



**UNIVERSITE ABDELMALEK ESSAADI**  
**ECOLE NATIONALE DES SCIENCES**  
**APPLIQUEES**  
**TANGER**

Centre d'Etudes Doctorales: «Sciences et Techniques de l'Ingénieur»  
Formation Doctorale: «Sciences et Techniques de l'Ingénieur»

**THESE DE DOCTORAT**

Présentée  
Pour l'obtention du

**DOCTORAT EN SCIENCES ET TECHNIQUES DE L'INGENIEUR**

Par :

**ASMA BAKKALI**

Discipline : Electricité et Télécoms  
Spécialité : Réseaux de Capteurs

**Titre : Réseaux de Capteurs Passifs pour la Détection de la  
Température**

**Soutenue le 03 Avril 2014 devant le Jury :**

*Pr. Abderrahmane SBIHI*  
*Pr. José PELEGRI SEBASTIA*  
*Pr. Naoufal RAISSOUNI*  
*Pr. El Houssaine El RHALEB*  
*Pr. Mohammed Reda BRITEL*  
*Pr. Abdelouahid LYHYAOUI*  
*Dr. Youssef LAGHMICH*

*ENSA de Tanger*  
*Université Polytechnique de Valencia*  
*ENSA de Tétouan*  
*Faculté des Sciences de Rabat*  
*ENSA de Tanger*  
*ENSA de Tanger*  
*Université Hassan 1<sup>er</sup> Khouribga*

*Président*  
*Rapporteur*  
*Rapporteur*  
*Rapporteur*  
*Examineur*  
*Directeur de thèse*  
*Co-encadrant*



*Ce travail est dédié à celles et ceux qui m'ont donné le goût de  
la Recherche, et qui m'ont soutenu tout au long de mon parcours.  
Cette mention aurait été incomplète sans une mention pour ma famille,  
pour tout ce qu'elle représente pour moi. A la mémoire de Mohaned Bakkali,  
mon grand-père, qui n'aura malheureusement pas pu voir la fin de ce travail.*

*L'esprit qui invente est toujours  
mécontent de ses progrès,  
parce qu'il voit au-delà.*  
**Jean le Rond d'Alembert.**

*Allons jusqu'au bout de nos erreurs sinon  
nous ne saurons jamais pourquoi  
il ne fallait pas les commettre.*  
**Bernard Werbe.**

---

# REMERCIEMENTS

*Pour réaliser une thèse il faut au-delà de la motivation, le goût d'apprendre et de faire apprendre avec toute la rigueur que cela exige. Cette thèse est avant tout une aventure humaine faite de rencontres, de collaborations, d'échanges, de partages, de remises en question, d'apprentissages, d'enrichissements et d'épreuves. Ces travaux de thèse se sont déroulés au sein du Laboratoire des Technologies Innovantes (LTI) de l'École Nationale des Sciences Appliquées de Tanger (ENSAT), en partenariat avec le Laboratoire Investigación-Grupo Sensores y Magnetismo (GSyM) de l'Ecole Polytechnique Supérieure de Gandia (EPSG), Université Polytechnique de València.*

*Je souhaiterais dans un premier temps de remercier vivement Monsieur le Professeur Abdelouahid LYHYAOUI, le responsable du laboratoire LTI et directeur de ma thèse. Je tiens à le remercier tout particulièrement pour l'excellence de son accompagnement ainsi que pour la confiance et l'autonomie qu'il m'a accordées. Je lui suis reconnaissante pour sa disponibilité, pour mon intégration au niveau de la recherche et de l'enseignement et pour ses conseils tant sur le plan technique que humain aux cours de ces années de thèse. Je le remercie également pour le temps qu'il a passé à la relecture de mon manuscrit de thèse, avec les corrections et les suggestions pertinentes qui ont suivi.*

*Je voudrais également témoigner ma reconnaissance à Monsieur le Professeur Youssef LAGHMICH, mon Co-directeur de thèse et professeur à l'université Hassan 1<sup>er</sup> de Khouribga, pour sa disponibilité, la manière avec laquelle il a su me guider dans mes recherches et son soutien durant ces années de travail. Je le remercie pour ses grandes compétences techniques et ses qualités humaines que j'ai appréciées aussi bien dans les moments de réussites que dans les périodes de doutes. L'appui sans réserve qu'il m'a apporté fut déterminant dans la progression de ces travaux de thèse.*

*Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Monsieur le Professeur José PELEGRI SEBASTIA, le responsable du laboratoire GSyM et mon encadrant à l'EPSG, pour son dévouement, ses conseils éclairés, et son suivi universitaire. Malgré ses lourdes responsabilités, il a su répondre à toutes mes sollicitations, l'aide et la confiance qu'il a su m'accorder contribuent largement à l'avancement de mes travaux.*

*Je tiens à remercier grandement l'aide et la collaboration de Monsieur le Professeur Mohammed Reda BRITEL pour ses conseils, sa contribution et l'intérêt qu'il a manifesté pour ce travail, j'ai beaucoup apprécié sa participation.*

*Ces travaux ont été réalisés en coopération avec l'Université de Silésie que je remercie de m'avoir permis d'utiliser leurs échantillons du matériau PLZT. Je tiens plus particulièrement à exprimer ma*

*profonde gratitude à Monsieur Pawel WAWRZALA, pour sa disponibilité, sa gentillesse et pour nos échanges sur le matériau mentionné qui m'ont permis de mieux comprendre les caractéristiques de ce dernier et d'entamer les essais expérimentaux.*

*J'adresse aussi mes très sincères remerciements à Monsieur le directeur de l'Ecole Nationale des Sciences Appliquées de Tanger, le Professeur Abderrahmane SBIHI, de me faire l'honneur de s'intéresser à ce travail et d'avoir présidé le jury.*

*Un grand merci aux rapporteurs, qui ont consacré de leur temps pour lire ma thèse et l'évaluer. Leurs questions et remarques vont grandement participées à la finition de ce manuscrit.*

*Je remercie tous les membres du jury qui ont accepté d'évaluer mon travail.*

*Je remercie chaleureusement le personnel enseignant, technique et administratif de l'ENSA de Tanger, pour l'aide apportée lors de mon intégration dans le milieu de l'enseignement en tant que vacataire. Je tenais à accorder également ma reconnaissance à l'ensemble du personnel du laboratoire Investigación.*

*Je ne terminerai pas ces remerciements sans saluer tous mes collègues et amies que j'ai côtoyés quotidiennement et qui m'ont aidé en créant une ambiance agréable et amicale tout au long de ces années de thèse, avec qui je garde de très bons souvenirs : Ikram Chaïri, Amina El gonnouni, Najma Hamzaoui, Souad Alaoui, Ouafae Kaissi, Maha Akbib, Hayat Bendahri, Maruzza Cupane, Lisa Makena, Adnan Chaara, Abdellatif El Idrissi ...*

*Cette thèse, aboutissement de longues années d'études, je la dois exceptionnellement à mes parents qui m'ont toujours encouragé et donné de la force pour persévérer et pour prospérer dans la vie. Il m'est impossible de trouver des mots pour les remercier pour tout ce qu'ils ont fait... mes remerciements profonds particulièrement i Yamma ath Baba, i Jadi ath Hanna, i Amirino ath Rihame, i Fouzia ath Samira, i Mohamed ath Yassine.*

*Dans le cadre du programme des bourses de recherche initié par le Ministère de l'Education Nationale, de l'Enseignement Supérieur, de la Formation des Cadres et de la Recherche Scientifique, j'ai bénéficié d'une bourse d'excellence octroyée par le Centre National pour la Recherche Scientifique et Technique à qui j'exprime profondément ma reconnaissance pour son soutien financier.*

*Enfin, je tiens à remercier toutes les personnes que je n'aurais pas encore citées ici, qui ont contribué de près ou de loin à cette aventure scientifique et humaine représentée par cette thèse.*

---

# TABLE DES MATIERES

---

<b>Remerciements</b> .....	5
<b>Introduction générale</b> .....	11
<b>Chapitre I : Introduction aux réseaux de capteurs sans fil et techniques de conservation d'énergie</b>	
I.    Introduction.....	22
II.   Réseaux de capteurs sans fil .....	22
1.  Architecture d'un réseau de capteurs.....	22
2.  Capteurs sans fil actifs .....	24
3.  Caractéristiques métrologiques d'un capteur.....	25
4.  Champs d'applications des réseaux de capteurs sans fil .....	27
III.  Techniques de conservation d'énergie dans un réseau de capteurs .....	30
1.  Notion de durée de vie d'un réseau de capteurs.....	31
2.  Technique orientée données .....	32
3.  Technique de mobilité .....	32
4.  Technique du réveil cyclique .....	33
IV.  Capteurs sans fil passifs .....	34
1.  Capteurs à identification par radio fréquence .....	34
2.  Capteurs à ondes acoustiques de surface .....	36
3.  Capteurs à transduction électromagnétique .....	38
V.   Conclusion.....	39
VI.  Références.....	41
<b>Chapitre II : Capacité planaire pour la mesure sans fil de la température</b>	
I.   Introduction.....	50
II.  Conception du transducteur passif et sans fil.....	50

1. Principe de fonctionnement du capteur .....	50
2. Caractéristiques de la capacité.....	52
3. Conception du filtre passif.....	54
4. Méthode d'interrogation .....	54
III. Simulations de la structure complète .....	55
IV. Applications du capteur proposé.....	56
V. Conclusion.....	58
VI. Références .....	59

### **Chapitre III : Architecture du capteur à modes de galerie et procédé de mesure de la température**

I. Introduction .....	63
II. Conception du capteur de température passif et sans fil.....	63
1. Filtre à base d'un résonateur diélectrique à modes de galerie .....	65
1.1. Présentation des modes de galerie .....	65
1.2. Avantage des modes de galerie pour la détection de température.....	66
2. Capteur à base de modes de galerie résonant en bande millimétrique .....	67
3. Etude des paramètres géométriques du capteur.....	68
4. Méthode d'interrogation du capteur .....	69
III. Résultats de simulation du capteur complet.....	72
IV. Application du capteur pour la détection d'incendie marine.....	77
V. Conclusion.....	79
VI. Références .....	81

### **Chapitre IV : Caractérisations, performances et limitations des capteurs développés**

I. Introduction .....	86
II. Etude caractéristique du capteur RLC .....	86
1. Introduction.....	86
2. Influence de l'inductance L2.....	87
3. Influence de la capacité C2 .....	89
4. Influence de l'inductance L1 .....	90
5. Influence de la capacité C3 .....	91

6. Conclusion .....	93
III. Etude caractéristique du capteur WGM.....	93
1. Introduction.....	93
2. Influence des paramètres géométriques .....	94
2.1. Influence de l'épaisseur du support .....	94
2.2. Influence de la hauteur du résonateur diélectrique .....	97
2.3. Influence du rayon du résonateur diélectrique et du matériau sensible .....	99
3. Conclusion .....	100
IV. Conclusion.....	101

## **Chapitre V : Système de récupération d'énergie électromagnétique pour un réseau de capteurs autonome**

I. Introduction .....	106
1. Réseaux de capteurs autonomes .....	106
2. Sources ambiantes d'énergie .....	107
II. Système de récupération de l'énergie électromagnétique.....	110
1. Principe de la récupération des radiofréquences .....	110
1.1. Forme générale d'un circuit rectenna .....	110
1.2. Antenne de réception .....	112
1.3. Circuit d'adaptation .....	113
1.4. Convertisseur RF-DC .....	114
2. Applications de la récupération d'énergie radiofréquences .....	116
III. Conception et simulation d'une antenne dédiée à la récolte de l'énergie radiofréquence.....	118
1. Structure proposée .....	118
2. Résultats de simulations et validation des performances .....	120
IV. Conclusion et perspectives d'optimisation .....	123
V. Références .....	125

## **Chapitre VI : Conclusion générale et perspectives du travail de thèse**

I. Conclusion générale .....	132
1. Capteur RLC .....	133
2. Capteur WGM .....	134

II. Perspectives et Future Work .....	135
<b>RESUME</b> .....	138
<b>SUMMARY</b> .....	139
<b>LISTE DES PUBLICATIONS</b> .....	140

---

## INTRODUCTION GENERALE

---



Pour de nombreuses applications scientifiques, industrielles et même grand public, le besoin d'observer et éventuellement de surveiller des phénomènes physiques est essentiel. Des capteurs sont donc délégués pour l'acquisition de l'information sur les phénomènes observés et l'exécution des traitements qui s'y attachent. L'utilisation de ces dispositifs ne constitue pas une nouveauté en soi et de nombreux domaines en font usages [1, 2]. Cependant, ce qui est innovant, c'est leur perfectionnement constant et leur miniaturisation grandissante [3]. Ainsi, grâce aux avancées technologiques et techniques, ces capteurs ont réussi à affranchir plusieurs problématiques qui limitaient considérablement leur déploiement dans un réseau constitué d'un nombre de nœuds collaboratifs [4].

De toute évidence, qu'il s'agit de détecter un mouvement, d'identifier un gaz ou encore de mesurer une température, les capteurs jouent un rôle stratégique dans notre vie quotidienne pour des applications d'analyse, de surveillance et de diagnostic [5, 6, 7]. Avec l'évolution de la technologie et les préoccupations actuelles de protection de l'environnement et des personnes, le développement de ces dispositifs connaît une expansion marquante, pour transformer des phénomènes chimiques, mécaniques et thermiques en une grandeur mesurable; signal électrique. A l'heure actuelle, nous assistons à l'explosion du marché des capteurs et les champs de leurs applications s'élargissent en parallèle avec les progrès qui se réalisent dans les domaines de l'électronique et des technologies de communication sans fil [8].

La détection de la température fait désormais partie des besoins les plus attendus, vue qu'elle est généralement mal maîtrisée à faible coût [9]. Les capteurs de température ont été un des premiers champs d'application des microsystèmes et ils représentent aujourd'hui une part très importante de ce marché suite à la demande croissante qui se manifeste dans les domaines grand public et des applications domestiques, mais également dans la production, l'aéronautique et la santé [10, 11]. Les caractéristiques principales demandées actuellement à ces composants sont le plus souvent d'être miniatures, performants, économiques et intégrables dans des systèmes électroniques complexes. Relier donc la détection de la température aux hyperfréquences est un enjeu important pour de nombreuses applications et plusieurs secteurs économiques sont concernés:

- Sécurité industrielle: Exigences de traçabilité et de sécurité sanitaire font de la mesure de température un élément incontournable des processus de fabrication industrielle.

- Suivi et contrôle de l'environnement: Évaluation des risques d'incendies, traitement et valorisation des déchets ménagers et industriels.
- Sécurité domestique: Les besoins en mesure de la température s'accroissent de plus en plus dans notre vie quotidienne afin d'améliorer la sécurité de l'habitation.

Généralement, ces capteurs sont déployés pour la détection d'éventuels problèmes environnementaux dans une optique d'intervenir à temps afin d'empêcher que d'éventuels incendie, volcan, inondation ou tsunami ne se produisent [12]. Grâce à ce potentiel riche en applications, ces systèmes de détection ont su attirer de grandes entreprises mondiales (Intel, IBM, Sun, Philips, etc.).

Malheureusement, ces dispositifs ne sont pas parfaits, à cause de leur durée de vie limitée ainsi que leur déploiement dans des zones difficiles. Force est de constater que les capteurs commercialisés aujourd'hui présentent des performances mitigées avec des conditions de fonctionnement limitées. Ces imperfections sont d'ailleurs le moteur de recherche de nombreux travaux de recherche, notamment pour le développement de nouveaux matériaux de détection mais aussi de nouveaux transducteurs. Les préoccupations principales des travaux proposés sur ce sujet dans la littérature [13, 14, 15, 16] était la réduction de la consommation énergétique, ou du moins sa rationalisation pour les réseaux de capteurs. Ainsi, la communauté scientifique en charge du développement des capteurs de température communicants sans fil doit réussir à associer les compétences issues de différents domaines tels que : la microélectronique, les télécoms et les matériaux. Les principaux verrous de cette technologie résident dans la conception et la réalisation de micro-capteurs autonomes (faible consommation) [17], dans l'élaboration des matériaux sensibles au changement de la température [18], et enfin dans les techniques de mesure [19], d'interrogation ou d'identification [20]. La mise en œuvre de ces dispositifs exige donc, des progrès technologiques qui nécessitent l'exploitation des connaissances issues de plusieurs domaines.

En vue de remédier aux problèmes de la consommation d'énergie, d'assurer d'excellentes performances en termes d'intégration, de linéarité et de faible coût, notre équipe de recherche s'est intéressée à de nouveaux modes de transduction hyperfréquence qui s'affranchissent complètement des besoins énergétiques embarqués et qui permettent d'envisager une interrogation sur des distances de plusieurs dizaines de mètres. A ce titre, nous proposons des procédés permettant d'obtenir une réduction cruciale au niveau de la consommation énergétique dans un réseau de capteurs de température. Notre première approche vise à

introduire une capacité variable en fonction des changements de température dans un filtre passe bande pour traduire ces variations de température en un signal électrique. Une autre approche prometteuse consiste à exploiter un matériau sensible à la variation de la température, et l'intégrer par la suite dans une structure composée d'un résonateur diélectrique fonctionnel en modes de galerie et excité par deux lignes coplanaires.

Notre sujet se situe bien évidemment dans le contexte des capteurs passifs sans fil, et notre étude porte sur la conception et le développement d'une nouvelle génération de capteurs de température, passifs et communicants sans fil, présentant de grandes performances. Le principe de cette transduction est basé sur la modification du signal électrique du capteur passif en présence d'une variation de température et qui sera identifié et mesuré par un système de communication. Néanmoins, la conception d'un capteur fait appel en général à plusieurs disciplines : mécanique, physique, électronique, chimie, etc. Cette recherche ne peut donc se concevoir que de manière collaborative avec de nombreux partenaires au sein du laboratoire mais également avec d'autres laboratoires extérieurs plus spécialisés. Par la suite, deux types de capteurs ont été conçus, simulés et caractérisés. Il nous a donc semblé judicieux, avant d'exposer les technologies de capteurs passifs et de présenter nos travaux, de nous placer dans une perspective plus générale en traitant les capteurs conventionnels existants. Les problématiques et les limites d'utilisation de ces systèmes de détection apparaîtront ainsi clairement et laissant place aux nouveaux capteurs passifs.

### **Plan de la thèse**

Cette thèse est organisée en six chapitres répartis en deux parties principales : une partie état de l'art et une partie contribution. La première partie rapporte principalement les caractéristiques des systèmes de détections actuels, passifs et sans fil. Elle présente une vue générale sur les technologies employées pour ce type de capteurs avant d'exposer les limites de chaque système de mesure. Ainsi, le chapitre I est dédié aux capteurs passifs existants justifiant l'orientation des travaux présentés. Nous synthétiserons les mécanismes mis en jeu dans la détection de la température avec les capteurs étudiés. L'état des connaissances sur les différentes voies de recherche pour l'amélioration de leurs performances sera ensuite dressé avant de développer notre sujet d'étude.

La partie contribution expose nos propositions pour la mise en œuvre de deux plateformes passives de détection de température. Ainsi, dans le chapitre II nous présentons la conception du premier capteur de température sans batterie embarquée. Nous sélectionnerons notamment

le composant sensible utilisé en tant qu'élément de reconnaissance. Ce capteur est basé sur la capacité sensible qui présente le paramètre pivot d'un circuit passif RLC. Une étude d'optimisation géométrique à l'aide d'un logiciel de simulation performant est ensuite élaborée afin d'aboutir à un choix technologique. Le troisième chapitre est dédié à la conception d'une génération de capteurs de température basée sur la transduction électromagnétique. Des simulations sont présentées, en utilisant des outils de simulations performants, pour démontrer les potentialités de cette approche. Le quatrième chapitre est consacré à une évaluation du comportement et des paramètres des capteurs proposés. La performance de ces capteurs a été étudiée en termes de différentes caractéristiques de ces systèmes de détection.

Le chapitre V de cette thèse expose un autre aspect de l'autonomie énergétique dans un réseau de capteurs, et il est également divisé en deux parties. La première est consacrée à une synthèse portant sur le domaine de la récupération d'énergie. Elle présente le résultat de quelques travaux menés dans le domaine du transfert d'énergie sans fil, notamment les techniques de récupération d'énergie électromagnétique. Des exemples d'applications directement alimentées à partir d'une énergie RF récupérée seront présentés et discutés à la fin de cette partie. La deuxième partie de ce chapitre traite spécifiquement une antenne de réception du système de récupération d'énergie RF. Ainsi notre travail actuel vise à élaborer une géométrie d'antenne performante que nous dimensionnerons et optimiserons ensuite par des simulations sous HFSS.

Le dernier chapitre de ce manuscrit dresse un bilan des travaux menés, les limites d'utilisation et les pistes d'améliorations envisagées. Quelques autres applications environnementales et industrielles viendront ouvrir de nouvelles perspectives d'utilisation de nos capteurs passifs.

## Références

- [1] L. Ruiz-Garcia, L. Lunadei, P. Barreiro and I. Robla, 'A Review of Wireless Sensor Technologies and Applications in Agriculture and Food Industry: State of the Art and Current Trends', *Sensors Journal*, Vol. 9, pp. 4728-4750, 2009.
- [2] P. Ferrari, A. Flammini, D. Marioli, E. Sisinni and A. Taroni, 'Wired and Wireless Sensor Networks for Industrial Applications', *Microelectronics Journal*, Vol. 40, N. 9, pp. 1322-1336, 2009.
- [3] C.Y. Chong and S.P. Kumar, 'Sensor Networks: Evolution, Opportunities, and Challenges' *IEEE*, Vol.91, Issue 8, 2003.
- [4] M. Tubasihata and S. Madria, 'Sensor Networks: An Overview', *IEEE Potentials*, Vol. 22, Issue 2, pp.20-23, 2003.
- [5] X. Zhang, H. Jiang, L. Zhang, C. Zhang, Z. Wang and X. Chen, 'An Energy Efficient ASIC for Wireless Body Sensor Networks in Medical Applications', *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, Vol. 4, No. 1, pp. 11-18, 2010.
- [6] S. Xuesong, C. Wu and L. Ming, 'Wireless Sensor Networks for Resources Tracking at Building Construction Site', *IEEE Tsinghua Science and Technology*, Vol. 13, pp. 78-83, October 2008.
- [7] E. Ergen and B. Akinci, 'An Overview of Approaches for Utilizing RFID in Construction Industry', *IEEE RFID Eurasia 1<sup>st</sup> Annual*, pp. 1-5, 2007.
- [8] 'Sensors Markets 2016: Analyzes and Forecasts the Development of 48 types of Sensors', *Intechno Consulting*, Basle (Switzerland), 2012-2013.
- [9] B. Baker, 'Temperature Sensing Technologies', *Microchip Technology Inc.*
- [10] E. Sisinni, P. Archetti, M. Manenti and E. Piana, 'High Availability Wireless Temperature Sensors for Harsh Environments', *IEEE Sensors Applications Symposium (SAS)*, 2012.
- [11] J.G Otto and Y. Tao, 'Ceramic Temperature Sensors for Harsh Environments', *IEEE Sensors Journal*, Vol.5, Issue 5, pp.833-838, 2005.
- [12] N. El-Bendary, M. Mostafa, M. Fouad, R. A. Ramadan, S. Banerjee, and A. E. Hassanien, 'Smart Environmental Monitoring Using Wireless Sensor Networks', *Wireless Sensor Networks*, pp.734-752, Cairo University, 2013.
- [13] D. Wei, Y. Jin, S. Vural and K. Moessner, 'An Energy-Efficient Clustering Solution for Wireless Sensor Network', *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol. 10, No. 11, November 2011.
- [14] Z. Watral and A. Michalski, 'Selected Problems of Power Sources for Wireless Sensors Networks', *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, Vol.16, Issue 1, 2013.

- [15] Z. Shelby, C. Pomalaza-Raez and J. Haapola, 'Energy Optimization in Multihop Wireless embedded and Sensor Networks', 15<sup>th</sup> IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2004.
- [16] M. M. Jatlaoui, F. Chebila, P. Pons and H. Aubert, 'Wireless Interrogation Techniques for a Passive Pressure Micro-sensor using an EM Transducer', IEEE European Microwave Conference, 2009.
- [17] Y. Wang, Y. Jia, Q. Chen and W. Yanyun, 'A Passive Wireless Temperature Sensor for Harsh Environment Applications', Sensors Journal, 2008.
- [18] A. Traille, S. Bouaziz, S. Pinon, P. Pons, H. Aubert, A. Boukabache and M. Tentzeris, 'A Wireless Passive RCS-based Temperature Sensor using Liquid Metal and Microfluidics Technologies', Manchester Central, Manchester, UK, European Microwave Week, 2011.
- [19] E. Sardini and M. Serpelloni, 'Passive and Self-Powered Autonomous Sensors for Remote Measurements', Sensors Journal, Vol.9, Issue 2, 2009.
- [20] S. Bouaziz, F. Chebila, A. Traille, P. Pons, H. Aubert and M. Tentzeris, 'Novel Microfluidic Structures for Wireless Passive Temperature Telemetry Medical Systems Using Radar Interrogation Techniques in Ka-Band', IEEE Antennas And Wireless Propagation Letters, Vol. 11, 2012.

# *CHAPITRE I*

---

## INTRODUCTION AUX RESEAUX DE CAPTEURS SANS FIL & TECHNIQUES DE CONSERVATION D'ENERGIE

---



---

## TABLE DES MATIERES

---

I.	Introduction.....	22
II.	Réseaux de capteurs sans fil .....	22
	1. Architecture d'un réseau de capteurs.....	22
	2. Capteurs sans fil actifs .....	24
	3. Caractéristiques métrologiques d'un capteur.....	25
	4. Champs d'applications des réseaux de capteurs sans fil .....	27
III.	Techniques de conservation d'énergie dans un réseau de capteurs..	30
	1. Notion de durée de vie d'un réseau de capteurs .....	31
	2. Technique orientée données .....	32
	3. Technique de mobilité .....	32
	4. Technique du réveil cyclique .....	33
IV.	Capteurs sans fil passifs .....	34
	1. Capteurs à identification par radio fréquence .....	34
	2. Capteurs à ondes acoustiques de surface .....	36
	3. Capteurs à transduction électromagnétique .....	38
V.	Conclusion.....	39
VI.	Références .....	41

---

## **I. Introduction**

Avant l'apparition des réseaux de capteurs sans fil, la récupération des données environnementales se faisait par l'intermédiaire du câblage toujours assez coûteux et encombrant. A l'heure actuelle, ces réseaux facilitent le suivi et le contrôle à distance de l'environnement physique avec une précision considérable [1]. De toute évidence, un réseau de capteurs sans fil est un réseau ad hoc, donc un ensemble de nœuds reliés et basés sur des protocoles pour se communiquer. Ces nœuds sont des capteurs capables de récolter et de transmettre des données environnementales [2].

Quoique le développement de ces réseaux ait été à l'origine stimulé par les applications militaires, actuellement il est motivé par des applications civiles, étant donné le besoin de contrôler et d'observer les phénomènes physiques pour de nombreuses applications scientifiques et industrielles [3, 4]. Ces dispositifs sont donc omniprésents dans la vie quotidienne et tendent à être de plus en plus puissants, intelligents, compacts et de moins en moins onéreux. En parallèle avec ce développement, nombreuses problématiques de recherche ont été apparues. Etant donné que les capteurs sont des dispositifs de détection et d'acquisition d'informations, ils sont contraints en énergie [5]. Dans cette optique, les capteurs doivent surveiller parfaitement l'environnement où ils sont déployés tout en économisant leur énergie afin de contourner cette limitation [6].

Les capteurs de température sans fil semblent atteindre les limites de leurs performances sur les plans : énergie, encombrement, technique d'analyse et d'interrogation à distance pour développer des réseaux de capteurs distribués. Le besoin de réalisation des capteurs à faible consommation d'énergie se présente, et nous avons fait ainsi appel à des démarches de conception des nœuds capteurs sans batteries embarquées. Ce chapitre, exclusivement bibliographique va nous permettre également d'identifier la topologie la plus intéressante pour notre application.

## **II. Réseaux de capteurs sans fil**

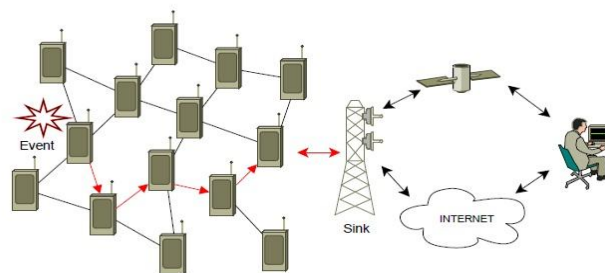
### **1. Architecture d'un réseau de capteurs**

Les réseaux de capteurs sans fil (Wireless Sensor Networks; WSN) sont considérés comme un type spécial de réseaux ad hoc, composés d'un grand nombre de capteurs matériellement petits, placés généralement près des objets auxquels ils s'intéressent dans les environnements où ils sont déployés [7]. Ces capteurs sont capables de récolter, traiter et acheminer les

données environnementales de la région surveillée d'une manière autonome, vers des stations de collecte appelées nœuds puits ou stations de base.

Pour qu'un tel réseau reste autonome pendant une durée de quelques mois à quelques années sans intervention humaine, la consommation d'énergie est la problématique la plus critique. Celle-ci n'est pas un grand problème pour les dispositifs sans fil traditionnels, car on peut toujours recharger les batteries comme le cas des téléphones ou les ordinateurs portables. Toutefois, dans un réseau de capteurs, il est difficile voire impossible dans certaines applications de changer ou de charger la batterie. Imaginons un réseau de capteurs déployé au pôle Nord pour surveiller la variation de la température, par conséquent on ne peut pas envoyer quelqu'un toutes les semaines pour changer la batterie. Ainsi, le réseau de capteurs doit avoir une durée de vie suffisamment longue pour répondre aux exigences de son application. La Figure 1 montre l'architecture d'un réseau de capteurs constitué généralement de nombreux nœuds répartis dans une zone particulière [8]. Ces nœuds sont reliés à une ou plusieurs passerelles qui permettent l'interconnexion avec d'autres réseaux (Internet, satellite, etc.) ainsi que la récupération des données.

En particulier, un capteur est un composant intégré qui présente la propriété de fournir des informations spécifiques, grâce à des éléments de reconnaissance en contact spatial direct avec le composé à détecter [9]. Ce système de détection et de saisie d'informations est le premier maillon de toute chaîne de mesure, système d'asservissement et de dispositif de contrôle. Le rôle propre d'un capteur est de détecter un événement (changement de température, des vibrations, des gaz, etc.) et d'en avertir par la suite la station de base. En d'autres termes, ce dispositif doit être capable de réaliser la récolte des données relatives à son environnement, de leurs traitements, ensuite, si nécessaire, de la communication avec les autres nœuds du réseau à travers un médium sans fil.



**Fig.1 : Architecture d'un réseau de capteurs.**

Différents types de capteurs existent, par contre leur fonctionnement reste pratiquement le même [10]. Par ailleurs, un nœud-capteur est composé de plusieurs unités ou modules correspondants chacun à une tâche particulière: acquisition, traitement ou transmission de données, il comprend également une source d'énergie [11].

- *Unité d'acquisition de données* : le principe de fonctionnement des détecteurs est souvent le même: il s'agit de répondre à une variation des conditions d'environnement par une variation de certaines caractéristiques électriques. Les variations de tension sont ensuite converties par un Convertisseur Analogique-Numérique afin de pouvoir être traitées par l'unité de traitement.
- *Unité de traitement de données* : les microcontrôleurs utilisés dans le cadre de réseaux de capteurs sont à faible consommation d'énergie. Leurs fréquences sont assez faibles, moins de 10 MHz pour une consommation de l'ordre de 1 mW. Outre le traitement des données, le microcontrôleur commande également toutes les autres unités notamment le système de transmission.
- *Unité de transmission de données* : les composants utilisés pour réaliser la transmission sont des composants classiques. Ainsi on retrouve les mêmes problèmes que dans tous les réseaux sans fil ; la quantité d'énergie nécessaire à la transmission s'amplifie avec la distance. Pour augmenter ces distances tout en préservant l'énergie, le réseau utilise un routage multi-sauts.
- *Source d'énergie* : pour des réseaux de capteurs sans fil autonomes, l'alimentation est une composante cruciale. Il existe essentiellement deux aspects : premièrement, stocker l'énergie et la fournir sous la forme requise ; deuxièmement, tenter de reconstituer l'énergie consommée par un réapprovisionnement grâce à une source externe au nœud-capteur telles les cellules solaires. Le stockage de l'énergie se fait traditionnellement en utilisant les piles.

En adoptant une approche fondée sur la consommation énergétique, la présence d'un module d'émission ou une source d'alimentation énergétique embarquée, on peut classer tous les capteurs sans fil en deux types: actif et passif [12].

## **2. Capteurs sans fil actifs**

Le capteur sans fil est généralement considéré comme actif s'il nécessite une source d'énergie embarquée, muni d'un circuit électronique de traitement de signal ainsi qu'un module d'émission qui lui permet de communiquer avec le lecteur [13]. La source d'alimentation énergétique, généralement assurée par des batteries, permet la réalisation de la phase de

traitement au cours de laquelle le signal est filtré, amplifié et converti dans un format exploitable transmis en temps réel. La majeure partie de la consommation est liée au module de communication (dans le cas où la consommation du transducteur peut être négligée) [14].

Il est important de noter que plusieurs caractéristiques limitent l'autonomie de ce type de capteur. La distance d'interrogation et le débit d'information transmis en vis-à-vis de la quantité d'énergie consommée sont des paramètres clés dans la conception de ce type de systèmes [15]. Ceci met en évidence la complexité voire l'impossibilité d'interroger ces capteurs pour des distances supérieures à une centaine de mètres avec une durée de vie estimée de quelques années.

En revanche, les capteurs sans fils passifs ne sont pas munis d'un module d'émission. La plupart d'entre eux sont des dispositifs qui ne possèdent pas de source d'énergie embarquée et présentent l'avantage d'être facilement intégrables [16]. La transmission de l'information est alors assurée à travers l'interrogation du capteur par le lecteur. Ceci est obtenu en modulant la charge connectée à l'antenne du capteur [17]. Ce type de capteur est formé généralement d'une impédance dont l'un des paramètres déterminants est sensible au mesurande (la grandeur physique à mesurer) [18]. L'expression littérale d'une impédance est une fonction de sa géométrie et de ses dimensions d'une part et d'autre part des propriétés électriques des matériaux qui la constitue: résistivité, perméabilité magnétique, constante diélectrique [19]. Dans certain cas, les propriétés électriques des matériaux peuvent être sensibles à des grandeurs physiques variées: température, gaz, pression, humidité. Dans d'autre cas, l'impédance constituant un capteur peut être sensible à des changements des dimensions géométriques de sa structure: l'étirement d'un substrat souple, la déflexion d'une membrane, etc. Pour mesurer l'impédance d'un capteur passif, il est intégré dans un circuit électrique, et ce dernier conditionne et alimente le capteur [20]. Ce type de capteur présente une solution de mesure passive, de grande précision, miniature et à faible coût pour la mesure des grandeurs physiques à distance pour différentes applications.

### **3. Caractéristiques métrologiques d'un capteur**

La connaissance des performances d'un capteur est indispensable pour la compréhension du fonctionnement de ce dispositif de mesure ainsi que la connaissance de son domaine d'application. Dans la suite, nous allons présenter les définitions des caractéristiques les plus communes parues dans la littérature [21, 22].

### - Sensibilité

La sensibilité d'un capteur représente le rapport de la variation du signal de sortie à la variation du signal d'entrée (température dans le cas d'un capteur de température). Un capteur de température est dit donc sensible si une petite variation de température entraîne une importante variation du signal de sortie. L'équation 1 est couramment utilisée pour obtenir une valeur approchée de cette sensibilité.

$$S = \frac{\Delta_{\text{sortie}}}{\Delta_{\text{entrée}}} = \frac{\Delta F}{\Delta T} \quad (1)$$

Avec,

S : Sensibilité à la variation de la température

F : Réponse du capteur (Sortie du capteur : la fréquence)

T : Paramètre température à mesurer (Entrée du capteur : la température)

La sensibilité est principalement fonction de la température. Plus la valeur de la sensibilité  $S$  est importante plus le capteur réagit, et plus il est envisageable de mesurer de faibles variations. Dans le cas où la réponse d'un capteur est linéaire, la sensibilité est donc constante : une seule valeur de sensibilité est nécessaire, car la pente de la courbe caractéristique entrée/sortie du capteur sera constante.

### - Fidélité

La fidélité d'un capteur correspond à l'écart type d'un ensemble de mesures faites pour un mesurande donné. Plus l'écart type est élevé, moins le capteur est fidèle. En effet, ce paramètre exprime la qualité d'un capteur à fournir des indications identiques pour une même valeur de la grandeur à mesurer. Ceci reflète sa capacité à donner des mesures exactes sans erreurs accidentelles.

