

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Kasdi Merbah - Ouargla
Faculté des Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication
Département d'Electronique et des Télécommunications



Mémoire en vue d'obtention d'un :
MASTER ACADEMIQUE
Domaine : Science et technique
Filière : Electronique et Communication
Spécialité : Systèmes de télécommunication
Préparé par :

BENKADDOUR Djamel Eddine Youcef et MERABET Omar

Thème :

**Capteur MEMS radiofréquence pour la détection de la
température**

Encadrant de mémoire : Bilal BENARABI

Soutenu le : 04/06/2022

Devant le jury :

Mr Boubakeur ROUABEH	Président	UKM Ouargla
Mr. Bilal BENARABI	Encadrant	UKM Ouargla
Mr. Said ACHBI	Examineur	UKM Ouargla

Année universitaire : 2021/2022

REMERCIEMENTS

Avant tout, nous tenons à remercier Allah qui nous a donné le courage et la volonté d'aller jusqu'au bout, afin de réaliser ce modeste travail à sa fin.

Nous tenons également à remercier encadreur Monsieur Bilal Benarabi, qui nous a prêté une attention particulière, qui à aucun moment n'a ménagé son effort et son savoir pour nous apporter de l'aide, la plus précieuse possible.

Nous remercions ensuite l'ensemble des membres du jury, qui nous ont fait l'honneur de bien vouloir examiner avec attention notre travail.

Nos remerciements s'adressent également aux aussi aux tout le corps enseignant du département d'Electronique et de communication de l'université de Ouargla.

Puisque, grâce à eux, que nous n'avons pas eu aucune difficulté à combler notre formation théorique et à satisfaire notre curiosité scientifique.

Enfin, nous remercions aussi toutes les personnes, amis, famille qui nous ont aidés de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

Table des matières

Liste des abréviations	8
<i>Introduction générale</i>	10
Chapitre I : Généralités sur la Mesure de la Température	12
<i>I.1. Introduction</i>	13
<i>I.2. Mesure de la température : la thermométrie</i>	13
I.2.1. Échelles de température	13
I.2.1.1. Le Kelvin	13
I.2.1.2. Le Celsius	14
I.2.1.3. L'échelle Fahrenheit	14
I.2.1.4. L'échelle Rankine	14
<i>I.3. Les thermomètres :</i>	14
I.3.1. Les thermomètres à dilatation du matériau :	15
I.3.1.1. La thermomètre à dilatation liquide :	15
I.3.1.2. Thermomètre à dilatation de gaz	16
I.3.1.3. Thermomètre à dilatation solide :	17
I.3.2. Thermomètres électriques :	18
I.3.2.1. Thermomètre à résistance métallique :	18
I.3.2.2. Thermomètre à thermistance :	19
I.3.2.3. Couples thermoélectrique (thermocouple)	20
I.3.3. Thermomètres Optique (Pyromètre Optique)	20
<i>I.4. Les capteurs de température miniatures :</i>	21
I.4.1. Capteur de température fluïdique :	21
I.4.2. Capteurs a onde acoustiques	22
<i>I.5. Conclusion :</i>	23
<i>Chapitre II : Conception d'un capteur MEMS RF de température</i>	24

<i>II.1. Introduction</i> :.....	25
<i>II.2. Les structures MEMS</i> :	25
<i>II.3. Étude du résonateur en anneaux (ring resonator):</i>	26
II.3.1. : Modélisation de résonateur en anneau :.....	27
II.3.1.1.Circuit équivalent du gap de couplage	27
II.3.1.2. Circuit équivalent de la ligne résonante	28
II.3.1.3. Circuit équivalent total du résonateur en anneau	29
II.3.2.Circuit équivalent du résonateur en anneau en termes de G, L, C.....	29
<i>II.4. Résonateur en anneau coplanaire</i>	31
<i>II.5. Conception du capteur de température RF avec bilame thermique:</i>	31
II.5.1. Dilatation et principes généraux des bilames thermiques :.....	31
II.5.2. Principe de fonctionnement du capteur :	34
II.5.3. Dimensionnement et choix des matériaux du capteur :	36
<i>II.6. Interrogation du capteur RF</i> :	37
<i>II.7. Conclusion</i> :.....	38
Chapitre III: Résultats de simulation EM du capteur	39
<i>III.1. Introduction</i> :.....	40
<i>III.2. Présentation du logiciel de simulation HFSS</i> :	40
<i>III.3. Simulation du résonateur en anneau seul</i> :.....	41
<i>III.4. Simulation du capteur de température RF:</i>	42
III.4.1.Résonateur en anneau avec un bilame au-dessus du gap de couplage :	42
III.4.2. Résonateur en anneau fendu (Split Ring Resonator SRR) :	45
III.4.3. Résonateur en anneau fendu (SRR) avec deux bilames :	47
<i>III.5. Conclusion</i>	50
<i>Conclusion générale</i>	53
Bibliographie.....	54

Liste des abréviations

RF : Radio Fréquence.

EM: Electromagnétique

HFSS: High Frequency Structure Simulator

FEM : (Finit Element Method) Méthode des éléments finis

CTN : Thermistance à coefficient de température négatif.

CTP : Thermistance à coefficient de température positif.

SAW : Dispositifs à ondes acoustiques de surface.

SRR: Split Ring Resonator

CPW: CoplanarWaveguide

MEMS: Micro Electro Mechanical Systems.

Introduction générale

Introduction générale

La température constitue une information importante dans plusieurs processus industriels et de laboratoire. La température est une grandeur physique mesurée à l'aide d'un thermomètre et étudiée en thermométrie. Dans la vie courante, elle est reliée aux sensations de froid et de chaud, provenant du transfert de chaleur entre le corps humain et son environnement. En physique, elle se définit de plusieurs manières : comme fonction croissante du degré d'agitation thermique des particules (en théorie cinétique des gaz), par l'équilibre des transferts thermiques entre plusieurs systèmes ou à partir de l'entropie (en thermodynamique et en physique statistique). La température est une variable importante dans d'autres disciplines : météorologie et climatologie, médecine, en chimie.

Les capteurs de température autonomes sans fil répondent à la demande croissante pour des réseaux de capteurs communicants autonomes pour des applications distribuées de surveillance, d'analyse ou encore de diagnostic.

De plus, un aperçu du marché mondial des capteurs et des composants MEMS montre tous les besoins et les enjeux économiques liés à ces unités de mesure, qui deviennent des éléments essentiels pour la vie de tous les jours. Ces demandes émergentes consistent en une simplicité du capteur et le souhait d'un système de mesure sans fil qui ne nécessite pas de contact physique. Ce mémoire va étudier la possibilité de concevoir un nouveau type de capteur de température radiofréquence de type miniature. La structure de base est un résonateur en anneau planaire déposé sur un substrat diélectrique et un bilame thermique fixé au-dessus. La réponse de la structure va être étudiée en fonction de la température.

Chapitre I : Généralités sur la Mesure de la Température

I.1. Introduction

Sans doute la température est une grandeur importante dans le milieu industriel (génie chimique, industrie agro-alimentaire, analyse de fonctionnement : moteurs, navettes spatiales, gestion de bains de peinture, ...). Elle est mesurée de façon indirecte, par le biais d'un autre principe physique. Il est donc essentiel de bien connaître les principales techniques de mesure et les principes physiques qui les permettent.

La mesure des températures peut être fondée sur la dilatation et la pression des corps (solides, liquides ou gazeux), ou toute autre propriété physique (variations électriques dans le cas du thermocouple, couleur d'émission de lumière pour les hautes températures, etc.) qui varie en fonction de la température. Ce principe général est mis en application de façons très diverses selon les besoins (plages de températures à mesurer, nature des matériaux à étudier, etc.). Les thermomètres à liquide usuels sont les thermomètres à mercure et les thermomètres à alcool, mais il est également possible de trouver des thermomètres à l'huile de colza.

Les applications des thermomètres sont multiples, en météorologie, en médecine, en cuisine, pour la régulation, dans les processus industriels...etc [17].

I.2. Mesure de la température : la thermométrie

I.2.1. Échelles de température

L'unité légale de température dans le système international est le **kelvin** de symbole **K** (noter l'absence du symbole ° car ce n'est pas une échelle de mesure). Il existe d'autres systèmes de mesures antérieurs et toujours utilisés : les échelles Celsius centigrade, Fahrenheit et Rankine.

Tableau I.1 : Échelles de température

	Echelle Kelvin	Echelle Celsius
Température de fusion de glace	273.15 K	0 °C
Température d'ébullition de l'eau	373.15 K	100 °C

I.2.1.1. Le Kelvin

Il est défini à partir du point triple de l'eau : un kelvin est égal à 1/273,16 fois la température du point triple de l'eau. Le zéro absolu, correspondrait à la limite à une absence totale d'agitation microscopique et à une température de -273,15 °C ; mais on ne peut jamais l'atteindre (Penser que l'entité physique est plutôt 1/T, et on ne peut jamais atteindre l'infini). Cette unité permet de définir une échelle absolue des températures [17].

I.2.1.2. Le Celsius

C'est le kelvin auquel on retire 273,15 K. Son unité est le °C. Elle est une simple translation de l'échelle absolue. Le point triple de l'eau y a donc pour valeur 0,01 °C [17].

I.2.1.3. L'échelle Fahrenheit

Son symbole est °F. Elle attribue une plage de 180 °F entre la température de solidification de l'eau et sa température d'ébullition. On la déduit de l'échelle Celsius par une fonction affine (voir ci-après). Elle fixe le point de solidification de l'eau à 32 °F et le point d'ébullition à 212 °F [17].

I.2.1.4. L'échelle Rankine

La valeur du zéro Rankine est la même que celle du zéro Kelvin. Donc 0 kelvin = 0° Rankine = zéro absolu. En revanche, les graduations des degrés Rankine sont celles des degrés Fahrenheit. Par conséquent, une différence d'un degré Ra est égale à une différence d'un degré F [28].

I.3. Les thermomètres :

Un thermomètre est un capteur de température utilisé en météorologie afin de mesurer la température. Au fil des siècles, différentes propriétés physiques des matériaux ont été exploitées afin de concevoir des thermomètres de plus en plus performants. Dans une chaîne de mesure de température, le capteur est le premier élément qui est par définition un composant qui traduit une grandeur physique (température) en une grandeur exploitable généralement électrique. Son rôle est de donner une image interprétable de la température de manière à l'intégrer dans un processus plus vaste. Le capteur de température forme ainsi une partie centrale et fondamentale de l'interface entre le monde physique et le monde électrique.

La figure I.1 montre le schéma synoptique d'un capteur de température. Soumis à l'action d'un mesurande non électrique, le capteur présente une caractéristique de nature électrique (charge, tension, courant ou impédance) désignée par s et qui est fonction du mesurande $S = F(T)$. La grandeur s est la sortie ou réponse du capteur, T est la température.

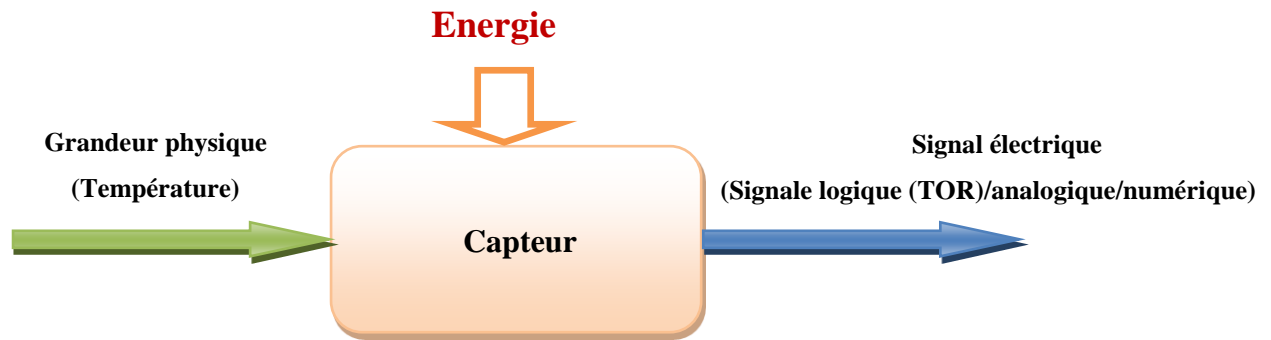


Figure I.1:schéma synoptique d'un capteur de température.

I.3.1. Les thermomètres à dilatation du matériau :

Ils reposent sur le phénomène de dilatation des corps lorsque la température augmente. La dilatation étant réversible, elle fournit un mode pratique de repérage des températures. Ce phénomène se trouve de façon analogue, mais avec une ampleur différente pour les liquides, les gaz et les solides. D'où les trois types de thermomètres à dilatation [27].

I.3.1.1. La thermomètre à dilatation liquide :

La variation du volume d'un liquide en fonction de la température est généralement donnée, à une pression constante, par la relation suivante : [27].

$$V = V_0 (1 + \alpha \cdot T) \quad [\text{éq I.3}]$$

Avec

V : volume du liquide à t °C

V₀ : volume du liquide à 0 °C

α : Coefficient de dilatation du liquide en °C⁻¹

Le thermomètre à dilatation de liquide est constitué d'un réservoir rempli d'un liquide appelé liquide thermométrique, surmonté d'un canal capillaire de section faible et régulière (diamètre de l'ordre de 0,2 mm) se terminant par une ampoule de sécurité (utile lors d'un dépassement de la température admissible). L'ensemble réservoir et capillaire son réalisés en verre ou silice, la nature du matériau dépend de la température à mesurer.

Sous l'effet des variations de température le liquide se dilate et monte dans le tube capillaire. Son niveau est repéré à l'aide d'une échelle gravée sur l'enveloppe. Ces thermomètres sont généralement remplis de mercure ou d'alcool, Cependant le mercure actuellement commence à être interdit pour ses risques d'agression sur l'environnement en cas de rejet..

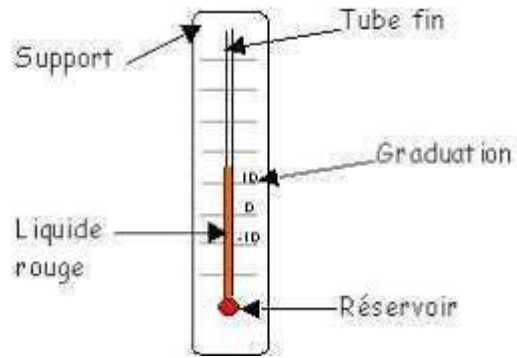


Figure I.2: Thermomètres à dilatation de liquide

Tableau I.2 : Quelques liquides thermométriques

Liquide	Domaine d'utilisation (°C)	α (°C ⁻¹)
Pentane	-200 à 20	*
Alcool éthylique	-110 à 100	1.17
Toluène	-90 à 100	1.03
Créosote - Alcool éthylique	-10 à 200	*
Mercure	-38 à 650	0.182
Mercure - Thallium	-58 à 650	*
Mercure - Gallium	0 à 1000	*

L'espace libre au-dessus du liquide peut être vide. Toutefois, pour empêcher la colonne de liquide de se fractionner facilement et aussi pour permettre de mesurer les hautes températures, l'espace libre est rempli d'un gaz inerte (azote ou argon) mis sous pression fonction de la température à mesurer [27].

I.3.1.2. Thermomètre à dilatation de gaz

Un thermomètre à gaz est composée d'une sonde dite bulbe en alliage de cuivre ou en acier inoxydable, formant une enveloppe dans laquelle est enfermé le gaz thermométrique à haute pression. Cette sonde est reliée par un tube capillaire de faible section à un tube de Bourdon, appelé spirale de mesure (Figure I.3).

