



**HAL**  
open science

# Capteurs sans fil à ondes élastiques de surface pour applications biomédicales, mesure du champ magnétique et environnements industriels

Sami Hage-Ali

► **To cite this version:**

Sami Hage-Ali. Capteurs sans fil à ondes élastiques de surface pour applications biomédicales, mesure du champ magnétique et environnements industriels. Sciences de l'ingénieur [physics]. Université de Lorraine, 2020. tel-03241548v2

**HAL Id: tel-03241548**

**<https://hal.univ-lorraine.fr/tel-03241548v2>**

Submitted on 21 Jun 2021

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



UNIVERSITÉ  
DE LORRAINE C2MP



# HABILITATION A DIRIGER DES RECHERCHES

Spécialité : Science des matériaux

Capteurs sans fil à ondes élastiques de surface pour  
applications biomédicales, mesure du champ magnétique  
et environnements industriels

Sami Hage-Ali

Soutenue le 15 décembre 2020 devant le jury :

Rapporteure : Marta CLEMENT, Professeure, Universidad Politecnica de Madrid

Rapporteure : Thérèse LEBLOIS, Professeure, Université Bourgogne Franche-Comté

Rapporteur : Smaïl TEDJINI, Professeur, Grenoble INP

Examineur : Thierry BELMONTE, Directeur de recherche CNRS, Institut Jean Lamour

Examineur : Jamal BOUGDIRA, Professeur, Université de Lorraine

Examineur : Omar ELMAZRIA, Professeur, Université de Lorraine

Examineur : Philippe PERNOD, Professeur, Ecole Centrale de Lille

Examineur : Sergei ZHGOON, Professeur, National Research University Moscow



# Sommaire

---

Introduction .....	4
Partie 1 : Travaux de recherche .....	5
A. Thèse de doctorat (2007-2011) .....	6
B. Séjour post-doctoral aux Etats- Unis (2011-2013).....	8
C. Post-doctorat : IEMN – LICS (2013-2014) .....	11
D. Maître de conférence à l’Université de Lorraine / Institut Jean Lamour (depuis 2014) .....	12
E. Projet scientifique .....	60
F. Liste des encadrements de doctorat et de master .....	66
G. Liste des publications et communications.....	68
H. Bibliographie.....	76
I. Liste des figures .....	79
J. Liste des tableaux.....	81
Partie 2 : Autres activités.....	82
A. Présentation des activités d’enseignement .....	83
B. Animation de la recherche et responsabilités .....	85
C. Rayonnement national et international.....	86
D. Expertises .....	87
E. Activité contractuelle .....	87
F. Organisation de congrès /workshop .....	89
G. Relations internationales .....	89
H. Relations avec l’industrie et activités de prestation .....	90
I. Vulgarisation scientifique et animation grand public .....	91

# Introduction

Il y a parfois de bons virus ! Celui de la recherche, je l'ai attrapé dès le plus jeune âge en accompagnant mon père Makram sur le grand campus de recherche du CNRS dans le quartier de Cronenbourg à Strasbourg, au milieu des accélérateurs de particules.

Cette passion pour la recherche n'a jamais été démentie depuis : j'ai commencé mes activités de recherche « sérieuses » lors de mon projet TIPE de classe préparatoire au laboratoire PHASE, encore une fois encadré par mon père. Puis lors de mon stage de fin d'études, à l'IEMN sous la direction du Pr Didier Lippens sur la thématiques des métamatériaux RF « main gauche ».

Il y aussi des rencontres qui changent une trajectoire de vie et une carrière: celle avec Philippe Pernod est une de celles-là. Au départ mon enseignant au sein de l'option « Ondes, micro-nanoélectronique et Télécommunication » à l'Ecole Centrale de Lille, Philippe m'a guidé vers une thèse de doctorat à l'IEMN qu'il a codirigé avec Vladimir Preobrazhensky, Philippe Coquet et Nicolas Tiercelin. C'est lors de ces travaux de doctorat que j'ai pu m'intéresser à deux domaines qui constituent encore aujourd'hui des piliers de mon activité : l'électronique souple et les hyperfréquences, en particulier les antennes. Ensuite, il m'a été possible, grâce à une bourse Fulbright, d'entamer un post-doctorat à l'université d'Illinois à Urbana-Champaign sous la supervision de John Rogers, référence mondiale de l'électronique étirable.

Après une année de post-doctorat à l'IEMN, j'ai été recruté en 2014 tant que Maître de conférences à l'Université de Lorraine / Institut Jean Lamour dans l'équipe Micronanosystèmes, notamment grâce à la recommandation d'Abdelkrim Talbi. C'est là que je fais une autre rencontre cruciale : celle d'Omar Elmazria, que je considère comme un mentor, tant au niveau scientifique que sur l'appréhension du métier d'enseignant-chercheur. Omar m'a également introduit au domaine des dispositifs sans fil à ondes élastiques de surface, qui fait l'objet de ma recherche à l'IJL. C'est donc tout naturellement qu'il est le parrain scientifique de cette Habilitation à Diriger des Recherches. J'ai également une pensée forte pour Sergei Zhgoon, dont je me considère encore aujourd'hui comme l'étudiant, tant j'apprends de lui ! Je remercie également Thierry Belmonte, directeur de l'IJL et Jamal Bougdira, directeur du pôle M4 de l'UL, qui m'ont tous deux ouvert leur porte et prodigué conseils et soutien à chaque fois que j'en ai eu le besoin.

Je profite de ces lignes pour remercier vivement les Pr Marta Clement, Thérèse Leblois et Smaïl Tedjini pour avoir accepté de rapporter cette HDR, ainsi que tous les examinateurs pour leur participation au jury.

Dans [la partie 1](#) de ce manuscrit, les activités de recherche de ma thèse de doctorat à aujourd'hui sont détaillées dans les [sections A à D](#) tandis que mes projets en cours et futurs sont détaillés dans la [section E](#). Les références associées à ces travaux sont à trouver dans la liste de mes publications [section G](#). Les textes intégraux des RICL sont disponibles sur [HAL](#). La bibliographie générale est, elle, disponible [section H](#).

Le bilan de mes autres activités (enseignement, responsabilités, expertises, animation scientifique, activité contractuelle, relations internationales...) est présenté dans la [Partie 2](#) : Autres activités .

# Partie 1 : Travaux de recherche

## A. Thèse de doctorat (2007-2011)

En 2007, j'ai commencé mes travaux de doctorat, au sein de l' équipe du Laboratoire international associé en MagnétoAcoustique non linéaire (LEMAC) à l'Institut d'Electronique, Microélectronique et Nanotechnologie (IEMN) sous la direction des professeurs Philippe Coquet, Philippe Pernod et Vladimir Preobrazhensky et le co-encadrement du docteur Nicolas Tiercelin et en collaboration avec l'IETR (Prof. Ronan Sauleau). Mes travaux ont porté sur la reconfiguration mécanique d'antennes et dispositifs hyperfréquences millimétriques ultrasouples grâce aux microsystèmes magnéto-électro-mécaniques (MMEMS) et ont été financés par une bourse DGA.

Ces travaux ont été motivés par le besoin d'antennes reconfigurables dans la bande des 60 GHz pour des applications de télédétection et de télécommunications sans fil : les solutions traditionnelles de reconfiguration sont basées sur des semiconducteurs ou des composants RF-MEMS, qui connaissent un coût, une complexité et des pertes croissantes en bande millimétrique.

Dans ma thèse de doctorat, une approche originale a été développée : elle est basée sur la reconfiguration mécanique d'antennes et dispositifs millimétriques microrubans sur substrat élastomère ultrasouple PDMS, grâce à des actionneurs MEMS grands déplacements.

Dans un premier temps, les choix de conception, la technique de simulation éléments finis (HFSS), la microfabrication d'antennes sur membrane PDMS ainsi que les techniques de mesure en impédance et rayonnement sont abordées. Une première antenne réseau a été étudiée en intégralité et fait l'objet en 2009 d'une publication dans *Antennas and Wireless Propagation Letters*.

Deux axes sont ensuite étudiés : les antennes accordables en fréquence, et les antennes et composants pour le balayage angulaire (déphaseurs et antennes à balayage mécanique de type « scanner »). Des procédés technologiques innovants ont été développés (reports de métallisations épaisses biocompatibles et d'aimants permanents FePt en couches minces sur membrane PDMS) et différentes techniques d'actionnement (pneumatique, magnétique, par électromouillage) ont été mises en œuvre. Les performances en terme d'accord en fréquence (8,2 % pour l' antenne à actionnement pneumatique, publiée en 2010 dans *Antennas and Wireless Propagation Letters*) et de balayage angulaire ( $-90/+100^\circ$ ) dépassent l'état de l'art des antennes du même type en bande millimétrique. Ces résultats sont obtenus en utilisant une technologie peu complexe, ultra bas-coût et prometteuse pour la montée en fréquence.

Quelques exemples de dispositifs ayant été entièrement conçus, modélisés par éléments finis, micro-usinés en salle blanche et caractérisés en impédance et, le cas échéant, en rayonnement pendant mes travaux de doctorat sont présentés ci-dessous :

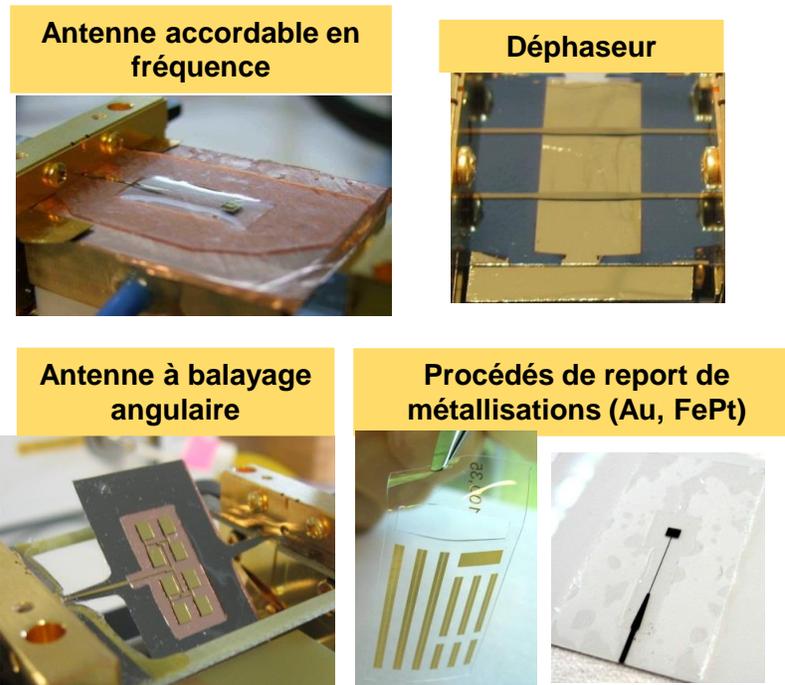


Figure 1 : Quelques exemples réalisations issues de ma thèse de doctorat

Par ailleurs, les principaux concepts liés à la reconfiguration de dispositifs hyperfréquences ont été brevetés dans le brevet FR2955319 « Dispositif hyperfréquences reconfigurable à membrane déformable ».

Ma thèse de doctorat a été soutenue le 30 septembre 2011 à Villeneuve d'Ascq avec la mention très honorable.

Ces travaux ont été valorisés dans les publications suivantes, ainsi que les proceedings [P2] à [P6] :

[R4] Y. Dusch, N. Tiercelin, A. Klimov, V. Rudenko, Y. Ignatov, **S. Hage-Ali**, P. Pernod, and V. Preobrazhensky, "Giant magnetostrictive nanostructured films with auto induced spin reorientation transition," *Nanomaterialy i nanostruktury XXI vek.*, vol. 1, pp. 35–41, 2011. <https://elibrary.ru/item.asp?id=16220260>

[R3] Y. Dusch, N. Tiercelin, A. Klimov, V. Rudenko, Y. Ignatov, **S. Hage-Ali**, P. Pernod, and V. Preobrazhensky, "Patterned L<sub>10</sub>-FePt for polarization of magnetic films," *J. Appl. Phys.*, AIP, vol. 109, no. 7, pp. 07A720, 2011 <https://doi.org/10.1063/1.3561172>

[R2] **S. Hage-Ali**, N. Tiercelin, P. Coquet, R. Sauleau, V. Preobrazhensky, and P. Pernod, "A Millimeter-Wave Inflatable Frequency Agile Elastomeric Antenna," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol.9, pp. 1131-1134, 2010 <https://doi.org/10.1109/LAWP.2010.2096405>

[R1] **S. Hage-Ali**, N. Tiercelin, P. Coquet, R. Sauleau, H. Fujita, V. Preobrazhensky, and P. Pernod, "A Millimeter-Wave Microstrip Antenna Array on Ultra-Flexible Micromachined Polydimethylsiloxane (PDMS) Polymer," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 8, pp. 1306-1309, 2009 <https://doi.org/10.1109/LAWP.2009.2037590>

## B. Séjour post-doctoral aux Etats- Unis (2011-2013)

Suite à mon doctorat, j'ai obtenu une bourse Fulbright pour aller effectuer un post-doctorat pendant 20 mois dans l'équipe du Prof. John A. Rogers à l'Université d' Illinois à Urbana-Champaign (USA), une des meilleures équipes au monde dans le domaine de l'électronique souple et étirable. Mettant à profit mes compétences en hyperfréquences, mes recherches ont porté sur le développement d'une nouvelle génération de composants sans fil, ultrasouples et étirables (antennes, électronique, capteurs, téléalimentation). Ces composants «universels» peuvent s'intégrer de manière conforme à tout type de surfaces, et résister à différents types de sollicitations mécaniques. Les domaines applicatifs sont variés : applications biomédicales (peau électronique, électronique implantable montée sur organe), grand public (électronique sur vêtements et montage dans des objets fortement contraints en volume) ou militaires (dispositifs compacts, robustes et reconfigurables).

Structuralement parlant, ces dispositifs étirables sont « maillés » avec des motifs 2D en « fer à cheval », ce qui garantit une bonne étirabilité et une structure intrinsèquement robuste car redondante.

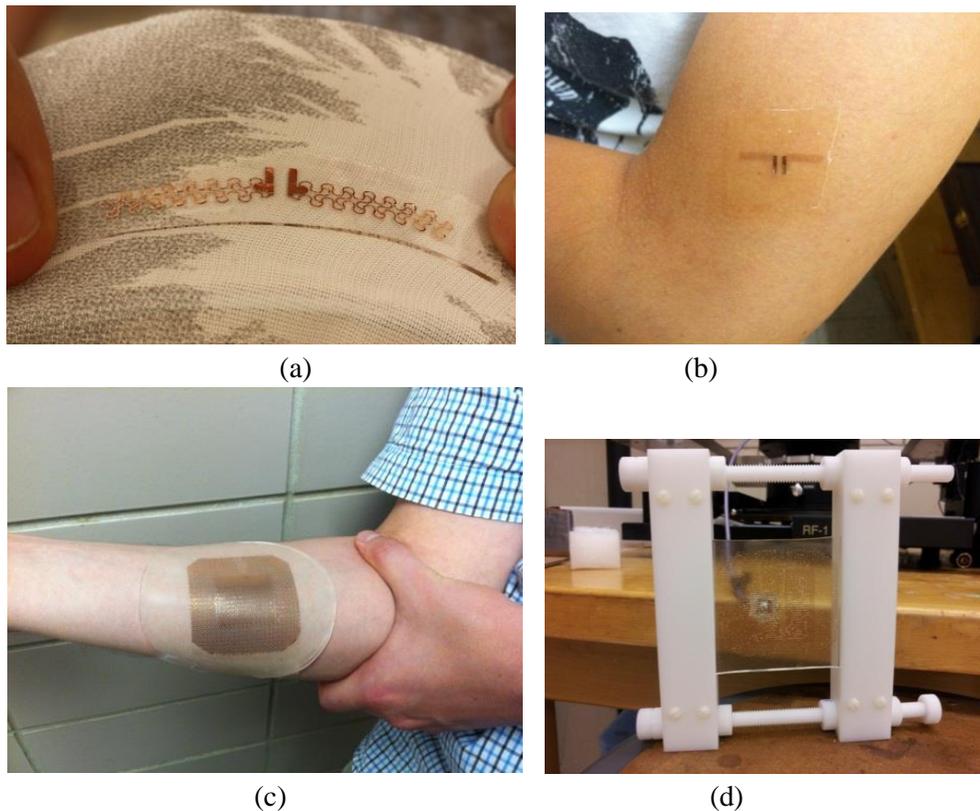


Figure 2 : Quelques exemples de réalisation d'antennes maillées résonant autour de 2 GHz :  
(a) Antenne dipôle sur substrat élastomère 500 microns (b) Antenne dipôle tatouée sur la peau (substrat élastomère 5 microns) (c) Antenne patch conformée sur la peau (d) La même antenne étirée sous test à l'analyseur de réseau.

Ces dispositifs sont tous réalisés par « transfer printing », une technologie utilisée dans presque toutes les réalisations du groupe de John Rogers. Il s'agit là d'une technique extrêmement versatile et un grand nombre de surface finales peuvent être considérés : la peau (epidermal electronics), les vêtements (wearable electronics) ou l'intérieur du corps humain (électronique implantable)

Les antennes produites présentent de nombreux avantages : elles sont de faible poids, translucides, peuvent servir dans tout type d'applications ultracompactes et sont fortement déformables avec des rayons de courbure très faibles. Etant étirables jusqu'à 35% au minimum elles peuvent former des structures 3D, par exemple sphériques à partir de structures 2D. Ces antennes peuvent également présenter un accord en fréquence de 10- 20% en les étirant.

Mes compétences en hyperfréquences, conception et modélisations électromagnétiques éléments finis (Ansys HFSS) et mesures RF, ont été sollicitées sur des projets très variés au sein de mon groupe de recherche. La problématique principale a été de mettre en place les méthodes de simulation (antennes, téléalimentation champ lointain, couplage inductif) et de caractérisation de dispositifs RF montés sur le corps humain. J'ai par ailleurs monté un laboratoire de test RF au sein du département de sciences des matériaux.

#### (a) Électronique RF biorésorbable

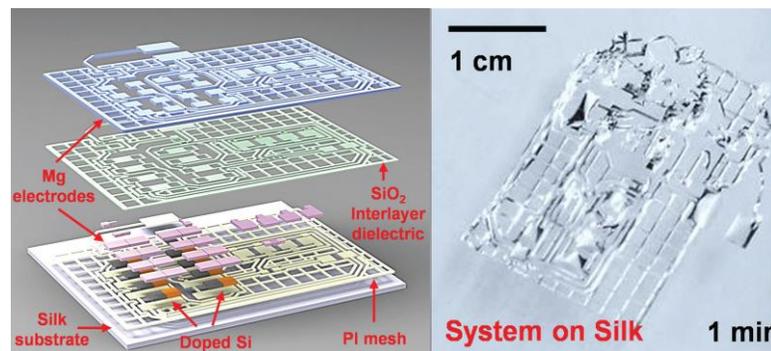


Figure 3 : Dispositif RF biorésorbable

Il s'agit d'un nouveau type d'électronique entièrement biorésorbable à base de Mg, MgO, soie résorbable et nano-membranes de Silicium. Les composants de base de circuits hyperfréquences, ainsi que la téléalimentation en champ lointain de dispositifs ont été démontrées dans le cadre de ce projet. Les applications biomédicales sont immenses puisqu'il est possible d'implanter des capteurs qui vont se biorésorber totalement à l'intérieur du corps humain sans avoir à réopérer un patient.

Ces travaux ont été valorisés dans :

[R5] S.-W. Hwang, X. Huang, J.-H. Seo, J.-K. Song, S. Kim, **S. Hage-Ali**, H.-J. Chung, H. Tao, F. G. Omenetto, Z. Ma, and J. A. Rogers, "Materials for Bioresorbable Radio Frequency Electronics," *Adv. Mater.*, vol. 25, no. 26, pp. 3526-3531, 2013 <https://doi.org/10.1002/adma.201300920>

(b) Capteurs d'hydratation et contrainte sans fil par couplage inductif

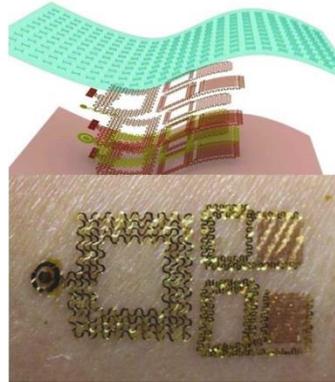


Figure 4 : Capteur d'hydratation et de contrainte [R6]

J'ai également modélisé et contribué aux mesures de capteurs d'hydratation et de contraintes sans fil basées sur une mesure de changements de capacité, dont l'information est transmise sans fil par couplage inductif. Ces travaux ont été valorisés dans :

[R6] X. Huang, Y. Liu, H. Cheng, W.-J. Shin, J. A. Fan, Z. Liu, C.-J. Lu, G.-W. Kong, K. Chen, D. Patnaik, S.-H. Lee, **S. Hage-Ali**, Y. Huang, and J. A. Rogers, "Materials and Designs for Wireless Epidermal Sensors of Hydration and Strain," *Adv. Funct. Mater.*, vol. 24, no. 25, pp. 3846-3854, 2014 <https://doi.org/10.1002/adfm.201303886>

## C. Post-doctorat : IEMN – LICS (2013-2014)

De manière à valoriser les compétences acquises aux Etats-Unis, j'ai choisi de retourner en France à l'IEMN pour un an au sein du Laboratoire International Associé LICS, à l'IEMN sous la direction de P. Pernod, N. Tiercelin et P. Coquet.

Mes travaux de recherche ont porté notamment sur le développement de dispositifs RF réalisés par impression jet d'encre d'encres Ag et PEDOT:PSS sur substrat élastomère (collaboration avec le CINTRA UMI CNRS/NTU/THALES, Singapour).

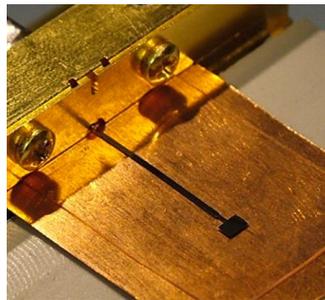


Figure 5: Antenne millimétrique en encre argent

Ces travaux ont été valorisés dans la conférence internationale :

[P7] S. Pacchini, **S. Hage-Ali**, A. Togonal, N. Tiercelin, P. Pernod and P. Coquet, "Inkjet-printed elastomeric millimeter-wave devices," 2014 44th Microwave Conference (EuMC), pp.13-16, 6-9 Oct. 2014, Rome, oral

J'ai par ailleurs appuyé l'encadrement de Gaëtan Dufour, doctorant DGA/ Région NPDC ainsi que Denis Le Goff, stagiaire de l'Ecole Centrale de Lille / Master Micro-nanotechnologies de l'université de Lille 1.

## D. Maître de conférence à l'Université de Lorraine / Institut Jean Lamour (depuis 2014)

### 1. Introduction

En septembre 2014, j'ai été recruté à l'Institut Jean Lamour en tant que Maître de Conférences au sein de l'équipe Micro-nanosystèmes (MNS), dirigée successivement par les professeurs Didier Rouxel et Frédéric Sarry, et au sein de laquelle je collabore de manière très rapprochée avec le Pr Omar Elmazria, qui est le directeur de thèse de toutes les thèses que je co-dirige ou que j'ai co-dirigé.

Mon but au sein de l'équipe MNS a dès le départ été double :

- Valoriser mes compétences en microfabrication, hyperfréquences et électronique souple au sein des différents projets de l'équipe
- Développer mon activité propre, notamment autour des capteurs sans fil étirables tatoués sur la peau.

Mon intégration au sein de l'équipe MNS m'a donné l'occasion de m'intéresser à un nouveau sujet de recherche complémentaire de mes activités passées : les capteurs à ondes élastiques de surface (SAW),

- a) pour les applications biomédicales
- b) pour la mesure de champ magnétique
- c) pour les environnements industriels et difficiles, notamment à haute température

## 2. Les capteurs à ondes élastiques de surface

Basés sur des matériaux piézoélectriques, les dispositifs à ondes élastiques de surface sont utilisés couramment comme filtres, résonateurs ou lignes à retard dans les systèmes électroniques pour une large gamme d'applications : les communications mobiles, les radars, ou en tant que résonateurs stables de génération d'horloge<sup>1</sup>. Pour ces applications, les dispositifs SAW dépendent de leur encapsulation (« package ») et de stratégies de compensation en température pour garantir la stabilité de leur propriétés.

A l'inverse, les dispositifs SAW sont de plus en plus utilisés comme capteurs : tout changement des propriétés élastiques des matériaux ou toute perturbation de surface aura un impact sur la vitesse de l'onde élastique. Ce changement de vitesse aura un impact sur la fréquence de résonance ou le délai de transmission des signaux, selon le type de dispositifs. Ainsi, combinés ou non avec des couches sensibles, les capteurs SAW peuvent être très sensibles aux paramètres physiques de l'environnement : la température, le champ magnétique, la déformation, la pression / force, les radiations. Ils peuvent être également utilisés pour la détection de la chimie / biologique en phase liquide ou gazeuse.

Pour plus de détails, un article de revue sur les capteurs résonants passifs, dont une solide partie traite des capteurs SAW, a été soumis récemment :

[R23] H. Hallil, C. Dejous, **S. Hage-Ali**, O. Elmazria, J. Rossignol, D. Stuerger, A. Talbi, A. Mazzamurro, P. Joubert, and E. Lefeuvre, "Passive resonant sensors: trends and future prospects", submitted to IEEE Sensors Journal

Les capteurs à base de SAW présentent l'avantage d'être passifs (**batteryless**) et peuvent être interrogés en utilisant des techniques sans fil (**wireless**). Dans leur version sans encapsulation, ils sont dits **packageless**. Nous avons donc baptisé les capteurs issus de notre activité sous le nom de **3less**.

Ces propriétés, combinées avec une petite taille, un système d'interrogation radio de faible coût et de petites antennes lors de l'utilisation à haute fréquence, offrent d'intéressantes perspectives pour les mesures sans fil. Lorsque les matériaux constituant les dispositifs sont correctement choisis, il devient possible d'utiliser ces capteurs sans électronique embarquée dans des environnements hostiles où les capteurs conventionnels ne peuvent aller<sup>2</sup>. Ces capteurs peuvent aussi être utiles pour les applications biomédicales, un milieu également « hostile » pour les ondes électromagnétiques et acoustiques.

Traditionnellement, il existe deux principales catégories de capteurs SAW en configuration sans fil (Figure 6) : les résonateurs<sup>3</sup> et les lignes à retard réfléchissantes<sup>4</sup> (R-DL), parfois plus connues sous l'acronyme ID-Tag, car le motif des réflecteurs permet de générer un « code-barre » permettant l'identification.

---

<sup>1</sup> C. K. Campbell, "Surface Acoustic Wave Devices for Mobile and Wireless Communications," San Diego, CA, USA: Academic, 1998.

<sup>2</sup> R. Fachberger, G. Bruckner, R. Hauser, and L. Reindl, "Wireless SAW based high-temperature measurement systems," in 2006 IEEE International Frequency Control Symposium and Exposition, 2006, pp. 358–367.

<sup>3</sup> A. Pohl, G. Ostermayer, and F. Seifert, "Wireless sensing using oscillator circuits locked to remote high-Q SAW resonators," IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, vol. 45, no. 5, pp. 1161–1168, Sep. 1998.

<sup>4</sup> V. P. Plessky and L. M. Reindl, "Review on SAW RFID tags," in IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, vol. 57, no. 3, pp. 654–668, March 2010.

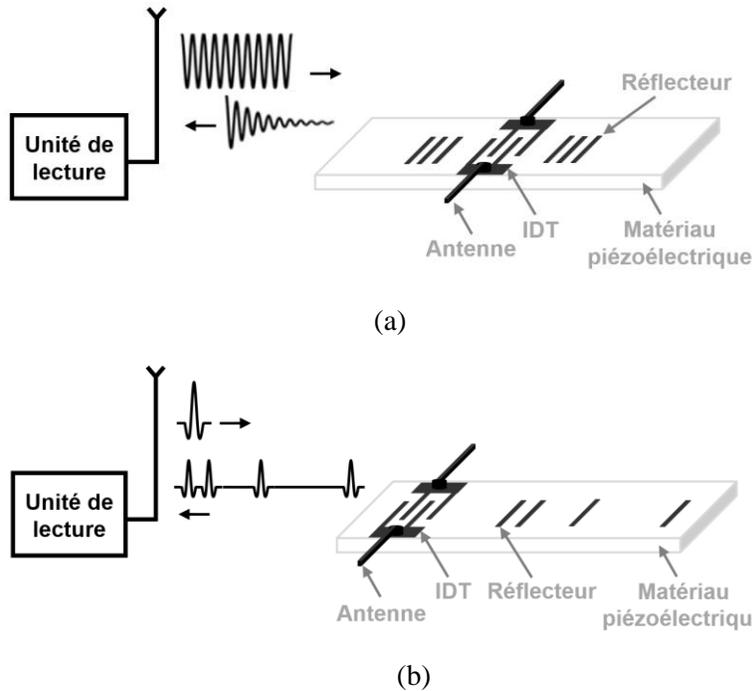


Figure 6 : (a) Résonateur en configuration sans fil (b) Ligne à retard réflective (R-DL) en configuration sans fil <sup>5</sup>

Pour les résonateurs, on cherchera à optimiser le facteur de qualité  $Q$  et la figure de mérite  $Q \cdot K^2$ ,  $K^2$  étant le coefficient de couplage électromécanique. Il est possible d'interroger ces capteurs via la technique suivante<sup>6</sup> : le résonateur est excité sans fil via un « burst » et se met en vibration à son autorésonance. L'analyse du signal « amorti » rétrodiffusé permet de remonter à la fréquence de résonance et *in fine* à la grandeur d'intérêt. La résolution en fréquence dépendra directement de  $Q$ , tandis que le pourcentage d'énergie rétrodiffusée dépendra de la figure de mérite<sup>7</sup>.

Pour les lignes à retard, c'est surtout le coefficient de couplage  $K^2$ , les pertes de propagation, ainsi que la définition des pics du signal transmis qui seront à optimiser.

Une excellente revue des techniques d'interrogation sans fil des capteurs SAW a été proposée par Lurz *et al.*<sup>8</sup>

<sup>5</sup> Cécile Floer, Thèse de doctorat, Université de Lorraine, 2019

<sup>6</sup> Mohamed M'Jahed, Gerard Prieur, Omar ElMazria Method for the rapid interrogation of a passive sensor, in particular of the surface acoustic waves type, and system for measuring the unique frequency of such a sensor, US PATENT US20140253094 A1 <http://www.google.com/patents/US20140253094>

<sup>7</sup> A. Shvetsov, S. Zhgoon, I. Antcev, S. Bogoslovsky, and G. Sapozhnikov, "Quartz orientations for optimal power efficiency in wireless SAW temperature sensors," in 2016 European Frequency and Time Forum (EFTF), 2016, pp. 1–4.

<sup>8</sup> F. Lurz, T. Ostertag, B. Scheiner, R. Weigel, and A. Koelpin, "Reader Architectures for Wireless Surface Acoustic Wave Sensors," Sensors, vol. 18, no. 6, p. 1734, Jun. 2018.

### 3. Applications biomédicales

Pour cette thématique, mes activités ont visé à jeter les bases d'une nouvelle génération de capteurs SAW étirables sans fil imprimés sur la peau pour la mesure de paramètres du corps humain comme la température ou les champs magnétiques faibles. Ce projet a été appelé « SAWGOOD », qui est également le nom du projet ANR JCJC en cours depuis 2018, et dont je suis le porteur. Ce projet a permis d'opérer une jonction entre mon expérience passée en électronique souple RF et mes « nouvelles » activités sur les capteurs SAW.

Une grande partie des résultats de cette section a été obtenue dans le cadre de la thèse de **Cécile Floer** entre Octobre 2016 et Novembre 2019. Ce travail de doctorat a été très fructueux au niveau scientifique et a été également multi-primé, notamment par le prestigieux prix L'Oréal-UNESCO pour les femmes et la science en 2019<sup>9</sup>. Ce travail doctoral a également permis de poser les bases de l'obtention d'une bourse postdoctorale Fulbright par la candidate pour un séjour à UCSD... ainsi que de son recrutement en tant que Maître de Conférences dans notre équipe de recherche à l'IJL.

Il est à noter que nombre de concepts développés dans cette partie du manuscrit seront utiles pour les différentes applications capteurs SAW, et pas uniquement pour la partie « applications biomédicales ».

#### 1. Motivation

Dans nos sociétés modernes, la nécessité de connaître en continu les paramètres du corps humain est une tendance croissante. Des applications militaires aux applications biomédicales/bien-être/sport, les objets connectés qui surveillent les paramètres corporels sont un besoin très important – et en croissance. Pourtant, la nécessité d'utiliser des fils/connectiques, des bracelets ou parfois des ceintures présentant tous potentiellement des difficultés opérationnelles, empêche les utilisateurs de porter en permanence ces objets connectés.

Un nouveau champ a alors émergé : l'électronique sur peau ou « epidermal electronics »<sup>10,11</sup> à savoir une nouvelle classe des dispositifs électroniques qui sont tatoués sur la peau d'une manière « transparente », et qui peuvent s'étirer, se plier, se tordre ou se conformer à n'importe quelle forme. Ce champ de recherche a été initié dans le groupe de recherche de John Rogers à l'Université d'Illinois à Urbana-Champaign, le groupe de référence au niveau mondial en électronique étirable où j'ai effectué mon postdoctorat.

