Appl. Phys. Lett.* **2017**, *111*, 241106
- [16] Gatt, R., Mizzi, L., Azzopardi, J. *et al.* Hierarchical Auxetic Mechanical Metamaterials. *Sci Rep* **5**, 8395 (2015).
- [17] Moeini, M.; Begon, M.; Lévesque, M. Numerical homogenization of a linearly elastic honeycomb lattice structure and comparison with analytical and experimental results. *Mech. Mater.* **2022**, *167*, 104210.

Chapitre II

Etude et caractérisation des structures à métamatériaux

II.1 Introduction

L'objectif de ce chapitre se concentre principalement sur la présentation des composants qui composent les matériaux descriptifs, la présentation théorique des matériaux descriptifs, l'affichage de leurs caractéristiques et leur classification selon des critères efficaces. Il existe différentes méthodes dans la littérature pour extraire ces paramètres efficaces des métamatériaux. Nous discuterons d'un exemple d'extraction des paramètres efficaces, qui est le chiffre oméga qui a été étudié précédemment. Nous calculerons les différents paramètres efficaces des éléments qui le seront grâce à des simulations utilisant le programme HFSS d'Ansoft. Nous la comparons avec l'étude précédente, et en conclusion nous donnerons un aperçu de l'évolution de ces matériaux avec la technologie

II.2 Caractérisation des métamatériaux

L'importance de la caractérisation des métamatériaux pour appréhender leurs propriétés distinctives et leurs interactions avec les champs électromagnétiques. Elle explore en détail la description des milieux métamatériaux ainsi que les principes fondamentaux qui y sont associés.

[1]

II.2.1 Approche de Veselago

Dans un milieu diélectrique classique, la permittivité et la perméabilité sont les deux positives et le champ électrique, magnétique et le vecteur d'onde forment un trièdre direct [2].

Veselago a considéré qu'une onde électromagnétique peut se propager dans un milieu linéaire, homogène et isotrope et qui est caractérisé par une permittivité et une perméabilité négative à la fois [3]. Ces matériaux sont appelés par la suite, les Matériaux Main Gauche « MMG » ou en anglais Left Handed Materials « LHM ». Le champ électrique \vec{E} , le champ magnétique \vec{H} et le vecteur d'onde \vec{K} forment un trièdre indirect dans les matériaux MMG, comme est bien montré sur la Figure.

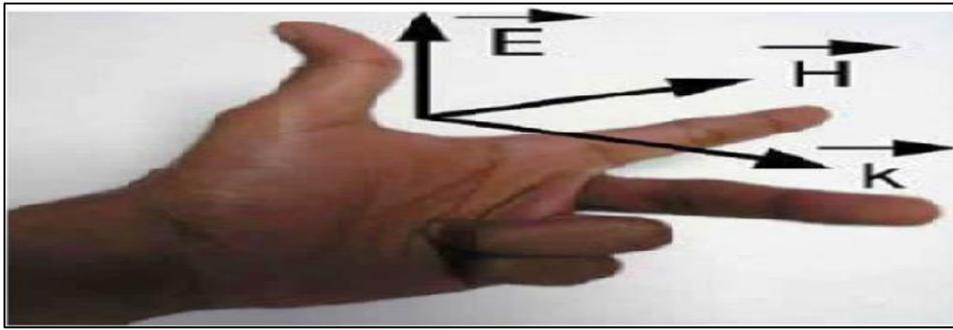


Figure II.1 : Trièdre indirect caractérisé par la règle de la main gauche de Veselago.

II.2.1.1 Vecteur de Poynting

La Figure présente la propagation d'une onde électromagnétique dans deux matériaux différents : (a) Matériaux Main Droite "MMD", (b) Matériaux Main Gauche "MMG".

Le vecteur de **Poynting** est parmi les caractéristiques essentielles des Matériaux Main Gauche (MMG). Comme illustré sur la Figure ci-dessous : dans le cas (a), le vecteur d'onde et le vecteur de Poynting ont la même direction. Cependant, ces deux vecteurs prennent des directions opposées, dans le cas (b).

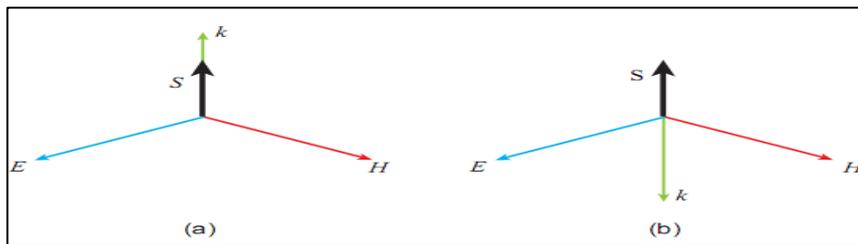


Figure II.2 : Trièdre (\vec{E} , \vec{H} , \vec{K}) pour une onde électromagnétique se propageant (a) dans un MMD et (b) dans un MMG.

- \vec{E} : Vecteur de champ électrique.
- \vec{H} : Vecteur de champ magnétique.
- \vec{K} : Vecteur d'onde.
- S : Vecteur de Poynting.

Le vecteur de Poynting est donné par la formule suivante, selon [4] :

➤
$$\vec{P} = \frac{1}{2} \vec{E} \times \vec{H}^*$$

Le fait que les trois vecteurs (\vec{E} , \vec{H} , \vec{K}) forment un trièdre indirect implique que la vitesse de phase $V\phi$ et la vitesse de groupe Vg de l'onde électromagnétique ont des directions opposées.

II.3 Métamatériaux avec une permittivité et /ou perméabilité négative

Les métamatériaux sont classés en fonction des paramètres effectives (la permittivité ϵ et la perméabilité μ). [5]

II.3.1 Milieux avec une Permittivité Négative (ENG)

Les milieux à permittivité négative (ENG, pour *Epsilon Negative Metamaterials*) sont des matériaux artificiels dont la permittivité effective (ϵ) est négative dans certaines bandes de fréquence [6]. Les ENG sont particulièrement intéressants pour leur capacité à manipuler les ondes électromagnétiques de manière unique, ce qui ouvre des perspectives innovantes dans diverses applications. [7]

La permittivité effective est donnée par l'équation suivante selon [8] :

$$\epsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \quad (2.1)$$

D'où : La fréquence de plasma est calculée par l'expression suivante :

$$\omega_p^2 = \frac{\rho e^2}{\epsilon_0 m_{eff}} = \frac{2\pi c^2}{a^2 \ln\left(\frac{a}{r}\right)} \quad (2.2)$$

Où ρ représente la densité d'électron, n représente la densité d'électron, e est la charge électrique élémentaire, et m_{eff} est la masse effective de l'électron [9].

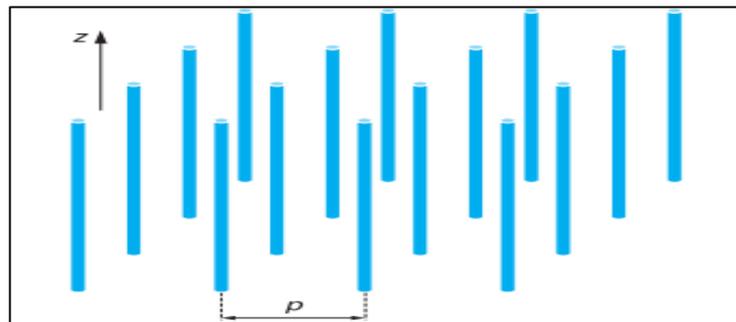


Figure II.3 Réseau de tiges métalliques minces

II.3.2 Milieux avec une Perméabilité Négative (MNG)

Les milieux à perméabilité négative (MNG, pour *Mu Negative Metamaterials*) sont des matériaux artificiels qui présentent une perméabilité effective (μ_{eff}) négative dans certaines bandes de fréquence [10].

En 1999, Pendry introduisit la structure rouleau suisse (swiss-roll) schématisée par la Figure. En effet, le rouleau suisse est une structure artificielle métallique qui a une résonance magnétique sans la présence de composant magnétique. Chaque rouleau suisse individuel est

composé d'un cylindre de rayon 'R' sur lequel est enroulé une spirale conductrice isolée de 'N' tours. L'espace entre deux tours consécutifs est noté par 'dc'.

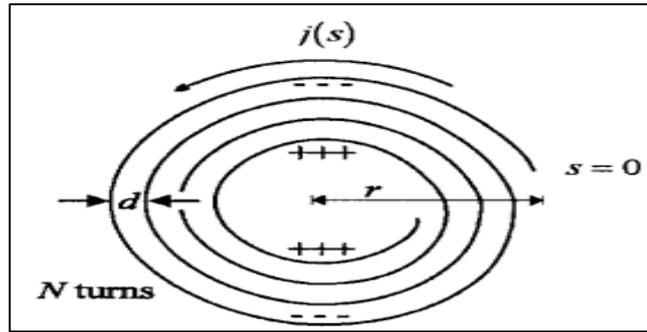


Figure II.4 : La structure rouleau suisse introduite par Pendry.

De ce fait, aucun contact électrique entre les couches n'est existé [11]. Quand un champ magnétique alternatif est appliqué selon l'axe du cylindre, un courant est induit dans le conducteur. La capacité crée complète donc le circuit résonant qui va faire circuler le courant.

La perméabilité effective est donnée par [11] :

$$\mu_{eff} = 1 - \frac{F}{1 + \frac{2\sigma_i}{\omega r \mu_0 (N-1)} - \frac{d_c \cdot c^2}{2\pi^2 r^3 (N-1)\omega^2}} \quad (2.3)$$

Où c est la vitesse de la lumière, ω est la pulsation angulaire, σ est la conductivité de la feuille spirale. R est le rayon intérieur de la bague plus petite, ϵ est la permittivité de l'isolant entre les couches conductrices. F est le volume de la structure et N est le nombre de tours du rouleau

La perméabilité effective peut s'écrire sous une forme plus simplifiée [11] :

$$\mu_{eff} = 1 - \frac{F}{\omega^2 - \omega_0^2 + i\Gamma\omega} \quad (2.4)$$

Où Γ est le coefficient de réflexion et ω_0 est la fréquence émise par le rayonnement de la source.

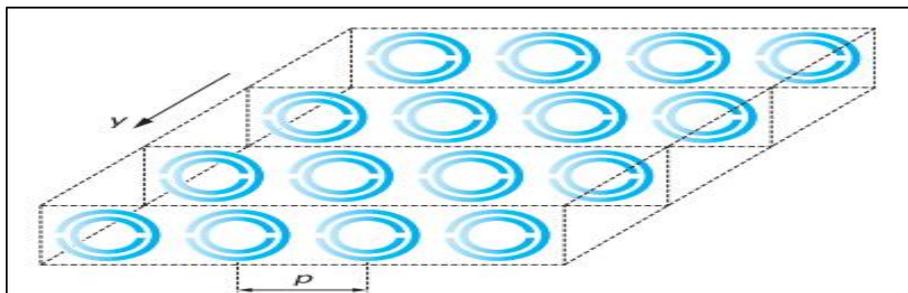


Figure II.5 : Anneaux métalliques doubles fendus.

II.3.3 Milieux avec une Permittivité et Perméabilité Négative (DNG)

Pour qu'un matériau présente un indice de réfraction négatif, il doit révéler à la fois une permittivité et une perméabilité relatives négatives. Toutefois, ils existent des matériaux de permittivités négatives tels que les plasmas, les métaux dans l'infrarouge... etc., et aussi des matériaux de perméabilités négatives, tel que les ferrites et ferromagnétiques. Cependant, ces matériaux ne présentent pas les deux phénomènes (ENG, MNG) simultanément [12]

En 2000, la première démonstration expérimentale d'un milieu composite doublement négatif a été éprouvée par D. Smith. En s'inspirant des travaux de J. Pendry, il a superposé un réseau de fil et un réseau de RAF, comme est bien illustré sur la Figure. Il a observé ainsi une transmission à travers ce milieu dans la bande de fréquences dans laquelle la permittivité et la perméabilité sont à la fois négatives [13]. Cette expérimentation a démontré pour la première fois la théorie des milieux main gauche introduite par Veselago [14], ce qui a prévu une propagation des ondes électromagnétiques à travers un milieu doublement négatif. Ce fut a démontré la réalisation du premier métamatériau [15]



Figure II.6 :Métamateriau proposé par Smith et al [16]

En se basant sur l'existence des effets bianisotropes dans la structure de RAF, Marqués et son équipe de recherche ont proposé un autre type de résonateur appelé BC-SRR (Broadside Coupled SRR) qui sert à éliminer le couplage électromagnétique.

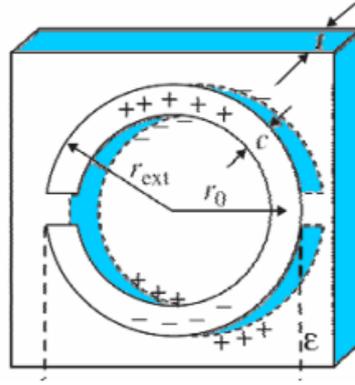


Figure II.7 : Structure BC-SRR proposée par R. Marqués [16]

II.4 Méthodes de calcul des paramètres effectifs

Le paramètre de transmission S_{21} et le paramètre de réflexion S_{11} sont calculés et extraits

Pour le calcul de la perméabilité et permittivité effective μ_{eff} , ϵ_{eff} ce qui est connu par la méthode Nicholson, Ross et Weir (NRW). Deux approches dérivées de la méthode NRW sont présentées pour le calcul des paramètres effectifs.

La première proposée par D. R. Smith [17] et la deuxième proposée par Ziolkowski [18].

II.4.1 Méthode de Smith (Méthode 1)

En 2000, Dr. Smith a réussi à réaliser et à tester le premier métamatériau double négatif, composé de tiges fines et du résonateur métallique à anneau fendu, conçu par Pendry en 1999. Dr. Smith a analysé ses travaux en utilisant une méthode bien définie, qui repose sur l'extraction à partir des paramètres S_{ij} , l'impédance z , l'indice de réfraction n , la permittivité ϵ_r et la perméabilité μ_r effectives. Cette méthode permet d'extraire sans ambiguïté les paramètres effectifs en raison de la nature multidimensionnelle de la fonction cosinus inverse [19].