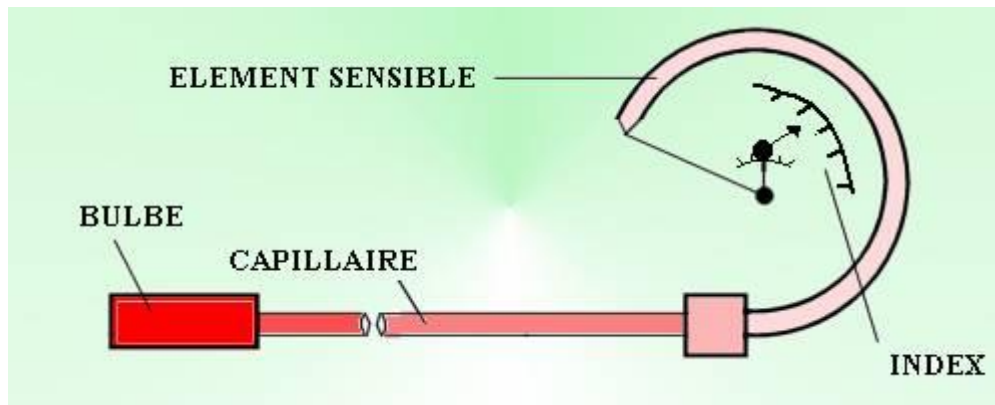


Figure I.3 : Thermomètres à dilatation de gaz

Sous l'effet de la température du milieu dans lequel la sonde est placée, la pression du gaz varie et la spire se déforme entraînant le déplacement de l'aiguille sur le cadran portant des graduations thermométriques. Les gaz les plus employés sont l'hélium, l'hydrogène, l'azote, le gaz carbonique. L'étendue de mesure est de -40 à 400°C .

L'équation d'un gaz parfait est [27] :

$$P V = n R T \quad [\text{éq I.4}]$$

n : Nombre de mole

$R = 8,3144 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$: Constante des gaz parfaits

T : Température absolue en K

P : Pression en Pa

Cette équation peut s'écrire sous la forme [27] :

$$P = n \cdot R \cdot T / V \quad [\text{éq I.5}]$$

On voit qu'à volume V constant, la pression du gaz est proportionnelle à la température absolue et une augmentation de la température provoque une augmentation de la pression.

Ces instruments peuvent être munis d'un contact électrique pour réguler par exemple un four ou un autoclave ou signaler une alarme ou un défaut de fonctionnement. Ces contacts ferment ou ouvrent des circuits électriques de puissance ou d'alarme en fonction de la position de l'aiguille par rapport à un index de contact réglé sur un point de consigne choisi sur le cadran [27].

I.3.1.3. Thermomètre à dilatation solide :

I.3.1.3.1. Loi de la dilatation de solide :

La dilatation linéaire d'une barre solide (ou une tige métallique) réagit par la loi suivante [27] :

$$L = L_0 (1 + \lambda t) \quad [\text{éq I.6}]$$

L : longueur de la tige à $t^{\circ}\text{C}$, L_0 : longueur de la tige à 0°C , t : température en $^{\circ}\text{C}$

λ : Coefficient de dilatation linéaire du métal

La mesure ou la détection de la variation de longueur ($L-L_0$) nous permet de déterminer la température de la tige métallique qui est supposée égale à la température du milieu environnant.

1.3.1.3.2. Le bilame thermique

Un bilame thermique est constitué de deux bandes d'alliages dont les coefficients de dilatation sont très différents, soudées sur toute leur surface et l'une des extrémités est fixe.

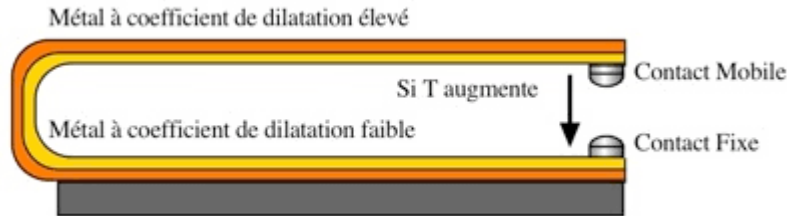


Figure I.4: Bilame thermique

Sous l'effet de la variation de la température, les dilatations différentes des deux bandes provoquent un déplacement de l'extrémité libre qui à son tour fait bouger une aiguille indicatrice de la température [27].

Dans notre travail, on va utiliser un bilame thermique comme corps d'épreuve. Pour cela, nous allons décrire plus en détails son principe de fonctionnement dans le second chapitre.

1.3.1.3.3. Le pyromètre linéaire

La sonde est formée d'une gaine de silice dans laquelle est placé un barreau métallique dilatable. Une tige transmet la dilatation du barreau à un système amplificateur permettant la lecture de la température [27].



Figure I.5: Pyromètre linéaire

I.3.2. Thermomètres électriques :

Un thermomètre électrique est un système permettant de repérer et d'indiquer la température. Il est constitué d'un capteur électronique (élément sensible) et d'un circuit électronique permettant de mesurer la caractéristique variable avec la température.

I.3.2.1. Thermomètre à résistance métallique : La résistance d'un conducteur électrique croît avec la température. Cette relation est parfaitement réversible. On peut donc établir une relation $R = f(T)$ entre la résistance R et la température T :

$$R = R_0(1 + aT + bT^2 + cT^3) \quad [\text{éq I.7}]$$

Où, T : la température en °C, R_0 : la résistance à 0 °C et a , b et c des coefficients positifs, spécifiques au métal. Cette relation s'utilise pour les températures au-dessus de 0°C. Le platine est le matériau le plus utilisé pour la fabrication de ce type de capteur, comme la sonde PT100 (figure I.6).



Figure I.6 : Sonde PT100

D'autres métaux sont également utilisés pour les thermomètres à résistance (tableau I.2)

Tableau I.3 : Métaux utilisés pour les thermomètres à résistance

Métal	Résistivité à 0 °C en $\mu\Omega$	Point de fusion en °C	Domaine d'emploi en °C	$\frac{R(100\text{ °C})}{R(0\text{ °C})}$
Cuivre	7	1083	-190 à 250	1.427
Nickel	6.38	1453	-60 à 180	1.672
Platine	9.81	1769	-250 à 1100	1.392

I.3.2.2. Thermomètre à thermistance :

Une thermistance est une accumulation d'oxydes métalliques frittés, c'est-à-dire rendus compacts par haute pression exercée à température élevée, de l'ordre de 150 bars à 1000°C. Il existe deux types de thermistance, les CTN à coefficient de température négatif, et les CTP à coefficient de température positif (figure I.7).

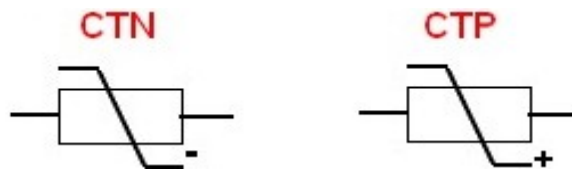


Figure I.7 : Représentation schématique des thermistances

La relation résistance-température d'un CTN est de la forme :

$$R(T) = R(T_0)e^{B\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)} \quad [\text{éq I.8}]$$

- T est la température en Kelvin.

- B est compris entre 3000 K et 5000 K.

I.3.2.3. Couples thermoélectrique (thermocouple)

Lorsque deux conducteurs de métaux différents sont connectés ensembles en 2 points, et que ces jonctions sont à des températures différentes, une F.E.M apparaît, c'est l'effet Seebeck. [17].

Le principe du thermocouple est basé sur l'effet Seebeck (**Figure I.8**), qui n'est autre que la combinaison de l'effet Peltier et l'effet Thomson.

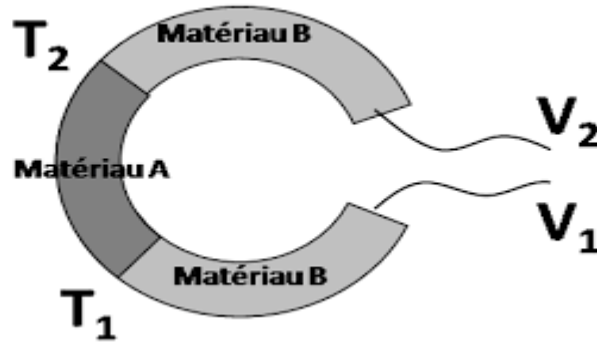


Figure I.8 : Effets thermoélectriques.

I.3.3. Thermomètres Optique (Pyromètre Optique)

La pyrométrie optique est une méthode de mesure de température basée sur la relation qui existe entre la température d'un corps et le rayonnement optique qu'il émet. Les capteurs utilisés sont de types photoélectriques ou thermiques.

Dans le cas des capteurs photoélectriques, c'est l'action de l'énergie lumineuse incidente qui est responsable des variations des propriétés électriques du capteur. Pour ce qui est des capteurs thermiques, le phénomène primaire est la conversion de l'énergie lumineuse absorbée en énergie d'agitation thermique du capteur. L'intérêt de la pyrométrie optique est de permettre la détermination d'une température sans contact avec l'objet ; c'est donc une méthode appropriée quand les conditions d'opération d'un équipement ne permettent pas l'utilisation de capteurs thermométriques classiques. En général l'utilisation des pyromètres optiques est destinée à :

1. La mesure de température d'objets en mouvement.
2. La mesure de température supérieure à 2000°C à grande distance
3. La mesure de température dans un environnement agressif
4. La mesure de température d'objet mauvais conducteur de chaleur.

En général, la chaîne de pyrométrie optique est composée d'une optique, d'un filtre spectral, d'un détecteur ou capteur, d'un conditionneur de signal et d'une interface

servant à transmettre le résultat de mesure. La figure I.9 montre ces différentes composantes [29].

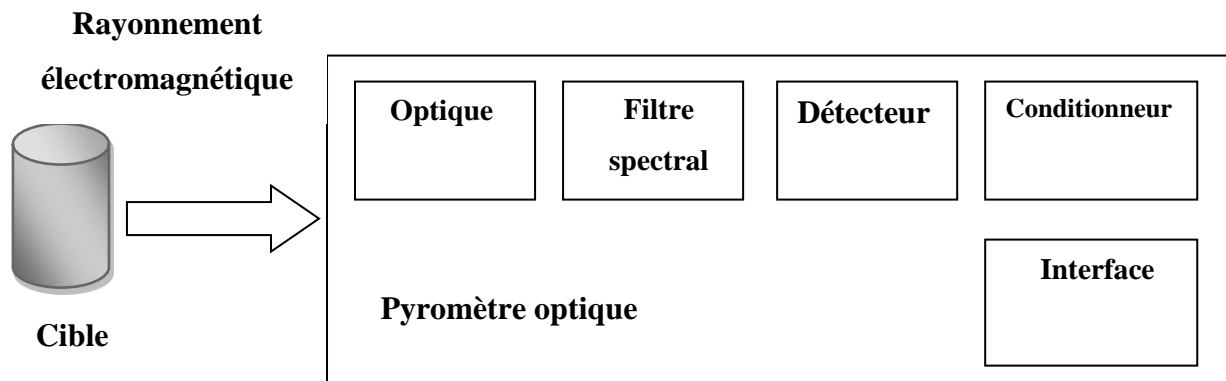


Figure I.9 Chaîne pyrométrique [29].

I.4. Les capteurs de température miniatures :

I.4.1. Capteur de température fluïdique :

Le principe de ce type de capteur est basé sur la dilation thermique d'un fluïde dans un micro-canal qui modifie les propriétés électromagnétiques (variation de l'impédance de la capacité) d'un dispositif aux fréquences millimétriques [9]. La structure du transducteur est constituée d'une capacité et d'un canal micro-fluïdique. Un réservoir rempli d'eau, et d'un volume relativement important, est relié au canal. Lors de l'élévation de la température, le liquide se dilate et remplit progressivement le canal (Figure I.10). Cette augmentation monotone du niveau du liquide à haute permittivité au voisinage des armatures de la capacité modifie la valeur de la capacité ainsi que les paramètres S de la structure.

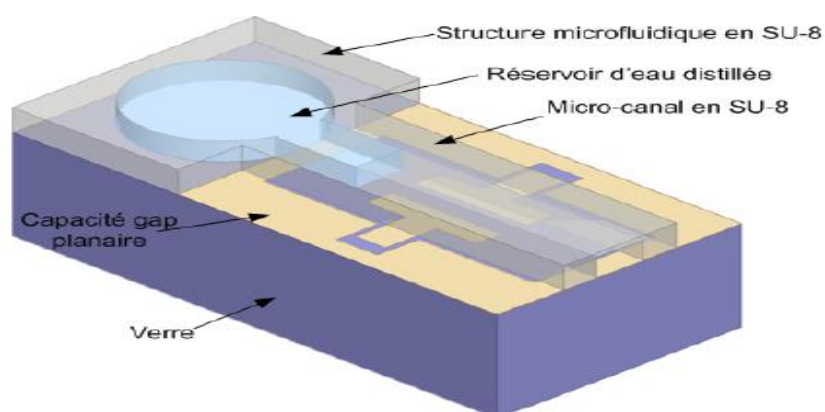


Figure I.10: Schéma du capteur de température micro-fluïdique [9].

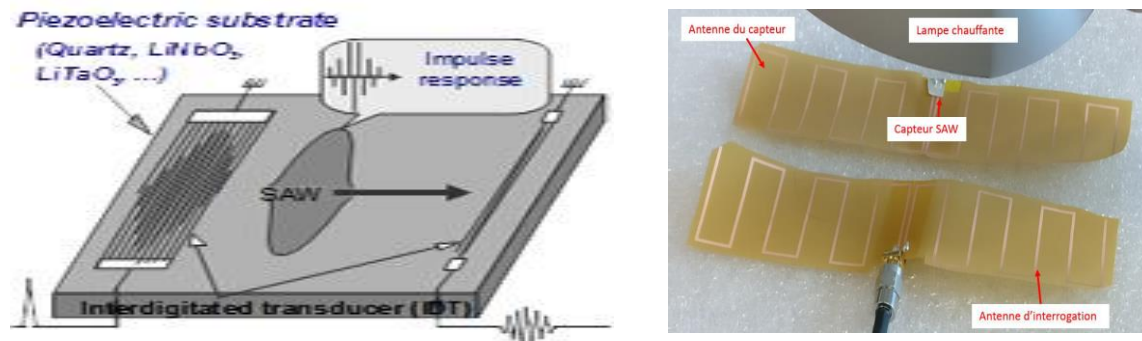
La fréquence centrale d'utilisation est 29.75GHz. Cette fréquence correspond à la fréquence centrale millimétrique du RADAR, qui est bien adaptée à la miniaturisation du transducteur et

améliore par ailleurs l'immunité du capteur à des objets se trouvant à proximité en augmentant la longueur électrique de séparation entre eux [9].

I.4.2. Capteurs a onde acoustiques

Les capteurs à ondes acoustiques de surface (SAW) exploitent les propriétés Acousto-Electriques de substrats piézoélectriques tels que le quartz ou le Niobate de Lithium pour générer des ondes de surface. Ce type de substrat présente des coefficients linéaires de variation en fonction de la grandeur physique. Pour le cas de la mesure de la température ce coefficient peut arriver jusqu'à 100ppm/°C.

Le principe de fonctionnement de ces capteurs sans fils est basé sur la génération d'une onde acoustique à la surface d'un matériau piézoélectrique grâce à un transducteur interdigité (Interdigital Transducer ou IDT) polarisé par une onde électromagnétique à travers une antenne. La propagation de cette onde acoustique via les électrodes interdigitées métalliques peut être modifiée par les conditions environnementales (température, contrainte, gaz, ...). En retour, l'onde modifiée est transformée en onde électromagnétique pour être renvoyée vers l'unité d'interrogation (unité d'émission/réception). L'analyse de l'onde électromagnétique réfléchie par le capteur permet d'obtenir une information sur la grandeur qui a modifié la propagation de l'onde acoustique (Figure I-11).