Pourtant, l'électronique sur peau souffre encore de limitations : elle nécessite souvent l'utilisation d'électrodes peu commodes pour mesurer différents paramètres (température, déformations, EEG, EMG). Par ailleurs, la mise en œuvre de batteries et de radios RF pour réaliser des émetteurs-récepteurs actifs de télétransmission dans ce format ultrafin et étirable est extrêmement difficile. C'est pourquoi le

---

<sup>9</sup> <https://factuel.univ-lorraine.fr/node/12431>

<sup>10</sup> D.-H. Kim, N. Lu, R. Ma, Y.-S. Kim, R.-H. Kim, S. Wang, J. Wu, S. M. Won, H. Tao, A. Islam, K. J. Yu, T. Kim, R. Chowdhury, M. Ying, L. Xu, M. Li, H.-J. Chung, H. Keum, M. McCormick, P. Liu, Y.-W. Zhang, F. G. Omenetto, Y. Huang, T. Coleman, and J. A. Rogers, "Epidermal Electronics," *Science*, vol. 333, no. 6044, pp. 838–843, Aug. 2011.

<sup>11</sup> W.-H. Yeo, Y.-S. Kim, J. Lee, A. Ameen, L. Shi, M. Li, S. Wang, R. Ma, S. H. Jin, Z. Kang, Y. Huang, and J. A. Rogers, "Multifunctional Epidermal Electronics Printed Directly Onto the Skin," *Advanced Materials*, vol. 25, no. 20, pp. 2773–2778, 2013.

développement de capteurs entièrement passifs comme le capteur d'hydratation sans fil ([R6], Figure 4) est très intéressant, mais toujours limité à quelques centimètres de portée, du fait de l'utilisation de la technique de couplage inductif.

Dans ce contexte, les dispositifs à base d'ondes acoustiques de surface (SAW) apparaissent comme particulièrement pertinents : ils sont intrinsèquement passifs, interrogeables sans fil, de fabrication relativement aisée et compatible avec l'amincissement.

## 2. Objectifs et proposition

Partant de cette analyse, le but a été de trouver comment intégrer des capteurs à ondes élastiques dans le contexte de l'électronique sur peau.

L'objectif à long terme (voir également la section E : Projet scientifique) est de construire une plateforme de détection sans fil multifonctionnelle qui comprend une large gamme de capteurs biomédicaux. Dans le cadre de l'ANR JCJC, nous avons choisi de nous concentrer sur deux objectifs d'intérêt biomédical accessibles, avec une portée sans fil visée de 50 cm.

- le principal est la température, avec un objectif de sensibilité de 0,1 °C
- le second est le champ magnétique. Ici, l'objectif est double : mesurer le champ magnétique de milieu de gamme (mT), comme dispositif d'alerte pour les porteurs de stimulateurs. Le deuxième objectif est de progresser vers la gamme de détection des champs cérébraux (fT). Ceci étant trop lointain, un objectif intermédiaire dans la gamme du nT est fixé. Le développement des capteurs SAW de champ magnétique est décrit à la section 4.

Pour réaliser des capteurs multifonctionnels «prêts à tatouer» et intégrés harmonieusement sur la peau, d'une épaisseur totale inférieure à 70 µm, qui seront passifs, sans batterie, sans fil et sans package, il est proposé, pour répondre aux objectifs cités plus haut, de coupler (Figure 7) :

- des structures à ondes élastiques confinées de type **WLAW (Waveguiding Layer Acoustic Wave)**, protégées des perturbations externes, dont la peau. (voir section 5)
- des **antennes ultrafines étirables**, réalisées par « transfer printing » (voir section 6)

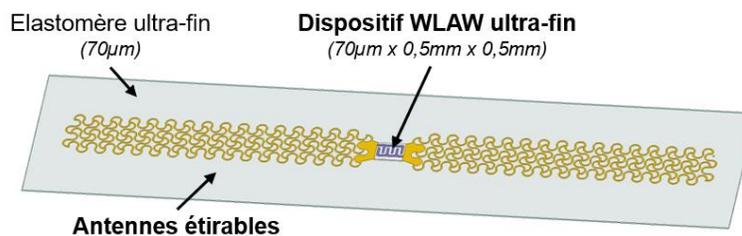


Figure 7 : Dispositif « prêt à tatouer »

Les bandes de fréquences pour l'interrogation sont les fréquences ISM (433 MHz, 868/900-915 MHz, 2450 MHz).

### 3. Verrous scientifiques et choix associés

Le corps humain est un milieu à très fortes pertes pour les ondes électromagnétiques et acoustiques aux fréquences avoisinant le GHz, pertes qu'il convient de maîtriser. En effet, par essence, ces capteurs présentent en configuration sans fil un bilan de liaison contraint par leur caractère passif et la puissance initiale autorisée par le régulateur des télécommunications.

Pour la partie électromagnétique, le but est de développer des designs spécifiques d'antennes RF, qui pourront répondre aux besoins suivants : ultrafines, étirables, respirantes, et surtout avec une valeur de gain maîtrisée. Dans un premier temps, nous utilisons des designs d'antennes dipôles étirables issus de mes travaux de post-doctorat aux Etats-Unis, et pour lesquelles le procédé de « transfer printing » a été transféré à l'IJL.

Pour la partie acoustique, le corps humain absorbant très rapidement les ondes élastiques, il fallait trouver un moyen de « découpler » les ondes du capteur de celui-ci. Nous nous sommes orientés vers des dispositifs « packageless » à ondes acoustiques confinés de type « Waveguiding Layer Acoustic Wave » (WLAW)<sup>12</sup>. Le principe est très similaire à celui de la fibre optique : l'onde acoustique est confinée dans une couche de faible vitesse acoustique entre deux couches à forte vitesse acoustique, rendant celle-ci insensible aux perturbations de surface, dont celles pouvant intervenir après laminage du capteur sur la peau.

Sur cette thématique - et d'autres -, l'équipe collabore de manière très proche avec le Pr Sergei Zhgoon (co-inventeur du concept) du Moscow Power Engineering Institute à Moscou en Russie, depuis des travaux initiaux sur diamant<sup>13</sup> et silicium<sup>14</sup> dans le cadre de la thèse de Ouarda Legrani.

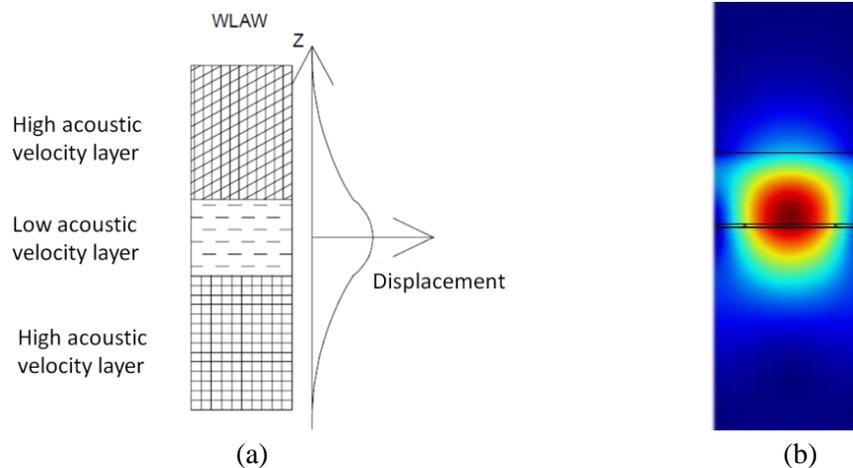


Figure 8 (a) Principe de base d'un dispositif WLAW (adapté de <sup>11</sup>) (b) Exemple de modélisation COMSOL du champ de déplacement acoustique d'une onde confinée WLAW

<sup>12</sup> K. Bhattacharjee, A. Shvetsov and S. Zhgoon, "Packageless SAW Devices with Isolated Layer Acoustic Waves (ILAW) and Waveguiding Layer Acoustic Waves (WLAW)," IEEE International Frequency Control Symposium, 2007 Joint with the 21st European Frequency and Time Forum., pp. 135-140, 2007

<sup>13</sup> O. Elmazria, S. Zhgoon, L. Le Brizoual, F. Sarry, D. Tsimbal, and M. A. Djouadi, "AlN/ZnO/diamond structure combining isolated and surface acoustic waves," Appl. Phys. Lett., vol. 95, no. 23, p. 233503, Dec. 2009, doi: 10.1063/1.3270536.

<sup>14</sup> O. Legrani, O. Elmazria, S. Zhgoon, P. Pigeat, and A. Bartasyte, "Packageless AlN/ZnO/Si Structure for SAW Devices Applications," IEEE Sensors Journal, vol. 13, no. 2, pp. 487-491, Feb. 2013, doi: 10.1109/JSEN.2012.2219692.

#### 4. Positionnement par rapport à l'état de l'art

Différents dispositifs de mesure de température sont comparés Tableau I, mais aucune d' eux ne présentent les spécification recherchées : ultrafins, sans fils, étirables.

Des dispositifs SAW flexibles sont décrits Tableau II. Les travaux <sup>20,21,22</sup> présentent des dispositifs avec croissance de couches minces piézoélectriques sur Al ou plastique, à forte pertes ou facteurs de qualité faibles pour les ondes de Rayleigh. Les modes de plaque (ondes de Lamb) sont peu prometteurs pour un lamination sur la peau. Xu & al <sup>23</sup> utilisent du LN aminci sur plastique, avec de bonnes performances, dans une approche similaire à la nôtre et qui conforte donc notre choix.

Tableau I – Quelque capteurs de température, sans fil ou en électronique sur peau, et leurs caractéristiques

Auteur	Sans fil ?	Fin / étirable ?	Méthode de mesure	Sensibilité	Application
Bakkali et al. <sup>15</sup>	oui	non	Résonateur diélectrique / radar	N/A	Environnements difficiles / haute température
Li. et al. <sup>16</sup>	oui	non	Résonateur LC (HTCC) / couplage inductif	2kHz/°C	Environnements difficiles / haute température
Bruckner et al. <sup>17</sup>	oui	non	SAW R-DL	0,01°C	Cryogénie
Webb et al. <sup>18</sup>	non	oui /oui	3 Omega	millikelvin	Electronique sur peau
Xu et al. <sup>19</sup>	non	non/oui	Piézorésistance (commercial)	/	Electronique sur peau

Tableau II – Caractéristiques des dispositifs SAW sur substrats flexibles (adapté de <sup>5</sup>)

	H. Jin et al. <sup>20</sup>	Y. Liu et al <sup>21</sup>	L. Lamanna et al. <sup>22</sup>	H. Xu et al. <sup>23</sup>
Substrat	polyimide	feuille Al	PEN	Plastique
Epaisseur	100µm	50µm	125µm	N/A
Couche	ZnO	ZnO	AlN	LN aminci (58µm)
Modes générés	Rayleigh; Lamb	Lamb	Rayleigh; Lamb	Rayleigh; Shear
TCF (ppm/°C)	-442; -245	-217	810; 67	-85; -59
Pertes moyennes (dB)	-50	-50	-70; -60	-15; -45
Sans fil ?	non	non	non	Non
Applicable sur peau	non	non	non	Oui

<sup>15</sup> A. Bakkali, J. Pelegri-Sebastia, Y. Laghmich and A. Lyhyaoui, "A batteryless temperature sensor based on high temperature sensitive material," *Eur. Phys. J. Appl. Phys.*, vol. 74, 2016.

<sup>16</sup> C. Li, Q. Tan, W. Zhang, C. Xue and J. Xiong, "An Embedded Passive Resonant Sensor Using Frequency Diversity Technology for High-Temperature Wireless Measurement," in *IEEE Sensors Journal*, vol. 15, no. 2, pp. 1055-1060, Feb. 2015.

<sup>17</sup> Bruckner, J. Bardong, Ch. Gruber and V. Plessky, "A Wireless, Passive ID Tag and Temperature Sensor for a Wide Range of Operation," *Procedia Engineering*, vol. 47, pp. 132-135, 2012.

<sup>18</sup> R. C. Webb, A. P. Bonifas, A. Behnaz, Y. Zhang, K. J. Yu, H. Cheng, M. Shi, Z. Bian, Z. Liu, Y.-S. Kim, W.-H. Yeo, J. S. Park, J. Song, Y. Li, Y. Huang, A. M. Gorbach and J. A. Rogers, "Ultrathin conformal devices for precise and continuous thermal characterization of human skin," *Nat Mater*, vol. 12, no. 10, pp.938-944, 2013

<sup>19</sup> S. Xu, Y. Zhang, L. Jia, K. E. Mathewson, K.-I. Jang, J. Kim, H. Fu, X. Huang, P. Chava, R. Wang, S. Bhole, L. Wang, Y. J. Na, Y. Guan, M. Flavin, Z. Han, Y. Huang and J. A. Rogers, "Soft Microfluidic Assemblies of Sensors, Circuits, and Radios for the Skin," *Science*, vol. 344, no. 6179, pp.70-74, 2014

<sup>20</sup> H. Jin, J. Zhou, X. He, W. Wang, H. Guo, S. Dong, D. Wang, Y. Xu, J. Geng, J. K. Luo and W. I. Milne, "Flexible surface acoustic wave resonators built on disposable plastic film for electronics and lab-on-a-chip applications," *Scientific Reports*, vol. 3, pp.2140-, 2013

<sup>21</sup> Y. Liu, J. T. Luo, C. Zhao, J. Zhou, S. A. Hasan, Y. Li, M. Cooke, Q. Wu, W. P. Ng, J. F. Du, Q. Yu, Y. Liu, and Y. Q. Fu, "Annealing Effect on Structural, Functional, and Device Properties of Flexible ZnO Acoustic Wave Sensors Based on Commercially Available Al Foil," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 63, no. 11, pp. 4535–4541, Nov. 2016.

<sup>22</sup> L. Lamanna, F. Rizzi, F. Guido, L. Algieri, S. Marras, V. M. Mastronardi, A. Qualtieri, and M. D. Vittorio, "Flexible and Transparent Aluminum-Nitride-Based Surface-Acoustic-Wave Device on Polymeric Polyethylene Naphthalate," *Advanced Electronic Materials*, vol. 5, no. 6, p. 1900095, 2019.

<sup>23</sup> H. Xu, S. Dong, W. Xuan, U. Farooq, S. Huang, M. Li, T. Wu, H. Jin, X. Wang, and J. Luo, "Flexible surface acoustic wave strain sensor based on single crystalline LiNbO3 thin film," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 112, no. 9, p. 093502, Feb. 2018.

## 5. Capteurs de température à ondes élastiques confinées

Etape préalable à la réalisation de capteurs sans fil autoprotégés, nous sommes intéressés à diverses structures à ondes confinées, notamment celles basées sur du niobate de lithium en coupe Y-128 et Z. Les structures suivantes ont été étudiées en détail :

- a) AlN/ZnO/LN-Y128
- b) Diamant/ZnO/LN-Y128
- c) AlN/IDT(Pt)/LN-Y128
- d) AlN/ZnO/LN-Z

### (a) La structure AlN/ZnO/LN-Y128

Cette première structure a permis de valider les outils de modélisation, de fabrication et de test dans le cadre de la thèse de Cécile Floer.

Le niobate de lithium dans sa coupe Y128 a été sélectionné pour son fort couplage piézoélectrique, tandis que les couches de ZnO et d'AlN sont compatibles avec des dépôts très épais en pulvérisation. Le ZnO joue le rôle de couche de faible vélocité entre deux couches (AlN et niobate de lithium) de vélocités comparativement plus élevées. Typiquement, la couche supérieure devra avoir une épaisseur d'au moins longueur d'onde.

- Modélisations

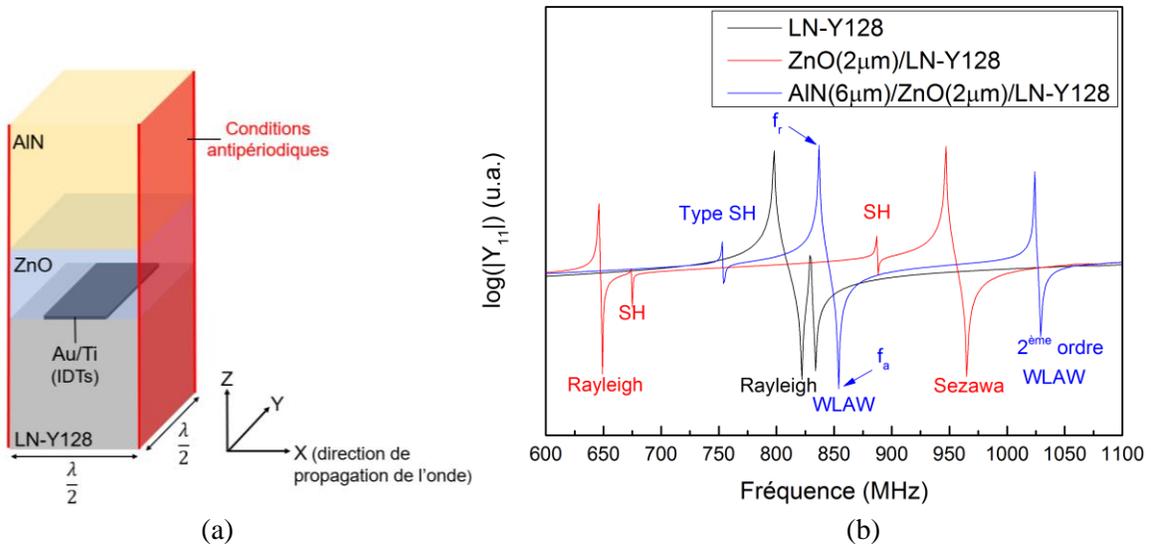


Figure 9 : (a) Modèle Comsol Multiphysics <sup>5</sup> (b) Simulation du module de l'admittance  $|Y_{11}|$  de la structure pour  $\lambda=4,4 \mu\text{m}$  <sup>5</sup>

La modélisation d'une structure semi-infinie est effectuée sur le logiciel COMSOL Multiphysics en utilisant des conditions antipériodiques (Figure 9a). Il est possible d'accéder à l'admittance (Figure 9b) et aux champs de déplacements particuliers totaux et par direction (Figure 10).

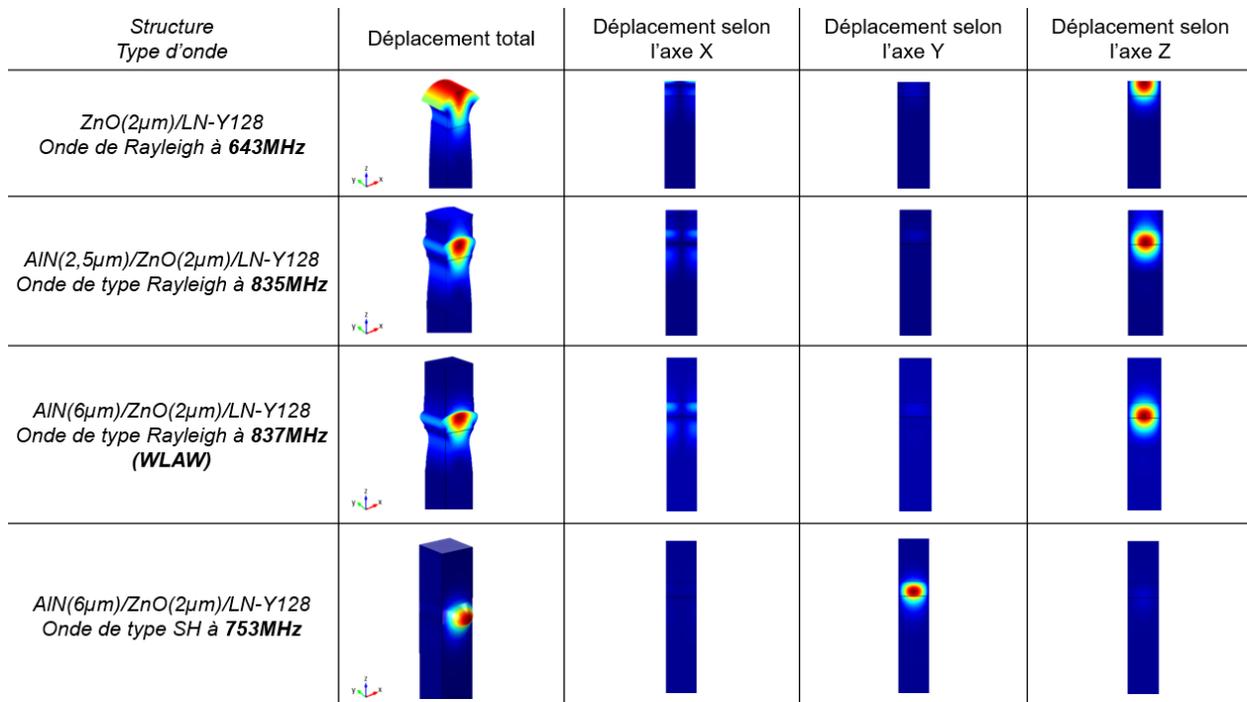


Figure 10 : Champs de déplacement pour différents modes d'intérêt dans les structures ZnO/LN-Y128 et AlN/ZnO/LN-Y128 <sup>5</sup>

Dans la structure AlN(6 $\mu$ m)/ZnO(2 $\mu$ m)/LN-Y128 avec  $\lambda=4,4 \mu\text{m}$ , on peut alors identifier 2 ondes dites confinées, une de type cisaillement à 753 MHz et une autre avec une polarisation de type Rayleigh à 837 MHz. Avec 2,5  $\mu\text{m}$  d'AlN au lieu de 6 $\mu\text{m}$  (Figure 10, 2<sup>ème</sup> ligne), il subsiste un -faible- déplacement en surface.

- Microfabrication

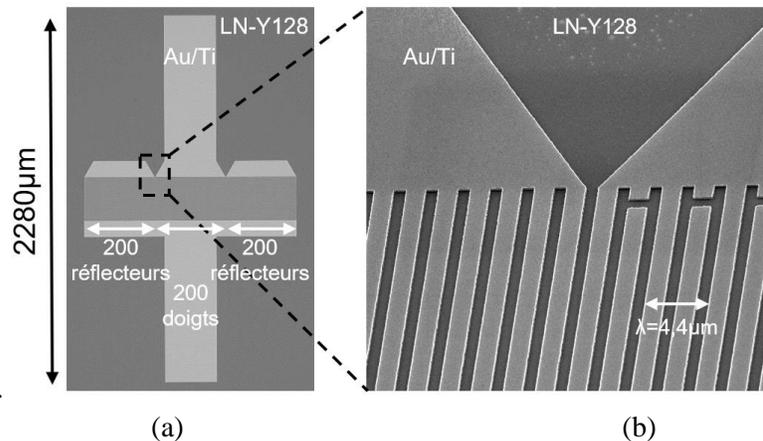


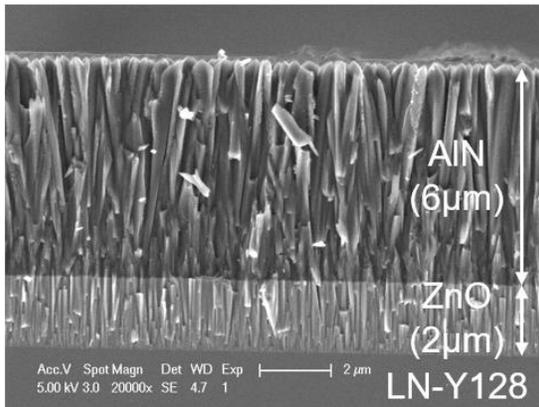
Figure 11 Résonateur synchrone réalisé en lithographie électronique <sup>5</sup>

Les dispositifs, ici un résonateur synchrone, dont la conception est détaillée Figure 11, sont fabriqués soit en lithographie électronique soit lithographie optique, suivi d'une étape de gravure chimique ou ionique (ou parfois une mise en motif par « lift-off »).

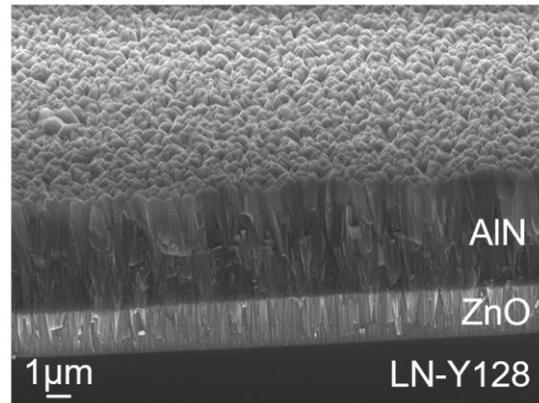
Les couches formant la structure WLAW sont, elles, réalisées en pulvérisation cathodique magnétron dans le bâti Alliance Concept DP650 avec les paramètres de dépôts suivants et montrées Figure 12 (a)(b)

Tableau III– Résumé des paramètres de dépôt

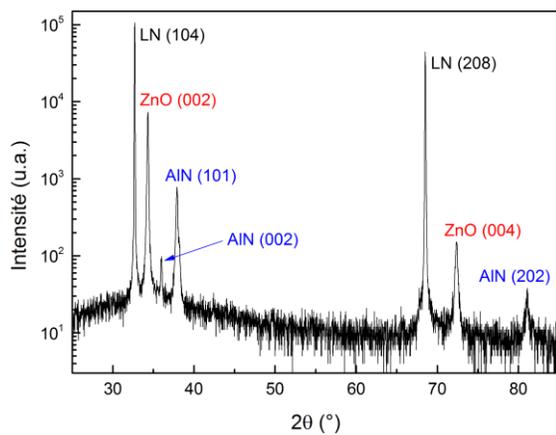
	ZnO	AlN
<i>Cible</i>	ZnO (Ø 4-pouces)	Al (Ø 4-pouces)
<i>Gaz</i>	6 sccm* O <sub>2</sub> 6 sccm* Ar	16 sccm* N <sub>2</sub>
<i>Température</i>	170°C	Pas de chauffage intentionnel
<i>Puissance RF</i>	150 W	200 W
<i>Pression totale</i>	6x10 <sup>-3</sup> mbar	8x10 <sup>-3</sup> mbar



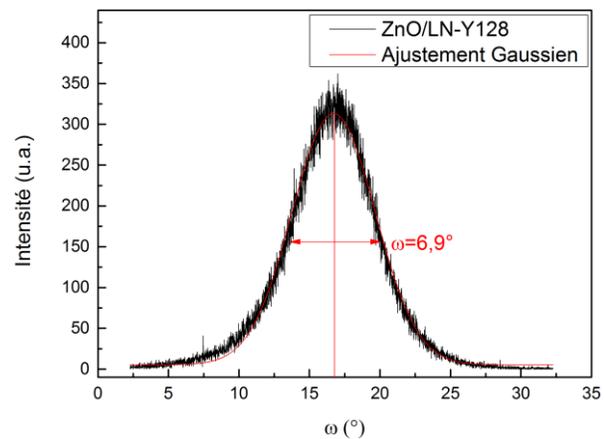
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 12 : (a)(b) Visualisations MEB d'un tricouche AIN/ZnO/LN-Y128 <sup>5</sup> (c) Diagramme de diffraction X θ-2θ de la structure <sup>5</sup> (d) Rocking curve d'un dépôt de ZnO sur LN-Y128 <sup>5</sup>

Les couches de ZnO présentent une cristallisation correcte, avec néanmoins une mosaïcité de  $6,9^\circ$ , probablement causée par un raccord de maille peu optimal et inhomogène entre le LN-Y128 et le ZnO.

Les couches d'AlN sont, par construction, faiblement cristallisées car elles sont déposées sans chauffage intentionnel, de manière à limiter les contraintes. Au vu de la répartition des champs de déplacement (Figure 8a, Figure 10), l'onde est néanmoins surtout confinée dans le ZnO et la faible qualité de la couche d'AlN n'a pas nécessairement un impact fort sur les performances de la structure.

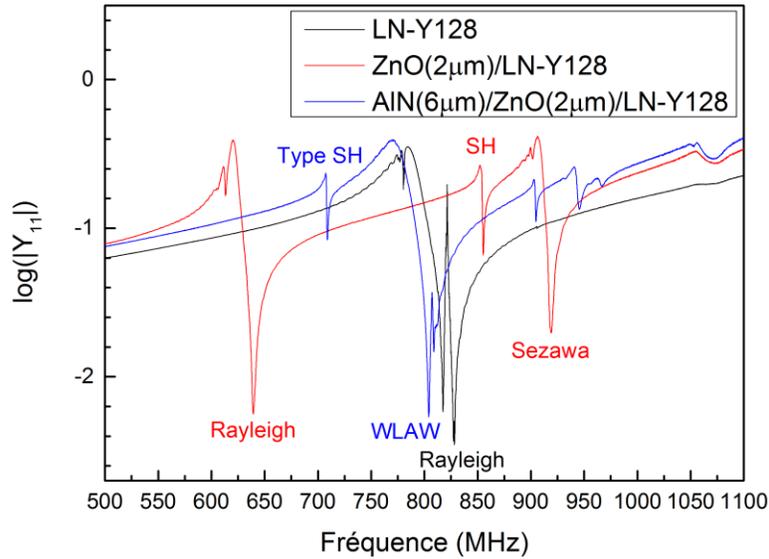


Figure 13 : Module de l'admittance  $|Y_{11}|$  de la structure AlN/ZnO/LN-Y128 aux différentes étapes <sup>5</sup>

La structure a ensuite été caractérisée en impédance sur notre station SUSS MicroTec PM5 connectée à notre analyseur de réseau Agilent-N5230A (Figure 13). On retrouve les modes prédits en simulation à la Figure 9b.

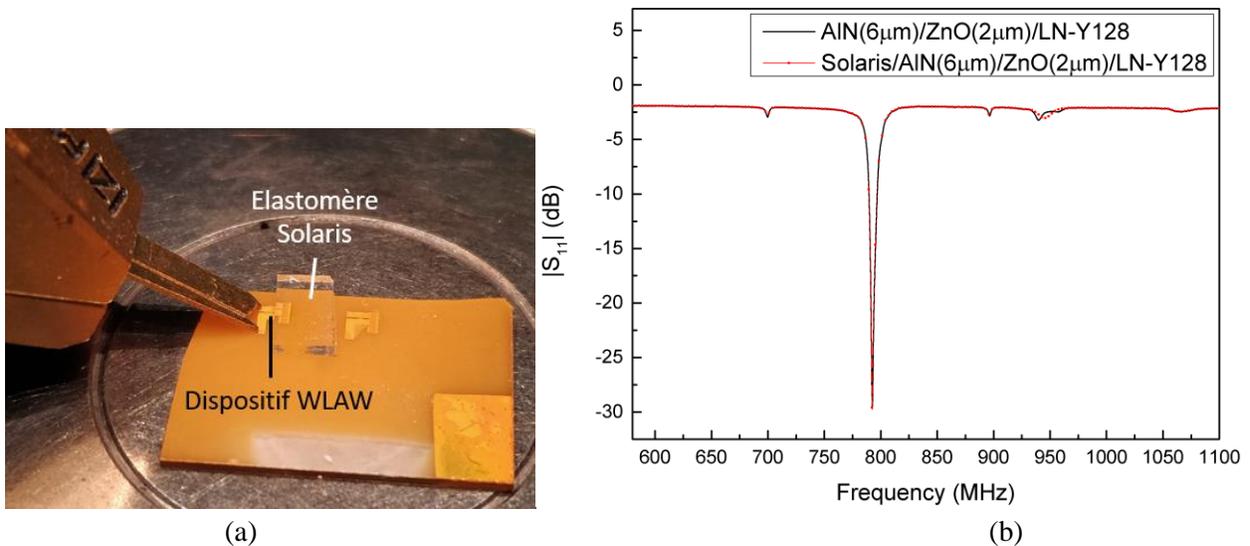


Figure 14 : (a) Dispositif WLAW sous test en contact avec le perturbateur Solaris <sup>5</sup> (b) Mesure du coefficient de réflexion  $S_{11}$  <sup>5</sup>

Reste à trancher la question suivante : est-ce que les ondes sont réellement confinées à l'intérieur du tricouche, et rendues insensibles aux perturbations de surface ? Pour ce faire, le test suivant a été mis au point (Figure 14a): l'échantillon est mis en contact avec un perturbateur élastomère extrêmement souple dont les propriétés élastiques se rapprochent de celles de la peau (Solaris, Smooth-on,  $E=172$  kPa).

Dans la Figure 14b, on peut voir que le coefficient de réflexion est le même avec et sans perturbateur pour les ondes WLAW de type SH et Rayleigh à  $\sim 700$  MHz et  $\sim 790$  MHz.

Par contre, on remarque que l'onde autour de 950 MHz n'est pas confinée avec  $6\mu\text{m}$  d'AlN car son impédance est modifiée par le perturbateur élastomère. De manière intéressante, on pourra donc imaginer une utilisation mixte pour ce type de structures : un capteur de température à ondes confinées, qui servira de capteur de compensation pour un capteur SAW de surface, par exemple un capteur chimique.

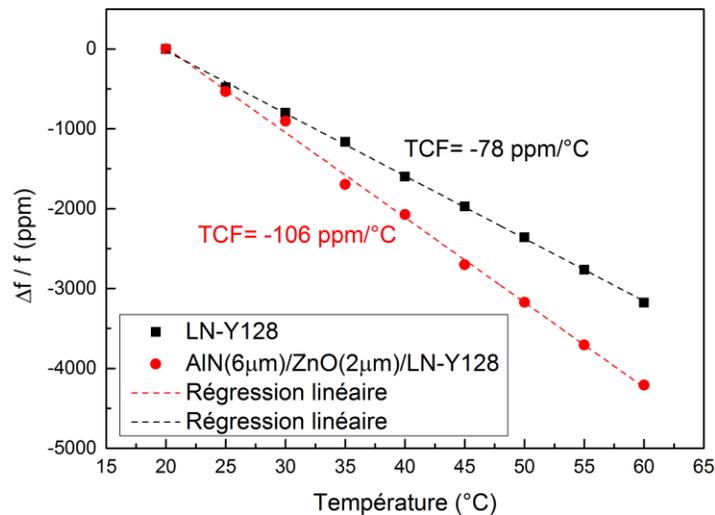


Figure 15 : Coefficient température-fréquence (TCF) du LN-Y128 et de la structure AlN/ZnO/LN-Y128 pour les ondes de type Rayleigh<sup>5</sup>

Enfin cette structure est évaluée en température pour les ondes Rayleigh et WLAW-type Rayleigh (Figure 15). Elle présente un TCF très élevé de  $-106$  ppm/°C pour l'onde confinée ce qui est particulièrement intéressant pour l'application capteur de température.

