

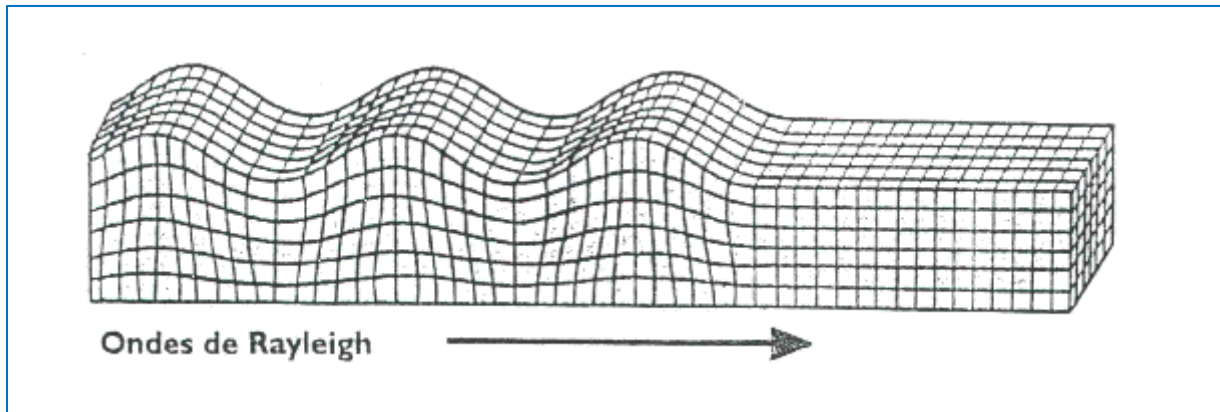
# Utilisation de la méthode de Prony pour la mesure de température par des capteurs passifs à base de résonateurs fonctionnant dans une même bande de fréquence

## Résumé du sujet de thèse

La société SENSEOR développe des systèmes que l'on peut apparenter aux systèmes RADAR pour la mesure de température en particulier, incluant des capteurs utilisant la technologie SAW (Surface Acoustic Wave). De par leur nature purement passive, ces capteurs présentent un fort intérêt dans le cas d'environnements sévères (forts champs électromagnétiques, haute température, ...). Ces capteurs sont majoritairement basés sur la mise en parallèle de résonateurs dont la fréquence va varier en fonction de la température, chaque capteur occupant une bande de fréquence définie (sous-bande) et différente (multiplexage fréquentiel). Une des limitations actuelles est la largeur limitée de la bande ISM à 434 MHz qui ne permet de gérer qu'un faible nombre de sous bandes et par conséquent de capteurs. L'objectif de cette thèse est donc de mettre au point une méthode basée sur la théorie développée par Prony qui permet de faire une mesure pertinente des fréquences de plusieurs capteurs fonctionnant dans la même bande de fréquence. Ces travaux feront suite à un premier travail de thèse qui a permis de mettre en évidence le fort potentiel de cette méthode. Une première phase de simulation numérique devra être menée afin de valider théoriquement la méthode pour un nombre de capteurs supérieur à deux et pouvant atteindre quinze capteurs et d'estimer sa sensibilité au bruit électromagnétique. Par la suite un système démonstrateur sera mis au point sur la base du lecteur existant, incorporant les capacités de fréquence d'échantillonnage adaptées aux signaux à 434 MHz ainsi que des moyens de calcul embarqués compatibles avec la complexité associée à la méthode de Prony.