La distance d'interrogation de ce type de capteur est de l'ordre d'une dizaine de mètres. Ceci est assuré grâce à la suppression (dans le capteur) des circuits électroniques et des transducteurs qui consomment de l'énergie. En 2011, des chercheurs ont développé un système de mesure de la température utilisant un capteur SAW avec une sensibilité de 1,1KHz/°C à la fréquence de 433MHz. Une résolution de 0,1°C est annoncée sur une gamme de température de 60°C (entre 30°C et 90°C). Avec ce capteur de température SAW à fort facteur de qualité (3000), la distance d'interrogation atteint 22m pour une puissance de transmission de 24dBm. Le principal inconvénient des capteurs SAW concerne le faible coefficient de couplage entre l'onde

électromagnétique et l'onde acoustique. Une partie importante de la puissance est ainsi perdue lors de la double conversion électromagnétique/acoustique puis acoustique/électromagnétique [9].

I.5. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté quelques notions de base de la thermométrie. Les différents types de capteurs de température ont été décrit notamment les capteurs à dilation de solide. Ces derniers utilisent le principe de dilation des matériaux solide sous l'effet de la température. Ce principe est exploité dans notre étude en intégrant les composants planaires microondes. L'objectif de ce mémoire est de concevoir un micro-capteur de température radiofréquence en associant un bilame thermique et un circuit micro ruban (résonateur en anneau coplanaire).



**Chapitre II : Conception d'un capteur MEMS RF de
température**

II.1. Introduction :

Après avoir présenté dans le premier chapitre des généralités sur la mesure de la température et les capteurs de température, nous allons nous intéresser dans ce chapitre à la présentation du principe de notre capteur de température de taille miniature, qui fait partie des structures MEMS. L'électromagnétisme est son mode de transduction et un bilame thermique est son corps d'épreuve. La structure de base est un résonateur en anneau coplanaire en technologie de guide d'onde coplanaire (Coplanar Waveguide CPW). Nous présentons, tout d'abord, une étude théorique sur les résonateurs en anneau coplanaire afin de comprendre son mécanisme de fonctionnement. Ensuite, nous expliquons le principe de fonctionnement du capteur.

II.2. Les structures MEMS :

La dénomination « MEMS » provient de l'abréviation anglaise de « Micro-Electro-Mechanical Systems » (systèmes micro-électro-mécaniques). Sous cette abréviation, il y a deux définitions relativement différentes : celle des américains et celles des européens. En ce qui concerne la définition américaine, un MEMS est un système électro-mécanique à l'échelle du micron (Figure II-1) comprenant des capteurs ainsi que des actionneurs fabriqués avec les techniques de la micro-électronique conventionnelle (croissance d'oxyde, dépôt de matériaux, lithographie) [9].

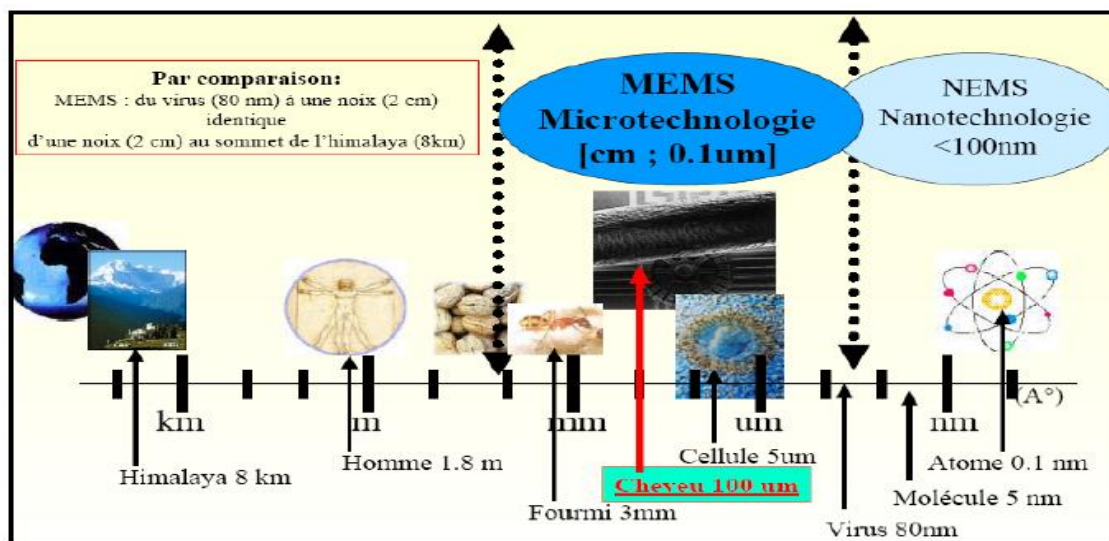


Figure II.1 : Ordre de grandeur des microsystèmes

Les microsystèmes, en ce qui concerne la définition européenne, sont des systèmes miniaturisés intelligents qui combinent de manière monolithique ou non des capteurs et des actionneurs à des fonctions de traitement du signal et de l'information.

La fabrication des microsystèmes est directement issue des techniques de fabrication utilisées pour la réalisation des circuits intégrés (lithographie, dépôt de métaux, gravures). Grâce aux techniques de dépôt, de gravure de films minces et également grâce aux procédés de micro-usinage du silicium, un empilement de divers matériaux peut être formé, afin de réaliser des structures miniatures en trois dimensions [9].

II.3. Étude du résonateur en anneaux (ring resonator):

Le résonateur en anneau (*Ring resonator*) a été proposé par P. Troughton en 1969 afin de mesurer la vitesse de phase et les caractéristiques de dispersion d'une ligne micro-ruban. Il a montré une très bonne performance en l'utilisant dans la conception de lignes coplanaires [7]. Le résonateur en anneau est une ligne de transmission sous forme de boucle fermée (ring). Le modèle de circuit le plus simple consiste en deux ports d'excitation, deux fentes de couplage (gap), et la boucle résonante. Le résonateur en anneau coplanaire présente un phénomène de résonance à une fréquence liée à ses dimensions géométriques. Ils permettent une caractérisation à la fréquence de résonance et plusieurs dimensions sont nécessaires pour obtenir une caractérisation sur une bande de fréquence large [1–25 GHz] [13].

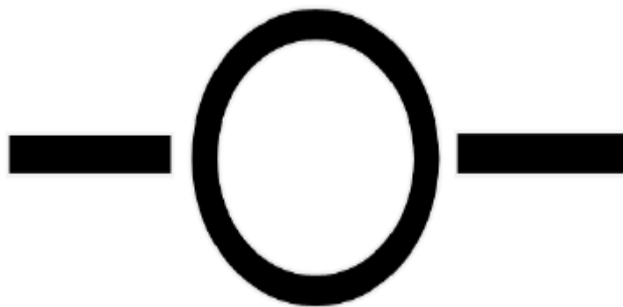


Figure II.2 : Modèle d'un simple résonateur en anneau

Si l'écart entre la ligne et le résonateur est très large, l'écart de couplage n'affecte pas la fréquence de résonance. Ce type de couplage s'appelle « couplage lâche ». Ce dernier est dû à la petite capacité de gap du couplage. Si les lignes d'alimentation sont déplacées vers le résonateur, l'écart devient serré et la capacité de gap est alors importante. Cela provoque une fréquence de résonance du circuit qui va s'écarter de la fréquence de résonance intrinsèque de la boucle. Ainsi, lors de la modélisation du résonateur en anneau, les capacités des gaps de couplage doivent être prises en compte.

Lorsque la longueur du cercle du résonateur en anneau est égale à un entier multiple de la longueur d'onde guidée, la résonance est établie. On peut écrire :

$$2\pi r = n\lambda_g \quad [\text{éq II.1}]$$

Où r est le rayon moyen entre le rayon extérieur et intérieur du résonateur, λ_g est la longueur d'onde guidée et n le numéro du mode de propagation.

À partir de cette équation, la fréquence de résonance peut être calculée depuis λ_g qui dépend de la fréquence. Pour le premier mode, les maxima de champ se trouvent dans les gaps de couplage, et les minima (nuls) se trouvent à 90° de déphasage. Deux modèles d'analyse de résonateurs en anneau existent et sont présentés dans la suite.

II.3.1. : Modélisation de résonateur en anneau :

Afin d'analyser le résonateur en anneau, un modèle de la ligne de transmission a été proposé. Dans ce modèle, le résonateur est représenté par son circuit électrique équivalent. On peut déterminer la fréquence de résonance du circuit à l'aide de son impédance d'entrée. Les lignes d'alimentation, le gap de couplage et l'anneau sont modélisés dans un seul circuit équivalent général.

II.3.1.1. Circuit équivalent du gap de couplage

Le gap de couplage est représenté par le modèle *gap end-to-side*, qui consiste en une ligne couplée avec une autre orthogonale, ce qui est le cas d'un résonateur en anneau. Ce modèle est une bonne modélisation, mais la discontinuité qui se trouve dans ce modèle est un problème difficile à résoudre car elle ne peut pas être réduite à un problème à deux dimensions, alors une approximation va permettre de mettre en œuvre un autre modèle qui s'appelle *gap end-to-end* comme la (figure II.4) le montre.

L'évaluation de la capacité due au gap a été traitée par Maeda et Benedek. La capacité de gap peut être calculée à partir de la charge distribuée près de la discontinuité de la ligne. Le circuit équivalent proposé pour le gap est un réseau π à deux ports symétriques montré dans la (figure II.4).

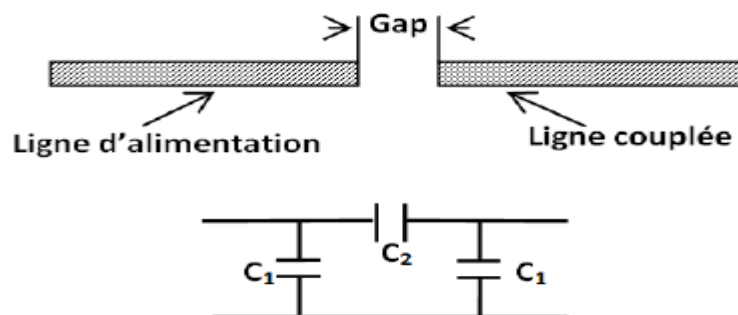


Figure II.4: Gap end-to-end et son circuit équivalent

La capacité C_2 est due à l'accumulation de la charge entre les deux lignes. C_1 est due à l'effet du champ sur les bords dans l'espace entre les lignes. Leurs expressions sont données par :

$$C_1 = \frac{1}{2} C_{pair} \quad [\text{éq II.2a}]$$

$$C_2 = \frac{1}{2} (C_{impair} - \frac{1}{2} C_{pair}) \quad [\text{éq II.2b}]$$

Où C_{pair} et C_{impair} sont respectivement les capacités dues à l'excitation symétrique et antisymétrique dans le gap [13].

II.3.1.2. Circuit équivalent de la ligne résonante

L'anneau peut être modélisé par un circuit équivalent d'une ligne de transmission. Il est représenté par un réseau d'impédances sous forme T à deux ports pour une longueur particulière d'une ligne de transmission (Figure II.5)

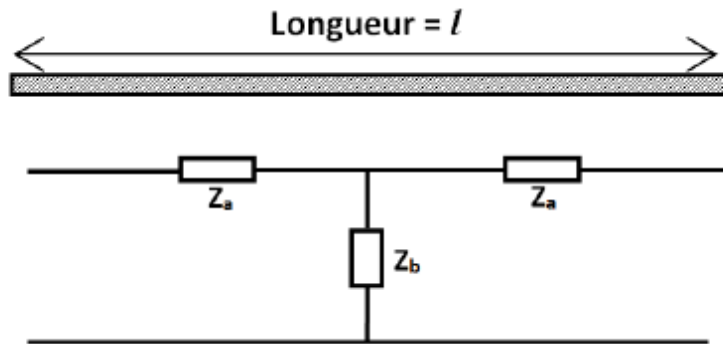


Figure II.5 : Circuit équivalent du résonateur Ring

Les impédances Z_a et Z_b sont données par les équations suivantes :

$$Z_a = Z_0 \times \tanh\left(\frac{\gamma l}{2}\right) \quad [\text{éq II.3a}]$$

$$Z_b = \frac{Z_0}{\sinh(\gamma l)} \quad [\text{éq II.3b}]$$

Où γ est la constante de propagation, l est la longueur de la ligne et Z_0 est l'impédance caractéristique de la ligne.

Une ligne de transmission est caractérisée par quatre paramètres : une résistance R et une inductance L en série, une conductance G et une capacité C en parallèle. La constante de propagation peut s'écrire comme :

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \quad [\text{éq II.4a}]$$

Avec

$$\gamma = \alpha + j\beta \quad [\text{éq II.4b}]$$

Où, γ est la constante d'atténuation, β la constante de phase (nombre d'ondes).

Dans la majorité des lignes de transmission, l'effet dû à L et C est dominant. Si on suppose que la ligne est sans pertes, R et G deviennent négligeables et l'équation [éq II.4a] devient :

$$\gamma = j\omega \times \sqrt{LC} = j\beta \quad [\text{éq II.5}]$$

En remplaçant dans les équations Z_a et Z_b , on trouve :

$$Z_a = jZ_0 \times \tan\left(\frac{\beta l}{2}\right) \quad [\text{éq II.6a}]$$

$$Z_b = j \frac{Z_0}{\csc(\beta l)} \quad [\text{éq II.6b}]$$

II.3.1.3. Circuit équivalent total du résonateur en anneau

La (figure II.6) montre le circuit équivalent total du résonateur.

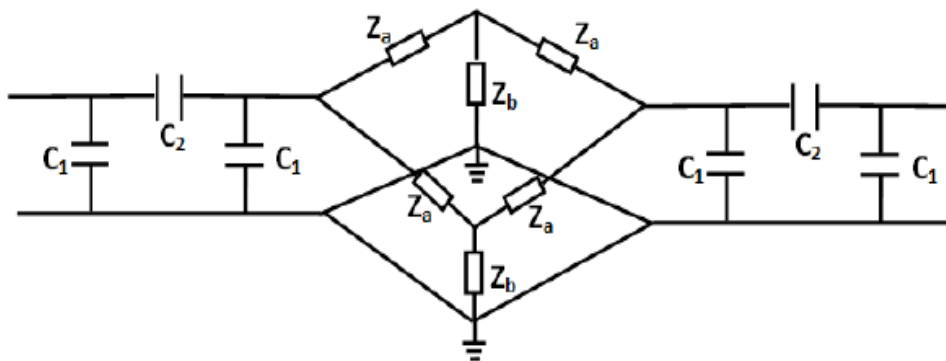


Figure II.6 – Circuit équivalent total du résonateur en anneau

Ce circuit peut être réduit à un circuit à un port en plaçant sur l'autre port une impédance de terminaison qui doit correspondre l'impédance des lignes d'excitation. Ces lignes sont généralement dimensionnées à 50Ω qui sont l'impédance d'entrée de l'appareil de mesure. Ce circuit est symétrique, l'impédance peut être trouvée par la simplification des combinaisons séries et parallèles.

II.3.2. Circuit équivalent du résonateur en anneau en termes de G, L, C

Le modèle de ligne de transmission, cité dans la section précédente, pouvait bien prédire le comportement d'un résonateur en anneau, mais il ne pouvait pas fournir les éléments du circuit équivalent G , L et C pour le circuit de l'anneau. Le résonateur en anneau est divisé par deux ports d'entrée et sortie dans une position arbitraire en créant deux sections $l1$ et $l2$ pour former un circuit parallèle (figure II.7) [13].