### - Stabilité

Un capteur est dit stable quand, pour des conditions fixes, il fournit une valeur de ligne de base constante. Cette caractéristique qualifie la capacité d'un capteur à conserver ses performances pendant une longue durée.

### - Précision

La précision est un des paramètres les plus importants d'un système de mesure. Elle quantifie l'erreur maximale de mesure, à savoir la différence maximale entre ce qu'indique l'affichage et la valeur vraie du paramètre mesuré, c'est-à-dire qu'elle exprime la qualité qui caractérise

l'aptitude d'un capteur à donner des indications proches de la valeur vraie de la grandeur mesurée. En d'autres termes, C'est le paramètre qui définit la plus petite variation de mesurande que peut détecter le capteur. On exprime très souvent la précision en pourcentage.

#### - Temps de réponse - Rapidité

La rapidité indique l'aptitude du capteur à suivre dans le temps les variations de la grandeur physique à mesurer. Autrement, c'est le temps nécessaire pour que la valeur de sortie soit plus ou moins stable lorsque les conditions de mesures varient brutalement d'un état à un autre. Il s'agit donc de quantifier le temps que met le capteur à réagir à l'évènement du changement de température par exemple, et le temps mis pour revenir à la configuration initiale une fois l'évènement disparu. Ainsi, il faut tenir compte du temps de réponse, bien qu'il soit fréquemment délicat à estimer avec précision. Ce temps est spécifiquement déterminé par le pourcentage et les valeurs les plus utilisées sont les temps de réponse à 2% et à 5%.

La rapidité est caractérisée donc par le temps que met le capteur à réagir à une variation brusque de la mesurande. On peut la chiffrer de plusieurs manières :

- Bande passante du capteur (à -3 dB par exemple).
- Fréquence de résonance du capteur.
- Temps de réponse à un échelon du mesurande.

De toute évidence, les caractéristiques métrologiques permettent d'évaluer les dispositifs de détection, et présentent une référence à toute étude de caractérisation d'un capteur. En conclusion, un capteur est considéré performant s'il répond positivement à ces paramètres.

## **4. Champs d'applications des réseaux de capteurs sans fil**

La diminution du coût, la miniaturisation et l'évolution des supports de communication sans fil ont élargi le champ d'applications des réseaux de capteurs, qui font toujours l'objet d'une recherche et d'un développement actifs universitaires et industriels. Ces dispositifs permettent de collecter et de traiter des informations complexes provenant de l'environnement (la météorologie, l'acidification des océans, la dispersion de polluants, localisation des départs de feu en forêt, etc.). Les réseaux de capteurs promettent donc de révolutionner notre vie, notamment à travers la détection et la surveillance des désastres, le contrôle de l'environnement et la cartographie de la biodiversité, le bâtiment intelligent et l'agriculture de

précision, la surveillance et la maintenance préventive des machines, la médecine et la santé, la logistique et la télématique.

Nous décrivons ci-après brièvement quelques applications dans certains domaines afin d'illustrer cette étendue.

#### - **Applications environnementales**

Pour améliorer la connaissance de l'environnement et surtout signaler d'éventuels problèmes y afférent (incendie, pollution, épidémies), il est possible de répartir dans la zone considérée, des thermo-capteurs formant un réseau de capteurs sans fil et offrant ainsi la possibilité d'une surveillance et une meilleure efficacité des moyens de lutte [23, 24]. De la même manière, des capteurs appropriés peuvent être dispersés au-dessus d'emplacements industriels, de centrales nucléaires et puits pétroliers, pour détecter et contrôler des fuites de produits toxiques (gaz, produits chimiques, éléments radioactifs, pétrole, etc.). Ces installations permettraient d'une part, de donner l'alerte en un temps record et d'autre part de suivre l'évolution de la catastrophe pour permettre une intervention plus efficace. D'autres capteurs peuvent également être répandus ou fixés sur le corps des animaux afin de surveiller les forêts, la variation des habitats naturels, les déplacements, l'activité et la santé des groupes animaliers, ce qui permet d'observer la biodiversité sans aucune intervention locale et aucune perturbation de l'environnement naturel des espèces [25, 26]. Les éventuelles conséquences de la dispersion en masse des micro-capteurs dans l'environnement ont soulevé plusieurs inquiétudes, notamment parce que ceux-ci sont généralement dotés d'une micro-batterie contenant des métaux nocifs.

#### - **Applications militaires**

Comme beaucoup d'autres technologies de l'information, les réseaux de capteurs sans fil proviennent principalement de la recherche militaire. Des réseaux de capteurs autonomes sont envisagés comme l'ingrédient essentiel dans cette lancée vers des systèmes de guerre centrés sur les réseaux [27]. Ils peuvent être rapidement déployés et utilisés pour la surveillance des champs de bataille afin de fournir des renseignements concernant l'emplacement, le nombre, le mouvement, et l'identité des soldats et des véhicules, ou bien encore pour la détection des agents chimiques, biologiques et nucléaires. En effet, un réseau de capteurs déployé sur un secteur stratégique ou difficile d'accès, permet par exemple d'y surveiller tous les mouvements (amis ou ennemis) ou d'analyser le terrain avant d'y envoyer des troupes (détection d'agents chimiques, biologiques ou de radiations) [28]. Ces utilisations militaires, comme dans le cas

de beaucoup de technologies, ont été un moteur initial pour leur développement du fait de leur déploiement rapide, leur coût réduit, leur auto-organisation et leur tolérance aux pannes.

#### - **Applications commerciales**

On pourrait imaginer devoir stocker des subsistances nécessitant un certain taux d'humidité et une certaine température. Dans ce type d'application, le réseau doit pouvoir collecter ces différentes informations et alerter en temps réel si les seuils critiques sont dépassés, ce qui permet un meilleur processus de stockage et de livraison (pour garantir la chaîne du froid en particulier) [29, 30]. En plus des applications visant à surveiller la température et l'humidité, les réseaux de capteurs sans fil permettent d'autres applications telles que le suivi des paquets et leur orientation. Grâce à ces réseaux, les entreprises pourraient offrir une meilleure qualité de service tout en réduisant leurs coûts. Les produits en fin de vie pourraient être mieux démontés et recyclés ou réutilisés si les micro-capteurs en garantissent le bon état. Des applications peuvent avoir un intérêt économique, en optimisant les systèmes de chauffage et de climatisation, en régulant l'éclairage [31]. Utilisées à grande échelle, de telles applications permettraient de réduire la demande mondiale en énergie, la consommation des matières premières et diminuer la pollution. Le monde économique pourrait ainsi diminuer ses impacts environnementaux sur le climat.

#### - **Applications médicales**

Des applications importantes dans la surveillance des personnes souffrant de certaines maladies (Alzheimer, perte de mémoire, etc.) sont aussi un moteur important pour le développement de cette technologie. Les applications médicales des réseaux de capteurs sans fil ne se limitent pas à la surveillance des personnes mais elles peuvent aussi couvrir la surveillance des fonctions vitales d'un organisme vivant en implantant les micro-capteurs dans le corps [32, 33]. Des micro-caméras permettant, par exemple, de transmettre des images de l'intérieur d'un corps humain, après avoir été avalées, existent déjà. D'autres applications peuvent être envisagées pour remédier à certains organes défectueux ou les remplacer (analyseur de taux de sucre dans le sang, rétine artificielle pour corriger la vue, détection précoce de cancers). Des réseaux de capteurs permettraient théoriquement une surveillance permanente des patients et une possibilité de collecter des informations physiologiques de meilleure qualité, facilitant ainsi le diagnostic de quelques maladies.

#### - **Applications à la sécurité**

Les réseaux de capteurs peuvent être utilisés pour assurer la sécurité des voyageurs, empruntant des avions, navires, automobiles, métros, etc., en suivant en temps réel l'état de leurs structures, de même que l'état des réseaux de circulation ou de distribution de l'énergie [34]. Des capteurs peuvent être aussi intégrés dans les murs ou dans le béton, sans alimentation électrique ni connexions filaires, pour surveiller la dégradation de la structure d'un bâtiment, d'une route, d'un quai, d'une voie ferrée, ou d'un pont. Dans ce contexte des mesures discontinues et périodiques permettent des durées de vie importantes à ces réseaux. En plaçant à différents points stratégiques des capteurs, on peut ainsi prévenir des cambriolages ou des passages de gibier sur une voie de chemin de fer par exemple, sans avoir à recourir à de coûteux dispositifs de surveillance vidéo [35]. Selon leurs promoteurs, ces réseaux de capteurs pourraient diminuer certaines failles de systèmes de sécurité et mécanismes de sécurisation, tout en diminuant leur coût. D'autres craignent aussi des dérives sécuritaires ou totalitaires si l'usage de ces réseaux n'est pas assujéti à des garanties éthiques sérieuses.

#### **- Applications au contrôle de structures**

Il est possible d'inclure sur les parois des barrages des capteurs qui permettent de calculer en temps réel la pression exercée par l'eau afin d'en réguler le niveau si les limites sont atteintes. La détection rapide d'infiltration d'eau peut servir à renforcer le barrage en conséquence. Cette technique peut aussi être utilisée pour d'autres constructions tels que ponts, routes de montagnes, bâtiments et autres ouvrages d'art [36, 37]. Dans l'aéronautique, la connaissance de la répartition de la pression ainsi que la température sur les ailes des avions durant les vols est indispensable autant dans le choix des matériaux de fabrication que pour la certification d'un appareil avant sa commercialisation. Un tel test demande de répartir plus de 200 capteurs par plan d'ailes, à une fréquence d'échantillonnage importante, ce qui demande des kilomètres de câbles posant alors des problèmes d'aérodynamique et rendant l'utilisation des réseaux de capteurs sans fil quasiment incontournable.

Dans la partie suivante de ce chapitre nous dresserons un panorama des techniques de conservation d'énergie proposées dans la littérature dans le but de prolonger la durée de vie des réseaux de capteurs.

### **III. Techniques de conservation d'énergie dans un réseau de capteurs**

## 1. Notion de durée de vie d'un réseau de capteurs

Les réseaux de capteurs sans fil sont souvent caractérisés par un déploiement dense et à grande échelle dans des environnements limités en terme de ressources. Les limites imposées sont la limitation des capacités de traitement, de stockage et surtout d'énergie puisqu'ils sont généralement alimentés par des batteries. Recharger un réseau de capteurs est parfois impossible en raison de l'emplacement de ces nœuds, mais le plus souvent pour la simple raison que cette opération est pratiquement ou économiquement infaisable. Il est donc largement reconnu que la limitation énergétique est une question incontournable dans la conception des réseaux de capteurs sans fil, en raison des contraintes strictes qu'elle impose sur l'exploitation du réseau [38]. A ce titre, la consommation d'énergie des capteurs joue un rôle important dans la durée de vie du réseau et elle exprime le critère de performance prédominant dans ce domaine.

La définition de la durée de vie d'un capteur sans fil est simple et sans ambiguïté. Un nœud capteur est vivant tant qu'il peut fonctionner, par conséquent sa durée de vie est égale à celle de sa batterie. Donner une définition de la durée de vie du réseau de capteurs tout entier est moins évident [39]. Un réseau ne peut accomplir son objectif que tant qu'il est « en vie », mais pas au delà. La durée de vie prévue est critique dans tout déploiement de réseau de capteurs. Le but des scénarios applicatifs classiques consiste à déployer des nœuds dans un domaine sans surveillance pendant des mois ou des années. La vie d'un réseau de capteurs correspond à la période de temps durant laquelle le réseau peut, selon le cas : maintenir assez de connectivité, couvrir le domaine entier, ou garder le taux de perte d'information en dessous d'un certain niveau [40]. La vie du système est donc liée à la vie nodale, même si elle peut en différer. Tandis que la vie nodale correspond à la vie d'un des nœuds du réseau. Elle dépend essentiellement de deux facteurs : l'énergie consommée par un nœud en fonction du temps et la quantité d'énergie dont il dispose. Il est donc important de noter que la durée de vie du réseau est sans doute la métrique la plus importante dans l'évaluation des performances d'un réseau de capteurs [41, 42]. En effet, dans un environnement contraint, toute ressource limitée doit être prise en compte. Par conséquent, la durée de vie du réseau, comme mesure de la consommation d'énergie, occupe une place exceptionnelle puisqu'elle constitue la borne supérieure de l'utilité de ce réseau. Elle est également considérée comme un paramètre fondamental dans un contexte de disponibilité et de sécurité dans les réseaux de capteurs sans fil.

Maximiser ce paramètre revient à réduire la consommation énergétique des capteurs. En dépit des progrès qui ont été faits, la durée de vie de ces dispositifs à piles continue d'être un défi majeur et un facteur clé, exigeant davantage de recherches sur l'efficacité énergétique des plates formes et des protocoles de communication. De toute évidence, plus les durées de vie des capteurs sont longues, meilleur est le fonctionnement du réseau. Dans ce contexte, plusieurs travaux de recherche sont apparus avec le majeur objectif : optimiser la consommation énergétique des nœuds à travers l'utilisation de techniques de conservation innovantes afin d'améliorer les performances du réseau, notamment la maximisation de sa durée de vie. De façon générale, économiser l'énergie revient finalement à trouver le meilleur compromis entre les différentes activités consommatrices en énergie ainsi que l'application conjointe de différentes techniques.

## **2. Technique orientée données**

Les approches orientées données peuvent être utiles pour améliorer l'efficacité en énergie [43]. En effet, la détection affecte la consommation d'énergie de deux manières:

- Les échantillons inutiles: Un échantillonnage inutile implique une consommation d'énergie à son tour inutile.
- La consommation électrique du module de détection: Réduire la communication ne suffit pas lorsque le capteur est lui-même très consommateur.

Des techniques orientées données sont conçues pour réduire la quantité d'échantillonnage de données en garantissant un niveau de précision acceptable dans la détection pour une application visée. Réduire les données en termes de volume ou de nombre de paquets dans le réseau, peut avoir un impact majeur sur la consommation d'énergie due à la communication. Parmi les méthodes de réduction de données, nous trouvons le In-network processing qui consiste à réaliser de l'agrégation de données (par exemple, calculer la moyenne de certaines valeurs) au niveau des nœuds intermédiaires entre la source et la station de base [44]. Ainsi, la quantité de données est réduite tout en parcourant le réseau vers la station de base. La compression de données peut être appliquée également pour réduire la quantité d'informations transmises par les nœuds sources [45]. Ce régime implique l'encodage d'informations au niveau des nœuds qui engendrent des données, et le décodage au niveau de la station de base.

## **3. Technique de mobilité**

Dans certains cas, où les capteurs sont mobiles (e.g. le transport de marchandises), la mobilité peut être utilisée comme un outil de réduction de la consommation d'énergie dans le réseau.

Dans un réseau de capteurs statiques, les paquets provenant des capteurs suivent des chemins multi-sauts vers la station de base. Ainsi, certains chemins peuvent être sollicités plus que d'autres, et les nœuds proches de la station de base sont plus sujets à l'épuisement prématuré de leurs batteries [46].

Si certains nœuds (éventuellement, la station de base) sont mobiles, les nœuds ordinaires peuvent économiser de l'énergie parce que la longueur du chemin est ainsi réduite : ils attendent le passage d'un dispositif mobile pour lui envoyer leurs messages de telle sorte que la communication ait lieu à proximité (directement ou au plus avec un nombre limité de sauts) [47]. Par conséquent, les nœuds ordinaires peuvent économiser de l'énergie parce que la longueur du chemin, la contention et les overheads de diffusion sont ainsi réduits. En outre, un dispositif mobile peut être utilisé afin de répartir uniformément la consommation d'énergie due à la communication à l'intérieur du réseau.

#### **4. Technique du réveil cyclique**

La technique du réveil cyclique est principalement utilisée dans l'activité réseau. Le moyen le plus efficace pour conserver l'énergie est de mettre la radio de l'émetteur en mode veille (standby) à chaque fois que la communication n'est pas nécessaire [48]. L'idée est que les capteurs doivent éteindre leurs radios lorsqu'il n'y a pas d'activités sur le réseau et être prêt dès qu'ils ont un paquet à recevoir ou à transmettre. Ainsi, les capteurs alternent entre périodes actives et sommeil en fonction de l'activité du réseau. Ce comportement est généralement dénommé Duty-cycling. Un Duty-cycle est défini comme étant la fraction de temps où les capteurs sont actifs.

Etant donné que les nœuds effectuent des tâches en coopération, ils doivent coordonner leurs dates de sommeil et de réveil. Un algorithme d'ordonnancement Sommeil/Réveil accompagne donc tout plan de Duty-cycling [49]. Il s'agit généralement d'un algorithme distribué reposant sur les dates auxquelles des nœuds décident de passer entre l'état actif et l'état sommeil. Il permet aux nœuds voisins d'être actifs en même temps, ce qui rend possible l'échange de paquets.

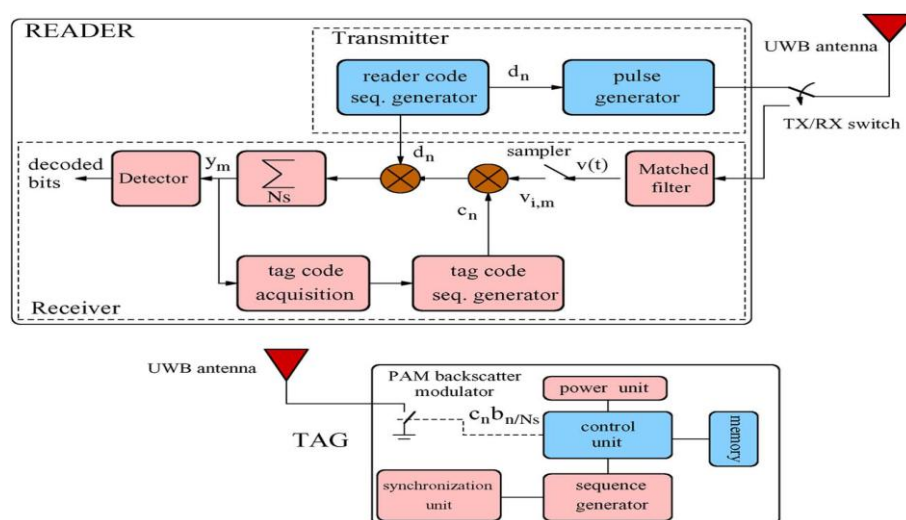
De toute évidence, il existe beaucoup d'autres techniques de conservation d'énergie. Par ailleurs et depuis quelques années, des capteurs passifs de transduction SAW (Surface Acoustic Wave) et RFID (Radio Frequency IDentification) ont fait leur apparition. La partie

suivante traite les composants les plus répandus fondés sur ces types de technologies ainsi que d'autres types récents de capteurs passifs.

## IV. Capteurs sans fil passifs

### 1. Capteurs à identification par radio fréquence

Le terme RFID est l'acronyme de l'expression anglaise «Radio Frequency IDentification» qui regroupe tous les systèmes d'identification par communication sans fil à l'aide de la radiofréquence [50]. Les premiers travaux de recherche mettant en œuvre la technologie d'identification par fréquence radio au profit de l'industrie, remontent au début des années quatre-vingt [51]. A l'heure actuelle, le développement des systèmes basés sur cette technologie est en plein expansion, visant à fournir la fiabilité et augmenter la sécurité, tout en conservant une faible consommation énergétique et une réduction du coût [52]. La Figure 2 montre l'ensemble des parties constituant un capteur RFID [53].



**Fig.2 : Principe de fonctionnement des systèmes RFID.**

La technologie RFID, considérée comme étant une solution prometteuse dans le domaine d'identification et de détection, est adoptée afin de surmonter les limites en termes d'énergie et de durée de vie des capteurs actifs, puisque aucune batterie n'est nécessaire et l'énergie est transmise par le champ électrique. Cette évolution a permis une variété des applications des dispositifs RFID, particulièrement dans les domaines de télédétection et de traçabilité [54]. En plus de la fonction d'identification initiale s'ajoutent celles de la géolocalisation, de l'intégration de capteurs et de l'acquisition de mesures [55].

Connue essentiellement pour son utilisation dans le domaine d'identification des objets, cette technologie promise à un grand essor permet également de mesurer une grandeur physique, et ce grâce à une étiquette attachée à l'objet composée d'une puce électronique et d'une antenne (cf. Fig.2) [56]. L'étiquette radiofréquence lorsqu'elle reçoit une énergie suffisante pour son activation par son antenne, elle renvoie un message au lecteur pour l'opération de décodage [57]. Les performances d'un système RFID s'expriment en termes de distance et de vitesse de lecture. Il existe quatre familles de systèmes RFID partagés par leurs fréquences de fonctionnement [58]:

- Basse fréquence (BF) de 125 à 135KHz de bande avec une distance de lecture de quelques centimètres.
- Haute fréquence (HF) à 13,56MHz avec une distance de lecture de quelques dizaines de centimètres (La plupart des puces passives utilisent cette bande de fréquences).
- Ultra Haute Fréquence (UHF) à 433,92MHz et de 860 à 956MHz avec une distance de lecture de l'ordre du mètre.
- Fréquences micro-ondes de 2,45 à 24GHz avec une distance de lecture inférieure à 5 mètres.

Parmi les systèmes RFID à transpondeurs passifs, deux systèmes sont identifiés et seront comparés aux objectifs de notre étude.

#### - **Capteur RFID à couplage inductif**

Dans le processus du couplage inductif, la communication est assurée par deux bobines connectées au lecteur et à la cellule RFID. Les gammes de fréquence utilisées sont les basses fréquences (en général  $< 30\text{MHz}$ ), [59]. On parle dans ce cas d'un couplage inductif fonctionnant avec des antennes bobinées pour le lecteur comme pour l'étiquette. Généralement, ce capteur est composé d'un condensateur et d'une inductance réalisant ainsi un circuit résonant LC série pour la communication sans fil. La variation de la capacité du capteur entraîne alors une variation de la fréquence de résonance du circuit LC [60, 61]. Cette variation est récupérée à distance et se traduit par une variation de la fréquence du couplage inductif. En pratique, ce type de dispositif présente deux défauts majeurs : la très faible distance d'interrogation ( $< 10\text{cm}$ ) et la grande taille des antennes (plusieurs centimètres de diamètre).

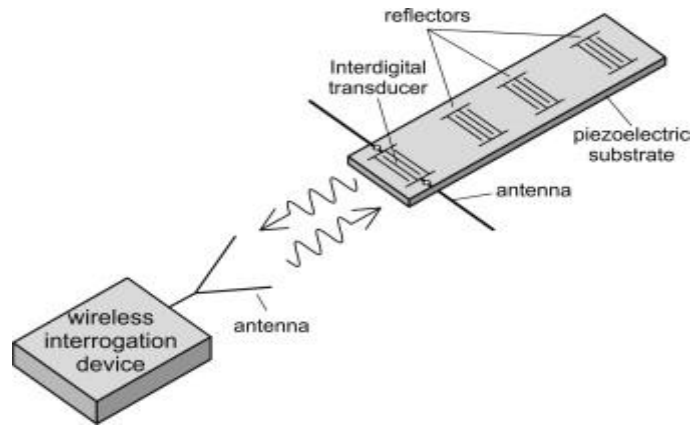
#### - **Capteur RFID UHF et micro-ondes**

Les systèmes RFID UHF et micro-onde utilisent un couplage électromagnétique dans des bandes de fréquences élevées. En général, ce type de dispositif se présente sous la forme d'un microcontrôleur connecté à un élément sensible et doté d'une antenne par laquelle l'étiquette reçoit de l'énergie électrique [62]. Lorsqu'il reçoit suffisamment d'énergie pour être activé, le microcontrôleur code l'information provenant de l'élément sensible en commutant la charge connectée à l'antenne entre deux valeurs. L'alimentation électrique du capteur (transducteur, circuits électroniques) est assurée par télé-alimentation à l'aide de l'onde RF. Les antennes utilisées sont plutôt de type filaire ou très proches des antennes radio classiques, leur dimension est de quelques centimètres, cependant elles permettent des distances plus grandes que celles du couplage inductif [63]. La communication repose sur le phénomène de rétro-modulation qui consiste à varier l'impédance du capteur dépendante de la grandeur physique mesurée, avec une modulation équivalente aux données à transmettre créant ainsi une variation du champ magnétique total qui pourra être détectée par le lecteur.

Plusieurs travaux de recherches sur les capteurs de température RFID ont été réalisés ces dix dernières années, on peut citer par exemple les travaux de [64] et [65]. Néanmoins, la technologie RFID souffrent de plusieurs limitations qui peuvent être déterminantes au niveau du développement, de la commercialisation et la mise en place de ses applications. On peut identifier : la portée réduite, le coût élevé, les problèmes de collision et d'interférences. Par conséquent, cette technologie doit faire face à plusieurs challenges en augmentant la distance d'interrogation et la fiabilité, en réduisant le volume des systèmes, en limitant les réflexions parasites et bien évidemment en diminuant les coûts. En outre, nombreuses technologies peuvent affecter les performances et les procédés de fabrication de ces systèmes, parmi lesquelles on trouve la technologie SAW traitée dans la partie qui suit.

## **2. Capteurs à ondes acoustiques de surface**

Autres types de capteurs passifs ont été réalisés en utilisant des composants à ondes acoustique de surface (connus également par SAW). Les capteurs SAW exploitent les propriétés acousto-électriques de substrats piézoélectriques tels que le quartz ou le Niobate de Lithium pour générer des ondes de surface [66, 67]. Ce type de substrat présente des coefficients linéaires de variation en fonction de la grandeur physique. Les systèmes SAW sont appliqués pour la mesure des grandeurs physiques comme la température [68], la pression [69] ou les gaz chimiques [70].



**Fig.3 : Configuration générale de l'interrogation des capteurs SAW.**

Le principe de fonctionnement de ces capteurs sans fil (cf. Fig. 3) 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) et polarisé par une onde électromagnétique à travers une antenne [71, 72]. La propagation de cette onde acoustique via les électrodes interdigitées métalliques peut être modifiée par les conditions environnementales (température, contrainte, gaz, etc.). En retour, l'onde modifiée est transformée en onde électromagnétique pour être renvoyée vers l'unité d'interrogation. L'analyse de l'onde électromagnétique réfléchiée par le capteur permet d'obtenir une information sur la grandeur qui a modifié la propagation de l'onde acoustique [73]. 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 des circuits électroniques et des transducteurs qui consomment de l'énergie.



**Fig.4 : Capteur de température à onde acoustique industrialisé.**

Les capteurs à onde acoustique industrialisés proposent une solution pour les applications dans des environnements sévères, e.g. dans les atmosphères explosives ou dans des environnements soumis à de fortes irradiations et à très hautes températures (cf. Fig.4). En 2011, un système de mesure de température utilisant un capteur SAW est introduit avec une sensibilité de 1,1KHz/°C à la fréquence de 433MHz [74].

D'autre part, 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. La distance d'interrogation reste ainsi généralement inférieure à 10m.

### **3. Capteurs à transduction électromagnétique**

Les capteurs passifs à transduction électromagnétique (EM) transforment la variation de la quantité physique détectée en une variation connue et spécifique de la description de l'onde électromagnétique. Ce type de capteur ne nécessite pas de circuit électronique de contrôle contrairement aux capteurs RFID. Le transducteur EM permet de garder en principe la majeure partie des avantages des capteurs passifs à onde acoustique (autonomie illimitée, tenue aux environnements sévères, complexité reportée au niveau du lecteur).

Contrairement au capteur SAW, les dispositifs à transduction EM n'utilisent pas de conversion onde électromagnétique - onde acoustique. Par conséquent, cela permet d'éviter les pertes dues à cette conversion et aide à augmenter la distance d'interrogation du capteur. Un autre avantage des transducteurs électromagnétique concerne la plus grande latitude quant aux choix des matériaux qui doivent seulement présenter de faibles pertes diélectriques. Enfin le type de structure peut être beaucoup plus complexe (intégrant des MEMS, des matériaux ou des liquides) ouvrant ainsi la voie à des applications plus variées.

Le premier capteur basé sur la transduction électromagnétique concerne un capteur d'humidité, publié en 1998 [75]. Depuis, plusieurs autres types de capteurs ont été publiés et on peut citer les plus récentes contributions à ces travaux : pression [76], gaz [77, 78], température [79].

Au sujet des capteurs de température, trois principes ont été explorés dans la littérature. Le premier principe utilise la déformation de bilames pour modifier le couplage électromagnétique dans une structure RF. En 2009, S. Scott et al. ont présenté un dispositif basé sur le changement de la longueur électrique d'une antenne à fentes par un réseau de poutres Or/SiO<sub>2</sub>. Le dispositif réalisé montre une variation de la fréquence de l'antenne de 19,45GHz à 19,30GHz pour un changement de la température entre 20 et 300°C [80]. En 2010, le laboratoire LAAS de l'université de Toulouse, propose un dispositif formé par deux anneaux résonnants chargés par deux poutres bimorphes [81]. En général, ce type de capteur

présente de très bonnes performances (sensibilité, gamme de température, résolution) mais la réalisation technologique est assez complexe, notamment pour la fabrication des micro-poutres.

Le second principe est basé sur la dilatation thermique d'un liquide dans un transducteur EM. Le couplage fluide/radiofréquence présente l'avantage d'être particulièrement important ce qui devrait permettre d'obtenir des capteurs avec une sensibilité considérable. La variation de la température entraîne la dilation du fluide contenu dans un réservoir et génère ainsi le déplacement du liquide dans un micro-canal. Le capteur en question a été proposé récemment par S. Bouaziz et al. [82]. Un fluide diélectrique est ainsi utilisé pour modifier une capacité planaire constituée par des électrodes en cuivre déposées sur un substrat en verre. Le fluide concerné est de l'eau désionisée qui peut circuler dans un micro-canal. La variation d'impédance, obtenue lors de la progression du front d'eau dans le micro-canal, permet de modifier l'impédance de charge d'une antenne et module ainsi le niveau de l'écho radar.

Le dernier principe met en œuvre des matériaux dont la permittivité varie avec la température afin de modifier directement l'environnement électromagnétique du dispositif RF. En 2008, Ren et al. [83] proposaient un dispositif utilisant un résonateur spiral planaire sur un substrat spécifique relié à une antenne. Bien qu'aucun résultats expérimentaux en température soient montrés, ce capteur est présenté comme pouvant fonctionner jusqu'à 1500°C ce qui le rend surtout intéressant pour des applications avec de larges gammes de température [84, 85].

Dans le cadre de cette thèse, nous proposons deux types de capteurs de température basés sur des principes passifs. Ces travaux sont particulièrement intéressants puisqu'ils ne nécessitent pas d'énergie embarquée et présentent donc de très bonnes performances en termes de consommation énergétique.

## **V. Conclusion**

Le défi le plus important auquel les concepteurs de réseaux de capteurs, prévus pour fonctionner pour une longue période, doivent faire face, c'est le besoin des réductions significatives de la consommation d'énergie. La synthèse des travaux et des projets de recherches nous a montré la diversité des thématiques scientifiques traitées ainsi que la multitude des solutions et techniques proposées. Nous avons remarqué que pour économiser l'énergie des capteurs, de nombreux travaux se sont focalisés sur les protocoles ainsi que sur le développement de prototypes à faible consommation. En recensant les différentes

techniques de conservation et de récupération, le meilleur moyen pour conserver l'énergie des capteurs et ainsi augmenter la longévité du réseau est celui de mettre les capteurs en mode sommeil et réduire l'activité du capteur (éteindre temporairement les nœuds lorsque la communication n'est pas utile).

Une autre approche de conception très intéressante consiste en une optimisation des capteurs en termes de consommation énergétique. Cette optimisation peut se faire en effectuant des mesures passives à distance : c'est la capacité de mesurer sans fil de certaines propriétés physiques détectées grâce à des capteurs sans utiliser d'alimentation. Cette approche permet de supprimer toute la partie de traitement du signal au niveau du capteur et par conséquent la majorité des consommations en énergie. Ceci demande une émission, par les outils d'interrogation, et une haute sensibilité de détection du signal RF de retour.

Dans ce chapitre, nous avons brièvement exploré un état de l'art sur les capteurs sans fil, les méthodes utilisées pour la conservation d'énergie, les différentes configurations passives que l'on peut rencontrer dans la littérature, en tenant de rappeler les caractéristiques et les limites de détection rapportées dans les publications.

## VI. Références

- [1] W. Dargie and C. Poellabauer, ‘Fundamentals of Wireless Sensor Networks: Theory and Practice’, Chichester West Sussex U.K.: Wiley, 2010.
- [2] J. Yick, B. Mukherjee and D. Ghosal, ‘Wireless Sensor Network Survey’, *Computer Networks*, Vol.52, Issue 12, pp. 2292–2330, Elsevier Inc, 2008.
- [3] T. Arampatzis, J. Lygeros, and S. Manesis, ‘A Survey of Applications of Wireless Sensors and Wireless Sensor Networks’, in *Intelligent Control, IEEE International Symposium on Mediterrean Conference on Control and Automation*, pp. 719– 724, 2005.
- [4] J. Yick, B. Mukherjee and D. Ghosal, ‘Wireless Sensor Network Survey’, *Computer Networks*, Vol.52, Issue 12, pp. 2292–2330, Elsevier Inc, 2008.
- [5] W. R. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan, ‘Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks’, *IEEE 33rd Hawaii International Conference on System Sciences*, 2000.
- [6] G. Anastasi, M. Conti, M. Di Francesco and A. Passarella, ‘Energy Conservation in Wireless Sensor Networks: A survey’, *Ad Hoc Networks*, Vol. 7, Issue 3, pp. 537–568, Elsevier Inc, May 2009.
- [7] K. Sohraby, D. Minoli and T. Znati, ‘Wireless Sensor Networks: Technology, Protocols, and Applications’, John Wiley & Sons, 2007.
- [8] Edgar H. Callaway Jr., ‘Wireless Sensor Networks: Architectures and Protocols’, Auerbach Publications, 2003.
- [9] G. Anastasi, M. Conti, M. Di Francesco and A. Passarella, ‘Energy Conservation in Wireless Sensor Networks: A survey’, *Ad Hoc Networks*, Vol. 7, Issue 3, pp. 537–568, Elsevier Inc, May 2009.
- [10] I.F. Akyildiz and I.H. Kasimoglu, ‘Wireless Sensor and Actor Networks: Research Challenges’, *Ad Hoc Networks Journal*, Vol. 2, Issue 4, pp.351–367, 2004.
- [11] W. Dargie and C. Poellabauer, ‘Fundamentals of Wireless Sensor Networks: Theory and Practice’, Chichester West Sussex U.K.: Wiley, 2010.
- [12] Jacob Fraden, ‘Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications’, Chapter I, Fourth Edition, Springer-Verlag New York Inc, 2010.
- [13] T. Torfs, S. Sanders, C. Winters, S. Brebels and C. Van Hoof, ‘Wireless network of autonomous environmental sensors’, *Sensors Journal*, pp. 923 – 926, vol.2, October 2004.
- [14] Jacob Fraden, ‘Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications’, Chapter I, Fourth Edition, Springer-Verlag New York Inc, 2010.

- [15] A. Ruhanen, M. Hanhikorpi, F. Bertuccelli, A. Colonna, W. Malik, D. Ranasinghe, T. López, N. Yan and M. Tavilampi, ‘Sensor-enabled RFID tag handbook’, Building Radio frequency IDentification solutions for the Global Environment Project report 2008.
- [16] O. B. Akan, M. T. Isik, and B. Baykal, “Wireless Passive Sensor Networks,” IEEE Communications Magazine, Vol. 47, no. 8, pp. 92-99, August 2009.
- [17] L. M. Reindl, ‘Wireless Passive Sensors: Basic Principles and Performances’, IEEE SENSORS 2008 Conference, 2008.
- [18] A. O. Bicen and O.B. Akan, ‘Energy-efficient RF Source Power Control for Opportunistic Distributed Sensing in Wireless Passive Sensor Networks’, IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC), 2012.
- [19] A. Tantawy, X. Koutsoukos, and G. Biswas, ‘Optimal Performance for Detection Systems in Wireless Passive Sensor Networks’, IEEE 17th Mediterranean Conference on Control & Automation Makedonia Palace, Thessaloniki, Greece, 2009.
- [20] K. Sohraby, D. Minoli and T. Znati, ‘Wireless Sensor Networks: Technology, Protocols, and Applications’, John Wiley & Sons, 2007.
- [21] J. S. Wilson, ‘Sensor Technology Handbook’, Elsevier Inc, 2005.
- [22] J. Fraden, ‘Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications’, Chapter II, Fourth Edition, Springer-Verlag New York Inc, 2010.
- [23] M. L. Oliveira, J. P. C. Rodrigues, ‘Wireless Sensor Networks: a Survey on Environmental Monitoring’, Journal of Communications, Vol. 6, No. 2, April 2011
- [24] C. Buratti, A. Conti, D. Dardari and R. Verdone, ‘An Overview on Wireless Sensor Networks Technology and Evolution’, Sensors Journal, Vol.9, Issue 9, 2009.
- [25] Z. Li, H. Shen and B. Alsaify, ‘Integrating RFID with Wireless Sensor Networks for Inhabitant, Environment and Health Monitoring’, 14<sup>th</sup> IEEE International Conference on Parallel and Distributed Systems, pp 639 – 646, 2008.
- [26] K. Lu, Y. Qian, D. Rodriguez, W. Rivera and M. Rodriguez, ‘Wireless Sensor Networks for Environmental Monitoring Applications: A Design Framework’, IEEE Global Telecommunications Conference, 2007.
- [27] M. A. Hussain, K. Pervez and K. S. Kwak, ‘WSN Research Activities for Military Application’, 11<sup>th</sup> IEEE International Conference on Advanced Communication Technology, pp. 271 – 274, 2009.
- [28] J. J. Lotf, S. H. Hosseini and N. Ghazani, ‘Overview on Wireless Sensor Networks’, Journal of Basic and Applied Scientific Research, Vol.1, Issue 12, 2011.
- [29] D. Baghyalakshmi, J. Ebenezer and S.A.V. Satyamurty, ‘WSN based Temperature Monitoring for High Performance Computing Cluster’, International Conference on Recent Trends in Information Technology (ICRTIT), pp. 1105 – 1110, 2011.