Cette valeur est néanmoins un peu surprenante dans le sens où elle est supérieure en valeur absolue à celle sur niobate Y-128 seul ( $-78$  ppm/°C), tandis que l'AlN et le ZnO présentent théoriquement un TCF négatif de valeur faible. Un faisceau d'indices liés aux différents travaux nous font penser que la raison est due à la couche d'AlN faiblement cristallisée.

En résumé, dans cette structure de base, il a été possible de démontrer :

- le confinement de l'onde à l'intérieur de la structure, donc une compatibilité avec l'application sur peau visée.
- une forte sensibilité en température de  $-106$  ppm/°C

Les travaux sur cette structure ont permis à Cécile Floer d’être finaliste du Student Paper Contest à la conférence IEEE IUS Washington [P7] , à l’issue des travaux de ses seuls 8 premiers mois de thèses et ont été valorisés dans [R10] :

[R10] C. Floer, **S. Hage-Ali**, S. Zhgoon, M. Moutaouekkil, F. Bartoli, H. Mishra, S. M. Murtry, P. Pigeat, T. Aubert, O. B. Matar, A. Talbi, and O. Elmazria, “AlN/ZnO/LiNbO<sub>3</sub> Packageless Structure as a Low-Profile Sensor for Potential On-Body Applications,” *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, vol. 65, no. 10, pp.1925-1932, Oct. 2018 <https://doi.org/10.1109/TUFFC.2018.2839262>

En partant de ces bases théoriques et expérimentales, il a été possible de proposer un certain nombre d’optimisations qui seront traitées dans la suite de cette section.

### (b) La structure Diamant nanocristallin/ZnO/LN-Y128

L’utilisation du diamant nanocristallin (NCD) a été proposée de manière alternative à l’AlN et a fait l’objet d’une collaboration avec l’équipe de Fabien Bénédic au LSPM.

La motivation de cette étude se comprend au regard de la simulation des champs de déplacement particuliers Figure 16.

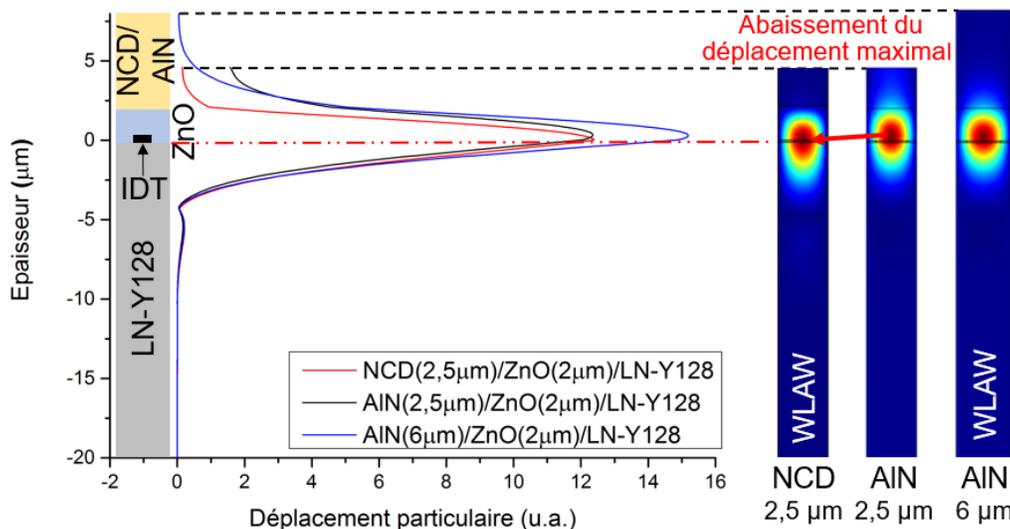


Figure 16 : Déplacements particuliers 1D / 2D dans différents tricouches NCD/ZnO/LN-Y128 ou AlN/ZnO/LN-Y128 <sup>5</sup>

En comparaison avec l’AlN, les simulations montrent qu’on peut obtenir le confinement de l’onde avec une épaisseur moindre de diamant, grâce à sa dureté exceptionnelle.

Cette même dureté a un autre effet bénéfique : le champ de déplacement acoustique est « repoussé » dans le monocristal de niobate de lithium. Cela est probablement de nature à limiter les pertes dans la structure, car les couches mines supérieures sont de qualité cristalline moindre.

Des dépôts de NCD ont été réalisés par D. Dekkar et F. Bénédic (au LSPM à Villetaneuse) dans leur réacteur microondes de type Distributed Antenna Array (DAA) utilisant un mélange gazeux de  $H_2/CH_4/CO_2$  en proportions typiques respectives 96,4%/2,6%/1% (Figure 17a). La spécificité de leur technique est d'utiliser une couche d'ensemencement basée sur une solution de nanocristaux de diamant qui permet la germination. Cette technique est compatible avec des dépôts à très basse température ( $250^\circ C$ ), à comparer avec CVD typiques à plus de  $1000^\circ C$ .

De manière à démarrer l'étude, des premiers tests de croissance de NCD ont été réalisés sur ZnO/Si : l'extrême agressivité du plasma d'hydrogène a gravé la couche de ZnO. Pour la protection chimique, une couche d'AlN a été rajoutée entre le ZnO et diamant. Un cliché MEB de la structure NCD/AlN/ZnO/Si est visible Figure 17b.

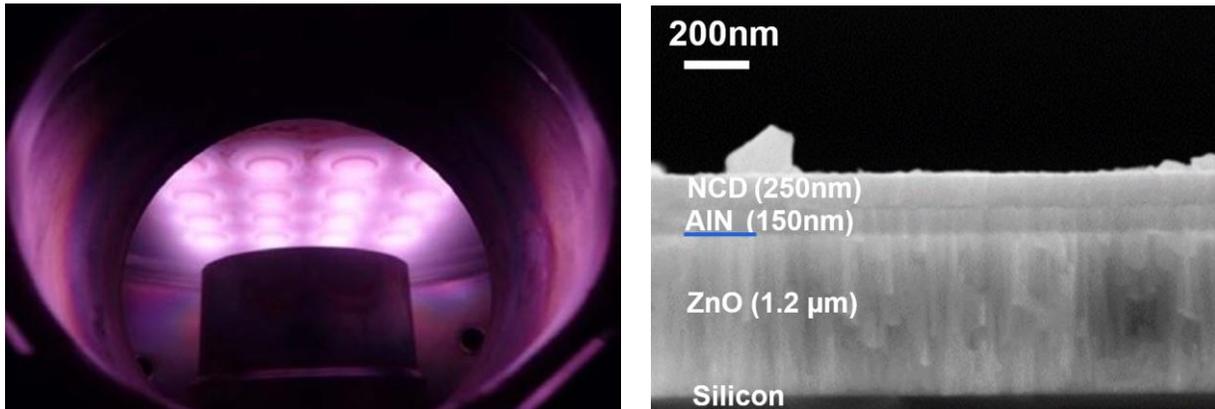


Figure 17 : (a) Réacteur DAA du LSPM, image de F. Bénédic (b) Visualisation MEB de la structure NCD/AlN/ZnO/Si

Ensuite, des dépôts ont été réalisés sur LN-Y128 :

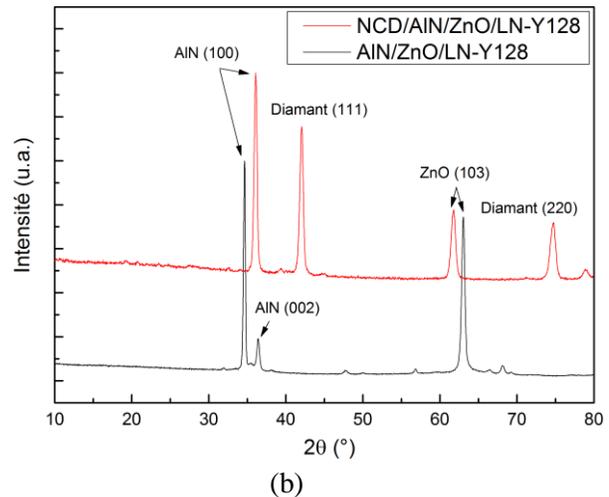
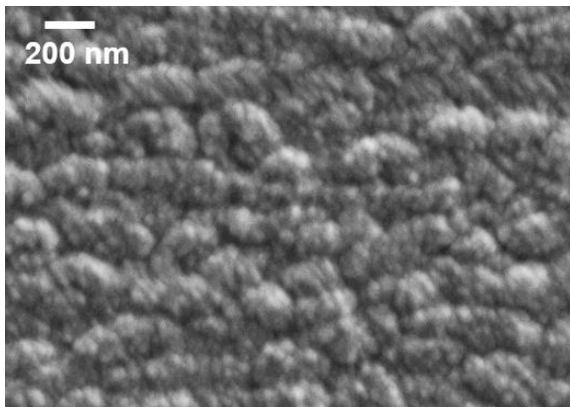


Figure 18 : (a) Visualisation MEB de la surface d'un dépôt NCD/AlN/ZnO/LN-Y128  
(b) Diagramme de diffraction X  $\theta$ - $2\theta$  de la structure <sup>5</sup>

Un film homogène de 300 nm d'épaisseur (Figure 18a) est déposé de NCD sur AlN/ZnO/LN-Y128. Par contre les décalages des pics de diffraction  $\theta$ -2 $\theta$  de l'AlN et ZnO avant et après dépôts de NCD trahissent la présence de contraintes importantes dans la structure.

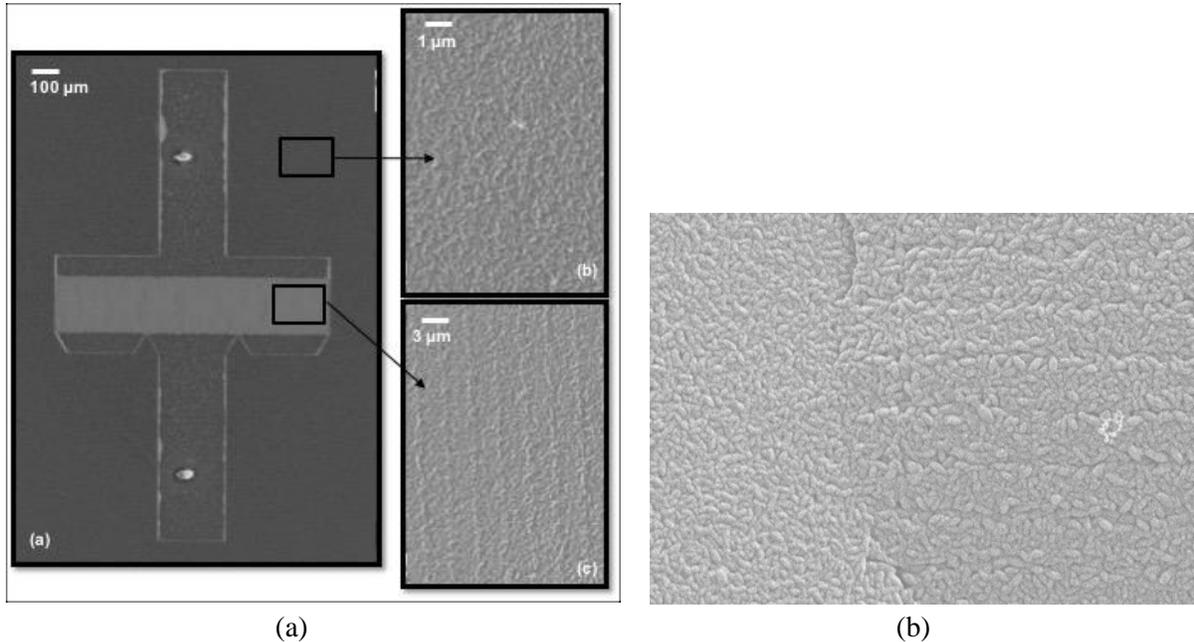


Figure 19 : (a) Dépôt de NCD sur AlN/ZnO/IDTs/ LN-Y128 et zoom (b) Présence de craquelures

Ceci est en partie confirmé par les dépôts sur structures SAW avec IDTs (Figure 19), où des craquelures apparaissent. Il reste donc un travail d'optimisation à effectuer avant de d'obtenir des structures WLAW fonctionnelles avec du diamant, d'autant plus que les dépôts les plus épais de NCD ont été limités à 300 nm au maximum, alors que la théorie prévoit une couche supérieure à  $2\mu\text{m}$  pour obtenir un confinement autour de 868 MHz.

En pratique, ce type de diamant trouvera donc plutôt son intérêt dans des structures WLAW à des fréquences de 2,45 GHz ou supérieures.

Ces travaux ont été valorisés dans [P14] et [R11] :

[R11] D. Dekkar, F. Bénédic, C. Floer, **S. Hage-Ali**, O. Brinza, J. Achard, and O. Elmazria, "Study of Low Temperature Deposition of Nanocrystalline Diamond Films on ZnO/LiNbO<sub>3</sub> Layered Structures Suitable for Waveguiding Layer Acoustic Wave Devices," *Phys. Status Solidi A*, vol. 215, no. 22, pp.1800251, 2018 <https://doi.org/10.1002/pssa.201800251>

### (c) La structure AIN/Pt/LN Y-128

N. Naumenko et P. Nicolay ont démontré théoriquement <sup>24</sup> la possibilité d'obtenir le confinement d'une onde dans une structure bicouche AIN/IDT(Pt)/LN-Y128 avec des métallisations épaisses.

Cette structure présente l'intérêt suivant : elle permet d'obtenir une onde confinée avec le dépôt d'une couche supérieure unique. Par ailleurs, de par les matériaux choisis, elle présente également un intérêt pour les applications à haute température.

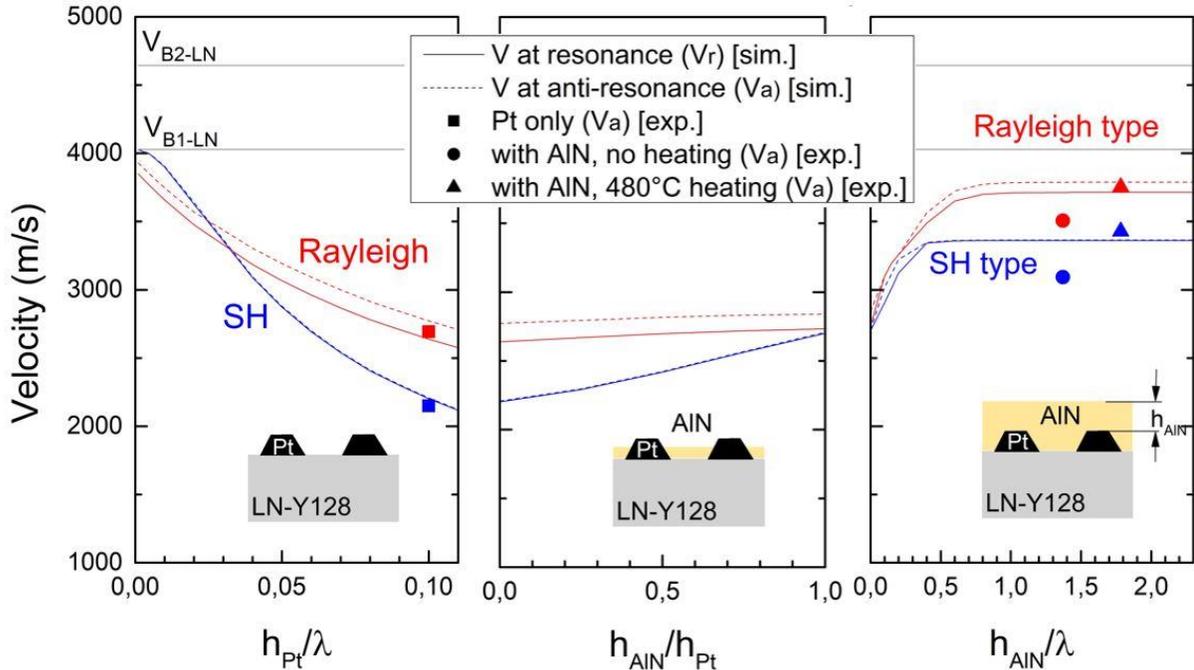


Figure 20 : Vitesses simulées (par N. Naumenko) et expérimentales de deux modes se propageant dans la structure bicouche AIN / IDT (Pt) / LN-Y128: (a) en fonction de l'épaisseur de Pt (b) en fonction de l'épaisseur d'AIN placée entre les électrodes de Pt d'épaisseur fixée à 0,1 $\lambda$  (c) en fonction de l'épaisseur AIN au-dessus des électrodes de Pt d'épaisseur fixée à 0,1 $\lambda$ .

En résumé de <sup>24</sup>, les spécificités de cette structures sont les suivantes : en utilisant des d'électrodes épaisses et denses, les ondes acoustiques de type Rayleigh peuvent se propager le long de l'interface AIN / LN-Y128 avec une vitesse élevée jusqu'à 4500 m/s, un couplage électromécanique élevé de 5,6% et fuite négligeable dans le substrat LN-Y128. Avec des électrodes Pt et des épaisseurs AIN optimisées, la vitesse de ce mode peut être comprise dans l'intervalle entre 4029 m/s et 4644 m/s, c'est-à-dire entre les vitesses de coupure des ondes de volume de cisailment lentes et rapides (respectivement notées  $V_{B1-LN}$  et  $V_{B2-LN}$ , voir Figure 20). Dans cet intervalle, l'onde de type Rayleigh ne se couple pas avec l'onde acoustique de volume de cisailment lente et ne fuit pas dans le substrat, en raison des propriétés « anormales » du LN-Y128. Des vitesses plus élevées ( $> V_{B2-LN} = 4644$  m/s) entraîneraient une forte fuite de l'onde dans le substrat, phénomène qui est évité dans cette structure par l'utilisation d'électrodes épaisses et denses optimisées qui

<sup>24</sup> N. Naumenko and P. Nicolay, "AIN/Pt/LN structure for SAW sensors capable of operating at high temperature," Appl. Phys. Lett., vol. 111, no. 7, p. 073507, Aug. 2017.

« ralentissent » l'onde. En supposant qu'une épaisseur d'AlN suffisante est utilisée pour protéger l'onde de l'influence de l'environnement pour un fonctionnement « packageless », c'est-à-dire environ une longueur d'onde  $\lambda$ , la vitesse de l'onde devrait être en théorie adaptée lorsque l'épaisseur de Pt est proche de  $0,1\lambda$ .

Cette structure a été réalisée en lithographie électronique et usinage ionique avec  $\lambda=1,7 \mu\text{m}$  et  $h_{\text{Pt}}=170\text{nm}$  et est visualisée Figure 21.

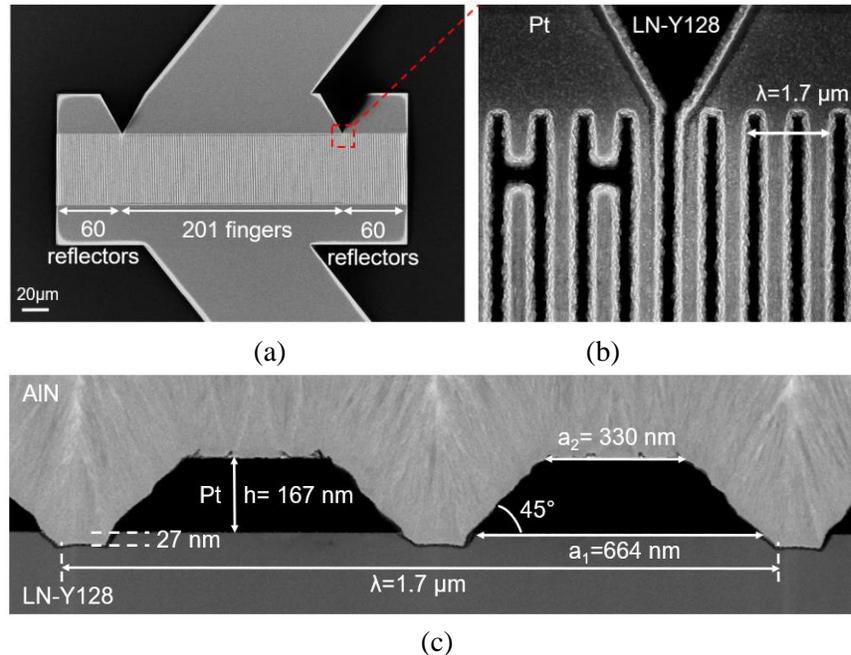


Figure 21 : (a) Micrographie MEB et détails de conception du résonateur en platine (b) Zoom sur les IDTs et les réflecteurs (c) Coupe transversale MET – Micrographie en champ clair (Bright Field) de la géométrie de l'électrode.

Les micrographies STEM révèlent que la géométrie issue de la gravure ionique est de forme trapézoïdale avec un taux de métallisation « volumique » de 58,9%.

Des dépôts d'AlN en pulvérisation cathodique sont alors réalisés dans le bâti Alliance Concept de notre équipe, dans la PVD dite « Pigeat » dans le tube Daum<sup>25</sup> de l'IJL, avec les paramètres suivants :

Tableau IV– Paramètres de dépôts

	Dépôt n°1	Dépôt n°2
Machine	Alliance Concept DP650	Custom-built
Cible	Al (Ø 4-inch)	Al (Ø 2-inch)
Gaz	16 sccm N <sub>2</sub>	23.5 sccm N <sub>2</sub>
Pression totale	$8 \times 10^{-3}$ mbar	$6.6 \times 10^{-3}$ mbar
Température	Pas de chauffage intentionnel	480°C
Puissance	200W	200 W
Epaisseur du dépôt	2.5 $\mu\text{m}$	3.2 $\mu\text{m}$

<sup>25</sup> <https://ijl.univ-lorraine.fr/recherche/centres-de-competences/depot-et-analyse-sous-ultravide-de-nanomateriaux-daum/>

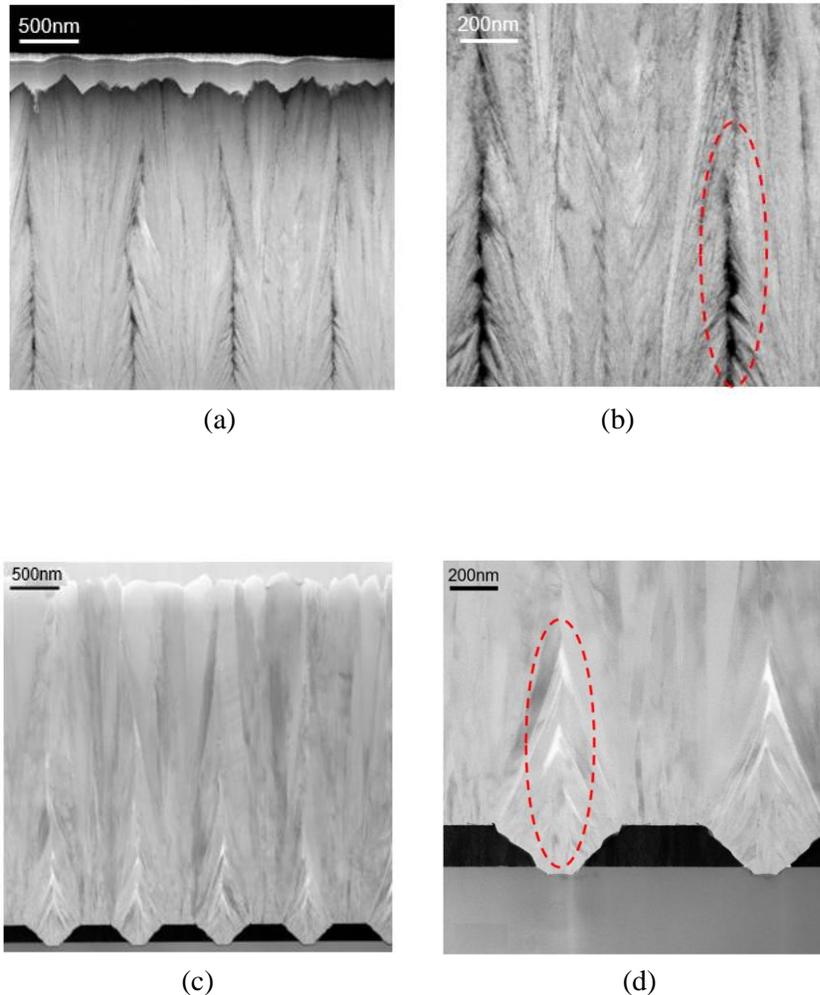


Figure 22 : Visualisations MET de dépôts : (a)(b) sans chauffage intentionnel, et (c)(d) à 480°C

Les clichés TEM (Figure 22) permettent de comprendre que les dépôts d'AlN sont fortement impactés par la forme trapézoïdale des électrodes. Pour le dépôt basse température, des dislocations apparaissent, tandis que dans le dépôt à 480°C, réalisé par F. Bartoli, la continuité est assurée. Ce dernier présente une *rocking curve* de 2.45°.

Les dispositifs sont ensuite caractérisés électriquement et leurs vitesses comparées aux simulations (Figure 20). Les vitesses des structures avec AlN sont très sensiblement inférieures à celle obtenues théoriquement dans <sup>24</sup>. N. Naumenko s'est alors attelée à « fitter » les constantes de l'AlN aux résultats expérimentaux et trouve le meilleur accord pour  $c_{11}=300$  GPa and  $c_{44}=86,5$  GPa. Ce sont ces constantes qui sont utilisées pour les simulations de la Figure 20. La vitesse expérimentale obtenue pour l'onde de type Rayleigh (3751 m/s) étant très inférieure à la vitesse de l'onde de volume de cisaillement rapide ( $V_{B2-LN}=4644$  m/s), on en déduit qu'il serait possible de réduire l'épaisseur de platine en dessous de  $0,05\lambda$  sans se rapprocher de cette vitesse limite, avec un avantage clair pour la fabrication et la réduction des pertes.

Le caractère « packageless » et le confinement des ondes est à nouveau vérifié à l'aide du test du perturbateur Solaris. Les dispositifs sont également caractérisés en température jusqu'à 300°C, cette structure étant également prometteuse pour la haute température. Les mesures d'impédance et de TCF sont reportées Figure 23, avec un TCF de -138ppm/°C pour l'onde de type Rayleigh, ce qui confirme le caractère prometteur de cette structure pour les applications de mesure de température.

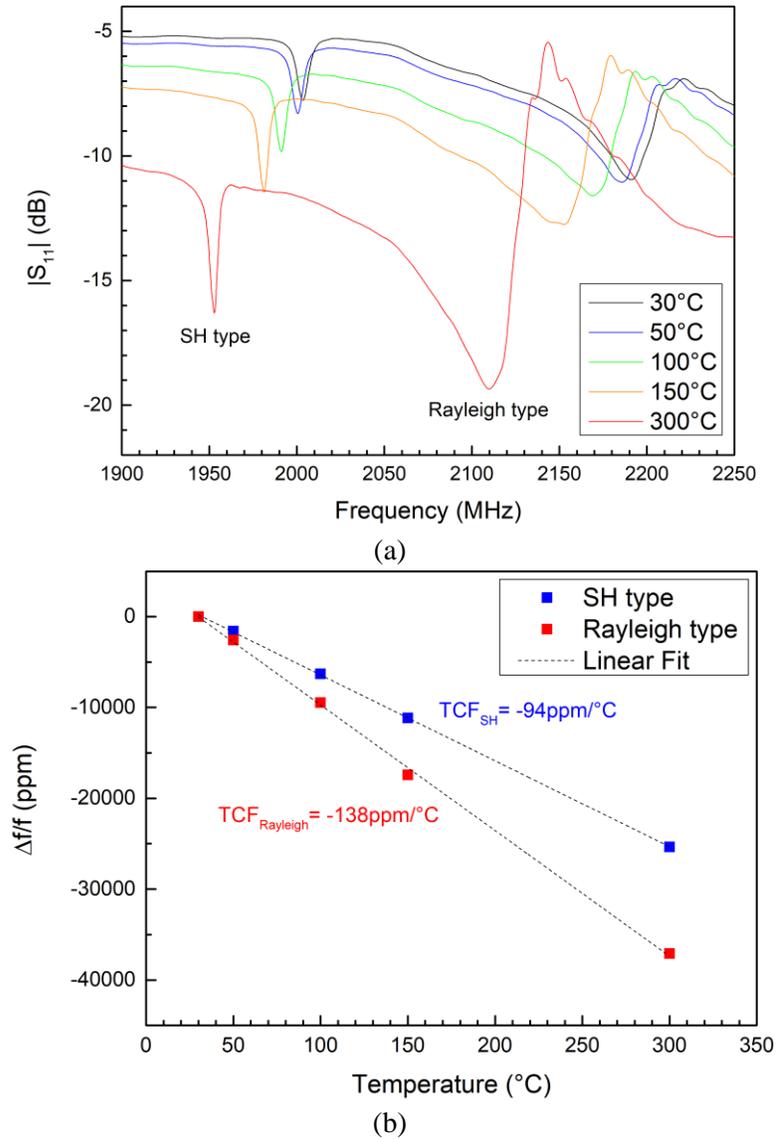


Figure 23 (a) Mesure du  $S_{11}$  de la structure AlN (480°C) /IDT(Pt)/LN-Y128 entre 30°C and 300°C.  
 (b) Décalage en fréquence relatif dans la structure AlN/IDT(Pt)/LN-Y128.

Ces travaux ont été valorisés dans leur variante avec du cuivre ([CI16]), ainsi que dans la publication récemment acceptée sous réserve de modifications mineures [R23].

[R23] C. Floer, O. Elmazria, N. Naumenko, F. Bartoli, J. Ghanbaja, T. Aubert and **S. Hage-Ali**, "AlN/Pt/LN-Y128 packageless acoustic wave temperature sensor," IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control, accepted with minor revisions

**(d) La structure AlN/ZnO/LN-Z**

La structure AlN/ZnO/LN-Y128 développée au paragraphe (a), est, de par son fort couplage, plutôt prometteuse pour des capteurs de type « ID tags » ou lignes à retard réfléchives (R-DL). De manière à obtenir des résonateurs à facteur de qualité Q élevé, utiliser un matériau plus faiblement couplé apparaît comme nécessaire.

J'ai pu proposer à cette effet l'utilisation de la coupe Z du niobate, qui n'est pas normalement utilisée pour les applications SAW. Cette coupe présente les quatre avantages suivants pour les capteurs de température WLAW :

- un couplage assez faible de 0,53 %<sup>26</sup>, le plus faible de coupes Y+...° avec rotation autour de l'axe X
- une vitesse en surface libre élevée (3798 m/s)<sup>26</sup> qui permet de servir de couche haute vélocité dans un tricouche WLAW.
- un TCF élevé de -82 ppm/°C
- et surtout : une croissance optimale pour les couches de ZnO, grâce à un raccord de maille favorable<sup>27,28</sup>

• Modélisations

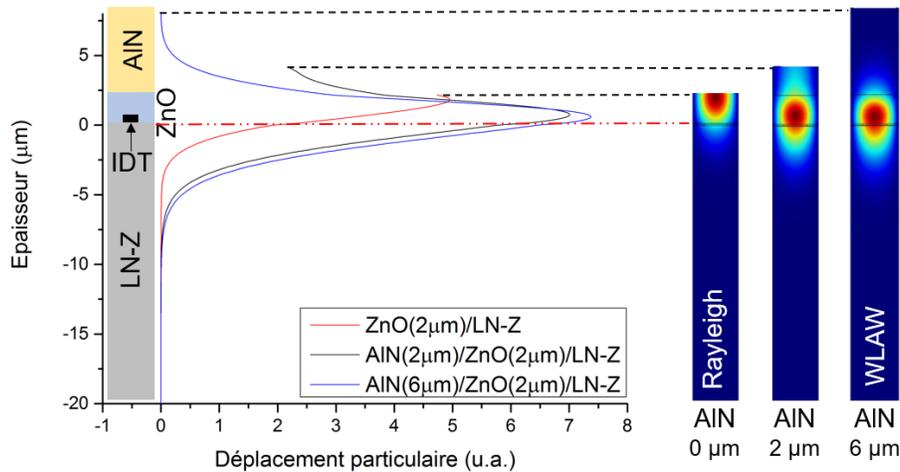


Figure 24 : Déplacements particuliers 1D et 2D dans la structure AlN/ZnO/LN-Z pour  $\lambda=4,4\mu\text{m}^5$

<sup>26</sup> D. Ciplys and R. Rimeika, "Measurements of electromechanical coupling coefficient for surface acoustic waves in proton-exchanged lithium niobate," *Ultragarsas Ultrasound*, vol. 33, no. 3, pp. 14-20, 1999

<sup>27</sup> J. Yin, Z. Liu, H. Liu, X. Wang, T. Zhu, and J. Liu, "The epitaxial growth of wurtzite ZnO films on LiNbO3 (0001) substrates," *Journal of Crystal Growth*, vol. 220, no. 3, pp. 281-285, 2000.

<sup>28</sup> H. Yamamoto, N. Saiga, and K. Nishimori, "ZnO thin films deposited on various LiNbO3 substrates by RF-sputtering," *Applied surface science*, vol. 169, pp. 517-520, 2001.

Les déplacements particulières dans la structure pour les ondes de type Rayleigh sont données Figure 24. De manière assez similaire au LN-Y128, on remarque que pour  $\lambda=4,4\mu\text{m}$  et  $2\mu\text{m}$  de ZnO,  $6\mu\text{m}$  d'AlN suffisent à obtenir une onde correctement confinée. On notera qu'en se rapprochant d'une épaisseur de ZnO de  $1,3\mu\text{m}$ , on commence à exciter des ondes de volume et la structure devient donc « perteuse » par rayonnement.