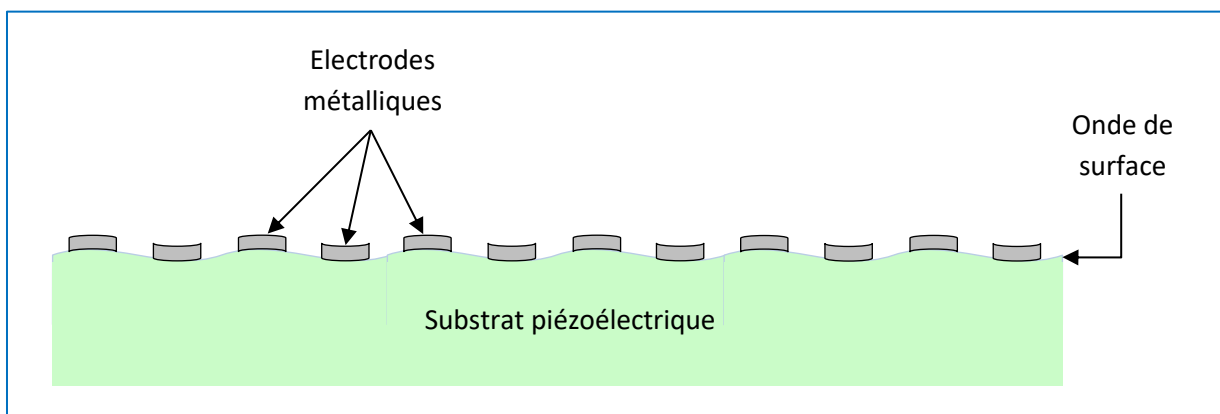
## Contexte de la thèse

SENSEOR conçoit, développe et commercialise des capteurs piézoélectriques (pour la mesure de la température et de contrainte/déformation) passifs à ondes de surface communément appelés capteur SAW (acronyme anglais signifiant **S**urface **A**coustic **W**ave). Ces capteurs sont typiquement constitués de résonateurs fonctionnant dans des bandes de fréquences allant de 430 à 450 MHz et utilisant généralement un substrat de quartz permettant d'atteindre de hauts facteurs de qualité (produit  $Q \cdot f$  de l'ordre de  $6 \cdot 10^{12}$ ).

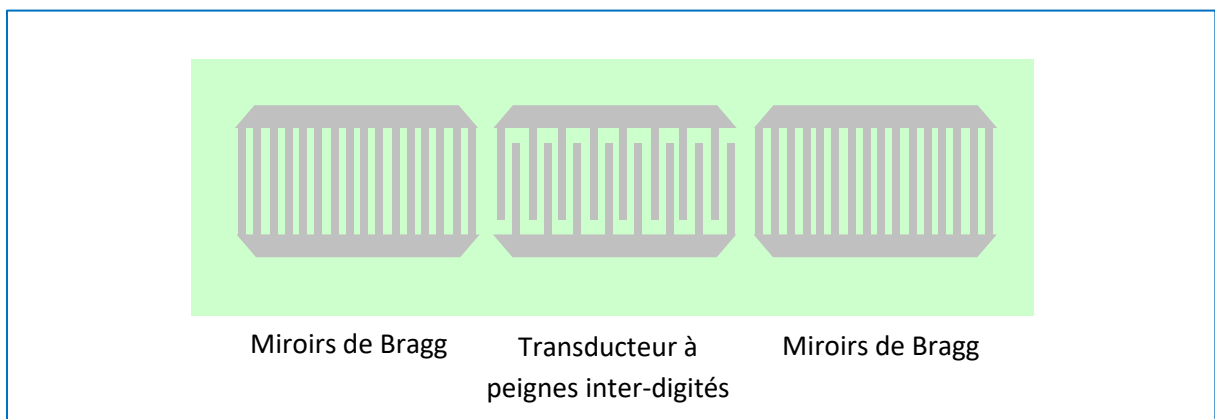


**Figure 1 :** Représentation de la surface d'un solide en présence d'une onde acoustique de surface classique : l'onde Rayleigh

Un résonateur à ondes de surface est constitué d'électrodes métalliques, déposées par des procédés de photolithographie usuels en micro-électronique, à la surface d'un substrat piézoélectrique. La structure d'un résonateur à ondes de surface est un transducteur électroacoustique à peignes interdigités entouré de part et d'autre par des miroirs de Bragg :