Les coefficients de réflexion et de transmission sont donnés par :

$$S_{11} = S_{22} = \frac{1}{\cos(nkd) - \frac{i}{2} \left(z + \frac{1}{z} \right) \sin(nkd)} \quad (2.5)$$

$$S_{21} = S_{12} = \frac{i}{2} \left(\frac{1}{z} - z \right) \sin(nkd) \quad (2.6)$$

Où k est le vecteur d'onde de l'onde incidente et d est l'épaisseur du matériau.

$$\text{L'impédance d'onde est définie par la relation: } z = \sqrt{\frac{(1 + S_{11})^2 - S_{21}^2}{(1 - S_{11})^2 - S_{21}^2}} \quad (2.7)$$

L'indice de réfraction est donné par :
$$n = \frac{1}{kd} \cos^{-1} \left[\frac{1}{2S_{21}} (1 - S_{11}^2 + S_{21}^2) \right] \quad (2.8)$$

La forme la plus simplifiée de l'indice est :
$$n = \frac{1}{jk_0 d} \log \left[\frac{1}{2S_{21}} (1 - S_{11}^2 + S_{21}^2) \right] \quad (2.9)$$

Et par conséquent μ_{eff} et ε_{eff} sont calculées en fonction de z et n comme suit

$$\mu = n * z$$

$$\varepsilon = \frac{n}{z}$$

II.4.2 Méthode de Ziolkowski (Méthode 2)

Cette approche est basée sur le calcul des paramètres effectifs à partir des paramètres S en exprimant le nombre d'onde k dans le milieu étudié [20].

A partir de S_{11} et S_{21} , les tensions normées V_1 et V_2 sont donnés par [18]

$$V_1 = S_{21} + S_{11}$$

$$V_2 = S_{21} - S_{11}$$

Le nombre d'onde (module du vecteur d'onde), la perméabilité et la permittivité sont définis à partir des deux derniers paramètres :

$$k \approx \frac{1}{jd} \frac{(1 - V_1)(1 + r)}{1 - rV_1} \quad (2.10)$$

$$\mu_r \approx \frac{2}{jk_0 d} \frac{1 - V_2}{1 + V_2} \quad \text{et} \quad \varepsilon_r = \left(\frac{k}{\mu_0} \right)^2 \frac{1}{\mu_0} \quad (2.11)$$

L'impédance relative peut également être obtenue avec :

$$\eta = \frac{\mu_r}{\varepsilon_r} = \frac{(1 + S_{11})^2 - S_{21}^2}{(1 - S_{11})^2 - S_{21}^2} \quad (2.12)$$

Avec :

- f : Bande de fréquences en GHz
- d : Epaisseur de substrat en m.

II.4.3 Exemple d'extraction de paramètres effectifs

Afin d'illustrer la faisabilité de construire de métamatériaux par des structures périodiques, voici un exemple sera analysé dans cette partie. Cet exemple prouvera l'application de l'approche

de Smith et aussi la simulation via le logiciel HFSS qui sera utilisé pour la conception de notre capteur de liquides.

II.4.3.1 Structure en double Oméga

Ce type de structure présente une double résonance, magnétique et électrique, dans sa cellule unité sans avoir recours à un réseau additionnel de tiges (voir la structure de Marqués dans la Figure II.6). La cellule unité représentée sur la Figure II.7 est formée de deux motifs en de la lettre latin «Oméga ».

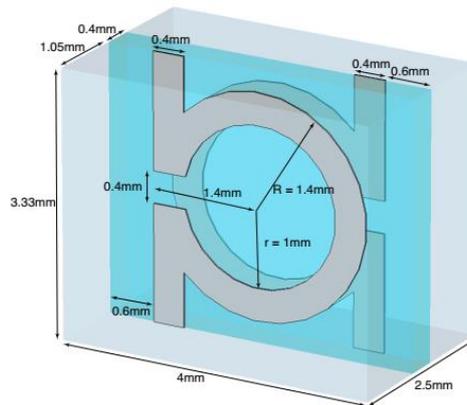
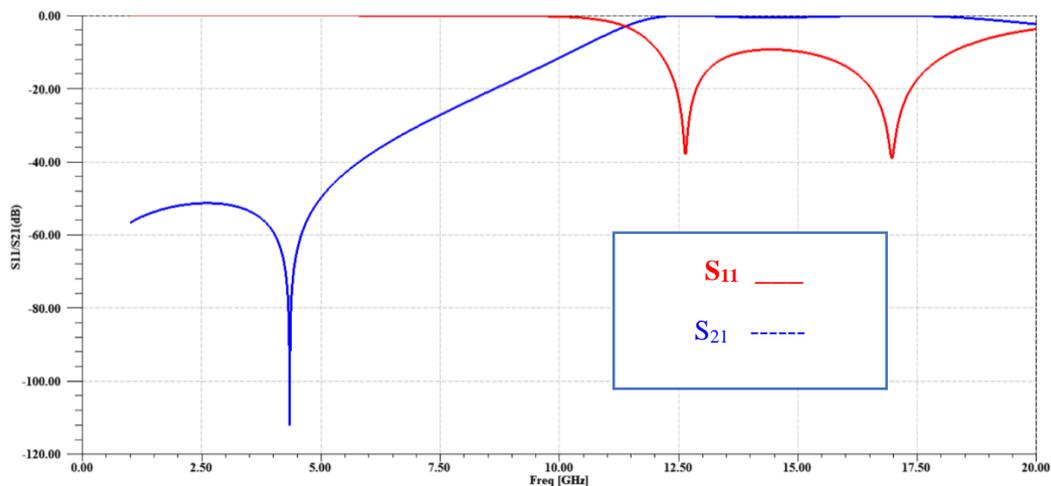


Figure II.8 : Structure en double Oméga [21]

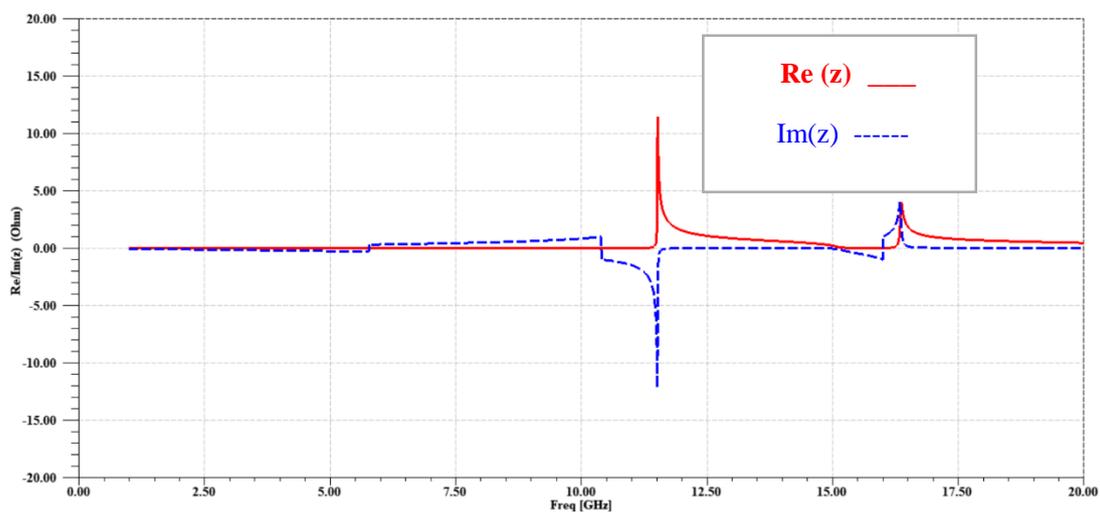
On peut considérer chaque cellule unité comme une cellule résonante, et elle est positionnée sur une face du substrat avec une permittivité relative de 4,0 de manière à être inversée l'une à l'autre.

Afin de reproduire cette structure avec le logiciel HFSS, on applique des conditions de périodicité. On applique des conditions de murs électriques et magnétiques en fonction de l'axe y et x, tandis que la propagation se fait en fonction de l'axe z. On ne considère qu'une seule couche de la structure pour la transmission de l'onde électromagnétique. Il est nécessaire que le champ magnétique soit perpendiculaire au plan de la structure « Oméga » afin de rendre la structure sensible au champ magnétique.

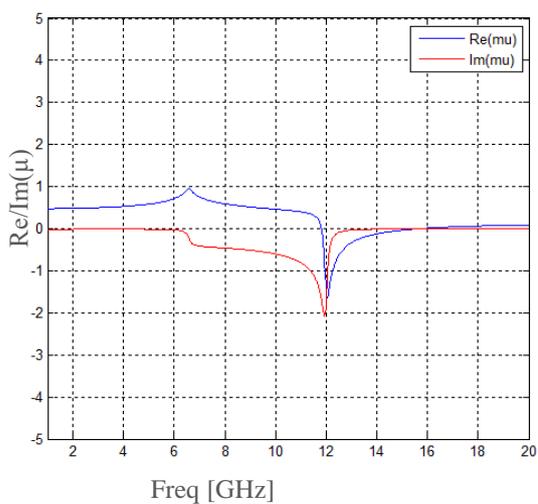
Les paramètres S sont présentés dans la Figures II .8 et ensuite l'impédance d'onde (partie réelle et imaginaire) est présenté et comparé avec le travail publié dans [21]. La déduction des paramètres effectifs de la structure étudiée utilisant les paramètres S a été programmée sous Matlab en se basant sur les équations présentées précédemment.



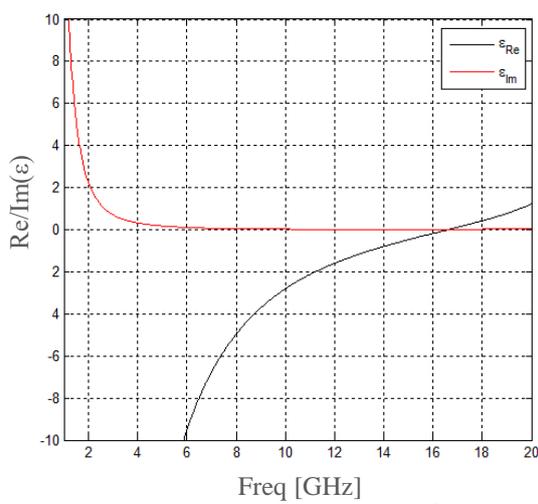
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure II.9 : Cellule unitaire de résonateur en double S. (a) Coefficients de réflexion et transmission (b) Partie réelle et imaginaire de l'impédance d'onde (c) Partie réelle et imaginaire de perméabilité (d) Partie réelle et imaginaire de permittivité

Tableau II.1 : Comparaison de paramètres effectifs ϵ_r , μ_r , n de la structure de Omega avec [21]

ϵ_r, μ_r, n Fréquences [GHz]	Re (ϵ_r) < 0	Re (μ_r) < 0	Re(n) < 0
[21]	0.1-16,5	11,4-16,5	11,4-16,5
Notre simulation	1-16,5	11,6-16	11,6-16

- les résultats de simulation obtenus sont très proches par rapport a [21] que ce soit dans les gammes de fréquences et aussi dans les valeurs de paramètres effectifs.
- Cependant, nous constatons qu'autour de 11,4 GHz et 16,8 GHz, $n \approx 0$, nous devrions donc pouvoir zones où un rayonnement directionnel est observé.

II.5 Métamatériaux dans des nouvelles technologies

a) Cape d'invisibilité

La fabrication de la première cape d'invisibilité en micro-onde a été développée par J. Pendry en 2006. Il a proposé un métamatériau dont les champs électromagnétiques peuvent être contrôlés et manipulés. Cette cape d'invisibilité détourne les ondes centimétriques ou micro-onde, Figure au-dessous, cette propriété résulte de la présence de mini circuit de taille inférieure à la longueur d'onde et de l'architecture en anneaux concentriques [21] [22]



Figure II.10 : La cape d'invisibilité de J.Pendry [21]

b) Antennes pour communication 5G

L'application des métamatériaux aux antennes 5G vise à répondre aux défis de miniaturisation, de performance et de flexibilité requis par les réseaux de prochaine génération.

Ces métamatériaux, sont fabriqués à partir de résonateurs en anneaux fendus (SRR) et de structures à haute impédance [23]

Ces éléments permettent de contrôler la propagation des ondes électromagnétiques, réduisent les pertes et améliorent la directivité. Grâce aux propriétés des métamatériaux, les antennes peuvent être significativement réduites en taille sans compromettre la performance. Cela facilite l'intégration des antennes dans les dispositifs mobiles et les infrastructures urbaines.

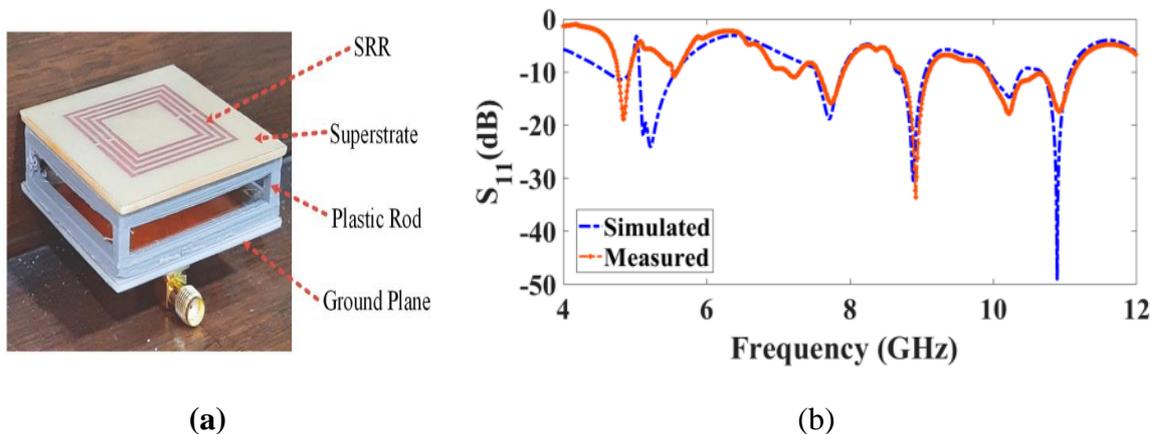


Figure II.11 : Antenne à métamatériau [24]

L'antenne proposée par [24] se compose d'un simple patch et de multi SRR sur la région du superstrat. L'optimisation des performances est obtenue en ajustant la position d'alimentation, en faisant varier la hauteur de la couche de superstrat et en modifiant l'épaisseur des anneaux de métamatériau. La conception proposée est analysée pour 4 GHz à 12 GHz. L'antenne à superstrat de métamatériau offre un gain élevé et des performances multi bandes, requises dans les dispositifs de communication sans fil à haut débit. L'antenne à métamatériau avait comme dimensions $48.2 \times 48.2 \text{ mm}^2$ et 6 bandes de résonances avec un gain élevé de 5.77 [24].

c) Métamatériaux pour application anti-séismique

Parmi tous les risques naturels possibles, les tremblements de terre sont parmi les plus catastrophiques en termes d'impacts humains, socio-économiques et environnementaux. Chaque année, plus d'un million de tremblements de terre (environ deux tremblements de terre par minute) se produisent dans le monde [25]. Les systèmes d'isolation sismique traditionnels visent à prolonger la durée de vie des structures protégées au moyen de diverses techniques de contrôle [26].