- [30] X. Zhang and B. Chang, 'Research of Temperature and Humidity Monitoring System Based on WSN and Fuzzy Control', International Conference on Electronics and Optoelectronics (ICEOE), 2011.
- [31] C.A.L. Garzon and O.J.R. Riveros, 'Temperature, Humidity and Luminescence Monitoring System using Wireless Sensor Networks (WSN) in Flowers Growing', IEEE ANDESCON, pp.1 – 4, 2010.
- [32] N. Dessart, H. Fouchal, P. Hunel and C. Rabat, 'Simulation of Large Scale WSN for Medical Care', IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC), pp 1115 – 1120, 2010.
- [33] H. Furtado and R. Trobec, 'Applications of Wireless Sensors in Medicine', MIPRO, IEEE Proceedings of the 34<sup>th</sup> International Convention, pp. 257 – 261, 2011.
- [34] F. Viani, G. Oliveri, M. Donelli, L. Lizzi, P. Rocca and A. Massa, 'WSN-based Solutions for Security and Surveillance', 40<sup>th</sup> IEEE European Microwave Conference, pp. 1762 – 1765, 2010.
- [35] M. Maimour, C. Pham, D. Hoang, 'A Congestion Control Framework for Handling Video Surveillance Traffics on WSN', International Conference on Computational Science and Engineering, pp 943 – 948, 2009.
- [36] P. Nie and Z. Jin, 'Requirements, Challenges and Opportunities of Wireless Sensor Networks in Structural Health Monitoring', 3rd IEEE International Conference on Broadband Network and Multimedia Technology, pp. 1052 – 1057, 2010.
- [37] N. Xu, S. Rangwala, K. K. Chintalapudi, D. Ganesan, A. Broad, R. Govindan and D. Estrin, 'A Wireless Sensor Network for Structural Monitoring', Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Conference on Embedded Networked Sensor Systems, 2004.
- [38] G. Anastasi, M. Conti, M. Di Francesco and A. Passarella, 'Energy Conservation in Wireless Sensor Networks: A Survey', Ad Hoc Networks, Vol. 7, Issue 3, pp. 537-568, Elsevier Inc, 2009.
- [39] S. Mahfoudh and P. Minet, 'Survey of Energy Efficient Strategies in Wireless Ad Hoc and Sensor Networks', 7<sup>th</sup> IEEE International Conference on Networking, pp. 1–7, 2008.
- [40] I. Dietrich and F. Dressler, 'On the lifetime of Wireless Sensor Networks', ACM Transactions on Sensor Networks, Vol. 5, No.1, 2009.
- [41] B. Carbunar, A. Grama, J. Vitek and O. Carbunar, 'Redundancy and Coverage Detection in Sensor Networks', ACM Transactions on Sensor Networks, Vol. 2, No.1, 2006.
- [42] K. Hellman and M. Colagrosso, 'Investigating a Wireless Sensor Network Optimal Lifetime Solution for Linear Topologies', Journal of Interconnection Networks, Vol.7, No.1, pp.91–99, 2006.
- [43] M. C. Vuran, O. B. Akan and I. F. Akyildiz. 'Spatio-temporal Correlation : Theory and Applications for Wireless Sensor Networks', Computer Networks, Vol. 45, Issue 3, pp. 245–259, Elsevier Inc., 2004.

- [44] E. Fasolo, M. Rossi, J. Widmer and M. Zorzi, 'In-network Aggregation Techniques for Wireless Sensor Networks : a Survey', *IEEE Wireless Communications*, Vol. 14, Issue 2, pp. 70–87, 2007.
- [45] A. Byl, R. Neilson and R. H. Wilkinson, 'An Evaluation of Compression Techniques for Wireless Sensor Networks', *IEEE AFRICON*, 2009.
- [46] M. Becker, A. L. Beylot, R. Dhaou, A. Gupta, R. Kacimi and M. Marot, 'Experimental Study : Link Quality and Deployment Issues in Wireless Sensor Networks', *The 8<sup>th</sup> International IFIP-TC6 Networking Conference, (NETWORKING'09)*, Vol. 5550, pp. 14–25, Springer, 2009.
- [47] G. Anastasi, M. Conti, A. Passarella, and L. Pelusi, 'Mobile-Relay Forwarding in Opportunistic Networks', *Adaptation and Cross Layer Design in Wireless Networks*, CRC Press, 2008.
- [48] G. Anastasi, M. Conti, M. Di Francesco and A. Passarella, 'Energy Conservation in Wireless Sensor Networks: A Survey,' *Ad Hoc Networks*, Vol. 7, Issue 3, pp. 537-568, Elsevier Inc, 2009.
- [49] R. Zheng, J. C. Hou and L. Sha, 'Asynchronous Wakeup for Ad hoc Networks', *The 4<sup>th</sup> ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking & Computing*, ACM, pp. 35–45, 2003.
- [50] 'RFID Techniques, Enjeux et Acteurs', *Journal Veille Technologique*, No. 32, 2005.
- [51] J. Landt, 'The history of RFID', *IEEE Potentials*, Vol. 24, No. 4, pp. 8-11, 2005.
- [52] R. Gadh, G. Roussos, K. Michael, G. Q. Huang, B. S. Prabhu and P. Chu, 'RFID- A Unique Radio Innovation for the 21<sup>st</sup> Century', *IEEE*, Vol.98, No.09, pp.1546 -1549, 2010.
- [53] D. Dardar, R.D. Errico, C. Roblin, A. Sibille and M. Z. Win, 'Ultrawide Bandwidth RFID: The Next Generation?', *Proceedings of the IEEE*, Vol.98, No.09, pp.1570-1582, 2010.
- [54] L. Ruiz-Garcia and L. Lunadei, 'The role of RFID in agriculture: Applications, Limitations and Challenges', *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 79, pp. 42–50. Elsevier Inc., 2011.
- [55] M. K. Lima, W. Bahrb and S. C.H. Leung, 'RFID in the warehouse: A literature analysis (1995–2010) of its applications, benefits, challenges and future trends', *International Journal of Production Economics*, Vol. 145, Issue 1, pp. 409–430, 2013.
- [56] M. J. Cazecaa, J. Meada, J. Chenb and R. Nagarajan, 'Passive Wireless Displacement Sensor Based on RFID Technology', *Sensors and Actuators*, Vol. 190, pp. 197–202, 2013.
- [57] T. S. López, 'RFID and Sensor Integration Standards: State and Future prospects', *Computer Standards & Interfaces*, Vol. 33, Issue 3, pp. 207–213, Elsevier Inc., 2011
- [58] RFID Journal : <http://www.rfidjournal.com/article/view/1335/3>
- [59] P. Scholz, C. Reinhold, W. John and U. Hilleringmann, 'Analysis of Energy Transmission for Inductive Coupled RFID Tags', *IEEE International Conference on RFID*, pp. 183-190, 2007.
- [60] K. Fotopoulou and B. Flynn, 'Wireless Powering of Implanted Sensors using RF Inductive Coupling', *5<sup>th</sup> IEEE Conference on Sensors*, pp. 765-768, 2006.

- [61] P.J. Chen, S. Saati, R. Varma, M.S. Humayun and Y.Ch. Tai, 'Wireless Intraocular Pressure Sensing Using Microfabricated Minimally Invasive Flexible-Coiled LC Sensor Implant', *Journal of Microelectromechanical Systems*, Vol. 19, No. 4, 2010.
- [62] S. Banerjee, R. Jesme and R. Sainati, 'Performance Analysis of Short Range UHF Propagation as Applicable to Passive RFID', *IEEE International Conference on RFID*, pp. 30-36, 2007.
- [63] F. Fuschini, C. Piersanti, F. Paolazzi and G. Falciasecca, 'Analytical Approach to the Backscattering from UHF RFID Transponder', *Antennas and Wireless Propagation Letters, IEEE*, Vol. 7, pp. 33-35, 2008.
- [64] H. Shen, L. Li and Y. Zhou, 'Fully Integrated Passive UHF RFID Tag With Temperature Sensor For Environment Monitoring', *7<sup>th</sup> International Conference on ASIC*, pp. 360-363, 2007.
- [65] A. Vaz, A. Ubarretxena, I. Zalbide, D. Pardo, H. Solar, A. G.Alonso and R. Berenguer, 'Full passive UHF tag with a Temperature Sensor suitable for Human Body Temperature Monitoring', *IEEE Transactions on Circuits and Systems II*, Vol. 57, No.2, pp. 95-99, 2010.
- [66] A. Pohl, 'A Review of Wireless SAW Sensors', *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, Vol. 47, No. 2, pp.317 -332, 2000.
- [67] L. Reindl, A. Pohl, G. Scoll and R. Weigel, 'SAW Based Radio Sensor System', *IEEE Journal Sensors*, Vol.1, No.1, pp. 68-78, 2001.
- [68] Y. WEN, P. LI and Z. ZHOU, 'A Passive Coding Resonant Wireless SAW Temperature Sensor Array', *IEEE Sensors Proceedings*, pp. 872-875, 2004.
- [69] M. Benetti, D. Cannatà, F. Di Pietrantonio, C. Marchiori, P. Persichetti and E. Verona, 'Pressure Sensor based on Surface Acoustic Wave Resonators', *IEEE Conference*, pp.1024-1027, 2008.
- [70] C. Wen, C. Zhu, Y. Ju, H. Xu and Y. Qiu, 'A Novel Dual Track SAW Gas Sensor Using Three-IDT and Two-MSC', *IEEE Journal Sensors*, Vol.9, No.12, pp.2010-2015, 2009.
- [71] A. Stelzer, S. Scheibelhofer, S. Schuster and R. Teichmann, 'Wireless Sensor Marking And Temperature Measurement with SAW-Identification Tags', *Measurement*, Vol. 41, pp. 579-588, Elsevier Inc., 2008.
- [72] P. Varshney, B. Panwar, P. Rathore, S. Ballandras, B. Francois, G. Martin, J. Friedt and T. Retornaz, 'Theoretical and Experimental Analysis of High Q SAW Resonator Transient Response in a Wireless Sensor Interrogation Application', *IEEE International Frequency Control Symposium (FCS)*, pp. 1-6, 2012.
- [73] A. Stelzer, S. Scheibelhofer, S. Schuster and R. Teichmann, 'Wireless Sensor Marking And Temperature Measurement with SAW-Identification Tags', *Measurement*, Vol. 41, pp. 579-588, Elsevier Inc., 2008.
- [74] P. Li, H. Xie, Y. Wen, C. Wang, S. Huang, Z. Ren, J. He and D. Lu, 'A SAW Passive Wireless Sensor System for Monitoring Temperature', *IEEE Sensors*, 2011.

- [75] R.A Yogia, S.A Gangalb, R.C Aiyera and R.N Karekar, 'Microwave Ring Resonator as a Novel Bio-material Moisture Sensor', *Sensors Actuators B : Chemical*, Vol. 50, Issue 1, pp. 38–44, 1998.
- [76] M.M. Jatlaoui, P. Pons and H. Aubert, 'Pressure Micro-sensor based on Radio- Frequency Transducer', *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, 2008.
- [77] H. Hallil, P. Menini, P., and H. Aubert, 'Novel Millimeter-Wave Gas Sensor Using Dielectric Resonator with Sensitive Layer on TiO<sub>2</sub>', *IEEE Sensors*, 2009.
- [78] H. Hallil, P. Menini, P., and H. Aubert, 'Novel Microwave Gas Sensor using Dielectric Resonator with SnO<sub>2</sub> Sensitive Layer', *Procedia Chemistry*, Vol. 1, Issue 1, pp. 935–938, Elsevier Inc., 2009.
- [79] S. Bouaziz, P. Pons, H. Aubert, A. Traille and M. M. Tentzeris, 'A Novel Wireless Passive Temperature Sensor utilizing Microfluidic Principles in Millimeter-Wave Frequencies', *IEEE Sensors*, pp. 524 -525, 2011.
- [80] S. Scott and D. Peroulis, 'A Capacitively-Loaded MEMS Slot Element for Wireless Temperature Sensing of up to 300°C', *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, pp. 1161-1164, 2009.
- [81] T. Thai, M. Jatlaoui, F. Chebila, H. Aubert, P. Pons, G.R. DeJean, M. Tentzeris and R. Plana: 'Design and Development of a Novel Passive Wireless Ultrasensitive RF Temperature Transducer for Remote Sensing', *IEEE Sensors Journal*, 2012.
- [82] S. Bouaziz, F. Chebila, A. Traille, P. Pons, H. Aubert and M. M. Tentzeris, 'A New millimeter-wave micro-fluidic Temperature sensor for wireless passive radar interrogation', *IEEE Sensors*, 2012.
- [83] X. Ren and X. Gong, 'A Wireless Sensing Technique using Passive Microwave Resonators', *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, 2008.
- [84] X. Ren, S. Ebadi, Y. Chen, A. Linan and X. Gong, 'High-Temperature Characterization of SiCN Ceramics for Wireless Passive Sensing Applications Up to 500°C', *IEEE 12<sup>th</sup> Annual Wireless and Microwave Technology Conference (WAMICON)*, 2011.
- [85] H. Cheng, S. Ebadi, X. Ren, Y. Yusuf and X. Gong, 'A Compact Wireless Passive Sensing Mechanism Based on a Seamlessly Integrated Resonator/Antenna', *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI)*, 2011.

## *CHAPITRE II*

---

### CAPACITE PLANAIRE POUR LA MESURE SANS FIL DE LA TEMPERATURE

---



---

## TABLE DES MATIERES

---

I.	Introduction.....	50
II.	Conception du transducteur passif et sans fil.....	50
	1. Principe de fonctionnement du capteur .....	50
	2. Caractéristiques de la capacité .....	52
	3. Conception du filtre passif .....	54
	4. Méthode d'interrogation.....	54
III.	Simulations de la structure complète .....	55
IV.	Applications du capteur proposé.....	56
V.	Conclusion .....	58
VI.	Références .....	59

---

## I. Introduction

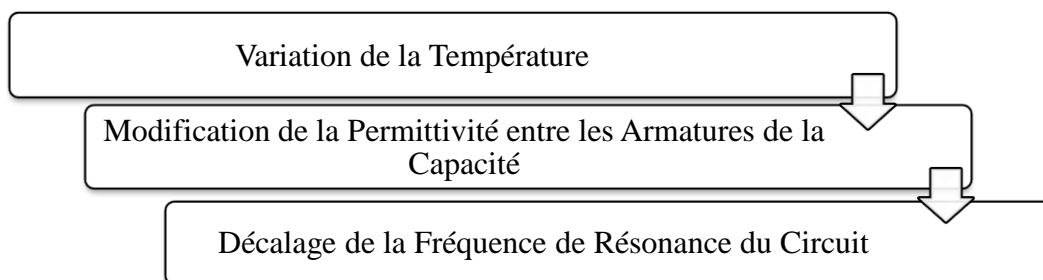
A l'heure actuelle, les capteurs de température sans fil semblent atteindre les limites de leurs performances sur les plans énergie, encombrement, technique d'analyse et interrogation à distance. Le besoin de réalisation des réseaux de capteurs autonomes, par des techniques innovantes fait appel à des fonctions passives en radiofréquence.

Après avoir présenté dans le premier chapitre l'état de l'art des capteurs sans fil, notamment les technologies passives, nous nous intéressons dans ce chapitre à la validation du principe proposé d'un capteur de température passif. Ce dispositif est basé sur la disponibilité d'une capacité sensible à la variation de la température d'une part et d'autre part, d'un circuit électronique passif à faible coût. Nous évaluons notre proposition en utilisant un simulateur et une plateforme de circuit RLC, pour analyser le comportement de la cellule de mesure dans différents scénarios. Le capteur est interrogeable à distance par une technique radiofréquence, et vise à apporter de nouveaux bénéfices à la détection classique de température.

## II. Conception du transducteur thermique

### 1. Principe de fonctionnement du capteur

Le principe du capteur proposé est basé sur la variation d'une impédance (capacité) en fonction de la température. La structure du transducteur est constituée d'une capacité sensible intégrée dans un filtre passif passe bande. L'élévation de la température modifie la valeur de cette capacité ainsi que les fréquences de résonances de la structure par la suite.



**Fig.1 : Principe de fonctionnement du capteur de température.**

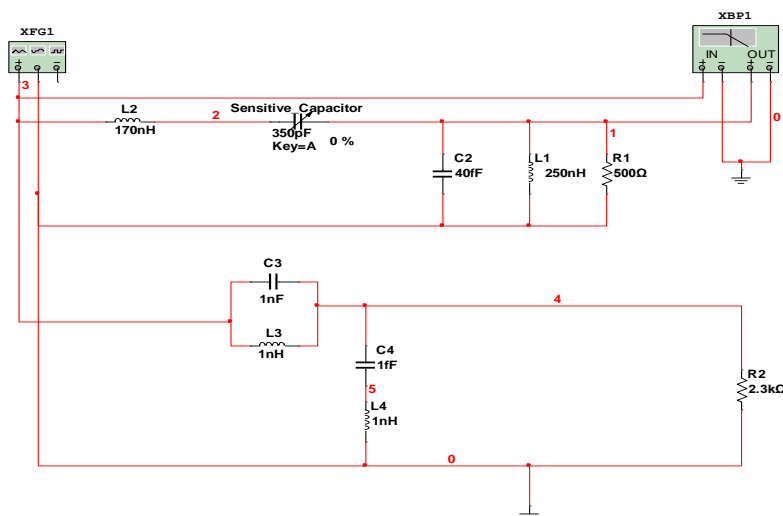
Notre approche illustrée en Figure 1, est basée sur l'interaction entre la capacité sensible et le changement de la température. La variation mesurable d'une propriété intrinsèque du matériau à base duquel est constituée la capacité permet de mettre en évidence le changement de la température. La difficulté principale consiste, entre autres, à trouver ainsi une capacité

constituée d'un matériau susceptible de voir ses propriétés diélectriques changer suffisamment sous l'effet d'une variation de la température.

L'objet du présent travail a été dans un premier temps de sélectionner et de caractériser une capacité autre que celles commercialisées comme sensibles à la température, dérivées à partir d'une base de titanate de baryum (Classe II), [1, 2, 3]. En dépit de leur sensibilité à la température, ces condensateurs présentent des dépendances non linéaires à la température et à la tension.

Notre approche consiste donc à intégrer une capacité avec des caractéristiques particulières au sein d'un filtre passif passe bande, afin d'apporter des résultats pertinents et originaux à la problématique de consommation d'énergie. Pour nos travaux, nous utilisons une capacité sensible aux variations de la température dont la structure est fabriquée au Laboratoire LIST [4, 5]. Le type de capacité choisie est planaire, constituée par deux électrodes métalliques déposées sur un substrat isolant. La distance entre les deux électrodes ainsi que la longueur des électrodes fixe la valeur de la capacité. Il est important de mentionner que ce type de capacité est facilement intégrable dans les filtres. De toute évidence, la capacité choisie est à base d'un matériau ayant des propriétés diélectriques particulières en présence d'un changement de température, c'est le Lead Lanthanum Zirconate Titanate [6]. En outre, ce matériau présente une permittivité électrique très élevée ce qui permettra d'optimiser la sensibilité du transducteur.

La structure du filtre est réalisée avec des impédances, condensateurs et des résistances, ce qui permet de visualiser la fréquence de résonance du dispositif pour chaque valeur de capacité sensible (cf. Fig.2).



**Fig.2 : Schéma électrique du transducteur.**

Le schéma de fonctionnement du capteur proposé est composé de deux parties. La 1<sup>ère</sup> partie a une relation directe avec la capacité sensible à la température. Cette dernière met en relation la variation de la température avec la variation de la capacité. La relation en question peut être interprétée par une équation du type (2):

$$C = f_1(T) \quad (2)$$

Avec C la valeur de la capacité, et T la température correspondante à cette valeur.

En revanche, la 2<sup>ème</sup> partie donne une relation entre la fréquence de résonance et la capacité sensible par l'intermédiaire d'un circuit passif; un filtre dans notre cas. Ainsi, cette relation peut être exprimée par l'équation 3 :

$$F_r = f_2(C) \quad (3)$$

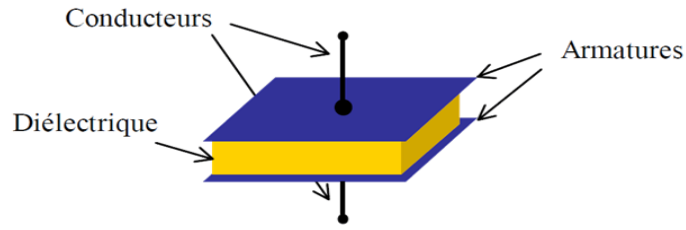
Avec  $F_r$  la fréquence de résonance du filtre, et C la capacité variable.

Par conséquent, nous pouvons en déduire la sensibilité globale du capteur à partir des deux fonctions précédentes (Equation 2 et Equation 3).

## **2. Caractéristiques de la capacité**

En raison de leurs petites tailles et la stabilité de leurs caractéristiques, les capteurs LC sont particulièrement adaptés à des puissances de transmission sur de courtes distances dans des environnements industriels difficiles. Dans le passé, beaucoup de recherches ont apporté des contributions pour faire avancer cette technologie sans fil passive et étendre ses applications dans de nombreux domaines, tels que les capteurs de température [7] et d'humidité [8].

La base de conception de ce présent capteur est une capacité électrique. Ce condensateur planaire lorsqu'il est exposé à des environnements hostiles (i.e. haute température), il présente une variation linéaire de sa capacité en fonction du mesurande. Le choix de cette capacité n'est pas évident, vue les exigences imposées par le capteur. En revanche, notre choix s'explique par la connaissance de ses propriétés électriques à partir de son intégration dans un circuit résonant (L-C). Ceci représente un capteur de température adapté pour travailler dans des environnements difficiles, pour surveiller la température des composants rotatifs par exemple. Des publications récentes [9] montrent que la variation de la température conduit à une réponse quasi linéaire de cette capacité.



**Fig.3 : Géométrie de la capacité planaire.**

La géométrie de la capacité planaire est présentée dans la Figure 3. Ainsi, la variation de cette capacité en réponse à la température est exprimée par l'équation 4.

$$C(T) = \epsilon_0 \epsilon_r (T) \cdot \frac{A}{d} \quad (4)$$

Avec,

C : Valeur de la capacité

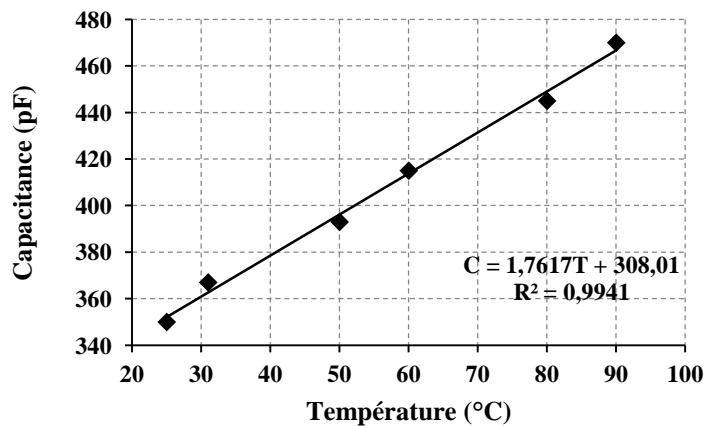
$\epsilon_0$  : Permittivité du vide

$\epsilon_r$  : Permittivité diélectrique

A : Surface des électrodes

d : Epaisseur du diélectrique

Les dimensions de cette capacité sont un compromis entre les exigences RF et les contraintes de fabrication. La Figure 4 montre le comportement de la présente capacité, considérée comme étant l'élément clé de la détection, en fonction de la variation de la température [9]. Dans ce cas, la capacité s'avère un candidat intermédiaire idéal pour servir à la mise en relation entre la température et la fréquence.



**Fig.4 : Variation de la capacité en fonction de la température.**

Le matériau à base duquel est constitué le condensateur tel que mentionné précédemment possède des propriétés électriques intéressantes en présence d'un changement de la température. Une description détaillée des propriétés de ce matériau sera discutée dans le chapitre III.

### 3. Conception du filtre

Le capteur de température a une conception simple comprenant un élément de détection capacitif intégré dans un filtre passif. Le choix de ce type de filtre est basé sur les nombreux avantages qu'il présente en termes d'un facteur de qualité élevé, la haute fréquence de fonctionnement et sa bonne sensibilité. Les composants passifs utilisés lors de la conception de ce dispositif sont des inductances, capacités et résistances.

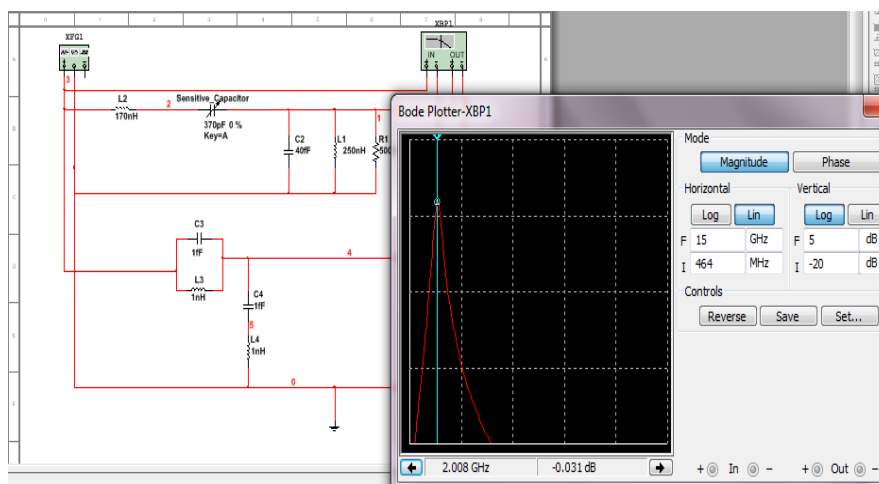


Fig.5 : Schéma électrique du filtre passe bande.

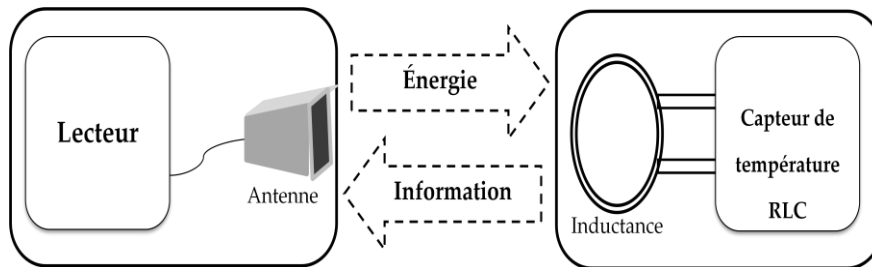
Le transducteur capacitif passif est rappelé dans la Figure 5. La capacité planaire sensible est ainsi représentée par une capacité variable, dont on modifie chaque fois la valeur. Le dispositif utilise trois condensateurs statiques et quatre inductances. En plus de deux résistances en parallèle avec les inductances, présentant les pertes rajoutées.

### 4. Méthode d'interrogation

Les opérations d'interrogation sans fil et d'alimentation à distance peuvent être réalisées grâce à un système alimenté par induction qui génère un champ électromagnétique variable dans le temps, basé sur la loi de Faraday de l'induction et la loi de Lenz [10, 11]. L'inductance agit donc comme un transformateur basé sur le principe de l'induction électromagnétique.

La conception du capteur de température alimenté par RF est basée sur un élément de détection capacitif et une antenne inductive. Les variations de la température ambiante

provoquent le changement de la capacité du circuit, par la suite un décalage de la fréquence de résonance est détecté. Comme le montre la Figure 6, le capteur de température est alimenté par un lecteur distant qui envoie un champ magnétique oscillant par un lien inductif entre l'antenne du lecteur et l'inductance du capteur. Ainsi, l'information de température en fonction d'une fréquence de résonance est également transmise au lecteur au moyen de ce lien.



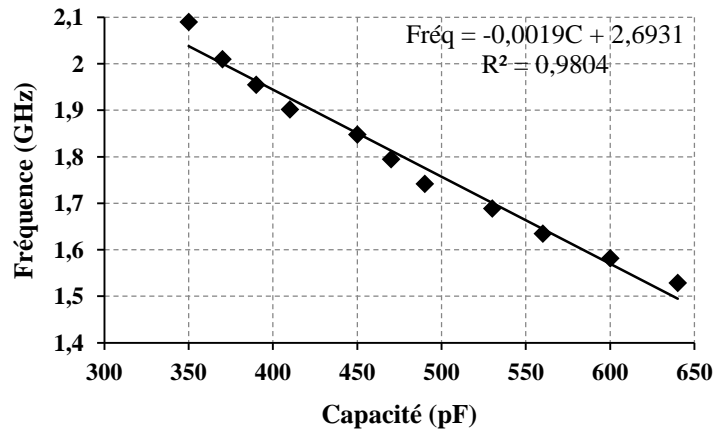
**Fig.6 : Synoptique de principe de la communication sans fil proposé.**

De toute évidence, la fréquence de résonance du capteur est dépendante de la température, le lecteur est donc capable de détecter des changements de température en contrôlant l'impédance aux bornes de son antenne. En d'autres termes, l'énergie électrique est transférée de la bobine d'entrée du capteur, ainsi les informations de température sont détectées par le lecteur à travers le champ magnétique couplé. Les informations de température et de puissance seront ainsi envoyées par l'intermédiaire d'un couplage inductif entre le lecteur et l'antenne du capteur. Tout changement de la température sera traduit par un décalage de fréquence de la sortie du lecteur.

Etant donné que la distance entre le lecteur et le capteur affecte le coefficient de couplage, les deux antennes sont placées aussi près que possible tout en évitant tout contact physique. Enfin, l'interrogation sans fil adoptée démontre l'avantage de la technologie développée du capteur passif puisqu'elle élimine la nécessité de batteries embarquées et de contact physique.

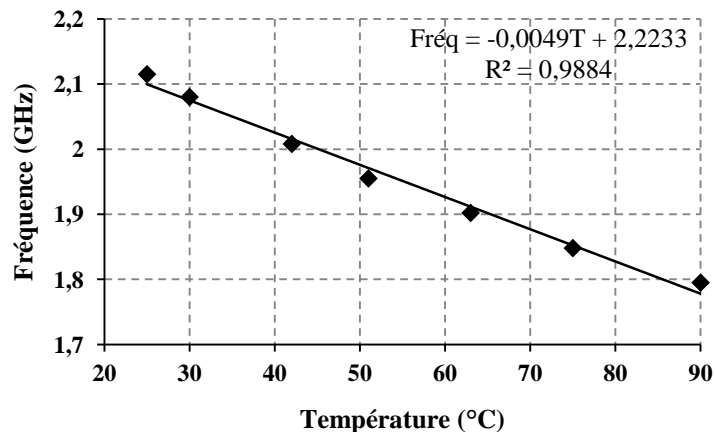
### **III. Simulations de la structure complète**

Une structure complète du transducteur capacitif a été simulée avec le logiciel MULTISIM™ de la société National Instruments pour s'assurer du bon fonctionnement de celle-ci. La Figure 7 présente les résultats obtenus pour les fréquences de résonance du circuit pour différentes valeurs de la capacité sensible. En effet, ce transducteur permet de traduire une variation de la capacité en un décalage fréquentiel avec un comportement linéaire en première approximation.



**Fig.7: Variation de la fréquence en fonction de la capacité planaire.**

Les valeurs extraites de la fréquence en fonction de la température sont présentées sur la Figure 8. Les résultats montrent que la fréquence varie quasi linéairement suite à un changement de la température allant de 25 à 90°C.



**Fig.8 : Variation de la fréquence du circuit en fonction de la température.**

Les résultats de simulations valident le principe physique exploité. Un principe fondé sur la corrélation entre la fréquence de résonance d'un circuit RLC et la capacité qui subit une variation proportionnelle à un changement de la température environnante.

#### **IV. Applications du capteur proposé**

De toute évidence, grâce à leurs divers avantages, les réseaux de capteurs sans fil ont pu s'imposer comme des acteurs incontournables dans plusieurs domaines d'applications. Ces dispositifs innovants se révèlent très utiles et peuvent offrir de meilleures contributions pour les maisons intelligentes, l'environnement et la santé. En particulier, de nombreuses applications industrielles nécessitent le recours aux mesures de température.

En prenant en considération sa distance d'interrogation, le capteur proposé peut être utilisé pour :

- Déduire une température au cœur d'un dispositif
- Surveiller un processus (régulation, processus de fabrication)
- Contrôler des capteurs non accessibles (processus de fabrication, boucle de chauffage)

Particulièrement, le présent capteur vise à proposer une solution pour la protection contre l'incendie des véhicules de transport terrestre, notamment de grande longueur et de poids lourd tels que les camions ou les camions tracteurs attelés à une remorque, ou encore les autocars. Les organes d'un tel véhicule sont soumis à des contraintes mécaniques et thermiques très élevées. C'est le cas du moteur, dans les montées, et des freins dans les descentes. Les essieux des roues, lourdement chargés, sont thermiquement sensibles à tout frottement excessif. Dans tous ces organes de puissance, il existe donc un risque de surchauffe susceptible de provoquer un incendie.

Lorsque l'incendie se produit dans le compartiment moteur, le conducteur est susceptible d'en détecter assez rapidement les fumées, et donc d'arrêter son véhicule pour intervenir au moyen d'un extincteur portable. Par contre, lorsque l'incendie se situe en arrière du siège de conduite, il risque de rester longtemps ignoré et donc de prendre une ampleur telle que toute action pour le combattre sera trop tardive et donc vaine.

Cette invention de lutte contre l'incendie, destinée à équiper un véhicule de transport terrestre, comportant des moyens capteurs de température prévus pour surveiller l'un au moins parmi un ensemble d'organes de puissance. Comprenant un bloc moteur et des moyens de freinage, une centrale de surveillance d'états et de commande en conséquence de moyens de lutte contre l'incendie agencés pour délivrer un produit de lutte contre l'incendie dans au moins une zone à traiter comportant l'organe de puissance surveillé.

Ainsi, un risque d'incendie peut être détecté à temps et donc être traité avant déclenchement de l'incendie, ou rapidement après celui-ci et l'état global de l'environnement du dispositif sera ainsi directement accessible pour prendre les mesures appropriées au cours du temps, c'est-à-dire avant, lors et après déclenchement d'un incendie. Davantage, pour protéger le reste du véhicule, il peut être prévu d'ajouter des extincteurs supplémentaires. En effet, lorsqu'une surchauffe de température est détectée dans une zone dans laquelle un incendie serait susceptible de se propager au reste du véhicule, la commande de ces extincteurs peut être

manuelle ou automatique pour mettre fin à cet incendie. De ce fait, une diffusion de produit de lutte contre l'incendie, produit qui est extincteur et refroidisseur comme de la mousse ou de l'eau, est déclenchée automatiquement.

L'interactivité envisagée de la solution proposée sera en effet un véritable atout, car elle permet d'anticiper d'éventuels problèmes lors de la livraison avec une consommation énergétique réduite. Tout au long du trajet, le conducteur peut rapidement signaler un incident, sans perturber sa conduite ou devoir s'arrêter, ce qui permet d'éviter le tout endommagement de la marchandise.

## **V. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons validé le principe de la mesure sans fil de la température à l'aide d'une capacité planaire intégrée dans un filtre passif et d'une interrogation à distance. Le transducteur est constitué donc d'une capacité planaire dont la valeur varie progressivement avec la température. Par la suite, une variation de la température environnante entraîne un changement de valeur de cette capacité sensible. Ce changement agit sur les paramètres électriques du filtre, à savoir la fréquence de résonance, ce qui provoque un décalage de ce paramètre.

Cette architecture a été adoptée en justifiant les différents choix. Puis une simulation complète de la structure a permis de valider le principe de fonctionnement. La correspondance capacité/décalage de la fréquence de résonance du circuit a permis d'estimer la réponse en température de la cellule avec une sensibilité de l'ordre de  $5\text{MHz}/^\circ\text{C}$ . La variation de la capacité, extraite à l'aide d'un changement de température, présente un comportement quasi linéaire en première approximation. Cette capacité va finalement être intégrée dans un système composé d'un filtre et d'une antenne, et interrogée par un lecteur.