- Etude expérimentale

Les dépôts de ZnO sur LN-Z et LN-Y128 ont été optimisés avec Cécile Floer dans le cadre du stage de fin d'études EEIGM de Clément Barbot. Après un étude systématique, il a été déterminé que les propriétés de la couche sont optimales sur les deux substrats avec un dépôt effectué à  $300^\circ\text{C}$  pour une pression d'Argon de  $3 \cdot 10^{-3}$  mbar et une puissance de 150 W RF.

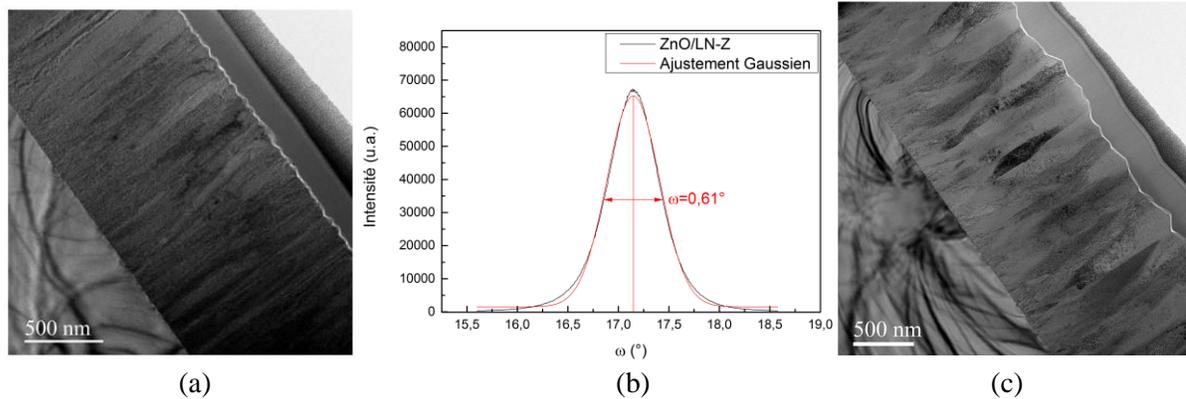


Figure 25 : (a) Cliché TEM d'une couche de ZnO sur LN-Z<sup>5</sup> (b) Rocking curve associée au dépôt de (a)<sup>5</sup> (c) Cliché TEM d'une couche de ZnO sur LN-Y128<sup>5</sup>

Un exemple d'un tel dépôt sur LN-Z est montré en imagerie TEM Figure 25(a) et présente une rocking curve très satisfaisante de  $0,6^\circ$ . Les grains présentant une taille assez homogène, on pourra parler ici d'hétéro-épitaxie. A titre de comparaison, un cliché TEM d'une couche sur LN-Y128 avec les mêmes paramètres de dépôt et une rocking curve de  $3,7^\circ$  est montrée Figure 25(c).

Sergei Zhgoon a proposé des designs de résonateurs synchrones optimisés à fort facteur de qualité sur LN-Z, basés sur 400 réflecteurs déconnectés, et un nombre de paires d'IDTs de 40 ou 200 pour  $\lambda=4,4 \mu\text{m}$ . Ceux-ci ont été fabriqués en lithographie optique, à la limite des possibilités de notre salle blanche. Ceux-ci présentent des facteurs de qualité compris en 1500 et 4000, selon les dispositifs. Des dépôts de ZnO et AlN ont ensuite été réalisés sur ces résonateurs (Figure 26a), qui ont été caractérisés électriquement.

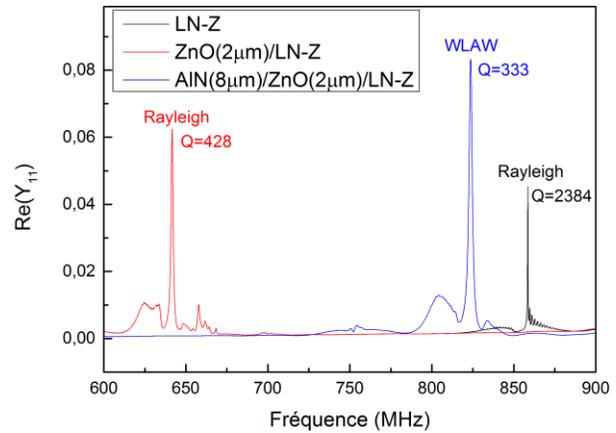
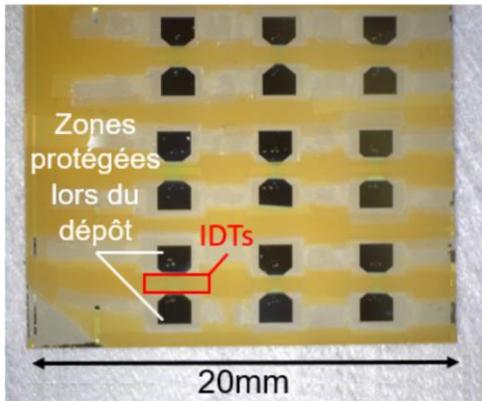


Figure 26 : (a) Echantillon WLAW AlN/ZnO/LN-Z<sup>5</sup> (b) Conductance d'un dispositif à 40 paires d'IDT à différentes étapes de fabrication<sup>5</sup>

Sur cet échantillon, le facteur de qualité sur LN-Z vaut 2384 pour l'onde Rayleigh sur LN-Z, tandis qu'après ajout des couches, il tombe à 333 pour l'onde confinée WLAW (Figure 26b). Comme on le verra dans la prochaine section, ceci est plus dû à un changement de mode, qu'à l'ajout de pertes importantes dues aux couches minces.

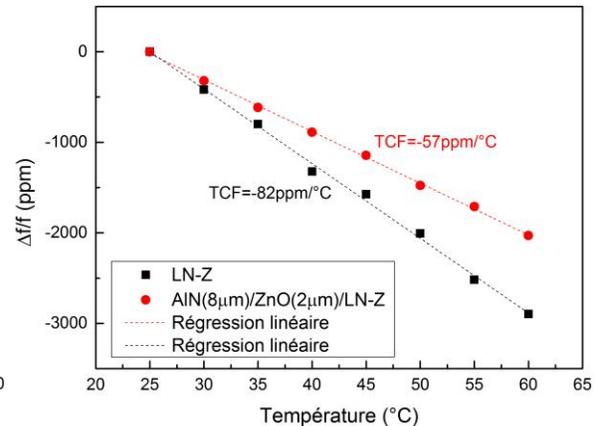
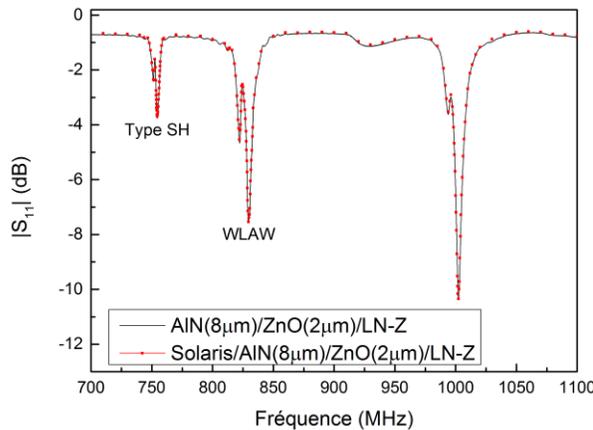


Figure 27 : (a) Coefficient de réflexion d'un dispositif AlN/ZnO/LN-Z<sup>5</sup> (c) TCFs d'un dispositif LN-Z et AlN/ZnO/LN-Z<sup>5</sup>

Le confinement de la structure est démontré grâce au test Solaris (Figure 27a) tandis que le TCF (Figure 27b) passe de -82 ppm/°C sur LN-Z massif à -57 ppm/°C. Il reste encore une étude théorique plus poussée à mener pour interpréter ce résultat, mais il semblerait que la qualité de cristallisation du ZnO et la croissance impactée d'AlN jouent un rôle important dans cette évolution.

- Amincissement

Enfin, pour obtenir réellement un format de type « tatouage », il fallait réaliser des structures ultrafines, sur des substrats de quelques dizaines de micromètres d'épaisseur maximale, et non pas 0.5 mm comme les dispositifs précédents. Toute la question était de savoir si il était possible de trouver des procédés de

microfabrication compatibles avec de telles épaisseurs, que ce soit pour la fabrication des SAW ou pour la réalisation des couches minces pour former le WLAW.

Après une première tentative sur un procédé d'usinage de micro-cavités suspendues, codéveloppé avec Femto-Engineering<sup>5</sup>, nous nous sommes orientés vers un travail direct sur substrats de niobate aminci de 60 $\mu\text{m}$  d'épaisseur, fabriqués par Yamaju (Japon). Ces substrats sont assez fragiles, mais néanmoins compatibles avec la lithographie et gravure, pour un opérateur ou une opératrice expérimenté(e). De manière plutôt surprenante, il a été possible de déposer 10 $\mu\text{m}$  en épaisseur totale de ZnO et AlN, avec les recettes décrites précédemment, sans que la structure soit fortement déformée par les contraintes par effet bilame. Un tel dispositif est montré Figure 28a et son admittance Figure 28b.

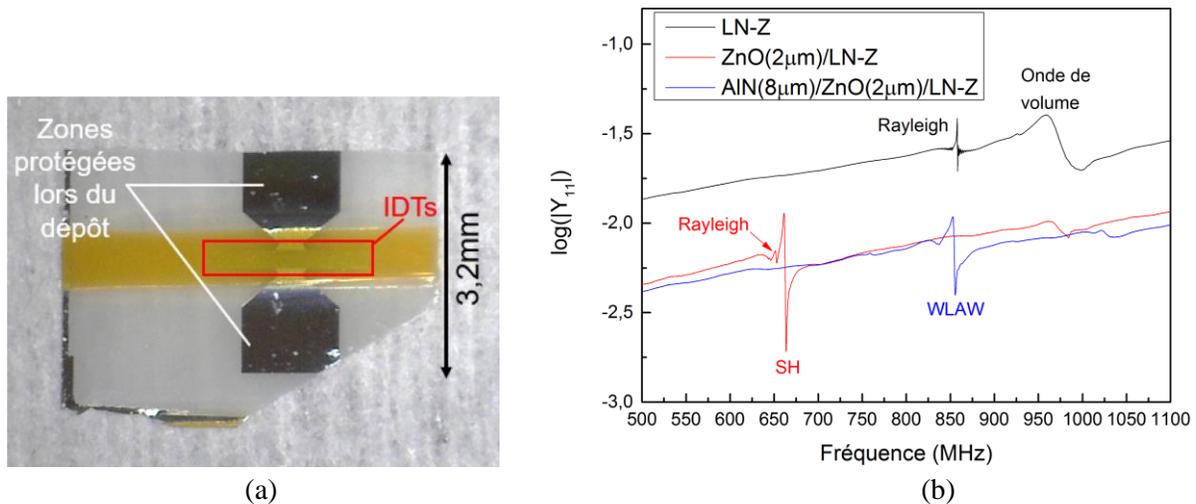


Figure 28 : (a) Dispositif WLAW sur LN-Z aminci 60 $\mu\text{m}$  (b) Module de l'admittance du dispositif à différents étapes de dépôts des couches

Sur LN-Z uniquement, l'onde de Rayleigh présente un Q de 2360 pour un coefficient de couplage effectif de 0,07 % (donc différent par design du couplage de la surface libre de 0,53%). La figure de mérite, obtenu par le produit des deux, vaut FOM= 2,0. Après dépôts des couches de ZnO et d'AlN, Q diminue à 178, tandis que la figure de mérite chute à uniquement 1,19, ce qui prouve que les pertes induites par les couches restent maîtrisées.

Une telle valeur de facteur de qualité reste correcte pour des applications de mesure tandis que d'après<sup>29</sup>, l'efficacité de re-rayonnement est estimée entre 20 et 30% pour un tel dispositif, ce qui est tout à fait acceptable. L'optimisation du facteur de qualité dans les structures WLAW reste un travail à effectuer.

<sup>29</sup> A. Shvetsov, S. Zhgoon, I. Antcev, S. Bogoslovsky, and G. Sapozhnikov, "Quartz orientations for optimal power efficiency in wireless SAW temperature sensors," in 2016 European Frequency and Time Forum (EFTF), 2016, pp. 1–4.

Un tel dispositif constitue un jalon important du travail sur le projet SAWGOOD, grâce aux propriétés suivantes. Il est :

- autoprotégé, grâce à une structure à ondes confinées Waveguiding Layer Acoustic Wave
- ultrafin (épaisseur  $<70\mu\text{m}$ )
- compatible avec l'interrogation à distance.

## 6. Antennes étirables et mesures sans fil de capteurs ultrafins

La section précédente a traité des capteurs à ondes élastiques compatibles avec une utilisation sur peau. Pour réaliser des capteurs sans fil, il faut leur adjoindre des antennes adaptées à une utilisation en électronique sur peau.

### (a) Les antennes étirables

- L'approche retenue : des antennes à conducteurs en méandres

Dans le contexte des capteurs sur la peau, les antennes doivent être extrêmement minces, pouvoir être montées de manière conforme sur n'importe quelle surface ou forme, pouvoir résister aux contraintes et aux impacts, et surtout être étirables ou rétractables pour pouvoir suivre les mouvements de la peau, par exemple lors de la contraction d'un muscle.

Quelques groupes ont travaillé sur le sujet : l'approche en métal liquide pour les antennes étirables décrite par différentes équipes depuis 2009<sup>30,31,32</sup> utilise des alliages de Galinstan (Ga-In-Sn) intégrés dans des canaux élastomères et conduit à une extensibilité élevée de dipôles de 120%<sup>32</sup>. Cependant, cette approche utilise des conducteurs coûteux, non biocompatibles avec une résolution limitée ( $\sim 10$  micromètres), peut être limitée en température en fonction de l'alliage<sup>30</sup>, et l'intégration dans des systèmes RF d'alliages liquides totalement étirables est difficile<sup>33</sup>. Les antennes étirables basées sur des motifs en or épais de 50 nm d'épaisseur sont limitées en extensibilité (20%) et en efficacité de rayonnement du fait de pertes résistives liées à l'effet de peau<sup>34</sup>. Les antennes à base de nanofils d'argent présentent une faible efficacité de rayonnement et une extensibilité modérée (15%)<sup>35</sup>.

---

<sup>30</sup> J.-H. So, J. Thelen, A. Qusba, G. J. Hayes, G. Lazzi and M. D. Dickey, "Reversibly Deformable and Mechanically Tunable Fluidic Antennas," *Adv. Funct. Mater.*, vol. 19, no. 22, pp.3632-3637, 2009

<sup>31</sup> S. Cheng, A. Rydberg, K. Hjort and Z. Wu, "Liquid metal stretchable unbalanced loop antenna," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 94, no. 14, pp.144103-3, 2009

<sup>32</sup> M. Kubo, X. Li, C. Kim, M. Hashimoto, B. J. Wiley, D. Ham and G. M. Whitesides, "Stretchable Microfluidic Radiofrequency Antennas," *Adv. Mater.*, vol. 22, no. 25, pp.2749-2752, 2010

<sup>33</sup> S. H. Jeong, A. Hagman, K. Hjort, M. Jobs, J. Sundqvist and Z. Wu, "Liquid alloy printing of microfluidic stretchable electronics," *Lab Chip*, vol. 12, no. 22, pp.4657-4664, 2012

<sup>34</sup> Q. Liu, A. Robinson, K. Ford, R. Langley and S. Lacour, "Elastic dipole antenna prepared with thin metal films on elastomeric substrate," *Electronics Letters*, vol. 48, no. 2, pp.65-66, 2012

<sup>35</sup> L. Song, A. C. Myers, J. J. Adams and Y. Zhu, "Stretchable and Reversibly Deformable Radio Frequency Antennas Based on Silver Nanowires," *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 6, no. 6, pp.4248-4253, 2014

L'approche défendue ici est que le meilleur moyen d'obtenir des antennes sur la peau efficaces est l'approche faisant appel à des motifs en méandres de métaux à haute conductivité (cuivre, or), comme celles développées durant mon post-doctorat aux Etats-Unis et illustrées Figure 2, pour obtenir des antennes légères, électriquement petites, translucides, extensibles, facilement intégrables et résilientes, pour former des « tatouages électroniques » ultra-minces.

- Conception et modélisation

De manière à obtenir des antennes robustes et résilientes à la rupture partielle, l'idée est d'utiliser un pavage 2D de motifs unitaires en méandres. Un certain nombre de « patterns » sont envisageables, mais le plus simple pour obtenir une extensibilité modérée est d'utiliser des motifs unitaires en sabot de cheval. Un exemple d'antenne dipôle conçue avec cette approche est montré Figure 29.

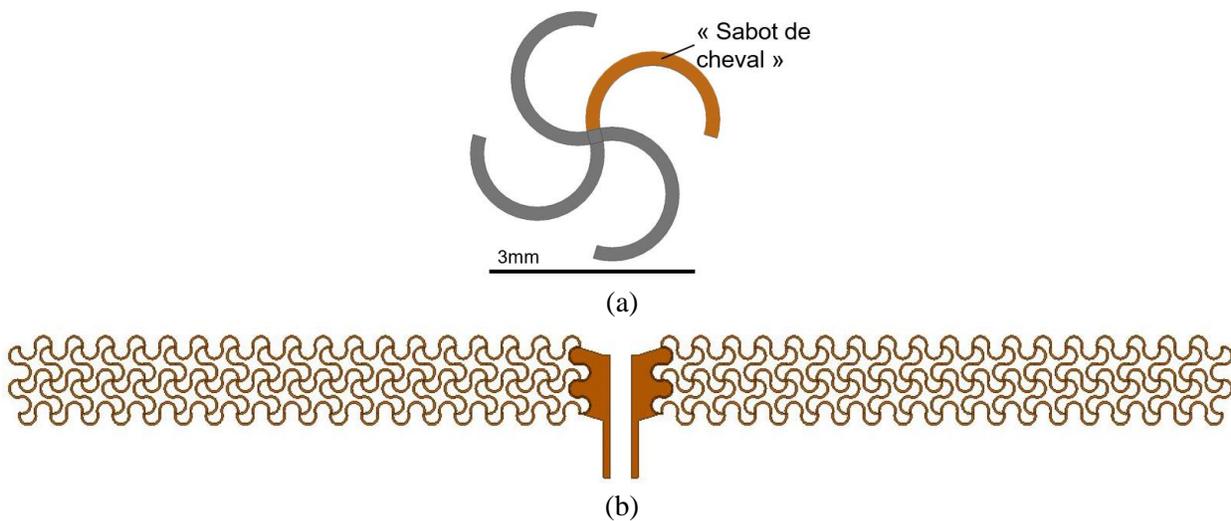


Figure 29 : (a) Motif unitaire en méandre<sup>5</sup> (b) Antenne dipôle conçue sur cette base.

Sur la base de ce motif, il est possible de faire varier plusieurs paramètres comme l'angle repérant la section d'arc de cercle, la largeur du motif, ou la taille de la cellule unitaire par rapport à la longueur d'onde. Ce dernier paramètre est particulièrement important, puisque que de grands méandres (relatifs) contribueront à former des antennes électriquement petites, tandis que de petits méandres relatifs tendront vers les caractéristiques d'une surface métallisée « pleine », mais néanmoins étirables. Pour un dipôle, on pourra ajuster la fréquence en de manière linéaire par partie en ajoutant ou retirant un certain nombre de cellule dans la largeur, ou de manière moins linéaire par « scaling » de l'échelle.

Les modélisations sont effectuées sur le solveur éléments finis HFSS (à présent propriété d'Ansys). Un exemple de calcul d'impédance pour une antenne dipôle de ce type est présenté Figure 30. Cette antenne résonne à 868 MHz quand elle calculée dans l'air. Par contre, de manière attendue, sa fréquence est décalée 556 MHz quand elle est placée sur un parallélépipède rectangle émulant une section de corps humain de 170\*60\*30 mm<sup>3</sup> de propriétés diélectriques  $\epsilon_r=54,8$  et  $\sigma=0,978$  S/m. Ce design est donc limité quant à la stabilité en fréquence quand il va être placé sur différentes parties du corps humain, ou différentes personnes.

De plus, le gain typique de ces antennes laminées sur le corps humain est autour de -13 dBi. Elles présentent donc une chute de gain de 15 dB par rapport à leurs contreparties dans l'air, qui interviendra deux fois (aller et retour) dans le bilan de liaison pour l'interrogation d'un capteur SAW sans fil. Il y a donc un potentiel important d'amélioration sur ce point, qui fait l'objet d'un « workpackage » dédié dans l'ANR SAWGOOD en cours.

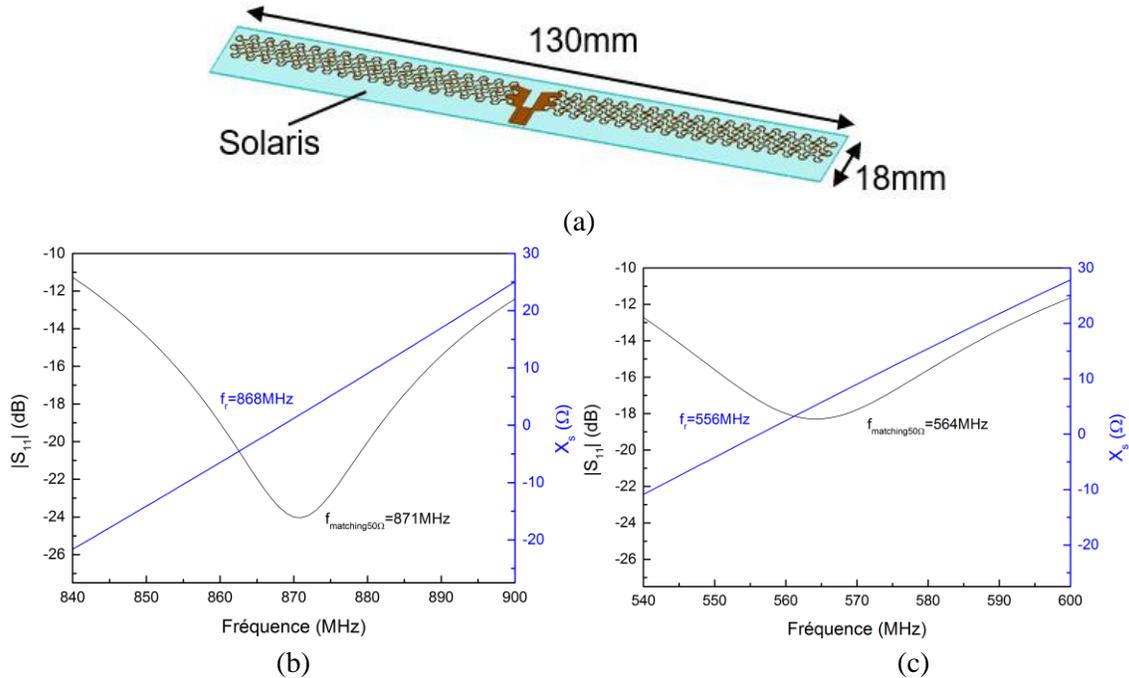


Figure 30 : (a) Design de l'antenne <sup>5</sup> ; Coefficient de réflexion et réactance : (b) dans l'air (c) placée sur une section de corps humain<sup>5</sup>

- Microfabrication

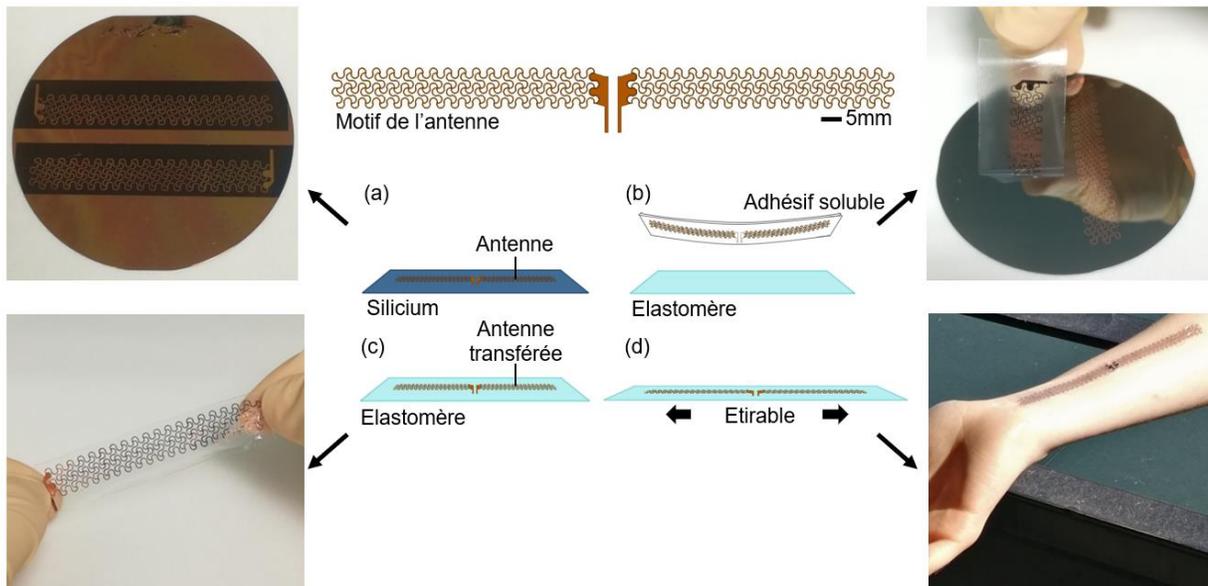


Figure 31 : Principales étapes du procédé de fabrication des antennes étirables <sup>5</sup>

Avec Cécile, nous nous sommes attachés à introduire le procédé de « transfer printing », permettant de fabriquer à des antennes étirables, à l'IJL. Typiquement, pour des raisons d'écart de dilatation thermique, il n'est pas possible de réaliser directement des métallisations épaisses de bonne qualité par des techniques classiques, il faut donc utiliser des techniques de report.

En bref, les principales étapes du procédé sont les suivantes (Figure 31) :

A l'étape a), une couche sacrificielle de PMMA est réalisée sur un wafer de silicium. Une métallisation épaisse est ensuite déposée (ici du cuivre de 2-3 $\mu$ m en pulvérisation cathodique), et la mise en motif est réalisée par photolithographie et gravure. A des fins de prototypage, nous utilisons le système de lithographie sans masque Smartprint<sup>36</sup>.

A l'étape b), la résine PMMA est sous gravée par de l'acétone. Après séchage, la métallisation est « attrapée » par du scotch soluble en poly-vinyl-alcool de marque 3M, qui sert de substrat temporaire. On dépose ensuite de fines couches de chrome et silice côté métal

A l'étape c) :

- une couche d'élastomère est tout d'abord préparée. Pour obtenir un élastomère aisément manipulable et résistant au déchirement, une formulation mélangeant du Solaris et de l'Ecoflex-030 (tous deux du fabricant Smooth-on) est privilégiée.
- après activation au plasma O<sub>2</sub> ou corona de cet élastomère siliconé, on colle l'antenne sur PVA dessus. L'adhésion est obtenue par des liaisons covalentes Si-O-Si formées entre le silicone activé et la silice.
- le tout est trempé dans l'eau et le scotch PVA est dissous.
- l'antenne sur élastomère est alors réalisée.

A l'étape d), l'antenne peut être laminée sur la peau et étirée. Une adhésion « faible » est obtenue par force de Van der Waals, tandis que pour une adhésion plus forte, pouvant résister à une douche ou un grattage léger, peut être obtenue avec du spray bandage de type Tegaderm (lui-même un adhésif partiellement siliconé).

## **(b) Mesures sans fil**

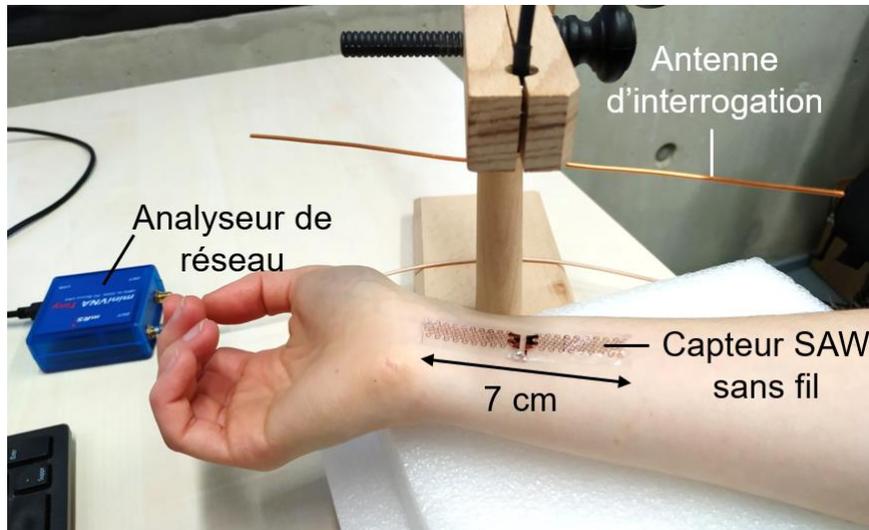
Ces antennes ont ensuite été couplées avec les capteurs ultrafins décrits à la section 5d.0

A ce stade, il a été possible d'interroger sans fil :

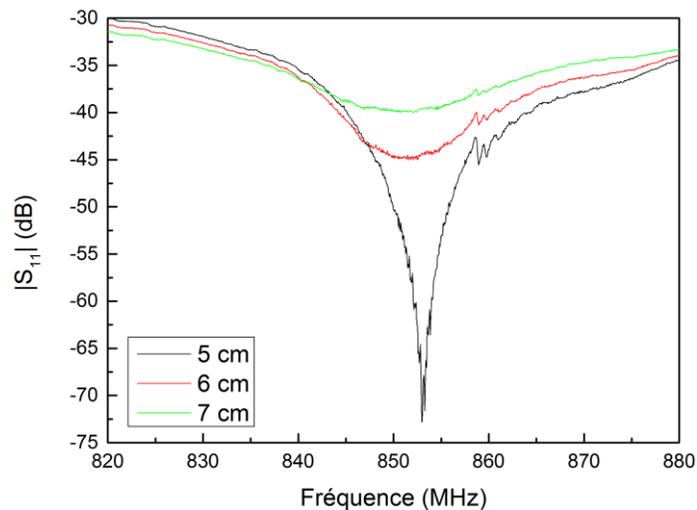
- des capteurs SAW LN-Z fort Q (> 3000), avec une antenne laminée cette fois sur le corps humain, et, à plus long distance, placée sur un diélectrique plastique.
- un capteur à ondes confinées WLAW AlN/ZnO/LN-Z avec une antenne étirable placée sur un diélectrique.

---

<sup>36</sup> <http://www.smartforcetechnologies.com/products/smartprint>



(a)

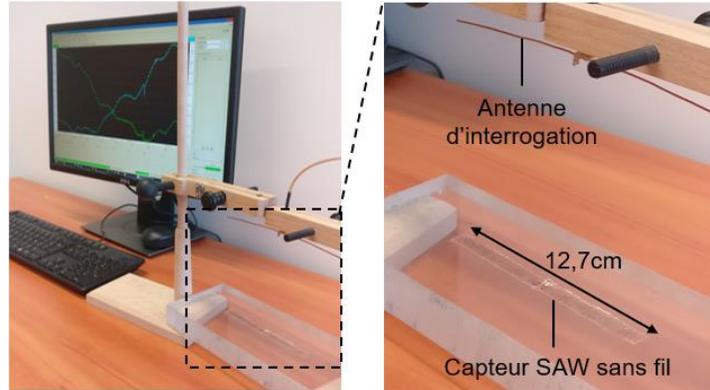


(b)

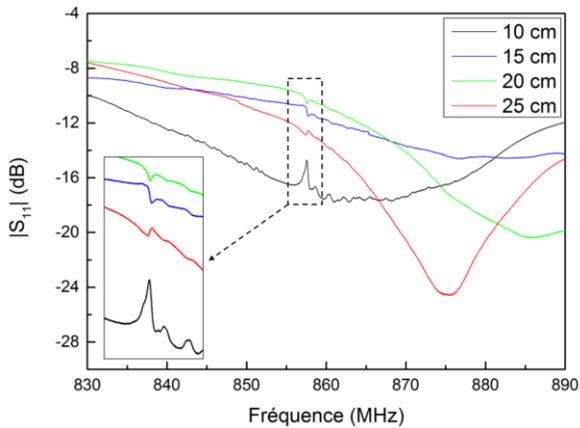
Figure 32 : (a) Dispositif expérimental pour l'interrogation à distance d'un capteur SAW ultrafin tatoué (b) Coefficient de réflexion de l'antenne d'interrogation

Le dispositif expérimental, pour l'interrogation à distance d'un capteur fort Q LN-Z 60  $\mu\text{m}$  est montré Figure 32a. Il s'agit simplement d'une antenne d'interrogation de type dipôle connectée à un analyseur de réseau low-cost (Mini-VNA Tiny, de chez Miniradiosolutions), qui procède à un balayage fréquentiel en continu. Cette antenne vient exciter le capteur SAW tatoué. La mesure du coefficient de réflexion de l'antenne d'interrogation est donnée Figure 32b, sur lequel on peut distinguer le signal rétrodiffusé à 859 MHz du capteur SAW jusqu'à 7 cm. Il est à noter qu'il est possible d'améliorer la distance d'interrogation avec la méthode décrite Figure 6a, mais il nous faudra pour cela faire des modifications sur un système de détection déjà existant, pour qu'il puisse être compatible avec des fréquences hors bandes ISM.