En général, ces systèmes sont inefficaces pour les grands tremblements de terre et ne peuvent pas être adaptés aux changements structurels. De plus, ils produisent des déplacements horizontaux dangereusement importants. La plupart des approches sont basées sur l'isolation vibratoire des structures plutôt que sur la protection à distance des ondes entrantes. Si la force

sismique appliquée à une structure peut être directement réduite à partir de la source, alors la structure peut être protégée de l'énergie des ondes sismiques [27]

Les métamatériaux auxétiques possèdent un coefficient de Poisson négatif. Lorsqu'ils sont étirés, ils deviennent plus épais perpendiculairement à la force appliquée. Cela se produit en raison de leur structure interne particulière et de la manière dont celle-ci se déforme lorsque l'échantillon est chargé uni axialement [28]

De plus, [29] a proposé en utilisant un type de métamatériaux auxétiques pour la protection contre les ondes sismiques, car les paramètres élastiques de ces métamatériaux peuvent présenter des valeurs négatives dans les bandes d'arrêt élastiques [29].

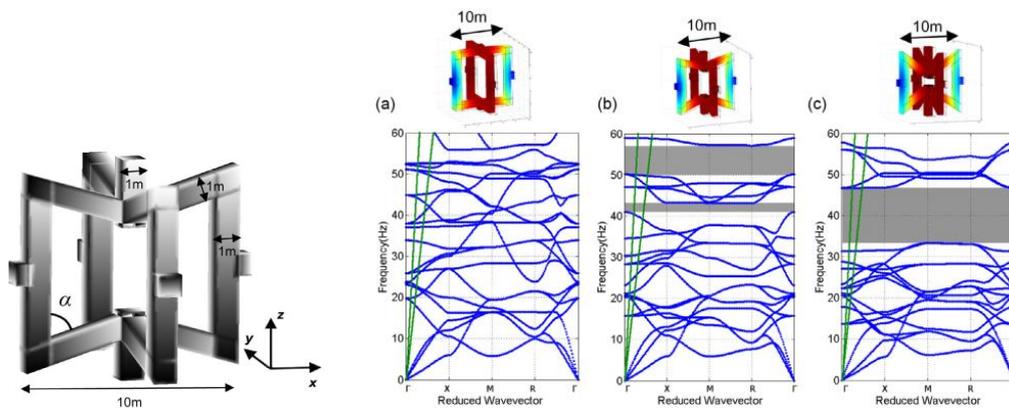


Figure II.12 : Diagrammes de bandes de métamatériaux auxétique générés avec des cellules élémentaires (10 m*10 m*10 m) avec fabrication de barres (béton) un angle (a) $a = 0^\circ$; b) $a = 30^\circ$; c) $a = 45^\circ$

Comme le montre la Figure II.13, la propagation des ondes sismiques avec des fréquences allant de 1 à 40 Hz peut être influencée par une version à l'échelle décimétrique de métamatériaux de type auxétique générés avec des cellules élémentaires à motif nœud papillon.

Pour la deuxième structure (pour $a = 30^\circ$, voir Figure II.13.b), donne lieu à une bande interdite petite dans une gamme de fréquences d'intérêt pour la protection contre les ondes sismiques, autour de 40 Hz. Une deuxième bande d'arrêt, plus grande, se trouve au-dessus de la gamme de fréquences visée. Cette conception pourrait être utilisée comme alternative aux modèles de protection sismique proposés dans les références

La structure pour $a = 45^\circ$, voir Figure II.13.(c), affiche un large bande d'arrêt total qui s'ouvre autour de 40 Hz, à partir de 33 Hz à 47 Hz (14 Hz de bande passante, donc avec une bande passante relative de 35 %). Il ressort que le type auxétique la structure avec un angle de $a = 45^\circ$ a la bande la plus prometteuse structure.

d) Capteur à métamatériaux pour détection de cancer

Le cancer demeure l'un des principaux facteurs de mortalité à l'échelle mondiale, ce qui met en évidence l'importance de méthodes novatrices pour repérer et identifier rapidement cette maladie. Les méthodes de dépistage direct du cancer utilisent fréquemment des techniques invasives ou des techniques d'imagerie dont la sensibilité et la spécificité sont imparfaites. Au cours des dernières années, une attention croissante a été portée aux avancées technologiques dans le domaine des ondes électromagnétiques pour détecter précisément et sans intervention chirurgicale le cancer dans le régime optique ou microondes. [30].

Les biocapteurs basés sur les métamatériaux offrent une sensibilité très élevée à celle des capteurs traditionnels. De même, les propriétés des métamatériaux et la variation des formes peuvent être combinées pour obtenir des applications multiservices.

Le capteur proposé dans [31] est une structure basée sur un résonateur métamatériau sous forme de corona dans le but de détecter les cellules cancéreuses. L'utilisation de métamatériaux dans la conception de résonateurs a reçu une attention considérable en raison de leurs propriétés électromagnétiques uniques et de leurs fonctions polyvalentes. En combinant les avantages de la géométrie corona et de la structure des métamatériaux, l'objectif était de développer un système de résonance capable de détecter les cellules cancéreuses avec une sensibilité et une spécificité élevée. En outre, la forme coronale du résonateur offre une surface plus grande et une interaction plus efficace de l'onde électromagnétique, ce qui accroît ses capacités de détection.

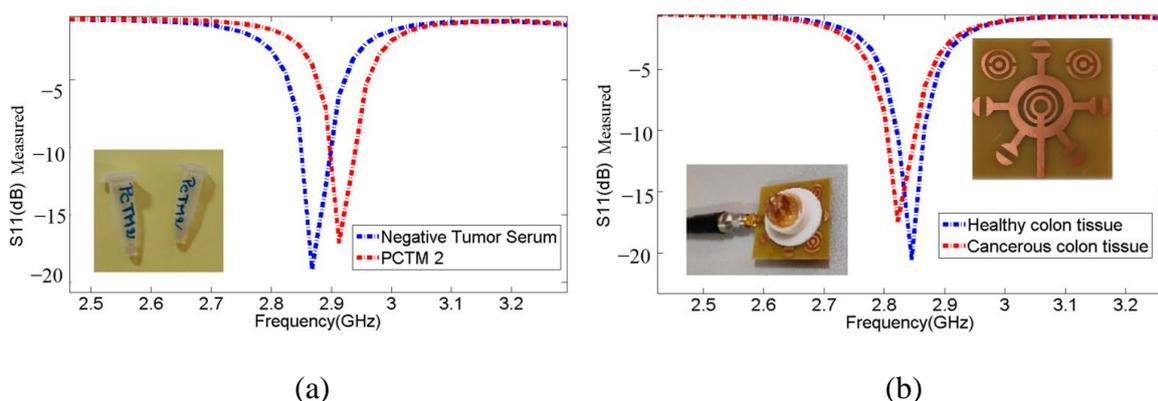


Figure II.13 : Comparaison de fréquences de résonance et de coefficients de réflexion entre (a) sérum tumoral et cancer type PCTM2 (b) Côlon sain et côlon cancéreux

II.6 Conclusion

Dans ce deuxième chapitre, nous avons examiné théoriquement les métamatériaux, qui ont des propriétés électromagnétiques spéciales (permittivité et/ou perméabilité négatives). Ces matériaux ont le potentiel de combler certaines lacunes dans le spectre électromagnétique et de créer de nouveaux dispositifs. Nous avons parlé des propriétés des métamatériaux, notamment la première découverte du Dr Smith qui a conduit à la création de matériaux artificiels exceptionnels. Nous avons aussi discuté des principes généraux et de la classification des métamatériaux. Ensuite, nous avons examiné différents types de métamatériaux et leurs caractéristiques fondamentales. Nous avons identifié trois catégories en fonction des signes des paramètres électromagnétiques, et avons étudié chaque type individuellement pour une meilleure compréhension. L'extraction et l'analyse des paramètres électromagnétiques nous permettent de déterminer à quelle catégorie appartient un matériau synthétique. Pour cela, nous avons présenté différentes méthodes d'extraction basées sur des équations bien définies telles que la méthode Nicholson-Rose-Weir (NRW) et la méthode Smith.

Bibliographie du Chapitre II

- [1] Smith, John D., and Doe, Jane A. Characterization of metamaterials: General principles and methods. *Journal of Applied Physics*, vol. 110, no. 7, 2011, pp. 071301.
- [2] Guillaume BOUDARHAM, « Nanooptique avec des électrons rapides : métamatériaux, formulation modale de la EMLDOS pour des systèmes plasmoniques ». Thèse présentée en vue d'obtention du diplôme de Doctorat en physique, UPMC Paris, juillet 2011.
- [3] Tahar GHADBANE, « Simulation des métamatériaux à indice de réfraction négatif », Thèse de magister en optique Appliquée, université de Sétif, 2011
- [4] Mondher LABIDI, « Conception et application des métamatériaux pour des circuits RF ». Thèse présentée en vue de l'obtention du diplôme de doctorat en technologies de l'information et de communications, école supérieure des communications, Tunis. 2012
- [5] La classification a été illustrée graphiquement par la Figure I.2 selon le signe des propriétés électromagnétiques
- [6] R. E. Camley and D. L. Mills; Surface polaritons on uniaxial antiferromagnets , *Physical Review B*, vol. 26, pp. 1280-1287, 1982.
- [7] European commission/ European research, studies and reports, Anne F. de Baas (Editor in chief), *Nanostructured Metamaterials Exchange between experts in electromagnetics and material science*, 19-20, 51, 2010
- [8] Smith, D. R., Schultz, S. (2002). Determination of Effective Permittivity and Permeability of Metamaterials from Reflection and Transmission Coefficients. *Physical Review B*, 65(19), 195104. DOI: 10.1103/PhysRevB.65.195104
- [9] Pendry, J. B, Schurig, D. Smith, D. R. (2006). Controlling Electromagnetic Fields. *Science*, 312(5781), 1780-1782. DOI: 10.1126/science.1125907.
- [10] Veselago, V. G. (1968). The Electrodynamics of Substances with Simultaneously Negative Values of ϵ and μ *Soviet Physics Uspekhi*, 10(4), 509-514.
- [11] Mondher LABIDI, ' Conception et application des métamatériaux pour des circuits RF' ,Thèse présentée en vue d'obtention du diplôme de doctorat en Technologies de l'information et de Communications, L'Ecole Supérieure des Communications, Tunis. 2012
- [12] Smith, D. R., Pendry, J. B, Wiltshire, M. C. K. (2004). Metamaterials and Negative Refractive Index. *Science*, 305(5685), 788-792.

- [13] DEMIREL, E., OZDEMIR, M., et AKTAS, B. Negative Refractive Index Ferromagnetic Materials with Negative Permeability at Zero Applied Magnetic Field. *Applied Magnetic Resonance*, 2009, vol. 36, no 1, p. 69.
- [14] Tahar BOUGOUTAIA, « Analyse et conception des antennes microstrip à base de métamatériaux ». Thèse présentée en vue de l'obtention du diplôme de doctorat en électronique, université de M'sila, Mai 2018
- [15] Veselago, V. G. (1968). The Electrodynamics of Substances with Simultaneously Negative Values of ϵ and μ . *Soviet Physics Uspekhi*, 10(4), 509-514.
- [16] Smith, D. R., Pendry, J. B., Wiltshire, M. C. K. (2004). Metamaterials and Negative Refractive Index. *Science*, 305(5685), 788-792. DOI: 10.1126/science.1096796.
- [17] Smith, D. R., et al. (2000). Composite Medium with Simultaneously Negative Permeability and Permittivity. *Physical Review Letters*, 84(18), 4184-4187.
- [18] Badreddine Mohamed OUAGAGUE, « Etude Théorique et Expérimentale des Métamatériaux et des Techniques d'Agilité (MEMS, BST) pour la Conception des Circuits RF Miniatures et Reconfigurables ». Thèse présentée en vue d'obtention du diplôme de doctorat en optoélectronique et microondes, université de Toulouse 3, Septembre 2014
- [19] D. R. Smith, S. Schultz, P. Markos, C. M. Soukoulis, Determination of Negative Permittivity and Permeability of Metamaterials from Reflection and Transmission Coefficients, *Phys. Rev. B* 65,2002.
- [20] H. A. Majid, M. K. A. Rahim, and T. Masri, Microstrip antenna's gain enhancement using left handed metamaterial structure, *Progress In Electromagnetics Research M*, Vol. 8, 235-247, 2009.
- [21] Bae-Ian Wu, Weijen Wang, Joe Pacheco, Xudong Chen, Tomasz M. Grzegorzcyk, and Jin Au Kong, "A Study of Using Metamaterials as Antenna Substrate to Enhance Gain," *Progress In Electromagnetics Research*, Vol. 51, 295-328, 2005.
- [22] U. Leonhardt, Optical conformal mapping , *Science*, 312 (2006), 1777-1780.
- [23] Musaed, A.A.; Al-Bawri,. Tunable Compact Metamaterial-Based Double-Negative/Near-Zero Index Resonator for 6G Terahertz Wireless Applications. *Materials* 2022, 15, 5608.
- [24] Armghan, A.; Lavadiya, S.; Alsharari, M.; Aliqab, K.; Daher, M.G.; Patel, S.K. Highly

- Efficient and Multiband Metamaterial MicrostripBased Radiating Structure Design Showing High Gain Performance for Wireless Communication Devices. *Crystals* 2023.
- [25] Duggal S K 2007 Earthquake-Resistant Design of Structures (Oxford: Oxford University Press).
- [26] Spencer B and Nagarajaiah S 2003 State of the art of structural control J. Struct. Eng. 129 845–56.
- [27] Xiang H, Shi Z, Wang S and Mo Y 2012 Periodic materials-based vibration attenuation in layered foundations: experimental validation Smart Mater. Struct. 21 112003.
- [28] R. Lakes, Foam structures with a negative Poisson's ratio, *Science* 235 (1987) 1038–1040.
- [29] B. Ungureanu et al, Auxetic-like metamaterials as novel earthquake protections, EPJ Applied Metamaterials Vol 2, 2015 Advanced Metamaterials in Microwaves, Optics and Mechanics.
- [30] Tantiwanichapan, K.; Durmaz, H. Herbicide/pesticide sensing with metamaterial absorber in THz regime. *Sens. Actuators A Phys.* **2021**, 331, 112960
- [31] Dadouche, N et al, A. Design and Fabrication of a Novel Corona-Shaped Metamaterial Biosensor for Cancer Cell Detection. *Micromachines* **2023**, 14, 2114.

Chapitre III

Conception et optimisation des capteurs à métamatériaux

III.1 Introduction

La création de capteurs implique l'analyse de structures potentielles, en particulier les structures ayant une permittivité ou une perméabilité négative. Une étude a été menée sur une cellule carrée SRR avec une permittivité négative pour une plage de fréquences spécifique. Ces structures offrent plusieurs avantages, notamment leur petite taille, leur coût de fabrication abordable et leur variété de formes disponibles. Les microondes, qui extraient les propriétés électriques et magnétiques d'un environnement soumis à un champ électromagnétique, offrent des avantages tels que des mesures rapides, une haute précision et l'automatisation. La conception des microondes repose sur l'adoption de matériaux en raison du faible rapport entre la taille de l'élément uni axial et la longueur d'onde de l'onde. Une haute sensibilité, une faible déviation de fréquence, une petite dimension électrique et une bonne linéarité sont cruciales pour les performances du capteur. Le choix entre une cavité résonante et une cavité plane pour la technique de caractérisation est également pris en considération. L'influence de différentes structures SRR couplées à une ligne micro ruban est étudiée à l'aide du logiciel Ansoft HFSS. Les structures multicarrés montrent une fréquence de résonance plus faible et une atténuation plus puissante par rapport aux autres structures.