Le présent capteur est envisagé pour surveiller la température de l'ensemble des organes des véhicules de transports et de gérer en temps réel les situations critiques. Davantage, pendant toute la durée du trajet, le superviseur n'aura pas besoin de charger la batterie ou de la changer.

## VI. Références

- [1] ‘Ceramic Disc Capacitors Class 1 and 2’, Vishay BCcomponents, 2010, [http:// www.vishay.com](http://www.vishay.com).
- [2] S. Maloy, ‘What is the capacitance of this Capacitor?’, TDK Components USA, Inc., June 1999.
- [3] ‘Ceramic capacitors’, The capacitance Company Kemet, [http:// www.Kemet.com](http://www.Kemet.com).
- [4] R. I. Rodriguez and Y. Jia, ‘A wireless inductive-capacitive (L-C) sensor for rotating component temperature monitoring’, *International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems*, Vol. 4, No. 2, June 2011.
- [5] Y. Wang, Y. Jia, Q. Chen and W. Yanyun, ‘A Passive Wireless Temperature Sensor for Harsh Environment Applications’, *Sensors Journal*, Vol. 8, pp.7982-7995, 2008.
- [6] S. Trivijitkasem and K. Koyvanich, ‘Characterization of Lead Lanthanum Zirconate Titanate (PLZT) Ceramics Sintered at Various Temperatures’ *Kasetsart Journal (Natural Science)*, Vol. 41, pp.192 – 197, 2007.
- [7] E.D. Birdsell, J. Park, and M.G. Allen, ‘Wireless Ceramic Sensors Operating in high Temperature Environments, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2004.
- [8] T.J. Harpster, S. Hauvespre, M.R. Dokmeci, K.A. Najafi, ‘Passive Humidity Monitoring System for in Situ Remote Wireless Testing of Micropackages’, *IEEE, Journal Of Microelectromechanical Systems*, Vol. 11, No. 1, February 2002
- [9] Y. Jia, ‘Passive Wireless Temperature Sensors and Pressure Sensors’, *Laboratory for Integrated Sensing Technologies, University of Puerto Rico, Mayaguez*, June 2009.
- [10] J. Masuch and Manuel D. Restituto, ‘Design constraints for the inductive power and data link of an implanted body sensor’, *IEEE European Conference on Circuit Theory and Design*, 2009.
- [11] K. M. Silay, C. Dehollain and M. Declercq, ‘Inductive Power Link for a Wireless Cortical Implant with Biocompatible Packaging’ *IEEE Sensors*, 2010.

## *CHAPITRE III*

---

### ARCHITECTURE DU CAPTEUR A MODES DE GALERIE ET PROCEDE DE MESURE DE LA TEMPERATURE

---



---

## TABLE DES MATIERES

---

I. Introduction .....	63
II. Conception du capteur de température passif et sans fil.....	63
1. Filtre à base d'un résonateur diélectrique à modes de galerie .....	65
1.1. Présentation des modes de galerie .....	65
1.2. Avantage des modes de galerie pour la détection de température.....	66
2. Capteur à base de modes de galerie résonant en bande millimétrique.....	67
3. Etude des paramètres géométriques du capteur .....	68
4. Méthode d'interrogation du capteur .....	69
III. Résultats de simulation du capteur complet.....	72
IV. Application du capteur pour la détection d'incendie marine.....	77
V. Conclusion.....	79
VI. Références .....	81

---

## **I. Introduction**

Plusieurs travaux de recherche sont axés autour de l'optimisation de la consommation énergétique des capteurs. Cela à travers l'utilisation des techniques de conservation innovantes, comme celles traitées dans le premier chapitre, afin d'améliorer les performances du réseau notamment la maximisation de sa durée de vie. Dans le chapitre précédent nous avons proposé un capteur passif fondé sur un mécanisme de résonance en réponse à la variation d'une capacité planaire. L'avantage principal de cette solution est qu'elle répond à la détection précoce des anomalies et des situations d'urgences de l'augmentation de la température. Néanmoins, en regardant plus en détail le fonctionnement de ce système, nous avons détecté quelques limites dans cette solution. Ces limites sont liées principalement à la distance d'interrogation et de lecture d'information.

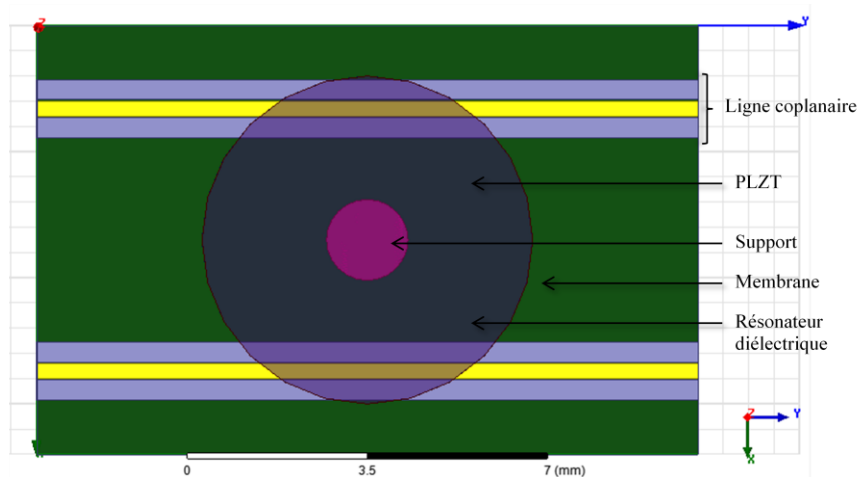
Il nous paraît donc rationnel de proposer un nouveau dispositif permettant d'augmenter cette distance tout en préservant l'aspect 'battery less' du système. Le capteur proposé dans ce chapitre, présente une solution technologique intéressante pour la détection de température, permettant ainsi une consommation extrêmement basse par rapport aux techniques classiquement connues. Ce nouveau dispositif, fortement intégré, ne nécessite aucune alimentation embarquée et utilise une transduction électromagnétique pour la mesure de température.

## **II. Conception du capteur de température passif et sans fil**

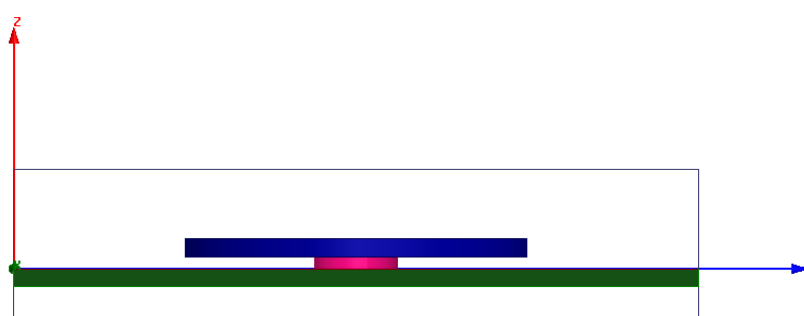
Depuis des années, les résonateurs diélectriques (RDs) ont pris une place très importante dans le domaine des microondes pour de nombreuses applications, telles que la réalisation d'oscillateur ou de dispositifs de filtrage [1]. Les progrès remarquables dans la réalisation de matériaux diélectriques, autant sur la fiabilité que sur l'amélioration de la tangente de pertes aux fréquences microondes, rendent possible leur utilisation allant des fréquences microondes aux fréquences millimétriques. Les dimensions de ces résonateurs pouvant être aujourd'hui de petite taille, il est possible de les intégrer à de nombreux systèmes de télécommunication, notamment les systèmes de filtrage où les résonateurs diélectriques ont permis de garder de très bonnes caractéristiques tout en réduisant leur encombrement. Ces domaines ont conduit à une technologie mature qui permet la réalisation de dispositifs fiables.

Nous avons repris le dispositif proposé par B. Guillon [2], composé d'une plateforme silicium avec des lignes coplanaires sur membrane. La seconde partie est un résonateur diélectrique

monté sur une cale entre les deux lignes coplanaires. L'ensemble du dispositif était couplé à un amplificateur MMIC (Monolithic Microwave Integrated Circuit) qui a permis par la suite de concevoir un oscillateur millimétrique [3]. Nous pouvons constater que le dispositif conçu par B. Guillon était destiné à la réalisation d'un oscillateur ce qui n'est pas le cas pour nous. L'objectif était d'explorer l'intérêt que peut apporter ce dispositif dans la mesure de faibles fluctuations de la permittivité diélectrique d'un matériau sensible au changement de la température. Par conséquent, la structure proposée est conçue avec des outils de simulation plus performants par rapport à ceux qui existaient dans les années 90, puisqu'ils nous permettent de simuler l'ensemble de la structure : lignes coplanaires, matériau sensible et résonateur diélectrique. Par ailleurs, nous avons redimensionné le dispositif afin d'avoir le meilleur signal de transmission possible.



(a)



(b)

**Fig.1 : Conception du capteur de température : (a) Vue de dessus, (b) Vue en coupe.**

Le capteur de température illustré sur la Figure 1, est constitué de deux parties : les lignes coplanaires micro-usinées et le résonateur diélectrique couvert du matériau sensible maintenus par un support entre et au-dessus de ces deux lignes. Dans la suite de ce chapitre, nous allons détailler le design de ce dispositif avant d'exposer les résultats de simulation de la structure optimisée.

## **1. Filtre à base d'un résonateur diélectrique à modes de galerie**

Les résonateurs diélectriques fonctionnant sur des modes conventionnels de type transverses électriques (TE) ou transverses magnétiques (TM), rayonnent une partie non négligeable d'énergie aux fréquences des longueurs d'ondes millimétriques [4]. Afin de s'affranchir des problèmes de dimensions et des pertes par rayonnement aux fréquences millimétriques, nous avons fait le choix d'utiliser un résonateur diélectrique excité sur des modes de galerie (Whispering Gallery Modes).

### **1.1. Présentation des modes de galerie**

Du point de vue électromagnétique, une des caractéristiques essentielles des WGMs se situe dans la répartition de l'énergie dans le résonateur. En effet, l'énergie se confine par pôles en périphérie du RD, notamment dans un cylindre diélectrique, l'énergie des modes de galerie possède la particularité de se confiner dans une région proche de l'interface air – diélectrique. De plus, l'un des principaux avantages offerts par ce type de mode, c'est la possibilité d'exciter un résonateur diélectrique avec une géométrie surdimensionnée tout en restant aux fréquences millimétriques [5, 6]. Les dimensions d'un résonateur excité sur un mode de galerie sont beaucoup plus grandes que celles des résonateurs utilisés sur les modes conventionnels de type TE ou TM. Cela facilite leurs utilisations aux hautes fréquences puisque, compte tenu des dimensions du résonateur, celui-ci peut être manipulé plus facilement.

Les modes de galerie des résonateurs diélectriques sont classés en deux familles : les modes  $WGH_{n,m,l}$  (modes de galerie à champs magnétiques) et  $WGE_{n,m,l}$  (modes de galerie à champs électrique). Cette nomenclature permet d'identifier chaque mode en tenant compte de l'état de polarisation et de l'importance des composantes transversales du champ électromagnétique [7]. Ainsi, nous distinguons, d'une part, les modes WGE dont la composante axiale du champ est essentiellement magnétique alors que les composantes transverses sont principalement électriques. D'autre part, nous distinguons les modes WGH qui constituent les modes duaux des WGE. Les trois entiers  $n$ ,  $m$  et  $l$  rendent compte de la configuration spatiale du champ

électromagnétique à l'intérieur du résonateur (nombre de variations du champ suivant les trois directions du repère cylindrique) :

- n: nombre de variations suivant la direction azimutale
- m: nombre de variations suivant la direction radiale
- l: nombre de variations suivant la direction axiale

Il est important de mentionner que le nombre azimutal a une influence sur le rayon de caustique. En effet, un nombre azimutal élevé se traduit par un rayon caustique plus important et par conséquent par un confinement de l'énergie électromagnétique plus proche de la surface latérale du résonateur.

### **1.2. Avantages des modes de galerie pour la détection de température**

Parmi les principaux avantages des modes de galerie, on notera ici les plus importants pour notre étude. Tout d'abord, les dimensions du résonateur excité sur un mode de galerie sont beaucoup plus grandes que dans les cas des modes conventionnels de type TE ou TM. Ce surdimensionnement permet d'envisager l'emploi de ce résonateur aux fréquences millimétriques en facilitant la détection de température. D'autre part, grâce au confinement important de l'énergie dans le diélectrique, les facteurs de qualité à vide ne sont pratiquement limités qu'à la tangente de pertes du matériau utilisé [7]. Ce dernier sera ainsi très sensible à la présence d'une variation des propriétés diélectriques du matériau sensible, ce qui va favoriser sa détection grâce un décalage de la fréquence de résonance d'un mode de galerie.

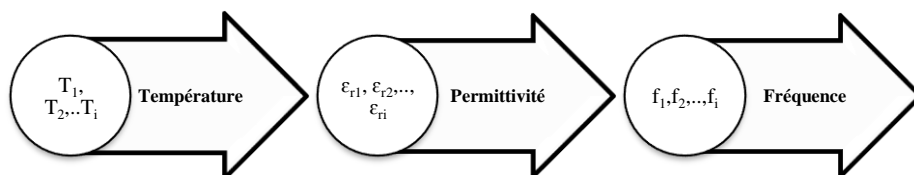
De plus, il est important de noter que les modes de galerie présentent la particularité de ne comporter aucune énergie au centre du résonateur. Comme nous l'avons déjà mentionné, cette zone est d'autant plus grande que le nombre azimutal est important. La partie centrale peut être donc utilisée pour fixer le résonateur, nous pourrions y rajouter une cale au circuit afin de le maintenir ou de régler son positionnement par rapport au circuit de couplage (lignes) sans perturber son fonctionnement. Enfin, ces modes ne sont plus stationnaires mais progressifs quand le résonateur est excité par une source à ondes progressives, dont la constante de propagation est voisine de celle du mode de galerie. Le mode se propage alors suivant la direction azimutale. Ce type d'excitation pour les modes de galerie se traduit par un couplage de type directif avec la ligne. Par conséquent, ce couplage permettra d'envisager la conception d'un filtre directif à bande passante étroite qui permettra à son tour la mesure de température grâce au décalage de sa fréquence de résonance.

## 2. Capteur à base de modes de galerie résonant en bande millimétrique

Dans l'optique de définir un capteur de température novateur qui présente de hautes performances en RF, nous allons tirer profit des propriétés diélectriques du matériau sensible, l'usinage des lignes coplanaires sur membrane ainsi que les caractéristiques des modes de galerie. Ce nouveau dispositif de détection est basé sur la modification de la fréquence de résonance du résonateur diélectrique à la présence d'une variation de la température. Cela se fait par l'intermédiaire d'un matériau pérovskite déposé au dessus de ce résonateur dont la constante diélectrique varie en présence d'un changement de température.

Le concept général choisi consiste à modifier le couplage électromagnétique qui existe dans le dispositif par la température (cf. Fig.2). Ce concept permet d'obtenir une très grande sensibilité. En effet, le couplage variable peut se faire en modifiant (globalement ou localement) l'environnement autour des lignes de champ électromagnétique par modification directe des propriétés électromagnétiques du matériau sensible.

En d'autres termes, une variation de la température entraîne la modification de la permittivité du matériau sensible et donc une variation du champ électromagnétique. Ce changement agit sur les paramètres électriques du résonateur, à savoir la fréquence de résonance et le facteur de qualité. Ainsi, un résonateur conçu pour fonctionner à une fréquence centrale  $f_0$  pour un mode de galerie particulier, voit celle-ci se décaler en fonction de la variation de la constante diélectrique du matériau sensible. Le champ électromagnétique est utilisé par conséquent pour mesurer la variation de la température. Le principe de détection repose alors sur le décalage de la fréquence de résonance des modes de galerie dans le résonateur diélectrique. Ce dernier ainsi que le matériau sensible sont utilisés ici pour mesurer l'influence de la permittivité de ce matériau et en déduire la variation de la température.



**Fig.2 : Principe de la transduction électromagnétique.**

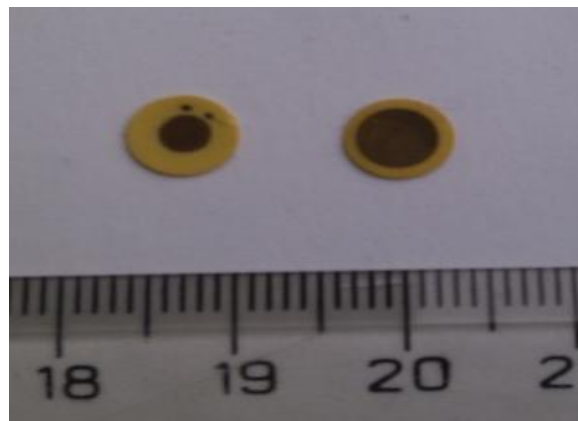
Par ailleurs, ce type de technique de détection basée sur la transduction électromagnétique a fait preuve des résultats intéressants pour la réalisation d'un oscillateur dans un premier lieu, et par la suite pour des applications spécifiques de détection de gaz et de pression comme mentionné dans le chapitre I. Ces capteurs passifs micro-ondes ont été réalisés en s'appuyant

sur le phénomène de relaxation présent dans des matériaux sensibles. En particulier, la mise en place d'un capteur micro-onde à base de  $\text{TiO}_2$  fonctionnel dans la bande Ka a été proposée pour la détection de concentration du gaz. Ce détecteur s'appuie sur la variation directe des propriétés diélectriques du résonateur à la présence d'un gaz.

### 3. Etude des paramètres géométriques du capteur

Il existe des paramètres qui peuvent modifier les caractéristiques diélectriques d'un matériau comme la température par exemple. Dans notre cas, on vise que cette modification engendre une variation de fréquence dans le domaine des hyperfréquences. L'élément de base est le matériau captant dont la constante diélectrique varie avec la température. Le choix du matériau sensible n'est pas évident à cause des exigences imposées qui compliquent l'intégration des matériaux diélectriques dans des circuits microélectroniques ou leur exploitation pour la fabrication du capteur. Pour cela, nous avons fait une étude bibliographique approfondie afin de trouver le matériau adéquat qui répond à notre cahier de charge.

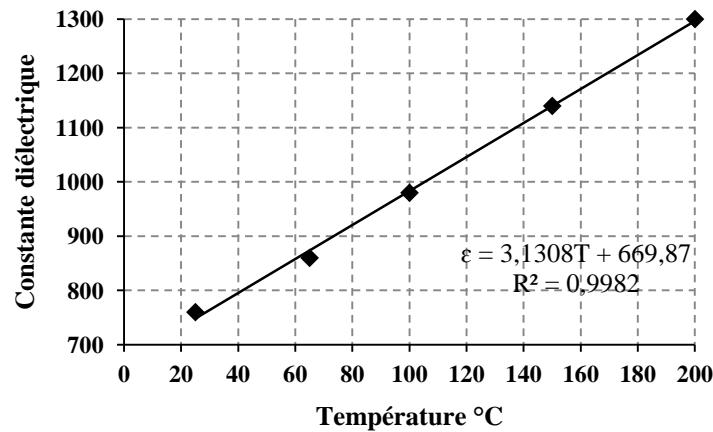
Parmi les matériaux proposés dans la littérature, notre choix s'est porté sur le Lead-Lanthanum-Zirconate-Titanate (Abrégé en PLZT). De ce fait, et dans le cadre de notre collaboration avec le professeur Pawel Wawrzala de la Faculté d'informatique et des sciences des matériaux - Université de Silésie de Pologne (cf. Fig.3) [8, 9], nous disposons de plusieurs échantillons réalisés dans son laboratoire.



**Fig.3 : Echantillons du matériau PLZT réalisés par P. Wawrzala et J. Korzekwa à l'Université Silésie de Pologne.**

Également connu sous le nom de Lanthanum Doped Lead Zirconate Titanate, ce matériau répond à nos besoins en termes de gamme de température et de fréquence de fonctionnement. Notamment, il présente une propriété diélectrique qui dépend du changement de la

température (cf. Fig.4) [10, 11]. En effet, la variation de la température a un impact sur les propriétés de ce matériau puisqu'elle provoque une modification plus ou moins importante de sa permittivité diélectrique [12]. Ce PLZT permettra alors de détecter le changement de la température à travers son intégration dans le circuit microonde décrit dans la Figure 1, et ceci avec un rayon de  $R_{PLZT}=3,25\text{mm}$  et une épaisseur de  $H_{PLZT}=10\mu\text{m}$ .



**Fig.4 : Constante diélectrique du PLZT en fonction de la température.**

Le système étudié est basé relativement sur l'utilisation d'un résonateur diélectrique et de deux lignes coplanaires sur membrane. Ces lignes servent de support d'excitation pour les modes de galerie du RD. L'étude du mécanisme de fonctionnement de ces deux composants était largement abordée dans la littérature [13, 14, 15]. Ainsi, le RD présente un rayon de  $R_{RD}=3,25\text{mm}$ , une épaisseur de  $H_{RD}=360\mu\text{m}$  et une permittivité diélectrique relative de 80. Ce résonateur diélectrique est maintenu sur le plan des lignes par une cale en Alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) de rayon  $R_{CALE}=0,8\text{mm}$  et de hauteur  $H_{CALE}=230\mu\text{m}$ .

Par la suite, et après avoir fait le choix du matériau sensible ainsi que le mécanisme d'excitation des modes de galerie du RD, nous avons opté de réaliser une interrogation radar pour la transmission de l'information relative à la température.

#### **4. Méthode d'interrogation du capteur**

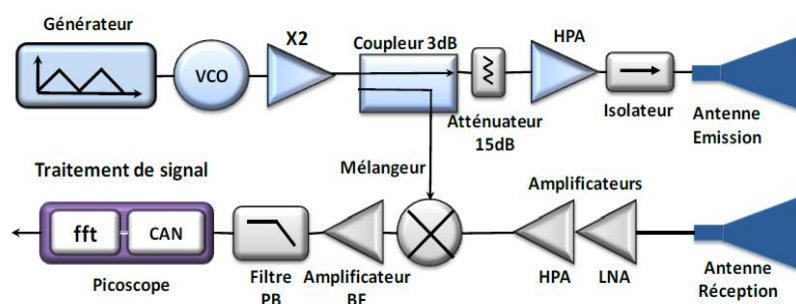
Le mode de transduction, la taille et la fréquence de fonctionnement de ce capteur, sont des caractéristiques importantes qui présentent une rupture technologique avec les systèmes existants des capteurs sans fil passifs de température RFID et SAW.

Pour être interrogeable à distance le capteur a besoin d'un lecteur qui soit compatible avec ses caractéristiques de fonctionnement. Des critères techniques pour l'utilisation d'un lecteur sont

à définir pour satisfaire la détection mais également pour que la portée d'interrogation soit la plus longue possible. Les lecteurs existants pour l'interrogation des capteurs passifs, présents dans les technologies RFID et SAW, ne répondent pas aux problématiques imposées à notre étude en termes de hautes fréquences d'utilisation et de portée supérieure à 10 mètres.

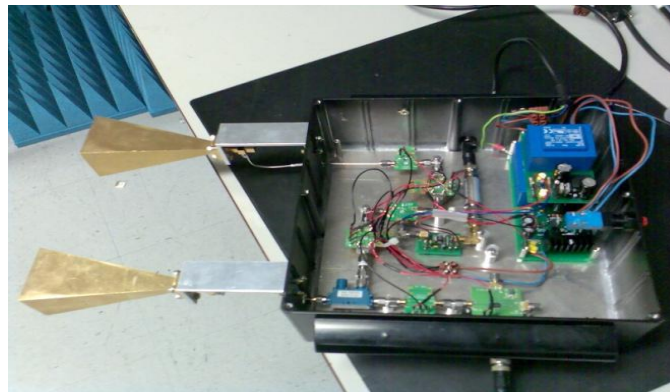
De ce fait, les caractéristiques de notre capteur : grande portée de détection, analyse et traitements de signaux à hautes fréquences, nous orientent à envisager un lecteur de technologie radar. Son principe de fonctionnement, comme pour tout radar, est d'envoyer un flux d'ondes électromagnétiques vers le capteur qui retournera un écho dont l'amplitude de puissance dépendra de la température mesurée. En effet, le radar est utilisé dans de nombreuses applications en l'occurrence de la mesure de niveau, détection d'obstacle pour l'automobile, la météorologie ou le domaine militaire [16]. Son utilisation pour l'interrogation de réseau de capteur passif à transduction RF présente une solution innovante.

Le capteur de température proposé utilise une transduction radiofréquence millimétrique. Les fréquences de résonance du capteur sont comprises dans la bande Ka et se décalent d'une largeur de bande de quelques centaines de MHz à quelques GHz. Le capteur sera relié par une antenne pour communiquer à distance avec le lecteur. Pour interroger ce capteur, nous nous sommes tournés vers un lecteur de technologie radar réalisé lors de la thèse de F. Chebila [17], suivant des critères techniques précis en termes de fréquence de fonctionnement satisfaisant une communication sans fil sur une portée supérieure à 20 mètres. Cette distance reste un point clé car de nombreuses applications dans les secteurs de l'aéronautique, du bâtiment, du nucléaire, y font référence pour la mise en place de réseaux de capteurs. La technique de modulation de ce radar et son architecture basée autour d'un oscillateur contrôlé en tension (Voltage Controlled Oscillator / VCO) a facilité sa réalisation et son réglage (cf. Fig.5).



**Fig.5 : Schéma synoptique du Radar à 30GHz.**

Le radar réalisé en 2011 est un radar continu à modulation de fréquence (FMCW), utilisé dans la bande Ka autour de 30GHz (cf. Fig. 6) [17]. Ce radar HF aura pour fonction de détecter à distance les mesures du capteur de température. Les signaux reçus par le lecteur doivent donc nous informer sur la distance entre le radar et le capteur mais également sur la valeur de la température venant de la cellule de mesure interrogée. En conclusion, le radar en question satisfait trois paramètres importants pour la lecture à distance : Sa portée est supérieure à 20m, travaille à une fréquence compatible avec le capteur proposé et contient un système d'identification des cellules au sein d'un réseau.



**Fig.6 : Photo du Radar.**

Les avantages potentiels de ce type de transducteur sont :

- Une réduction importante des pertes de signal grâce à la modulation directe du signal hyperfréquence par la grandeur à mesurer.
- Une grande sensibilité de la propagation électromagnétique à l'environnement mise à profit pour réaliser la fonction capteur.
- Une grande résolution spatiale et temporelle grâce à la fréquence élevée de fonctionnement.
- Un choix plus souple de la fréquence de fonctionnement qui peut s'adapter aux différentes contraintes d'utilisation du capteur.
- Une facilité de son intégration dans une chaîne de mesure (radar et antennes).

La partie qui suit est consacrée aux résultats des mesures hyperfréquences réalisées à l'aide d'un simulateur performant, ceci permet de suivre le décalage fréquentiel et d'établir une relation directe entre la variation de la température et le décalage en fréquence observé. On réalise, de la sorte, une mesure de température via une transduction électromagnétique.

### III. Résultats de simulation du capteur complet

Des simulations successives en oscillations libres (Eigen mode) utilisant le logiciel HFSS<sup>TM</sup>, appliquées au résonateurs diélectriques permettent de déterminer le diamètre, l'épaisseur, la permittivité du résonateur diélectrique ainsi que la répartition du champ électromagnétique nécessaire pour définir la caustique et le couplage optimal avec les lignes coplanaires (cf. Fig.7). La détermination de la caustique permet d'établir la répartition du champ électromagnétique dans le RD et conduit à la définition de la position des lignes coplanaires. En outre, le diamètre du résonateur ainsi que le confinement du champ électromagnétique dans celui-ci imposent la distance entre ces deux lignes micro-usinées.

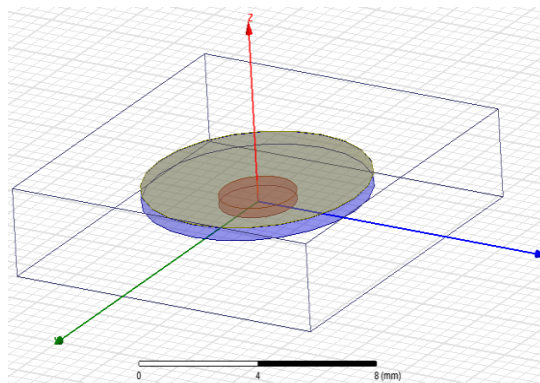


Fig.7 : Le matériau sensible et le résonateur dans la cavité avec support.

Dans cette étude, nous avons étudié un résonateur diélectrique de permittivité relative égale à 80 et sans pertes. L'épaisseur et le diamètre du résonateur diélectrique permettent de déterminer les modes et les fréquences de résonances associées. Par la suite, on s'intéresse à la modification des propriétés physiques du matériau PLZT en présence d'un changement de température ; plus précisément la variation de sa permittivité diélectrique. Comme illustré sur la Figure 8, nous observons la répartition du champ électrique du mode  $WGE_{8,0,0}$  dans le résonateur diélectrique, elle est ainsi isolée autour de 30GHz.

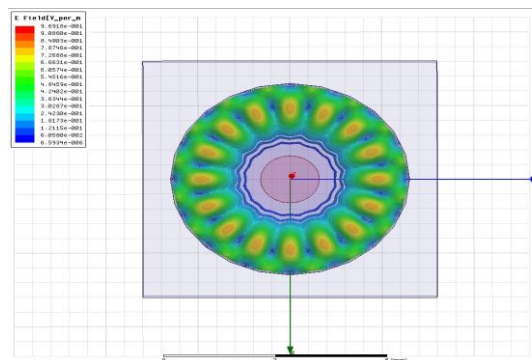
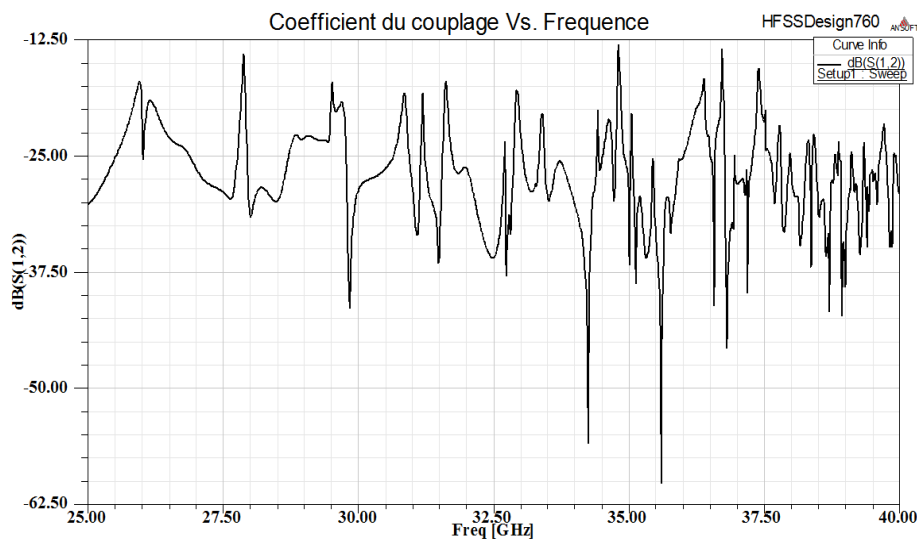


Fig.8 : La répartition du champ du mode  $WGE_{8,0,0}$  à 30GHz pour le calcul en Eigenmode (HFSS<sup>TM</sup>).

Nous rappelons que le circuit global de notre système de détection représente un filtre directif constitué de deux parties:

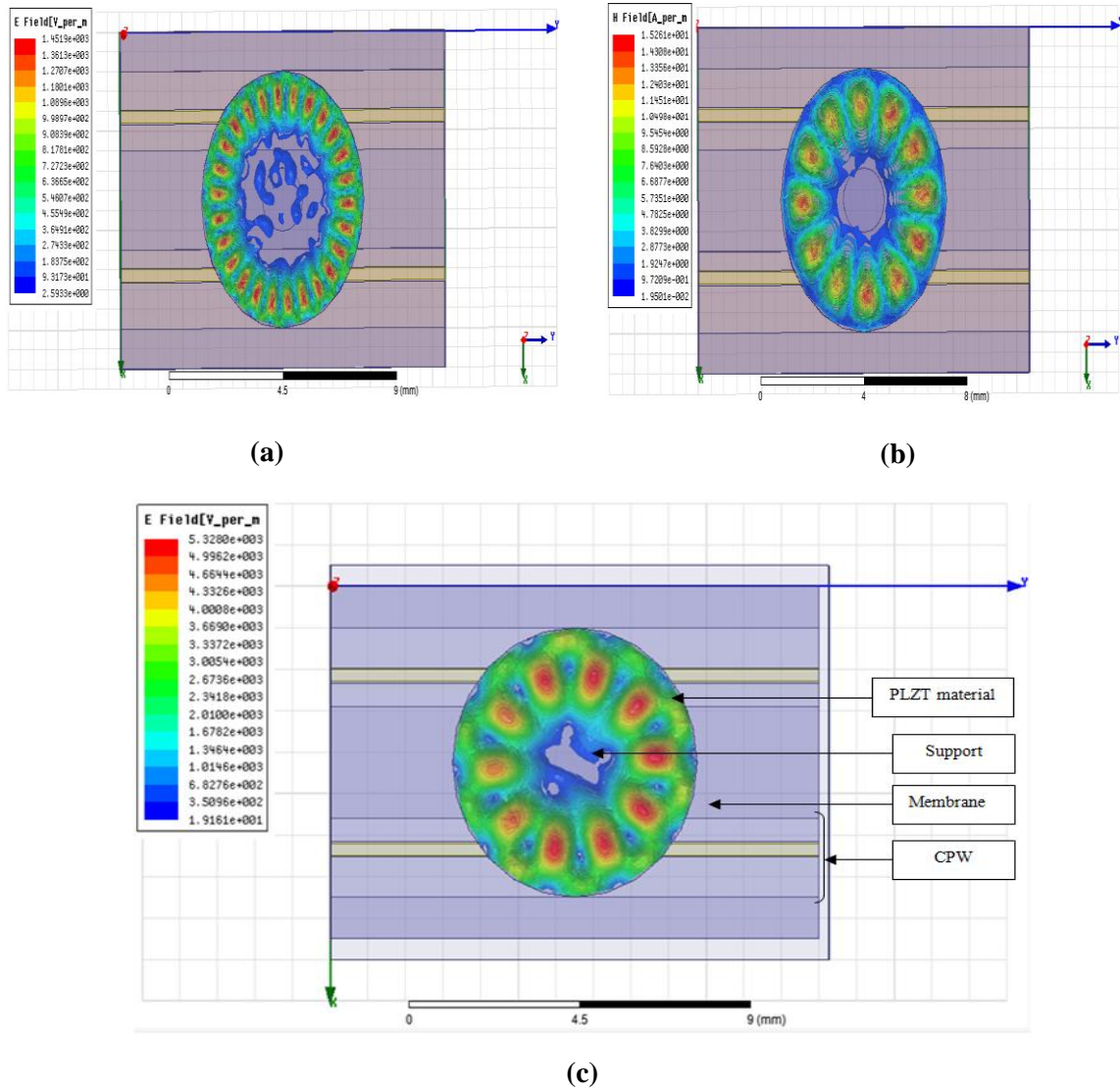
- Lignes coplanaires (CPWs) utilisées pour l'excitation du RD et la propagation du champ électromagnétique.
- Résonateur diélectrique utilisé pour le couplage et excité en WGM, ainsi que le matériau PLZT considérée comme élément de reconnaissance.

A partir du coefficient de couplage  $S_{12}$  entre l'accès 1 et 2 (simulé) donné en fonction de la fréquence, les modes de galerie WGE et WGH ont été identifiés sur une gamme de fréquence de 25 à 40GHz. La Figure 9 montre l'allure du paramètre de transmission entre l'accès 1 et 2 dans la bande Ka.



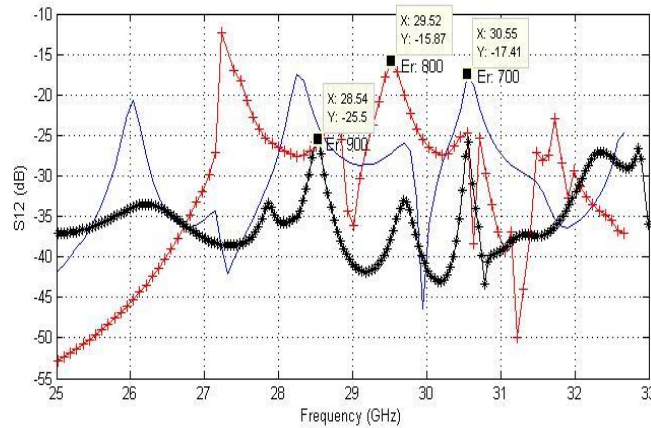
**Fig.9 : Coefficient de couplage  $S_{12}$  donné en fonction de la fréquence pour  $\epsilon_{PLZT}=760$ .**

La Figure 10 ((a), (b) et (c)) montre des exemples de résultats de simulation correspondants à des amplitudes du champ magnétique des modes de galerie à leurs fréquences de résonance.