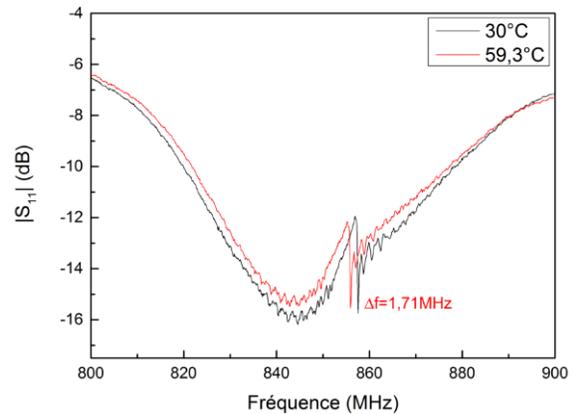
Cette mesure est un jalon très important puisqu'il s'agit du premier capteur SAW tatoué interrogé sans fil.



(a)



(b)



(c)

Figure 33 : (a) Interrogation sans fil d'un SAW LN-Z aminci avec une antenne placée sur plexiglas<sup>5</sup>  
 (b) Coefficient de réflexion de l'antenne d'interrogation<sup>5</sup> (c) Mesure en température<sup>5</sup>

Un dispositif similaire, placé sur un bloc de plexiglas, est également interrogé à distance jusqu'à 25 cm avec le même dispositif expérimental (Figure 33ab). L'écart de distance d'interrogation par rapport à la mesure précédente s'explique par la différence de gain des antennes. La sensibilité du dispositif à la température du dispositif chauffé par lampe halogène est démontrée Figure 33c.

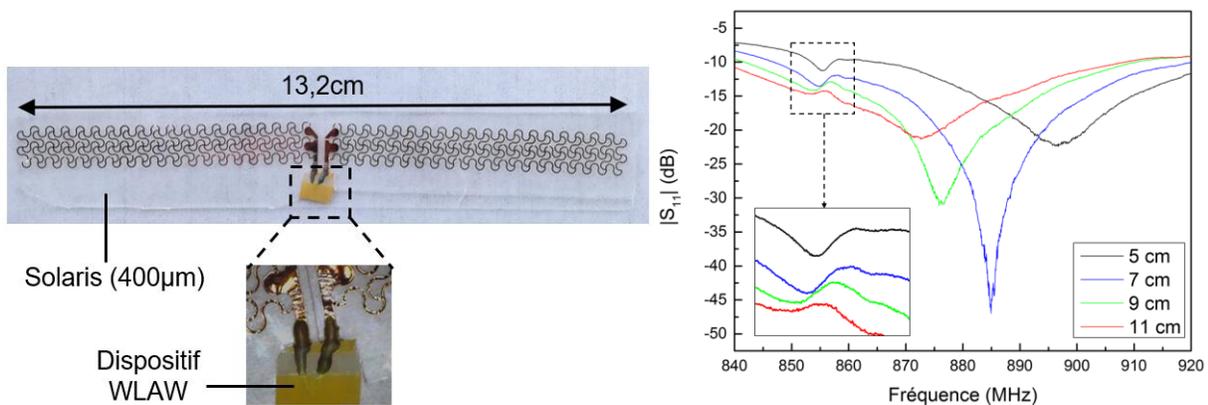


Figure 34 : (a) Dispositif WLAW AlN/ZnO/LN-Z(60μm) connecté à une antenne étirable<sup>5</sup> (b) Coefficient de réflexion de l'antenne d'interrogation<sup>5</sup>

Enfin, le dispositif WLAW AlN/ZnO/LN-Z(60 $\mu$ m) (présenté Figure 28, Q=178) est également testé sans fil (sur polystyrène) jusqu'à 11cm (Figure 34). Cela constitue un autre jalon important puisqu'il s'agit de la première interrogation sans fil d'un capteur WLAW à ondes confinées aminci, connecté à une antenne étirable.

Ces résultats, présentant des avancées claires, nous permettent d'identifier le travail restant à accomplir sur cette axe, pour obtenir des capteurs WLAW tatoués ultrafins interrogeables à une distance plus importante :

- i) améliorer le facteur de qualité des résonateurs WLAW, soit par design, soit par changement de matériaux
- ii) améliorer le gain des antennes sur peau avec de nouveaux designs
- iii) développer un système d'interrogation par « burst » présentant une bande passante élargie.

## 4. Capteurs de champ magnétique à ondes élastiques de surface

Dans de nombreuses applications, la mesure du champ magnétique est une donnée très utile. Dans certains cas, une mesure sans fil est requise, ce qui fait du capteur SAW un candidat très intéressant. L'ajout de matériaux magnéto-élastiques permet de modifier les constantes élastiques du milieu de propagation (effet Delta-E), ainsi que le couplage magnéto-élastique dynamique et d'obtenir une dépendance du capteur SAW au champ magnétique.

Une collaboration très active entre les équipes « Micronanosystèmes » et « Nanomagnétisme et électronique de spin » de l'IJL et l'équipe du LEMAC/LICS à l'IEMN, a permis d'avancer de manière significative sur les effets magnétiques et magnéto-élastiques apparaissant dans ce type de capteurs, en fonction des différents substrats piézoélectriques, des différentes configurations, des différents modes de propagation acoustique, des différentes anisotropies magnétiques (intrinsèques ou de forme) et des champs et aimantations à saturation.

Dans la foulée des travaux initiaux menés à l'IEMN, notamment dans le cadre de la thèse de Huan Zhou à l'IEMN, cette collaboration a donné lieu côté lorrain à l'IJL à trois thèses de doctorat, celle de Meriem ElHosni, de Vincent Polewczyk, et celle d'Harshad Mishra que j'ai co-dirigée. Elle a également permis cette année l'obtention de l'ANR PRCE WISSTITWIN, coordonnée par le Pr Abdelkrim Talbi. Nous collaborons également de manière étroite avec le Pr Tao Han de la Shanghai Jiao Tong University. Nous avons accueilli pendant 6 mois le doctorant invité Yang Yang, qui effectue ses travaux sur les SAW magnétiques.

### 1. Les capteurs de champ magnétique

Les capteurs de champ magnétique sont des éléments clés pour une large gamme d'applications, notamment le positionnement ou la vitesse angulaire, la CEM, la mesure à distance du courant électrique, le stationnement intelligent ou encore la détection de champ biomagnétique. Les spécifications concernant l'intensité du champ, la plage de champ et la sensibilité diffèrent et dépendent de l'application. Il existe néanmoins une vraie demande pour des capteurs magnétiques sans fil, sans pile et miniaturisés.

#### (a) Différents types de capteurs de champ magnétique

Quelques types de capteurs de champ magnétique et leur plage de mesure sont présentés Figure 35. Le plus sensible de tous les instruments pour mesurer un champ magnétique à basses fréquences (1 Hz) est le dispositif d'interférence quantique supraconducteur (SQUID)<sup>37</sup>. Un SQUID est basé sur les interactions remarquables des courants électriques et des champs magnétiques, observées lorsque certains matériaux sont refroidis en dessous d'une température de transition supraconductrice. Cependant, un tel capteur est encombrant et nécessite des conditions d'utilisation spécifiques le rendant impraticable pour la plupart des applications que nous envisageons.

---

<sup>37</sup> V. Pizzella et al., "SQUID systems for biomagnetic imaging," Super- cond. Sci. Technol., vol. 14, pp. R79–R114, 2001.

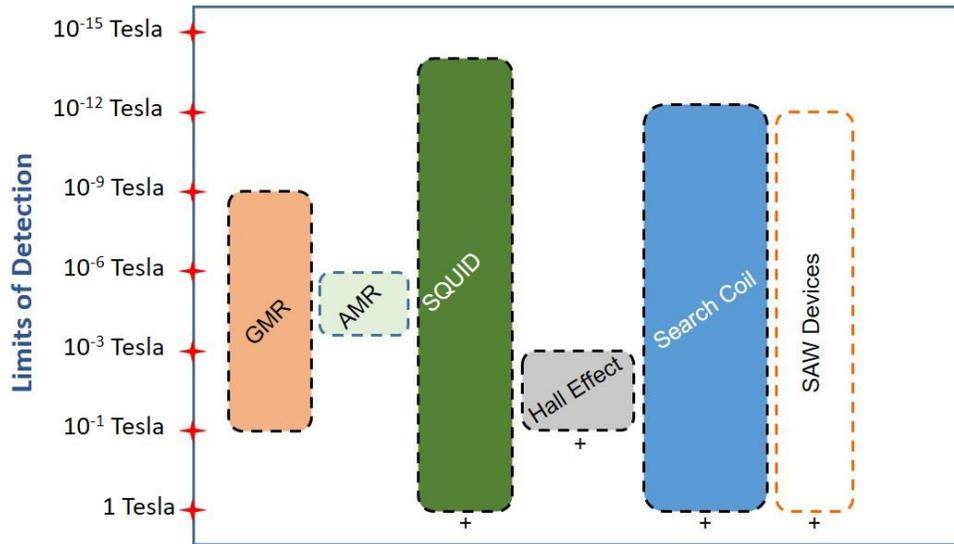


Figure 35 : Plages typiques de quelques classes de capteurs de champ magnétique<sup>38</sup>

Un des capteurs de champ magnétique le plus couramment utilisé est le capteur à effet Hall<sup>39</sup>. Le capteur à effet Hall (HE) est un capteur à faible coût exploitant un phénomène physique découvert par Edwin H. Hall, exploitant la tension créée sous champ magnétique dans un semi-conducteur parcouru par un courant. La sensibilité des capteurs HE va de 10<sup>2</sup> nT à 10<sup>8</sup> nT, mesurant un champ constant ou variable jusqu'à 1 MHz. Cependant, leur puissance requise est comprise entre 0,1 et 0,2 W.

Une autre grande classe de capteurs est composée des magnétorésistances (AMR, GMR<sup>40</sup>, TMR), qui présentent une sensibilité croissante dans cet ordre. Les magnétorésistances servent notamment dans les têtes de lecture des disques durs. Les capteurs AMR, GMR et TMR sont des capteurs actifs, ce qui signifie qu'ils ont besoin d'une alimentation externe câblée pour fonctionner. Cet inconvénient empêche leur utilisation dans bon nombre d'applications.

### (b) Les capteurs SAW de champ magnétique

Pour les applications sans fil, passives et contraintes en taille, les capteurs SAW de champ magnétique, abrégés MSAW, semblent donc être une technologie très pertinente.

Il est possible de remonter à la fin des années 70 ou début des années 80 pour trouver de premiers travaux entre ondes élastiques de surface et champ magnétique<sup>41,42</sup>.

<sup>38</sup> Harshad Mishra, Thèse de doctorat, Université de Lorraine, 2019

<sup>39</sup> R. S. Popovic, *Hall Effect Devices*. Bristol, U.K.: Inst. Physics, 2004.

<sup>40</sup> M. N. Baibich et. al., "Giant Magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr magnetic superlattices," *Phy. Rev. Lett.*, vol. 61, no. 21, Nov. 1988

<sup>41</sup> Ganguly A. K., Davis K. L., Webb D. C. and Vittoria C., "Magnetic control of surface elastic waves in a novel layered structure", *J. Appl. Phys.*, 47, 2696, 1976.

<sup>42</sup> Yamaguchi M., Hashimoto K. Y., Kogo H., and Naoe M., "Variable SAW delay line using amorphous TbFe<sub>2</sub> film", *IEEE Trans. Magn.*, 16, 916, 1980

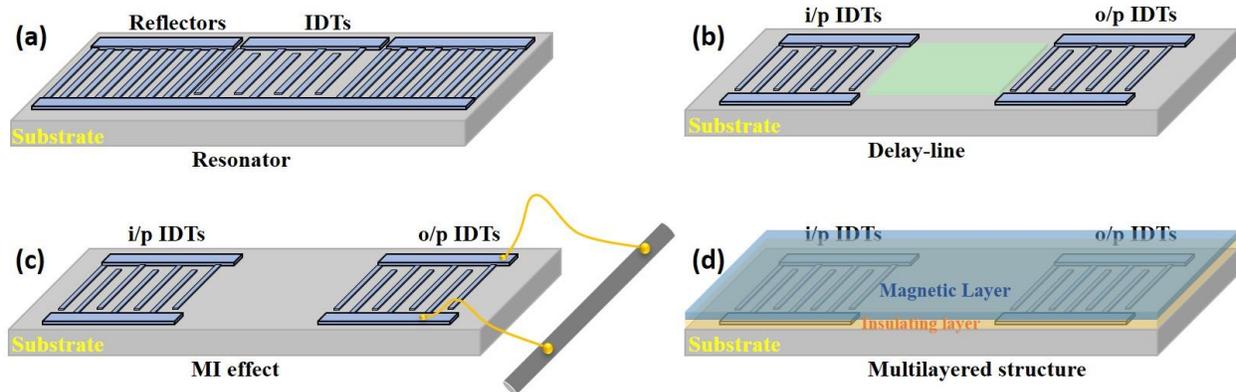


Figure 36 : Différentes configurations de capteurs MSAW<sup>38</sup> (a) Résonateur (b) Lignes à retard (c) Magnétoimpédance (d) Multicouches

Une grande variété de matériaux magnéto-élastiques ont été utilisés dans ce type de capteurs que soit du nickel<sup>43</sup>, des matériaux à bases de terres rares<sup>42,44</sup>, ou différentes alliages de Fe ou Co (FeGaB<sup>45</sup>, FeCoSiB<sup>46</sup>, CoFeB etc..).

Il existe également un grand nombre de configurations possibles dont 4 types sont décrits Figure 36. Les matériaux magnéto-élastiques peuvent être (a) les conducteurs d'un résonateur (b) dans l'espace d'une ligne à retard (d) en couche pleine isolée au-dessus d'un résonateur ou d'une ligne à retard. Une autre possibilité (sans matériau magnéto-élastique) est de charger une ligne de transmission (ou une banque de réflecteurs) par une magnétoimpédance.

A notre meilleure connaissance, les dispositifs les plus sensibles sont rapportés dans <sup>46</sup> (~12000 ppm/mT) et <sup>45</sup> (~6500 ppm/mT). Ce deuxième dispositif est néanmoins un résonateur MEMS à mode de contour et non pas un résonateur SAW. La plupart des capteurs de la littérature ont typiquement des sensibilités inférieures de 3 ou 4 ordres de grandeurs.

La compréhension des différents effets dans les capteurs MSAW n'est pas une tâche aisée, notamment car le domaine demande des bases fortes en acoustique et en magnétisme. Dans le cadre de la thèse de Huan Zhou<sup>47</sup>, Bou Matar et al. proposent un modèle (dont les principaux éléments sont résumés dans <sup>44</sup>) permettant de prédire la réponse de certains capteurs MSAW, modèle dont nous avons pu bénéficier à l'IJL. Yang Yang a également développé un modèle implémenté sur COMSOL.

<sup>43</sup> Kadota M, Ito S, Ito Y, Hada T, And Okaguchi K, "Magnetic Sensor Based on Surface Acoustic Wave Resonators", Jpn. J. Appl. Phys., 50: 07HD07, 2011.

<sup>44</sup> H. Zhou, A. Talbi, N. Tiercelin, and O. Bou Matar, "Multilayer magnetostrictive structure based surface acoustic wave devices," Appl. Phys. Lett., vol. 104, no. 11, p. 114101, Mar. 2014.

<sup>45</sup> M. Li, A. Matyushov, C. Dong, H. Chen, H. Lin, T. Nan, Z. Qian, M. Rinaldi, Y. Lin, and N. X. Sun, "Ultra-sensitive NEMS magnetoelectric sensor for picotesla DC magnetic field detection," Appl. Phys. Lett., vol. 110, no. 14, p. 143510, Apr. 2017.

<sup>46</sup> P. Smole, W. Ruile, C. Korden, A. Ludwig, E. Quandt, S. Krassnitzer, and P. Pongratz, "Magnetically tunable SAW-resonator," in IEEE International Frequency Control Symposium and PDA Exhibition Jointly with the 17th European Frequency and Time Forum, 2003. Proceedings of the 2003, 2003, pp. 903-906.

<sup>47</sup> Huan Zhou, Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lille, 2014

Quelques résultats obtenus sur les capteurs MSAW seront présentés à travers quelques publications clés.

## 2. Capteurs à ligne à retard et impact des harmoniques. Travaux de Meriem ElHosni

Meriem ElHosni, dans ses travaux de doctorat, étudie notamment une ligne à retard en configuration multicouche (comme celle décrite à la Figure 36d), basée sur un substrat de LN-Y128, un isolant de ZnO et une couche magnétoélastique en Ni, avec l'idée qu'une couche « pleine » de matériau magnétoélastique sur toute la structure présentera une sensibilité plus importante que si seuls les IDTs sont magnétoélastiques, ou si la couche est uniquement présente entre les deux transducteurs.

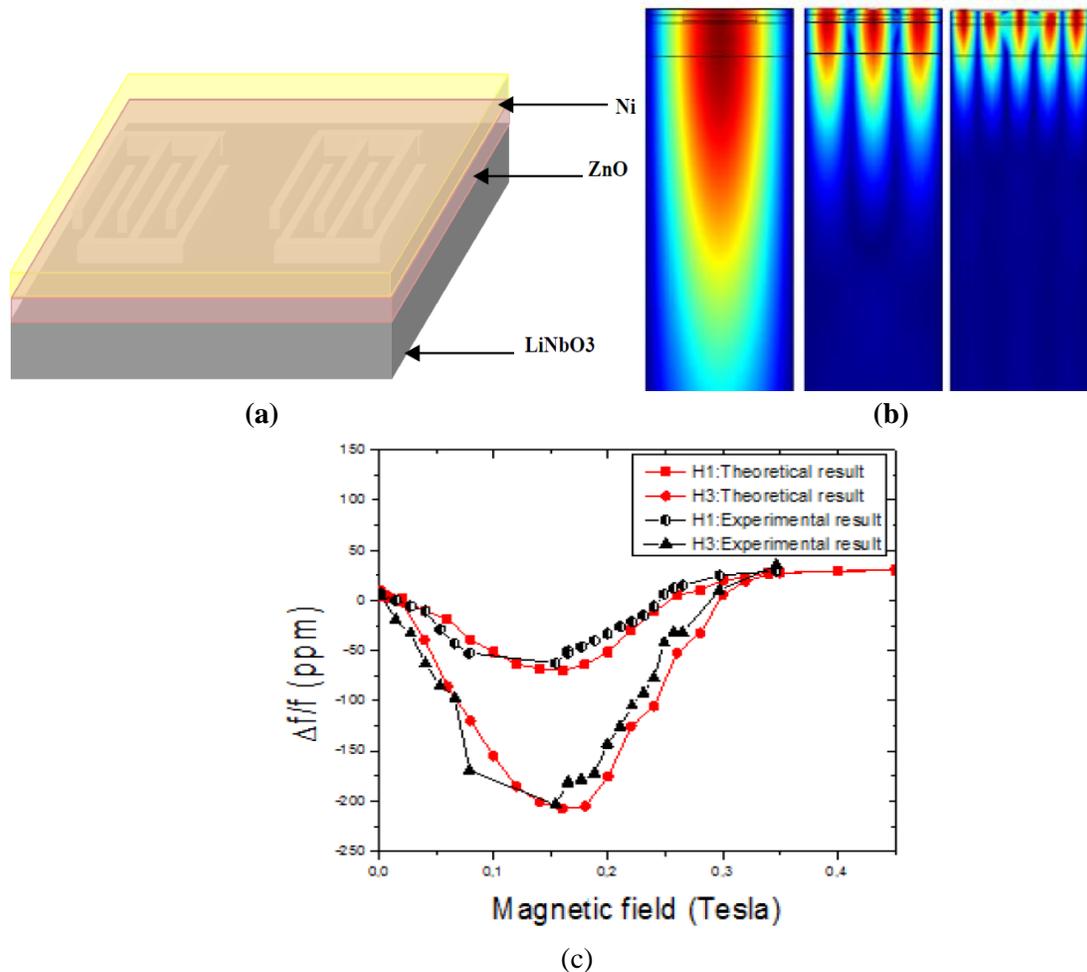


Figure 37 : (a) Schéma de la structure multicouche Ni/ZnO/LN-Y128, (b) Modélisation COMSOL des champs de déplacement pour le fondamental et les harmoniques 3 et 5 (c) Courbes de sensibilité pour un champ magnétique appliqué dans la direction de propagation.

Le schéma de la structure est donné Figure 37a. La direction de propagation est X. La modélisation des déplacements particuliers pour le fondamental et les harmoniques 3 et 5 (Figure 37b) montrent que

plus l'ordre de l'harmonique est élevé, plus il est possible de concentrer le champ de déplacement dans la couche magnéto-élastique. Comme il est possible de s'y attendre, cela engendre une sensibilité plus importante (de l'ordre de 3 fois pour l'harmonique 3) pour les harmoniques, comme montré en simulation et mesure (Figure 37c). Si on considère les décalages « bruts » en fréquence, et non plus les décalages relatifs, on multiplie encore une fois la sensibilité exprimée en MHz/T par un facteur proche de l'ordre de l'harmonique.

Ces résultats sont issus de :

[R7] M. Elhosni, O. Elmazria, S. Petit-Watelot, L. Bouvot, S. Zhgoon, A. Talbi, M. Hehn, K. A. Aissa, **S. Hage-Ali**, D. Lacour, F. Sarry, and O. Boumatar, "Magnetic field SAW sensors based on magnetostrictive-piezoelectric layered structures: FEM modeling and experimental validation," *Sens. Actuators, A*, vol. 240, pp.41-49, 2016 <https://doi.org/10.1016/j.sna.2015.10.031>

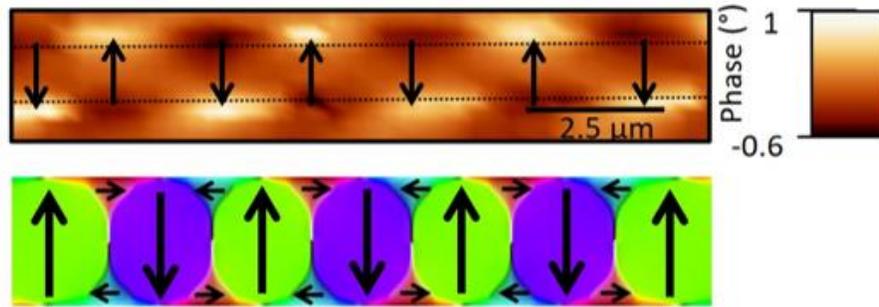
### 3. Impact de l'anisotropie de forme dans les MSAW. Travaux d'Harshad Mishra

La première publication [R14] issue de la thèse d'Harshad Mishra a permis de clarifier certains résultats « surprenants » de la littérature ou de nos propres travaux sur les SAW magnétiques où le comportement magnétique des capteurs ne correspondaient pas aux simulations. Ces simulations étaient basées sur des modèles ou des mesures de l'aimantation de couches magnétiques en configuration « pleine » ou « pleine plaque ». Dans certains cas, il était retrouvé en pratique une caractéristique ... correspondant à une autre direction d'axe facile d'aimantation que celle simulée.

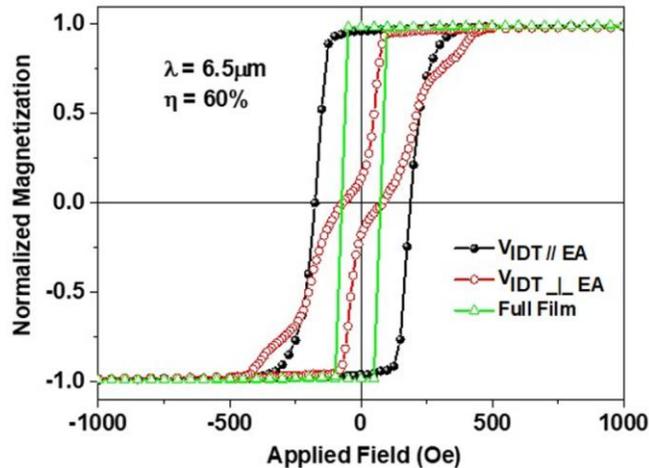
En réalité, la forme des doigts très fins dans les dispositifs SAW est propice à une compétition entre anisotropie de forme et anisotropie intrinsèque. Dans un matériau avec un champ d'anisotropie magnétocristalline faible (par exemple le CoFeB), l'anisotropie de forme peut tout à fait dominer la caractéristique d'aimantation dans une direction du champ donnée. Il fallait donc évaluer les propriétés magnétiques de structures en « doigts » imitant les IDTs et non en pleine plaque.

Les résultats sont parfois complexes, notamment dans le cas des multicouches  $\text{TbCo}_2(4\text{nm})/\text{FeCo}(4\text{nm}) \times 25$ . Il a été possible de mettre en exergue ce phénomène de compétition, *via* des mesures en MFM et simulation micromagnétique, et dont le résultat est la formation de domaines à l'intérieur des doigts (Figure 38a). Cet effet génère des courbes d'aimantation irrégulières quand l'axe facile d'aimantation est perpendiculaire au doigt (Figure 38b, courbe rouge). Par contre, quand le doigt est dans le même sens que l'axe facile, l'anisotropie totale est renforcée par la structuration : la courbe d'aimantation noire est plus « large » que la verte.

Cet effet de la structuration en doigt sur l'aimantation impacte bien évidemment la réponse acoustique sous champ.



(a)



(b)

Figure 38 : (a) Apparition de domaines dans des doigts TbCo/FeCo (en haut) MFM (en bas) modélisations micromagnétiques (b) Aimantation d'un multicouche TbCo/FeCo en configuration film plein, et dans deux configurations « doigts »

Ces résultats sont issus de :

[R14] H. Mishra, M. Hehn, D. Lacour, O. Elmazria, N. Tiercelin, H. Mjahed, K. Dumesnil, S. Petit Watelot, V. Polewczyk, A. Talbi, O. Bou Matar, and **S. Hage-Ali**, "Intrinsic versus shape anisotropy in micro-structured magnetostrictive thin films for magnetic surface acoustic wave sensors," *Smart Mater. Struct.*, vol. 28, no. 12, pp.12LT01, 2019 <https://doi.org/10.1088/1361-665X/ab522d>

#### 4. Capteur à ondes de Love compensé en température. Travaux d'Harshad Mishra

Dans la suite des travaux d'Harshad Mishra, nous nous sommes intéressés aux ondes de Love -des ondes de cisaillement- car elles sont particulièrement propices à l'obtention d'une forte sensibilité des MSAW, car la magnétostriction impacte fortement les constantes élastiques principales pour ce type de mode<sup>47,48</sup>.

<sup>48</sup> A. Kittmann, P. Durdaut, S. Zabel, J. Reermann, J. Schmalz, B. Spetzler, D. Meyners, N. X. Sun, J. McCord, M. Gerken, G. Schmidt, M. Höft, R. Knöchel, F. Faupel, and E. Quandt, "Wide Band Low Noise Love Wave Magnetic Field Sensor System," *Scientific Reports*, vol. 8, no. 1, p. 278, Jan. 2018.

De plus, un autre facteur clef pour les capteurs MSAW est la compensation en température. Nous nous sommes rendus compte lors de certaines expériences visant à mesurer le champ créé par la circulation d'un courant dans un câble électrique que nous mesurions beaucoup plus l'échauffement local de l'air créé par effet Joule que le champ magnétique !

### (a) Compensation acoustique en température

Pour parer à ce problème, nous nous sommes intéressés à une structure multicouche utilisant du quart ST, mais la direction X+90°. Cette coupe présente un TCF positif avec uniquement des électrodes, mais une fois des couches de ZnO et de CoFeB ajoutées avec des épaisseurs maîtrisées, il est possible d'obtenir une compensation de la structure en température lors des mesures acoustiques sans champ magnétique (Figure 39).

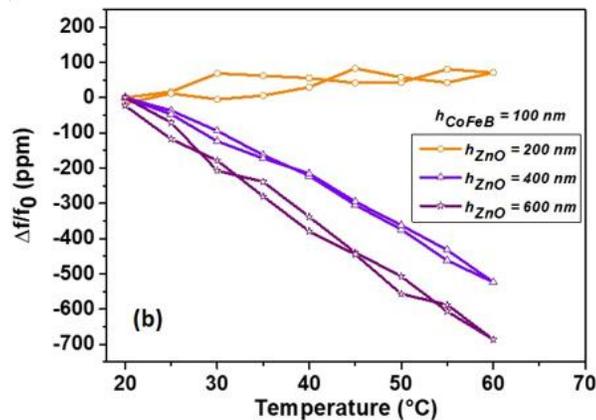


Figure 39 : Caractéristique en température du capteur à ondes de Love CoFeB/ZnO/ QST X+90°

Le capteur de champ magnétique ainsi obtenu présente une bonne sensibilité (15 MHz/T @430 MHz, 34 ppm/mT). Ces travaux ont été valorisés dans :

[R17] H. Mishra, J. Streque, M. Hehn, P. Mengue, H. Mjahed, D. Lacour, K. Dumesnil, S. Petit-Watelot, S. Zhgoon, V. Polewczyk, A. Mazzamurro, A. Talbi, **S. Hage-Ali**, and O. Elmazria, "Temperature compensated magnetic field sensor based on love waves," *Smart Mater. Struct.*, vol. 29, no. 4, pp.045036, 2020 <https://doi.org/10.1088/1361-665X/ab7857>

### (b) Capteur multifonctionnel avec compensation en température et insensibilité magnétique en température

Par contre, un point limitant de la structure précédente est que les propriétés magnétiques de la couche de CoFeB sont, elles, toujours sensibles à la température, ce qui va impacter la réponse sous champ du capteur.

Il a été trouvé qu'à partir d'une structure similaire à la précédente (voir Figure 40a), la structuration du CoFeB en bandelettes permet d'obtenir une véritable insensibilité en température à la fois des propriétés magnétiques et acoustiques pour un mode donné. Le résultat de la fabrication a été cartographié à l'AFM (Figure 40b) et a, de par sa topologie, donné son nom à la structure « en oreille de lapin »

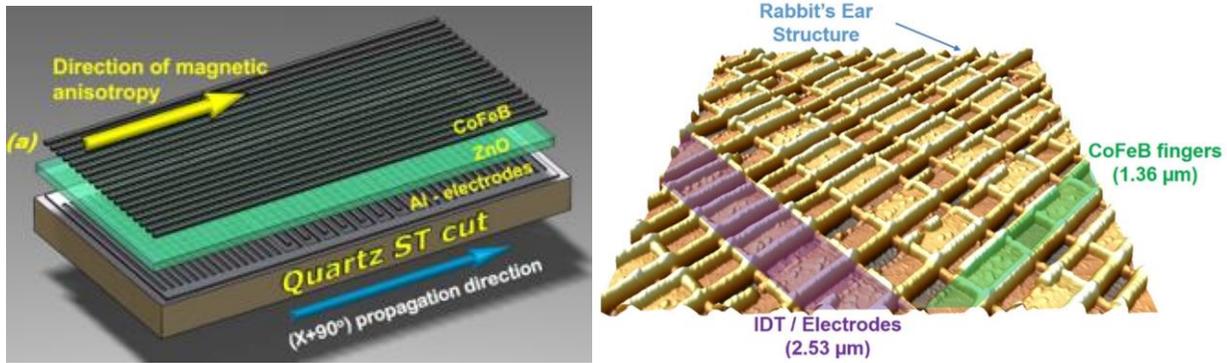


Figure 40 : Capteur multifonctionnel basé sur des « stripes » de CoFeB (a) design (b) topologie AFM

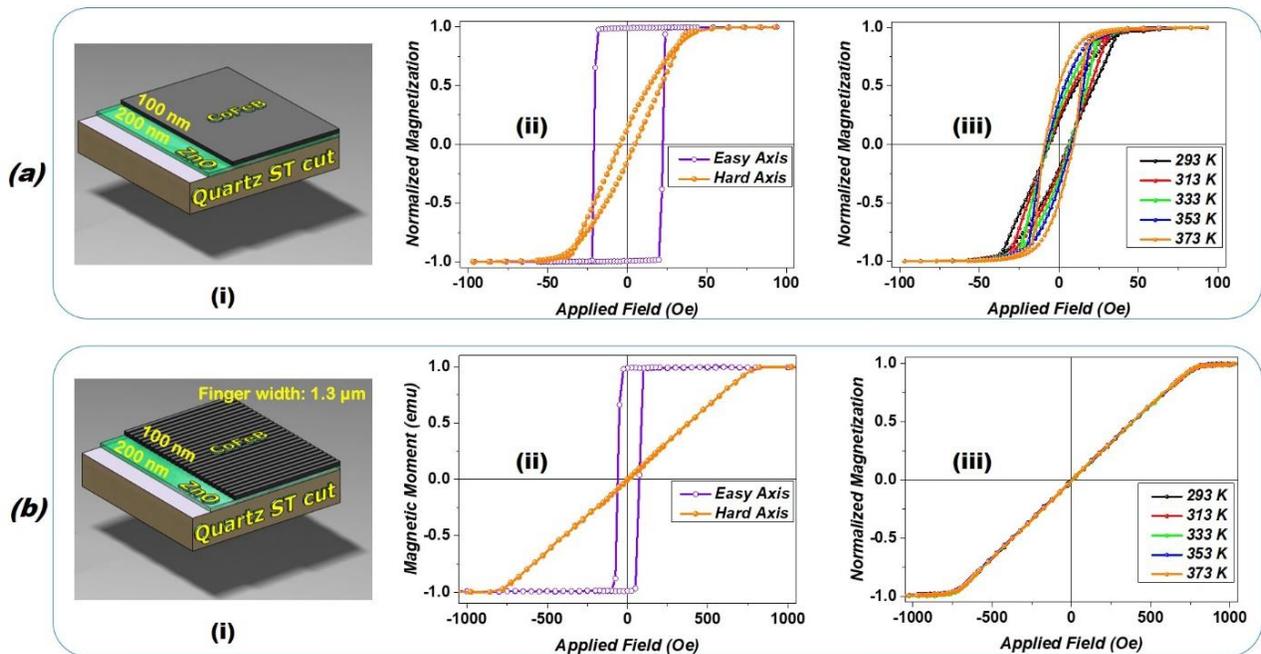


Figure 41 : Courbes d'aimantation pour une couche magnétique pleine plaque (a) vs microstructurée (b), en fonction de la température pour les axes difficiles.