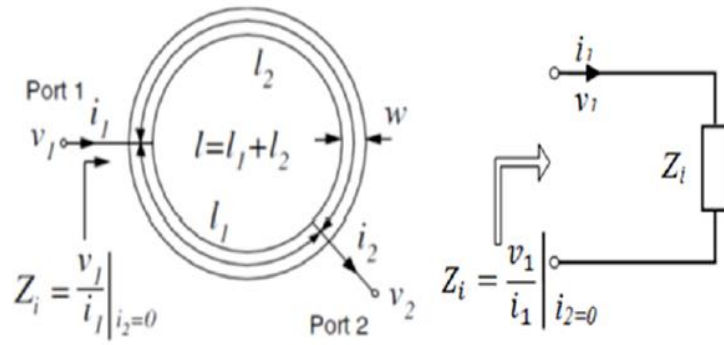


Figure II.7 – Impédance d'entrée du réseau à deux ports du résonateur en anneau

Pour ce circuit parallèle, les paramètres Y sont donnés par :

$$\begin{pmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y_0[\coth(\gamma l_1) + \coth(\gamma l_2)] & -Y_0[\operatorname{csch}(\gamma l_1) + \operatorname{csch}(\gamma l_2)] \\ -Y_0[\operatorname{csch}(\gamma l_1) + \operatorname{csch}(\gamma l_2)] & Y_0[\coth(\gamma l_1) + \coth(\gamma l_2)] \end{pmatrix} \quad [\text{éq II.7}]$$

Si $i_2 = 0$, l'impédance d'entrée du résonateur Z_{in} peut être écrite comme suit :

$$Z_{in} = \frac{Y_{22}}{Y_{11}Y_{22} - Y_{12}Y_{21}} = \frac{Z_0}{2} \frac{1 + j \tanh(\alpha l_g) \tan(\beta l_g)}{\tanh(\alpha l_g) + j \tan(\beta l_g)} \quad [\text{éq II.8}]$$

Où

$$l_g = \frac{l}{2} = (l_1 + l_2)/2$$

En pratique, les lignes de transmission ont toujours de faibles pertes de sorte que $\alpha l_g \ll 1$, et $\tanh(\alpha l_g) \approx \alpha l_g$. Proche de la résonance, la fréquence angulaire $\omega = \omega_0 + \Delta\omega$, où ω_0 est la fréquence de résonance et l'écart $\Delta\omega$ est faible, on peut écrire alors :

$$\beta l_g = \omega_0 l_g / v_{PH} + \Delta\omega l_g / v_{PH} \quad [\text{éq II.9}]$$

Où v_{PH} est la vitesse de phase de la ligne de transmission.

À la résonance $\omega = \omega_0$, $l_g = \frac{\lambda_g}{2} = \pi v_{PH} / \omega_0$. Par conséquent, [éq II.9] peut être réécrite :

$$\beta l_g = \pi + \pi \Delta\omega / \omega_0 \quad [\text{éq II.10a}]$$

$$\tanh(\beta l_g) \approx \pi \Delta\omega / \omega_0 \quad [\text{éq II.10b}]$$

En utilisant ces résultats, l'impédance d'entrée [éq II.8] peut être définie comme suit :

$$Z_{in} \approx \frac{Z_0}{2} \frac{1 + j \alpha l_g \pi \Delta\omega / \omega_0}{\alpha l_g + \pi \Delta\omega / \omega_0} \quad [\text{éq II.11}]$$

Pour $\alpha l_g \pi \Delta\omega / \omega_0 \ll 1$, Z_{in} devient :

$$Z_{in} \approx \frac{Z_0 / 2 \alpha l_g}{1 + j \pi \Delta\omega / \alpha l_g \omega_0} \quad [\text{éq II.12}]$$

Par ailleurs, la formule générale de l'impédance d'entrée d'un circuit $G.L.C$ parallèle est :

$$Z_{inGLC} = \frac{1}{G+2j\Delta\omega C} \quad [\text{éq II.13}]$$

Lorsqu'on fait la comparaison entre [éq II.12] et [éq II.13] qui ont la même forme, on peut extraire l'expression de la conductance du circuit équivalent de l'anneau :

$$G_r = \frac{2\alpha l_g}{z_0} = \alpha\lambda_g/z_0 \quad [\text{éq II.14a}]$$

$$C_r = \pi/\omega_0 z_0 \quad [\text{éq II.14b}]$$

$$L_r = 1/\omega_0^2 C_r \quad [\text{éq II.14c}]$$

II.4. Résonateur en anneau coplanaire

Les résonateurs décrits précédemment sont en technologie micro-ruban, c'est-à-dire avec un niveau de conducteur supérieur, sur le substrat, comprenant les lignes sans les masses et un niveau de conducteur sous le substrat qui correspond au plan de masse. Un résonateur en anneau avec la configuration coplanaire peut également être conçu (figure II.8). La structure peut être analysée en utilisant le modèle de ligne de transmission similaire à celui décrit pour le résonateur en anneau micro-ruban.

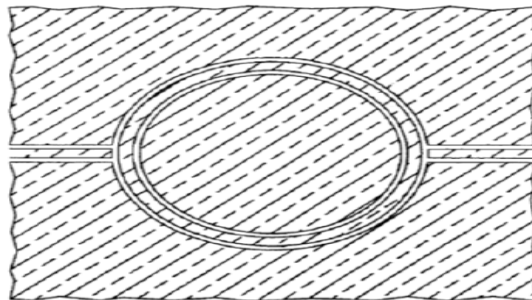


Figure II.8 : Résonateur en anneau CPW alimenté par des lignes de transmission CPW

II.5. Conception du capteur de température RF avec bilame thermique:

II.5.1. Dilatation et principes généraux des bilames thermiques :

La dilatation thermique est l'expansion à pression constante du volume d'un corps occasionné par son réchauffement. Ce mouvement est généralement imperceptible à l'œil nu et se manifeste au niveau atomique. Au sein de la matière, les atomes vibrent autour d'une position moyenne. Cette vibration est directement liée à la température. En oscillant autour de leur position d'origine, les atomes interagissent entre eux par des forces appelées potentiels interatomiques. Lorsqu'un corps est soumis à un réchauffement, le rayon de vibration des atomes n'est plus

stage, les forces de potentiels interatomiques augmentent et les atomes se repoussent, causant la dilatation thermique [31].

Un bilame est constitué de deux bandes de métaux différents, liées sur toute leur surface. Sous l'effet d'une variation de température, la différence d'allongements entre les deux faces induit une courbure du bilame. C'est cet effet : « l'effet bilame » qui nous intéresse dans la conception de notre capteur de température (figure II.9).



Figure II.9 : Constitution d'un bilame et déformation sous l'effet de la chaleur

La soudure des deux constituants doit être suffisamment intime pour que la zone de jonction soit mécaniquement aussi résistante que chacune des deux lames.

Les physiciens et métallurgistes ont établi des relations entre le coefficient de dilatation linéaire, la température de fusion et le module d'Young. Elles permettent de calculer et donc de prévoir les déformations d'un solide. L'équation générale donnant le rayon de courbure R d'un bilame plat uniformément chauffé d'une température T_0 à T en l'absence de forces extérieures est donnée par [3]:

$$\frac{1}{R} - \frac{1}{R_0} = \frac{3(\alpha_2 - \alpha_1)(T - T_0)}{2 \frac{(E_1 s_1^2 - E_2 s_2^2)^2}{1 + \frac{4E_1 E_2 s_1 s_2}{E_1 s_1 + E_2 s_2}}} \quad [\text{éq II.15}]$$

Avec :

- R_0 le rayon de courbure initial à la température T_0 ;
- α_1 et α_2 les coefficients de dilatation des matériaux 1 et 2 (1 pour le matériau le moins extensible) ;
- E_1 et E_2 les modules d'Young des deux matériaux ;
- s_1 et s_2 les épaisseurs des deux matériaux ;
- $s = s_1 + s_2$ l'épaisseur du bilame.

Dans la plupart des applications industrielles, les bilames suivent des spécifications standards (DIN 1715 en Europe). Par exemple, l'épaisseur des deux matériaux est souvent la même ($s_1/s_2=1$), et en prenant deux matériaux dont le module d'Young est presque le même ($E_1/E_2 \approx 1$), le calcul du rayon de courbure se simplifie [4]:

$$\frac{1}{R} - \frac{1}{R_0} \approx \frac{3(\alpha_2 - \alpha_1)(T - T_0)}{2s} \quad [\text{éq II.16}]$$

On définit la flexibilité (ou courbure spécifique) par le facteur k :

$$K = \frac{3(\alpha_2 - \alpha_1)}{2} \quad [\text{éq II.17}]$$

Pour un bilame plat, maintenu à une extrémité et sans courbure initiale à la température T_0 (figure II.10), on a [4]:

$$\frac{1}{R} = \frac{k(T - T_0)}{2} \quad [\text{éq II.18}]$$

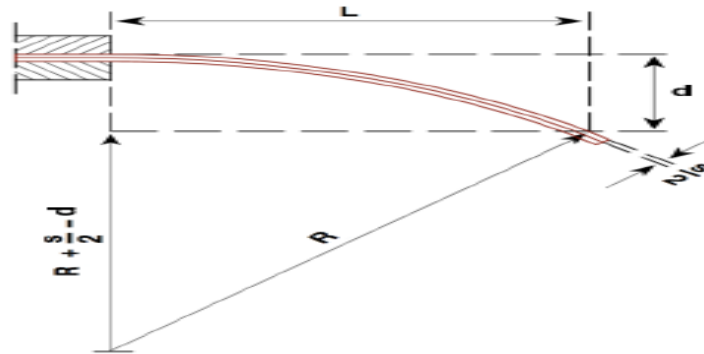


Figure II.10 : Déformation du bilame sous l'effet de la chaleur.

Pour trouver la déflexion d , on applique le théorème de Pythagore

$$\left(R + \frac{s}{2}\right)^2 = \left(R + \frac{s}{2} - d\right)^2 + L^2 \quad [\text{éq II.19}]$$

En général, la déflexion du bilame est plus petite que 10% de sa longueur L , on peut donc simplifier l'équation précédente en :

$$d = \frac{k(T - T_0)L^2}{2s} \quad [\text{éq II.20}]$$

La figure II.11 montre un bilame thermique Alimuminium-Polytéréphtalate d'éthylène (PET) réalisé par des chercheurs dans le but de détecter la variation de la température avec un circuit microonde [32].

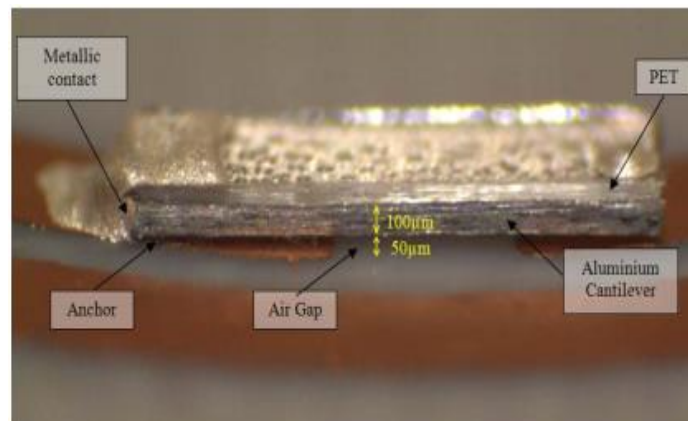


Figure II.11 : Vue microscopique d'un exemple de bilame thermique Aluminium-Polytéréphtalate d'éthylène (PET) [32].

II.5.2. Principe de fonctionnement du capteur :

Notre capteur de température est une structure en technologie MEMS (Micro Electro Mechanical Systems). Cette technologie couvre le domaine des dispositifs miniaturisés combinant plusieurs principes physiques. Ils intègrent généralement des éléments mécaniques couplés à de l'électronique et sont réalisés par des procédés de fabrication issus de la micro-électronique. Les MEMS exploitent, entre autres, des effets liés à l'électromagnétisme, la thermique et la fluïdique. Le principe de conception d'un microsysteme ne diffère pas fondamentalement de celui d'un macro-systeme puisque les lois physiques et les équations qui les décrivent restent principalement les mêmes. Cependant, au regard des lois d'échelle, l'importance des effets physiques dans ces équations changent en lien avec la taille du système. Utilisé en tant que capteur, un MEMS possède une partie mobile sensible à la variation d'une grandeur physique (dans notre cas, c'est la température ...). Cette variation est alors traduite en une grandeur électrique qui sera analysée par la suite.

Pour concevoir un capteur de température HF, l'idée exploitée consiste à combiner les micro-ondes et la mécanique à l'échelle micrométrique. Le capteur est constitué d'un résonateur en anneau coplanaire asymétrique et un bilame thermique.

Dans la première configuration de la structure, le bilame est fixé, d'un côté, par une poutre (métallique ou non) à l'extrémité de la ligne d'excitation du résonateur, près du gap de couplage. L'autre côté du bilame reste libre et forme effectivement une capacité de plaque parallèle avec l'extrémité de la ligne de résonateur (Figure II.12). La distance (H_{bilame}) entre les armatures de la capacité est variable en fonction de la température [13].

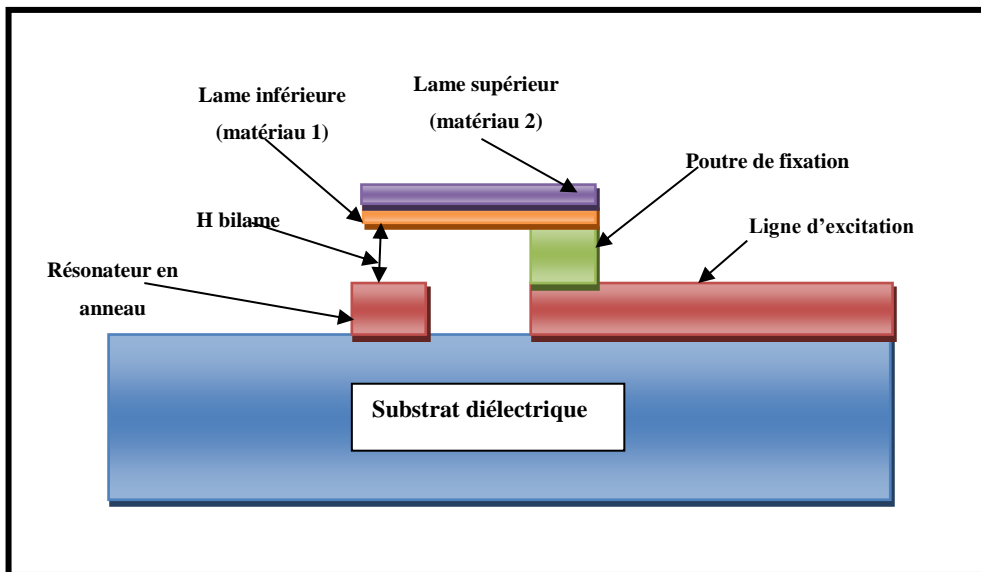


Figure II.12 : Coupe transversale du capteur de température HF avec bilame thermique (Résonateur en anneau)

Le mécanisme de détection de température du capteur est basé sur ces principes (figure II.13):

- La déflexion du bilame en réponse aux changements de température.
- La variation de la capacité du couplage causé par la déflexion du bilame - - Variation de la réponse du résonateur en fonction de la variation de la capacité du couplage

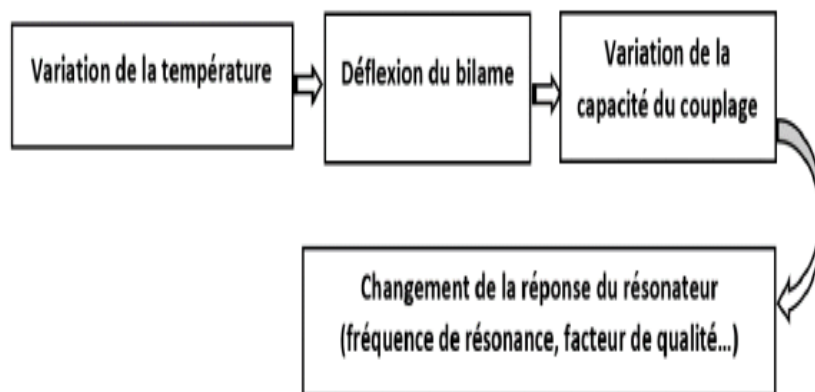


Figure II.13 : Principe de fonctionnement du capteur de température RF (Résonateur +bilame thermique)

Le résultat obtenu est un microsystème électromécanique qui utilise la transduction électromagnétique comme moyen de détection de la variation de température.