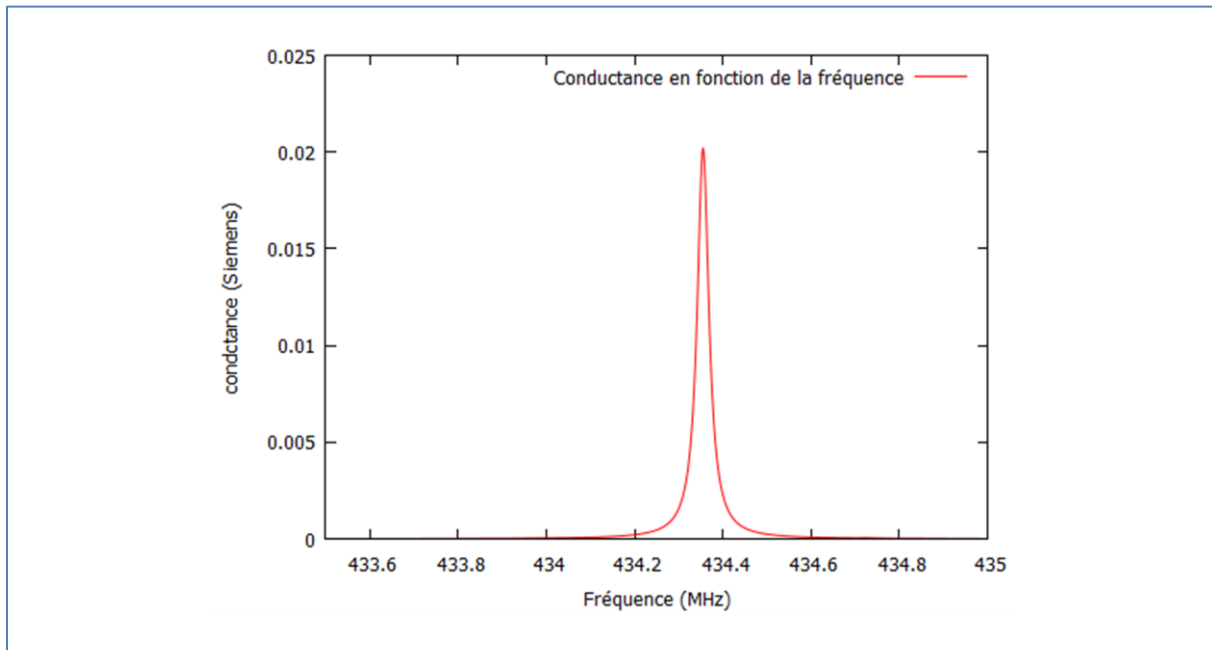


**Figure 2 :** Electrodes d'un résonateur SAW vu en coupe dans le plan sagittal en présence d'une onde de surface



**Figure 3 :** Electrodes d'un résonateur à ondes de surface vues de dessus

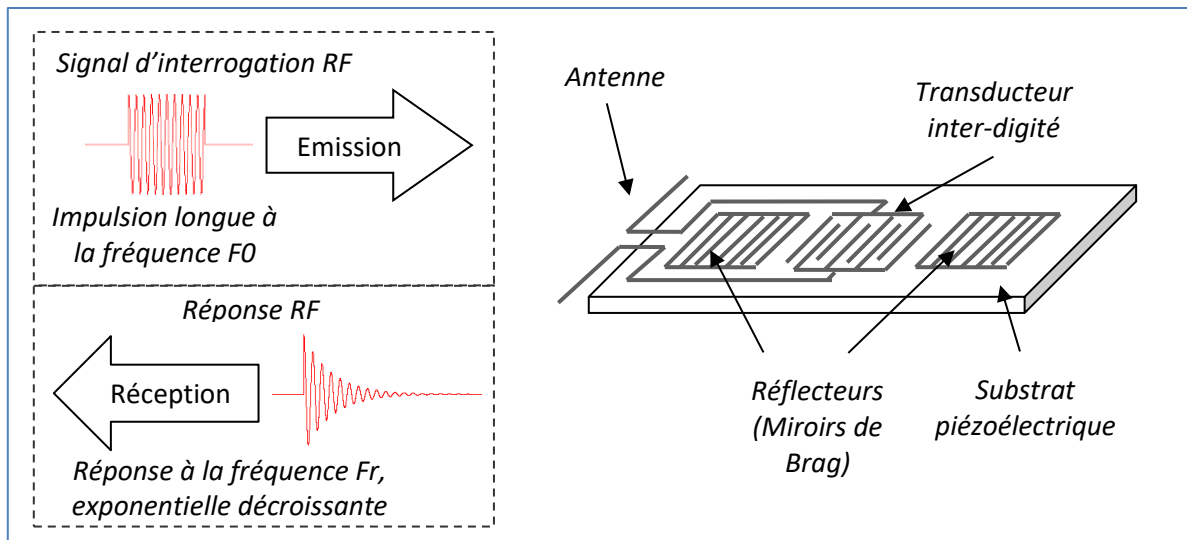
A la fréquence de résonance, la condition de synchronisme entre les réflecteurs est satisfaite permettant d'obtenir une addition cohérente des différentes réflexions qui se produisent sous les réflecteurs. On observe alors un maximum d'énergie acoustique au sein de la cavité résonante et d'un point de vu électrique, on observe un maximum d'amplitude du courant admis par le transducteur. La conductance électrique (partie réelle de l'admittance qui multipliée par la tension donne le courant), fonction de la fréquence, admet donc à la fréquence de résonance un maximum :



**Figure 4 :** Réponse en fréquence typique d'un résonateur SAW sur quartz

Connectés à une antenne radioélectrique, les résonateurs peuvent être interrogés par l'intermédiaire d'ondes électromagnétiques, c.à.d. que l'on peut déterminer leur fréquence de résonance. Pour cela, on utilise une méthode d'interrogation proche de celle du RADAR (Acronyme anglais de **R**adio **D**etection **A**nd **R**anging) monostatique (Fig 5):