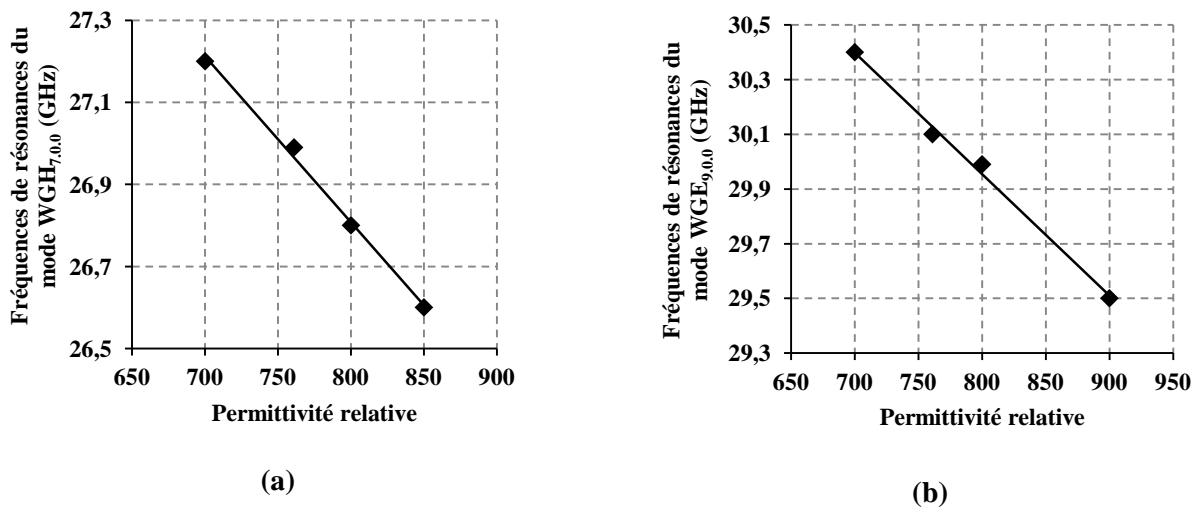
**Fig.10 : Amplitude du champ magnétique des modes de galerie : (a)  $WGE_{13,0,0}$ , (b)  $WGH_{6,0,0}$  et (c)  $WGE_{5,0,0}$ .**

En s'appuyant sur les résultats obtenus ainsi que ceux de la littérature, le PLZT apparaît comme le bon candidat pour réaliser la transduction de la température en fréquence. En effet, il a été démontré précédemment que la permittivité diélectrique de ce matériau peut être modifiée en présence d'une variation de température. Nous avons donc voulu analyser l'impact d'une telle modification sur la fréquence de résonance d'un mode de galerie. Pour cela, on a varié la constante diélectrique  $\epsilon_{rPLZT}$  entre 700 à 900 avec une variation de 14%. Comme illustré sur la Figure 11, la variation de la permittivité du PLZT produit des modifications mesurables sur la fréquence de résonance, traduites par un décalage vers les basses fréquences d'environ 1GHz, dans le cas du mode  $WGE_{4,0,0}$  par exemple.



**Fig.11 : Coefficient de transmission ( $S_{12}$ ) en fonction de la fréquence pour des variations de permittivité du PLZT ( $\epsilon_r = 700, 800$  et  $900$ ).**

Ces modifications sur la fréquence de résonance pour des variations de permittivité du matériau PLZT mettent en évidence la grande sensibilité de ce type de dispositif. Comme mentionné dans le 1<sup>er</sup> chapitre, cette sensibilité représente celle du transducteur électromagnétique, qui transforme une variation de permittivité en variation de fréquence de résonance d'un WGM. Dans l'optique d'évaluer cette sensibilité, nous avons représenté sur la Figure 12 ((a) et (b)) les fréquences de résonances du mode  $WGH_{7,0,0}$  et  $WGE_{9,0,0}$  respectivement, en fonction de la permittivité du PLZT en présence d'une variation de la température. Les résultats obtenus avec un résonateur diélectrique cylindrique ont montré que les fréquences de résonance des modes de galeries sont très sensibles à la modification de la permittivité du matériau sensible. La relation entre la permittivité et les fréquences de résonance est approximativement linéaire.



**Fig. 12 : Fréquences de résonances en fonction de la permittivité du PLZT : (a) mode  $WGH_{7,0,0}$  et (b) mode  $WGE_{9,0,0}$ .**

Nous rappelons donc que la sensibilité du capteur est la combinaison de la sensibilité du transducteur avec celle de la variation de permittivité du PLZT en fonction de la température. Comme indiqué sur la Figure 13, nous présentons les sensibilités des autres modes WGM d'ordre supérieur, e.g.,  $WGE_{11,0,0}$ ,  $WGE_{12,0,0}$ ,  $WGE_{13,0,0}$ ,  $WGE_{14,0,0}$ .

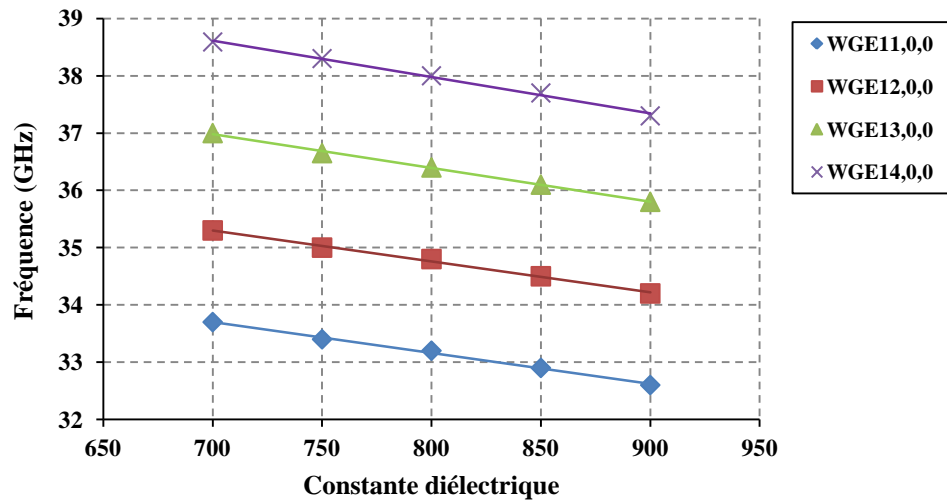


Fig.13 : Fréquence de résonance en fonction de la permittivité du matériau sensible.

De toute évidence, les modes de galerie dans le résonateur diélectrique ainsi que le matériau PLZT sont utilisés ici pour mesurer la modification de permittivité et en déduire la variation de la température. A partir de simulations numériques électromagnétiques rigoureuses (HFSS<sup>TM</sup>), nous montrons ici qu'une faible modification de la permittivité du matériau sensible induit une forte variation de la fréquence de résonance des modes de galerie du résonateur diélectrique.

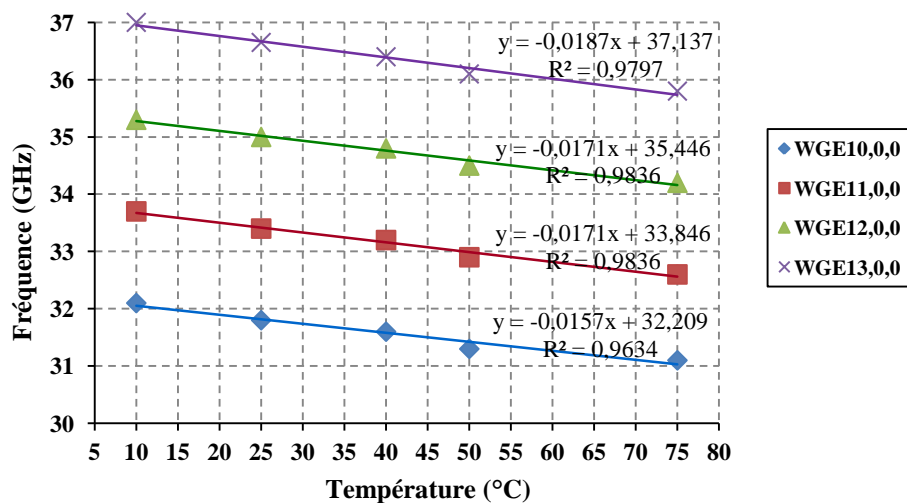


Fig.14 : Fréquence de résonance en fonction de la température.

En s'appuyant sur les caractéristiques du matériau sensible utilisé et les résultats précédents, il est donc possible de déduire la relation entre la fréquence de résonance des modes de galerie détectés et la température. La Figure 14 illustre cette relation pour les modes  $WGE_{10,0,0}$ ,  $WGE_{11,0,0}$ ,  $WGE_{12,0,0}$  et  $WGE_{13,0,0}$ , ce qui permet de vérifier la linéarité du capteur entre ces deux paramètres. De ce fait, une dépendance linéaire entre la fréquence et la température est clairement observée dans le cas de tous les modes détectés.

En d'autres termes, la dépendance relativement linéaire entre la température et la constante diélectrique du matériau sensible, conduit à un changement du coefficient de couplage entre les deux guides d'ondes coplanaires et ceci se traduit par la suite par un décalage de la fréquence de résonance du système. De ce fait, une variation de température entraîne généralement un déplacement de la fréquence de résonance du mode excité dans le résonateur diélectrique.

#### **IV. Application du capteur pour la détection d'incendie marine**

En termes de domaines d'applications, les réseaux de capteurs détiennent un potentiel qui révolutionne de nombreux secteurs de notre économie et notre vie quotidienne ; de la surveillance et la préservation de l'environnement, à la fabrication industrielle, en passant par l'automatisation dans les secteurs de transport et de la santé, la modernisation de la médecine, de l'agriculture, de la télématique et de la logistique. Cette nouvelle technologie promet de révolutionner notre façon de vivre, de travailler et d'interagir avec l'environnement physique qui nous entoure. Des capteurs communicants sans fil et dotés de capacités de calcul facilitent une série d'applications irréalisables ou trop chères il y a quelques années. Aujourd'hui, ces dispositifs minuscules et bon marché peuvent être littéralement éparpillés sur des routes, des structures, des murs ou des machines, capables de détecter une variété de phénomènes physiques. De nombreux domaines d'application sont alors envisagés tels que la détection et la surveillance des désastres, le contrôle de l'environnement et la cartographie de la biodiversité, le bâtiment intelligent, l'agriculture de précision, la surveillance et la maintenance préventive des machines, la médecine et la santé, la logistique et les transports intelligents.

A l'heure actuelle, l'utilisation de ces capteurs est de plus en plus exigée pour la supervision et la sécurité. Les industriels proposent alors des capteurs sans fil qui peuvent renseigner

l'utilisateur sur l'évolution de différentes grandeurs physiques, ils constituent donc un axe de recherche très fertile. Par ailleurs, le développement des capteurs de température présente plusieurs intérêts dont le plus important est la sécurité. La tendance actuelle, compte-tenu des nouvelles applications qui émergent, est de miniaturiser à l'extrême les capteurs et les rendre compatibles avec les systèmes de traitement du signal afin d'obtenir des systèmes totalement intégrés. Les objectifs environnementaux et la lutte contre l'incendie représentent les applications les plus visées de nos jours. Les listes des applications (Sécurité, contrôle, analyse, confort, etc.) et domaine d'applications (Environnement, sécurité, médical, automobile, domotique, etc.) sont très longues traduisant le grand intérêt pour le développement des capteurs de température.

Le développement de ces systèmes comportent généralement un capteur miniature, bas coût et performant. C'est ce qui motive notre recherche actuelle. En effet, la miniaturisation est importante pour pouvoir embarquer facilement les systèmes autonomes de plus en plus distribués en réseau. Le prix de revient est bien sûr un facteur important et il sera déterminant pour le développement marketing de ces capteurs. La quête de la performance est dans le but de fiabiliser les informations obtenues par ces capteurs qui doivent rester à faible coût. Ceci est pratiquement intéressant pour l'application visée : L'amélioration de la lutte contre les incendies dans des applications marines.

A l'évidence, de tous les désastres qui peuvent arriver à un navire, l'incendie est certainement le plus affreux. À terre, les occupants d'édifices en flamme peuvent compter sur les secours des pompes à incendie et des échelles qui peuvent se trouver sur les lieux quelques minutes après le premier signal d'alarme. Un navire en mer, par contre, ne doit compter que sur lui-même dans la lutte contre le feu comme pour toute autre chose, et depuis le premier signal d'incendie jusqu'à la retraite ou à la victoire durement arrachée, il est possible qu'il y ait aucune chance de sauvetage par canot si le temps est mauvais.

Les conséquences d'un incendie à bord d'un navire sont toujours coûteuses et parfois tragiques. Il est donc essentiel d'avoir des systèmes de lutte contre les incendies efficaces mais l'on sait maintenant que les capteurs de températures classiques qui étaient très utilisés dans le passé, ont d'importants inconvénients. Le présent dispositif vise à résoudre ce problème, en faisant usage de moyens simple, autonome et peu coûteux. Ainsi, grâce à cette conception, on réduit grandement la consommation énergétique globale du réseau de capteurs de température à bord des navires.

Ainsi, pour contrôler efficacement la température des navires, l'utilisation de ce capteur passif de température permet de garder un œil sur la température à tout moment, pour de longues durées et avertir le personnel en cas de problème. Si la température dans une zone de surveillance dépasse soudainement la valeur seuil  $T_{\text{seuil}}$ , le capteur la détecte en temps réel et transmet l'information au superviseur afin d'intervenir. Cela permet d'éviter le risque que l'incendie reste longtemps ignoré et donc de prendre une ampleur telle que toute action pour le combattre sera trop tardive et donc vaine.

Ce système de protection anti-incendie marine permet donc de détecter à temps tout risque d'incendie, avant ou rapidement après le déclenchement de celui-ci, et de gérer en temps réel les alarmes pendant toute la durée du trajet. De toute évidence, le déploiement d'un tel réseau peut constituer un système d'alarme qui servira à détecter les intrusions, et il présente un grand avantage pour l'utilisation de longue durée à bord de navires sans avoir besoin de charger la batterie ou de la changer.

## **V. Conclusion**

Les résultats que nous avons présentés dans ce chapitre sont très encourageants : la simulation d'un capteur de température passif basé sur une transduction électromagnétique a donné de très bonnes performances. Ces résultats de simulation obtenus, en utilisant des travaux précédents, nous permettent d'envisager la réalisation d'un nouveau capteur de température performant. L'optimisation de ce type de dispositif était faite en utilisant des simulations électromagnétiques globales sur HFSS<sup>TM</sup> incluant tous les éléments du système. L'association du matériau PLZT, le résonateur diélectrique et les lignes coplanaires permet de réaliser un filtre à bande étroite que nous excitons par une onde électromagnétique aux hyperfréquences en modes de galerie.

Le point clef de notre application est basé sur les performances du matériau pérovskite et sur les propriétés des modes de galerie des RDs. En effet, le résonateur diélectrique, couvert du matériau sensible, est excité sur un mode de galerie qui autorise son surdimensionnement aux ondes millimétriques et son association avec des lignes de transmission afin d'avoir un filtre directif passe bande. Ainsi, nous avons conçu l'ensemble du dispositif en 3D sur HFSS<sup>TM</sup>. Ce logiciel présente l'avantage d'être rigoureux et permet à priori de prendre en compte l'ensemble des caractéristiques physiques et géométriques du dispositif.

Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous avons présenté quelques résultats obtenus. Plusieurs modes de galerie ont été observés sur une large bande de fréquence ; la bande Ka. Nous avons montré donc grâce à ces simulations que la mesure de la fréquence de résonance d'un mode de galerie dans le résonateur diélectrique traduit, en principe, une variation de la température avec une sensibilité remarquable. Ceci en exploitant principalement les propriétés du matériau PLZT, en tant que matériau de détection, qui présentent des variations de permittivité à la présence d'un changement de température.

La mise en œuvre d'un tel dispositif qui propose une détection passive de température permet d'envisager la réalisation d'un capteur de température à transduction électromagnétique de grande sensibilité. La caractérisation d'un tel capteur permet d'évaluer la fréquence en termes de dispersions géométriques telles que l'influence des épaisseurs et des diamètres des matériaux, sera présentée dans le chapitre suivant.

Finalement, notre contribution met à disposition une technologie innovatrice pour répondre au besoin d'améliorer la protection du transport maritime contre les incendies. Le contrôle et la traçabilité de la température font encore appel à des procédures manuelles dépendantes de l'énergie embarquée. Le système proposé simplifie et automatise relativement l'ensemble de ces interventions manuelles et particulièrement ne nécessite aucune alimentation embarquée. Par la suite, ce dispositif anti-incendie présente une sensibilité de l'ordre de  $10\text{MHz}/^{\circ}\text{C}$ , et permet de contrôler à tout moment la température et de réagir rapidement en cas de problème.

## VI. Références

- [1] B. Guillon, 'Conception et réalisation de circuits millimétriques micro-usines sur silicium: Application à la réalisation d'un oscillateur à résonateur diélectrique en bande Ka', Thèse de doctorat de l'Université Paul Sabatier de Toulouse, 1999.
- [2] B. Guillon, D. Cros, P. Pons, J.L. Cazaux, J.C. Lalaurie, R. Plana and J. Graffeuil, 'Ka Band Micromachined Dielectric Resonator Oscillator', IEEE Electronics Letters, Vol. 35, Issue: 11, 1999.
- [3] B. Guillon, K. Grenier, P. Pons, J. L. Cazaux, J. C. Lalaurie, D. Cros and R. Plana, 'Silicon Micromachining for Millimeter-wave Applications', Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films, Vol.18, Issue 2, 2000.
- [4] J. Krupka, K. Derzakowski, A. Abramowicz, M. E. Tobar and R. G. Geyer, 'Use of Whispering-Gallery Modes for Complex Permittivity Determinations of ultra-Low-Loss Dielectric Materials' IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol.47, No.6, pp.752-759, 1999.
- [5] H. Peng, 'Study of Whispering Gallery Modes in Double Disk Sapphire Resonators', IEEE Trans. Microwave Theory Tech., Vol. 44, pp. 848-853, 1996.
- [6] V.S. Boriskina and I.A. Nosich, "Radiation And Absorption Losses Of The Whispering-Gallery-Mode Dielectric Resonators Excited By A Dielectric Waveguide", IEEE Trans. Microwave Theory Tech., vol.47, pp. 223-231, 1999.
- [7] D. Mouneyrac 'Utilisation des modes de galerie pour la caractérisation des semi-conducteurs et la réalisation d'un oscillateur ultra faible bruit de phase', Thèse de doctorat de l'Université de Limoges, 2011.
- [8] P. Wawrzala and J. Korzekwa 'PLZT type Ceramics as a Material for Applications in Power Pulse Capacitors', IEEE Proceedings, 2012.
- [9] D. Kuscer, J. Korzekwa, M. Kosec and R. Skulski, 'A- and B-compensated PLZT x/90/10: Sintering and Microstructural Analysis', Journal of the European Ceramic Society, Vol. 27, pp. 4499-4507, 2007.
- [10] F. Y. Lee, H. R. Jo, C. S. Lynch and L. Pilon, 'Pyroelectric Energy Conversion using PLZT Ceramics and the Ferroelectric-Ergodic Relaxor Phase Transition', Smart Materials and Structures, Vol. 22, IOP Publishing, 2013.
- [11] L. Kozielski, M. Plonska and M.M. Bucko, 'Electrical and Mechanical Examination of PLZT/PZT Graded Structure for Photovoltaic Driven Piezoelectric Transformers', Materials Science Forum, 2010.
- [12] S. Trivijitkasem and K. Koyvanich, 'Characterization of Lead Lanthanum Zirconate Titanate (PLZT) Ceramics Sintered at Various Temperatures' Kasetsart Journal (Natural Science), Vol. 41, pp.192 – 197, 2007.

- [13] M. M. Jatlaoui, 'Capteurs passifs a transduction électromagnétique pour la mesure sans fil de la pression', Thèse de doctorat de l'INPT de Toulouse, 2009.
- [14] M. Saadaoui, 'Optimisation des circuits passifs micro-ondes suspendus sur membrane diélectrique', Thèse de doctorat de l'Université Paul Sabatier de Toulouse, 2005.
- [15] H. Hallil, 'Conception et réalisation d'un nouveau capteur de gaz passif communicant à transduction RF', Thèse de doctorat de l'Université Paul Sabatier de Toulouse, 2010.
- [16] P. Lacomme, J. P. Hardange, J.C. Marchais and E. Normant, 'Radar Applications and Roles', Air and Spaceborne Radar Systems, pp. 347-369, Elsevier Inc., 2001.
- [17] F. Chebila 'Lecteur Radar pour Capteurs Passifs à Transduction Radio Fréquence', Thèse de doctorat de l'INPT de Toulouse, 2011.

# *CHAPITRE IV*

---

## CARACTERISATIONS, PERFORMANCES ET LIMITATIONS DES CAPTEURS DEVELOPPES

---



---

## TABLE DES MATIERES

---

I.	Introduction .....	86
II.	Etude caractéristique du capteur RLC .....	86
1.	Introduction .....	86
2.	Influence de l'inductance L2.....	87
3.	Influence de la capacité C2 .....	89
4.	Influence de l'inductance L1.....	90
5.	Influence de la capacité C3 .....	91
6.	Conclusion .....	93
III.	Etude caractéristique du capteur WGM.....	93
1.	Introduction.....	93
2.	Influence des paramètres géométriques .....	94
2.1.	Influence de l'épaisseur du support .....	94
2.2.	Influence de la hauteur du résonateur diélectrique .....	97
2.3.	Influence du rayon du résonateur diélectrique et du matériau sensible .....	99
3.	Conclusion .....	100
IV.	Conclusion.....	101

---

## **I. Introduction**

Dans ce chapitre, nous présentons l'évaluation et l'analyse des performances des deux capteurs conçus. L'objectif est la mise en évidence du bon fonctionnement de chaque proposition de réduction de consommation énergétique, ainsi la validation des mécanismes proposés. L'étude caractéristique permettra également de dimensionner et de valider les propriétés de matériels utilisés. Cette validation consiste à comparer les résultats issus de chaque simulation pour adopter à la fin la combinaison la plus performante en vue de fabrication.

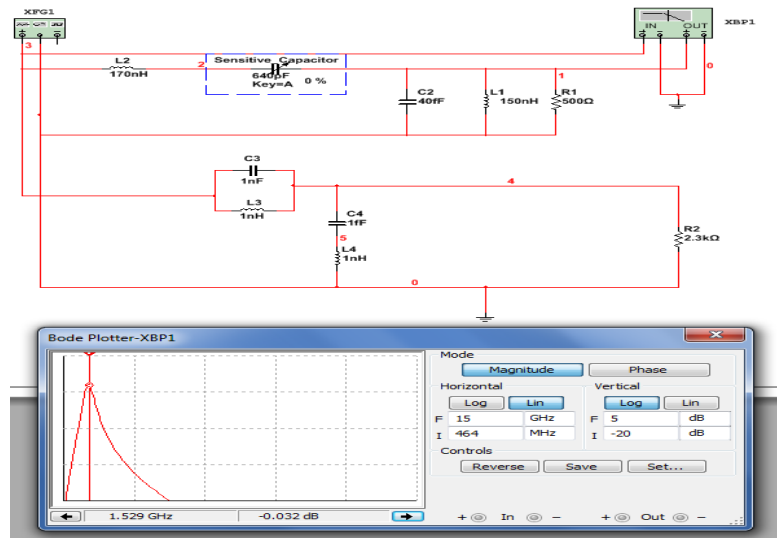
Dans le contexte critique de notre approche, l'énergie et la distance de lecture représentent les critères de performances les plus importants. Afin d'évaluer et de dimensionner les capteurs, il est nécessaire de choisir les bons paramètres permettant d'optimiser ces critères. En d'autres termes, l'objectif des simulations réalisées est d'identifier l'influence de chaque composant faisant partie de chaque dispositif, et obtenir par la suite une variation d'impédance adaptée au fonctionnement du capteur à une fréquence assez intéressante, avec une bonne sensibilité et à une longue distance.

## **II. Etude caractéristique du capteur RLC proposé**

### **1. Introduction**

L'objectif de cette partie est de simuler le fonctionnement du capteur RLC à capacité sensible. Une étude paramétrique permet de caractériser finement le comportement du nouveau capteur relativement aux paramètres géométriques définissant la structure. Cette étude est nécessaire puisque l'objectif de ces travaux de recherche consiste à développer des capteurs avec de hautes performances par rapport aux capteurs conventionnels.

Le principe de ces simulations est de valider la structure retenue en prenant en compte les caractéristiques des composants constitutifs du dispositif. Dans cette section nous traitons quelques aspects métrologiques du capteur. Nous analyserons et quantifierons tous les éléments inductifs et capacitifs de ce dispositif de mesure.



**Fig.1 : Structure du filtre simulée sous Multisim™.**

Pour des raisons de simplicité, une démarche progressive a été adoptée en décomposant le filtre en question en deux parties : Dans un premier lieu, des éléments capacitifs et inductifs avec la capacité planaire variable, sont simulés afin d’explorer l’influence de leurs variations sur le comportement du dispositif. Dans un deuxième lieu, on simule l’effet de la variation d’autres éléments passifs sur le fonctionnement du capteur, en particulier la fréquence de résonance du circuit globale. La Figure 1 illustre la cellule simulée sous le logiciel de simulation Multisim™ avec la capacité planaire variable. On peut visualiser également, sur la même figure, le résultat de simulation obtenu. Cette architecture est ainsi optimisée afin d’avoir une faible consommation d’énergie.

## 2. Influence de l’inductance L2

On simule, à présent, l’effet de la variation de l’inductance L2 sur la fréquence de résonance du circuit qui représente le capteur, pour obtenir une impédance adaptée au fonctionnement du capteur et présenter ainsi une bonne sensibilité. En se basant sur les caractéristiques de la capacité planaire déterminées précédemment et en variant la valeur de L2 entre 170 nH et 220 nH, on détermine le profil de variation de la fréquence de résonance en fonction de la capacité sensible (cf. Fig.2).

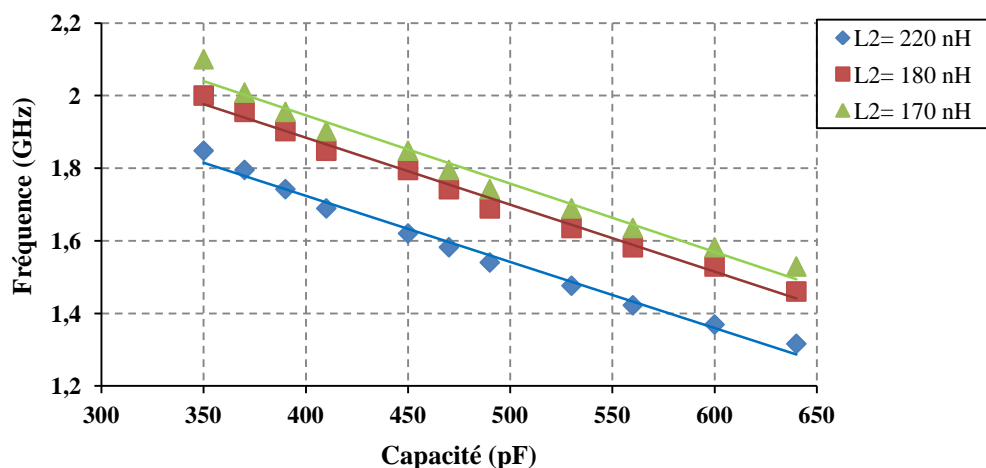
Le tableau I regroupe les fréquences de résonance en fonction de la capacité planaire pour différentes valeurs de L2. Pour une variation de 10 nH de cette impédance, la fréquence de résonance enregistre un décalage vers les basses fréquences d’ordre de 50MHz. En revanche, au delà de 220nH cette fréquence demeure relativement constante. Nous constatons donc une

variation notable du déplacement de la fréquence de résonance en réponse à une modification de l'inductance L2.

*Tableau I. Les fréquences de résonance en fonction de la capacité sensible avec L2 variable*

Capacité sensible (pF)	Fréquence de résonance (GHz)				
	L2= 170 nH	L2= 180nH	L2= 200 nH	L2= 210 nH	L2= 220 nH
350	2,1	2	1,902	1,848	1,848
370	2,008	1,955	1,848	1,795	1,795
390	1,955	1,902	1,795	1,742	1,742
410	1,902	1,848	1,742	1,742	1,689
450	1,848	1,795	1,689	1,635	1,62
470	1,795	1,742	1,635	1,582	1,582
490	1,742	1,689	1,582	1,582	1,54
530	1,689	1,635	1,529	1,529	1,476
560	1,635	1,582	1,476	1,476	1,422
600	1,582	1,529	1,422	1,422	1,369
640	1,529	1,46	1,369	1,369	1,316

D'après les résultats obtenus, une augmentation de l'inductance L2 (Jusqu'à 220nH) provoque un déplacement de la fréquence de résonance vers les basses fréquences. Ainsi, on observe une sensibilité simulée de l'ordre de 2.2MHz/pF. La cellule de mesure avec une inductance L2 de 180 nH s'avère comme une meilleure solution avec une meilleure sensibilité que les autres.



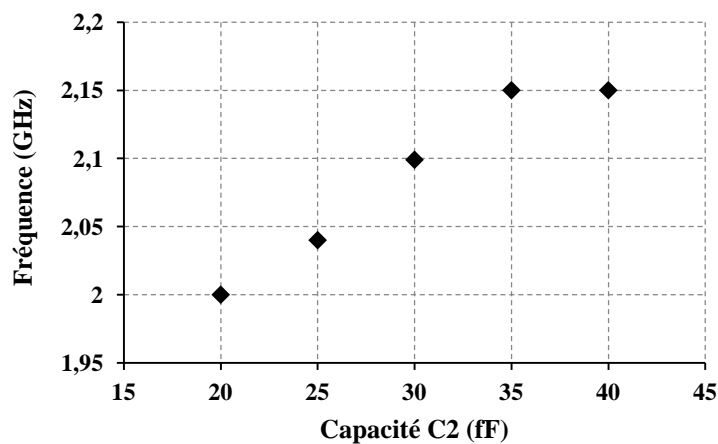
**Fig.2 : Fréquence de résonance en fonction de la capacité plane pour trois valeurs de L2.**

### 3. Influence de la capacité C2

Dans ce qui suit, on s'intéresse à l'influence de la capacité C2 sur le comportement du filtre. Le tableau II et la Figure 3 (capacité sensible égale à 350pF) présentent la variation de la fréquence de résonance en fonction de différentes valeurs de la capacité C2. Pour ces résultats on varie la capacité sensible pour les valeurs de C2 en fixant les valeurs des autres paramètres.

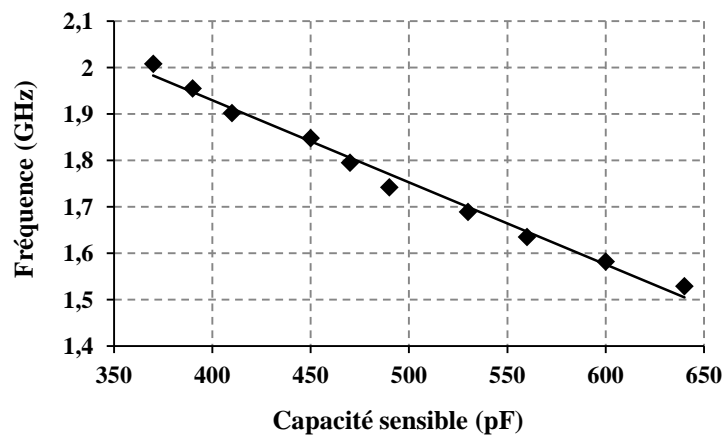
*Tableau II. Les fréquences de résonance en fonction de la capacité sensible avec C2 variable*

Capacité sensible (pF)	Fréquence de résonance (GHz)			
	C2 = 40fF	C2 = 35fF	C2 = 30fF	C2 = 25fF
350	2,15	2,15	2,099	2,04
370	2,008	2,008	2,01	2
390	1,955	1,955	1,952	1,951
410	1,902	1,902	1,90	1,898
450	1,848	1,848	1,795	1,791
470	1,795	1,795	1,791	1,789
490	1,742	1,742	1,739	1,735
530	1,689	1,689	1,685	1,681
560	1,635	1,635	1,631	1,629
600	1,582	1,582	1,579	1,572
640	1,529	1,529	1,525	1,521



**Fig.3 : Variation de la fréquence de résonance en fonction de la capacité C2.**

L'analyse de la courbe illustrée sur la Figure 3 permet de constater que la valeur de la capacité C2 joue un rôle important dans la définition de la fréquence de fonctionnement de ce capteur. La fréquence de résonance augmente progressivement lorsqu'on varie C2 entre 20 et 35fF. Au delà de 35fF la fréquence de résonance du circuit reste constante. La Figure 4 présente un exemple du comportement fréquentiel de la cellule de mesure pour différentes valeurs de capacités planaires de 370pF à 640pF. Par conséquent, on constate que la réponse fréquentielle est approximativement linéaire par rapport à la capacité.



**Fig.4 : Fréquence de résonance en fonction de la capacité planaire.**

Ces résultats, peuvent avoir un rôle important dans l'optimisation du fonctionnement du capteur, vu qu'un comportement linéaire est toujours recherché pour le fonctionnement des unités de mesure.

#### 4. Influence de l'inductance L1

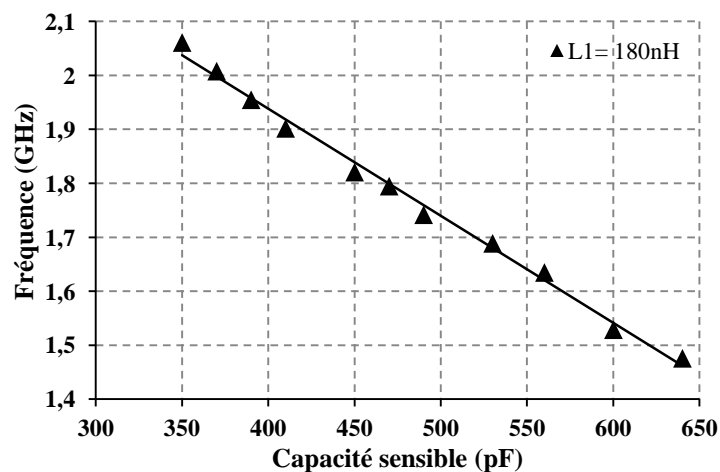
La structure, telle présentée dans la Figure 1, a été simulée pour différentes valeurs d'inductance L1 allant de 150nH jusqu'à 250nH, en tenant à changer chaque fois la valeur de la capacité planaire. Les résultats de simulation sont répertoriés dans le tableau III.

**Tableau III.** Les fréquences de résonance en fonction de la capacité sensible avec L1 variable

Capacité sensible (pF)	Fréquence de résonance (GHz)			
	L1= 250nH	L1 = 200nH	L1= 180nH	L1= 150nH
350	2,115	2,061	2,061	2,061
370	2,008	2,008	2,008	2,008

<b>390</b>	1,955	1,955	1,955	1,955
<b>410</b>	1,902	1,902	1,902	1,902
<b>450</b>	1,848	1,848	1,821	1,821
<b>470</b>	1,795	1,795	1,795	1,795
<b>490</b>	1,742	1,742	1,742	1,742
<b>530</b>	1,689	1,689	1,689	1,689
<b>560</b>	1,635	1,635	1,635	1,635
<b>600</b>	1,582	1,582	1,529	1,529
<b>640</b>	1,529	1,529	1,476	1,476

Nous pouvons constater que les valeurs mesurées sont intéressants à analyser ; l'inductance L1 n'a donc manifesté aucune influence appréciable sur la fréquence de résonance du filtre.



**Fig.5 : Fréquence de résonance en fonction de la capacité planaire pour L1=180nH.**

La Figure 5 montre ainsi un exemple de résultat obtenu correspondant à la variation de la fréquence de résonance en fonction de la capacité planaire pour le cas où l'inductance L1 est égale à 180nH.

## 5. Influence de la capacité C3

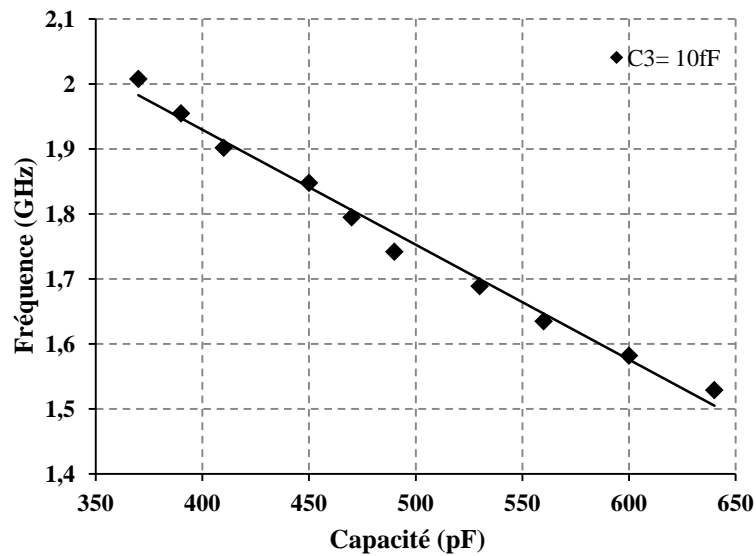
Pour analyser l'effet de la variation de la capacité C3, sur le fonctionnement du capteur et par la suite sur la fréquence de résonance, on fait varier donc cette capacité entre 1fF et 200fF.