II.5.3. Dimensionnement et choix des matériaux du capteur :

Le résonateur et les plans de masse sont réalisés avec du cuivre compte tenu de sa forte conductivité électrique qui tend à minimiser les pertes de conducteur. Le substrat diélectrique est en Alumine (Al₂O₃ céramique). Ce matériau présente de faibles pertes radio fréquence. Il possède une permittivité électrique de $\epsilon_r=9,8$. L'Alumine est résistante aux chocs thermiques, résistant aux bains d'acide et peut être envisagé pour des applications sous hautes températures. Ce matériau est le candidat idéal pour servir de support au résonateur. L'épaisseur du substrat en Alumine est fixée par les plaquettes qui sont fournies dans le commerce (635 μm).

Le bilame thermique est constitué de deux lames, la lame inférieure est réalisée avec le cuivre (coefficient de dilation thermique $17 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) et la lame supérieure avec du silicium (coefficient de dilation thermique $3 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$). La poutre de fixation est réalisée également avec du cuivre si la poutre est fixée sur le résonateur ou Alumine s'elle est fixée sur lesubstrat

La fréquence de résonance choisie pour ce capteur est $f_0=10 \text{ GHz}$. A cette fréquence, les dimensions des circuits hyperfréquences sont de quelques millimètres.

Les dimensions des lignes d'accès doivent être accordées de manière à avoir 50Ω afin de minimiser les réflexions et assurer une bonne adaptation de la structure [13]. Pour cela, on utilise le module *Linecalc* du logiciel *ADS*. Les tableaux suivants montrent les dimensions choisis pour la conception du capteur.

Tableau II.1: Dimensions des lignes d'accès coplanaires

Impédance Z_0 (Ω)	Largeur du ruban (μm)	La fente (μm)
50	242	124

Tableau II.2 : Dimensions choisis pour le résonateur en anneau.

Impédance Z_0 (Ω)	Largeur de la ligne résonante W_r (μm)	La fente (μm)	Rayon intermédiaire (R) (mm)
50	242	124	2

Tableau II.3 : Dimensions choisis pour le bilame thermique

Bilame thermique	Matériaux	Longueur	Largeur	Epaisseur
Lame supérieur	Silicium	0.5 mm	242 μm	20 μm
Lame inférieur	Cuivre	0.5 mm	242 μm	20 μm

Poutre de fixation	Cuivre/ Alumine	0.15 mm	242 μm	Gap entre bilame et résonateur (H_{bilame} Variable)
--------------------	--------------------	---------	-------------------	---

II.6. Interrogation du capteur RF :

L'interrogation sans fil des capteurs passifs, qu'ils soient de type RFID, à onde acoustique ou électromagnétique (comme le cas de notre capteur de température RF), est basée sur l'analyse du signal rétrodiffusé par le capteur. Mais contrairement aux capteurs RFID pour lesquels le signal reçu est de type logique (0 ou 1 en fonction du niveau de signal reçu), les capteurs à transduction électromagnétique (et acoustiques) analysent le signal de manière analogique.

Pour principe de fonctionnement, l'énergie envoyée par le lecteur est dirigée et reçue successivement par chaque capteur. Une partie de cette énergie est ensuite réémise par chacune de ces cellules vers le lecteur. Le niveau de cette rétrodiffusion est représentatif de la grandeur physique mesurée.

La figure 14 montre un type de réseau composé de plusieurs capteurs passifs qui communiquent directement avec le lecteur radar. Chaque capteur à sa propre antenne.

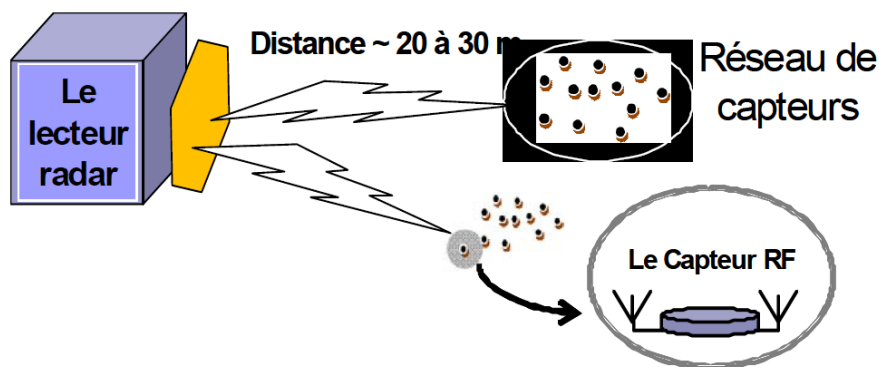


Figure II.14 : Interrogation à distance d'un réseau de capteurs passifs par un Radar [33].

Les avantages principaux de ce type d'interrogation sont comme nous avons vu précédemment : la suppression de tous les circuits électroniques au niveau du transducteur et par voie de conséquence le transfert de toute l'intelligence au niveau du lecteur ainsi qu'une distance d'interrogation potentiellement plus grande (pour les capteurs électromagnétiques). Cette configuration permet ainsi non seulement d'adresser des applications à environnements sévères mais également de pouvoir laisser le transducteur en place tout en profitant des améliorations réalisées au niveau du lecteur [34].

II.7. Conclusion :

Une étude théorique du résonateur en anneau coplanaire et le principe des bilames thermiques ont été présentés dans ce chapitre. Le mode de la transduction de notre capteur est électromagnétique est basé sur l'interaction entre la réponse électromagnétique du résonateur en anneau et la déflexion du bilame thermique sous l'effet de la température. L'interrogation sans fil de ce type de capteur RF est basée sur l'analyse du signal rétrodiffusé par le capteur via des antennes par un système de lecture.

***Chapitre III: Résultats de
simulation EM du capteur***

III.1. Introduction :

Dans cette partie de simulation, nous allons, en premier temps, réaliser le résonateur anneau puis le capteur de température à l'aide du logiciel HFSS (High Frequency Structure Simulator). Ce logiciel est un simulateur de champ électromagnétique qui aide le concepteur à observer et analyser les diverses propriétés électromagnétiques d'une structure. Le choix de ce logiciel est motivé par la capacité de celui-ci à la simulation des structures de géométrie complexe dont les dimensions et les propriétés électromagnétiques sont définies par l'utilisateur.

III.2. Présentation du logiciel de simulation HFSS :

La simulation électromagnétique a été réalisée sous Ansoft HFSS (High Frequency Structure Simulator). Il s'agit d'un outil simulation standard pour une simulation électromagnétique en trois dimensions. Il fournit les champs électriques E et magnétiques H , les courants et les paramètres S . C'est un outil de conception d'ingénierie où les utilisateurs n'ont qu'à préciser la géométrie, les propriétés des matériaux et les paramètres de sortie désirés (figure III.1). HFSS générera automatiquement une réponse appropriée, maillage efficace et précis pour résoudre le problème en utilisant la méthode des éléments finis. La précision, la capacité et la performance de HFSS assurent la conception des composants opérant à des hautes fréquences telles que les antennes, composants radiofréquences...etc [35].

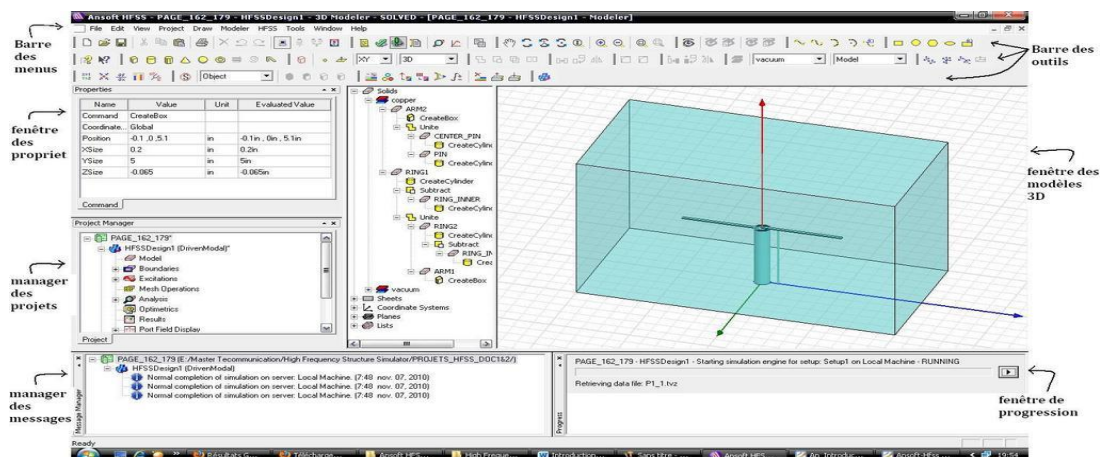


Figure III.1 : Interface du logiciel de simulation HFSS

Son principe consiste à diviser l'espace d'étude (structure) en un grand nombre de petites régions (tétraèdres) appelé « élément », puis à calculer localement la valeur du vecteur de champ électromagnétique (E ou H) en un point à l'intérieur d'un tétraèdre par interpolation

polynomiale des valeurs des champs dans les sommets du tétraèdre. Cette approche réduit considérablement la complexité de la structure [16].

L'avantage de ce logiciel est sa possibilité de traiter toutes sortes de structures homogènes et inhomogènes, quelle que soit la technologie désirée (micro-ruban, coplanaire, ligne à fente, guide d'ondes, Ring ...etc).

III.3. Simulation du résonateur en anneau seul :

Dans l'interface de conception 3D du logiciel HFSS, nous avons réalisé, dans un premier temps, le résonateur anneau avec un accès ligne sans bilame thermique (figure III.2). Cette étape nous a permis de vérifier le bon fonctionnement du résonateur

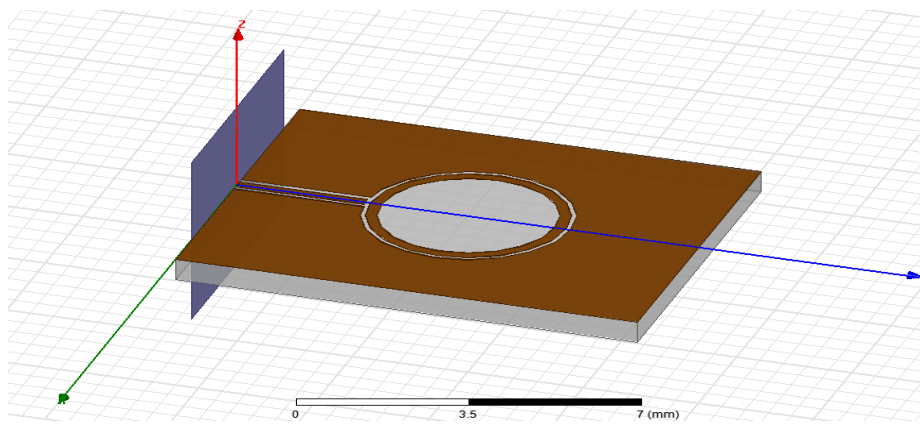


Figure III.2 : Simulation HFSS du résonateur anneau avec une seule ligne d'accès (sans bilame thermique)

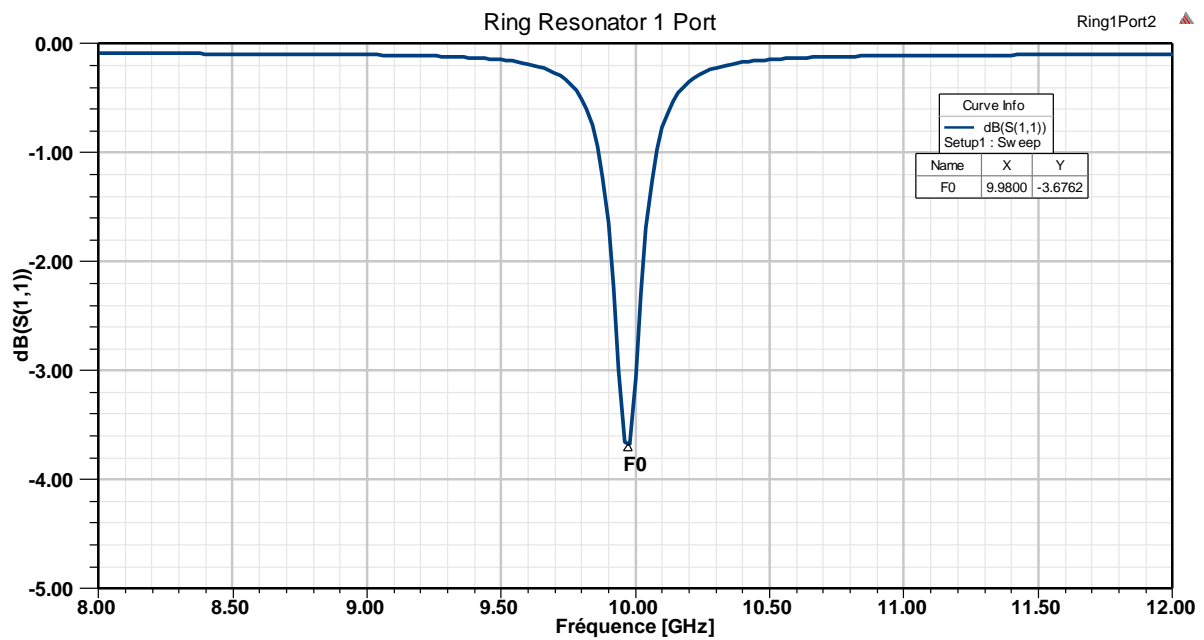


Figure III.3 : Résultat Simulation HFSS du résonateur anneau avec une seule ligne d'accès (sans bilame thermique)

Les résultats de la simulation (figure III.3) montrent que la structure donne une résonance à la fréquence d'environ $f_0 = 9.98$ GHz avec une perte de retour de -3.67 dB.

III.4. Simulation du capteur de température RF:

III.4.1. Résonateur en anneau avec un bilame au-dessus du gap de couplage :

La première configuration du capteur de température est obtenue en déposant le bilame thermique au-dessus du gap de couplage entre la ligne d'accès et l'anneau (Figure III.4).

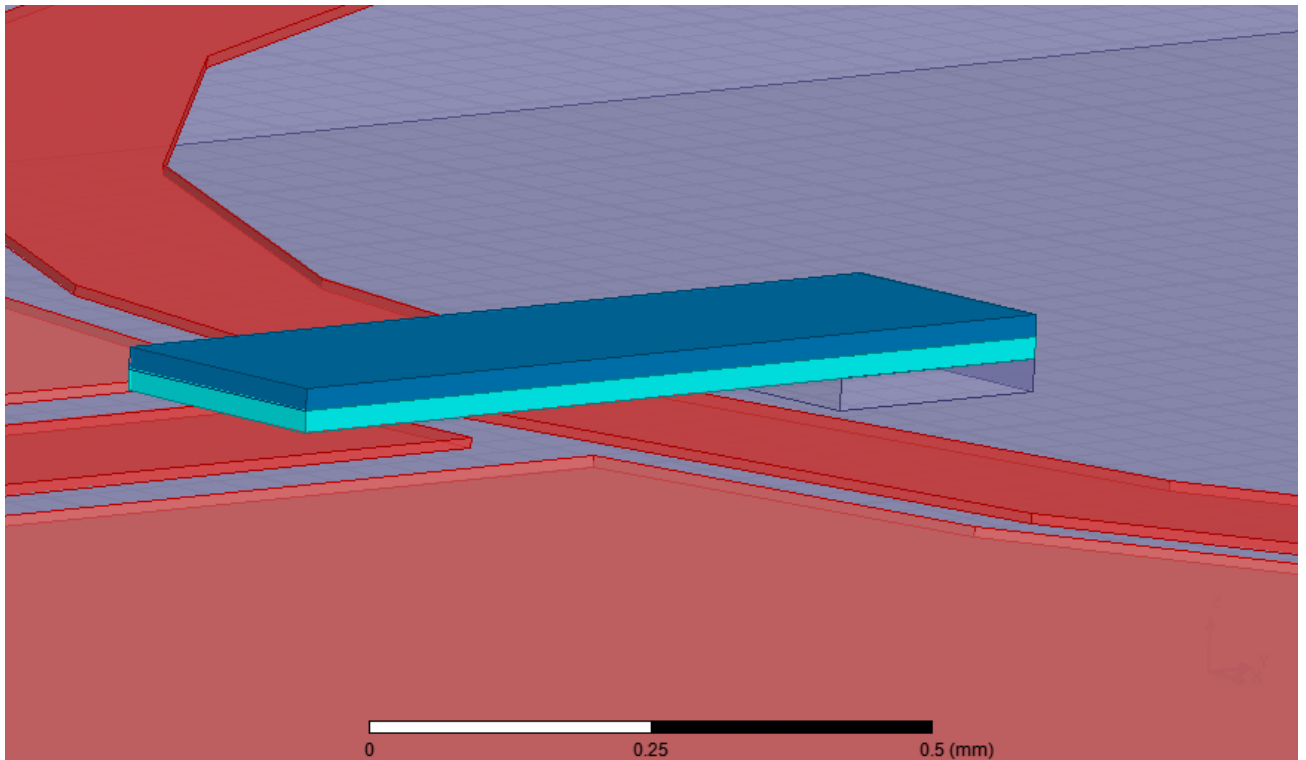


Figure III.4 : Simulation HFSS du résonateur en anneau avec un seul accès avec un bilame thermique au-dessus du gap de couplage

La figure III.5 montre les différentes courbes des coefficients de réflexion S_{11} du capteur de température en fonction de la distance entre le bilame thermique et la surface du résonateur (H_b).