III.2. Définition d'un capteur

Un capteur est un appareil qui mesure une quantité physique et la traduit en un signal. La quantité en question peut être par exemple la température, la longueur, la force ou bien évidemment la pression. Le signal transmis est généralement un signal électrique mais peut être également optique. Ainsi, la structure d'un capteur répond de manière générale au schéma ci-dessous [1] :

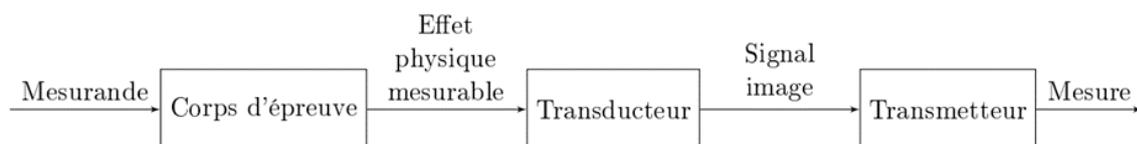


Figure III.1 :Structure d'un capteur [2]

III.2.1 Introduction aux techniques de caractérisation de liquides

III.2.1.1 Techniques de caractérisation de capteurs

La création de circuits et de dispositifs hyperfréquences, optiques ou plasmoniques requiert une connaissance approfondie des propriétés intrinsèques des matériaux, telles que la permittivité complexe ϵ pour les isolants (ou diélectriques) et les semi-conducteurs. À l'origine développées pour caractériser des matériaux solides utilisés dans la conception de substrats ou de résonateurs planaires, les techniques de mesure des propriétés diélectriques des matériaux ont été étendues à la caractérisation des liquides.

Dans un premier temps, cela a permis la modélisation de ces matériaux nécessaire aux simulations de concentration, et plus récemment pour le développement de biocapteurs microfluidiques. Parmi les différentes techniques de caractérisation, on distingue trois catégories : les techniques réflectométries, les techniques de transmission et les techniques résonantes. Dans notre cas, nous nous intéressons aux techniques résonantes, plus précisément aux techniques basées sur des résonatrices planaires miniatures.

Tableau III.1 : Techniques d'analyse RF et hyperfréquences sur les liquides [3]

Techniques	Précision mesure	Dimensions	Volume fluide	Placement	Largeur de bande	Remarques
Guide miniature CPW Microruban	Bonne	Miniature	Quelques nL	Face supérieur (structure μ fluidique)	Bande large	Dévelop.Techno. nécessaire pour les fluides
Cavité résonante (TM)	Très bonne	Volumineux	#1mL	Dans un tube au centre de la cavité	Bande étroite	Incertitude dans les mesures de ϵ
Cavité résonante (TE)	Très bonne	Volumineux	#1mL		Bande étroite	
Résonateurs planaires	Excellente pour ϵ'	Volumineux	#1 μ L	Nombreuses techniques	Bande étroite	
Résonat. Mini. CPW Microruban	Très bonne	Miniature (intégrable)	Quelques nL	Face supérieur (structure μ fluidique)	Bande étroite	Dévelop.Techno. nécessaire pour les fluides

En ce qui concerne la précision des techniques de mesure de fluide dans la gamme microondes, il apparaît clairement que les solutions résonantes à bande étroites sont meilleures que les solutions à large bandes.

III.2.1.2 Caractéristiques d'un capteur

a) Sensibilité

La sensibilité d'un capteur se définit comme sa capacité à percevoir de légères variations de la grandeur mesurée. Une sensibilité élevée est essentielle pour détecter de faibles concentrations de substances analytiques, notamment dans les domaines biomédicaux et environnementaux [4].

La sensibilité S peut être exprimée mathématiquement par : $S = \Delta V / \Delta P$ (3.1)

Où :

- ΔV est la variation du signal de sortie du capteur.
- ΔP est la variation de la grandeur physique mesurée.

b) Linéarité

C'est la zone de la réponse du capteur dans laquelle sa sensibilité est indépendante de la valeur de la grandeur mesurée. Cette zone peut être définie à partir de la définition d'une droite obtenue comme approchant au mieux la caractéristique réelle du capteur. [5]

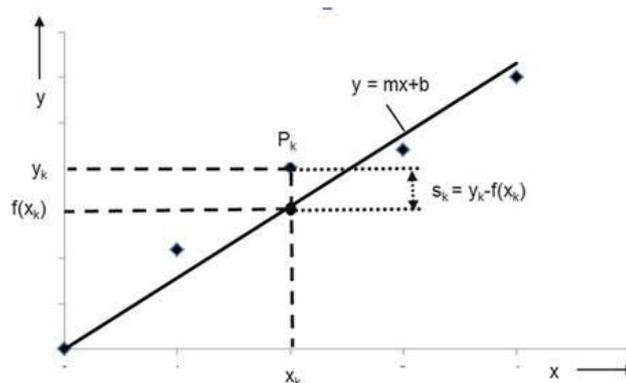


Figure III.2 : Exemple de linéarisation de caractéristiques.

c) La dimension électrique

Un des objectifs à atteindre est la compacité du dispositif. En tant qu'indicateur de dispositif résonant compact, la taille électrique u du résonateur est exprimée par :

$$u = 2a\lambda_0 \quad (3.2)$$

Où $2a$ est la dimension linéaire maximale de la structure et λ_0 la longueur d'onde correspondant à la fréquence de travail f_0 . [6]

e) La fonction de transfert

La fonction de transfert d'un capteur est essentielle pour comprendre son fonctionnement et ses caractéristiques. Elle permet de modéliser la relation entre la grandeur physique mesurée et

le signal de sortie, ce qui facilite l'utilisation précise et efficace du capteur dans diverses applications [7].

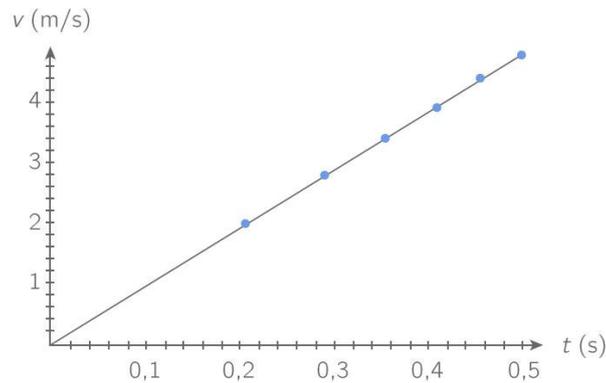


Figure III .3 : exemple de fonction de transfert [8]

III.2.1.3 Métamatériaux non linéaires

Les métamatériaux non linéaire peuvent être fabriqués à l'aide de structures comprenant différentes formes de matériaux à milieu non linéaire de fréquences optiques. Ils ont pour objectif d'améliorer la résistance faible de ces matériaux optiques ou d'étudier l'impact de ces caractéristiques physiques sur le changement du champ électrique [9].

✓ **Caractéristiques des Métamatériaux Non Linéaires**

a) Propriétés :

Les résonateurs intégrés dans les métamatériaux non linéaires peuvent avoir des réponses résonantes qui varient avec l'intensité du champ, ouvrant des possibilités pour les filtres réglables et les dispositifs de stockage d'énergie [10].

b) Réponse non Linéaire :

Les métamatériaux non linéaires modifient leurs propriétés électromagnétiques (comme la permittivité et la perméabilité) en réponse à l'intensité des champs appliqués, ce qui permet des applications comme la modulation de signal et le contrôle actif des ondes [11].

Voici quelques formes de structures de métamatériaux non linéaires :

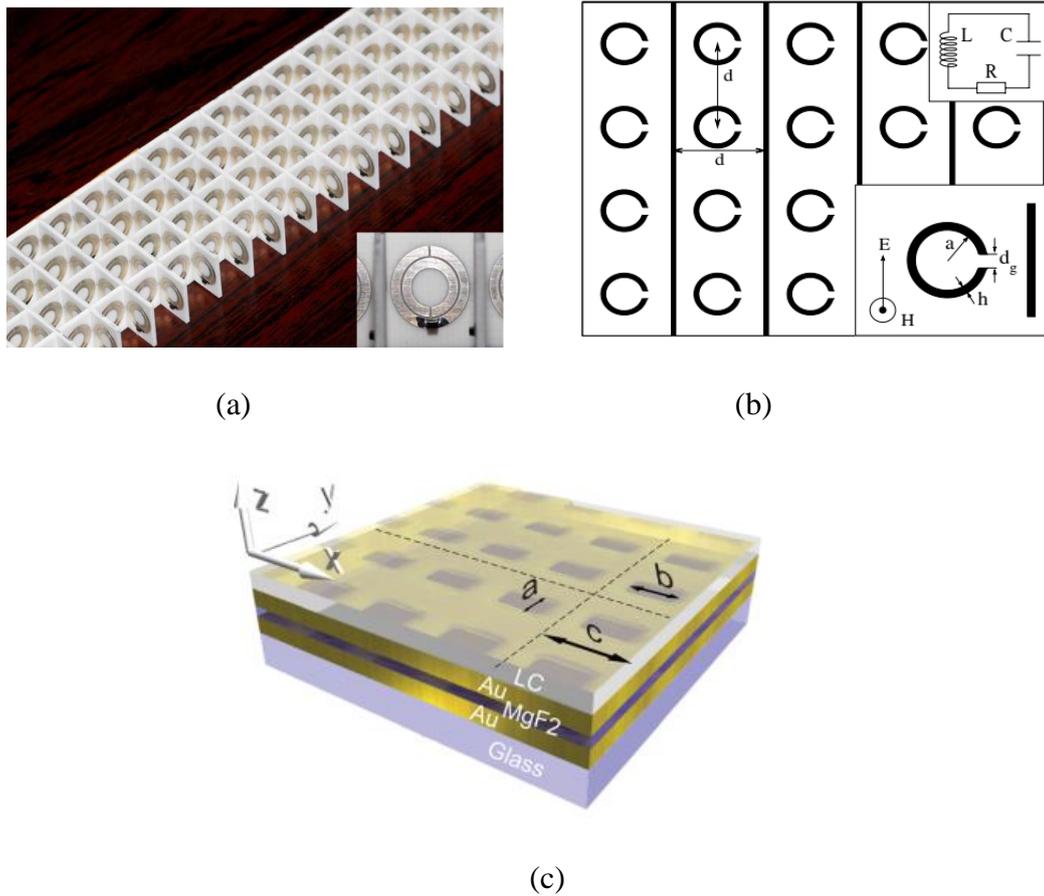


Figure. III .4 : (a) Métamatériau constitué de résonateurs à anneau fendu avec diodes varicap[12]
 (b)réseaux de fils et d'SRR intégrés dans un diélectrique non linéaire [13](c) cristal liquide à métamateriau non linéaire sous forme de fishnet [14]

III.3. Etude des structures résonantes à base des SRR

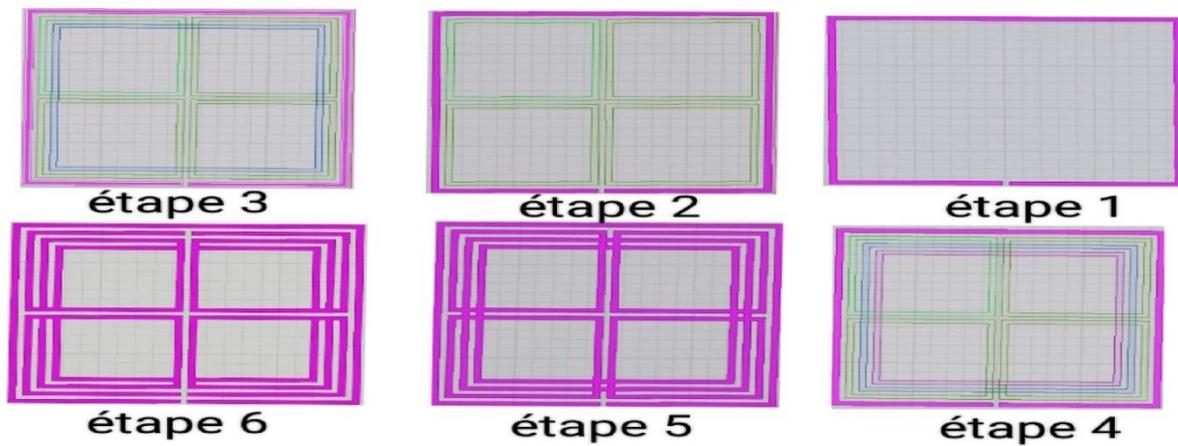


Figure III .5 Les différentes structures SRR qui sont utilisés dans cette étude

(a) forme rectangulaire avec un seul anneau, (b) forme carré avec quatre anneaux carrés, (c) forme double carré avec quatre anneaux carrés, (d) forme 3carré avec quatre anneaux carrés, (e) forme 3carré avec quatre anneaux carrés c'est compact, (f) forme après le processus de fusion des formes carrées nous avons recadre certains bords

La Figure III.5 montre plusieurs configurations de résonateur en anneau combines, de forme rectangulaire, Nous considérons ici le rôle de chaque paramètre : taille, distance, angle, etc. Nous analyserons également l'effet du couplage entre ces configurations et la ligne de transmission

III. 3.1 Couplage entre une structure résonante et une ligne de transmission

Le couplage entre l'SRR de forme carrée et la ligne uniforme est illustré dans la Figure III.5.

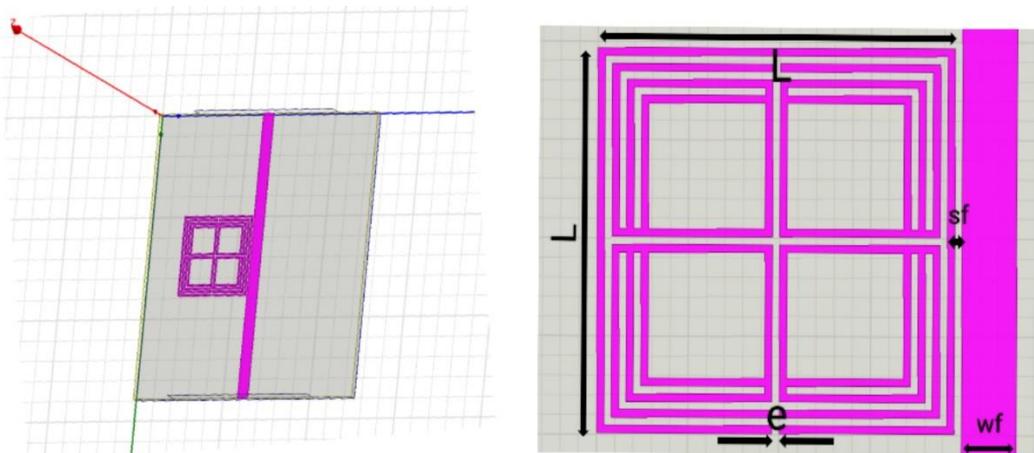


Figure III .6 Couplage entre une structure résonante et une ligne de transmission

Les différents paramètres utilisés sont donnés dans le Tableau III.2

Tableau III.2 : Dimensions du capteur conçu

Désignation	L	E	S_f	W_f
Valeur (mm)	19,6	0,4	0,4	3
Paramètre	Largeur résonateur	Gap	Espace entre la ligne et le résonateur	Largeur de ligne

Le substrat est de type FR4 avec $\epsilon_r=4,5$; $\tan \delta=0,022$.