A titre comparatif, nous exposons dans le tableau IV les fréquences de résonance obtenues en fonction de la capacité planaire pour différentes valeurs de C3; c'est une comparaison des résultats obtenus pour la capacité variable dans le cas de C3 variable.

**Tableau IV.** Les fréquences de résonance en fonction de la capacité sensible avec C3 variable

Capacité sensible (pF)	Fréquence de résonance (GHz)			
	C3= 1fF	C3= 10fF	C3= 100fF	C3= 200fF
350	2,115	2,115	2,115	2,115
370	2,008	2,008	2,008	2,008
390	1,955	1,955	1,955	1,955
410	1,902	1,902	1,902	1,902
450	1,848	1,848	1,848	1,848
470	1,795	1,795	1,795	1,795
490	1,742	1,742	1,742	1,742
530	1,689	1,689	1,689	1,689
560	1,635	1,635	1,635	1,635
600	1,582	1,582	1,582	1,582
640	1,529	1,529	1,529	1,529

On en déduit que la fréquence de résonance du circuit n'était pas modifiée par les variations de la capacité C3. La Figure 6 illustre la courbe de sensibilité du capteur extraite à partir des résultats du tableau pour le cas où C3 est égale à 10fF.



**Fig.6 :** Fréquence de résonance en fonction de la capacité plane pour C3=10fF.

A l'instar de la simulation précédente, nous avons vérifié l'influence des autres paramètres afin d'avoir le maximum d'informations sur le comportement de chaque composant pour les plus petites variations lors de la fabrication. Ainsi, les paramètres tels que la capacité C4, les inductances L3 et L4, et également la résistance R2 ont été étudiés mais ne sont pas représentatifs.

## **6. Conclusion**

Les résultats obtenus dans cette section ont permis de mieux comprendre le phénomène d'interaction qui se produit entre la capacité sensible et les autres composants du filtre. Le décalage de la fréquence de résonance a été observé dans certains cas. La variation de la fréquence en fonction de l'inductance L2 a permis, ensuite, de constater que pour une diminution de cette inductance on arrive à améliorer la sensibilité du capteur. Néanmoins, la fréquence de résonance augmente progressivement lorsqu'on varie la capacité C2 de 20fF à 35fF. En revanche, les autres paramètres tels que les capacités C3 et C4, les inductances L1, L3 et L4, ainsi que la résistance R2, n'ont manifesté aucun impact sur la fréquence de résonance de la cellule de mesure. Du point de vue conception, ce phénomène ajoute un degré de liberté à la conception. Il peut être vu comme un avantage car il donne la possibilité d'atteindre une gamme de température plus grande et de vérifier la stabilité du filtre.

Par ailleurs, chaque capteur présente certaines caractéristiques métrologiques qui définissent ses limites d'utilisation et de précision. Ces limites dépendent non seulement du mesurand, mais aussi des grandeurs d'influence qui viennent perturber l'élément de mesure.

La section suivante est dédiée aux simulations du capteur électromagnétique mettant en évidence l'impact des paramètres géométriques sur les performances du dispositif, traduite par une influence sur le couplage entre les lignes et le résonateur diélectrique ainsi que les fréquences de résonance.

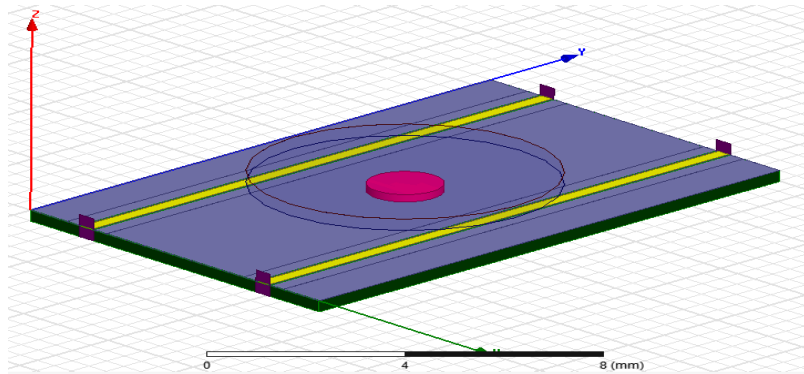
## **III. Etude caractéristique du capteur WGM**

### **1. Introduction**

Des études antérieures sur la conception des résonateurs ont permis de constater que l'utilisation des résonateurs microondes pour la mesure de gaz et de pression était envisageable ; les transducteurs électromagnétiques mentionnés dans le chapitre I sont des exemples. Lors de ces études, on a remarqué que tout changement du milieu qui entoure le

résonateur agit sur ce dernier en modifiant ses propriétés électriques à savoir la fréquence de résonance et le facteur de qualité.

Pour la mesure de la température, l'idée originale exploitée ici consiste à combiner entre un résonateur diélectrique et un matériau pérovskite. Le résultat obtenu est un microsystème qui utilise la transduction électromagnétique comme moyen de détection de la variation de la température.



**Fig.7 : Le capteur de température en 3 dimensions sur HFSS<sup>TM</sup>.**

Le système de détection est rappelé sur la Figure 7. Nous rappelons que le circuit global de notre capteur représente un filtre directif. Lors de la conception, nous avons tenu compte de plusieurs paramètres géométriques tels que, le rayon du résonateur diélectrique ( $R_{DR}$ ), le rayon du matériau PLZT ( $R_{PLZT}$ ), l'épaisseur du support ( $H_{Support}$ ) et l'épaisseur du résonateur diélectrique ( $H_{RD}$ ). Ces paramètres tendent à engendrer une influence sur le coefficient de couplage et les fréquences de résonances des modes de galerie. Nous avons vérifié donc cette influence afin d'avoir le maximum d'information sur le comportement du dispositif pour les plus petites variations sur ces paramètres géométriques lors de la fabrication. Ces analyses permettront de quantifier, par simulation, la sensibilité en MHz/°C du capteur.

Les autres paramètres tels que la longueur des lignes ( $L_{CPW}$ ) ont été étudié mais ne sont pas représentatifs.

## **2. Influence des paramètres géométriques**

### **2.1. Influence de l'épaisseur du support**

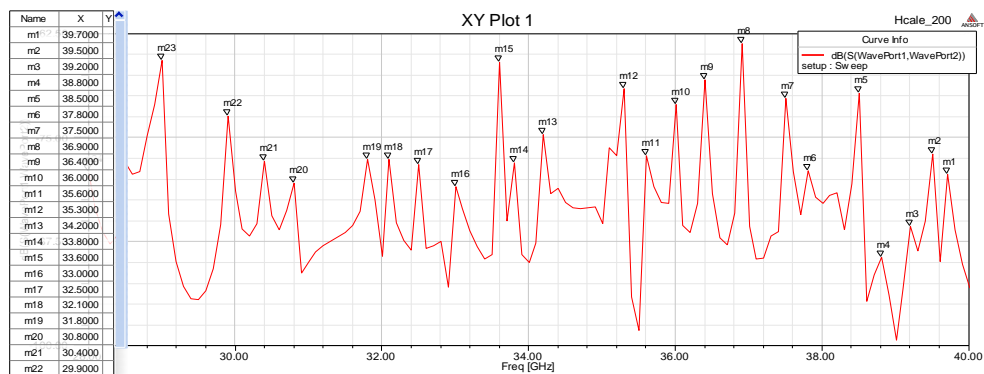
Le but de cette partie est d'étudier l'effet de la variation de l'épaisseur de la cale sur les paramètres électriques du résonateur, à savoir la fréquence de résonance, et de visualiser la distribution du champ électromagnétique vis-à-vis de cette variation.

Nous avons fait varier l'épaisseur du support ( $H_{Support}$ ) entre  $200\mu\text{m}$  et  $260\mu\text{m}$  dans la bande  $28\text{GHz}$  à  $40\text{GHz}$  tout en gardant les autres paramètres géométriques constants. Le tableau V montre l'influence de ces variations sur quelques modes de galerie WGE et WGH détectés. Par conséquent, nous remarquons que la fréquence de résonance du résonateur diélectrique change selon l'épaisseur du support.

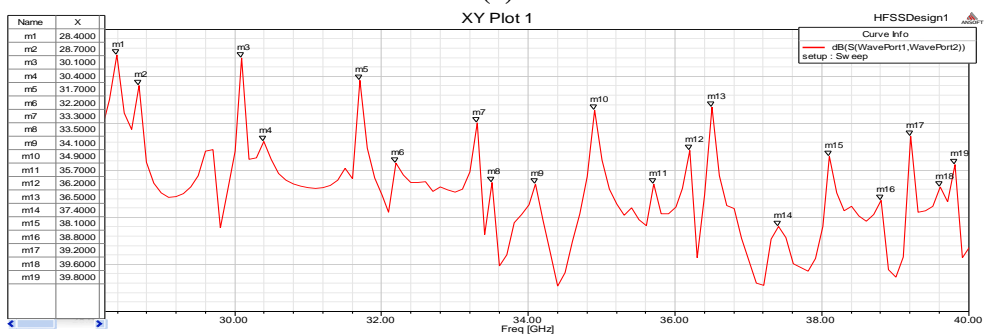
**Tableau V.** Les WGM observés dans la bande de fréquence  $[28,40\text{GHz}]$  avec  $H_{Support}$  variable.

Hauteur Support ( $\mu\text{m}$ )	Fréquences de résonances (GHz)								
	WGE <sub>14,0,0</sub>	WGE <sub>13,0,0</sub>	WGE <sub>12,0,0</sub>	WGE <sub>11,0,0</sub>	WGE <sub>10,0,0</sub>	WGH <sub>9,1,0</sub>	WGH <sub>5,2,0</sub>	WGH <sub>7,1,0</sub>	WGH <sub>5,1,0</sub>
200	38,5	36,9	35,3	33,6	32,1	36	33,8	32,5	29
230	38,1	36,5	34,9	33,35	31,7	35,7	33,5	32,2	28,7
260	38,1	36,3	34,9	33,2	31,7	35,7	33,5	32,2	28,6

Les deux figures suivantes montrent bien que pour une épaisseur qui varie de  $200\mu\text{m}$  à  $230\mu\text{m}$ , la fréquence de résonance du mode WGE<sub>13,0,0</sub> passe de  $35.3\text{GHz}$  (le point de mesure m12 Fig.8 (a)) à  $34.9\text{GHz}$  (le point de mesure m10 Fig.8 (b)) respectivement, et cela avec une décroissance du coefficient de couplage entre le résonateur diélectrique et les deux lignes coplanaires.



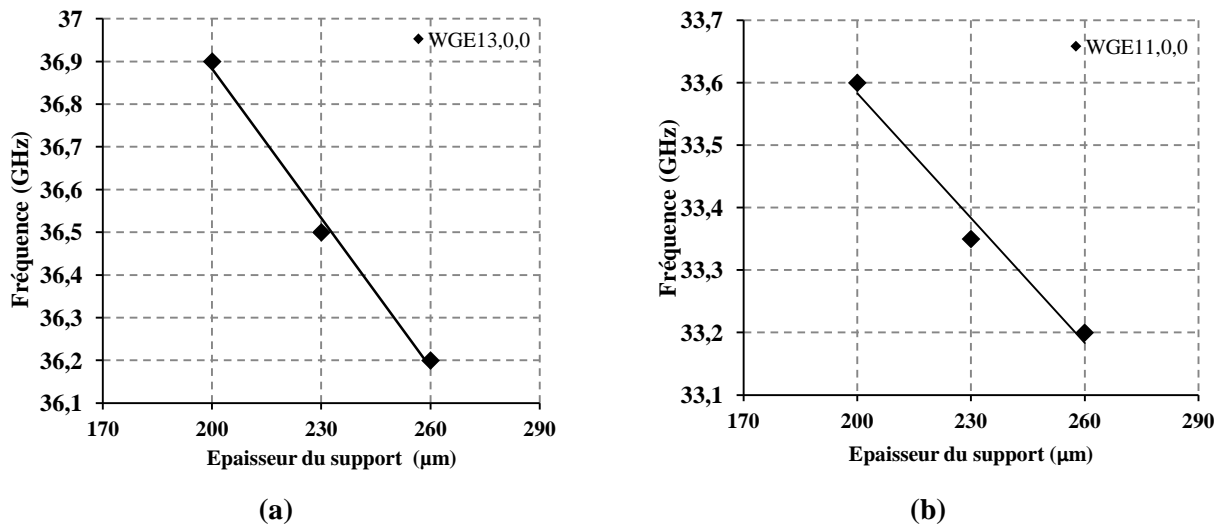
(a)



(b)

**Fig.8 : Coefficient de transmission dans la bande de fréquence [28,40GHz] avec une variation de l'épaisseur du support : (a)  $H_{\text{Support}}=200\mu\text{m}$  (b)  $H_{\text{Support}}=230\mu\text{m}$ .**

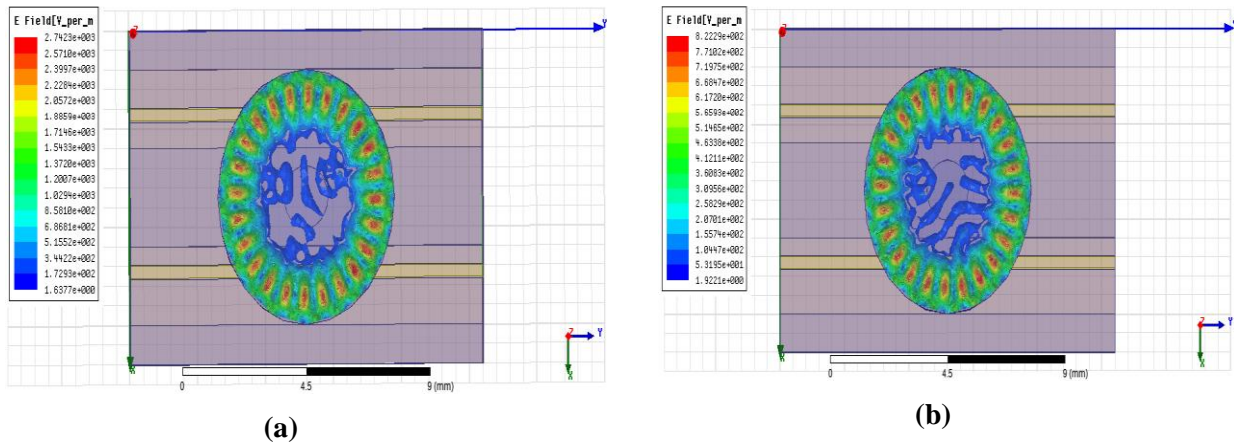
Pour une augmentation de l'épaisseur  $H_{\text{Support}}$  de  $30\mu\text{m}$ , chaque mode se décale vers les basses fréquences, d'un pas d'environ  $0.3\text{GHz}$  pour une épaisseur qui varie de  $200\mu\text{m}$  à  $230\mu\text{m}$ . Néanmoins, pour une épaisseur qui varie de  $230\mu\text{m}$  à  $260\mu\text{m}$  la fréquence de résonance demeure relativement inchangée pour la majorité des modes détectés.



**Fig.9 : Fréquence de résonance en fonction de l'épaisseur du support (a) mode WGE<sub>13,0,0</sub> et (b) mode WGE<sub>11,0,0</sub>.**

La Figure 9 illustre l'allure de la variation de la fréquence de résonance en fonction de l'épaisseur du support pour les modes WGE<sub>13,0,0</sub> et WGE<sub>11,0,0</sub>. Les résultats obtenus à partir des mesures montrent globalement une décroissance de la fréquence lorsqu'on augmente l'épaisseur du support avec un comportement linéaire en première approximation.

Un exemple de résultat de simulation correspondant à la distribution du champ magnétique est présenté sur la Figure 10 ; le cas du mode de galerie WGE<sub>12,0,0</sub> à une fréquence de  $34.9\text{GHz}$  et avec une épaisseur du support de  $230\mu\text{m}$  et de  $260\mu\text{m}$ . Le confinement de l'énergie dans une région proche de la périphérie du résonateur est ainsi mis en évidence. Par ce biais, les composantes électromagnétiques des modes de galerie sont quasi nulles au centre du RD.



**Fig.10 : Amplitude du champ magnétique du mode de galerie  $WGE_{12,0,0}$  à 34.9GHz**  
**(a)  $H_{Support} = 230\mu m$ , (b)  $H_{Support} = 260\mu m$ .**

D'après ces résultats, nous concluons que l'épaisseur du support doit être choisie entre  $200\mu m$  et  $230\mu m$  afin d'avoir le meilleur couplage entre le RD et les CPWs. Il est aussi intéressant de noter la possibilité de déterminer les fréquences de résonances pour chaque mode de galerie pour une large gamme d'épaisseur du support. C'est une étude qui permet d'évaluer la dispersion en fréquence liée aux dispersions géométriques (exemple de fabrication).

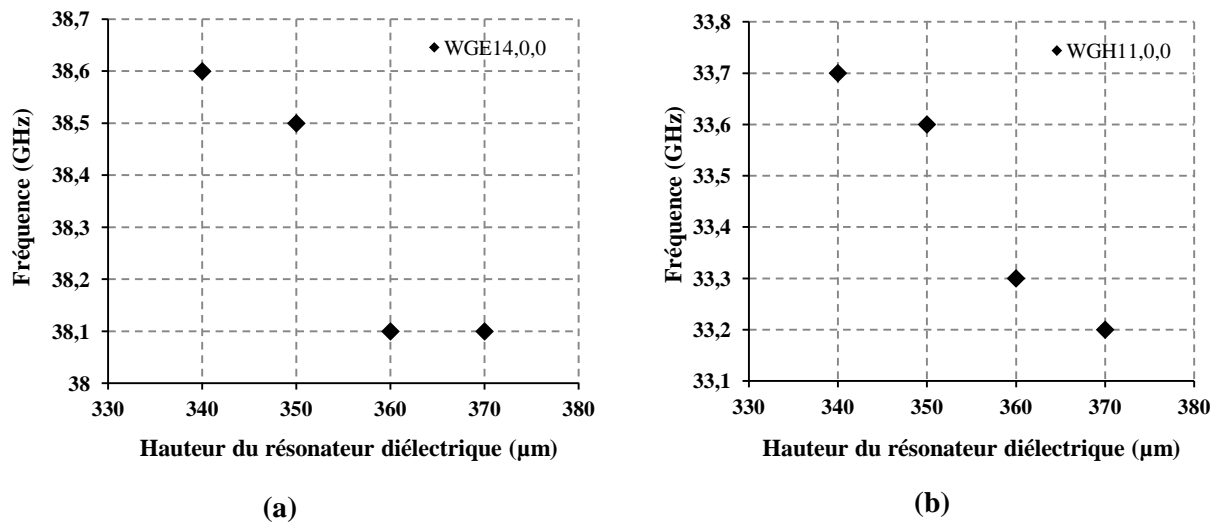
## 2.2. Influence de la hauteur du résonateur diélectrique

Dans ce qui suit, on va s'intéresser à l'influence de l'épaisseur du résonateur diélectrique sur le comportement du capteur. Nous avons fait varier l'épaisseur du RD ( $H_{RD}$ ) entre  $340\mu m$  et  $370\mu m$ , par un pas de  $10\mu m$  dans la bande 28 à 40GHz, tout en gardant les autres paramètres constants. Les résultats sont résumés dans le tableau VI, ce qui permet de montrer l'influence de ces variations sur plusieurs modes de galerie. Ainsi, pour une variation de  $10\mu m$  dans  $H_{RD}$ , chaque mode enregistre un décalage vers les basses fréquences d'environ 100MHz.

**Tableau VI.** Les WGM observés dans la bande de fréquence [28,40GHz] avec  $H_{RD}$  variable.

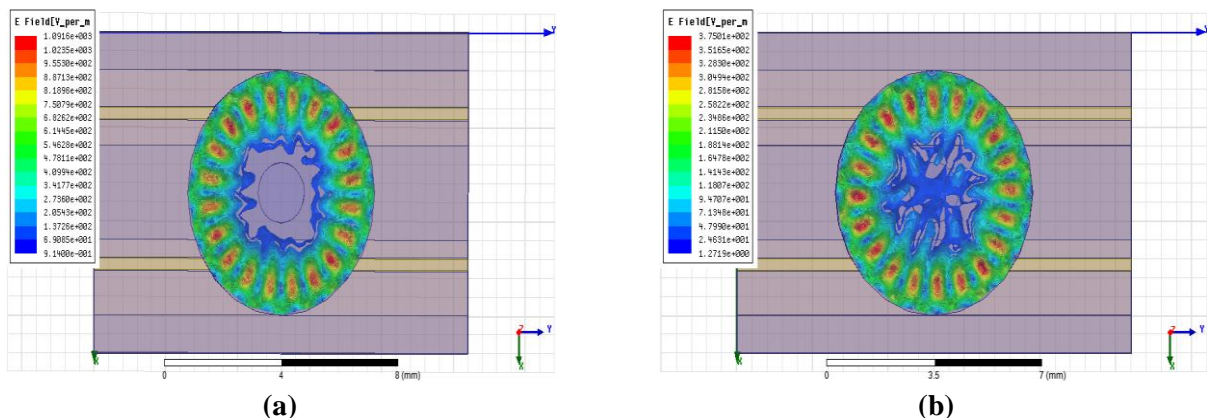
$H_{RD}$ ( $\mu m$ )	Fréquence de résonance (GHz)				
	$WGE_{14,0,0}$	$WGE_{13,0,0}$	$WGH_{12,0,0}$	$WGH_{11,0,0}$	$WGE_{10,0,0}$
<b>340</b>	38,6	37	35,4	33,7	32,1
<b>350</b>	38,5	36,9	35,3	33,6	32
<b>360</b>	38,1	36,5	34,9	33,3	31,7
<b>370</b>	38,1	36,5	34,9	33,2	31,7

Pour une augmentation de  $10\mu\text{m}$  sur  $H_{RD}$  par exemple, les fréquences de résonances des modes  $WGE_{14,0,0}$  et  $WGH_{11,0,0}$  diminuent de  $38.6\text{GHz}$  à  $38.5\text{GHz}$  et de  $33.7\text{GHz}$  à  $33.6\text{GHz}$  respectivement. Ce qui confirme que la fréquence de résonance est inversement proportionnelle à la hauteur du résonateur  $H_{RD}$ .



**Fig.11 : Fréquence de résonance en fonction de l'épaisseur du résonateur diélectrique (a) mode  $WGE_{14,0,0}$  et (b) mode  $WGH_{11,0,0}$ .**

A titre comparatif, la Figure 11 et le tableau VI montrent également l'impact que produit la variation de  $H_{RD}$  sur les modes de galerie lorsque cette épaisseur est supérieure à  $360\mu\text{m}$ . Nous constatons qu'une augmentation du  $H_{RD}$  n'a pas toujours d'influence significative sur les fréquences de résonance des modes de galerie détectés. En revanche, le mode  $WGH_{11,0,0}$  est plus sensible à cette variation, nous remarquons ainsi un décalage de la fréquence d'environ  $100\text{MHz}$ .



**Fig.12 : Amplitude du champ magnétique du mode de galerie  $WGE_{10,0,0}$  (a)  $H_{RD}=350\mu\text{m}$  à  $32\text{GHz}$ , (b)  $H_{RD} =370\mu\text{m}$  à  $31.7\text{GHz}$ .**

Les résultats, pour le mode de galerie  $WGE_{10,0,0}$  concernant la distribution de l'énergie dans la partie centrale du résonateur pour deux hauteurs différentes de ce dernier, sont décrits sur la Figure 12. La structure optimale est traduite par un fort confinement de l'énergie dans la partie centrale du résonateur.

A l'issue de ces résultats de simulation, nous pouvons également estimer l'influence de la moindre erreur lors de la fabrication du RD sur les fréquences de résonances et les paramètres de transmission des modes de galerie dans la bande de fréquence [28,40GHz]. Un autre paramètre peut également être intéressant pour un concepteur de dispositif. Il s'agit du diamètre du résonateur et du matériau sensible.

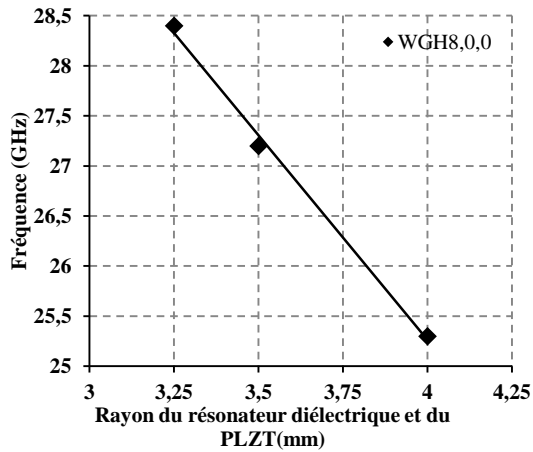
### 2.3. Influence du rayon du RD et du matériau sensible

Nous avons fait varier le rayon du résonateur diélectrique et du matériau PLZT entre 3.25mm et 4mm dans la bande de fréquence de 25GHz à 40GHz, toujours en gardant les autres paramètres géométriques constants. Le tableau VII montre l'influence de ces variations sur les modes de galerie détectés. Nous remarquons que en augmentant les rayons, on observe un décalage de la fréquence de résonance vers les basses fréquences.

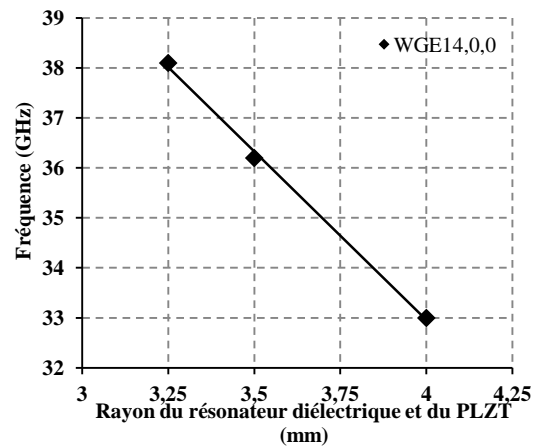
*Tableau VII. Les WGM observés dans la bande de fréquence [25,40GHz] avec  $R_{RD}$  et  $R_{PLZT}$  variable.*

R (mm)	Fréquence de résonance (GHz)				
	$WGE_{14,0,0}$	$WGH_{5,1,0}$	$WGH_{8,0,0}$	$WGE_{11,0,0}$	$WGH_{7,1,0}$
3,25	38,1	28,7	28,4	33,3	32,2
3,5	36,2	27,5	27,2	31,7	30,7
4	33	25,5	25,3	29,1	28,3

L'analyse des résultats obtenus permet de constater que le diamètre du résonateur et du matériau sensible joue un rôle important dans la définition de la fréquence de fonctionnement du capteur. La variation de la fréquence de résonance est due généralement au changement du milieu de propagation des lignes de champ. La Figure 13 ((a) et (b)) présente une allure du comportement fréquentiel de la cellule de mesure, pour les deux modes de galerie  $WGE_{8,0,0}$  et  $WGE_{14,0,0}$  respectivement. A partir des résultats obtenus, la cellule avec un rayon entre 3.25mm et 3.5mm présente une meilleure dynamique et une meilleure sensibilité que les autres.



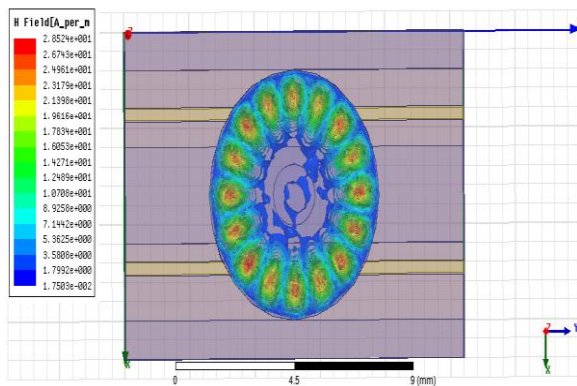
(a)



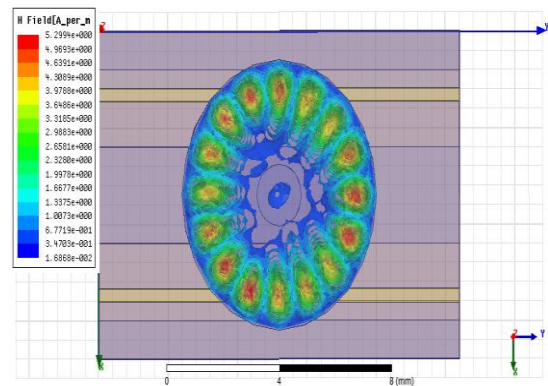
(b)

**Fig.13 : Fréquence de résonance en fonction du rayon du résonateur et du matériau sensible**  
**(a) mode  $WG_{8,0,0}$  et (b) mode  $WGE_{14,0,0}$ .**

La Figure 14 illustre un exemple de résultat correspondant à l'amplitude du champ magnétique du mode de galerie  $WG_{8,0,0}$  pour une augmentation du  $R_{DR}$  et  $R_{PLZT}$  de 0.05mm.



(a)



(b)

**Fig.14 : Amplitude du champ magnétique du mode de galerie  $WG_{8,0,0}$**   
**(a)  $R_{RD}=3.25\text{mm}$  à 28.4 GHz, (b)  $R_{RD}=3.5\text{mm}$  à 27.2GHz.**

### 3. Conclusion

Au travers cette section, nous avons effectués sous HFSS<sup>TM</sup> plusieurs simulations et optimisations des paramètres géométriques du capteur avec toujours le même objectif de visualisation d'influence et maximisation de sensibilité. On est arrivé à valider dans plusieurs cas le décalage en fréquence et donc le principe de cette transduction électromagnétique.

Les simulations effectuées ont permis d'apporter progressivement des éléments de réponse quant au principe de fonctionnement du capteur. Ces étapes de simulations ont dévoilé aussi

les limites des outils commerciaux de modélisation et de simulation face à la complexité de la structure étudiée et son aspect multiphysique. On a rencontré des problèmes d'ordre géométrique liés à l'intersection entre plusieurs matériaux. D'autres problèmes, qu'on dû résoudre, se rapportent au maillage et la convergence des solutions.

L'utilisation d'un signal microonde dans une large bande de fréquence permet d'obtenir beaucoup plus d'informations et de données sur l'interaction entre la température et le matériau sensible utilisé, permettant ainsi une meilleure sensibilité à la température.

## **IV. Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons présenté des exemples de résultats obtenus lors des simulations, dans le but d'évaluer les performances des capteurs conçus en termes de sensibilité et de taille, ce qui permet de les comparer à ceux obtenus en adoptant d'autres approches.

Idéalement, il faudrait que la réponse de l'élément de mesure ne dépende que du mesurande. Malheureusement, en pratique, les grandeurs d'influence viennent perturber le fonctionnement du capteur et entraînent souvent des erreurs de mesure. Les principales grandeurs d'influence sont : la pression, les vibrations, les chocs, le temps (vieillesse), l'humidité, la position et la fixation d'un capteur, les effets d'une immersion, la corrosion, les rayonnements nucléaires, la gravité, etc. Il faut faire en sorte de réduire le plus possible les effets des grandeurs d'influence sur la mesure en stabilisant et/ou en compensant ces grandeurs ou leurs effets.

L'ensemble de notre appareillage est pratiquement apte à être industrialisé dans sa définition actuelle. Un des points forts de notre appareillage est son excellent rapport performance/coût. Il est important de noter que l'utilisation d'un capteur passif de température basé sur la transduction électromagnétique permet d'obtenir une très bonne sensibilité avec réduction de l'énergie et pour un coût très faible. De même, les matériaux utilisés assurent ainsi un prix de revient acceptable.

Dans le contexte d'assurer un autre aspect de l'autonomie énergétique des capteurs, nous envisageons dans le chapitre suivant de mettre l'accent sur une approche qui permet aux capteurs de puiser dans l'environnement l'énergie dont ils auront besoin. C'est une solution distincte mais idéale pour remplacer les batteries peu pratiques, coûteuses ou dont le remplacement présente des risques qui permettra l'acquisition d'énergie à travers la récolte ; les futurs capteurs auront donc la capacité de récolter de l'énergie dans des environnements très divers et de stocker ce qui est nécessaire pour les fonctions du système. Nous nous

focaliserons donc sur la récolte d'énergie électromagnétique dans l'optique d'alimenter les capteurs autonomes.

# *CHAPITRE V*

---

## SYSTEME DE RECUPERATION D'ENERGIE ELECTROMAGNETIQUE POUR UN RESEAU DE CAPTEURS AUTONOME

---



---

# TABLE DES MATIERES

---

I.	Introduction .....	106
1.	Réseaux de capteurs autonomes .....	106
2.	Sources ambiantes d'énergie .....	107
II.	Système de récupération de l'énergie électromagnétique.....	110
1.	Principe de la récupération des radiofréquences .....	110
1.1.	Forme générale d'un circuit rectenna .....	110
1.2.	Antenne de réception .....	112
1.3.	Circuit d'adaptation .....	113
1.4.	Convertisseur RF-DC .....	114
2.	Applications de la récupération d'énergie radiofréquences .....	116
III.	Conception et simulation d'une antenne dédiée à la récolte de l'énergie radiofréquence .....	118
1.	Structure proposée .....	118
2.	Résultats de simulations et validation des performances .....	120
IV.	Conclusion et perspectives d'optimisation .....	123
V.	Références .....	125

---

## **I. Introduction**

Outre leur impact défavorable sur l'environnement, l'utilisation des batteries peut être gênante en raison de leur capacité de stockage d'énergie limitée et leur durée de vie finie. Compte tenu de ces raisons, des sources d'énergies alternatives ont fait l'objet de nombreuses recherches. Une approche prometteuse, connue sous le nom de récolte d'énergie, consiste à recueillir l'énergie de l'environnement et à la convertir en électricité utilisable. L'intérêt pour la récupération d'énergie ambiante est intimement lié à la volonté de pouvoir mesurer, surveiller, traiter des données issues d'un environnement parfois hostile et pouvoir les communiquer de manière totalement autonome.

Ce chapitre est consacré précisément à la récupération de l'énergie électromagnétique. Les systèmes autonomes et les différentes sources d'énergie exploitées à nos jours sont également présentés. Ensuite, on expose, sans détailler, les modules et quelques applications d'un système de récupération d'énergie radiofréquence. La dernière partie est dédiée à l'étape d'extraction de l'énergie qui permettra la récolte des ondes radiofréquences par l'intermédiaire d'une nouvelle structure d'antenne RF proposée.

### **1. Réseaux de capteurs autonomes**

Les systèmes autonomes sont considérés comme étant des systèmes utilisant l'énergie environnementale disponible pour s'alimenter en permanence. Ainsi, ils sont capables de fonctionner sans utilisation d'une source d'énergie auxiliaire spécifique. Les réseaux de capteurs sans fils en sont un exemple [1]. Les WSNs, comme exposés dans le chapitre I, sont constitués d'un nombre conséquent de nœuds miniaturisés déployés dans un environnement afin d'en mesurer des données caractéristiques. Ces données sont ensuite traitées et communiquées à un nœud central par l'intermédiaire de processus de communication sans fil.

Le défi essentiel à surmonter dans le domaine des réseaux de capteurs consiste à fournir une alimentation d'une durée de vie plus longue possible pour limiter toute intervention humaine, qui est en outre impossible dans certaines conditions. En dépit des progrès réalisés, les performances en termes de capacités de stockage des batteries restent modestes. Une solution d'amélioration de l'autonomie énergétique des capteurs passe par la récupération de l'énergie ambiante en complément de l'énergie des batteries, prolongeant ainsi leur durée de vie et permettant d'envisager leur remplacement par des accumulateurs rechargeables [2, 3]. Par

conséquent, l'énergie récupérée peut être utilisée directement ou stockée dans un super condensateur ou une micro batterie rechargeable.

Dans ce contexte, nombreux travaux visent à récupérer l'énergie électromagnétique de l'environnement pour alimenter des capteurs mises en réseau. En effet, la prolifération des systèmes communicants et les émetteurs associés font de notre environnement quotidien une source d'énergie électromagnétique dans une large bande de fréquence allant du KHz au GHz. En particulier, l'énergie électromagnétique est maintenant rayonnée en permanence sur plusieurs bandes fréquentielles et elle est potentiellement récupérable pour alimenter sans liaison filaire des microsystèmes électroniques basse consommation via un transfert de l'énergie (télé-alimentation). C'est dans cette optique que notre travail actuel sur la récupération d'énergie électromagnétique s'inscrit. Il répond donc à un besoin réel pour l'alimentation permanente des dispositifs électroniques à faible consommation. Les différentes sources d'énergie disponibles et une étude des blocs composants un récupérateur d'énergie radiofréquence feront l'objet de ce chapitre.