Sur la Figure 41, on peut voir les courbes d'aimantation d'une couche pleine et de bandelettes de CoFeB en fonction de la température. L'aimantation des bandelettes reste stable tandis que celle des couches pleines varie en fonction de la température.

La mesure de sensibilité du capteur au champ magnétique pour une onde de type Love en fonction de la température est présentée Figure 42. Malgré des conditions expérimentales difficiles (impact de la température sur la forme des points), les mesures restent remarquablement stables. Par contre cette stabilité est obtenue au prix de la sensibilité, qui est sensiblement inférieure à celle de la structure de la section précédente.

Enfin, cette structure est réellement multifonctionnelle puisqu'une autre onde, de type Rayleigh cette fois, est sensible à la température et très peu au champ magnétique et pourra être utile, de manière indépendante du capteur de champ magnétique.

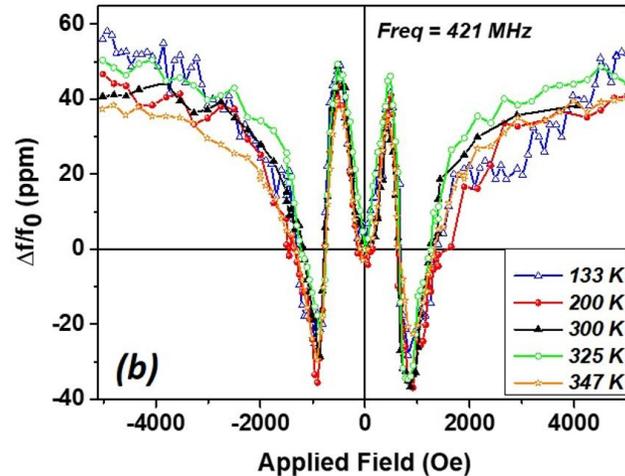


Figure 42 : Courbes de sensibilité au champ magnétique du capteur pour un onde de type Love, en fonction de la température.

Ces résultats sont issus de :

[R20] H. Mishra, M. Hehn, **S. Hage-Ali**, S. Petit-Watelot, P. W. Mengue, S. Zghoon, H. M'Jahed, D. Lacour, and O. Elmazria, "Microstructured Multilayered Surface-Acoustic-Wave Device for Multifunctional Sensing," *Phys. Rev. Appl.*, vol. 14, no. 1, p. 14053, Jul. 2020. <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.14.014053>

## 5. Capteur à forte sensibilité. Travaux du doctorant invité Yang Yang

Enfin Yang Yang a développé dans le cadre de sa thèse un modèle implémenté dans COMSOL pour la prédiction des courbes de sensibilité magnétique, qui a été confronté avec succès à nos résultats expérimentaux passés. ([R25] en révision).

[R25] Y. Yang, H. Mishra, T. Han, **S. Hage-Ali**, M. Hehn and O. Elmazria, "Sensing Mechanism of Surface Acoustic Wave Magnetic Field Sensors Based on Magnetostrictive Materials" submitted to *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*

Il a utilisé ce modèle pour optimiser la sensibilité des structures à ondes de Love compensées en température des sections précédentes, en ajoutant une couche intermédiaire de SiO<sub>2</sub> et en prenant en compte la géométrie de la structure fabriquée. La structure multicouche est présentée Figure 43a.

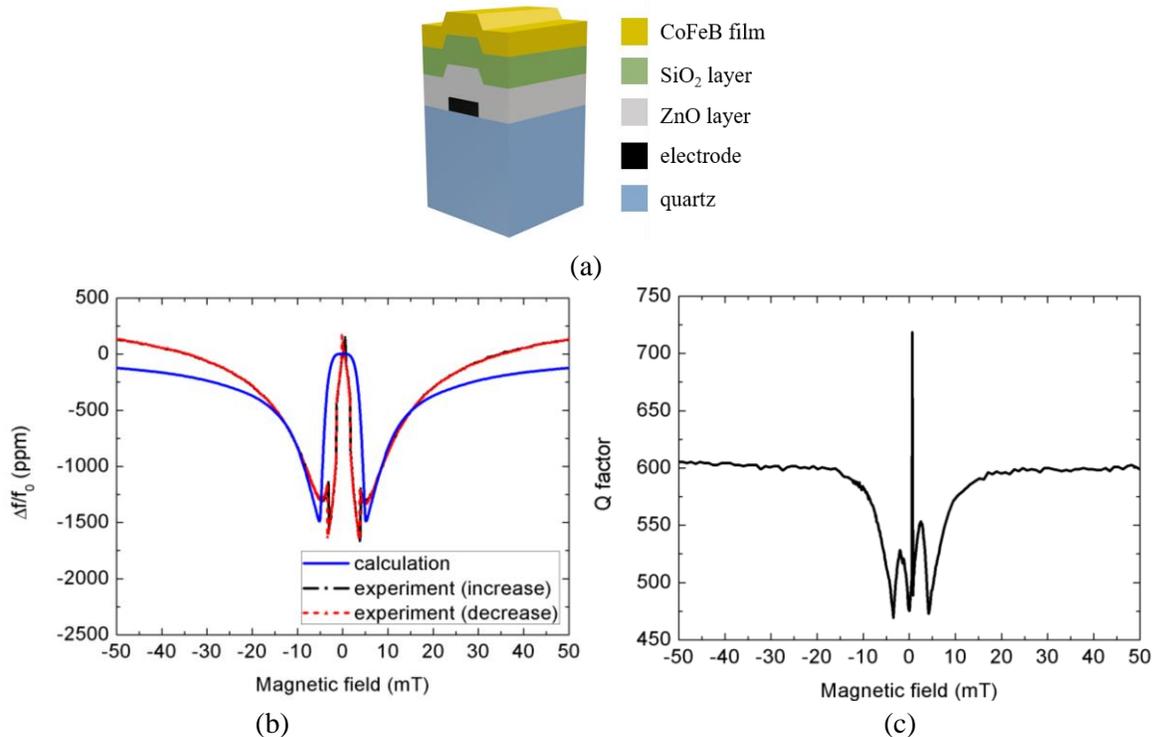


Figure 43 : (a) Design de la structure CoFeB/SiO<sub>2</sub>/ZnO/QST(X+90°) (b) Sensibilité au champ magnétique dirigé selon l'axe difficile d'aimantation : calculs et mesures (c) Facteur de qualité en fonction du champ

La sensibilité de cette structure optimisée compensée en température est très forte (420 ppm/mT) et l'accord entre simulations et expériences est bon (Figure 43b). Il n'y a plus d'hystérèse. Le facteur de qualité est compatible avec des mesures sans fil (Figure 43c).

Ce sont donc des résultats très prometteurs pour différentes applications et nous cherchons encore à les améliorer avec de nouveaux concepts et de nouvelles structures. Une voie claire pour obtenir des capteurs avec une sensibilité de plus de 3000 ppm/mT a été identifiée récemment.

Ces résultats sont issus de :

[R19] Y. Yang, H. Mishra, P. Mengue, **S. Hage-Ali**, S. Petit-Watelot, D. Lacour, M. Hehn, H. M'Jahed, T. Han, and O Elmazria, "Enhanced Performance Love Wave Magnetic Field Sensors with Temperature Compensation," *IEEE Sens. J.*, vol. 20, no. 19, pp. 11292–11301, Oct. 2020. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.2998826>

## 5. Capteurs SAW pour les environnements difficiles

Les milieux hostiles sont véritablement le domaine de prédilection des capteurs SAW car ils font partie des rares techniques permettant des mesures sans fil dans des conditions à très haute température<sup>49</sup>, en milieu radiatif<sup>50</sup> ou corrosifs<sup>51</sup>.

Nous nous sommes intéressés aux mesures à haute température, notamment dans le cadre de l'ANR SALSA (2015-2019) coordonnée par Omar Elmazria en partenariat avec Arcelor Mittal et le LMOPS (Thierry Aubert), le SYMME (Marc Lomello) et l'IMN (Abdou Djouadi) et freq'n'sys (Sylvain Ballandras/Thierry Laroche). D'un point de vue applicatif, deux objectifs ont été et sont toujours visés :

- le suivi du refroidissement des pièces en métallurgie (~ 600 - 650°C)
- le suivi de procédé dans des fours / laminoir (1000°C et plus)

Dans l'équipe, le travail sur l'activité haute température s'est concentré principalement les objectifs techniques et scientifiques suivants, auxquels le post-doctorat de Jérémy Strèque a fortement contribué :

- L'étude et l'optimisation des différents matériaux (notamment les électrodes) constituant le capteur et l'antenne associée, et de leur comportement à des températures élevées.

- L'optimisation des dépôts des couches piézoélectriques (AlN, ZnO, AlN-Sc) substrat saphir pour atteindre des propriétés optimales de transduction, des propriétés physiques stables et reproductibles permettant la conception de dispositifs robustes, avec notamment la thèse de Florian Bartoli.

- L'évaluation du potentiel du niobate de lithium congruent et stœchiométrique pour la haute température, qui est l'objet de la thèse en cours de Jordan Maufay.

- La conception de dispositifs SAW de haute performance et d'antennes associées. Des travaux ont été menés sur des résonateurs, mais aussi sur une structure originale de type « ligne à retard » baptisés « IDT connectés », perfectionnée dans le cadre de la thèse de Cécile Floer.

Les développements importants de ces dernières années sont détaillés dans les sections suivantes.

---

<sup>49</sup> R. Fachberger, G. Bruckner, R. Hauser, and L. Reindl, "Wireless SAW based high-temperature measurement systems," in 2006 IEEE International Frequency Control Symposium and Exposition, 2006, pp. 358–367.

<sup>50</sup> Y. Wang, G. Sha, C. Harlow, M. Yazbeck, and M. Khafizov, "Impact of nuclear reactor radiation on the performance of AlN/sapphire surface acoustic wave devices," Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, vol. 481, pp. 35–41, Oct. 2020.

<sup>51</sup> L. Xie, X. Zhu, Z. Liu, X. Liu, T. Wang, and J. Xing, "A rebar corrosion sensor embedded in concrete based on surface acoustic wave," Measurement, vol. 165, p. 108118, Dec. 2020

## 1. La structure AlN/Saphir

La structure AlN/Saphir a été identifiée comme étant une des plus prometteuses pour les applications SAW à très haute température<sup>52,53</sup>.

Dans le cadre des travaux postdoctoraux de Jérémy Strèque, c'est une électrode finalement assez sous-estimée pour les applications en haute température intermédiaire (~600°C) qui est utilisée : l'aluminium.

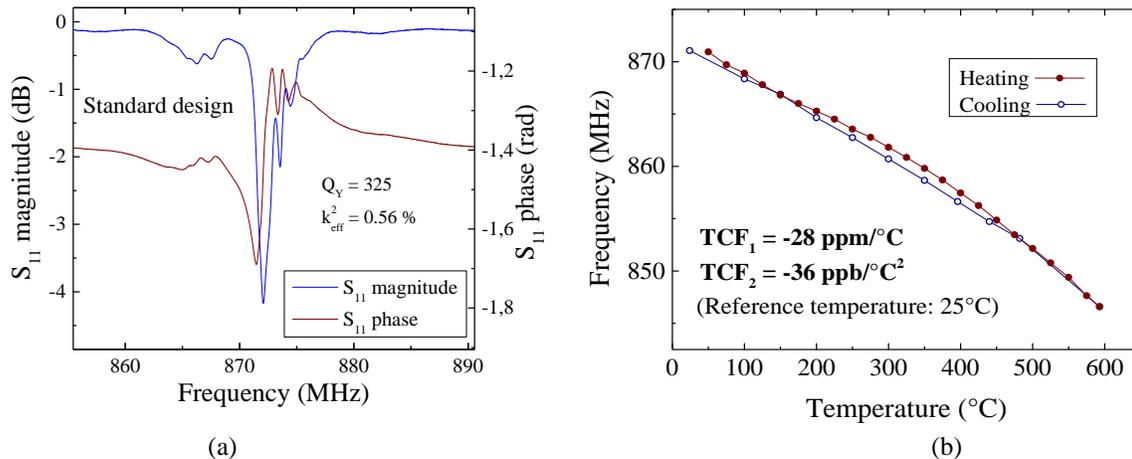


Figure 44 : (a) Mesure d'un résonateur asynchrone à 872 MHz (b) Dépendance en température jusqu'à 593°C

Dans un premier temps, un résonateur synchrone ( $\lambda = 6,5 \mu\text{m}$ ) est réalisé sur AlN  $3\mu\text{m}$  et testé en température (Figure 44). Ce résonateur, au facteur de qualité limité ( $Q=325$ ) a néanmoins une résistance surprenante à la température puisqu'il a pu être testé jusqu'à 593°C, c'est-à-dire 67°C en dessous de la température de fusion de l'aluminium.

Ce premier résonateur a pu servir de base au design d'un résonateur légèrement asynchrone fort Q par  $frec'n'sys$ , dont les caractéristiques en température ( $Q$ ,  $k_{eff}^2$ , FOM) sont décrites Figure 45. Ce résonateur présente un très fort Q à l'ambiante proche de 8000, et qui reste supérieur à 3000 jusqu'à 400°C. La figure de mérite baisse légèrement avec la température mais reste supérieure à 2 sur toute cette plage.

Ces résultats sont donc convaincants pour la plage basse des mesures haute température.

Ces travaux ont été valorisés dans :

[R18] J. Streque, J. Camus, T. Laroche, **S. Hage-Ali**, H. M'Jahed, M. Rammal, T. Aubert, M. A. Djouadi, S. Ballandras, and O. Elmazria, "Design and characterization of high-Q SAW resonators based on the AlN/Sapphire structure intended for high-temperature wireless sensor applications", *IEEE Sens. J.*, vol. 20, n°13, pp. 6985-6991, 2020. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.2978179>

<sup>52</sup> T. Aubert, O. Elmazria, B. Assouar, L. Bouvot, and M. Oudich, "Surface acoustic wave devices based on AlN/sapphire structure for high temperature applications," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 96, no. 20, p. 203503, May 2010.

<sup>53</sup> T. Aubert, O. Elmazria, B. Assouar, E. Blampain, A. Hamdan, D. Genève, and S. Weber, "Investigations on AlN/sapphire piezoelectric bilayer structure for high-temperature SAW applications," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 59, no. 5, pp. 999–1005, May 2012.

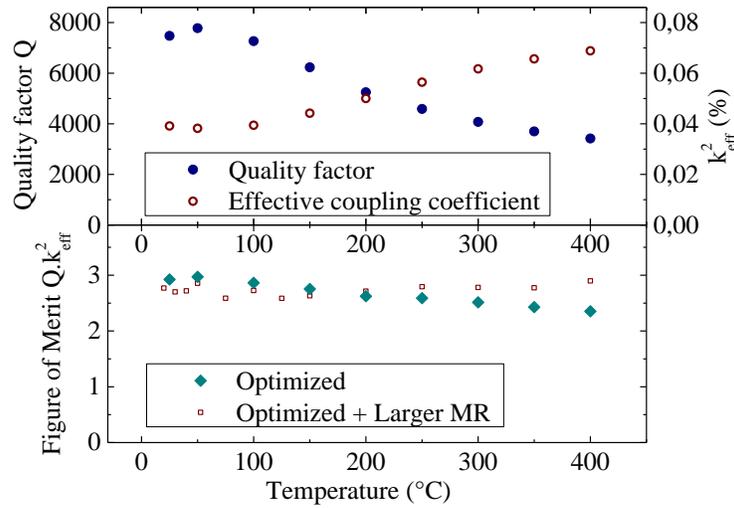


Figure 45 : Evolution en température d'un résonateur AlN/Saphir optimisé

## 2. Structure ligne à retard à IDT connectés

Nous nous sommes également intéressés à des structures de type lignes à retard. Un des « challenges » pour celles-ci à haute température est le suivant : les matériaux de référence que sont la langasite (LGS) ou l'AlN/Saphir sont faiblement couplés et sont donc peu propices à la réalisation de « tags » identifiables sans fil. Il faut donc trouver un moyen de récupérer des décibels « par design ».

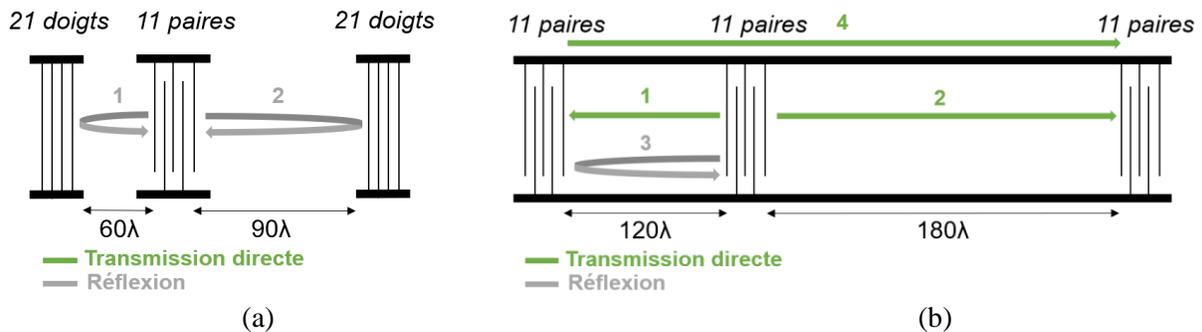


Figure 46 : (a) Ligne à retard classique (b) Ligne à retard de type « IDT connectés »<sup>5</sup>

L'idée derrière la structure à IDT connectés est décrite Figure 46 : alors qu'une R-DL « standard » (a) voit ses propriétés dépendre des réflexions électromécaniques et mécaniques, la structure à IDT connectés repose essentiellement sur des transmissions directes. Comme il est possible de le voir sur LN-Y128 congruent, cette dernière présente un gain comparatif clair (Figure 47) avec un différence de 12dB, quand trois banques d'IDTs composent les structures.

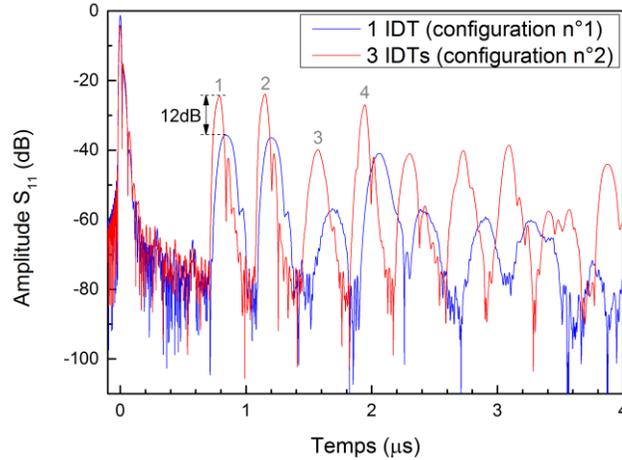


Figure 47 : Coefficients de réflexion expérimentaux dans le domaine temporel d’une structure R-DL standard (1IDT) vs IDT connectés (3IDT) sur LN-Y128 <sup>5</sup>

Cette amélioration de performances permet d’obtenir des signaux dans des lignes à retard sur langasite dans la structure à IDT connectés, alors qu’un R-DL standard voit ses signaux au niveau du bruit. Ce design permet donc clairement d’étendre le potentiels des tags identifiables à des matériaux faiblement couplés.

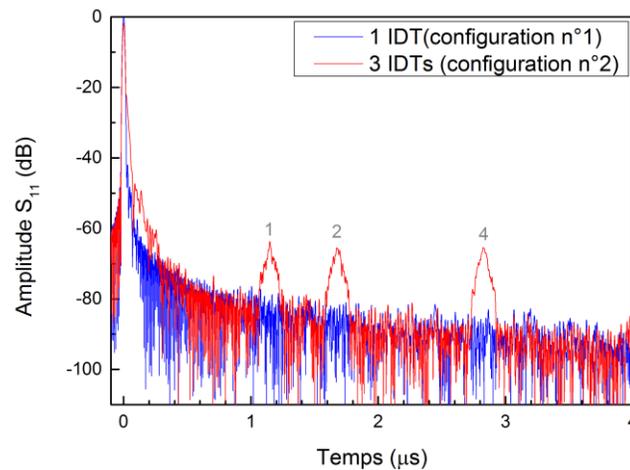


Figure 48 : Coefficients de réflexion expérimentaux dans le domaine temporel d’une structure R-DL standard (1IDT) vs IDT connectés (3IDT) sur LGS <sup>5</sup>

Enfin, ces structures sur LN-Y128 et LGS ont été testées en température jusqu’à 600°C avec des métallisations en platine (Figure 49), l’idée initiale étant de montrer que seules les structures sur LGS restent fonctionnelles tandis que le niobate « flanche », comme ce qui était prédit par la littérature <sup>54</sup>.

Ces mesures ont généré une réelle surprise scientifique et de nouvelles voies de recherche, car il s’est avéré que les dispositifs sur LN-Y128 restent fonctionnels, au moins 45 mn 600°C, avec une dégradation de performance modérée. (Figure 49b)

<sup>54</sup> R. Hauser, L. Reindl, and J. Biniash, “High-temperature stability of LiNbO<sub>3</sub> based SAW devices,” in IEEE Symposium on Ultrasonics, 2003, 2003, vol. 1, pp. 192-195 Vol.1.

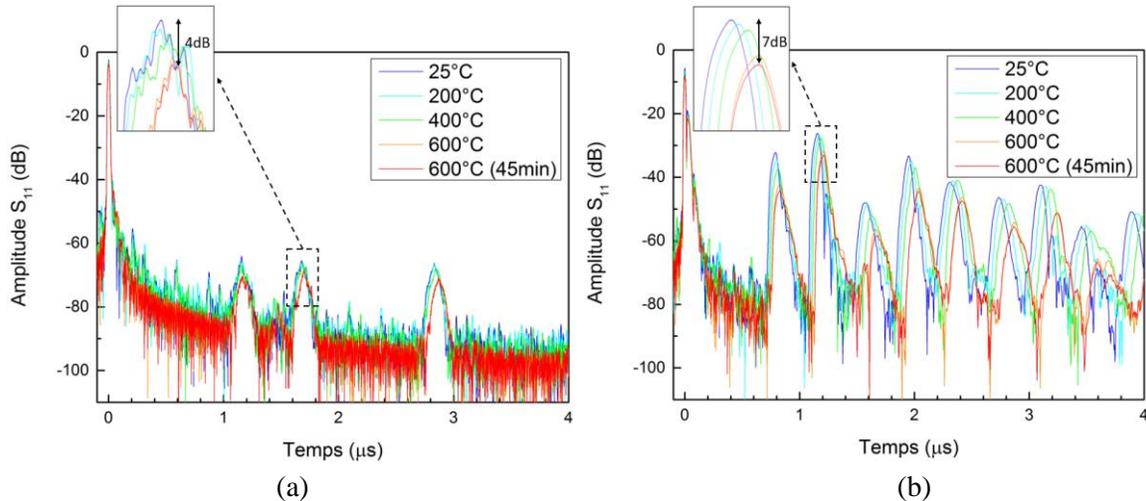


Figure 49 : Coefficients de réflexion expérimentaux dans le domaine temporel d'une structure à IDT connectés sur (a) LGS (b) LN-Y128 avec des métallisations platine <sup>5</sup>

Ces travaux ont été valorisés dans :

[R16] C. Floer, **S. Hage-Ali**, P. Nicolay, H. Chambon, S. Zhgoon, A. Shvetsov, J. Streque, H. M'Jahed, and O. Elmazria, "SAW RFID devices using connected IDTs as an alternative to conventional reflectors for harsh environments," *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, vol. 67, no. 6, pp.1267-1274, 2020 <https://doi.org/10.1109/TUFFC.2019.2943310>

### 3. Potentiel du niobate stœchiométrique

Le potentiel du niobate congruent (cLN) et du niobate stœchiométrique (sLN) pour des applications de capteurs est actuellement évalué dans le cadre de la thèse en cours de Jordan Maufay encadrée par Thierry Aubert et Omar Elmazria en collaboration avec l'Arménie (E. Kokanyan), à la suite de travaux engagés durant le post-doctorat de Jérémy Strèque.

Comme nous l'avons vu dans la section précédente, le cLN avait une mauvaise réputation pour les applications en haute température. Comme l'a proposé Thierry Aubert, le sLN, de par son diagramme de phase, présente en théorie un potentiel de stabilité beaucoup plus important. Ceci est confirmé expérimentalement par des mesures Raman et en diffraction X (Figure 50) : le sLN reste stable tandis que le cLN voit ses propriétés modifiées, et une phase de triniobate de lithium ( $\text{Li}_3\text{NbO}_8$ ) apparaît. Des premiers dispositifs SAW sur sLN ont permis de réaliser des mesures en température jusqu'à presque 600°C (Figure 51).

Des travaux sur le sLN ont été valorisés dans [R13] et ainsi que récemment à IUS 2020 [CI18]

[R13] J. Streque, T. Aubert, N. Kokanyan, F. Bartoli, A. Taguett, V. Polewczyk, E. Kokanyan, **S. Hage-Ali**, P. Boulet, and O. Elmazria, "Stoichiometric Lithium Niobate Crystals: Towards Identifiable Wireless Surface Acoustic Wave Sensors Operable up to 600°C," *IEEE Sensors Letters*, vol. 3, no. 4, pp.1-4, April 2019 <https://doi.org/10.1109/LSENS.2019.2908691>

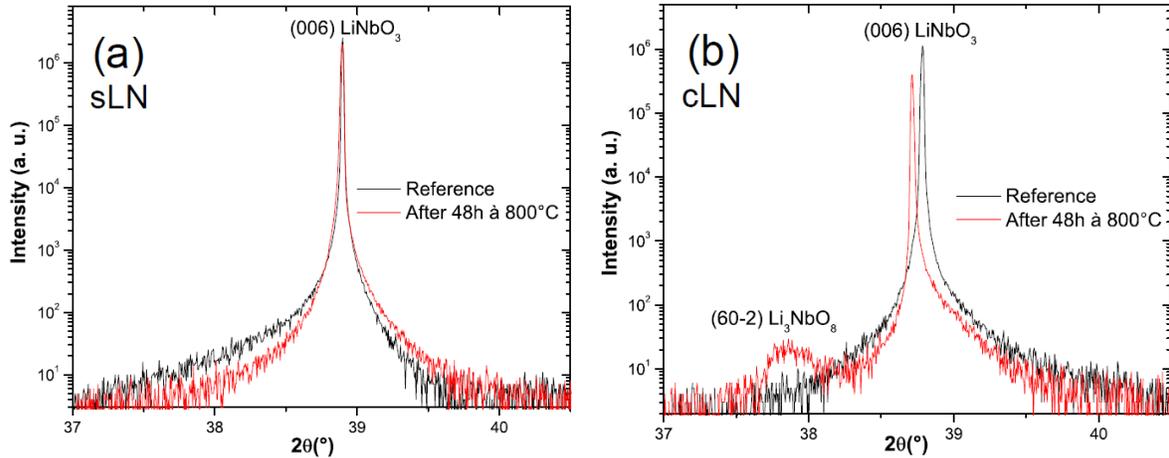


Figure 50 : Diagramme de diffraction du (a) niobate stœchiométrique (b) niobate congruent après 48h à 800 °C

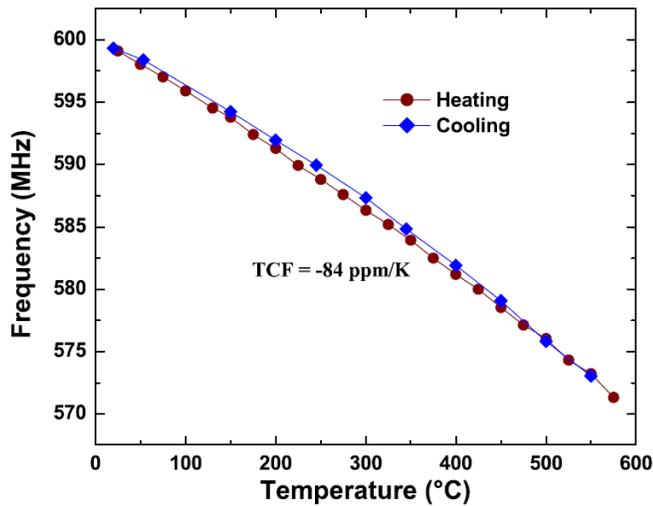


Figure 51 : Sensibilité en température de capteurs sur sLN

#### 4. Antennes PIFA pour la haute température.

Enfin, dans le cadre de l'ANR Salsa et dans le cadre du stage de M2 EEA CIM de Louis Verzellesi, nous nous sommes attachés à essayer de trouver des solutions pour les mesures de capteurs SAW en milieu industriel métallique, comme les palplanches d'ArcelorMittal (voir Figure 52).

Les premiers tests réalisés sur site avec des capteurs freq'n'sys muni d'antennes dipôles se sont révélés perfectibles : les antennes dipôles placées proches des palplanches étaient perturbées en impédance et rayonnement. Louis Verzellesi propose alors l'utilisation d'antennes PIFA, une classe d'antenne par exemple utilisée par le CTR dans leur travaux <sup>55</sup>.

<sup>55</sup> B. Wall, R. Gruenwald, M. Klein, and G. Bruckner, "C3.3 - A 600°C Wireless and Passive Temperature Sensor Based on Langasite SAW-Resonators," Proceedings SENSOR 2015, pp. 390–395, May 2015.

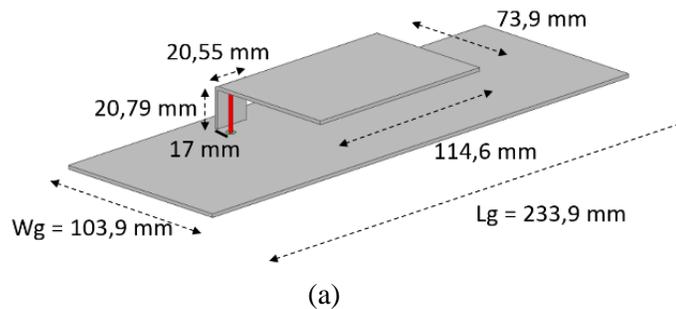


Figure 52 : Antenne PIFA et capteur SAW sous test sur une palplanche.

Ce type d'antenne, notamment utilisée dans les premiers téléphones portables présentent un plan de masse, qui, si il est suffisamment grand, permet d'isoler l'antenne du métal se trouvant en dessous.

Le prototype en acier inoxydable autour de 433 MHz (montré Figure 52) a été testé avec succès avec un résonateur SAW commercial en fin de cycle de refroidissement à 180°C, sur le site de Belval chez ArcelorMittal. Par contre, avec un plan de masse de 30x30 cm, il est encore assez encombrant.

Nous nous sommes donc attachés à réduire la taille du plan de masse de cette antenne avec pour critère le suivant : l'antenne ne doit pas avoir trop de modifications d'impédance une fois posée sur une surface métallique de grand taille. Le prototype de taille réduite est montrée Figure 53.



(b)

Figure 53 : Antenne PIFA à plan de masse réduit (a) design (b) prototype

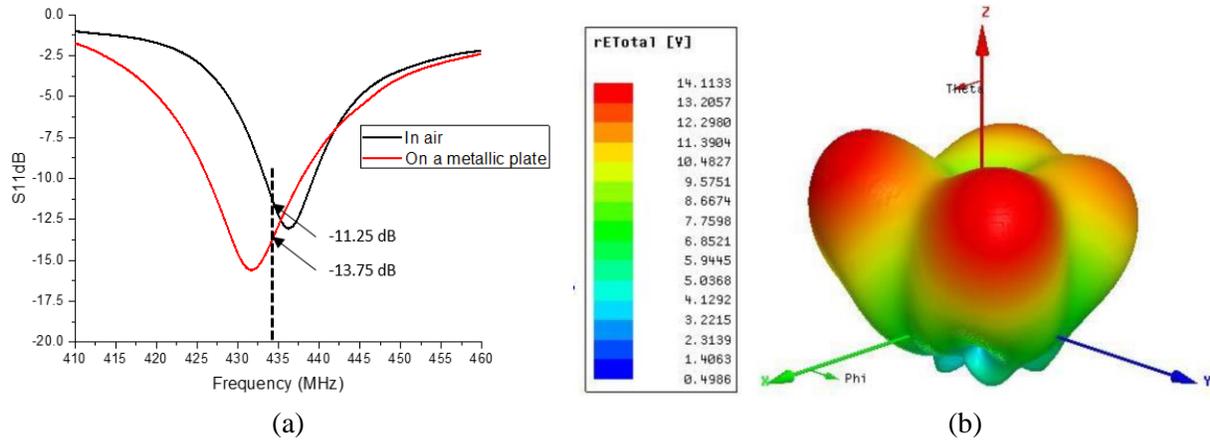


Figure 54 : (a) Coefficient de réflexion expérimental de l'antenne PIFA réduite placée dans l'air ou sur un large plan métallique (b) Modélisation HFSS du diagramme de rayonnement de l'antenne placée sur un plan de métallique de large taille

Cette antenne présente des propriétés intéressantes au vu des contraintes applicatives :

- elle présente expérimentalement peu de variations d'impédance quand elle est placée sur un large plan métallique, garantissant la stabilité des mesures (Figure 54a).
- son diagramme de rayonnement théorique présente un rayonnement assez latéral (Figure 54b), ce qui est particulièrement adapté à la configuration de mesure latérale présentée Figure 52.

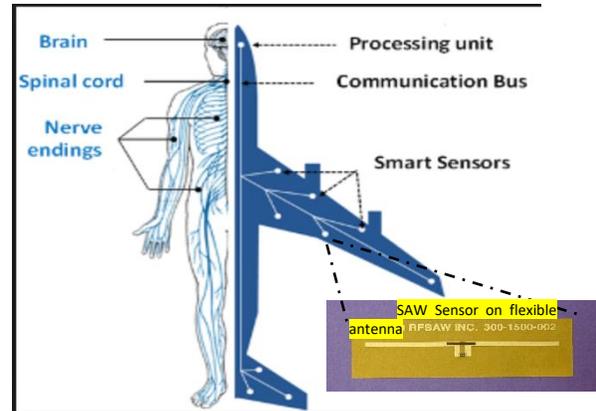
Il reste un travail important à effectuer sur le test de ce type d'antenne à haute température et sur les interconnexions antennes – capteur SAW résistant à ce type d'environnement, de jolis travaux en perspective.