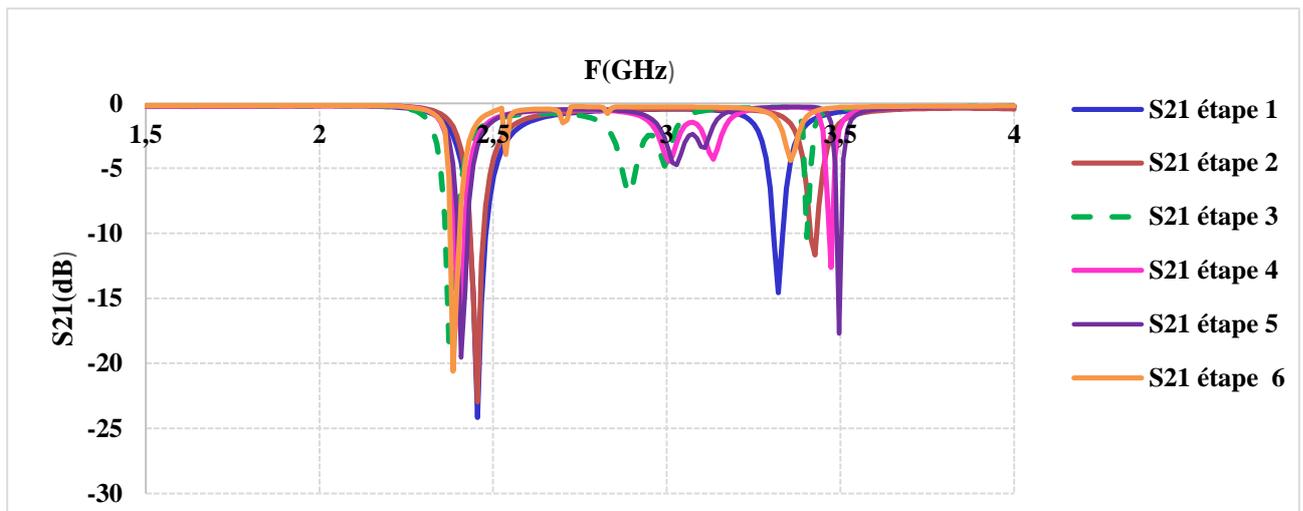


Figure.III .7 Coefficient de transmission pour les différentes étapes de conception

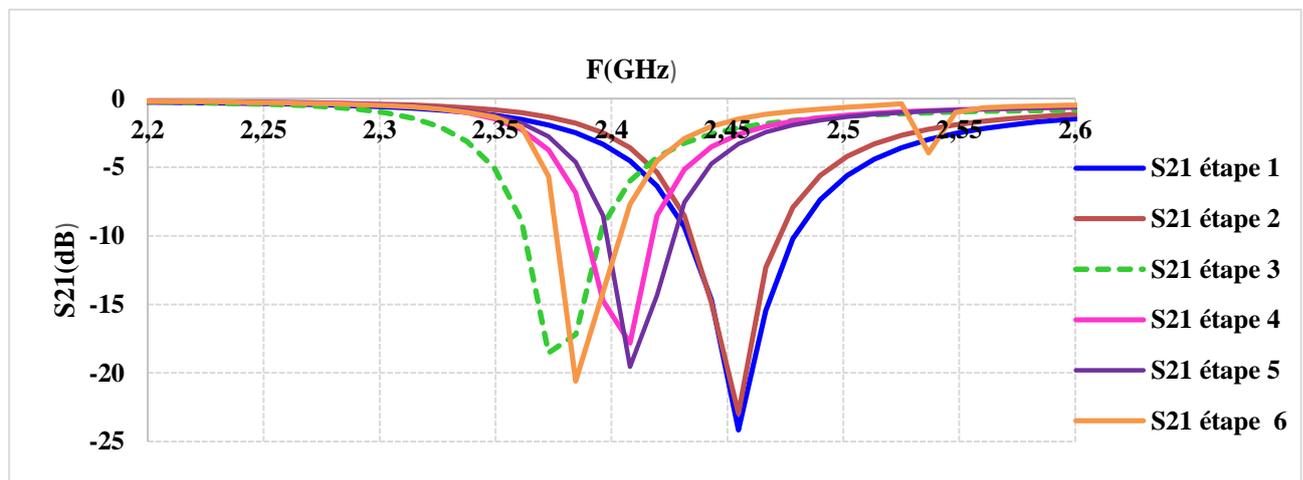


Figure.III .8 : Coefficient de transmission pour les différentes étapes de conception autour de fréquence de résonance

La Figure III.8 compare l'allure de résonances de différentes structures SRRs pour enfin choisir la meilleure forme et essayer de l'optimiser.

Tableau III .3 : Coefficient de transmission pour les différentes étapes de conception

Structure	Etape 1	Etape 2	Etape 3	Etape 4	Etape 5	Etape 6
Fr(Ghz)	2.4548	2.4548	2,3729	1,1321	2,4080	2,3846
S21(dB)	-24,2396	-22,9524	-18,5436	-23,55313	-19,5565	-20,6018

Donc pour mieux satisfaire de la compacité la structure d'étape 6 sera choisi dans le reste de la discussion.

III.3.1.1 Étude paramétrique de la structure proposée

a) Orientation de la structure résonante par rapport à la ligne de transmission

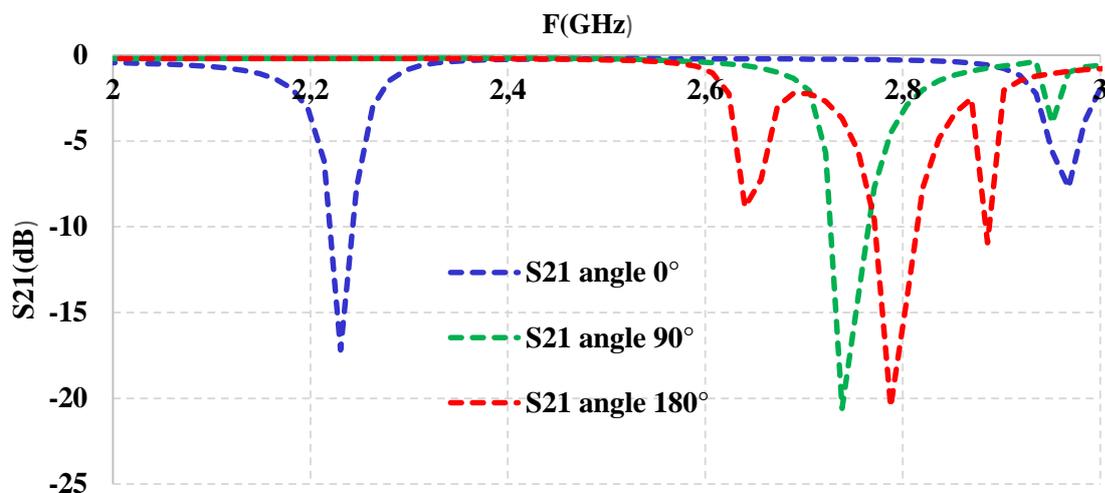


Figure.III .9 : Coefficient de transmission S_{21} en fonction de la fréquence pour des orientations différentes

Dans cette étude sur l'angle de la structure par rapport à la ligne de transmission Figure III.8, on a placé la structure en plusieurs angles 0° , 90° et 180° . Par rapport à la ligne de transmission

- Tableau III.4 : Comparaison entre les différentes orientations

Angle	0°	90°	180°
f_r (GHz)	2,2304	2,846	2,78
S_{21} (dB)	-17,17	-20,60	-20,50

Dans cette partie, il est proposé d'étudier l'effet de l'angle sur le comportement fréquentiel de structure on propose trois orientations de SRR 0° , 90° et 180° .

Comme On voit que l'angle 90° donnant la fréquence de résonance plus élevée que les deux autres angles

D'après ces résultats on conclut que la position de l'angle 90° est le plus compatible pour le couplage entre la structure et la ligne de transmission

b) Espacement entre une structure résonante et une ligne de transmission

Dans cette partie, on étudie les résultats de l'espacement entre une structure et une ligne de transmission, on prend trois valeurs pour cet espacement $S_f = (0,2\text{mm}, 0,4\text{mm}, 0,6\text{mm})$

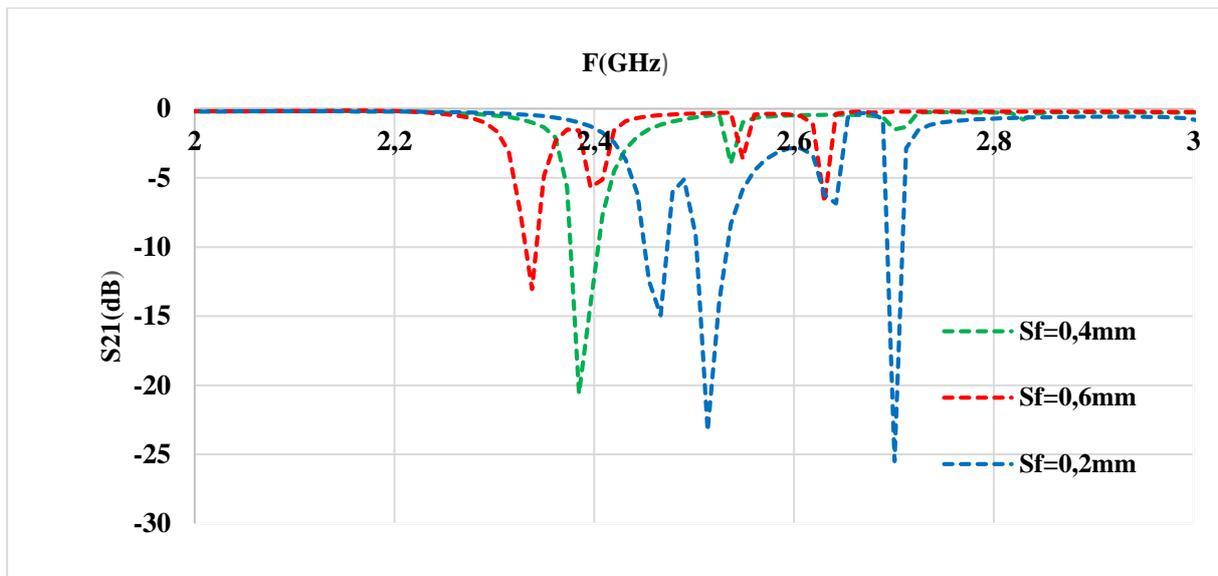


Figure.III .10 : Coefficient de transmission S_{21} en fonction de la fréquence

On voit que si l'espacement diminue, l'atténuation et la fréquence de résonance SRR augmentent.

Tableau III.5 : Influence de l'espacement S_f

S_f	0,2mm	0,4mm	0,6mm
S_{21} (dB)	-25,50	-20,60	-13,05
f_r (GHz)	2,7007	2,3846	2,3377

Donc, on remarque que la valeur $S_f=0,2\text{mm}$ est donne l'atténuation-25,50 dB et fréquence de résonance 2,7007 GHz C'est une bonne valeur par rapport aux deux autres valeurs, mais dans notre cas on ne peut pas la prendre et créer la forme car les la technologie de fabrication est limitée à $400\mu\text{m}$, nous prenons donc la valeur $S_f=0,4\text{ mm}$ (-20,60 dB, 2,3846 GHz)

c) Ouverture des anneaux

Dans cette partie, nous étudions les résultats de la valeur de trois ouvertures de valeurs différentes $e = (0,2\text{mm}, 0,4\text{mm}, 0,6\text{mm})$ pour évaluer l'effet de ce paramètre sur le coefficient de transmission

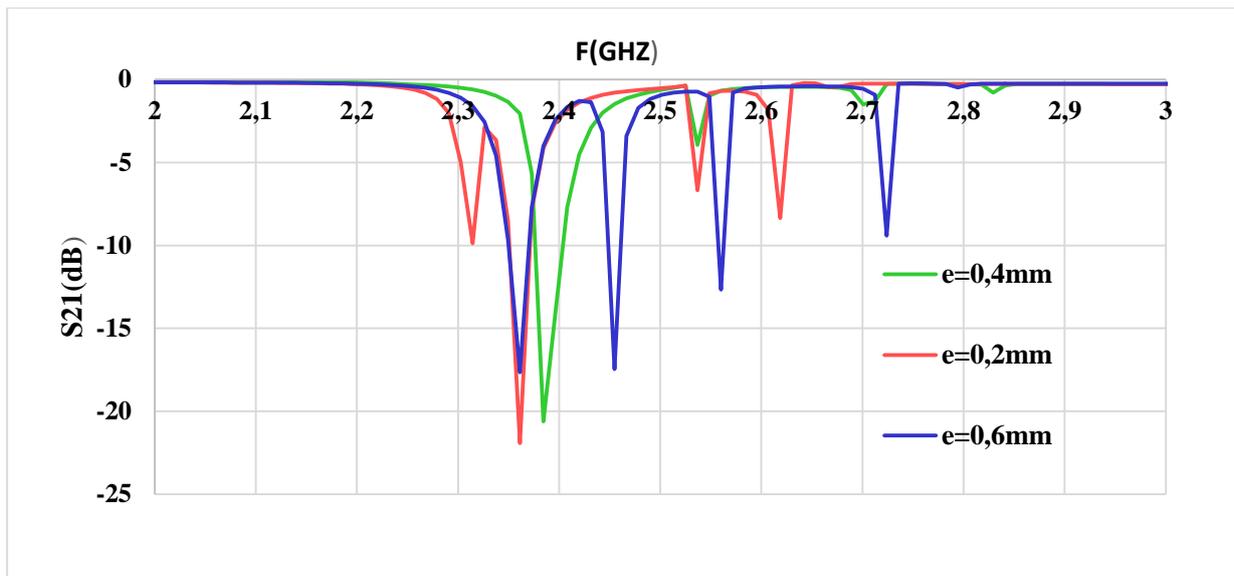


Figure.III .11 : Coefficient de transmission S_{21} en fonction de la fréquence pour une ouverture d'anneau différente

On remarque sur la Figure et le Tableau que la valeur $e=0,4\text{mm}$ donne la valeur de fréquence de résonance la plus élevée car l'amplitude du gap est la plus faible.