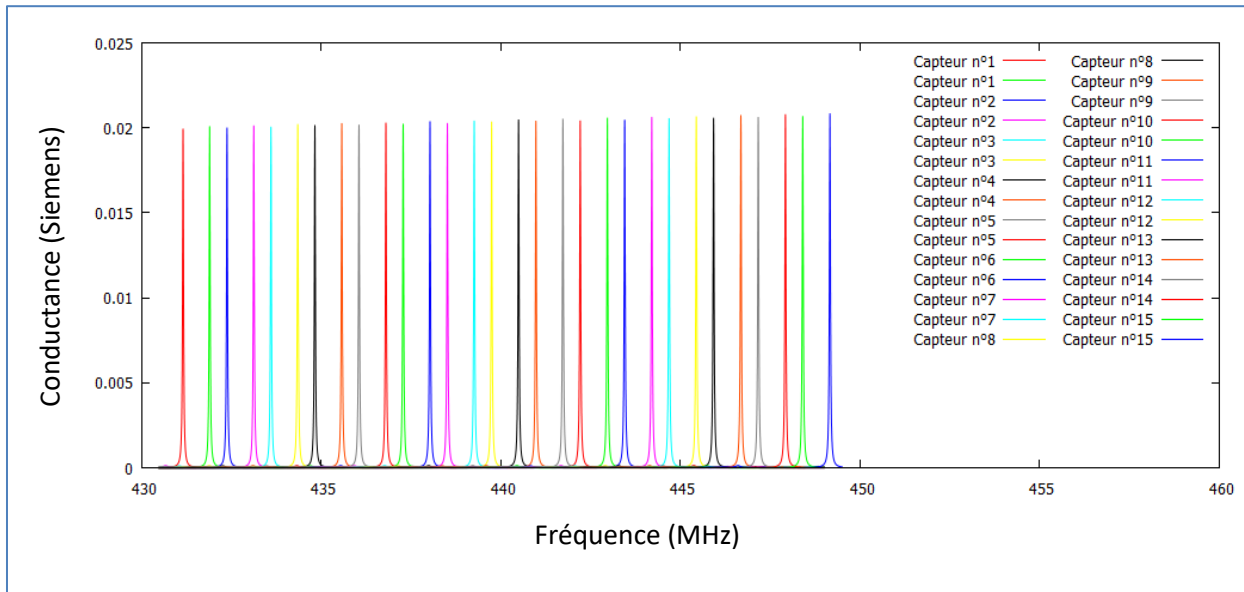
Une impulsion électromagnétique longue est émise à une fréquence  $F_0$  et force le résonateur à osciller à cette fréquence, c'est la phase dite « d'émission ». Plus la fréquence émise est proche de la fréquence de résonance du résonateur (condition de synchronisme dans les miroirs de Bragg), plus le résonateur accumule d'énergie dans la cavité acoustique. Pendant la durée de l'impulsion émise, le résonateur se charge, accumulant de l'énergie. Ensuite, après un bref état transitoire, le résonateur se décharge dans l'antenne qui lui est connectée, émettant une exponentielle décroissante à sa fréquence naturelle d'oscillation  $F_r$ , c.à.d. à la fréquence de résonance. La puissance reçue de l'exponentielle décroissante est alors mesurée, c'est la phase dite « de réception ». L'opération complète est répétée en faisant varier la fréquence d'interrogation  $F_0$  et le maximum de puissance mesurée correspond à la fréquence de résonance.



**Figure 5 :** Principe d'interrogation RF d'un résonateur SAW

De manière à s'affranchir de certaines perturbations RF (distance entre le capteur et l'antenne d'émission notamment) et de certains problèmes dus au vieillissement du capteur (dérive des fréquences dans le temps par exemple), ce dernier est généralement constitué d'un minimum de deux résonateurs dans le cas de la température ou de trois résonateurs dans le cas d'une mesure de pression compensée en température. Cela permet d'utiliser la différence de fréquence entre les deux résonateurs pour calculer la grandeur physique mesurée, comme par exemple la température. La mesure « différentielle » permettant de s'affranchir des effets indésirables associés à une mesure non différentielle.

Il est possible, simplement, de décliner le principe d'interrogation pour faire cohabiter et interroger plusieurs capteurs : un multiplexage fréquentiel est alors utilisé. Chaque capteur possède dans ce cas des fréquences de résonances distinctes permettant aujourd'hui d'interroger 15 capteurs de température décalés en fréquence dans la bande des 430 MHz à 450 MHz (voir figure 6). Cette configuration nécessite de pouvoir fonctionner dans des bandes non ISM correspondant à des environnements confinés et répondant à des exigences spécifiques en termes de puissance émise, périodicité du signal d'émission,...



**Figure 6 :** Réponse en fréquence typique de 15 capteurs SAW multiplexés en fréquence

### Problématique associée à la thèse et solutions envisagées :

Dans la plupart des cas, il est nécessaire de disposer de plusieurs points de mesure ce qui est impossible à réaliser dans des environnements non confinés à 434 MHz où le multiplexage fréquentiel conduirait à une dégradation réshibitoire de la précision de mesure. Une des solutions envisagées pour remédier à ce problème consiste à utiliser des fréquences de fonctionnement ISM plus élevées où les largeurs de bande sont plus importantes ce qui permet potentiellement de faire fonctionner plusieurs capteurs dans des sous-bandes adjacentes. C'est le cas de la bande ISM à 2.45 GHz dite bande S qui s'étend de 2400 MHz à 2483 MHz. Ses avantages sont les suivants :