## **2. Sources ambiantes d'énergie**

L'essor de la téléphonie mobile et de l'électronique nomade s'accompagne d'un besoin de sources d'énergie miniaturisées et permanentes. De même, le développement des produits à faible consommation dans les domaines civils et militaires tels que les capteurs autonomes et les vêtements intelligents, devrait accentuer ce phénomène. Le recours aux systèmes de production, de stockage ou de récupération d'énergie devrait répondre à ces besoins énergétiques pour libérer l'utilisateur de contraintes de charge, offrir une durée d'utilisation plus importante et rendre ces systèmes totalement autonomes. Plusieurs études sont menées dans ce domaine de recherche, cependant il reste encore un certain nombre de difficultés technologiques dont il faut s'affranchir. Ces dernières impliquent le recours à de nouveaux matériaux et procédés permettant d'améliorer les performances des systèmes de récupération d'énergie.

Plusieurs sources d'énergie ambiante ont été envisagées pour rendre autonome des systèmes électroniques. L'énergie mécanique résultant de vibrations, charges ou contraintes, l'énergie solaire photovoltaïque issue du soleil ou de lumières artificielles, l'énergie électromagnétique, l'énergie thermique ou encore l'énergie chimique issue de processus biologiques sont autant d'exemples d'énergies naturelles ou inhérentes à un processus industriel, qui sont actuellement envisagées pour être conditionnées en production utile. Quelques exemples des

sources d'énergie primaires en mesure de répondre à plusieurs applications sont détaillés ci-après.

#### - **Energie mécanique**

Les sources mécaniques peuvent provenir des mouvements du corps humain, naturels ou volontaires, mais également de vibrations ambiantes dues aux machines environnantes ou aux bruits acoustiques. Les convertisseurs mécano électriques présents dans la littérature sont basés sur trois principes : les générateurs électromagnétiques [4, 5], électrostatiques [6, 7] et piézoélectriques [8, 9].

Les expériences de récupérations d'énergie mécanique développées ces dernières années s'appuient sur l'utilisation des structures capables de récupérer et transformer de l'énergie mécanique en électricité [10, 11]. L'idée générale consiste à utiliser le mouvement relatif des électrodes d'un condensateur variable électriquement chargée et soumises aux vibrations externes. Si les électrodes sont électriquement isolées, l'énergie mécanique convertie en énergie électrostatique correspond au travail effectué par l'élément mobile contre la force électrostatique entre les électrodes du condensateur [12, 13]. La puissance récupérée est de l'ordre de quelques micro watts.

D'autres systèmes de récupération d'énergie mécanique sont basés sur le mouvement d'un aimant permanent à l'intérieur d'une bobine. Ce mouvement crée un courant dans la bobine proportionnel à la variation du flux magnétique, donc proportionnel à la vitesse de déplacement de l'aimant et à la surface des spires. Une des applications de ce principe est la lampe torche, la puissance générée par la bobine est de 300 mW environ [14].

#### - **Energie thermoélectrique**

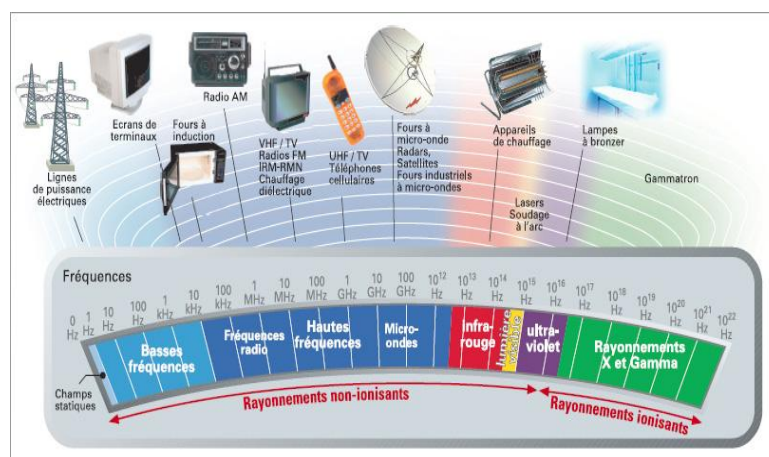
La conversion thermoélectrique consiste à transformer un flux de chaleur circulant entre deux points à deux températures différentes en une énergie électrique. Plusieurs principes physiques ont été mis au point afin d'assurer cette transduction : La pyroélectricité, l'effet tunnel et la conversion thermoïonique [15].

Douseki et al [16] ont développé un système de communication sans fil autonome tirant son énergie de la différence de température entre l'environnement ambiant et le corps humain ou de l'eau froide. Pour cette application, la puissance de sortie du générateur thermoélectrique était de 1.6mW. La montre bracelet *Seiko Thermic* [14] est un autre exemple où le module

thermoélectrique génère l'énergie nécessaire (quelques micro Watts) pour le fonctionnement de cette montre à partir de la différence de température entre l'air ambiant et le corps humain.

### - Energie radiofréquence

Compte tenu des différentes applications sans fil qui ont envahi notre environnement, ce dernier se trouve riche en ondes électromagnétique de nature différente. Avec les émetteurs de plus en plus abondants sur la planète, nous pourrions considérer que nous avons des sources d'énergie mobiles et distribuées. En considérant l'étendue du spectre électromagnétique représentée dans la Figure 1, nous pouvons classer les sources électromagnétiques en deux parties : celle correspondante à la lumière visible, et celles liées aux dispositifs de communication sans fil (Téléphonie, WiFi, Radar, etc.) [17]. La disponibilité de cette énergie rayonnante peut devenir intéressante pour certaines applications de faible consommation. La récupération de cette énergie peut représenter une alternative énergétique capable de remplacer, totalement ou en partie, la batterie de certains microsystemes.



**Fig.1 : Etendu du spectre électromagnétique ambiant.**

L'énergie que l'on peut récupérer de ces sources est relativement limitée, et nécessite que le système récupérateur d'énergie ait une grande surface équivalente (antenne) ou qu'il soit très proche de l'émetteur. La notion de directivité peut être également un frein dans la récupération d'énergie et le rendement de ces sources est généralement très faible. Une application spécifique de ce type de source est l'alimentation des capteurs lorsque l'on approche un appareil communicant, ce qui mène le capteur à se réveiller, effectuer la mesure et transmettre l'information, ensuite à retourner en veille. On peut donc parler dans ce cas de la télé-alimentation plutôt que l'auto-alimentation. Ce principe est celui largement utilisé dans le domaine RFID.

En 2007, la société américaine Powercast a dévoilé son projet de chargeur sans fil. Ce chargeur est uniquement alimenté via des ondes électromagnétiques à la fréquence 900MHz, sur une distance maximale de 15m entre la source et le récepteur [18].

Le laboratoire Investigación de l'EPSG de Valencia a proposé également un système de récupération d'énergie RF émise par les stations de radio ou de télévision, dans l'objectif de montrer la faisabilité d'alimenter des WSNs [19]. La solution proposée présente des hautes performances par rapport aux systèmes classiques en termes de disponibilité des sources et de distance séparant l'antenne de réception des stations d'émission (d'ordre de plusieurs kilomètres).

Dans [20] les auteurs présentent un système de récupération d'énergie RF émise dans la bande GSM-900MHz. Ce système de récolte était destiné à fournir une source alternative d'énergie pour alimenter les dispositifs de faible puissance. La tension continue obtenue à une distance approximative de 50m d'une station de téléphonie cellulaire GSM a été de 2,9V. Cette tension était assez pour alimenter le capteur de température STLM20 [21].

L'objectif donc de la récupération d'énergie électromagnétique ambiante est d'alimenter idéalement des systèmes autonomes et sans fil, notamment les réseaux de capteurs. Par ailleurs, la conversion de l'énergie RF en énergie électrique s'effectue en plusieurs étapes qui doivent être chacune optimale pour pouvoir fournir le maximum de puissance au nœud. La partie suivante est dédiée au principe de cette conversion présenté par le modèle général d'un système de récupération d'énergie électromagnétique.

## **II. Système de récupération d'énergie électromagnétique**

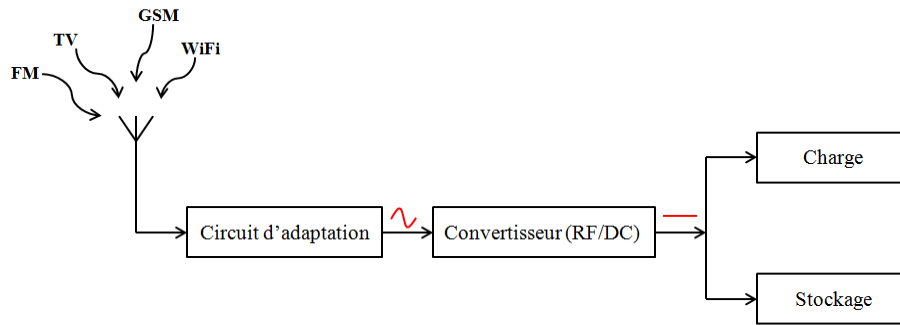
### **1. Principe de la récupération de l'énergie radiofréquences**

#### **1.1. Forme générale d'un circuit rectenna**

Classiquement, la récupération d'énergie électromagnétique ambiante est réalisée à l'aide d'antennes dites rectificatrices ou rectennas, formées par l'association d'une antenne réceptrice et d'un système de conversion RF/DC. L'énergie RF ainsi convertie en énergie électrique sert ensuite à alimenter une charge électronique ou l'emmagasiner dans un accumulateur pour une utilisation ultérieure.

La Figure 2 présente le schéma fonctionnel simplifié d'une rectenna, qui est généralement composé d'une antenne de réception qui permet de collecter l'énergie radiofréquence. Un circuit d'adaptation jouant le rôle d'adaptation d'impédance entre l'antenne et l'étage de

rectification, en outre d'un filtre qui peut être intégré afin d'empêcher le rayonnement des harmoniques générées par le circuit de redressement vers l'antenne. Un circuit de redressement qui est généralement un redresseur à diodes Schottky. Finalement, la charge de sortie qui représente tout type de charge DC.



**Fig. 2 : Principe de la récupération de l'énergie électromagnétique ambiante.**

L'énergie électromagnétique est captée par l'antenne de réception et envoyée vers le convertisseur RF-DC sous forme d'une onde sinusoïdale haute fréquence. L'étage de rectification transforme cette onde en tension et courant continu. Le niveau de tension obtenu en sortie de la rectenna est souvent trop faible pour pouvoir alimenter directement un circuit électronique ou pour charger une batterie ; en particulier lorsque la distance émetteur récepteur est importante. Un étage élévateur de tension est souvent utilisé afin d'obtenir un niveau de tension DC suffisant [22, 23], tandis que des stratégies de conversion DC-DC sont souvent utilisées afin d'assurer un transfert de puissance optimal entre la rectenna et la charge [24, 25]. En parallèle, en suivant la tendance générale vers la miniaturisation des dispositifs électroniques, des nouvelles batteries micro-échelle rechargeables sont développées et peuvent représenter des sources d'énergie viables pour des capteurs isolés miniaturisés qui peuvent être rechargés sans fil [26].

Par ailleurs, l'efficacité de la conversion RF-DC d'une rectenna est influencée par la quantité de puissance perdue dans les diodes de redressement, la qualité de l'adaptation d'impédance entre l'antenne et l'étage de rectification, ainsi que par l'efficacité de l'antenne. Pour une rectenna, le rendement de conversion RF-DC est généralement défini comme le ratio entre la puissance totale DC fournie à la charge et la puissance que l'antenne réceptrice serait capable d'injecter dans un circuit parfaitement adapté (cf. Equation 1).

$$\eta = \frac{P_{DC}}{P_{RF}} \quad (1)$$

De manière générale, la puissance récupérée par une antenne est donnée par l'équation 2:

$$P_R = P \cdot G \cdot (\lambda^2/4\pi) \quad (2)$$

Avec :

- P densité de puissance (en W/m<sup>2</sup>);
- G gain linéaire de l'antenne de réception;
- $\lambda$  longueur d'onde utilisée.

La récupération d'énergie provenant des ondes électromagnétiques ambiantes nécessite donc d'une part une connaissance suffisamment précise des ondes à récupérer (fréquence, variation des signaux, orientation de l'antenne émettrice), et d'autre part, que le système de récupération ait une grande surface et/ou qu'il soit assez proche de l'émetteur.

## 1.2. Antenne de réception

Généralement, une antenne est définie par la norme comme étant un dispositif métallique destiné à rayonner ou à recevoir des ondes radio [27]. L'antenne est donc la structure de transition entre la propagation libre dans le vide et la propagation guidée dans la matière. Dans le cas d'une récupération d'énergie électromagnétique, l'antenne de réception sera celle qui nous permettra de collecter l'énergie électromagnétique. Il n'y a pas de restriction particulière pour le choix de l'antenne puisqu'elle peut être un patch [28, 29], un spiral [30], un micro-ruban [31, 32] ou un dipôle [33]; la technologie employée peut être filaire, plaquée ou autre. Un circuit rectenna est donc composé d'une antenne qui peut être sous différentes formes, circulaire pour favoriser une tolérance en termes de directivité ou patch pour favoriser un gain d'antenne important.

Néanmoins, le choix de l'antenne associée au circuit de rectification dépend avant tout du type de charge à alimenter et de la nature de l'onde incidente. Nous retrouvons dans la littérature une diversité importante dans le choix des antennes. La grande majorité des auteurs utilisent des antennes patch et des dipôles. Pour l'antenne patch, le gain important permet d'élever la puissance fournie au convertisseur et donc obtenir un meilleur rendement de conversion, alors que pour le dipôle, l'omni-directivité permet de s'adapter au circuit pourvu d'une mobilité dans l'espace. D'autres formes d'antennes, moins utilisées que les deux citées, ont un intérêt grandissant, la plus connue est l'antenne circulaire (de forme spirale sur plan) qui est de plus en plus utilisée dans les travaux récents.

Dans [34], une antenne patch a été dimensionnée pour recevoir à la fois de l'énergie à convertir, mais aussi un signal qui sera transmis par un port secondaire de l'antenne. Pour pouvoir fixer l'impédance de l'antenne, et ceci est valable pour toutes les antennes patch, il suffit de faire translater le feed point du centre du patch à son extrémité, en effet, la position du point d'alimentation définit l'impédance de l'antenne. Dans [35], une antenne spirale a été utilisée, celle-ci offre l'avantage d'être opérationnelle sur des gammes de fréquences larges et d'adapter son impédance en fonction de la fréquence. Cette propriété associée à un dimensionnement judicieux a donné lieu à une adaptation de l'impédance de l'antenne à celle de la diode sur une large part du spectre de fréquence.

Afin d'augmenter le gain global, les antennes élémentaires peuvent être associées de telle sorte à fournir plus de puissance au circuit de conversion [36]. Cette association peut également avoir comme but de renforcer l'omni-directivité de l'antenne sans pour autant dégrader le gain [27].

Dans le cas de la récupération d'énergie électromagnétique dans le milieu environnant, les niveaux de puissance sont très faibles, variables d'un endroit à un autre et réparties sur une large bande fréquentielle. Une antenne large bande omnidirectionnelle, à polarisation circulaire et ayant un gain assez important permettra de pallier cette difficulté. Il est donc préférable d'avoir des antennes à haut gain car elles permettent de collecter plus de puissance RF, par conséquent il y a souvent un compromis à faire entre le gain d'une antenne et sa surface. En outre, le choix d'une antenne n'est pas déterminé que par sa forme géométrique, le substrat utilisé pour la réalisation de l'antenne est également un paramètre important. En effet, plus la permittivité relative du substrat est élevée, plus l'antenne sera réduite. Le facteur de pertes est également important puisque celui-ci doit être le plus faible possible.

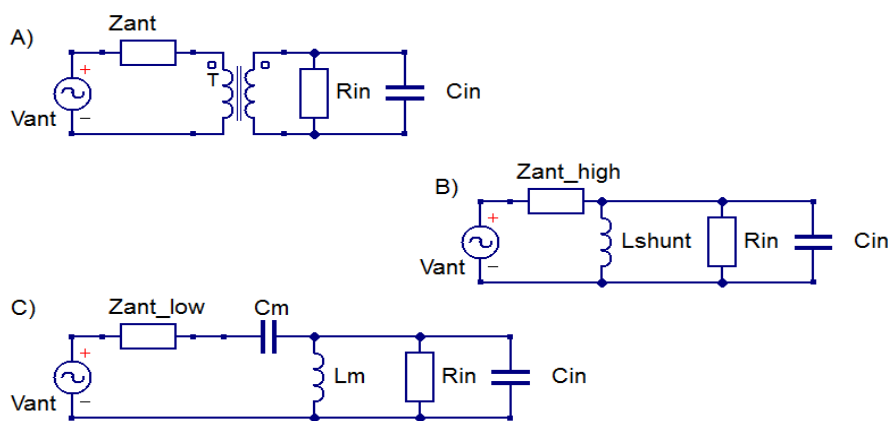
### **1.3. Circuit d'adaptation**

Compte tenu que le redresseur possède une impédance différente de celle de l'antenne à la fréquence fondamentale et pour une puissance donnée, une désadaptation subsiste alors entre le redresseur et l'antenne de réception. Ainsi, pour que le transfert de la puissance collectée soit maximal vers la diode redresseuse, il faut une adaptation d'impédance.

Un circuit d'adaptation placé entre le redresseur et l'antenne permet d'améliorer le rendement de la conversion RF/DC et de minimiser les pertes par réflexion sur l'antenne. En haute fréquence, il est nécessaire d'ajouter ce circuit, afin d'assurer l'adaptation de l'impédance présentée par le redresseur à la source RF, donc de minimiser les pertes par réflexion, et de

bloquer ainsi le passage des harmoniques susceptibles d'être générées, par les diodes, en fortes puissances.

La difficulté rencontrée lors de l'optimisation d'une rectenna provient de l'aspect non linéaire de la diode de redressement, qui provoque une variation de l'impédance du circuit global en fonction de la puissance de fonctionnement. Il en résulte que la puissance de sortie n'est plus une fonction linéaire de la puissance d'entrée. Ainsi, en fonction de la puissance incidente et de la charge un maximum de rendement est obtenu pour un point de fonctionnement bien déterminé. Comme l'objectif est de récupérer le maximum d'énergie, il faudra que le circuit d'adaptation assure l'adaptation entre l'antenne et le redresseur sur une large bande, et cela avec le moins de pertes possibles par insertion.



**Fig.3 : Circuits d'adaptation exemplaires pour les systèmes RFID et de récupération d'énergie RF.**

A l'issue de nombreux travaux de recherches, l'adaptation de l'impédance d'entrée du redresseur à celle de l'antenne conduit vers un maximum d'efficacité de celle-ci pour un domaine de fonctionnement [37]. Tous les éléments des circuits d'adaptation contiennent souvent des inductances et des capacités, ainsi plusieurs méthodes d'adaptation sont disponibles (cf. Fig.3).

#### 1.4. Convertisseur RF-DC

Les convertisseurs RF-DC sont généralement basés sur des diodes ou des transistors. Les diodes Schottky restent à la base d'une grande majorité de circuits rectenna mais les semi-conducteurs à effet de champ (FET) ont une place de plus en plus importante, surtout lorsqu'il s'agit de convertir à des fréquences relativement faibles [38]. Les circuits de redressement des microondes ont des topologies très différentes, en fonction de la position et du nombre de

diodes HF. La fréquence de conversion et le niveau de puissance à convertir sont les critères principaux à prendre en compte dans le choix d'un mode de conversion. Le domaine fréquentiel d'utilisation des convertisseurs synchrones (transistors montés en diode) se situe en dessous du gigahertz alors que celui des diodes Schottky est compris entre 800MHz et plusieurs gigahertz. En ce qui concerne la puissance, les convertisseurs synchrones sont limités généralement à des applications où la tension de sortie ne dépasse pas 2V, alors que les diodes Schottky vont bien au-delà.

#### - **Convertisseurs à transistors**

Les convertisseurs à transistors ou synchrones sont à base de transistors à effet de champs. L'utilisation de ces semi-conducteurs est due essentiellement à la tension de seuil très basse qui permet de convertir des puissances plus faibles que celle converties par des diodes Schottky. En effet, la tension de seuil d'un transistor MOS est de 100mV alors qu'elle est au mieux de 200mV pour les diodes Schottky [39].

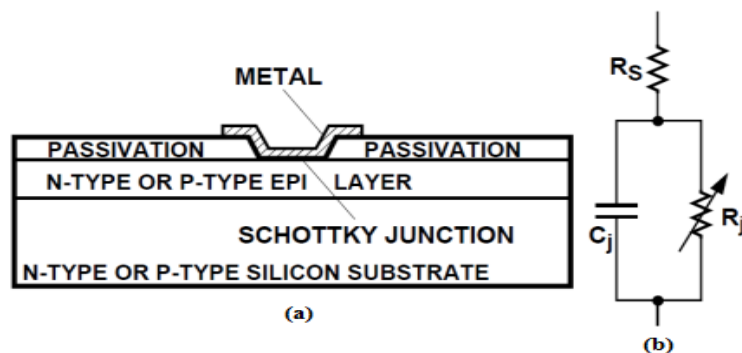
La conversion est réalisée par des transistors dont la commande est assurée par l'onde à rectifier elle-même. Plusieurs topologies de convertisseurs synchrones existent [19, 40, 41]. La plupart des structures de conversion synchrone trouvées dans la littérature sont dédiées aux faibles densités de puissance. Ceci est dû au fait que les transistors MOS ont des pertes beaucoup plus faibles que les diodes Schottky lorsqu'ils sont traversés par des courants faibles [42]. Le frein majeur à l'utilisation de la rectification synchrone pour des applications rectenna est leur limitation en fréquence. En effet, alors que la plupart des travaux dans le domaine se font à 2,45GHz et 5,8GHz, et que la perspective est la montée à 35GHz, les semi-conducteurs MOS restent limités à 1GHz de fréquence de coupure. A cet inconvénient s'ajoute un autre, qui semble moins important, et qui est celui de la tenue en tension des transistors. Le confinement de la rectification synchrone aux très faibles puissances permet de passer outre ce problème.

#### - **Convertisseurs à diodes**

Les convertisseurs à base de diodes de redressement sont généralement de type Schottky connues pour leurs tensions de seuil très faibles. A la différence des diodes classiques qui sont des jonctions p-n, les diodes Schottky sont une jonction métal – semi-conducteur. Cette particularité leur procure une tension de seuil plus basse que celle des diodes classiques, mais surtout un temps de commutation très court ce qui rend leur utilisation en hyper-fréquence fort répandue.

Les diodes Schottky offrent donc l'avantage d'avoir des tensions de seuils plus faibles que leurs équivalents PN [43]. Cette caractéristique est un avantage dans des applications de redressement de puissance car les pertes dans les diodes seront réduites.

La tension de seuil des diodes joue un rôle important dans l'efficacité de conversion RF-DC car l'amplitude du signal incident est souvent inférieure à la tension de seuil des diodes. Les hautes fréquences de fonctionnement exigent des dispositifs de rectification rapides. Les caractéristiques des diodes Schottky sont recommandées pour une utilisation dans des circuits de rectification RF-DC. La Figure 4 montre une vue en coupe de la diode Schottky ainsi que son circuit équivalent [44]. Le modèle électrique de cette diode est constitué d'une résistance série  $R_s$ , d'une capacité de jonction variable  $C_j$  et d'une résistance de jonction  $R_j$  montées en parallèle.



**Fig. 4 : Diode Schottky HSMS 2850 : (a) Vue en coupe, (b) Circuit équivalent.**

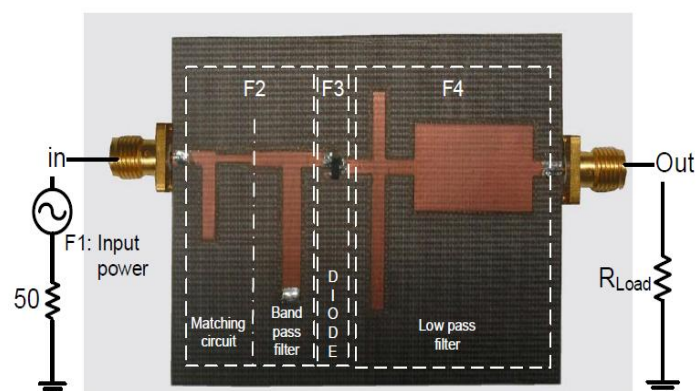
Les aspects de performance de la rectenna dépendent principalement des paramètres de la diode de redressement. La littérature dans le domaine de la conversion RF-DC est relativement importante. Celle-ci est très dispersée et ne cible pas une gamme de puissance ou de fréquence unique. Le choix donc doit être fait en adéquation avec les applications visées.

## **2. Applications de la récupération d'énergie radiofréquences**

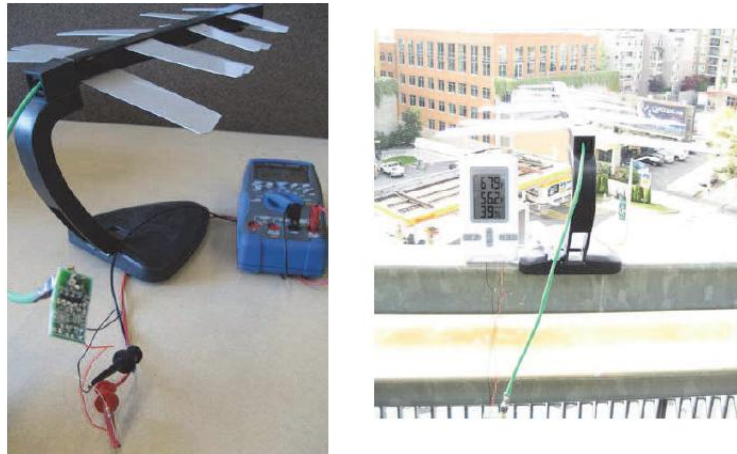
Beaucoup de chercheurs se sont intéressés à la récupération de l'énergie issue des ondes radio fréquence, compte tenu du nombre de sources d'onde électromagnétique émise par l'homme dans notre environnement, notamment les appareils de télécommunication, les appareils électroménagers et les lignes haute tension. Cependant, l'énergie récupérable décroît rapidement avec l'augmentation de la distance source-récepteur et avec la diminution de la taille du récepteur (récupérateur d'énergie). En outre, il est peu courant de trouver dans l'environnement ambiant un champ électrique de haute intensité sauf aux voisinages de sources puissantes comme les antennes GSM par exemple.

L'énergie RF disponible en permanence dans le milieu urbain peut être une alternative énergétique pour alimenter partiellement ou totalement des dispositifs électroniques à faible consommation, tels que des capteurs, et donc rendre ces dispositifs autonomes. Les applications potentielles sont nombreuses et concernent l'alimentation de capteurs abandonnés, d'actionneurs et de micro-dispositifs à faible consommation (WSN, RFID, etc.). Cette technique d'alimentation est particulièrement intéressante dans des environnements dangereux et difficile d'accès. Contrairement aux systèmes d'alimentation par induction magnétique, les distances de travail peuvent aller de quelques dizaines de centimètres à quelques mètres.

L'application typique de la conversion d'énergie électromagnétique est l'alimentation des étiquettes RFID passives. Compte tenu de l'étude bibliographique présentée dans le chapitre I, une étiquette RFID passive se compose d'une antenne bobinée ou imprimée et d'une puce électronique, contenant une mémoire permettant de stocker des informations. Un lecteur muni d'une antenne crée un champ électromagnétique qui alimente l'étiquette et active sa puce, lui permettant ainsi d'émettre son code d'identification unique et d'effectuer les fonctionnalités qui y sont programmées. Ces étiquettes sont dites passives contrairement aux étiquettes actives qui sont alimentées par une pile. La distance à laquelle le signal radio sera détectable dépend de la puissance de l'installation d'activation et de la fréquence utilisée. Par exemple, pour une fréquence de 868MHz (fréquence réservée à la RFID en Europe), l'étiquette RFID sera sensible à un champ électrique de  $1.6V.m^{-1}$  [45], soit une densité de puissance de la ressource de  $0.7\mu W.cm^{-2}$ . Une étude a été réalisée en 2008 à l'université de La REUNION pour mettre en œuvre un récupérateur d'énergie pour RFID (cf. Fig.5) [46].



**Fig. 5 : Exemple de Rectanna réalisée pour RFID application.**



**Fig.6 : Récupération des ondes TV.**

D'autres travaux ont été menés par la suite, comme le système de récolte de l'énergie réalisé au laboratoire de recherche d'Intel à Seattle, dont l'objectif était de récupérer des ondes provenant d'une antenne TV d'une puissance de 960kW à 674-680MHz [47]. Le système de récupération comme montré sur la Figure 6, situé à 4.1km, a permis de récupérer 60 $\mu$ W (soit 0.1 $\mu$ W.cm<sup>-2</sup>) afin d'alimenter un capteur de température avec affichage LCD.

### **III. Conception et simulation d'une antenne dédiée à la récolte de l'énergie radiofréquence**

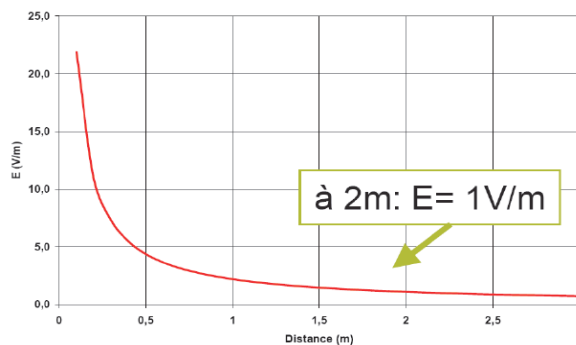
#### **1. Structure proposée**

A la suite de l'étude précédente, un circuit rectenna classique comprend une antenne de réception suivie d'un circuit de conversion RF-DC. L'enjeu est d'optimiser l'ensemble de la rectenna en ayant comme objectif la maximisation de la sortie DC en termes de rendement de conversion RF-DC. L'optimisation doit s'effectuer sur l'ensemble du circuit, d'où la nécessité de faire appel aux méthodes d'analyse globale basées sur des simulations électromagnétiques rigoureuses. L'objectif principal est donc de réaliser un circuit rectenna innovant, compact et à haut rendement pour l'alimentation de dispositifs à faible consommation.

Dans ce contexte le laboratoire Investigación de Valencia a développé un système récupérateur d'énergie RF, en mettant l'accent sur le bloc convertisseur RF-DC [19]. Néanmoins, la contribution actuelle vise à concevoir, optimiser, réaliser et caractériser expérimentalement une antenne de réception (car ce sera elle qui récoltera l'énergie RF et qui la transmettra vers le circuit de redressement). Cet élément sera placé dans un environnement où nous n'avons aucune information sur la position des antennes émettrices, ni sur les puissances des ondes rayonnées. L'utilisation d'une antenne omnidirectionnelle avec un gain

élevé, peut résoudre le problème de la directivité, car cette antenne sera capable de capter des ondes provenant de plusieurs directions et de maximiser la puissance RF captée.

Dans la pratique, les champs électriques et donc les densités de puissance auxquels nous sommes exposés dans les lieux de vie sont bien inférieurs à ceux définis par les normes et sont extrêmement variables, avec d'ailleurs des zones d'ombre où les niveaux sont très faibles. En effet, le champ électrique diminue en fonction de la distance comme le montre la Figure 7 [45]. On y observe le champ électrique d'une antenne WiFi de 2.45GHz en fonction de la distance à la source. Ainsi, à deux mètres de l'antenne, le champ ne vaut que  $1\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$ .

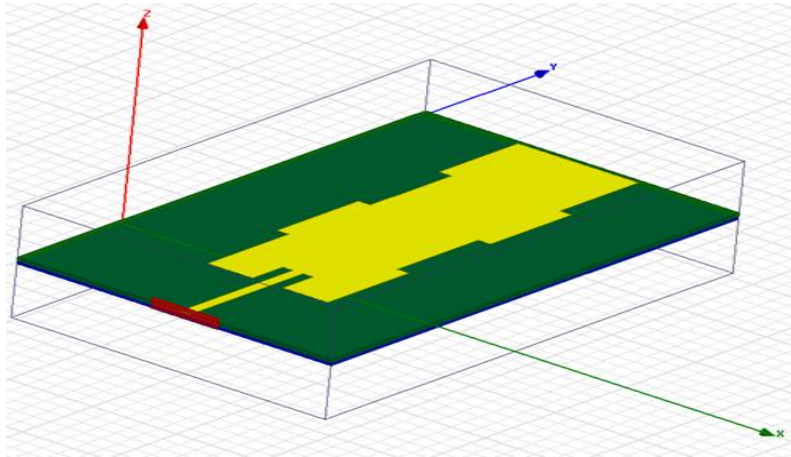


**Fig.7 : Évolution du champ électrique généré par une antenne WiFi vs. la distance.**

La fréquence de travail d'un système de transmission d'énergie sans fil représente un aspect très important. Son choix détermine tout d'abord les dimensions du système, son rendement et son coût. Ce choix est conditionné par le milieu de propagation de l'onde où le système opérera. En effet, il est très important de prendre en compte l'atténuation du milieu en fonction de la fréquence afin de limiter les pertes et d'accroître par conséquent le rendement.

Les premiers travaux sur les rectennas ont été focalisés dans la bande ISM à 2.45GHz, la plupart de ces travaux étaient destinés pour des applications spatiales. Le choix de cette fréquence n'était pas fortuit, il s'explique principalement par la faible atténuation que présente cette fréquence à travers l'atmosphère. Les bandes ISM, conformément à la répartition des bandes de fréquence imposée par l'Agence Nationale des Fréquences (ANFR), sont dédiées aux applications industrielles, scientifiques et médicales. Ces bandes de fréquences présentent un certain nombre d'avantages. En effet, elles sont libres de toute obligation de licence, la taille des antennes et des circuits est raisonnable et les composants actifs sont disponibles dans le commerce et sont peu onéreux. Cependant, les inconvénients rencontrés à 2.45GHz en termes d'efficacité et de rendement, ont conduit à viser également dans le cadre de ce travail la nouvelle fréquence WiFi à 5GHz. Cela permettra un meilleur rendement et une réduction

des dimensions des circuits par rapport à la fréquence 2.45GHz, sans pour autant perdre en efficacité.



**Fig.8 : Topologie de l'antenne RF.**

Par conséquent, le choix de l'antenne est très important dans la conception d'un système de récupération d'énergie électromagnétique. Plusieurs critères peuvent être définis pour faciliter ce choix. Les critères les plus importants sont : la fréquence de fonctionnement, le gain de l'antenne, l'efficacité du circuit ainsi que son coût. Les bandes de fréquences d'intérêt nous conduit naturellement vers la configuration des antennes patch. En effet, ces antennes permettent non seulement de collecter plus de puissance mais aussi de rendre la structure plus compacte.

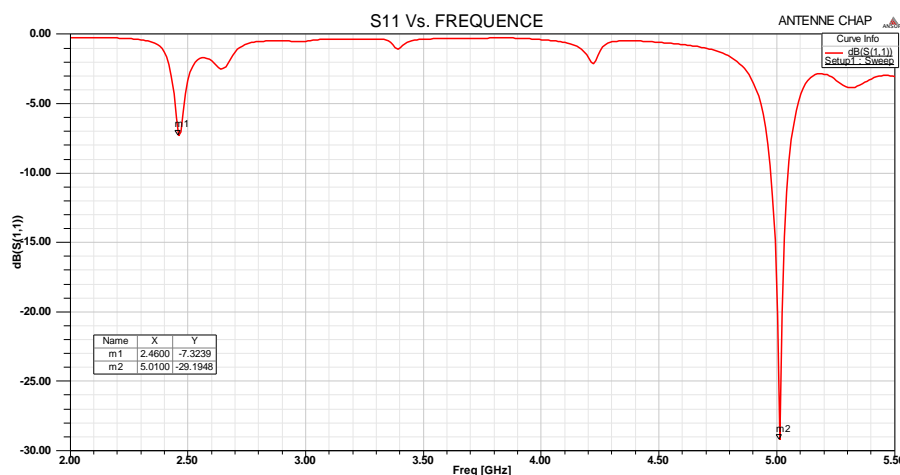
La structure de l'antenne en cours de d'optimisation est montrée sur la Figure.8. En effet, l'antenne bi-bande proposée a été imprimé sur un substrat Rogers RT/ duroid 5870 ( $\epsilon_r= 2.33$ ,  $h= 1.6\text{mm}$ ,  $\tan\alpha= 0.0012$ ). Le plan de masse a une longueur de 145mm et une largeur de 93.6mm. L'alimentation est assurée par une ligne micro-ruban d'impédance caractéristique de  $50\Omega$ , des encoches ont été introduites afin d'assurer l'adaptation. Dans ce qui suit, les résultats de simulation de l'antenne candidate pour la récupération de l'énergie radiofréquence sont présentés et discutés.