Tableau III.6 : Influence de l'ouverture

Taille ouverture e	0,2mm	0,4mm	0,6mm
$S_{21}(\text{dB})$	-21,91	-20,60	-17,65
Fréquence (Ghz)	2,3612	2,3846	2,3612

III.4 Capteur à base d'SRR.

Nos travaux de conception se basent sur des recherches antérieures, notamment sur les résonateurs multi-carrés de type SRR. Au début, nous cherchons à améliorer les structures en fonction des caractéristiques du substrat, de la permittivité relative, des tangentes de perte, ainsi que des dimensions des modes conducteurs qui pourraient être limitées par les capacités de production en laboratoire. Nous avons également modifié la forme du résonateur pour étudier l'impact du nombre de résonateurs et des dimensions sur les propriétés des capteurs, notamment la sensibilité et la taille électrique. A partir de cette étude, une structure sera créée.

III.4.1 Structure multi résonateurs

III.4.1.1 Conception et fabrication

Notre structure a été conçue et construite chez Almitex SNC dans les limites de la technologie de fabrication qui est $400\ \mu\text{m}$.

Les propriétés physiques et techniques de notre structure sont :

Le matériau :

- On utilisé pour le substrat est le FR4 ($\epsilon_r=4,5$ $\mu=1$, $\text{tg}\delta=0,022$) avec une épaisseur de 1,6mm et largeur des piste 4 mm la ligne de transmission :
- On a utilisé l'application« Microstrip Line Calculator-emptalk » pour avoir les caractéristiques de la ligne de transmission dans la Figure suivant :

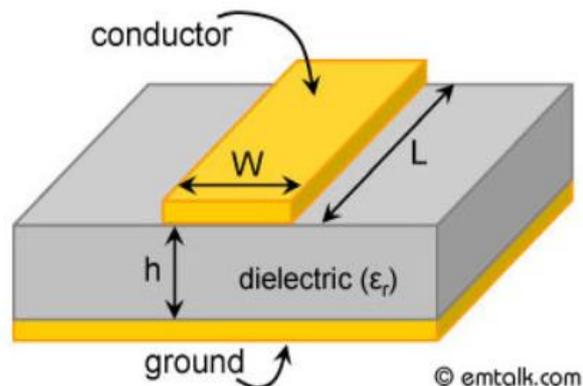
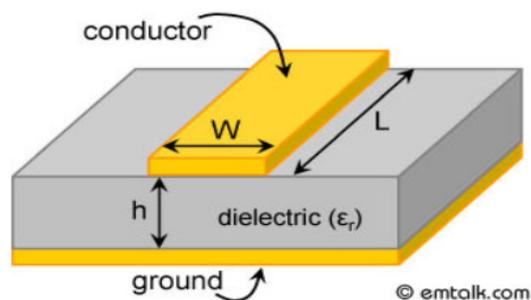


Figure.III .12 : Ligne de transmission

Le calculateur micro-ruban déterminer la largeur et la longueur d'une ligne de transmission

Pour une impédance caractéristique (Z_0) et une longueur électrique données et les paramètres du substrat ($\epsilon_r;h$) et la fréquence d'intérêt sont requis.



Substrate Parameters

Dielectric Constant (ϵ_r):

Dielectric Height (h): mm ▾

Frequency: GHz

Electrical Parameters

Z_0 : Ω

Elec. Length: deg

Synthesize

Physical Parameters

Width (W): mm ▾

Length (L): mm ▾

Analyze

Figure.III .13 Les dimensions de ligne de transmission.

Après l'étude de l'application « Microstrip Line Calculator-entalk » a été représentées dimensions de ligne de transmission

- * La longueur totale de la ligne de transmission est 70mm
- * La largeur de la ligne de transmission est 3mm

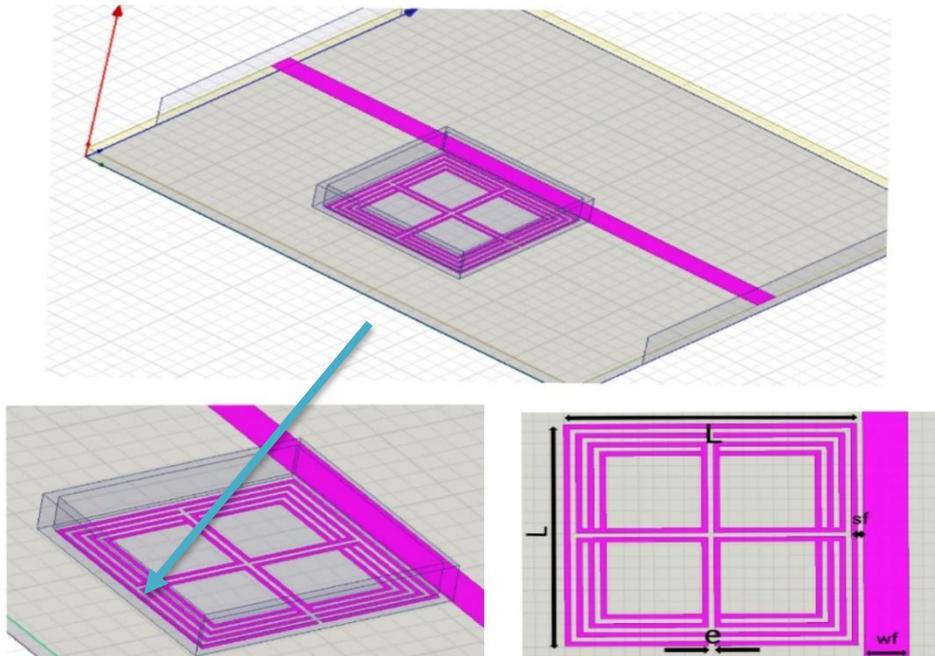
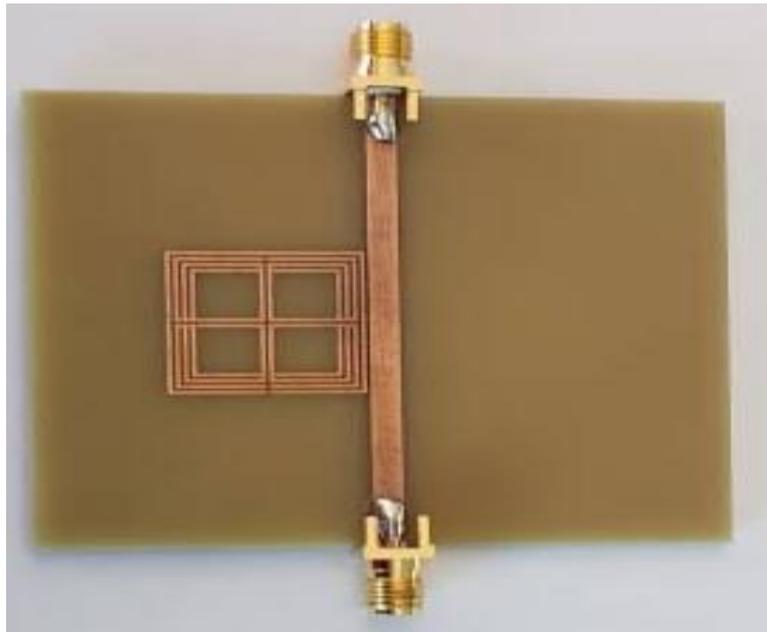


Figure.III .14 : (a) Design de la structure à réaliser (b) dimensions du résonateur

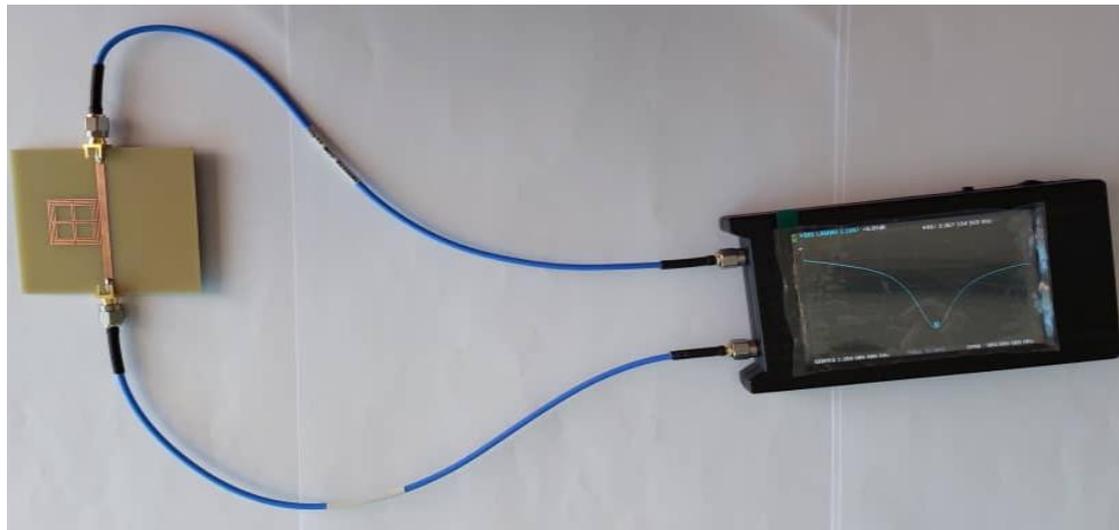
Tableau III .7 : Les différentes longueurs de la structure

Désignation	L	E	S _f	W _f
Valeur (mm)	70	4	0	3

Donc, la Figure III. 15(a) est la photo du capteur réalise par Almitech SNC en Algérie



(a)



(b)

Figure.III.15 : (a) Photo du capteur réalisé (b) Manip de mesure (structure, analyseur de réseau)

III.5 Résultats et discussions

III.5.1 Expérimentation avec un mélange eau-éthanol

a) Mesures avant le dépôt de liquides (cas du vide)

La fréquence de résonance et les paramètres de réflexion et de transmission ont été mesurés par un analyseur de réseau LiteVNA64. La Figure III.16 compare le coefficient de transmission simulé et mesuré du montage expérimental avec un échantillon dans le vide.

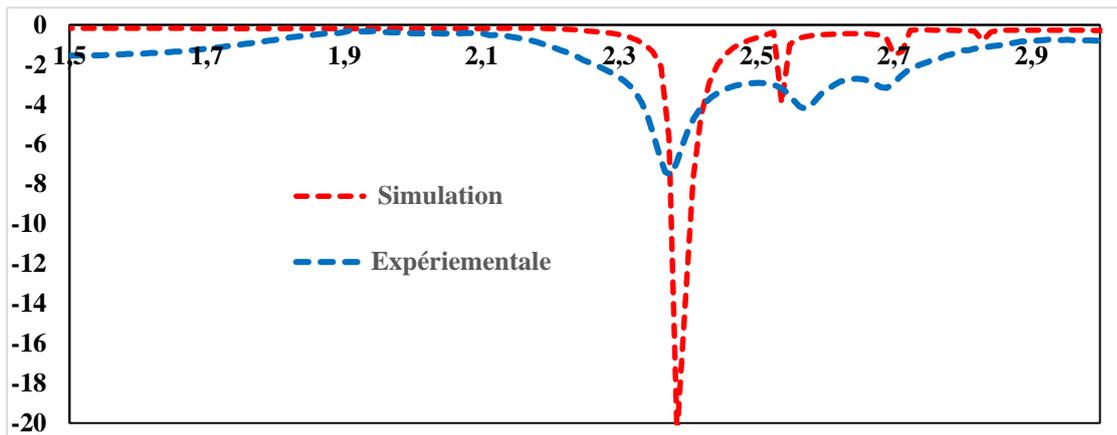


Figure III.16 : Simulation et mesures de la transmission dans le cas du vide

Tableau III.8 : Résumé des résultats de simulation et de mesures de la transmission dans le cas du vide

Cas testés	Simulation	Expérimentale
S_{21} (dB)	-20,60	-7,53
Fréquence(GHz)	2,384	2,376

- On remarque dans le tableau et la Figure qu'il y a résonance autour de deux valeurs consécutives, 2,384GHz et 2,376GHz ce qui représente 0.33% comme marge d'erreur.
- La différence dans l'allure entre la simulation et l'expérimentale est dû à plusieurs paramètres tels que : les pertes de rayonnement, Le choix du couplage car les résonateur à effet de champs donnent des allures plus ou moins bons. L'analyseur été calibré en entrée et en sortie (50 Ohm) mais pas au centre. Dans cette situation, on s'assure le paramètre principal qui est la fréquence de résonance. Enfin les limites de fabrication car pour 0.2 mm, il était possible d'avoir des atténuations de valeurs supérieur à -10dB.

b) Mesures après le dépôt de liquides

Les liquides (eau, éthanol) ont été introduits séparément dans un récipient qui englobe le résonateur. Nous avons déposé 2ml de chaque liquide via une seringue médicale.

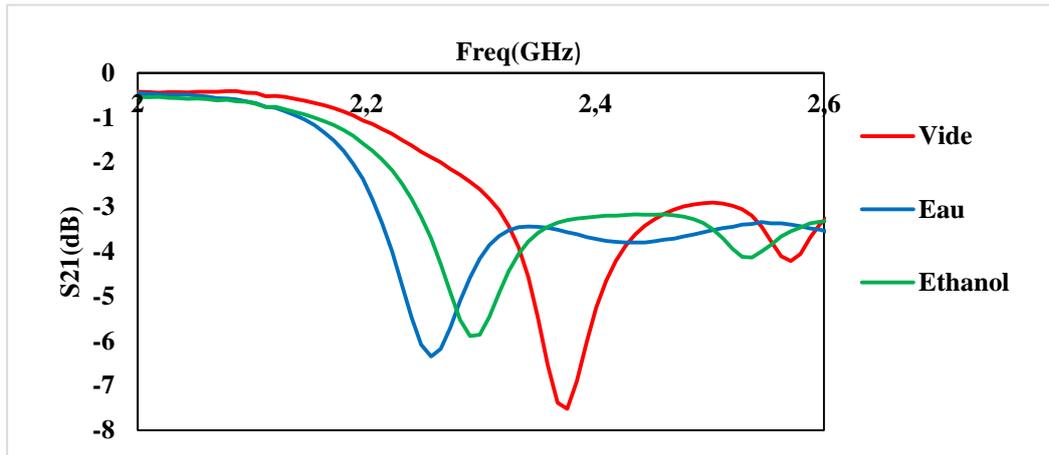


Figure III.17 : Mesures de transmission de l’eau, de l’éthanol et du vide.