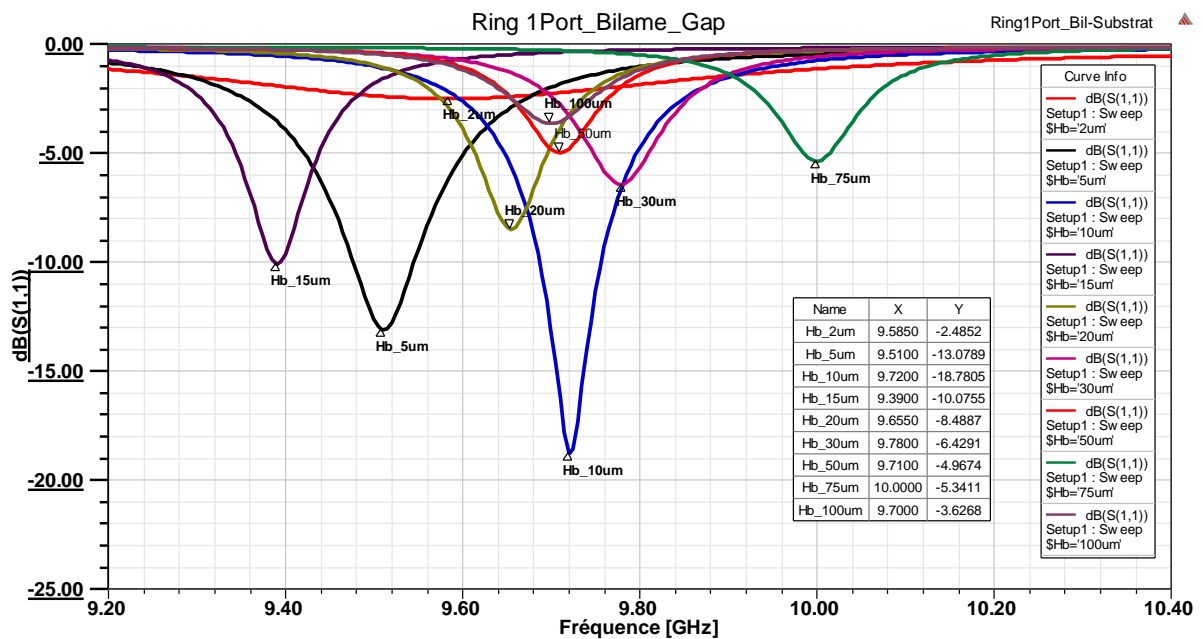


Figure III.5: La réponse du résonateur en anneau avec un seul accès avec un bilame thermique au-dessus du gap de couplage, en fonction de la distance H_b .

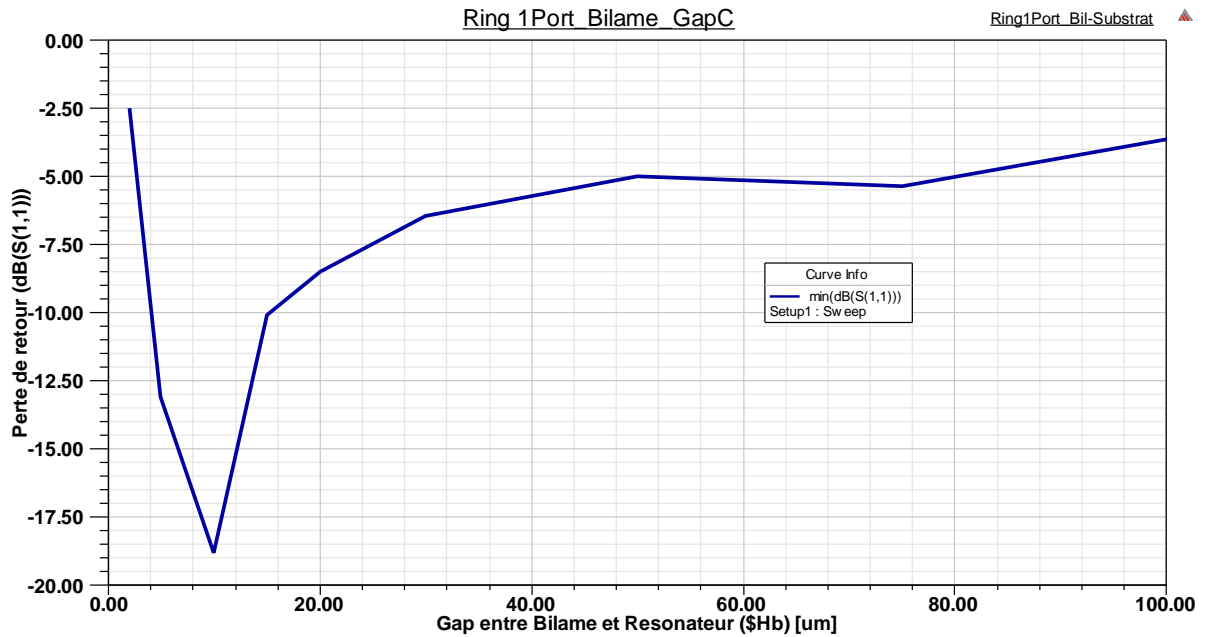


Figure III.6 : La variation des pertes de retour du résonateur en anneau avec un seul accès avec un bilame thermique au-dessus du gap de couplage, en fonction de la distance H_b .

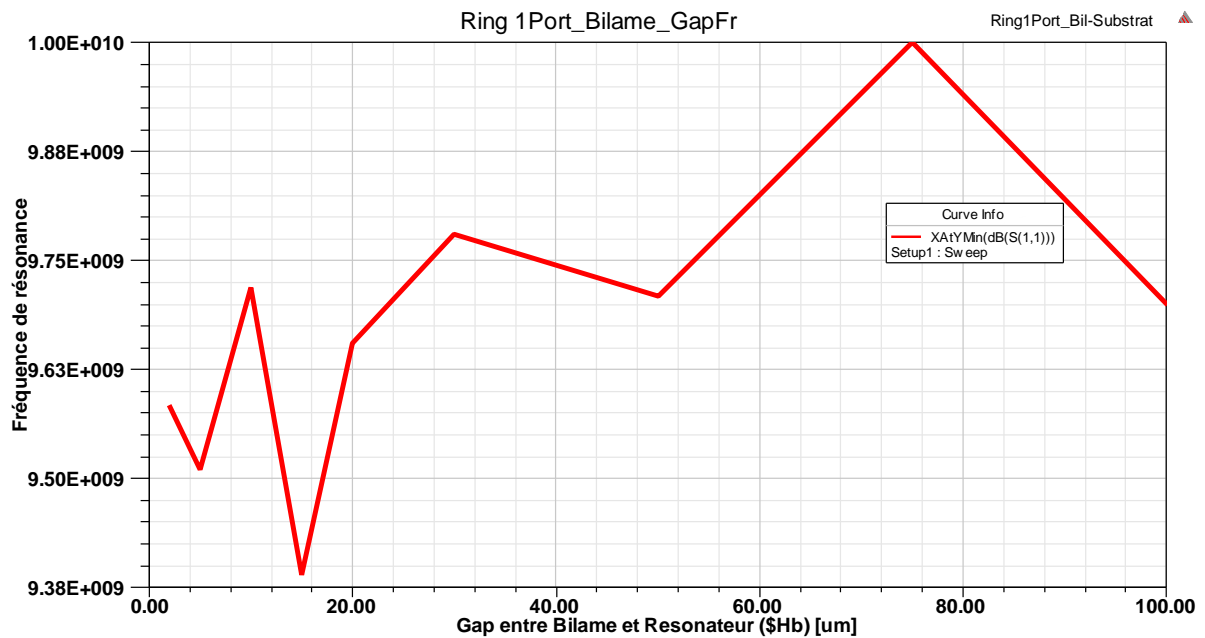


Figure III.7 : La variation de fréquence de résonance du résonateur en anneau avec un seul accès avec un bilame thermique au-dessus du gap de couplage, en fonction de la distance H_b .

Chapitre 3 : Résultats de simulation EM du capteur

Les résultats montrés dans les figures III.6 et III.7 montre que la relation entre les pertes de retour, la fréquence de résonance et la distance H_b n'est pas linéaire.

Donc, les pertes de retour et la fréquence de résonance ne peuvent pas être exploitables pour la mesure de la température pour les raisons suivantes :

- Dans une plage, la distance H_b varie sans que les pertes de retour varie (le phénomène n'est pas sensible).
- L'existence des valeurs des pertes de retour et de la fréquence de résonance auxquelles correspondent deux valeurs de la distance H_b , donc la relation n'est pas univoque.

III.4.2. Résonateur en anneau fendu (Split Ring Resonator SRR) :

Les résultats précédents montrent que la configuration de la structure d'un résonateur en anneau avec un seul accès avec un bilame thermique au-dessus du gap de couplage n'est valable pour constituer un capteur de température. Pour cette raison, nous avons adopté une autre configuration qui le résonateur en anneau fendu (Split Ring Resonator SRR) montré dans la **Figure III.8**.

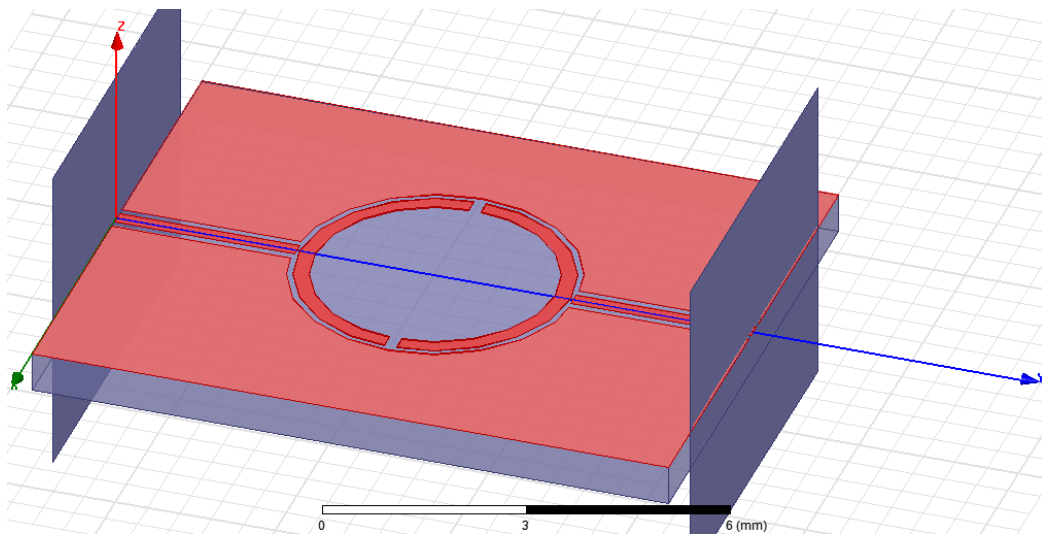


Figure III.8: Résonateur en anneau fendu (Split Ring Resonator SRR) avec deux gaps fendus dans l'anneau.

L'influence de la dimension du gap fendu dans l'anneau ($SpGap$) sur le comportement de la structure a été étudiée. Le gap fendu a été varié avec les valeurs $SpGap = 10\mu m$, $20\mu m$, $50\mu m$, et $200\mu m$.

La figure III.9 montre les différentes courbes des coefficients de transmission S_{12} du capteur de température en fonction de la dimension du gap fendu dans l'anneau ($SpGap$).

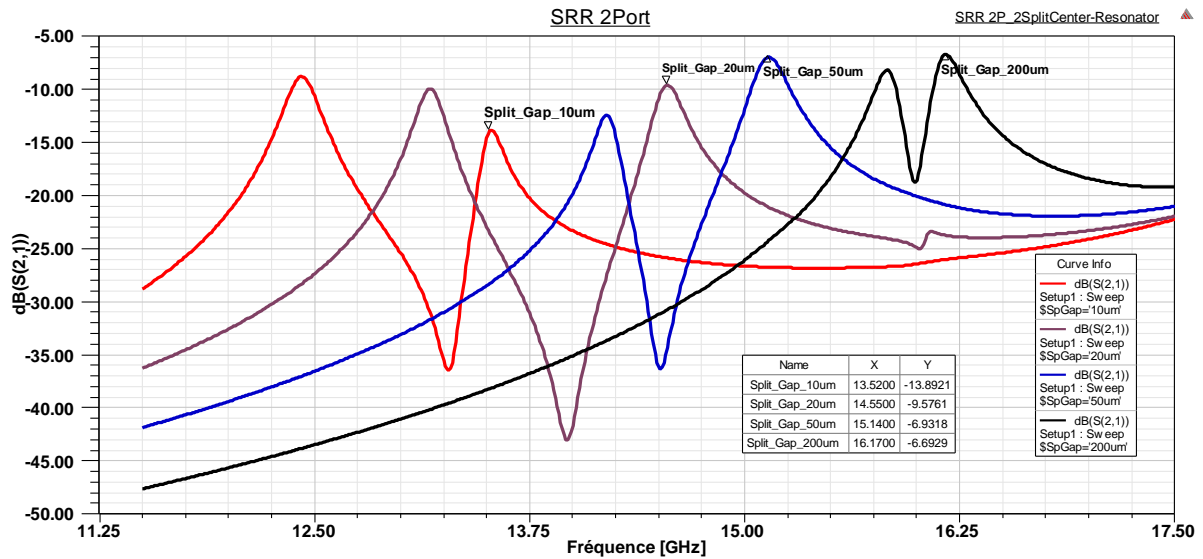


Figure III.9 : La réponse (S_{12}) du résonateur en anneau fendu (SRR) en fonction de la dimension du gap fendu dans l’anneau ($SpGap$).

Nous avons remarqué que lorsqu’on augmente la dimension du gap fendu dans l’anneau, la fréquence de résonance se décale vers les hautes fréquences (**Figure III.10**).