## E. Projet scientifique

### 1. Capteurs SAW pour environnements industriels 4.0. Thèses en cours de Baptiste Paulmier et Prince Mengue

#### 1. Eléments de contexte

Les capteurs actuels, qu'ils soient dans une usine, un bâtiment, dans une navette spatiale ou dans un dispositif d'électronique grand public sont des dispositifs extrêmement contraints dans leur dimensionnement : un maximum de fonctionnalités doivent pouvoir être intégrées de manière harmonieuse dans leur environnement immédiat, avec un profil et un poids le plus faible, et en consommant le moins d'énergie possible.



Les capteurs SAW ont été identifiés comme une technologie d'intérêt pour les applications aérospatiales par la NASA, notamment pour les applications de Structural Health Monitoring (SHM)<sup>56</sup>. En plus, des caractéristiques de type poids, taille, sans fil, les capteurs SAW ont aussi l'avantage de pouvoir adresser une large plage de température, des hautes températures<sup>57</sup> jusqu'à la cryogénie, ainsi que de pouvoir résister aux radiations.

C'est dans ce contexte « SHM » ou « santé des structures » que se déroulent les thèses de Baptiste Paulmier et Prince Mengue. Une des applications visées sera le monitoring de la santé de structures du béton armé, une activité dans le cadre de laquelle nous collaborons avec Pascal Nicolay du Cismat / Université de Carinthie.

#### 2. Travail de thèse de Baptiste Paulmier : Capteurs SAW pour applications SHM

Le travail de thèse de Baptiste Paulmier, commencé en Octobre 2019, consistera à développer des structures WLAW –IDtag pour des applications de « Structural Health monitoring » qui permettra d'assurer des fonctions de contrôle non destructif enfouilli, pour tout type d'applications aérospatiales, aéronautiques, défense ou encore des infrastructures BTP (pont, pipeline, ..). Dans ce travail des capteurs de déformation, soumis à des variations de température, seront particulièrement étudiés.

Les structures de type ID-Tag requièrent des couplages électromécaniques forts. Des premiers résultats intéressants sur des structures à base de niobate de lithium ont été obtenus dans le cadre de la thèse de Cécile Floer [R16].

Pour aller au-delà de l'état de l'art, il est proposé de baser nos travaux sur des wafers de type « Piezoelectric on insulator » (POI), de type tantalate de lithium / silicium ou niobate de lithium / silicium.

<sup>56</sup> W. C. Wilson, M. D. Rogge, B. H. Fisher, D. C. Malocha, and G. M. Atkinson, "Fastener Failure Detection Using a Surface Acoustic Wave Strain Sensor," IEEE Sensors Journal, vol. 12, no. 6, pp. 1993–2000, Jun. 2012.

<sup>57</sup> A. Maskay, D. M. Hummels, and M. Pereira da Cunha, "SAWR dynamic strain sensor detection mechanism for high-temperature harsh-environment wireless applications," Measurement, vol. 126, pp. 318–321, Oct. 2018.

Ces substrats, qui commercialisés par SOITEC<sup>58</sup> ou son concurrent chinois NanoLN, sont à la pointe de la technologie 5G et sont qualifiés de véritable révolution dans le domaine <sup>59</sup> grâce aux avantages suivants, pour l'instant peu exploités dans le domaine des capteurs :

- les coefficients de couplages très importants doivent permettre d'augmenter le niveau de signal permettant soit d'augmenter la portée, soit le nombre de codes-barres et donc de capteurs détectables
- la vitesse élevée des ondes dans le silicium permet soit de relaxer la contrainte de fabrication, soit la montée en fréquence
- La facilité d'amincissement ou de gravure de substrats POI permettra de réaliser des capteurs ultrafins, donc plus sensibles à la déformation de la pièce en l'impactant moins.

La variété des possibilités de combinaison de couches dans les wafers POI offre par ailleurs de nombreuses occasions de développements théoriques, qui seront effectués en collaboration avec nos collaborateurs Dr Naumenko et Pr Zhgoon. En préparation de ce travail sur POI, une expérience sur un banc de traction en température est actuellement réalisée sur des résonateurs SAW Langasite/Iridium (Figure 55).

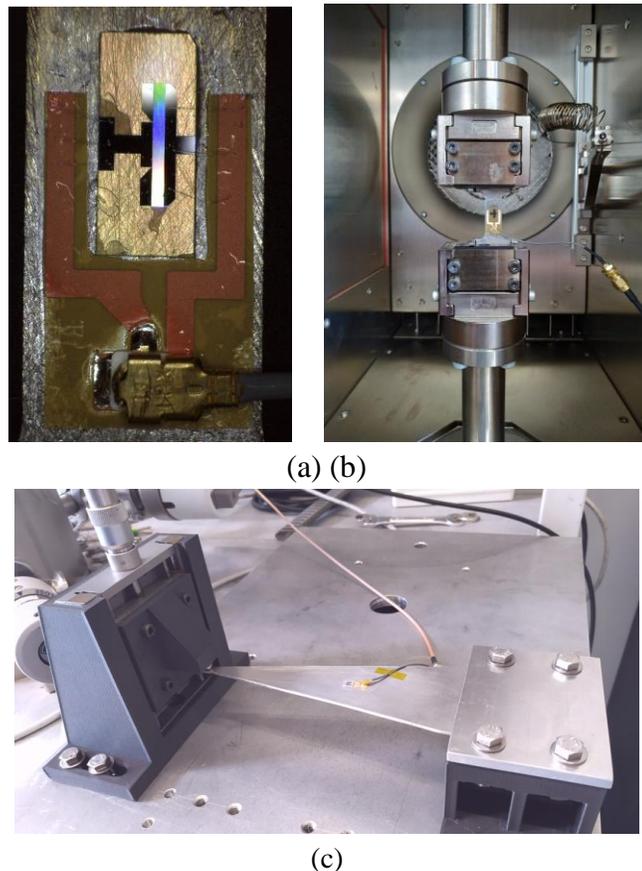


Figure 55 : (a) Capteur de déformation langasite (b) Banc de traction en température (c) Banc en flexion développé par B. Paulmier

<sup>58</sup> <https://www.soitec.com/fr/produits/poi>

<sup>59</sup> T. Takai, H. Iwamoto, Y. Takamine, H. Yamazaki, T. Fuyutsume, H. Kyoya, T. Nakao, H. Kando, M. Hiramoto, T. Toi, M. Koshino and N. Nakajima, "Incredible high performance SAW resonator on novel multi-layered substrate," 2016 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), 18-21 Sept. 2016

### 3. Travail de thèse de Prince Mengue : Capteurs SAW réalisés directement sur pièces métalliques

Un des challenges importants pour les capteurs de déformation, notamment sur des pièces métalliques en milieu industriel est toujours leur intégration sur la pièce cible, que ce soit au niveau du collage/montage, de l'encombrement ou de la perturbation éventuelle de la mécanique locale par le capteur en lui-même.

En particulier le collage de monocristaux rigides qui constituent les SAW, pour mesurer une déformation, peut générer des relaxations de contrainte dans la colle et générer des erreurs de mesure, sans parler du budget thermique limite. Une méthode possible pour parer à ce problème est d'utiliser du Nanofoil<sup>60</sup> pour une adhésion métallique et sera investiguée dans le thèse de B. Paulmier.

Dans la thèse de Prince Mengue, commencée en Novembre 2018, il est proposé une approche radicalement différente : la réalisation de capteurs directement sur des pièces métalliques industrielles. Ainsi, après une étape de polissage mécano-chimique, il a été possible de déposer des couches de ZnO et réaliser des SAW sur des pièces de Dural, titane et acier inox... issues de notre atelier de mécanique, ce qui prouve que cette approche est compatible avec des pièces industrielles.

- Les couches piézoélectriques de quelques micromètres étant déposées directement sur la pièce,
- le collage (et les inconvénients associés) disparaissent
  - le capteur en lui-même fait à peine quelques micromètres d'épaisseur, ce qu'on peut qualifier d'ultrafin.
  - le dispositif est compatible avec la montée en température

Les premiers résultats sont prometteurs (cf Figure 56) et une partie a déjà été valorisée dans le proceeding [P17]. Les travaux prévus, et pour certains bien avancés, visent à améliorer les performances des dispositifs sur métal (résonateur, lignes à retard), réaliser des mesures de température et de déformation ainsi qu'à la réalisation de dispositifs à ondes confinées sans fil sur cette base technologique.

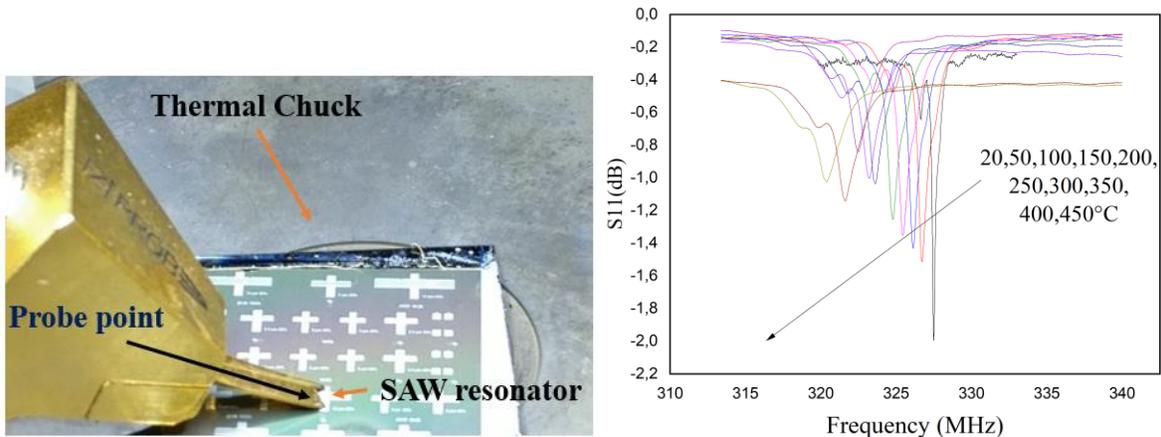


Figure 56 : Dispositif SAW Al/ZnO/Ti et son coefficient de réflexion en fonction de la température de 20° à 450 °C

<sup>60</sup> P. Nicolay, J. Bardong, H. Chambon and P. Dufilié, "Glue-Less and Robust Assembly Method for SAW Strain Sensors," 2018 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS) pp.1-4, 22-25 Oct. 2018

## 2. Une activité transverse : les antennes

Dans mes activités futures, je continuerai à travailler sur la thématique des antennes et des télétransmissions, une compétence unique à l'IJL et dans le groupe MNS. Ces développements seront d'ordre à la fois théoriques – en modélisation éléments finis – et expérimentaux. Cette activité pourra trouver toute son ampleur avec l'acquisition à l'Institut Jean Lamour d'une chambre anéchoïde, actuellement en fin d'installation (Figure 57). Cette équipement de taille (6x5x3m !) permettra :

- de mesurer le rayonnement d'antennes dans la bande (400 MHz-18GHz, voire plus) et de valider les développements théoriques prévus ci-dessous
- de caractériser nos capteurs sans fil dans un environnement stable électromagnétiquement

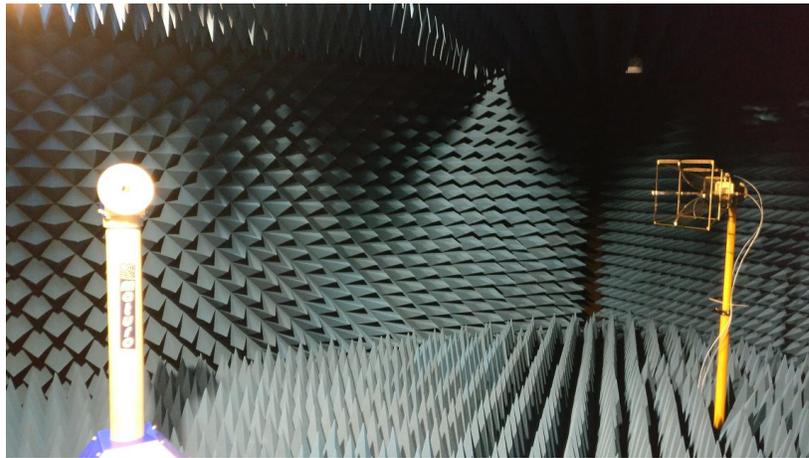


Figure 57 : Chambre anéchoïde de l'Institut Jean Lamour

Pour soutenir cette activité, le post-doctorat du spécialiste d'antenne Tony Makdissy, commencé en Novembre 2020, permettra d'avancer sur les développements suivants :

### 1. Antennes sur le corps humain

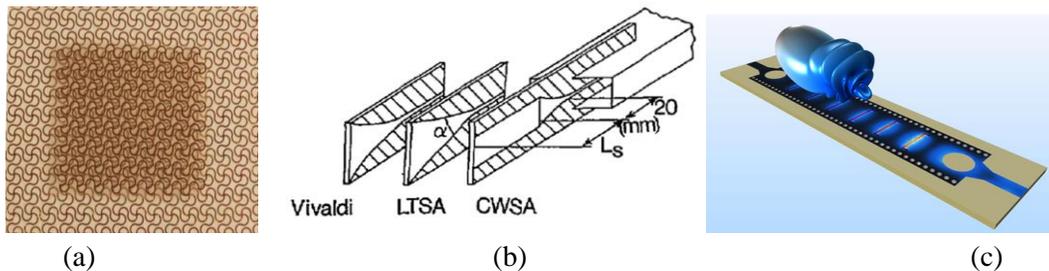


Figure 58: (a) Antenne patch microruban étirable <sup>61</sup> (b) Antennes à ondes progressives <sup>62</sup> (c) Antenne SIW à fentes <sup>63</sup>

<sup>61</sup> S Hage-Ali, unpublished results

<sup>62</sup> D. Schaubert, E. Kollberg, T. Korzeniowski, T. Thungren, J. Johansson and K. Yngvesson, "Endfire tapered slot antennas on dielectric substrates," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 33, no. 12, pp.1392-1400, Dec 1985

<sup>63</sup> <https://www.comsol.com/model/substrate-integrated-waveguide-leaky-wave-antenna-16021>

Les antennes dipôles imprimées directement sur la peau, présentées [section D.6](#), sont étirables, mais présentent un gain faible.

Pour aborder ce problème, l'idée ici est de découpler les ondes électromagnétiques du corps humain. Différentes approches seront étudiées, impliquant des antennes patch ou PIFA compactes, des antennes à ondes progressives ou des antennes SIW (Figure 58). La réduction de taille pourra être obtenue par charge d'élastomères par des poudres diélectriques.

Ces concepts seront adaptés au format « étirable », étudiés numériquement et expérimentalement et testés en combinaison avec des capteurs SAW sans fil passifs développés dans notre équipe

## 2. Antennes pour applications industrielles.

Les environnements industriels peuvent être difficiles pour les capteurs sans fil qui doivent monitorer leur bon fonctionnement. Chaleur, poussière, graisse, pièces métalliques, contraintes d'espace importantes, corrosion, pièces rotatives peuvent faire partie de l'équation et impacter antennes et télétransmissions.

L'antenne doit être conçue pour présenter les performances nécessaires, notamment en gain et en directivité, afin de permettre une communication à distance tout en s'adaptant à la pièce sous test et à ses propriétés électriques et mécaniques. Les contraintes liées au métal, à l'encombrement et éventuellement à la température seront prises en compte. Des conceptions originales et spécifiques seront développées et testées, en mettant l'accent sur la conception d'antennes « insensibles au placement », et aux contraintes d'intégration avec nos capteurs sans fil, sans batterie et sans emballage.

Ces différentes sous-parties, liées à des projets en cours, seront notamment étudiées :

- Les capteurs intégrés directement sur métal développés par Prince Mengue, présentent des challenges spécifiques : les antennes à résonateur diélectriques, ne nécessitant pas forcément d'interconnexions seront considérées avec une grande attention.<sup>64</sup>
- Les antennes PIFA décrites [section D.5.4](#) devront pouvoir résister à la température et pouvoir être intégrées facilement avec nos capteurs SAW.
- Les antennes pour des mesures industrielles en milieu rotatif seront nécessaires pour certains projets.
- En terme d'intégration, le couplage capacitif des SAW<sup>65</sup> permettra d'éliminer pour éliminer les wire-bonding dans certains cas.

---

<sup>64</sup> S. Keyrouz and D. Caratelli, "Dielectric Resonator Antennas: Basic Concepts, Design Guidelines, and Recent Developments at Millimeter-Wave Frequencies," International Journal of Antennas and Propagation, 27-Oct-2016. [Online]. Available: <https://www.hindawi.com/journals/ijap/2016/6075680/>

<sup>65</sup> S. C. Moulzolf, R. Behanan, T. Pollard, R. J. Lad and M. P. da Cunha, IEEE Ultrasonics Symposium, pp.255-258, 2013

### 3. Plateforme multi-capteurs pour l'électronique sur peau

A la suite de 13 années de recherche avec le fil conducteur de l'électronique souple, mon intérêt pour cette thématique de recherche n'a pas faibli. Je souhaite encore amplifier ces travaux en démarrant de nouvelles activités, tout en capitalisant sur les résultats acquis.

Le but de mon activité sur cette partie (matérialisée par le dépôt d'une candidature à l'IUF Junior) sera de développer une plateforme multifonctionnelle et multi-capteurs pour l'électronique sur peau (« epidermal electronics ») combinant 4 classes de capteurs :

- Des capteurs SAW sans fil sur base POI

Si de nombreuses avancées ont été obtenues dans le cadre des thèses de Cécile Floer et Harshad Mishra, beaucoup de recherches reste à effectuer. Ici les substrats POI offrent la possibilité d'obtenir des dispositifs de type lignes à retard réfléchives de haute performance et des potentialités d'amincissement.

- Impédancemétrie LC à couplage inductif

L'impédancemétrie, à l'instar des dispositifs LC développés dans [R6] permettent dans le cadre de l'électronique sur peau un grand nombre de mesure : constante diélectrique de la peau pour mesure de l'hydratation / détection des nécroses, contraintes locales ou analyses chimiques de la sueur. Ici les développements porteront sur le développement de nouvelles couches sensibles à base de nanomatériaux et de nouveaux élastomères pour une meilleure sensibilité

- Chipless RFID

Si les capteurs SAW offrent de nombreuses possibilités dans le cadre de l'électronique sur peau, il reste deux inconvénients incompressibles :

- les antennes sont relativement encombrantes, même à 2.45 GHz
- les dispositifs, d'épaisseur  $\sim 70\mu\text{m}$  n'atteignent pas la finesse ultime de ce format

Alors, les dispositifs de type « Chipless RFID »<sup>66,67</sup> couplés à différents types d'interrogation possible, permettent une montée en fréquence et donc un gain de compacité, de confort et ... plus de puce !

- Photopléthysmographie

Enfin, je souhaite développer une nouvelle activité sur la « Photopléthysmographie » (PPG), une technique de mesure optique de la peau qui permet de mesurer le rythme cardiaque, l'oxymétrie et autres en collaboration avec les spécialistes de la technique à NCTU Taiwan (groupe de Paul Chao). J'interviendrai sur la réduction des artefacts de mouvement obtenus grâce à une transition au format étirable, et sur les liaisons sans fil. Cette partie fait actuellement l'objet d'un dépôt d'ANRI (PPG Stretch)

---

<sup>66</sup> D. Girbau, Á. Ramos, A. Lazaro, S. Rima and R. Villarino, "Passive Wireless Temperature Sensor Based on Time-Coded UWB Chipless RFID Tags," in IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 60, no. 11, pp. 3623-3632, Nov. 2012, doi: 10.1109/TMTT.2012.2213838.

<sup>67</sup> S. Tedjini, N. Karmakar, E. Perret, A. Vena, R. Koswatta and R. E-Azim, "Hold the Chips: Chipless Technology, an Alternative Technique for RFID," in IEEE Microwave Magazine, vol. 14, no. 5, pp. 56-65, July-Aug. 2013, doi: 10.1109/MMM.2013.2259393.

## F. Liste des encadrements de doctorat et de master

### 1. Thèses de doctorat

#### (a) Soutenues

Thèse de Cécile FLOER - 01/10/2016 au 19/11/2019	
Titre	Capteurs à ondes élastiques confinées, sans fil et étirables : application à l'électronique imperceptible sur peau
Co-encadrement	S. Hage-Ali (50%) O. Elmazria (50%)
Financement	DGA 100%

Thèse d'Harshad MISHRA - 01/10/2016 au 17/09/2019	
Titre	Capteur de champ magnétique basé sur des dispositifs à ondes acoustiques de surface magnéto-élastiques microstructurées
Co-encadrement	S. Hage-Ali (50%) O. Elmazria (50%)
Financement	ISITE Lorraine Université d'Excellence 100 %

#### (b) En cours

Thèse de Prince Warel MENGUE M'OWONO - 01/11/2018 au 31/10/2021	
Titre	Etude et réalisation d'une plateforme de capteurs multifonctionnels à Ondes élastiques de surface à base de structures multicouches.
Co-encadrement	S. Hage-Ali (50%) O. Elmazria (50%)
Financement	Campus France Gabon

Thèse de Prince Baptiste Paulmier - 01/10/2019 au 30/09/2022	
Titre	Microcapteurs ultrafins, passifs, sans fil et sans batterie pour les environnements industriels, aérospatiaux & défense
Co-encadrement	S. Hage-Ali (50%) O. Elmazria (50%)
Financement	DGA(50 %) / IJL(50%)

## 2. Masters 2 / 5A Ecole d'Ingénieur

Stage de master d' Hamza MERSNI - 01/02/2015 au 01/07/2015	
Titre	Potentiel de l'hétérostructure Saphir/GaN/Alumine pour les applications SAW à hautes températures
Co-encadrement	S. Hage-Ali (50%) T. Aubert (50%)

Stage de master de Moïse DEROH - 01/02/2016 au 01/07/2016	
Titre	Couche passivante d'alumine Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : synthèse, caractérisations et intégration à des dispositifs SAW et WLAW pour les hautes températures
Co-encadrement	S. Hage-Ali (50%) T. Aubert (50%)

Stage de 5ème année Ingénieur EEIGM de Clément BARBOT - 01/09/2018 au 31/12/2018	
Titre	Optimisation de dépôt de ZnO sur des substrats de LiNbO <sub>3</sub> par pulvérisation cathodique RF pour applications capteurs acoustiques
Co-encadrement	S. Hage-Ali (100 %)

Stage de M2 EEA CIM Louis Verzellesi - 01/04/2019 au 31/09/2019	
Titre	NOUVEAUX CONCEPTS D'ANTENNES POUR APPLICATIONS AVANCEES DE CAPTEURS SANS FIL EN MILIEU PERTURBE
Co-encadrement	S. Hage-Ali (50 %), Cécile Floer (50%)

## G. Liste des publications et communications

<https://scholar.google.fr/citations?user=ubNrSskAAAAAJ>

[Texte des publications dans HAL](#)

### **Mémoire de doctorat**

"Antennes et dispositifs hyperfréquences millimétriques ultrasouples reconfigurables à base de Microsystèmes Magnéto-Electro-Mécaniques (MMEMS) : Conception, réalisation, mesures", Doctorat préparé à l'École Centrale de Lille, spécialité Micro et Nanotechnologies, Acoustique et Télécommunications (Thèse soutenue le 30 Septembre 2011). Manuscrit accessible à l'adresse : <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00638181>

### **Reuves internationales à comité de lecture**

[R25] Y. Yang, H. Mishra, T. Han, **S. Hage-Ali**, M. Hehn and O. Elmazria, "Sensing Mechanism of Surface Acoustic Wave Magnetic Field Sensors Based on Magnetostrictive Materials" submitted to IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control

[R24] H. Hallil, C. Dejous, **S. Hage-Ali**, O. Elmazria, J. Rossignol, D. Stuerga, A. Talbi, A. Mazzamurro, P. Joubert, and E. Lefevre, "Passive resonant sensors: trends and future prospects", submitted to IEEE Sensors Journal

[R23] C. Floer, O. Elmazria, N. Naumenko, F. Bartoli, J. Ghanbaja, T. Aubert and **S. Hage-Ali**, "AlN/Pt/LN-Y128 packageless acoustic wave temperature sensor," IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control, accepted with minor revisions

[R22] F. Bartoli, J. Streque, J. Ghanbaja, P. Pigeat, P. Boulet, **S. Hage-Ali**, N. Naumenko, A. Redjaïmia, T. Aubert, and O. Elmazria, "Epitaxial Growth of Sc<sub>0.09</sub>Al<sub>0.91</sub>N and Sc<sub>0.18</sub>Al<sub>0.82</sub>N Thin Films on Sapphire Substrates by Magnetron Sputtering for Surface Acoustic Waves Applications," *Sensors*, vol. 20, no. 16, p. 4630, 2020. <https://doi.org/10.3390/s20164630>

[R21] J. C. Asseko Ondo, E. J. J. Blampain, G. N'Tchayi Mbourou, S. Mc Murtry, **S. Hage-Ali**, and O. Elmazria, "FEM Modeling of the Temperature Influence on the Performance of SAW Sensors Operating at GigaHertz Frequency Range and at High Temperature Up to 500 °C," *Sensors*, vol. 20, no. 15, p. 4166, 2020. <https://doi.org/10.3390/s20154166>

[R20] H. Mishra, M. Hehn, **S. Hage-Ali**, S. Petit-Watelot, P. W. Mengue, S. Zghoon, H. M'Jahed, D. Lacour, and O. Elmazria, "Microstructured Multilayered Surface-Acoustic-Wave Device for Multifunctional Sensing," *Phys. Rev. Appl.*, vol. 14, no. 1, p. 14053, Jul. 2020. <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.14.014053>

[R19] Y. Yang, H. Mishra, P. Mengue, **S. Hage-Ali**, S. Petit-Watelot, D. Lacour, M. Hehn, H. M'Jahed, T. Han, and O. Elmazria, "Enhanced Performance Love Wave Magnetic Field Sensors with Temperature Compensation," *IEEE Sens. J.*, vol. 20, no. 19, pp. 11292–11301, Oct. 2020. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.2998826>

[R18] J. Streque, J. Camus, T. Laroche, **S. Hage-Ali**, H. M'Jahed, M. Rammal, T. Aubert, M. A. Djouadi, S. Ballandras, and O. Elmazria, "Design and characterization of high-Q SAW resonators based on the AlN/Sapphire structure intended for high-temperature wireless sensor applications", *IEEE Sens. J.*, vol. 20, n°13, pp. 6985-6991, 2020. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.2978179>

- [R17] H. Mishra, J. Streque, M. Hehn, P. Mengue, H. Mjahed, D. Lacour, K. Dumesnil, S. Petit-Watelot, S. Zhgoon, V. Polewczyk, A. Mazzamurro, A. Talbi, **S. Hage-Ali**, and O. Elmazria, "Temperature compensated magnetic field sensor based on love waves," *Smart Mater. Struct.*, vol. 29, no. 4, pp.045036, 2020 <https://doi.org/10.1088/1361-665X/ab7857>
- [R16] C. Floer, **S. Hage-Ali**, P. Nicolay, H. Chambon, S. Zhgoon, A. Shvetsov, J. Streque, H. M'Jahed, and O. Elmazria, "SAW RFID devices using connected IDTs as an alternative to conventional reflectors for harsh environments," *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, vol. 67, no. 6, pp.1267-1274, 2020 <https://doi.org/10.1109/TUFFC.2019.2943310>
- [R15] Y. Yang, H. Mishra, Q. Zhang, **S. Hage-Ali**, T. Han, and O. Elmazria, "A Weak Form Nonlinear Model for Thermal Sensitivity of Love Wave Mode on Layered Structures," *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, vol. 67, no. 6, pp. 1275 - 1283, 2020 <https://doi.org/10.1109/TUFFC.2020.2968007>
- [R14] H. Mishra, M. Hehn, D. Lacour, O. Elmazria, N. Tiercelin, H. Mjahed, K. Dumesnil, S. Petit Watelot, V. Polewczyk, A. Talbi, O. Bou Matar, and **S. Hage-Ali**, "Intrinsic versus shape anisotropy in micro-structured magnetostrictive thin films for magnetic surface acoustic wave sensors," *Smart Mater. Struct.*, vol. 28, no. 12, pp.12LT01, 2019 <https://doi.org/10.1088/1361-665X/ab522d>
- [R13] J. Streque, T. Aubert, N. Kokanyan, F. Bartoli, A. Taguett, V. Polewczyk, E. Kokanyan, **S. Hage-Ali**, P. Boulet, and O. Elmazria, "Stoichiometric Lithium Niobate Crystals: Towards Identifiable Wireless Surface Acoustic Wave Sensors Operable up to 600°C," *IEEE Sensors Letters*, vol. 3, no. 4, pp.1-4, April 2019 <https://doi.org/10.1109/LENS.2019.2908691>
- [R12] F. Bartoli, T. Aubert, M. Moutaouekkil, J. Streque, P. Pigeat, S. Zhgoon, A. Talbi, **S. Hage-Ali**, H. M'Jahed, and O. Elmazria, "AlN/GaN/Sapphire heterostructure for high-temperature packageless acoustic wave devices," *Sens. Actuators, A*, vol. 283, pp 9-16, 2018 <https://doi.org/10.1016/j.sna.2018.08.011>
- [R11] D. Dekkar, F. Bénédict, C. Floer, **S. Hage-Ali**, O. Brinza, J. Achard, and O. Elmazria, "Study of Low Temperature Deposition of Nanocrystalline Diamond Films on ZnO/LiNbO<sub>3</sub> Layered Structures Suitable for Waveguiding Layer Acoustic Wave Devices," *Phys. Status Solidi A*, vol. 215, no. 22, pp.1800251, 2018 <https://doi.org/10.1002/pssa.201800251>
- [R10] C. Floer, **S. Hage-Ali**, S. Zhgoon, M. Moutaouekkil, F. Bartoli, H. Mishra, S. M. Murtry, P. Pigeat, T. Aubert, O. B. Matar, A. Talbi and O. Elmazria, "AlN/ZnO/LiNbO<sub>3</sub> Packageless Structure as a Low-Profile Sensor for Potential On-Body Applications," *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, vol. 65, no. 10, pp.1925-1932, Oct. 2018 <https://doi.org/10.1109/TUFFC.2018.2839262>
- [R9] C. Thevenot, B. Vincent, **S. Hage-Ali**, S. Thomas, and D. Rouxel, "Dynamic light scattering study of the ultrasonication of P(VDF-TrFE): A new model," *Int. J. Polym. Anal. Charact.*, vol. 22, no. 7, pp.649-658, 2017 <https://doi.org/10.1080/1023666X.2017.1362926>
- [R8] V. Polewczyk, K. Dumesnil, D. Lacour, M. Moutaouekkil, H. Mjahed, N. Tiercelin, S. Petit Watelot, H. Mishra, Y. Dusch, **S. Hage-Ali**, O. Elmazria, F. Montaigne, A. Talbi, Olivier Bou Matar, and M. Hehn, "High field unipolar and bipolar magnetic field sensors based on Surface Acoustic Wave resonators", *Phys. Rev. Appl.*, vol. 8, pp.024001, 2017 <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.8.024001>
- [R7] M. Elhosni, O. Elmazria, S. Petit-Watelot, L. Bouvot, S. Zhgoon, A. Talbi, M. Hehn, K. A. Aissa, **S. Hage-Ali**, D. Lacour, F. Sarry, and O. Boumatar, "Magnetic field SAW sensors based on magnetostrictive-piezoelectric layered structures: FEM modeling and experimental validation," *Sens. Actuators, A*, vol. 240, pp.41-49, 2016 <https://doi.org/10.1016/j.sna.2015.10.031>

[R6] X. Huang, Y. Liu, H. Cheng, W.-J. Shin, J. A. Fan, Z. Liu, C.-J. Lu, G.-W. Kong, K. Chen, D. Patnaik, S.-H. Lee, **S. Hage-Ali**, Y. Huang, and J. A. Rogers, “Materials and Designs for Wireless Epidermal Sensors of Hydration and Strain,” *Adv. Funct. Mater.*, vol. 24, no. 25, pp. 3846-3854, 2014 <https://doi.org/10.1002/adfm.201303886>

[R5] S.-W. Hwang, X. Huang, J.-H. Seo, J.-K. Song, S. Kim, **S. Hage-Ali**, H.-J. Chung, H. Tao, F. G. Omenetto, Z. Ma, and J. A. Rogers, “Materials for Bioresorbable Radio Frequency Electronics,” *Adv. Mater.*, vol. 25, no. 26, pp. 3526-3531, 2013 <https://doi.org/10.1002/adma.201300920>

[R4] Y. Dusch, N. Tiercelin, A. Klimov, V. Rudenko, Y. Ignatov, **S. Hage-Ali**, P. Pernod, and V. Preobrazhensky, “Giant magnetostrictive nanostructured films with auto induced spin reorientation transition,” *Nanomaterialy i nanostruktury XXI vek.*, vol. 1, pp. 35–41, 2011. <https://elibrary.ru/item.asp?id=16220260>

[R3] Y. Dusch, N. Tiercelin, A. Klimov, V. Rudenko, Y. Ignatov, **S. Hage-Ali**, P. Pernod, and V. Preobrazhensky, “Patterned L1<sub>0</sub>-FePt for polarization of magnetic films,” *J. Appl. Phys.*, AIP, vol. 109, no. 7, pp. 07A720, 2011 <https://doi.org/10.1063/1.3561172>

[R2] **S. Hage-Ali**, N. Tiercelin, P. Coquet, R. Sauleau, V. Preobrazhensky, and P. Pernod, “A Millimeter-Wave Inflatable Frequency Agile Elastomeric Antenna,” *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol.9, pp. 1131-1134, 2010 <https://doi.org/10.1109/LAWP.2010.2096405>

[R1] **S. Hage-Ali**, N. Tiercelin, P. Coquet, R. Sauleau, H. Fujita, V. Preobrazhensky, and P. Pernod, “A Millimeter-Wave Microstrip Antenna Array on Ultra-Flexible Micromachined Polydimethylsiloxane (PDMS) Polymer,” *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 8, pp. 1306-1309, 2009 <https://doi.org/10.1109/LAWP.2009.2037590>

## **Publications pédagogiques**

[PP1] **S. Hage-Ali**, M. Oudich, J. Claudel, J. Strèque, E. Tisserand, J. Mainka, D. Rouxel, C. Floer, O. Elmazria, M. Hehn, F. Weinachter, S. Weber, “Microsystèmes communicants : modélisation, fabrication et mesures,” *J3eA*, vol. 18, 2019, hors-série 1, <https://doi.org/10.1051/j3ea/20191007>

## **Brevets**

[B1] **S. Hage-Ali**, N. Tiercelin, P. Coquet, R. Sauleau, V. Preobrazhensky, and P. Pernod, “Dispositif hyperfréquences reconfigurable à membrane déformable,” Brevet FR2955319, 15 Jan. 2010.