Tableau III.9 : Résumé des résultats de mesures de la transmission dans le cas de vide, de l’eau, et de l’éthanol

Cas testés	Vide	Water	Ethanol
S ₂₁ (dB)	-7,5230	-6,350	-5,885
Fréquence(GHz)	2,367	2,255	2,290

Donc, à chaque fois que nous changeons le liquide déposé, la fréquence de résonance change. Cette fréquence varie en fonction de la permittivité de chaque matériau sous test.

c) Caractérisation de liquides

En se basant sur la relation de Cole-Cole

$$\epsilon_r = \epsilon_r(\infty) + \frac{\epsilon_r(0) - \epsilon_r(\infty)}{1 + (\omega\tau_d)^2} \tag{3.3}$$

$\epsilon_r(0)$ et $\epsilon_r(\infty)$ sont les constantes diélectriques « statique » et « fréquence infinie », ω est la fréquence angulaire et τ_d est un temps caractéristique.

Nous calculons les permittivités relatives complexes de l’eau et de l’éthanol avec [15]:

Dans le cas de l’éthanol :

Modèle initiale : avec $\epsilon_r(\infty) = 4,7776$; $\epsilon_r(0) = 25$;

$$\text{Re}(\epsilon_r \text{ éthanol}) = 4.78 + 20.22 / (1 + 4.89 \cdot 10^{-19} \cdot \text{Freq} \cdot \text{Freq}) \tag{3.4}$$

$$\text{Im}(\epsilon_r \text{ éthanol}) = 2.05 \cdot 10^{-8} \cdot \text{Freq} / (1 + 4.89 \cdot 10^{-19} \cdot \text{Freq} \cdot \text{Freq}) \tag{3.5}$$

Dans le cas de l'eau:

Modèle initiale: Avec $\epsilon_r(\infty) = 3,04$; $\epsilon_r(0) = 78,4$; $\tau = 8,21 \cdot 10^{-12}$

$$\text{Re}(\epsilon_{r \text{ eau}}) = 3.04 + 75.36 / (1 + 2.66 \cdot 10^{-21} \cdot \text{Freq} \cdot \text{Freq}) \tag{3.6}$$

$$\text{Im}(\epsilon_{r \text{ eau}}) = 3.887 \cdot 10^{-9} \cdot \text{Freq} / (1 + 2.66 \cdot 10^{-21} \cdot \text{Freq} \cdot \text{Freq}) \tag{3.7}$$

Tableau III.10 : Décalage de résonance après le dépôt de l'eau et de l'éthanol pure.

Cas testés	Vide	Récipient vide	Ethanol	Eau
Fréquence(GHz)	2.3755	2.3245	2.2905	2.2565
ϵ_r	1	$1 > \epsilon_r > 3.2$	10.35	77.77

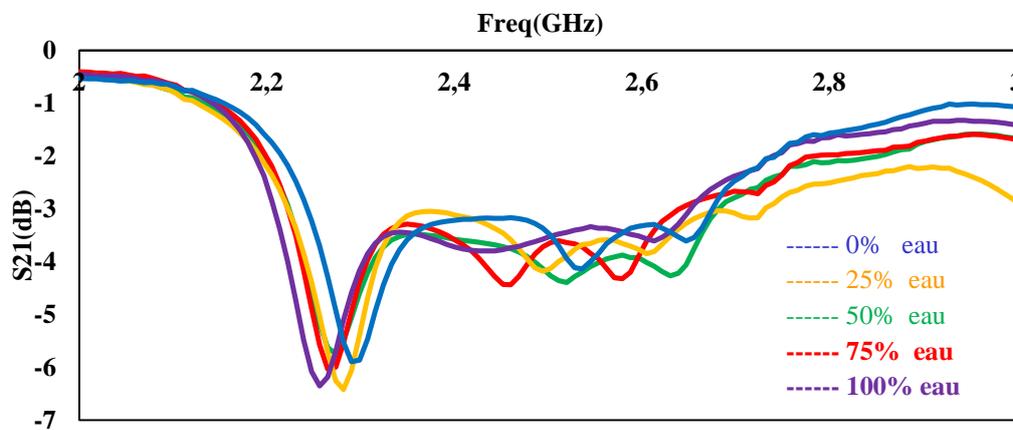
Après introduction du liquide (eau et éthanol) dans le récipient, la fréquence de résonance, qui était initialement de 2,3755 GHz à l'état vide, a diminué jusqu'à 2,2905 GHz à l'état d'éthanol déminéralisé et à 2,2565 GHz à l'état d'eau.

En conclusion l'augmentation de la permittivité relative du matériau sous test est accompagnée par une décroissance de la fréquence de résonance.

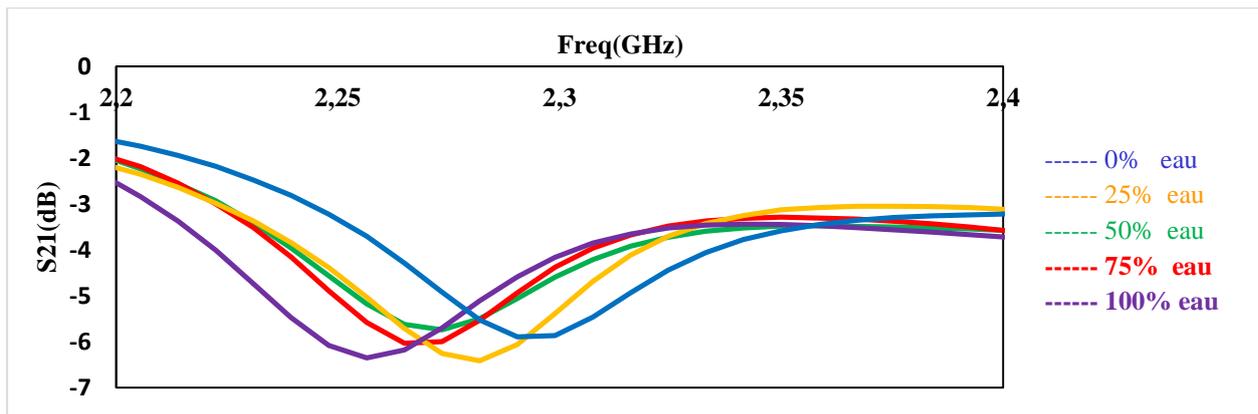
Un décalage de 170 MHz pour un changement de permittivité relative de 76,77 entre les cas de l'eau et le vide. Ce décalage est réduit à 78MHz en comparant le cas du récipient vide et l'eau car dans les deux cas nous avons utilisé le récipient. Le récipient de matière plexiglass a créé un décalage de 51MHz avant le dépôt des liquides.

a) Mesures avec un mélange eau-éthanol

- Pour ces mesures, la fraction volumique d'éthanol a été modifiée de 0% à 100% avec un pas variable.



(a)



(b)

Figure III.18 : Mesures de coefficient de transmission d'échantillons de mélange de l'eau-éthanol pour le calibrage du capteur. La fraction volumique de l'eau est changée de 0% à 100% avec un pas variable 25%

(a) entre 2 et 3GHz (b) autour de fréquence de résonance

- La fréquence de résonance et le pic d'atténuation du capteur sont enregistrés à chaque étape. Les fractions utilisées sont 0, 25, 50, 75, 100% d'éthanol. La Figure III.18 montre le coefficient de transmission S21 mesuré pour différentes concentrations de mélange eau-éthanol.

Tableau III.11 : Mesures de coefficient de transmission d'échantillons de mélange de l'eau-éthanol

Cas testes	Ethanol	75% Ethanol	50% Ethanol	25% Ethanol	Eau
Fréquence (GHz)	2,2905	2,2820	2,2735	2,2650	2,2565
ϵ_r	10,35	26,28	43,45	60,14	77,77

Comme on le voit, la fréquence de résonance est passée de $f_{01} = 2,2905$ GHz à $f_{02} = 2,2565$ GHz pour le changement de concentration d'éthanol de 0% à 100%, indiquant un décalage de 43 MHz pour un changement de permittivité relative de 67,42.

Le but de la caractérisation avec des mélanges est de vérifier la haute sensibilité et la linéarité du capteur.

III.5.2 Insertion de la Diode varactor

III.5.2.1 La diode varactor

Une diode varactor est un dispositif semi-conducteur dépendant de la tension dont la capacité interne varie avec le changement de tension inverse. Une diode varactor est utilisée lorsqu'une capacité variable est requise et cette capacité est contrôlée par la tension.

Elle est également appelée Varicap, Voltcap, tension variable Capacité ou diode réglable. La diode a deux pôles : positif et négatif. La diode de contrainte est constituée de matériaux semi-conducteurs de type n et de type p. Dans les matériaux semi-conducteurs de type n, électrons

constituent la charge majoritaire, et dans les matériaux de type p, trous sont les porteurs de charge majoritaires. Lorsque des matériaux semi-conducteurs de type p et de type n sont combinés, une jonction p-n est formée et une région d'appauvrissement est créée au niveau de la jonction p-n.

La diode varactor fonctionne uniquement en mode polarisation inverse où aucun courant ne circule. Si la diode est connectée dans le sens direct, le courant commence à circuler à travers la diode et la charge totale stockée dans la diode devient 0, c'est-à-dire qu'est indésirable.

La diode varactor est utilisée pour stocker la charge sans lui permettre de cycliser. La capacité de la diode varactor diminue avec l'augmentation de la région d'appauvrissement. Augmenter la capacité signifie plus de charge pour les diodes de stockage [16].

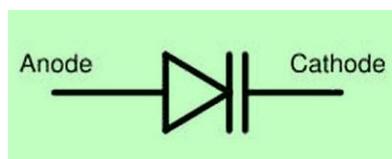


Figure.III.19 :Symbole de la diode Varactor

III.5.2.2 Simulation et expérimentale

L'objectif de cette partie est de faire une étude expérimentale en mettant une diode varactor dans l'ouverture de l'anneau extérieur mais vu que les mesures obtenues n'ont pas été satisfaisantes, nous nous contentons simplement de faire résumer notre étude en utilisant le logiciel HFSS. On sait que dans HFSS, il n'est pas possible d'ajouter directement un composant électronique. Pour simplifier, il suffit de reproduire la diode varactor à l'aide d'une fonction fournie appelée : Composant RLC (Lumped ports) ou 1, la Figure III.20 Représente la diode

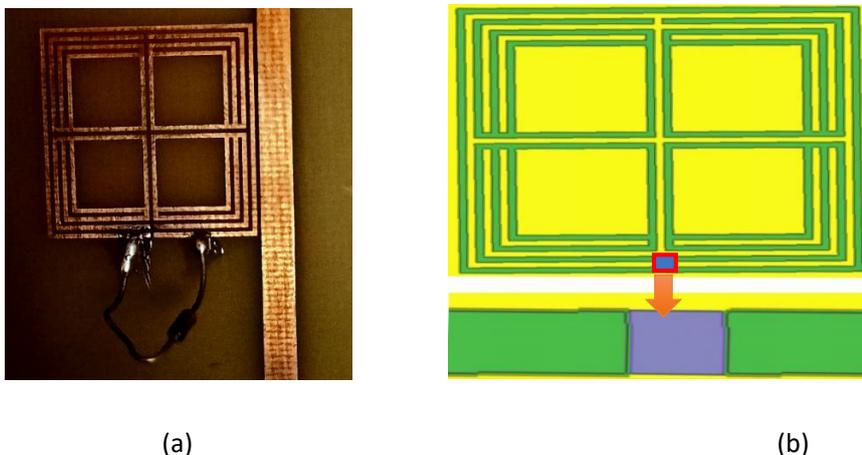


Figure.III.20 : (a) diode varactor insérée dans le circuit (b) diode varactor en HFSS

La zone bleu foncé mise en évidence sur la Figure III.20 représente le composant de diode varactor. Dans cette conception, nous adoptons le Diode varactor commerciale SMV2203-040LF fabriquée par Skyworks Solutions Inc, dont le modèle d'épices est présenté dans Figure III.21

Dans le modèle, la résistance R_s , l'inductance L_s et le condensateur C_p est considéré négligeable lors de la polarisation inverse La tension sur les ports 1 et 2 change. Cependant, lorsque l'inverse La tension de polarisation sur la diode varactor diminue de 0V a -16V, La capacité C_t de la diode varactor diminue de manière non linéaire de 4,71pF à 0,36pF. Les paramètres de circuit équivalent de la diode varactor SMV2203-040LF sont présentés dans le Tableau.

Tableau III. 12 : Paramètres de la diode SMV2203-040LF

Tension (Vr)	R_s (Ohm)	L_s (nH)	C_t (pF)
0	2.76	0.45	4,71
-4			1,89
-8			0,97
-12			0,62
-16			0,36

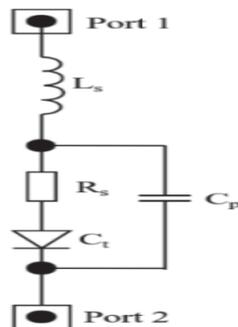


Figure.III.21 : Circuit équivalent de la diode varactor SMV2203-040LF [17]

III.5.2.3 Résultats et discussion

a) Changement de capacité (cas du vide)

Après simuler les valeurs de capacités différentes de cet élément, on connaît le comportement de la diode variable mis en œuvre dans la conception proposée dans la Figure Capacités à valeur variable (V_C) :

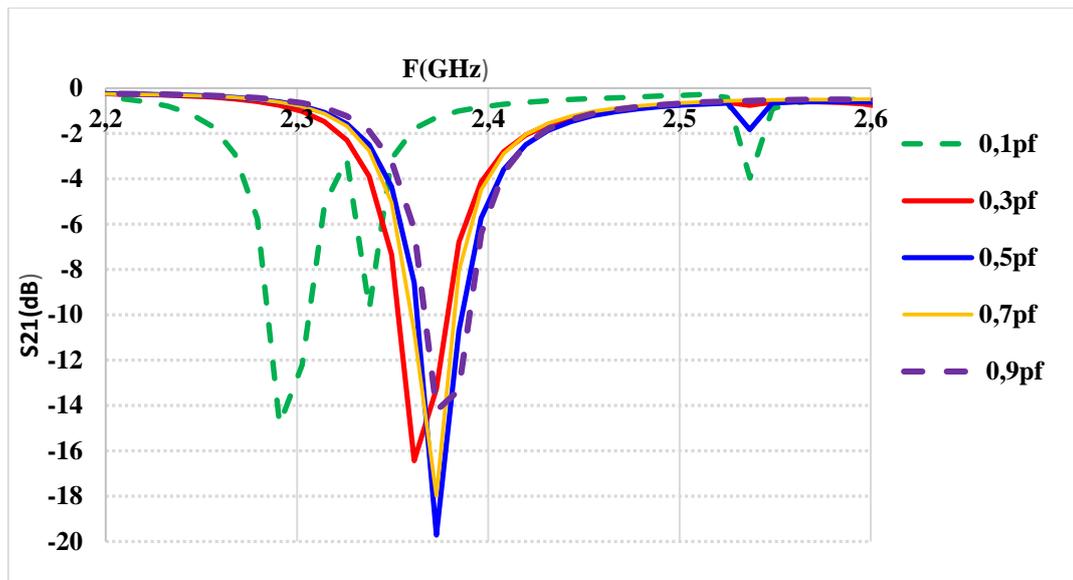


Figure.III.22 : Réponses S_{21} pour une capacité variable $C = (0,1, 0,3, 0,5, 0,7, 0,9)$ pF

Tableau III.13 : Réponses S_{21} pour une capacité variable (V_C)

C (pF)	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9
Fréquence (GHz)	2,29	2,36	2,37	2,37	2,37
S_{21} (dB)	-14,82	-16,43	-19,70	-17,98	-14,21

L'augmentation de la valeur de capacité est associée avec un décalage de fréquence jusqu'à la fréquence 2.37 GHz correspond à la valeur 0.5pF où nous remarquons que la fréquence de résonance s'arrête mais l'allure diminue.