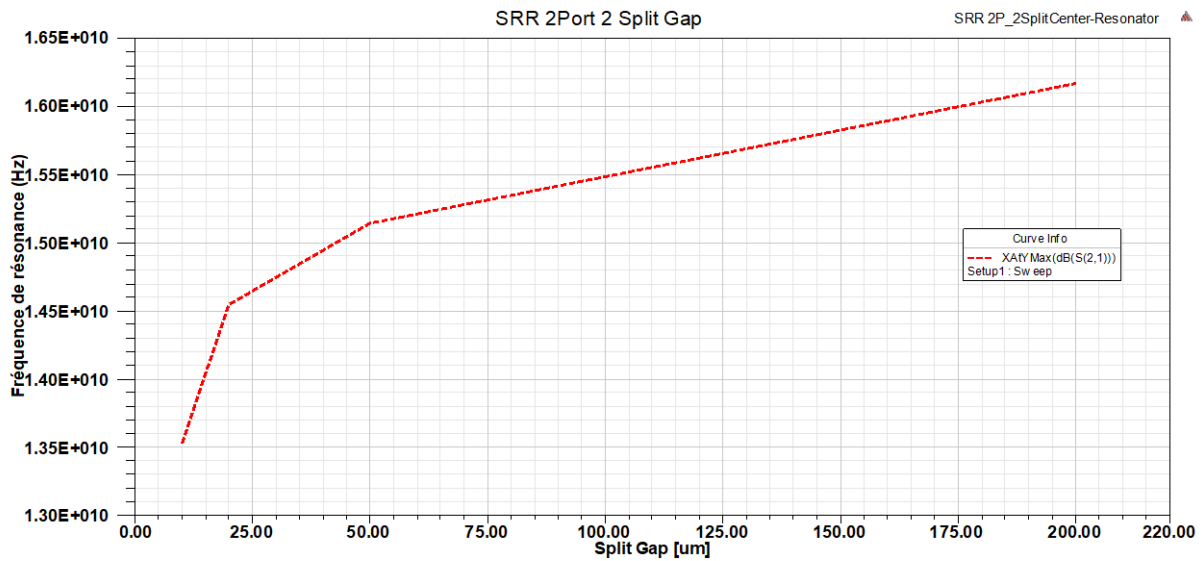


Figure III.10 : La variation de la fréquence de résonance du résonateur en anneau fendu (SRR) en fonction de la dimension du gap fendu (Split Gap) dans l’anneau ($SpGap$).

Cela est expliqué par le fait que la circonférence de l’anneau ($2\pi \times r$) diminue avec l’augmentation de la dimension du gap fendu. Par conséquent, la longueur d’onde guidée (λ_g) diminue à son tour suivant l’équation [éq II.1] et la fréquence de résonance f_r du premier mode augmente suite à la formule suivante :

$$f_0 = \frac{c}{\lambda_g \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad [\text{éq III.1}]$$

- « c » est la vitesse de la lumière dans le vide et « ϵ_{eff} » est la permittivité effective de la structure.

III.4.3. Résonateur en anneau fendu (SRR) avec deux bilames :

Nous avons choisi la valeur maximale 200 μm pour le gap fendu (Split gap) dans la structure du capteur de température. Nous pensons que c'est la valeur qui simplifiera la réalisation expérimentale du capteur dans le futur et peut donner une meilleure sensibilité du capteur.

Les deux bilames thermiques sont déposés au-dessus du gap fendu de l'anneau (**Figure III.11**)

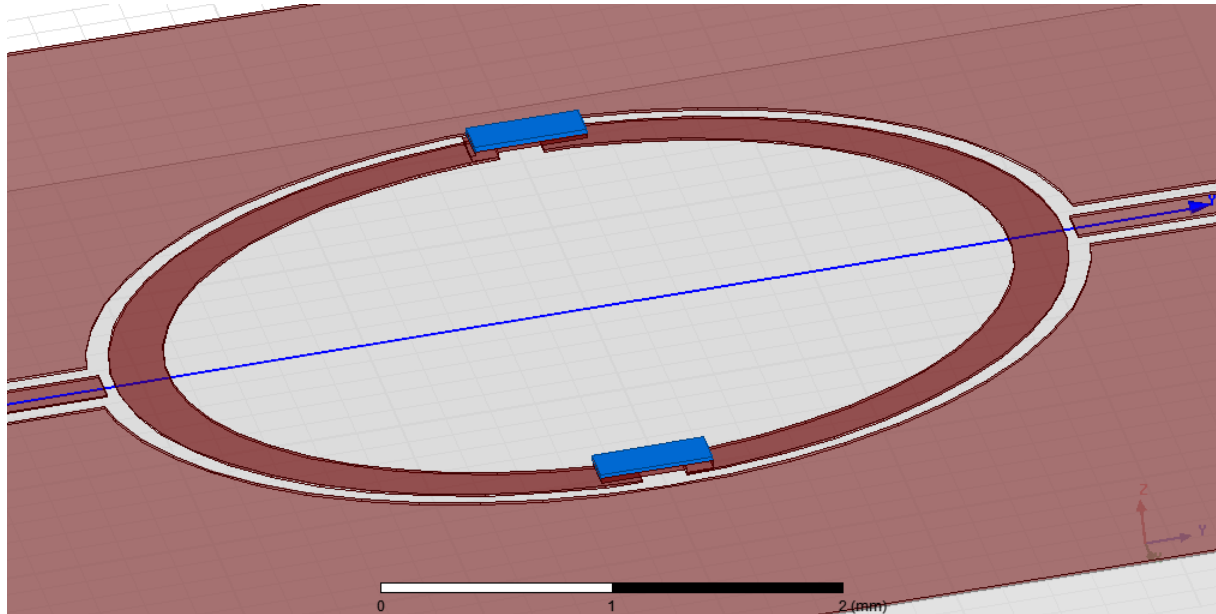


Figure III.11 : Résonateur en anneau fendu (SRR) avec deux bilames thermiques au-dessus du gap fendu de l'anneau.

Les figures III.12 et III.13 montrent, respectivement, les différentes courbes des coefficients de réflexion S_{11} et transmission S_{22} du capteur pour plusieurs valeurs de la distance entre le bilame thermique et la surface du résonateur (H_b).

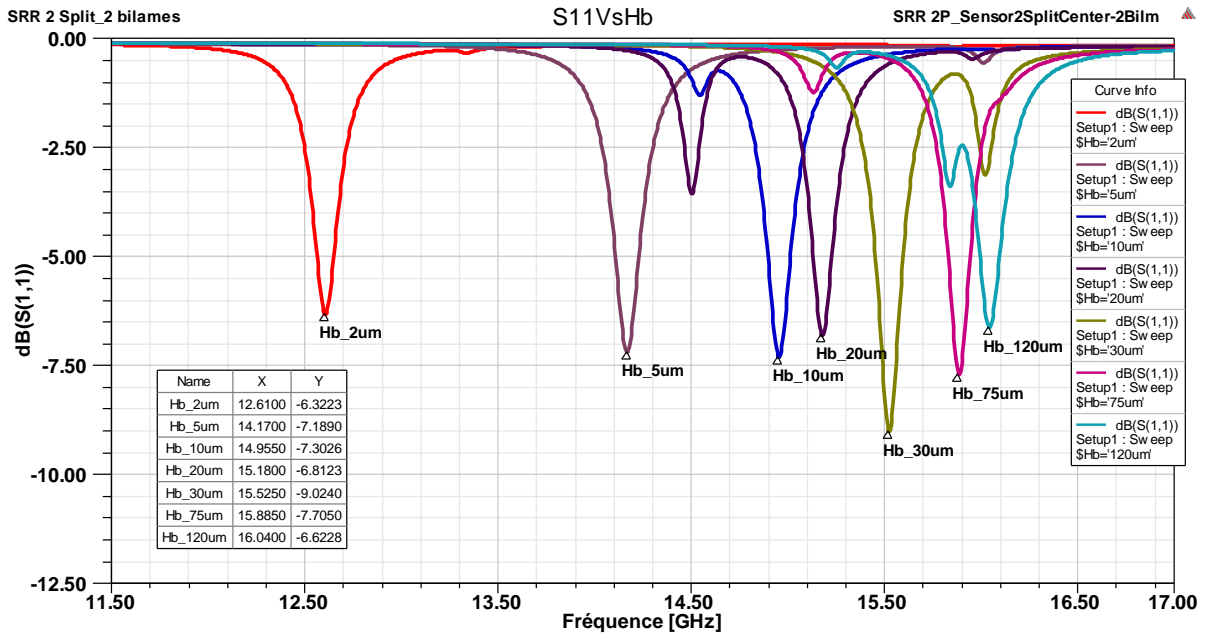


Figure III.12 : La réponse (S11) du résonateur en anneau fendu (SRR) avec deux bilames thermiques au-dessus du gap fendu de l’anneau, en fonction de la distance H_b .

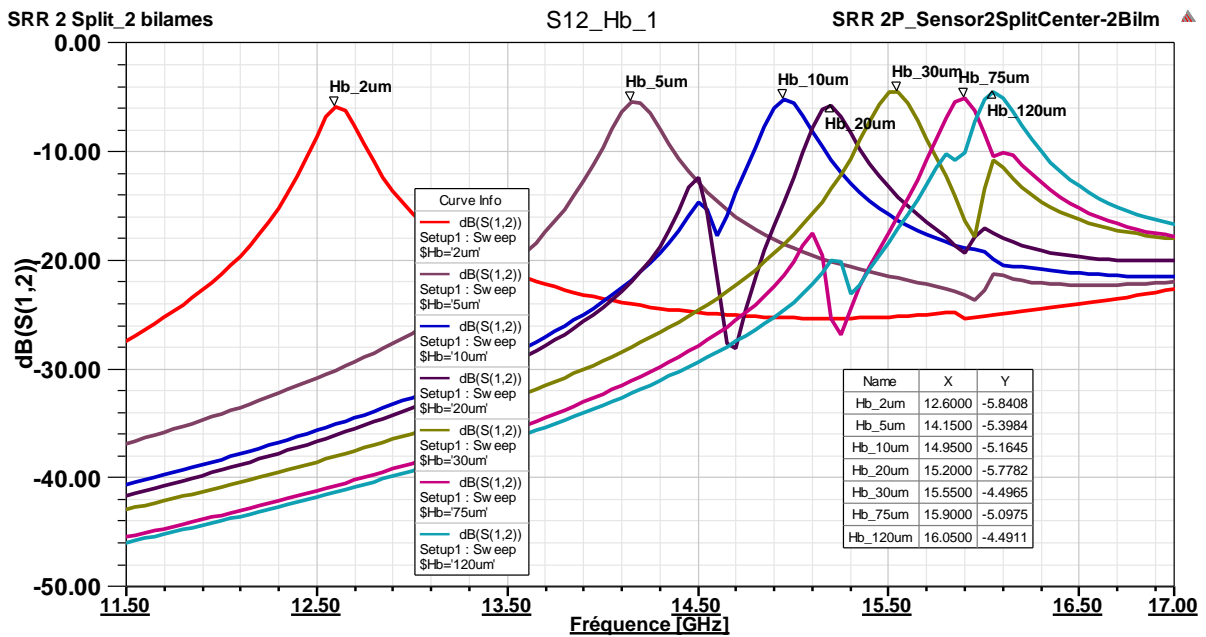


Figure III.13 : La réponse (S12) du résonateur en anneau fendu (SRR) avec deux bilames thermiques au-dessus du gap fendu de l’anneau, en fonction de la distance H_b .

Nous observons un décalage du pic de résonance lorsqu’on varie la distance ($H_b=2, 5, 10, 20, 30, 75$ et $120 \mu\text{m}$). La fréquence de résonance augmente lorsqu’on fait éloigner le bilame thermique de la surface du résonateur (figure III.14 et III.15).

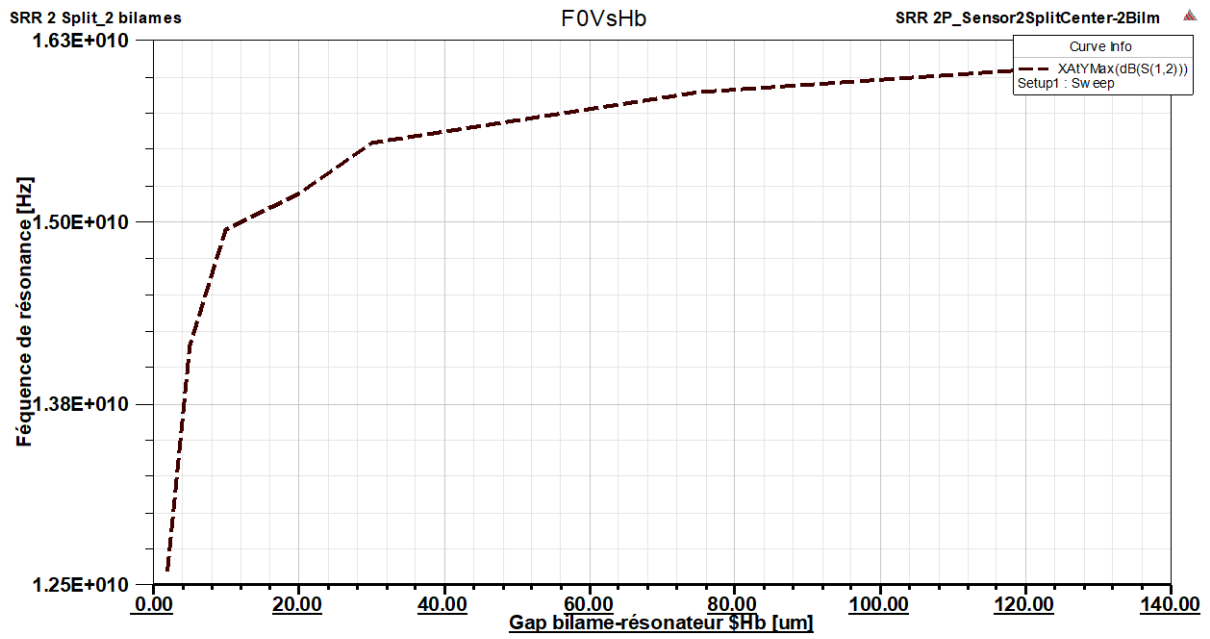


Figure III.14 : La variation de la fréquence de résonance du résonateur en anneau fendu (SRR) avec deux bilames thermiques au-dessus du gap fendu de l'anneau, en fonction de la distance H_b .

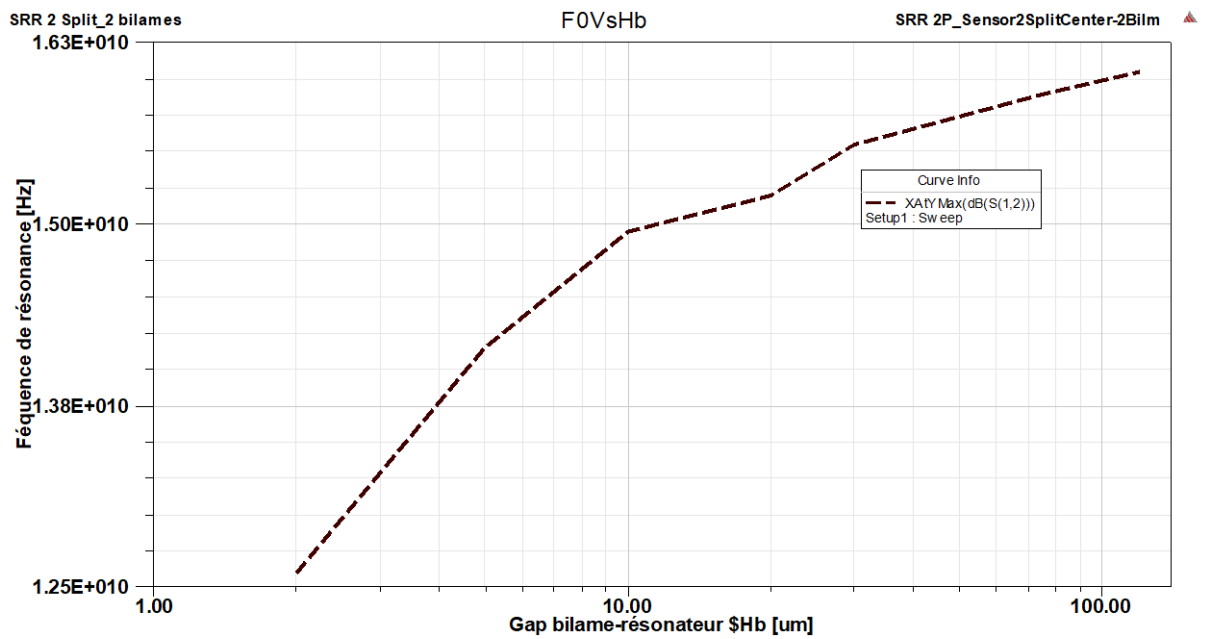


Figure III.15 : La variation de la fréquence de résonance (échelle logarithmique) du résonateur en anneau fendu (SRR) avec deux bilames thermiques au-dessus du gap fendu de l'anneau, en fonction de la distance H_b .