## **2. Résultats de simulation et validation des performances**

Pour une antenne donnée, la détermination de l'onde rayonnée passe par la résolution des équations de Maxwell. Ce difficile problème de physique-mathématique n'est en général pas soluble analytiquement, même pour les structures les plus simples. De nos jours, grâce à l'ordinateur et avec l'utilisation de codes électromagnétiques ou numériques, la conception d'antennes complexes devient possible. Ainsi, les simulateurs électromagnétiques sont

devenus des outils incontournables pour l'aide à la conception des dispositifs et systèmes. Ils sont basés sur des méthodes numériques exactes (Full Wave) qui donnent des résultats précis. Ces méthodes solutionnent les équations de Maxwell ou des formes dérivées et sont appliquées sur des formulations différentes possédant toutes leurs avantages et inconvénients. L'architecture de récepteur d'énergie électromagnétique est ainsi proposée. L'objectif est de pouvoir exploiter une large gamme de puissance incidente, par rapport aux structures classiques. Les simulations montrent des résultats encourageants en termes de bande de fréquence et de gain, par la suite des améliorations notables de la quantité d'énergie collectée peuvent être estimée par rapport aux rectennes conventionnelles.

Nous avons effectués sous HFSS plusieurs simulations et optimisations des paramètres géométriques de l'antenne, avec toujours le même objectif de maximiser le gain et la bande passante (2.45GHz et 5GHz), avec des dimensions qui restent de l'ordre du centimètre. La variation du coefficient de réflexion (S11) en fonction de la fréquence est présentée Figure 9. Ce coefficient de réflexion passe en dessous de  $-29\text{dB}$  pour la fréquence 5GHz.

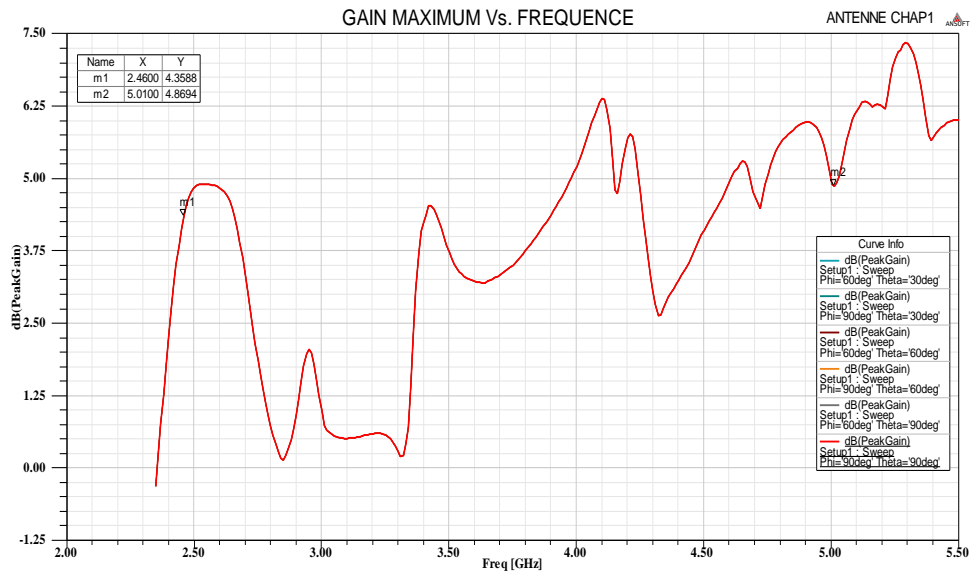


**Fig.9 : Variation du coefficient de réflexion S11 en fonction de la fréquence.**

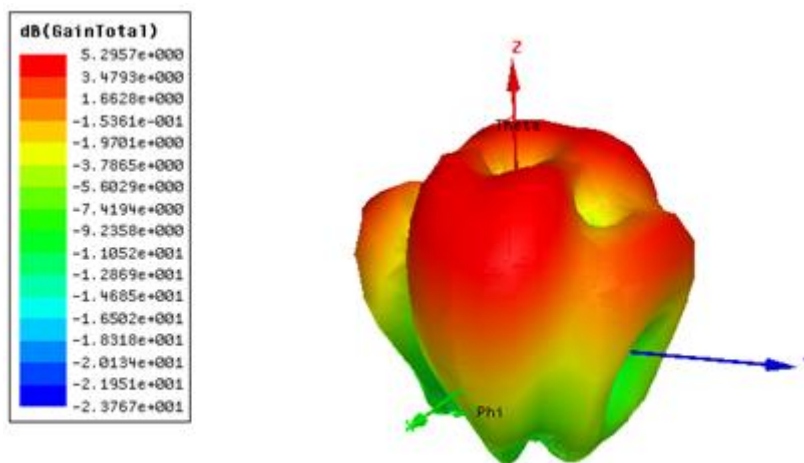
Le gain d'une antenne est une donnée très importante dans notre travail sur la conversion d'énergie électromagnétique, il est directement lié à la directivité et aux pertes dans l'antenne. Dans une direction donnée, il est défini comme étant le rapport entre la puissance rayonnée dans cette direction et la puissance qui serait rayonnée par une antenne isotrope sans pertes, dans la même direction et avec la même puissance d'alimentation.

Les simulations de rayonnement de l'antenne montrent que le gain maximal de l'antenne augmente en fonction de la fréquence jusqu'à 2.5GHz, puis fluctue constamment au delà de cette fréquence (cf. Fig.10). Ces fluctuations sont dues au nombre de lobes secondaires qui

augmente en fonction de la fréquence. La répartition de l'énergie rayonnée dans l'espace est présentée sur la Figure 11. Cette figure montre la forme du diagramme de rayonnement à 5GHz de fréquence de fonctionnement, il s'agit donc d'un diagramme directif avec deux lobes secondaires.



**Fig.10 : Variation du gain maximal en fonction de la fréquence.**



**Fig.11 : Diagramme de rayonnement de l'antenne à 5GHz.**

Cette antenne est très intéressante pour la suite de notre étude d'un système de récupération d'énergie électromagnétique, en répondant aux critères souhaités pour maximiser l'énergie RF captée. La bande passante présentée par cette antenne couvre la bande de notre étude (2.45GHz-5GHz) et au-delà, avec un rayonnement quasi omnidirectionnel dans une première approximation.

## **IV. Conclusion et perspectives d'optimisation**

Dans ce chapitre introductif à la récupération de l'énergie ambiante, nous avons donné un aperçu du contexte global de la récupération d'énergie à basse puissance. Nous avons présenté un certain nombre d'applications envisageables ainsi que les différentes formes d'énergie potentiellement exploitables. Chaque application, chaque forme d'énergie et chaque mécanisme de transduction fait l'objet d'une thématique à part entière dans la recherche scientifique.

L'analyse des rayonnements électromagnétiques en milieu urbain montre clairement que l'énergie RF est disponible en permanence mais que la quantité est très faible. L'exploitation de ces faibles niveaux d'énergie rayonnés doit surmonter quelques difficultés spécifiques, non encore résolues, en termes d'intégration d'antennes, d'efficacité de redressement, d'amplification et de stockage. Enfin, l'optimisation du rendement énergétique nécessite souvent l'association d'un système de récupération à un système de stockage de l'énergie. Le premier élément du système de récupération d'énergie avec lequel la puissance RF sera captée est l'antenne. L'étude, le choix et l'optimisation de différentes caractéristiques de cet élément est nécessaire pour augmenter la puissance RF captée.

L'antenne du système de récupération d'énergie électromagnétique large bande doit présenter un coefficient de réflexion le plus faible possible sur toute la bande fréquentielle d'intérêt énergétique. La quantité d'énergie RF captée par l'antenne dépend de son gain. Plus le gain de l'antenne est important plus la quantité d'énergie RF captée est importante. L'antenne proposée possède des caractéristiques très intéressantes et elle présente donc un intérêt évident dans un système de récupération d'énergie électromagnétique. Un travail d'optimisation de cet élément sera essentiel pour une récupération maximale de l'énergie RF en termes d'amélioration du gain et minimisation des pertes de réflexion. L'utilisation d'un réseau d'antennes pour augmenter la puissance RF captée est également envisagée dans le travail futur.

Par ailleurs, en régime de réception l'antenne est soumise au rayonnement d'une source électromagnétique. Elle doit être donc robuste pour des raisons de tenue aux agents atmosphériques et en compatibilité électromagnétique. Ainsi, nous devons garder à l'esprit que les contraintes sécuritaires et environnementales sont importantes. Nous devons pour cela se mettre dans les conditions de fonctionnement qui respectent les normes actuelles, ainsi que

l'intégration de l'antenne dans l'environnement. L'antenne de réception doit alors présenter un gain acceptable et être la moins sensible possible à la dépolarisation.

## V. Références

- [1] S.W. Arms, C.P. Townsend, D.L. Churchill, J.H. Galbreath and S.W. Mundell, 'Power Management for Energy Harvesting Wireless Sensors', SPIE International Symposium on Smart Structures & Smart Materials, California USA, 2005.
- [2] S. Chalasani and J.M. Conrad, 'A Survey of Energy Harvesting Sources for Embedded Systems', IEEE Southeast Conference, 2008.
- [3] S. Sudevalayam and P. Kulkarni, 'Energy Harvesting Sensor Nodes: Survey and Implications', IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol. 13, No. 3, 2011.
- [4] D. Zhu, S. P. Beeby, M. J. Tudor and N. R. Harris, 'A Planar Electromagnetic Vibration Energy Harvester With a Halbach Array', 11th International Workshop on Micro and Nanotechnology for Power Generation and Energy Conversion Applications, pp. 347–350, Republic of Korea, 2011.
- [5] B. Yang, C. Lee, W. Xiang, J. Xie, J. Han He, R. K. Kotlanka, S. P. Low and H. Feng, 'Electromagnetic Energy Harvesting from Vibrations of Multiple Frequencies', Journal of Micromechanics and Microengineering, 2009.
- [6] P.D. Mitcheson, E.M. Yeatman, G. Kondala Rao, A.S. Holmes and T.C. Green, 'Energy Harvesting from Human and Machine Motion for Wireless Electronic Devices', Proceedings of IEEE, Vol. 96, No. 9, pp. 1457–1486, 2008.
- [7] G. Despess, 'Etude des phénomènes physiques utilisables pour alimenter en énergie électrique des microsystèmes communicants', Rapport de thèse, INPG 2005.
- [8] X. Chen, T. Yang, W. Wang and X. Yao, 'Vibration Energy Harvesting with a Clamped Piezoelectric Circular Diaphragm', Ceramics International, pp. 271–274, 2012.
- [9] B. Yang and K.S. Yun, 'Piezoelectric Shell Structures as Wearable Energy Harvesters for Effective Power Generation at Low-Frequency Movement', Sensors and Actuators A: Physical, 2012.
- [10] H. A. Sodano, G. Park, D. J. Leo and D. J. Inmana, 'Model of Piezoelectric Power Harvesting Beam', Proceedings of IMECE, ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 2003.
- [11] S. P. Beeby, M. J. Tudor and N. M. White, 'Energy Harvesting Vibration Sources for Microsystems Applications', Measurement Science and Technology, Vol. 17, pp. 175-195, 2006.
- [12] H. B. Fanga, J. Q. Liua, Z. Y. Xub, L. Donga, L. Wangb, D. Chena, B. C. Caia and Y. Liub, 'Fabrication and Performance of MEMS-Based Piezoelectric Power Generator for Vibration Energy Harvesting', Microelectronics Journal, Vol.37 , pp. 1280–1284, 2006.
- [13] P. D. Mitcheson, E. M. Yeatman, G. K. Rao, A. S. Holmes and T. C. Green, 'Energy Harvesting From Human and Machine Motion for Wireless Electronic Devices', Proceedings of IEEE, Vol. 96, Issue 9, pp. 1457-1486, 2008.

- [14] J. A. Paradiso and T. Starner, 'Energy Scavenging for Mobile and Wireless Electronics', *Pervasive Computing IEEE*, Vol. 4, pp. 18-27, 2005.
- [15] B. A. SEDDI, 'Systèmes de récupération de l'énergie vibratoire large bande', Thèse De L'Université de GRENOBLE, 2012.
- [16] T. Douseki, Y. Yoshida, F. Utsunomiya, N. Itoh, and N. Hama, 'A Battery Less Wireless System Uses Ambient Heat with a Reversible-Power-Source Compatible CMOS/SOI DC-DC Converter', *IEEE International Solid- State Circuits Conference (ISSCC)*, USA, 2003.
- [17] <http://sanscontact.wordpress.com/2010/08/14/la-place-de-la-rfid-dans-le-spectre-electromagnetique/>
- [18] <http://www.powercastco.com/>
- [19] T. Sogorb, J. V. Llario, J. Pelegrí, R. Lajara and J. Alberola, 'Studying the Feasibility of Energy Harvesting from Broadcast RF Station for WSN', *IEEE International Instruments and Measurement Technology Conference*, Canada, 2008.
- [20] N. M. Din, C. K. Chakrabarty, A. Bin Ismail, K. K. A. Devi and W.-Y. Chen, 'Design of RF Energy Harvesting System for Energizing Low Power Devices', *Progress In Electromagnetics Research*, Vol. 132, pp.49-69, 2012.
- [21] [http://www.st.com/web/catalog/sense\\_power/FM89/SC294/PF129199](http://www.st.com/web/catalog/sense_power/FM89/SC294/PF129199)
- [22] M. Huang, Y. Tsai and K. Chen, 'Sub-1 V Input Single-Inductor Dual-Output (SIDO) DC-DC Converter With Adaptive Load-Tracking Control (ALTC) for Single-Cell Powered Systems', *IEEE Transactions on Power Electronics*, pp.1713–1724.2010.
- [23] A. Richelli, L. Colalongo, S. Tonoli and Z. K. Vajna, 'A 0.2-1.2 V DC/DC Boost Converter for Power Harvesting Applications', *IEEE Transactions on Power Electronics*, pp. 1541–1546, 2009.
- [24] A. Dolgov, R. Zane and Z. Popovic, 'Power Management System for Online Low Power RF Energy Harvesting Optimization', *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular*, Issue: 7, Vol.57, pp.1802–1811, 2010.
- [25] S. L. Brunton, C. W. Rowley, S. R. Kulkarni and C. Clarkson, 'Maximum Power Point Tracking for Photovoltaic Optimization Using Ripple-Based Extremum Seeking Control', *IEEE Transactions on Power Electronics*, pp.2531–2540, 2010.
- [26] M. A. Alahmad and H. L. Hess, 'Evaluation and Analysis of a New Solid- State Rechargeable Microscale Lithium Battery', *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, pp. 3391–3401, 2008
- [27] C. A. Balanis, 'Antenna Theory Third Edition', Wiley-Interscience.
- [28] C. Mikeka and H. Arai, 'Microwave Tooth for Sensor Power Supply in Battery free Applications', *Proceeding of the Asia-Pacific Microwave Conference*, 2011.

- [29] K. Avuri, K.A. Devi, S. Sadasivam, N.M. Din and C.K. Chakrabarthy, 'Design of a 377  $\Omega$  Patch Antenna for Ambient RF Energy Harvesting at Downlink Frequency of GSM 900', 17th Asian Pacific Conference on Communications, 2011.
- [30] D. Bouchouicha, F. Dupont, M. Latrach and L. Ventura, 'Ambient RF Energy Harvesting', International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'10), Spain, 2010.
- [31] H. Kitayoshi and K. Sawaya, 'Development of a passive RFID-Tag with 10-m Reading Distance under RCR STD-1 Specification', Proceeding of International Symposium of Antennas and Propagation, Japan, 2004.
- [32] H. Kitayoshi and K. Sawaya, 'Long Range Passive RFID-Tag for Temperature Monitor System', Proceeding of International Symposium of Antennas and Propagation, Korea, 2006.
- [33] J. R. Smith, A. P. Sample, P. S. Powledge, S. Roy and A. Mamishev, 'A Wirelessly-Powered Platform for Sensing and Computation', 8th Proceeding International Conference on Ubiquitous Computing, 2006.
- [34] R. Dehbashi, K. Forooraghi and Z. Atlasbaf, 'Dual-Fed Antenna for Wireless Power Transmission and Data Communication', IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, pp. 2201-2204, 2006.
- [35] J. A. Hagerty, F. B. Helmbrecht, W. H. McCalpin, R. Zane and Z. B. Popović, 'Recycling Ambient Microwave Energy with Broad-Band Rectenna Array', IEEE Transaction Microwave Theory & Tech., Vol. 52, No. 3, 2004.
- [36] S. H. Choi, K. D. Song, W. Golembiewskii, S. H. Chu and G. C. King, 'Microwave Power for Smart Material Actuators', Smart Mater. Struct. 13, pp. 43-48, 2004.
- [37] M. T. Penella Lopez, 'Methods and Circuits for the Efficient Management of Power and Energy in Autonomous Sensors', Doctorate Thesis, University Polytechnic of Catalunya, 2010.
- [38] C. Blake and A. Guerra, 'Schottky Diodes vs. FET Synchronous Rectifiers', Electronics Engineer, 2000.
- [39] T. Umeda, H. Yoshida, S. Sekine, Y. Fujita, T. Suzuki and S. Otaka, 'A 950-MHz Rectifier Circuit for Sensor Network Tag with 10-m Distance', IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol. 41, N°. 1, 2006.
- [40] Y. H. Lam, W. H. Ki and C. Y. Tsui, 'Integrated Low-Loss CMOS Active Rectifier for Wirelessly Powered Device', IEEE Trans. On Circuit and Systems – II: Express Briefs, Vol. 53, No.12, 2006.
- [41] J. Yi, W. H. Ki and C. Y. Tsui, 'Analysis and Design Strategy of UHF Micro-Power CMOS Rectifiers for Micro-Sensor and RFID Applications', IEEE Trans. On Circuit and Systems, Vol. 54, No.1, 2007.
- [42] S. Deuty, 'HDTMOS Power MOSFETs Excel in Synchronous Rectifier Applications', Semiconductor Components Industries, LLC, 2003.

- [43] B. Merabet, L. Cirio, H. Takhedmit, F. Costa, C. Vollaïre, B. Allard and O. Picon, 'Low-cost Converter for Harvesting of Microwave Electromagnetic Energy', IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, pp. 2592–2599, 2009.
- [44] AGILENT. Surface Mount Zero Bias Schottky Detector Diodes Technical Data - HSMS-2850 Series.
- [45] F. Gallee, 'Micro-ondes et économie d'énergie', Proceeding de Journée TIC et développement durable, 2009.
- [46] A. Douyere, F. Alicalapa, J.D. L. S. Luk and A. CelestE, 'Losses Analysis and Performance Improvement of a Rectenna for RFID Systems', 15th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems ICECS, 2008.
- [47] A. Sample and J.R. Smith, 'Experimental Results With two Wireless Power Transfer Systems', IEEE Radio and Wireless Symposium, pp. 16–18, 2009.

## *CHAPITRE VI*

---

### CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES DU TRAVAIL DE THESE

---



---

## TABLE DES MATIERES

---

I.	Conclusion générale .....	132
1.	Capteur RLC .....	133
2.	Capteur WGM.....	134
II.	Perspectives et Future Work.....	135

---

## **I. Conclusion générale**

Le suivi des paramètres physiques (pression, contraintes, fissures, température, humidité, etc.) dans les systèmes embarqués ou les infrastructures est indispensable aussi bien pour la qualification et le suivi fonctionnel de ces systèmes que pour le contrôle de santé des structures (Structural Health Monitoring). A l'heure actuelle, ces paramètres sont obtenus avec des réseaux de capteurs filaires qui compliquent leur mise en œuvre et donc augmente le coût, ou bien ne sont accessibles qu'à posteriori par des techniques d'inspections contraignantes et coûteuses. Parmi les solutions sans fil développées on trouve les capteurs actifs qui permettent d'obtenir de grandes distances d'interrogation mais dont l'autonomie est limitée par la batterie. Devant l'intérêt économique et scientifique lié à la réduction de la consommation énergétique, les solutions fondées sur ces capteurs ont été vite abandonnées pour laisser la place à des solutions passives de type RFID ou SAW. Ces capteurs passifs, de natures très différentes, présentent l'avantage d'une très grande autonomie mais leur distance d'interrogation est généralement nettement inférieure à 10m. En effet, malgré les avancées remarquables dans ce domaine il reste encore des problèmes à résoudre qui motivent de nombreux chercheurs. La maîtrise et la réduction de la consommation énergétique dans un réseau de capteurs restent parmi les problématiques les plus courantes. La distance d'interrogation et le débit d'information transmis vis-à-vis de la quantité d'énergie consommée sont des paramètres clés dans la conception de ce type de systèmes.

Dans ce contexte, le Laboratoire des Technologies Innovantes de l'Ecole Nationale des Sciences Appliquées de Tanger en collaboration avec le Laboratoire Investigación Grupo de Sensores y Magnetismo de l'Université Polytechnique de Valencia ont débuté dans le cadre de cette thèse, le développement des capteurs passifs pour lesquels le principe de conception a été complètement repensé. Ces dispositifs sont fondés sur des modes de transduction complètement passifs qui ne nécessitent pas d'énergie embarquée et peuvent être interrogé à grande distance.

Après avoir, dans un premier temps, présenté le cadre de notre travail, puis montré l'insuffisance des technologies existantes, nous avons étudié et proposé deux systèmes de mesure de température permettant de favoriser l'utilisation de ces capteurs dans les réseaux de capteurs distribués. La réduction de la consommation énergétique en s'affranchissant complètement des besoins énergétiques embarqués, permet d'envisager une interrogation de ces capteurs sur des distances de plusieurs dizaines de mètres.

## 1. Capteur RLC

Un premier démonstrateur a permis de valider le principe de la mesure passive de température à l'aide d'une capacité planaire. La topologie du capteur est basée sur cette capacité dont la permittivité de son matériau diélectrique varie progressivement suite à une augmentation de la température. Le changement de la permittivité effective entre les armatures de la capacité modifie d'une façon monotone la valeur de la capacité ainsi que la fréquence de résonance du capteur.

Dans un premier temps, le principe de fonctionnement du capteur est expliqué et les différents choix effectués sont justifiés. La capacité planaire s'est révélé un candidat à fort potentiel pour réaliser un capteur passif pour la mesure de la température. Ce potentiel a notamment été mis en relief par les travaux disponibles dans la littérature. Nous avons donc conçu et caractérisé le dispositif avec l'élément clé qui est la capacité sensible intégrée dans un filtre passif passe bande. Les optimisations des performances du capteur et les simulations sont mises en œuvre pour valider le principe de fonctionnement à l'aide d'un outil de simulation Multisim<sup>TM</sup> de la société National Instruments.

Une étude d'influence des composants utilisés dans le filtre nous a permis de constater que l'inductance L2 ainsi que la capacité C2 arrivent à modifier la fréquence de résonance du circuit, notamment en s'intéressant aux caractéristiques de la capacité planaire et sa dépendance approximativement linéaire à la fréquence. Tandis que les autres paramètres n'ont manifesté aucun impact sur le comportement fréquentiel de la cellule de mesure.

Le dispositif prouve donc la mise en œuvre simple et économique d'un capteur de température sans batterie embarquée. Il peut être proposé comme une solution pour la protection contre l'incendie des véhicules de transport terrestre. En particulier, au niveau des organes de puissance où il existe un risque de surchauffe susceptible de provoquer un incendie. Cette solution permet par conséquent de prendre les mesures appropriées au cours du trajet, et de signaler un incident à temps sans perturber la conduite, ce qui permet d'éviter l'endommagement des véhicules et de la marchandise. Le capteur présente des performances comparables aux solutions commercialisées et un excellent compromis entre consommation, gamme de température et bande passante.

Par ailleurs, nous avons montré qu'il était possible d'utiliser le champ électromagnétique pour mesurer la variation de la température. Le principe de détection repose sur la mesure de la

fréquence de résonance dans un résonateur diélectrique hyperfréquence. Le matériau diélectrique utilisé est le pérovskite constituant le diélectrique de la capacité sensible, dont les propriétés diélectriques dépendent de la température. La variation de la température environnante induit principalement une modification plus ou moins importante de sa permittivité diélectrique.

## 2. Capteur WGM

La deuxième proposition est donc un transducteur radiofréquence pour la mesure de température basée sur le matériau PLZT (utilisé comme matériau de détection) dont la constante diélectrique varie progressivement avec la température : c'est le phénomène de la relaxation diélectrique en présence d'une variation de la température qui engendre par conséquent un décalage en fréquence du résonateur diélectrique au niveau d'un filtre fonctionnant aux hyperfréquences.

Le but est la validation du principe d'un nouveau capteur de température basé sur le changement des propriétés diélectriques de ce matériau, ce qui modifie par la suite d'une façon monotone la fréquence de résonance du résonateur diélectrique. Nous avons donc conçu le capteur à base de ce matériau sensible et d'un résonateur diélectrique excité en modes de galerie par des lignes coplanaires. Le choix des WGM s'est avéré le meilleur puisque ces derniers nous permettent d'avoir des filtres à base de RD avec un très grand facteur de qualité (100 fois supérieur à celui d'un résonateur diélectrique excité sur les modes conventionnels).

Le principe de la transduction radiofréquence est fondé sur la corrélation entre la fréquence de résonance d'un circuit microonde et la constante diélectrique du matériau PLZT qui subit une modification proportionnelle à la variation de la température. Nous avons pu utiliser des résultats de la littérature concernant les propriétés diélectriques du matériau PLZT pour simuler le comportement du capteur. La variation de la température environnante, engendrait une variation de la permittivité du PLZT, ce qui pour notre capteur créerait un décalage sur une fréquence de résonance.

A partir des simulations numériques électromagnétiques rigoureuses (HFSS<sup>TM</sup>), nous avons montré ici qu'une faible modification de la permittivité du matériau diélectrique induit une forte variation de la fréquence de résonance des modes de galerie du résonateur. En s'appuyant sur les caractéristiques du matériau sensible utilisé (cf. chap. III. 3 Fig.3), il est donc possible de déduire de cette mesure la variation de la température.

Dans un premier temps, nous avons simulé l'influence des parties constituant le capteur : le matériau PLZT, le résonateur diélectrique son support puis les lignes coplanaires afin d'avoir un meilleur couplage. Ensuite, nous avons simulé l'impact des épaisseurs et des diamètres des matériaux utilisés. Les résultats obtenus sont très encourageantes puisque un décalage en fréquence vers les basses fréquences a été enregistré. De toute évidence, nous avons détecté plusieurs résonances sur la bande Ka. Par contre des pertes en transmission ont été également enregistrées. Les travaux ont montré également qu'il était possible d'obtenir des variations importantes.

Par ailleurs, et comme les conséquences d'un incendie à bord d'un navire sont toujours coûteuses et parfois tragiques, cette solution permet donc de répondre au besoin d'améliorer la protection du transport maritime contre les incendies. Ainsi, contrôler à tout moment la température et de réagir rapidement en cas de problème.

L'avantage de ce type de dispositif, par rapport à la capacité planaire présentée précédemment, réside dans la gamme de température, l'hyperfréquence et la distance de lecture. Les travaux réalisés ont néanmoins permis de mettre en évidence les difficultés technologiques ainsi que les pistes pour les surmonter. Ces résultats ont donc répondu aux objectifs de mes travaux de thèse, à savoir la proposition d'un capteur innovant pour réduire la consommation de l'énergie dans un réseau de capteurs de température avec une bonne distance d'interrogation.

## **II. Perspectives et Future Work**

Ce travail contribue à l'optimisation de la consommation d'énergie ainsi que la maximisation de la durée de vie d'un réseau de capteurs de température. Les travaux que nous avons menés utilisent des méthodes d'optimisation très avancées, combinant des éléments de détection potentiels et des outils de simulations qui permettent de trouver des solutions optimales de gestion d'énergie des capteurs sans fils pour la réduction de la consommation d'énergie dans un réseau de capteurs (et donc la maximisation du temps de surveillance des cibles).

Parmi les résultats de recherche que nous avons présentés dans cette thèse, la plupart d'entre eux sont obtenus par des simulations. De ce fait, un des travaux futurs est la fabrication de ces dispositifs afin de vérifier le fait que les simulations présentent de bonnes approximations de la réalité. La facilité de mise en œuvre, les performances et le coût relativement bas de ces dispositifs répondent en grande partie aux besoins industriels.

En outre, l'élément clé des deux capteurs conçus est le matériau sensible PLZT, la validation de ses propriétés électromagnétiques intrinsèques est envisagée. En effet, nous avons entamé une étude expérimentale après avoir reçu plusieurs échantillons (cf. Chap. III Fig.3) réalisés par P. Wawrzala et J. Korzekwa à l'Université de Silésie (Faculty of Computer Science and Materials Science) de Pologne. Les mesures sont effectuées en utilisant l'équipement de mesure : '85070E Dielectric Probe Kit' de la société Agilent Technologies. Cet outil de mesure permet de fournir des informations importantes sur les matériaux utilisés dans la littérature. Ce qui permet de donner un aperçu général de leurs applications dans de nombreuses industries.

Ensuite, nous pouvons également citer, comme autre perspective, la conception et fabrication d'une antenne planaire intégrée avec le capteur afin d'avoir un microsystème complet qui facilitera l'interrogation radar dans le cas du capteur électromagnétique. En effet, cela va aider à voir une interrogation nettement améliorée (bonne portée) et plus sensible par la maîtrise des pertes qui proviennent de la ligne à retard (câble coaxial) connectée entre l'antenne cornet et le capteur.

A l'issue de ce travail, on prévoit bien évidemment de promouvoir notre collaboration avec l'équipe Grupo Sensores y Magnetismo dirigé par le Professeur José PELEGRI, afin de poursuivre la validation des topologies et améliorer la qualité des résultats obtenus relatifs aux antennes RF. Autres actions de collaboration sont mises en place avec cet organisme peuvent constituer un contexte extrêmement favorable au développement de la recherche et de la formation à la recherche, notamment dans le domaine des réseaux de capteurs autonomes et la technologie de la récolte d'énergie.

Enfin, ces capteurs ont de nombreuses perspectives d'application dans des domaines très variés en outre que les applications proposées. Des applications peuvent être envisagées pour mettre en évidence ces dispositifs, en l'occurrence la santé, la domotique, l'environnement et l'industrie. C'est ainsi que nous présentons des travaux qui favorisent une meilleure détection de température, tout en octroyant plus d'intérêt à des solutions qui optimisent de plus en plus la consommation de l'énergie, pour permettre une longue longévité des capteurs et de profiter pleinement de leurs avantages.



**AUTEUR** : Asma BAKKALI

**TITRE** : Réseaux de Capteurs Passifs pour la Détection de la Température

**DIRECTEUR DE THESE** : Abdelouahid LYHYAOUI

**LIEU ET DATE DE SOUTENANCE** : ENSA-TANGER, LE 03/04/2014

---

## RESUME

Le travail présenté dans ce manuscrit de thèse s'inscrit dans la perspective du développement d'un capteur de température sans batterie embarquée. L'objectif est donc de réussir à réduire la consommation énergétique dans les réseaux de capteurs sans fil. Deux capteurs innovants ont été proposés pour répondre aux besoins de la détection de température et pallier le manque de capteurs passifs. Le premier capteur utilise une capacité planaire intégrée dans un filtre passe-bande. Cette capacité est constituée par des électrodes déposées sur un substrat pérovskite sensible à la température. La variation d'impédance, obtenue lors du changement de la température, permet de modifier la fréquence de résonance du circuit. Le capteur ensuite peut être couplé à une antenne pour être interrogé à distance par un lecteur. Le second capteur est basé sur le principe de la transduction électromagnétique et son originalité réside dans l'intégration du matériau sensible à haute température dans un dispositif hyperfréquence. La variation de la température produit le changement de la constante diélectrique de ce matériau, et une telle modification induit une variation dans les fréquences de résonance des modes de galerie d'un résonateur diélectrique. De cette façon, le dispositif proposé présente une réponse linéaire suite à l'augmentation de la température et ces variations peuvent être détectées à distance par un radar, et ce à partir de l'antenne du capteur. Les dispositifs proposés constituent de puissants outils pour de nombreuses applications intéressantes, puisqu'ils offrent une très faible consommation d'énergie et fournissent une mesure écologique de température. Ces capteurs ont été soumis à des simulations afin de définir leurs performances et de montrer l'avantage des systèmes de détection sans batteries. A l'issue des résultats obtenus le capteur électromagnétique s'avère plus performant et présente des perspectives intéressantes.

---

**MOTS-CLES** : Consommation d'énergie, Réseaux de capteurs sans fil, Durée de vie, Conservation d'énergie, Modes de galerie, Matériau PLZT, Température, Résonateur diélectrique.

---

**DISCIPLINE ADMINISTRATIVE** : Conception des Circuits Microélectroniques et Microsystèmes.

---

**LABORATOIRES** : Laboratoire des Technologies Innovantes & Laboratoire Investigación GSyM.

---

## **SUMMARY**

The context of this thesis is the development of passive sensors for temperature sensing applications. The purpose is to successfully reduce the energy consumption in wireless sensor networks. Two types of passive temperature sensors in high frequencies are proposed. The first battery less system is made up of a planar capacitor integrated into a band pass filter. As the temperature changes, the capacitance is modified and thereby alters the resonant frequency of the circuit. The sensor can be coupled with an antenna in order to be interrogated at distance by a reader. The second sensor is based on the electromagnetic transduction principle and its originality resides on the integration of a high temperature sensitive material into passive structure. Variation in temperature makes the dielectric constant of this material changing, and such modification induces variation in the resonant frequencies of high-Q whispering-gallery modes in the millimeter-wave frequency range. In this way, the proposed device shows a linear response to the increasing temperature and these variations can be remotely detected from a radar interrogation of an antenna loaded by the whispering-gallery modes resonator. Proposed devices are powerful tools for many interesting applications since they offer very low power consumption and provide environmentally friendly temperature measurement. These sensors were simulated in order to outline their performance and to show the benefit of the battery less sensing device. Following the results achieved, the electromagnetic sensor is more powerful and provides interesting perspectives.

---

**KEYWORDS :** Energy Consumption, Wireless Sensor Networks, Lifetime, Energy conservation, Whispering Gallery Mode, PLZT material, Temperature, Dielectric Resonator.

---

# LISTE DES PUBLICATIONS

## JOURNAUX INTERNATIONAUX AVEC COMITÉ DE LECTURE

Asma Bakkali, Youssef Laghmich, Abdelouahid Lyhyaoui, 'Green Passive Temperature Sensing Technology using Sensitive Ceramic Capacitor', International Journal of Computer Applications, Volume 71– No.15, May 2013.

Asma Bakkali, Youssef Laghmich, Abdelouahid Lyhyaoui, 'Novel Autonomous Temperature Sensor based on Sensitive Material and Dielectric Resonator', International Journal of Emerging Trends & Technology in Computer Science , Volume 2, Issue 1, January – February 2013.

Asma Bakkali, Abdelouahid Lyhyaoui, Mohammed Reda Britel, Youssef Laghmich, 'Need and Trend for Smart Temperature Sensors: Dielectric Resonator and Sensitive Material Suitable for Use as Passive Temperature Sensor', International Journal of Advances in Electrical and Electronics Engineering, Vol.1, No.3, 2012.

Asma Bakkali, Mohammed Reda Britel, Youssef Laghmich, Abdelouahid Lyhyaoui, 'New Passive Temperature Sensor using Dielectric Resonator with a Sensitive Layer', International Journal of Advances in Science and Technology, Vol. 5, No.2, 2012.

Miguel Pareja, Asma Bakkali, Jose Pelegri-Sebastia, Tomás Sogorb, Vicente Llario, 'Review on Radio Frequency Energy Harvesting: Sources and Techniques', Elsevier Editorial System for Sensors & Actuators: A. Physical, (In review).

## CONFÉRENCES INTERNATIONALES AVEC COMITÉ DE LECTURE

Asma Bakkali, Abdelouahid Lyhyaoui, Mohammed Reda Britel, Youssef Laghmich, 'Conception d'un Capteur Passif pour la surveillance de Température dans le Transport de Marchandises', 6ème Edition du Colloque International LOGISTIQUA, Tangier, May 2013.

Asma Bakkali, Mohammed Reda Britel, Youssef Laghmich, Abdelouahid Lyhyaoui, 'New Passive Temperature Sensor based on sensitive Capacitor', IEEE Conference: International Conference on Multimedia Computing and Systems ICMCS, Tangier, May 2012.

Asma Bakkali, Mohammed Reda Britel, Youssef Laghmich, Abdelouahid Lyhyaoui, 'Toward a Passive Sensors Network for Temperature Detection', International Workshop on Codes, Cryptography and Communication Systems WCCCS, Rabat, June 2011.

Asma Bakkali, Abdelouahid Lyhyaoui, Mohammed Reda Britel, Youssef Laghmich, 'Passive Sensors Network For Temperature Detection', IEEE Conference: Low Voltage Low Power Conference FTFC, Marrakech, May 2011.