- il s'agit d'une bande utilisable dans le monde entier
- le niveau de puissance maximum varie de 10 à 20 dBm (selon que l'on utilise ou pas la méthode FHSS Frequency Hopping Spread Spectrum [1]) contrairement à la bande 434 MHz où la puissance du signal est limitée à 0 dBm où à 10 dBm selon la période du signal d'émission
- la bande relative est de 3.4% soit 8.5 fois plus importante qu'à 434 MHz (0.4%)
- on peut s'attendre à une réduction de la taille des antennes d'au moins un facteur 5 puisque celle-ci est proportionnelle à la longueur d'onde et à une augmentation de l'efficacité de rayonnement des antennes associée aux contributions environnementales métalliques
- cette fréquence de fonctionnement demeure compatible de la résolution accessible par les moyens de photolithographie pour la réalisation de capteurs SAW à 2.45 GHz

On peut néanmoins noter les inconvénients suivants :

- augmentation des pertes de propagation [2]
- augmentation des variations de fréquence liées aux dispersions de fabrication
- diminution du facteur de qualité (produit  $Q \times f$  constant) et du temps de décharge du résonateur (produit  $\tau \times f^2$  constant)

- forte occupation spectrale liées aux communications sans fil : WIFI, Bluetooth, ... avec un risque de pollution électromagnétique qui peut fortement impacter la précision de la mesure avec le capteur SAW

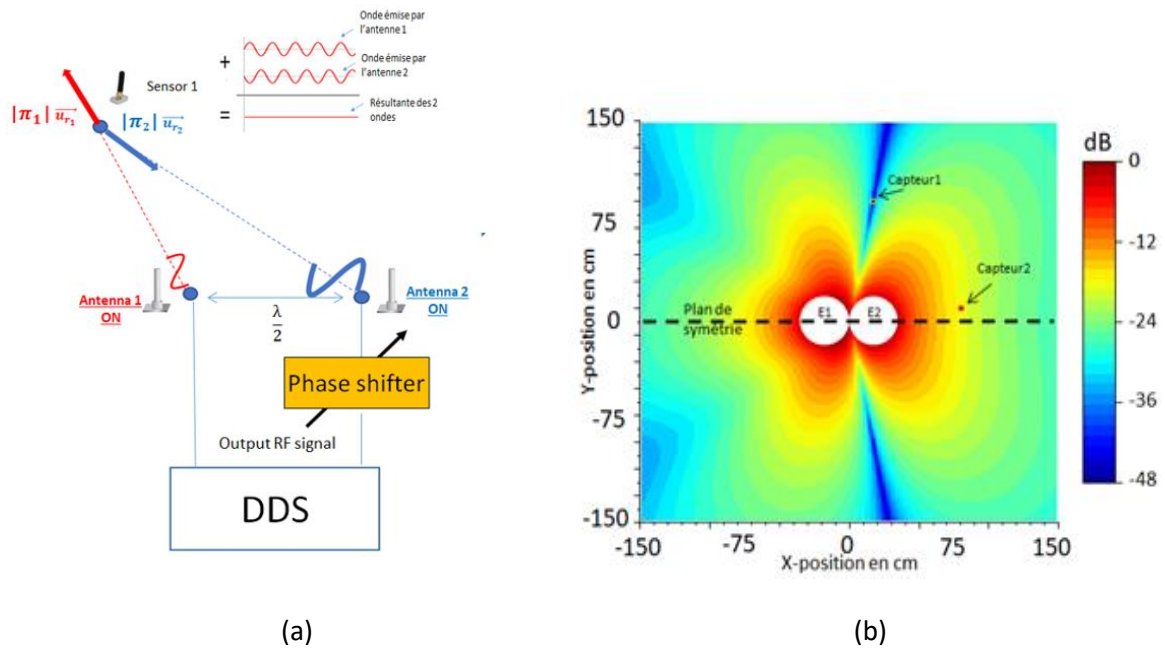
Il serait également nécessaire de mettre au point un nouveau lecteur adapté à cette bande de fréquence ce qui représente un effort de développement substantiel.

L'intérêt de pouvoir conserver le lecteur adapté à la bande ISM 434 MHz tout en pouvant faire cohabiter plusieurs capteurs dans cette même bande est donc d'une importance hautement stratégique.