Selon la Figure III.21 une diode varactor est composée de capacité variable C_t , résistance R_s , inductance L_s et capacité interne inchangée (des fois nulle) donc pour tester l'effet de la diode sur le circuit, nous devons utiliser les valeurs des paramètres électriques présentés dans le Tableau III.11

b) Cas de la diode SMV2203-040LF

La diode varactor est polarisée en inverse via un réseau de polarisation qui comprend une inductance d'arrêt et une résistance. Les capacités des de la diode varactor sont réglées de 4,71 à 0,36 pF en modifiant la tension de polarisation inverse de 0 à 16 V.

Les amplitudes des paramètres S simulés sont présentées sur la Figure III.23, tandis que les résultats. La tension inverse V_R est balayée de 0 à 16 V par pas de 4V. Les résultats montrent que le la fréquence de résonance augmente lorsque la valeur de la capacité diminue. Lorsque V_R est de 0 V, une résonance à environ 2,326 GHz est obtenue, et lorsque V_R est de 16 V, la fréquence de

résonance se déplace vers 2,385 GHz.

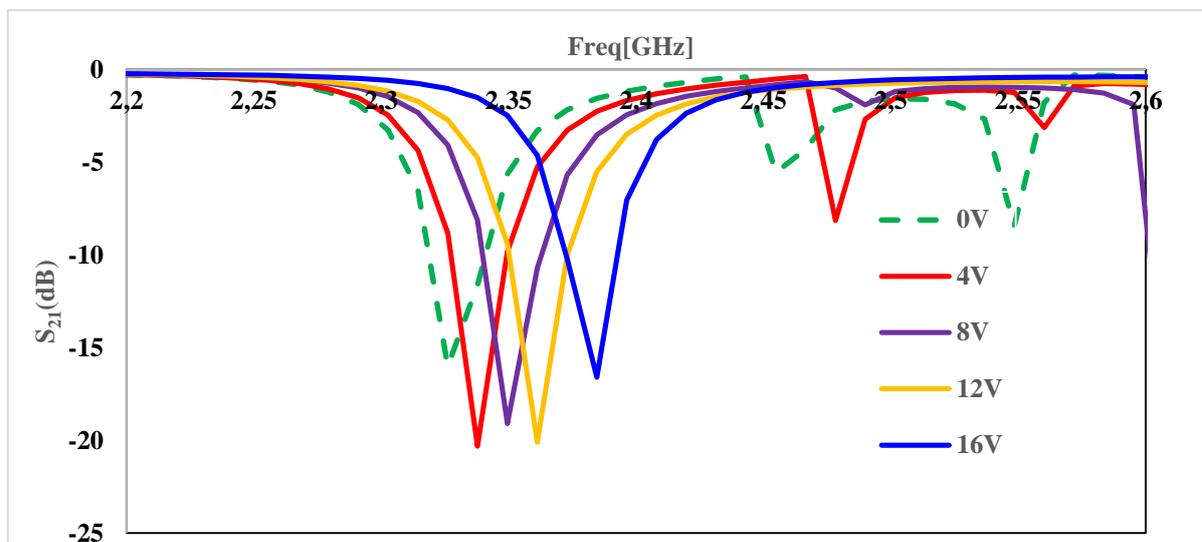


Figure.III.23 : Réponses S_{21} en fonction de la tension inverse V_R de la diode

Tableau III.14 : Réponses S_{21} en fonction de la tension inverse V_R de la diode SMV2203-040LF

V_R (V)	0	-4	-8	-12	-16
Fréquence (GHz)	2.326	2.338	2.349	2.361	2.385
S_{21} (dB)	-16.02	-20.31	-19.08	-20.09	-16.59

Le changement de la tension inverse implique un changement dans l'intensité du champ appliquée et visiblement, nous avons trouvé un décalage de fréquence pour chaque augmentation de tension et puisque ce décalage est toujours accompagné avec changement de permittivité effectifs ce qui prouve l'effet non linéaire.

Cette simulation a montré aussi l'effet accordable de la diode car nous pouvons contrôler la fréquence de résonance, la permittivité et la sensibilité en changeant la valeur de tension inverse.

III.5.3 Analyse du capteur

Dans le tableau suivant nous présentons des topologies différentes, leur fréquence de résonance, taille électrique et enfin la sensibilité de leur capteur. Nous avons fait une comparaison par rapport à ces caractéristiques mentionnés avec des références récentes et bien cités dans le domaine de la caractérisation diélectrique des mélanges de liquide.

Tableau III.15 : Comparaison entre les caractéristiques du capteur

Référence	Topologie	f_0 (GHz)	u	S
[18]	Cavité Rectangulaire	1,91	$\lambda_0/1$	0,14
[19]	CSRR ouvert	0.9	$\lambda_0/13$	0,26
Structure	SRR	2,37	$\lambda_0/5$	0,03

- Nous observons depuis le tableau :

La sensibilité est la plus petite quantité de changement détectable par une mesure, la sensibilité extraite de notre capteur est de 0,03% et la dimension électrique est de $\lambda_0/5$

Nous pouvons en conclure que notre capteur est suffisamment compact pour être considéré comme un capteur compact puisque sa taille électrique est inférieure à la valeur limite de $\lambda_0/4$.

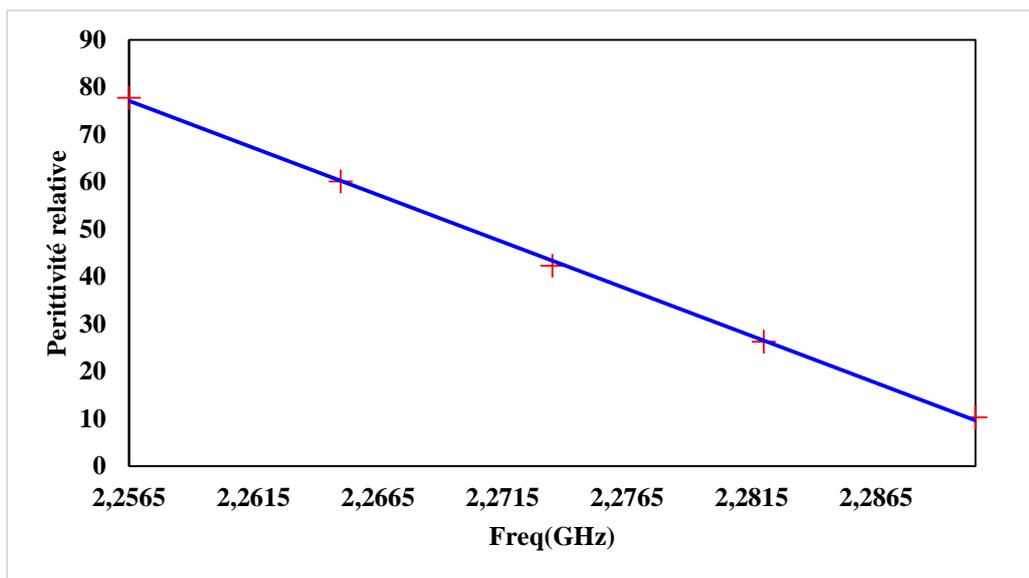


Figure.III.24 : Courbe d'ajustement (fitting) de la permittivité relative du mélange ϵ_m en fonction de la fréquence de résonance f_r .

- La courbe Figure III.24 Représente la courbe d'ajustement (fitting) de la permittivité relative du mélange ϵ_m en fonction de la fréquence de résonance f_r . Cette courbe montre une bonne linéarité en utilisant l'équation linéaire simple suivante pour le processus d'ajustement :

$$\epsilon_m (f_r) = -1984,7 f_r + 4555,6 \text{ [GHz]} \tag{3.8}$$

En effet, la permittivité relative d'un matériau influence ses propriétés électriques et optiques, telles que la conductivité, la réflexion et la transmission des ondes électromagnétiques.

En conclusion, la relation entre la permittivité relative d'un mélange, les fractions volumiques des constituants et la fréquence de résonance est cruciale pour caractériser les propriétés électromagnétiques des matériaux

III.6 Conclusion

L'utilisation des métamatériaux et plus particulièrement des résonateurs SRR dans le domaine des capteurs est évidente. Les facteurs importants qui ont guidé l'amélioration des capteurs conçus sont : une sensibilité élevée, un faible décalage de fréquence et la linéarité de la moyenne effective du capteur entre la fréquence de résonance et la permittivité relative.

Nous avons démontré par simulation à l'aide du logiciel HFSS une étude paramétrique sur la structure afin de tester l'effet de l'orientation du résonateur par rapport à la ligne de transmission, la taille de la fente et l'orientation de la fente.

Cette étude a montré que le capteur conçu a une bonne sensibilité, ce qui signifie qu'il est sensible utilisé dans ce travail. L'étude expérimentale a démontré que le capteur réalisé présente de faibles déplacements de fréquence, une sensibilité élevée et une bonne linéarité de la moyenne effective du capteur entre la fréquence de résonance et la permittivité relative.

Bibliographie du chapitre III

- [1] Christian BISSIERES, "Les capteurs ", Cours Physique appliquée, école nationale d'ingénieurs des travaux agricoles de Clermont-Ferrand, 2008.
- [2] D. Guérin : Cours de génie Électrique, 2016. TSI1 - Lycée Eiel - Dijon.
- [3] Thomas CHRETIENNOT, Biocapteurs hyperfréquences résonants pour l'analyse non-invasive de liquides biologiques. Thèse de doctorat de l'université de Paul Sabatier, 2013
- [4] Bogue, R. (2007). "Sensors for condition monitoring: a review of technologies and applications." *Sensor Review* 27(4): 277-290.
- [5] Cours de génie Électrique, 2016. TSI1 - Lycée P.-P. Riquet - St-Orens de Gameville.
- [6] Yacouba Sanogo. "Conception et fabrication de capteurs et de leur technique d'interrogation pour des applications dans les domaines de la santé et de l'environnement, thèse de doctorat de l'École normale supérieure de Cachan, 2012.
- [7] E. Ekmekci and G. Turhan-Sayan, "Reducing the electrical size of magnetic metamaterial resonators by geometrical modifications: a comparative study for single-sided and double-sided multiple SRR, spiral and U-spiral resonators," 2008 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, San Diego, CA, pp. 1-4, 2008.
- [8] Sander Stuijk, "Sensors and Actuators : Introduction to sensors", University of Technology of Eindhoven, Netherlands, 2013.
- [9] Shadrivov, I. V., Zharov, A. A., Kivshar, Y. S. (2008). "Nonlinear metamaterials: A new degree of freedom in the structure design." *Physics-Uspekhi*, 51(7), 687-697.
- [10] Scalora, M., Vincenti, M. A., de Ceglia, D., Roppo, V., Centini, M., Akozbek, N., Bloemer, M. J. (2010). "Second- and third-harmonic generation in metal-based structures." *Physical Review A*, 82(4), 043828.
- [11] Powell, D. A., Shadrivov, I. V., Kivshar, Y. S. (2009). "Asymmetric transmission through nonlinear chiral metamaterials." *Applied Physics Letters*, 95(8), 084102.
- [12] Ilya V. Shadrivov, Alexander B. Kozyrev, Daniel W. van der Weide, and Yuri S. Kivshar, "Nonlinear magnetic metamaterials," *Opt. Express* **16**, 20266-20271, 2008.

- [13] Zharov AA, Shadrivov IV, Kivshar YS, Nonlinear properties of left-handed metamaterials. *Phys Rev Lett* 91:037401,2003.
- [14] Minovich A et al (2012) Liquid crystal based nonlinear fishnet metamaterials. *Appl Phys Lett* 100:121113
- [15] J.-Z. Bao, M. L. Swicord, and C. C. Davis, "Microwave dielectric characterization of binary mixtures of water, methanol, and ethanol," *J. Chem. Phys.*, vol. 104, no. 12, pp. 4441–4450, 1996.
- [16] 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.
- [17] Varactor diode datasheet, <https://www.skyworksinc.com/en/Products/Diodes/SMV2203-040LF>
- [18] G. Gennarelli, S. Romeo, M. Scarfi, F. Soldovieri, "A microwave resonant sensor for concentration measurements of liquid solutions", *IEEE Sensors J.*, vol. 13, no. 5, pp. 1857–1864, May 2013.
- [19] P. Vélez, K. Grenier, J. Mata-Contreras, D. Dubuc and F. Martín, "Highly-Sensitive Microwave Sensors Based on Open Complementary Split Ring Resonators (OCSRRs) for Dielectric Characterization and Solute Concentration Measurement in Liquids," in *IEEE Access*, vol. 6, pp. 48324-48338, 2018.
- [20] M. P. Vargas, "Planar Metamaterial Based Microwave sensor Arrays for biomedical Analysis and Treatment", Springer theses, ISBN 978-3-319-35985-4, 2014.

Conclusion générale

L'objectif de cette mémoire est la conception des capteurs chimiques compacts, de bonne sensibilité, facile à réaliser et intégrable dans des circuits intégrés. Ainsi, dans la première partie de notre recherche, nous avons mené une étude des matériaux, leurs caractéristiques, utilisation dans les capteurs à résonateurs diélectriques, la deuxième partie a été consacrée à la conception des capteurs diélectriques liquide, et à leur réalisation et leur caractérisation en présence des mélanges aqueuses avec des substances chimiques.

Nous avons choisi une structure pour initier le travail de conception des capteurs chimiques dans des gammes de fréquences microondes il s'agit de structure résonante en forme de boucle fendue (SRR), et une variable multi carrée. Une première validation en absence des matériaux sous test (MST) a été effectuée en comparant avec succès des résultats de simulation sous HFSS et des mesures réalisées à l'aide d'un analyseur de réseaux vectoriel.

Des tests ont été ensuite réalisés sur des mélanges de liquides : eau et éthanol pour des différentes proportions dans des mélanges ; des résultats ont été très concluants .Ensuite nous avons ajouté la diode varactor a notre structure pour étudier la non-linéarité et elle nous a donné des bons résultats. Il est essentiel de poursuivre ce projet pour explorer davantage les possibilités d'optimisation de ce type de métamatériau pour des applications de capteurs encore plus avancées.