La fréquence de résonance varie de 12.6 GHz à 16.05 GHz lorsque la distance H_b varie $2\mu\text{m}$ à $120\mu\text{m}$, ce qui donne une sensibilité de $29.23\text{ MHz}/\mu\text{m}$. La déflexion réelle du bilame « d » est une fonction de la température par la relation [éq II.35], que nous rappelons ici :

$$d = \frac{k(T - T_0)L^2}{2s}$$

La déflexion réelle du bilame « d » est calculée par la relation suivante :

$$H_b = H_0 - d \quad [\text{éqIII.2}]$$

Où, H_0 est le gap initial entre le bilame thermique au repos et la surface du résonateur.

En utilisant les équations [éq II.32],[éq II.35]et [éqIII.2], nous pouvons calculer les valeurs de température qui provoquent la déformation du bilame thermique et la modification de la distance (H_b). La figure **III.16** montre la variation de la fréquence de résonance en fonction de la température estimée : $T = 137.38, 134.52, 129.76, 120.23, 110.71, 67.85, 25^\circ\text{C}$, sachant que $T_0 = 25^\circ\text{C}$.

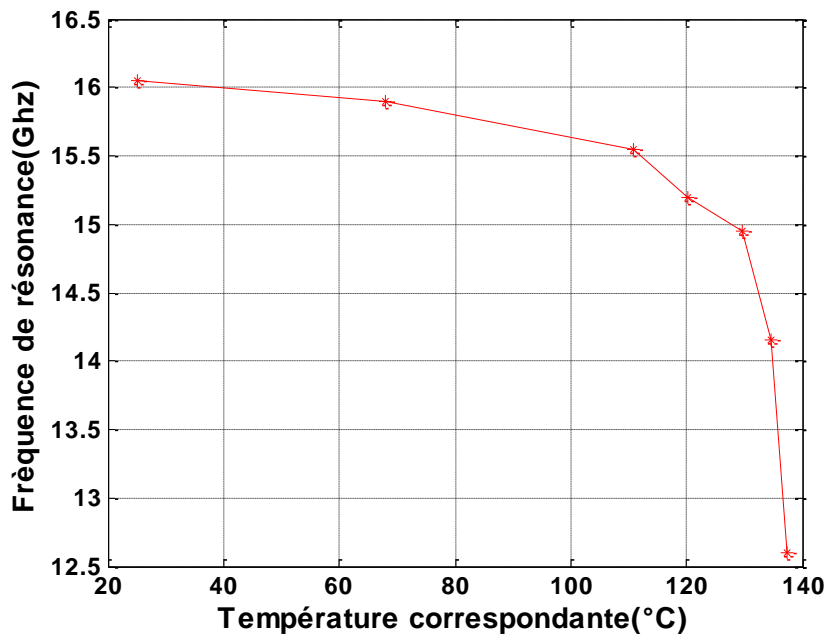


Figure III.16 : Variation de la fréquence de résonance du capteur en fonction de la température correspondante ($^\circ\text{C}$).

D'après ces résultats, la sensibilité en température de ce capteur est d'environ $30,69\text{ MHz}/^\circ\text{C}$.

III.5. Conclusion :

Un capteur de température micrométrique est réalisé en associant un résonateur en anneau fendu (SRR) et un bilame thermique a été conçu et simulé à l'aide du logiciel HFSS. La transduction électromagnétique est le mode utilisé dans ce type de dispositif. L'effet de la température a été

Chapitre 3 : Résultats de simulation EM du capteur

simulé par la déflexion mécanique du bilame. Ce dernier est placé en dessus du gap fendu (Split gap) de l'anneau. Les résultats de simulation ont montré l'influence de la déformation du bilame sur la réponse du capteur notamment sa fréquence de résonance. La fréquence de résonance varie de 12.6 GHz à 16.05 GHz lorsque la distance entre le bilame et la surface du résonateur varie de 2 μm à 120 μm , ce qui donne une sensibilité de 29.23 MHz/ μm . Avec ces dimensions, la plage de mesure de ce capteur est de 25 °C à 137.38 °C. La sensibilité en température de ce capteur est d'environ 30,69 MHz/°C.



Conclusion générale

Ces travaux de mémoire s'inscrivent dans le cadre de développement d'un nouveau type de capteur de température micrométrique qui se base sur la transduction électromagnétisme. Le mode de la transduction de notre capteur est électromagnétique est basé sur l'interaction entre la réponse électromagnétique du résonateur en anneau et la déflexion du bilame thermique sous l'effet de la température. L'interrogation sans fil de ce type de capteur RF est basée sur l'analyse du signal rétrodiffusé par le capteur via des antennes par un système de lecture.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté quelques notions de base de la thermométrie. Les différents types de capteurs de température ont été décrit notamment les capteurs à dilation de solide. Le principe de dilation thermique des matériaux solide est exploité dans ce travail en intégrant les composants planaires microondes.

Dans le second chapitre, une étude théorique du résonateur en anneau coplanaire et le principe des bilames thermiques ont été décrits dans le second chapitre. Le capteur de température micrométrique est réalisé en associant un résonateur en anneau fendu (SRR) et un bilame thermique.

Dans le dernier chapitre, nous avons présenté la simulation de la structure. L'effet de la température a été simulé par la déflexion mécanique du bilame. Ce dernier est placé en dessus du gap fendu (Split gap) de l'anneau. Les résultats de simulation ont montré l'influence de la déformation du bilame sur la réponse du capteur notamment sa fréquence de résonance.

La première configuration simple du résonateur en anneau avec un seul port n'est valable pour la mesure de la température. Par contre, la configuration du résonateur en anneau fendu (SRR) a montré une bonne corrélation entre la fréquence de résonance et la déformation du bilame.

La fréquence de résonance varie de 12.6 GHz à 16.05 GHz lorsque la distance entre le bilame et la surface du résonateur varie de $2\mu\text{m}$ à $120\mu\text{m}$, ce qui donne une sensibilité de 29.23 MHz/ μm . La plage de mesure de ce capteur est de 25 °C à 137.38 °C. Une sensibilité en température de 30,69 MHz/°C est obtenue pour ce capteur.

Bibliographie

- [1] ASHBY M.F. Choix des matériaux en conception mécanique. Paris : L'Usine Nouvelle, Dunod, 2004.
- [2] TOULOUKIAN Y.S., KIRBY R.K., TAYLOR R.E. and LEE T.Y.R. Thermal expansion : Nonmetallic Solids, Thermophysical Properties of Matter. Vol. 13, New York : IFI/ PLENUM, 1977
- [3] TOULOUKIAN Y.S., KIRBY R.K., TAYLOR R.E. and DESSAI P.D. Thermal Expansion :Metallic Elements and Alloys. Thermophysical Properties of Matter. Vol. 12. New York : IFI/ PLENUM, 1975.
- [4] Jean-Pierre MICHEL « Dilatation et contraintes thermiques dans les solides : application aux bilames » Présentation d'une expérience, Institut Jean Lamour (SI2M) (UMR CNRS- Université Nancy, École des Mines - 54042 Nancy Cedex
- [5] A. Pohl, "A review of wireless SAW sensor,s" IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, vol. 47, no 2, pp. 317 -332, March 2000.
- [6] C. C. W. Ruppel et T. A. Fjeldly, Advances in Surface Acoustic Wave Technology, Systems and Applications Volume 2, 1er éd. World Scientific Publishing Company, 2001.
- [7] Sergey Y.Yurish and Maria Teresa S.R.Gomes, 'Smart Sensors and MEMS', Kluwer Academic Publisher, 2004.
- [8] P Li, H Xie, Y Wen, C Wang, S Huang, Z Ren, J He, D Lu, "A SAW Passive Wireless Sensor System for Monitoring Temperature", IEEE Sensors 2011, 28-31 Oct 2011, Limerick, Ireland.
- [9] Sofiene Bouaziz. Capteurs de température passifs sans fil micro-fluidique à interrogation radar. Micro et nanotechnologies/Microélectronique. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2013. Français. tel- 00803491
- [10] C. P. Wen. "Coplanar waveguide: A surface strip transmission line suitable for non reciprocal gyro-magnetic device applications". IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 17(12) :1087–1090, Dec 1969.
- [11] S. Gevorgian, L. J. P. Linner, and E. L. Kollberg. "CAD models for shielded multilayered CPW". IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques", 43(4) :772–779, April 1995.

- [12] B. Benarabi, F. Kahlouche, B. Bayard, A. Chavanne, J. Sautel, “Microwave characterization of electrical conductivity of composite conductors by half-wavelength coplanar resonator”, *Progress In Electromagnetics Research Letters*, Vol. 60, 73–80, 2016.
- [13] Bilal Benarabi. Modélisation et caractérisation de nouveaux conducteurs pour la connectique hyperfréquence. Optique / photonique. Université de Lyon, 2016. Français. <NNT : 2016LYSES001>. <tel-01762150>
- [14] D. M. Pozar. "Microwave Engineering". John Wiley & Sons, 4nd edition, December 2011.
- [15] G. Amendola, P. Poulichet, L. Sevely, L. Valbin. Les capteurs MEMS, principes de fonctionnement. Techniques de l'Ingénieur.
- [16] Tatsuo Itoh. “Numerical techniques for microwave and millimeter-wave passive structures”. John Wiley and Sons. 1989.
- [17] <https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Temperature.html>
- [18] P. R. N. Childs, J. R. Greenwood, and C. A. Long, “Review of temperature measurement,” *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 71, No. 8, pp. 2959-2978, Aug. 2000.
- [19] J. Goetz, “Sensors that can take the heat”, *Sensors*, pp. 20–38, June 2000.
- [20] O.J. Gregory, T. You, “Ceramic Temperature Sensors for Harsh Environments”, *IEEE Sensor J.*, vol.5, Oct. 2005, pp.833-838.
- [21] Lemi Toygur, “Interface Circuits in SOI-CMOS for High Temperature Wireless Micro Sensors,” Ph.D. Dissertation, Case Western Reserve University, OH, January 2004.
- [22] S. Scott, and D. Peroulis, “A capacitively-loaded MEMS slot element for wireless temperature sensing of up to 300 °C,” *IEEE Intl. Microwave Symp.*, pp.1161-1164, Boston, MA, June 2009.
- [23] J. B. Pendry, A. J. Holden, D. J. Ribbins, and W. J. Stewart, “Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena,” *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 47, pp. 2075-2084, Nov. 1999.
- [24] D. 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.*, vol. 84, no. 18, pp. 4184-4187, May 2000.
- [25] R. Marques, F. Mesa, J. Martel, and F. Medina, “Comparative analysis of edge- and broadside-coupled split ring resonators for metamaterial design- theory and experiments,” *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol. 51, no. 10, Oct. 2003.

- [26] R. J. Stephenson, A. M. Moulin, and M. E. Welland, "Bimaterials thermometers," *The Measurement Ins. Sensors Handbook*, Chemical Rubber, Boca Raton, FL, 1999.
- [27] Amor Gharsalli Mesures et Instrumentations Mesure de la Température Université Virtuelle de Tunis <http://btscira.perso.sfr.fr/> Techniques de l'Ingénieur, traité Mesures et Contrôle (R 2 570,R2550,R2610) / Documents technologiques I T E C A SOCADEI Web site : www.iteca-socadei.com
- [28] https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89chelle_Rankine#D%C3%A9finition.
- [29] Jean Carignan. Étude de faisabilité d'un capteur inductif pour la mesure de température de surface des objets métalliques. Université du Québec Février 1998.
- [30] Hage-Ali et al. (2019). Microsystèmes communicants : modélisation, fabrication et mesures. *J3eA*. 18. 1007. 10.1051/j3ea/20191007.
- [31] Matthieu Bouchaud, « Réalisation d'un module de façade en bilame permettant la ventilation d'un bâtiment », ENSAPM , Département Transitions , Séminaire de recherche, Année 2014-2015.
- [32] T. T. Thai *et al.*, "Design and Development of a Novel Passive Wireless Ultrasensitive RF Temperature Transducer for Remote Sensing," in *IEEE Sensors Journal*, vol. 12, no. 9, pp. 2756-2766, Sept. 2012, doi: 10.1109/JSEN.2012.2201463.
- [33] Hamida Hallil. Conception et réalisation d'un nouveau capteur de gaz passif communicant à transduction RF. Micro et nanotechnologies/Microélectronique. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2010. Français. (tel-00546243)
- [34] F.CHEBILA, M. M.JATLAOUI, P.PONS, H.AUBERT "Interrogation radar de micro-capteur de pression à transduction électromagnétique" 16èmes Journées Nationales Microondes (JNM 2009), Grenoble (France), 27-29 Mai 2009, 4p.
- [35] Taline Boyajian. Étude et réalisation d'un circulateur hyperfréquence à nano particules magnétiques orientées dans la bande 40-60GHz. Electromagnétisme. Université Jean Monnet - Saint-Etienne, 2011. French. <tel-00670799v1>.

Résumé :

Ces travaux de mémoire s'inscrivent dans le cadre de développement d'un nouveau type de capteur de température micrométrique qui se base sur la transduction électromagnétique. Le capteur est basé sur l'interaction entre la réponse électromagnétique du résonateur en anneau fendu et la déflexion du bilame thermique sous l'effet de la température. L'interrogation sans fil de ce type de capteur RF est basée sur l'analyse du signal rétrodiffusé par le capteur via des antennes par un système de lecture. La configuration du résonateur en anneau fendu (SRR) a montré une bonne corrélation entre la fréquence de résonance et la déformation du bilame.

Mots clés : Capteur de température, Résonateur en anneau fendu, bilame thermique, transduction électromagnétique.

المخلص:

الهدف من هذه الدراسة هو تصميم نوع جديد من المستشعرات الميكرومترية لقياس الحرارة. هذا النوع من المستشعرات يعمل بمبدأ التحويل الكهرومغناطيسي الذي يعمل بالتفاعل بين الاستجابة الكهرومغناطيسية لممران الحلقة المنقسمة وانحراف الشريط الحراري ثنائي المعدن تحت تأثير درجة الحرارة. يعتمد الاستجواب اللاسلكي لهذا النوع من مستشعرات الترددات اللاسلكية على تحليل الإشارة المرتدة من قبل المستشعر عبر الهوائيات بواسطة نظام القراءة. أظهر تكوين ممران الحلقة المنقسمة (SRR) ارتباطاً جيداً بين تردد الرنين والتشوه ثنائي المعدن.

الكلمات المفتاحية: مستشعر درجة الحرارة، التحويل الكهرومغناطيسي، ممران حلقي، ثنائي المادة الحراري.

Abstract:

The aim of this work is the development of a new type of micrometric temperature sensor based on electromagnetic transduction. The sensor is based on the interaction between the electromagnetic response of the split ring resonator (SRR) and the deflection of the thermal bimetallic cantilevers under the effect of temperature. The wireless interrogation of this type of RF sensor is based on the analysis of the signal backscattered by the sensor via antennas by a reading system. The split ring resonator configuration showed a good correlation between resonant frequency and bimetal deformation.

Keywords: Temperature sensor, Split ring resonator, thermal bimorph cantilever, electromagnetic transduction.