Il est actuellement impossible d'interroger plus de deux capteurs de même référence fonctionnant aux mêmes fréquences (c.à.d. non multiplexés en fréquence) et tous deux visibles par la ou les antennes d'émission. En effet, la réponse obtenue est alors la somme des réponses de chaque capteur, réponses que nous ne savons pas séparer. Il s'agit d'une limitation majeure du système de mesure sans fil SENSEOR puisque la seule solution existante est le multiplexage fréquentiel, contraignant tant pour l'entreprise que pour les clients confrontés à la multiplication des références de capteurs. SENSEOR souhaite donc poursuivre l'effort de développement de techniques permettant de séparer et d'identifier les réponses issues de capteurs fonctionnant aux mêmes fréquences. Cela constituerait une innovation majeure dans le domaine des capteurs SAW passifs et plus précisément concernant l'interrogation de résonateurs SAW par liaison sans fil.

Cette problématique a déjà fait l'objet d'un premier travail de thèse [3] qui a permis d'évaluer les possibilités d'utiliser certaines techniques regroupées sous l'appellation de la séparation aveugle de sources [4]-[7]. Ces méthodes applicables au domaine temporel ou fréquentiel pour les applications radar en particulier, permettent de séparer les différentes sources mais ne permettent pas de les identifier. D'autres méthodes [8] de type estimation de la direction d'arrivée DoA (Direction of Angle) permettent de déterminer la direction des sources présentes dans la zone couverte par les systèmes d'antennes connectées au lecteur. Ces techniques nécessitent d'utiliser un nombre d'antennes au moins égal au nombre de sources devant être identifiées. Cette condition est rédhibitoire dans notre cas car la taille d'un tel système antennaire n'est pas compatible des contraintes d'encombrement des applications visées. De surcroît outre l'identification du capteur il est nécessaire d'obtenir l'information de fréquence de résonance qui ne peut être obtenue via l'utilisation de ces techniques.

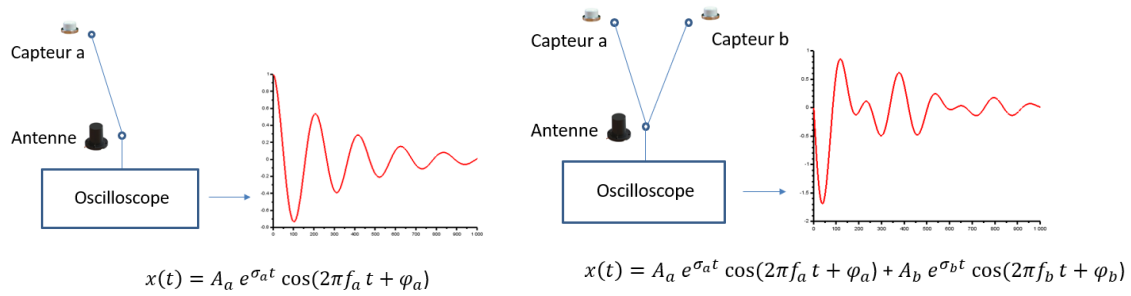
Ce premier travail de thèse a également permis de mettre en œuvre une méthode dite méthode du nul de rayonnement [9] et de démontrer sa validité expérimentale dans le cas de deux capteurs fonctionnant dans la même bande de fréquence. Celle-ci est basée sur l'utilisation du lecteur à 434 MHz qui possède deux sorties antennes déphasées et consiste à ajuster la puissance et la phase des 2 signaux émis par chacune des antennes de façon à créer un nul de rayonnement localisé à l'emplacement d'un des deux capteurs. La figure 7 ci-dessous présente la méthode ainsi que les résultats d'une simulation permettant de faire une mesure correcte avec le capteur n°2 sans être gêné par le capteur n°1. La méthode a par ailleurs été validée expérimentalement [9] dans le cas de deux capteurs de température installés dans une cellule moyenne tension.



**Figure 7 :** (a) Description sommaire de la méthode de nul de rayonnement (b) Simulation d'un nul de rayonnement localisé sur le capteur 1 permettant de faire une mesure avec le capteur 2

Cette méthode est néanmoins limitée au cas de deux capteurs car il n'est pas possible de créer simultanément des nuls de rayonnement sur plusieurs capteurs avec le lecteur actuel.

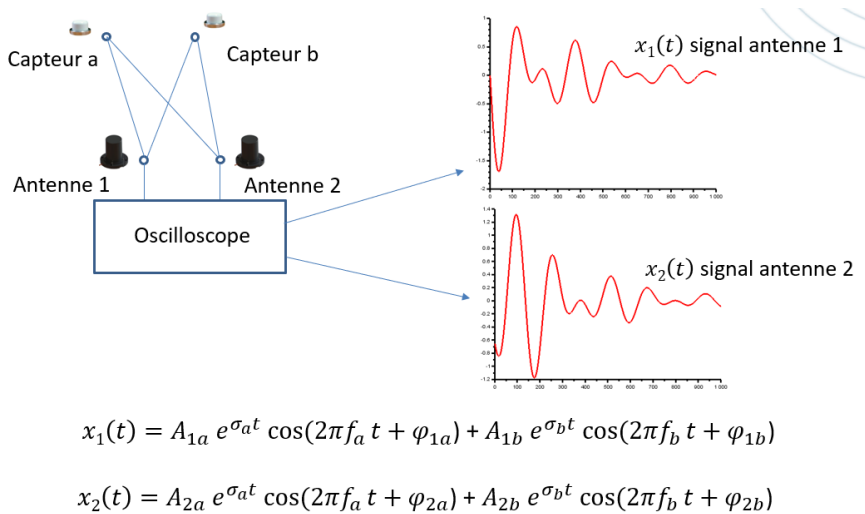
Ce travail de thèse a également été l'occasion d'identifier une méthode alternative très prometteuse permettant de séparer les réponses, d'identifier des capteurs fonctionnant dans la même bande de fréquence et de déterminer les fréquences de résonances de ces derniers. Cette méthode présente l'avantage fondamental de pouvoir théoriquement fonctionner dans le cas de  $N$  capteurs ( $N$  supérieur ou égal à 1) avec l'utilisation de 2 antennes uniquement connectées au lecteur. Cette méthode basée sur les travaux de Prony [10] est particulièrement bien adaptée à notre configuration où le signal accessible est une somme d'oscillations amorties, chaque oscillation amortie étant associée à un capteur. Suite à la phase de charge, l'expression de la décharge temporelle du résonateur "a" est décrit sur la figure 8 (a) ci-dessous. La signature du résonateur est déterminée par quatre paramètres  $A_a$ ,  $\varphi_a$  qui correspondent à l'amplitude et à la phase du signal (dépendants en particulier de la distance d'interrogation) et  $f_a$ ,  $\sigma_a$  qui correspondent à la fréquence de résonance et à l'amortissement du signal (paramètres intrinsèques au résonateur). Si l'on ajoute un second capteur, voir figure 8 (b), le signal de décharge temporelle va être la somme de deux oscillations amorties chacune étant caractérisée par ses paramètres  $A$ ,  $\varphi$ ,  $f$  et  $\sigma$ .



**Figure 8 :** (a) décharge temporelle du résonateur "a" mesurée avec une antenne (b) superposition des décharges temporelles des résonateur "a" et "b" mesurées avec une antenne

La méthode de Prony [10] permet via un échantillonnage adéquat du signal temporel de la figure 8 (b) de construire un système d'équations dont la résolution conduit à la détermination des quatre paramètres  $A$ ,  $\varphi$ ,  $f$  et  $\sigma$  pour chacun des résonateurs, l'information de fréquence étant le paramètre recherché afin de pouvoir en déduire l'information de température dans le cas d'un capteur de température par exemple.

La phase d'identification peut être réalisée via l'utilisation de deux antennes (voir figure 9 ci-dessous) dont les deux sorties sont découplées contrairement au lecteur actuel où les deux sorties sont combinées via un déphasage variable.



**Figure 9 :** superposition des décharges temporelles des résonateur "a" et "b" mesurées avec les antennes 1 et 2

L'identification des capteurs "a" et "b" est alors respectivement basée sur la mesure des différences de phase  $\Delta\varphi_a$  et  $\Delta\varphi_b$  avec :

$$\Delta\varphi_a = \varphi_{1a} - \varphi_{2a}$$

$$\Delta\varphi_b = \varphi_{1b} - \varphi_{2b}$$

Les différences de phase  $\Delta\varphi_a$  et  $\Delta\varphi_b$  présentent la particularité d'être quasiment constantes dans les gammes de températures de mesure. Celles-ci sont néanmoins variables en fonction de la distance de mesure ce qui limite l'application de cette méthode aux configurations stationnaires.



Une simulation numérique dans le cas de deux résonateurs a d'ores et déjà été effectuée selon la configuration de la figure 9 et a démontré la validité de la méthode. La même méthode a également été éprouvée expérimentalement dans le cas d'un résonateur selon la configuration de la figure 8 (a) et a démontré son efficacité à obtenir les quatre paramètres  $A$ ,  $\varphi$ ,  $f$  et  $\sigma$ .

Dans de nombreux cas les signaux issus des résonateurs peuvent être pollués par des signaux électromagnétiques parasites provenant de systèmes télécommandés par radio fréquence : ponts mobiles, systèmes ouverture : fermeture, talky walky, ... Nous ne connaissons pas à ce jour l'impact de tels signaux parasites sur les résultats de la méthode de Prony mais on peut d'ores et déjà identifier ce point comme potentiellement critique.

### **Principales étapes de la thèse**

Le travail de thèse débutera naturellement par une bibliographie exhaustive concernant les travaux associés à l'identification de capteurs à base de résonateurs fonctionnant dans la même bande de fréquence à l'aide de méthodes de type Prony.

Une première phase de simulation devra être engagée afin de démontrer l'aptitude de la méthode de Prony à obtenir les valeurs des paramètres  $A$ ,  $\varphi$ ,  $f$  et  $\sigma$  dans le cas de  $N$  ( $N > 2$ ) capteurs jusqu'à  $N=15$  capteurs par exemple. La robustesse de la méthode devra être également testée numériquement par rapport à la présence de différents types de bruit et de source d'interférence. Ce sera l'occasion de valider en particulier que la condition d'échantillonnage imposée par Shannon (fréquence d'échantillonnage supérieure ou égale à deux fois la fréquence maximum présente dans le spectre du signal) conduit à des mesures pertinentes.

Une validation expérimentale de la méthode de Prony dans le cas d'un nombre de capteurs  $N > 2$  pourra être effectuée avec une mesure à l'aide d'un oscilloscope permettant d'accéder à un échantillonnage temporel adéquat (3 à 4 GHz pour les signaux de la bande ISM à 434 MHz).

Une maquette de lecteur à 434 MHz compatible de la mise en œuvre de la méthode devra être mise au point. Cette mise au point passera par la recherche d'un composant permettant d'atteindre les fréquences d'échantillonnage visées. Une modification du hardware devra également être effectuée afin de créer deux voies antennes indépendantes pour pouvoir réaliser la fonction d'identification précédemment décrite. La méthode de Prony et son extension pour l'identification nécessite de disposer d'une capacité de calcul importante, c'est pourquoi il sera nécessaire d'identifier un microprocesseur de type DSP ou équivalent compatible avec cette complexité de calcul. Un logiciel adapté devra également être développé.

Des mesures sans fil devront par la suite être effectuées avec la maquette de lecteur à 434 MHz avec un nombre de capteurs croissants de  $N=1$  à  $N=15$  afin d'évaluer les limites de fonctionnement du système. On testera en particulier la robustesse de celui-ci par rapport aux sources d'interférences électromagnétiques.

Il est à noter qu'une des limitations potentielles pour le déploiement de cette solution est la disponibilité d'un composant à un coût compatible du prix de vente du système permettant d'atteindre les fréquences d'échantillonnages visées. On peut envisager concernant ce dernier point la possibilité de mettre en œuvre des méthodes d'échantillonnage plus basse fréquence avec un déphasage variable. Une autre solution alternative consiste à développer une architecture superhétérodyne qui

permet de ramener le signal à analyser à une fréquence plus basse compatible de convertisseurs analogiques numériques standards. Ces possibilités pourront également être étudiées dans le cadre de la thèse.

[1] FCC part 15 Rules

[2] Arthur Von Hippel MIT, *Dielectric materials and applications*

[3] C. Jendrzejczak "Développement de techniques de séparation et d'identification de réponses de capteur sans fil identiques et fonctionnant simultanément dans le cas de capteurs à base de résonateurs"

[4] N. Mitianoudis and M. Davies, "Audio source separation of convolutive mixtures," IEEE Trans. Speech and Audio Processing, vol. 11, no. 5, pp. 489-497, 2003.

[5] H. Sawada, R. Mukai, S. Araki, and S. Makino, "A robust and precise method for solving the permutation problem of frequency-domain blind source separation," IEEE Trans. Speech and Audio Processing, vol. 12, no. 5, pp. 530-538, 2004.

[6] S. I. Amari, S. C. Douglas, A. Cichocki, and H. H. Yang, "Multichannel blind deconvolution and equalization using the natural gradient," Proc. SPAWC, pp. 101-104, 1997.

[7] Q. Pan and T. Aboulnasr, "Time-domain convolutive blind source separation employing selective-tap adaptive algorithms," EURASIP Journal Audio, Speech, and Music Processing, vol. 2007, 2007.

[8] Guillaume de La Roche " Estimation bande étroite des angles d'arrivée d'un signal radio-mobile en environnement Indoor", PROJET DE FIN D'ETUDES, ECOLE SUPERIEURE DE CHIMIE PHYSIQUE ELECTRONIQUE DE LYON FILIERE ETI - OPTION TELECOM , Aout 2003

[9] C.Jendrzejczak, C.Migliacccio, J.Y. Dauvignac, L.Chommeloux "identification et mesure par formation de faisceau d'un capteur SAW dans un environnement multi-capteurs" Assemblée générale GDR ONDES " Interférences d'ondes" Sophia Antipolis 23-25 Octobre 2017

[10] James B. Tsui "Digital techniques for wideband receivers" second edition Scitech publishing. Inc.

[11] M. Monedero "Interrogation de dispositif à base d'onde acoustique de surface dans milieu de propagation fortement électromagnétiquement perturbé" pli Soleau PS-2017-003, 10 Juillet 2017

Contacts pour le sujet : Robert.Staraj@unice.fr - Philippe.Lethuc@unice.fr - Luc.Chommeloux@senseor.com

Lieu de la thèse : LEAT Campus Sophiatech et SENSEOR Route des Lucioles Valbonne