## **Conférences invitées**

[I6] **S. Hage-Ali**, C. Floer, Prince Mengue and O. Elmazria, “Surface acoustic wave sensors for industrial and biomedical applications”, *GMC-ElecEng conference*, Valencia, Spain, Sept 2020 (**keynote**)

[I5] **S. Hage-Ali**, C. Floer and O. Elmazria, “Skin-printed wireless SAW sensors for biomedical applications”, *IEEE International Conference on Sensors and Nanotechnology*, July 2019, Penang, Malaysia

[I4] **S. Hage-Ali**, C. Floer, H. Mishra, J. Streque, F. Bartoli, S. Zhgoon, S. Mc Murtry, H. M’Jahed, T. Aubert, P. Pigeat and O. Elmazria, “Tattooed surface acoustic wave sensors for wireless, passive and imperceptible “e-skin” applications”, *Nanomaterials conference*, 24-28 Sept 2018, Nancy

[I3] **O. Elmazria**, **S. Hage-Ali**, C. Floer, Florian Bartoli, Sergei Zhgoon and T. Aubert, “Surface Acoustic Waves Technology as 3less sensors: Wireless, Batteryless & Packageless”, *Sensors and Actuator congress*, Stockholm, Sweden, Sept 2018

[I2] **S. Hage-Ali**, “Microsystèmes RF ultrasouples pour la santé”, Journée scientifique de la priorité 6 de l’IJL Matériaux et vivant, Nancy, 13 Novembre 2014

[I1] **S. Hage-Ali**, Y. Orlic, N. Tiercelin, R. Sauleau, P. Pernod, V. Preobrazhenski and P. Coquet, “Millimeter-Wave Elastomeric Antennas,” *ADVANCED ELECTROMAGNETICS SYMPOSIUM, AES 2012*, 16-19 avril 2012, Paris, France

### **Conférences internationales avec actes**

[P19] A. Merkulov, A. Shvetsov, S. Zhgoon, B. Paulmier, **S. Hage-Ali**, and O. Elmazria, “Peculiarities of Wireless Interrogation of SAW-Resonator Vibration Sensor by RF Pulse-Signal”, *IEEE Ultrasonics Symposium 2020*, Las Vegas, Sept. 2020, poster

[P18] H. Mishra, M. Hehn, **S. Hage-Ali**, S. Petit-Watelot, P. W. Mengue, S. Zhgoon, H. M’Jahed, D. Lacour, and O. Elmazria, “Multifunctional sensor (Magnetic field and temperature) based on Micro-structured and multilayered SAW device,” *IEEE Ultrasonics Symposium 2020*, Las Vegas, Sept. 2020, poster

[P17] P. Mengue, **S. Hage-Ali**, O. Elmazria, and S. Zhgoon, “SAW Sensors Directly Integrated onto Industrial Metallic Parts for Manufacturing 4.0,” in 2020 IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 IoT, 2020, pp. 158–161, oral <https://doi.org/10.1109/MetroInd4.0IoT48571.2020.9138176>

[P16] C. Floer, **S. Hage-Ali**, S. Zhgoon, L. Verzellesi, L. Badie and O. Elmazria, “Wireless stretchable SAW sensors based on Z-cut lithium niobate,” *IEEE SENSORS 2019*, Montréal, Nov. 2019, oral. <https://doi.org/10.1109/SENSORS43011.2019.8956784>

[P15] C. Floer, S. Hage-Ali, P. Nicolay, H. Chambon, S. Zhgoon, A. Shvetsov, J. Streque, H. M’Jahed and O. Elmazria, “SAW RFID devices using connected IDTs as an alternative to conventional reflectors for harsh environments,” *2019 Joint Conference of the IEEE International Frequency Control Symposium and European Frequency and Time Forum (IFCS-EFTF)*, Orlando, 2019, oral. <https://doi.org/10.1109/FCS.2019.8856146>

[P14] C. Floer, M. Moutaouekkil, F. Bartoli, H. Mishra, S. M. Murtry, **S. Hage-Ali**, O. Elmazria, D. Dekkar, B. Baudrillart, F. Bénédic, S. Zhgoon, A. Talbi, O. B. Matar, F. Bartoli and T. Aubert, “Diamond/ZnO/LiNbO<sub>3</sub> structure for packageless acoustic wave sensors,” *IEEE SENSORS 2017*, pp.1-3, Oct. 30 -Nov. 2 2017, poster <https://doi.org/10.1109/ICSENS.2017.8234393>

[P13] H. Mishra, V. Polewczyk, M. Hehn, M. Moutaouekkil, C. Floer, K. Dumesnil, D. Lacour, S. Petit Watelot, H. M’jahed, **S. Hage-Ali**, N. Tiercelin, Y. Dusch, A. Talbi, O. Bou Matar, O. Elmazria, “Control of the magnetic response in magnetic field SAW sensors,” *IEEE SENSORS 2017*, pp.1-3, Oct. 30 -Nov. 2 2017, poster <https://doi.org/10.1109/ICSENS.2017.8233971>

[P12] F. Bartoli, M. Moutaouekkil, J. Streque, P. Pigeat, **S. Hage-Ali**, P. Boulet, H. M’Jahed, F., T. Aubert, Sergei Zhgoon, O. Bou Matar, A. Talbi and O. Elmazria, “Theoretical and experimental study of ScAlN/Sapphire structure based SAW sensor”, *IEEE SENSORS 2017*, pp.1-3, Oct. 30 -Nov. 2 2017, oral <https://doi.org/10.1109/ICSENS.2017.8233938>

[P11] C. Floer, M. Moutaouekkil, F. Bartoli, H. Mishra, **S. Hage-Ali**, S. Mc Murtry, P. Pigeat, T. Aubert, O. Bou Matar, A. Talbi and O. Elmazria “AlN/ZnO/LiNbO<sub>3</sub> packageless structure as a low-profile sensor for on-body applications,” *IEEE Ultrasonics Symposium 2017*, Washington, Sept. 2017, oral <https://doi.org/10.1109/ULTSYM.2017.8091765>

[P10] **S. Hage-Ali**, O. Elmazria, G. Pierson, R. Kouitat, M. Deroh, F. Bartoli, T. Aubert and A. Talbi, “Packageless acoustic wave sensors for wireless body-centric applications,” *IEEE SENSORS 2016*, pp.1-3, Oct. 30 2016-Nov. 3 2016, poster <https://doi.org/10.1109/ICSENS.2016.7808870>

- [P9] S. Zhgoon, O. Legrani, O. Elmazria, T. Aubert, M. Elhosni, H. Mersni, L. Lefevre and **S. Hage-Ali**, “Potential of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GaN/Sapphire layered structure for high temperature SAW sensors,” *2015 Symposium on Piezoelectricity, Acoustic Waves, and Device Applications (SPAWDA)*, pp.106-110, Oct. 30 2015-Nov. 2 2015, Jinan, China, oral <https://doi.org/10.1109/SPAWDA.2015.7364451>
- [P8] M. Elhosni, S. Petit-Watelot, M. Hehn, **S. Hage-Ali**, K. A. Aissa, D. Lacour, A. Talbi and O. Elmazria, “Experimental Study of Multilayer Piezo-magnetic SAW Delay Line for Magnetic Sensor,” *Procedia Engineering, Eurosensors 2015*, vol. 120, pp.870-873, 2015, poster <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.743>
- [P7] S. Pacchini, **S. Hage-Ali**, A. Togonal, N. Tiercelin, P. Pernod and P. Coquet, “Inkjet-printed elastomeric millimeter-wave devices,” *2014 44th Microwave Conference (EuMC)*, pp.13-16, 6-9 Oct. 2014, Rome, oral <https://doi.org/10.1109/EuMC.2014.6986357>
- [P6] **S. Hage-Ali**, Y. Orlic, N. Tiercelin, R. Sauleau, P. Pernod, V. Preobrazhenski and P. Coquet, “A Millimeter-Wave Elastomeric Microstrip Phase Shifter,” *Proceedings of 60th IEEE MTT-S International Microwave Symposium, IMS 2012*, Montréal, QC, Canada, June 17-22, 2012, 1-3, oral <https://doi.org/10.1109/MWSYM.2012.6259722>
- [P5] **S. Hage-Ali**, N. Tiercelin, F. Lapiere, Y. Orlic, M. Harnois, V. Thomy, V. Preobrazhensky, P. Pernod, and P. Coquet, “An EWOD driven millimeter-wave phase shifter using a movable ultrasoft metalized PDMS ground plane,” in *The 16th International Conference on Solid State Sensors, Actuators and Microsystems TRANSDUCERS 2011*, Beijing, China, June 2011, 522-525, poster <https://doi.org/10.1109/TRANSDUCERS.2011.5969671>
- [P4] **S. Hage-Ali**, N. Tiercelin, P. Coquet, R. Sauleau, V. Preobrazhensky, and P. Pernod, “A Millimeter-Wave Frequency Tunable Microstrip Antenna on Ultra flexible PDMS substrate,” in *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium APSURSI*, pp. 1-4, Toronto, 2010, oral <https://doi.org/10.1109/APS.2010.5561288>
- [P3] **S. Hage-Ali**, N. Tiercelin, P. Coquet, R. Sauleau, L. Le Coq, H. Fujita, V. Preobrazhensky, and P. Pernod, “Millimeter-wave Printed Antennas on Ultrasoft Polymer Substrate,” in *Proceedings of the Fourth European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, pp.1-5, Barcelona, 2010, oral, ISSN: 2164-3342
- [P2] **S. Hage-Ali**, N. Tiercelin, P. Coquet, R. Sauleau, V. Preobrazhensky, and P. Pernod, “Millimeter-wave patch array antenna on ultra flexible micromachined Polydimethylsiloxane (PDMS) substrate,” in *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium APSURSI '09*, pp. 1-4, Charleston, 2009, poster. <https://doi.org/10.1109/APS.2009.5171486> **Honorable mention from Student Paper Contest**
- [P1] A. Marteau, **S. Hage-Ali**, E. Lheurette, X. Mélique, O. Vanbésien, and D. Lippens, “Metamaterial-based surface for negative refraction and lensing”, *Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Student Seminar on Microwave Applications of Novel Physical Phenomena*, St. Petersburg Electrotechnical University “LETI”, St Petersburg, Russia, October 17-19, 2005, pp23-25, oral

### **Conférences internationales sans acte**

- [CI18] J. Maufay, T. Aubert, N. Kokanyan, C. Floer, **S. Hage-Ali** and O. Elmazria, “Investigation of the Limit Operating Temperature of LiNbO<sub>3</sub> As Substrate for SAW Devices,” *IEEE Ultrasonics Symposium 2020*, Las Vegas, Sept. 2020, poster
- [CI17] C. Floer, J. Maufay, **S. Hage-Ali**, P. Nicolay, T. Aubert, S. Zhgoon and O. Elmazria, “Towards a 915MHz High-Temperature Reflective Delay Line SAW Sensor,” *IEEE Ultrasonics Symposium 2020*, Las Vegas, Sept. 2020, poster
- [CI16] C. Floer, N. Naumenko, **S. Hage-Ali** and O. Elmazria, “AlN/Cu(IDTs)/LNY128 bilayer structure for SAW packageless devices,” *2019 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS)*, Glasgow, 2019, poster.

- [CI15] F. Bartoli, N. Naumenko, P. Pigeat, T. Aubert, J. Streque, J. Ghanbaja, P. Boulet, S. Robert, C. Floer, **S. Hage-Ali** and O. Elmazria, “Numerical and experimental investigations of higher order modes on  $\text{Sc}_x\text{Al}_{(1-x)}\text{N}$ /Sapphire structure for high-temperature SAW applications,” *2019 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS)*, Glasgow, 2019, poster.
- [CI14] J. Streque, M.-A. Soussou, F. Bartoli, **S. Hage-Ali**, T. Aubert, T. Mazingue, M. Lomello, O. Elmazria, “Study of  $\text{Cr}_5\text{Si}_3$  Electrodes on Langasite Surface Acoustic Wave Resonators for High Temperature Sensing,” *2018 IEEE International Ultrasonics Symposium*, Oct. 22-25 2018, Kobe, Japan, poster
- [CI13] F. Bartoli, J. Streque, M. Moutaouekkil, T. Aubert, P. Pigeat, Jaafar Ghanbaja, S. Robert, **S. Hage-Ali** and O. Elmazria, “Experimental observation of high-velocity surface acoustic wave (HVSAW) on highly-textured  $\text{ScAlN}$ /Sapphire bilayer structure. Application to high frequency devices,” *2018 IEEE International Ultrasonics Symposium*, Oct. 22-25 2018, Kobe, Japan, poster
- [CI12] H. Mishra, M. Moutaouekkil, **S. Hage-Ali**, V. Polewczyk, S. Petit-Watelot, K. Dumesnil, D. Lacour, M. Hehn, O. Elmazria, N. Tiercelin, A. Talbi, O. Bou Matar, “Shape effects and response to an applied magnetic field in ( $\text{TbCo}_2/\text{FeCo}$ ) multilayer-based SAW resonators,” *2018 IEEE International Ultrasonics Symposium*, Oct. 22-25 2018, Kobe, Japan, poster
- [CI11] C. Floer, **S. Hage-Ali**, J. Streque, F. Bartoli, S. Zhgoon, S. Mc Murtry, T. Aubert and O. Elmazria, “SAW based wireless flexible temperature sensors for on-body applications,” *2018 IEEE International Ultrasonics Symposium*, Oct. 22-25 2018, Kobe, Japan, oral
- [CI10] J. Streque, J. Camus, T. Laroche, F. Bartoli, **S. Hage-Ali**, T. Aubert, A. Djouadi, S. Ballandras, O. Elmazria, “High Quality Factor SAW Resonators Based on Al /  $\text{AlN}$  / Sapphire for High Temperature Wireless Applications,” *2018 IEEE International Ultrasonics Symposium*, Oct. 22-25 2018, Kobe, Japan, oral
- [CI9] V. Polewczyk, K. Dumesnil, S. Petit-Watelot, D. Lacour, M. Hehn, M. Moutaouekkil, H. Mjahed, H. Mishra, **S. Hage-Ali**, O. Elmazria, N. Tiercelin, Y. Dusch, A. Talbi, O. Bou Matar, “Magnetic sensors based on surface acoustic wave resonators,” *M-SNOWS 2018*, Nancy, Sept 2018
- [CI8] K. Dumesnil, V. Polewczyk, S. Petit-Watelot, D. Lacour, M. Hehn, M. Moutaouekkil, H. Mjahed, H. Mishra, **S. Hage-Ali**, O. Elmazria, N. Tiercelin, Y. Dusch, A. Talbi, O. Bou Matar, Magnetic sensors based on surface acoustic wave resonators, *ICM 2018*, San Francisco, July 2018
- [CI7] C. Floer, **S. Hage-Ali**, S. Zhgoon, P. Nicolay, N. Naumenko, O. Elmazria, “ $\text{AlN}/\text{ZnO}/\text{LiNbO}_3$  as a promising multilayered structure for RFID WLAW sensors,” *2018 IEEE International Frequency Control Symposium (IFCS)*, Olympic Valley, CA, USA, May 2018, poster
- [CI6] D. Dekkar, F. Bénédic, C. Floer, **S. Hage-Ali**, O. Brinza and O. Elmazria, “Low temperature deposition of nanocrystalline diamond films on  $\text{ZnO}/\text{LiNbO}_3$  substrates for Waveguiding Layer Acoustic Wave devices”, Hasselt Diamond Workshop 2018, SBDD XXIII, Hasselt, Belgium, March 2018, poster
- [CI5] K. Dumesnil, V. Polewczyk, S. Petit-Watelot, M. Moutaouekkil, H. Mjahed, H. Mishra, **S. Hage-Ali**, O. Elmazria, F. Montaigne, D. Lacour, M. Hehn, N. Tiercelin, Y. Dusch, A. Talbi, O. Bou Matar, “Magnetic sensors based on surface acoustic wave resonators”, *MMM 2017*, Pittsburgh (USA), 2017
- [CI4] H. Mishra, V. Polewczyk, M. Moutaouekkil, N. Tiercelin, C. Floer, M. Hehn, K. Dumesnil, **Sami Hage-Ali**, A. Talbi and O. Elmazria, “SAW resonators for magnetic field sensing with ( $\text{TbCo}_2/\text{FeCo}$ ) multilayered IDTs as sensitive layer”, *IEEE Ultrasonics Symposium 2017*, Washington, Sept. 2017, oral
- [CI3] M. Moutaouekkil, F. Bartoli, S. Zhgoon, T. Aubert, **S. Hage-Ali**, A. Talbi, O. Elmazria, “ $\text{AlN}/\text{GaN}/\text{Sapphire}$  as Promising Structure for Wireless, Batteryless and Packageless Acoustic Wave Sensors for High Temperature Applications,” *IEEE Ultrasonics Symposium 2017*, Washington, Sept. 2017, oral

[CI2] **S. Hage-Ali**, Y. Dusch., N. Tiercelin, P. Coquet, R. Sauleau, V. Preobrazhensky, and P. Pernod, "A frequency tunable millimeter-wave planar antenna using L1<sub>0</sub> - FePt patterned element," *55th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials*, Atlanta, Nov. 2010, oral

[CI1] Y. Dusch, N. Tiercelin, A. Klimov, V. Rudenko, Y. Ignatov, **S. Hage-Ali**, P. Pernod, and V. Preobrazhensky, "Patterned L1<sub>0</sub>-FePt for Polarization of Magnetic Films," *55th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials*, Atlanta, Nov. 2010, oral

### **Conférences nationales avec actes**

[CN4] **S. Hage-Ali**, M. Oudich, J. Claudel, J. Strèque, E. Tisserand, Julia Mainka, D. Rouxel, Cécile Floer, O. Elmazria, M. Hehn, F. Weinachter, S. Weber, "Microsystèmes communicants : modélisation, fabrication et mesures," Journées Nationales du GIP-CNFM, Saint Malo, 7-9 Novembre 2018, oral

[CN3] P.-Y. Cresson, Y. Orlic, J.-F. Legier, E. Paleczny, L. Dubois, Ph. Coquet, N. Tiercelin, **S. Hage-Ali**, Ph. Pernod, V. Preobrazhensky, T. Lasri, "Mesure de la permittivité complexe du Polydimethylsiloxane (PDMS) jusqu'à 220 GHz pour la mise en œuvre d'une électronique souple," in *13èmes Journées de Caractérisation Microondes et Matériaux*, Nantes, Mars 2013, oral

[CN2] **S. Hage-Ali**, Y. Orlic, N. Tiercelin, P. Pernod, V. Preobrazhensky and P. Coquet, "Déphaseurs millimétriques microrubans en technologie ultrasouple," in *18èmes Journées Nationales Microondes*, Paris, Mai 2012, oral

[CN1] **S. Hage-Ali**, N. Tiercelin, P. Coquet, Y. Dusch., R. Sauleau, V. Preobrazhensky, and P. Pernod, "Antennes accordables en fréquence dans la bande des 60 GHz sur substrat élastomère ultrasouple," in *17èmes Journées Nationales Microondes*, Brest, Mai 2011, oral

### **Vulgarisation**

[V1] C. Floer, S. Hage-Ali et O. Elmazria, "Les capteurs de demain seront-ils tatoués ?", The Conversation France, 29/04/2019, <https://theconversation.com/les-capteurs-de-demain-seront-ils-tatoues-115410>

### **Workshops et séminaires**

[W17] C. Floer, S. Hage-Ali and O. Elmazria, "Surface Acoustic Wave (SAW) technology as 3less sensors: wireless, batteryless and packageless," IEEE SENSORS Chapter FRANCE ANNUAL WORKSHOP, ESIREM, Dijon, June 2019, oral.

[W16] C. Floer, S. Hage-Ali and O. Elmazria, "Vers une nouvelle génération de capteurs directement tatoués sur la peau", Journée de valorisation de la recherche, Polytech Nancy, Vandoeuvre-lès-Nancy, March 2019, oral.

[W15] S. Hage-Ali, "Capteurs SAW tatoués", Séminaire à l'ICB/ ESIREM, Dijon, 17 Janvier 2019

[W14] C. Floer, S. Hage-Ali, O. Elmazria, L. Badie and G. Lengaigne, "Microfabrication in cleanroom: SAW based wireless flexible temperature sensors," Institut Jean Lamour, Nancy, France, Dec. 2018. (oral presentation)

[W13] S. Hage-Ali, "Wireless stretchable SAW devices : packageless devices and transfer-printed antennas microfabrication", Journée du Réseau des pIAteformes de Nanofabrication du Grand-Est RANGE, 11 Novembre 2018 (oral)

[W12] C. Floer, S. Hage-Ali and O. Elmazria, "AlN/ZnO/LiNbO<sub>3</sub> structure for packageless acoustic wave sensors", Séminaire de l'Ecole Doctorale EMMA, LMOPS, Metz, June 2018, poster. Best Poster Award

- [W11] C. Floer, S. Hage-Ali, M. Moutaouekkil, F. Bartoli, H. Mishra, S. Mc Murtry, P. Pigeat, T. Aubert, O. Bou Matar, A. Talbi and O. Elmazria, “Capteurs à ondes acoustiques sans fil étirables tatoués pour applications biomédicales,” Journée thématique Matériaux pour la Santé, Reims, 16 Janvier 2018, poster
- [W10] V. Polewczyk, K. Dumesnil, S. Petit-Watelot, M. Moutaouekkil, H. Mjahed, H. Mishra, **S. Hage-Ali**, O. Elmazria, F. Montaigne, D. Lacour, M. Hehn, N. Tiercelin, Y. Dusch, A. Talbi, O. Bou Matar, “Unipolar and Bipolar High-Magnetic-Field Sensors Based on Surface Acoustic Wave Resonators”, Colloque Louis Néel, Paris, 24-27 Septembre 2017
- [W9] **S. Hage-Ali**, “Elastomers in flexible electronics and wireless sensors applications,” French-Indian workshop on Polymers, nanoparticles and nanocomposites, Vandoeuvre les Nancy, 25 Septembre 2017
- [W8] **S. Hage-Ali**, “Antennes pour les capteurs sans fil”, SAWSSENS seminar series, Vandoeuvre les Nancy, Feb. 2017
- [W7] **S. Hage-Ali**, “Applications of silicone-based elastomers to flexible/stretchable radiofrequency devices and sensors”, Prof Sabu Thomas seminar series, Mahatma Gandhi University, Kottayam, India, July 2016
- [W6] **S. Hage-Ali**, “Antennes et dispositifs hyperfréquences millimétriques ultrasouples reconfigurables à base de Microsystèmes Magnéto-Electro-Mécaniques (MMEMS)”, 1er Forum Innovation DGA, CNIT la défense, 27 novembre 2012, poster
- [W5] Ph. Coquet, N. Tiercelin, **S. Hage-Ali**, Y. Orlic, V. Preobrazhensky, P. Pernod, “Reconfigurable millimeter wave planar antennas on ultra soft polymer” séminaire invité à IMT talks, 27 janvier 2012, IMT - Institut de microtechnique, EPFL, Lausanne
- [W4] **S. Hage-Ali**, N. Tiercelin, P. Coquet, R. Sauleau, Y. Dusch, Y. Orlic, V. Preobrazhensky, and P. Pernod, “Millimeter-wave ultrasoft reconfigurable antennas,” *Georgia Tech and University of Michigan Workshops*, IEMN, Villeneuve d’Ascq, Mai, 2011, oral
- [W3] **S. Hage-Ali**, N. Tiercelin, P. Coquet, R. Sauleau, V. Preobrazhensky, and P. Pernod, “Antennes planaires millimétriques reconfigurables à base de Microsystèmes Magnéto-Mécaniques (MMMS)”, GDR Micronanosystèmes, Montpellier, December, 2008, poster
- [W2] **S. Hage-Ali**, N. Tiercelin, P. Coquet, R. Sauleau, V. Preobrazhensky, and P. Pernod, “Reconfigurable antennas @ mm-wave using magnetic microsystems”, LEMAC seminar, Lille, December 2007, oral
- [W1] **S. Hage-Ali**, N. Tiercelin, P. Coquet, R. Sauleau, V. Preobrazhensky, and P. Pernod, “Applications Micro-Systèmes Magnéto-Mécaniques (MMMS) pour réseaux de capteurs : Antennes orientables sur substrat polymères & matériaux magnétoélectriques nanostructures”, GDR Micronanosystèmes, Toulouse, October, 2007, poster

## H. Bibliographie

- <sup>1</sup> C. K. Campbell, "Surface Acoustic Wave Devices for Mobile and Wireless Communications," San Diego, CA, USA: Academic, 1998.
- <sup>2</sup> R. Fachberger, G. Bruckner, R. Hauser, and L. Reindl, "Wireless SAW based high-temperature measurement systems," in 2006 IEEE International Frequency Control Symposium and Exposition, 2006, pp. 358–367.
- <sup>3</sup> A. Pohl, G. Ostermayer, and F. Seifert, "Wireless sensing using oscillator circuits locked to remote high-Q SAW resonators," IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, vol. 45, no. 5, pp. 1161–1168, Sep. 1998.
- <sup>4</sup> V. P. Plessky and L. M. Reindl, "Review on SAW RFID tags," in IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, vol. 57, no. 3, pp. 654–668, March 2010.
- <sup>5</sup> Cécile Floer, Thèse de doctorat, Université de Lorraine, 2019
- <sup>6</sup> Mohamed M'Jahed, Gerard Prieur, Omar ElMazria Method for the rapid interrogation of a passive sensor, in particular of the surface acoustic waves type, and system for measuring the unique frequency of such a sensor, US PATENT US20140253094 A1 <http://www.google.com/patents/US20140253094>
- <sup>7</sup> A. Shvetsov, S. Zhgoon, I. Antcev, S. Bogoslovsky, and G. Sapozhnikov, "Quartz orientations for optimal power efficiency in wireless SAW temperature sensors," in 2016 European Frequency and Time Forum (EFTF), 2016, pp. 1–4.
- <sup>8</sup> F. Lurz, T. Ostertag, B. Scheiner, R. Weigel, and A. Koelpin, "Reader Architectures for Wireless Surface Acoustic Wave Sensors," Sensors, vol. 18, no. 6, p. 1734, Jun. 2018.
- <sup>9</sup> <https://factuel.univ-lorraine.fr/node/12431>
- <sup>10</sup> D.-H. Kim, N. Lu, R. Ma, Y.-S. Kim, R.-H. Kim, S. Wang, J. Wu, S. M. Won, H. Tao, A. Islam, K. J. Yu, T. Kim, R. Chowdhury, M. Ying, L. Xu, M. Li, H.-J. Chung, H. Keum, M. McCormick, P. Liu, Y.-W. Zhang, F. G. Omenetto, Y. Huang, T. Coleman, and J. A. Rogers, "Epidermal Electronics," Science, vol. 333, no. 6044, pp. 838–843, Aug. 2011.
- <sup>11</sup> W.-H. Yeo, Y.-S. Kim, J. Lee, A. Ameen, L. Shi, M. Li, S. Wang, R. Ma, S. H. Jin, Z. Kang, Y. Huang, and J. A. Rogers, "Multifunctional Epidermal Electronics Printed Directly Onto the Skin," Advanced Materials, vol. 25, no. 20, pp. 2773–2778, 2013.
- <sup>12</sup> K. Bhattacharjee, A. Shvetsov and S. Zhgoon, "Packageless SAW Devices with Isolated Layer Acoustic Waves (ILAW) and Waveguiding Layer Acoustic Waves (WLAW)," IEEE International Frequency Control Symposium, 2007 Joint with the 21st European Frequency and Time Forum., pp. 135-140, 2007
- <sup>13</sup> O. Elmazria, S. Zhgoon, L. Le Brizoual, F. Sarry, D. Tsimbal, and M. A. Djouadi, "AlN/ZnO/diamond structure combining isolated and surface acoustic waves," Appl. Phys. Lett., vol. 95, no. 23, p. 233503, Dec. 2009, doi: 10.1063/1.3270536.
- <sup>14</sup> O. Legrani, O. Elmazria, S. Zhgoon, P. Pigeat, and A. Bartasyte, "Packageless AlN/ZnO/Si Structure for SAW Devices Applications," IEEE Sensors Journal, vol. 13, no. 2, pp. 487–491, Feb. 2013, doi: 10.1109/JSEN.2012.2219692.
- <sup>15</sup> A. Bakkali, J. Pelegri-Sebastia, Y. Laghmich and A. Lyhyaoui, "A batteryless temperature sensor based on high temperature sensitive material," Eur. Phys. J. Appl. Phys., vol. 74, 2016.
- <sup>16</sup> C. Li, Q. Tan, W. Zhang, C. Xue and J. Xiong, "An Embedded Passive Resonant Sensor Using Frequency Diversity Technology for High-Temperature Wireless Measurement," in IEEE Sensors Journal, vol. 15, no. 2, pp. 1055-1060, Feb. 2015.
- <sup>17</sup> Bruckner, J. Bardong, Ch. Gruber and V. Plessky, "A Wireless, Passive ID Tag and Temperature Sensor for a Wide Range of Operation," Procedia Engineering, vol. 47, pp. 132-135, 2012.
- <sup>18</sup> R. C. Webb, A. P. Bonifas, A. Behnaz, Y. Zhang, K. J. Yu, H. Cheng, M. Shi, Z. Bian, Z. Liu, Y.-S. Kim, W.-H. Yeo, J. S. Park, J. Song, Y. Li, Y. Huang, A. M. Gorbach and J. A. Rogers, "Ultrathin conformal devices for precise and continuous thermal characterization of human skin," Nat Mater, vol. 12, no. 10, pp.938-944, 2013
- <sup>19</sup> S. Xu, Y. Zhang, L. Jia, K. E. Mathewson, K.-I. Jang, J. Kim, H. Fu, X. Huang, P. Chava, R. Wang, S. Bhole, L. Wang, Y. J. Na, Y. Guan, M. Flavin, Z. Han, Y. Huang and J. A. Rogers, "Soft Microfluidic Assemblies of Sensors, Circuits, and Radios for the Skin," Science, vol. 344, no. 6179, pp.70-74, 2014
- <sup>20</sup> H. Jin, J. Zhou, X. He, W. Wang, H. Guo, S. Dong, D. Wang, Y. Xu, J. Geng, J. K. Luo and W. I. Milne, "Flexible surface acoustic wave resonators built on disposable plastic film for electronics and lab-on-a-chip applications," Scientific Reports, vol. 3, pp.2140-, 2013

- <sup>21</sup> Y. Liu, J. T. Luo, C. Zhao, J. Zhou, S. A. Hasan, Y. Li, M. Cooke, Q. Wu, W. P. Ng, J. F. Du, Q. Yu, Y. Liu, and Y. Q. Fu, "Annealing Effect on Structural, Functional, and Device Properties of Flexible ZnO Acoustic Wave Sensors Based on Commercially Available Al Foil," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 63, no. 11, pp. 4535–4541, Nov. 2016.
- <sup>22</sup> L. Lamanna, F. Rizzi, F. Guido, L. Algieri, S. Marras, V. M. Mastronardi, A. Quattieri, and M. D. Vittorio, "Flexible and Transparent Aluminum-Nitride-Based Surface-Acoustic-Wave Device on Polymeric Polyethylene Naphthalate," *Advanced Electronic Materials*, vol. 5, no. 6, p. 1900095, 2019.
- <sup>23</sup> H. Xu, S. Dong, W. Xuan, U. Farooq, S. Huang, M. Li, T. Wu, H. Jin, X. Wang, and J. Luo, "Flexible surface acoustic wave strain sensor based on single crystalline LiNbO<sub>3</sub> thin film," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 112, no. 9, p. 093502, Feb. 2018.
- <sup>24</sup> N. Naumenko and P. Nicolay, "AlN/Pt/LN structure for SAW sensors capable of operating at high temperature," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 111, no. 7, p. 073507, Aug. 2017.
- <sup>25</sup> <https://ijl.univ-lorraine.fr/recherche/centres-de-competences/depot-et-analyse-sous-ultravide-de-nanomateriaux-daum/>
- <sup>26</sup> D. Ciplay and R. Rimeika, "Measurements of electromechanical coupling coefficient for surface acoustic waves in proton-exchanged lithium niobate," *Ultrasonics*, vol. 33, no. 3, pp. 14-20, 1999
- <sup>27</sup> J. Yin, Z. Liu, H. Liu, X. Wang, T. Zhu, and J. Liu, "The epitaxial growth of wurtzite ZnO films on LiNbO<sub>3</sub> (0001) substrates," *Journal of Crystal Growth*, vol. 220, no. 3, pp. 281-285, 2000.
- <sup>28</sup> H. Yamamoto, N. Saiga, and K. Nishimori, "ZnO thin films deposited on various LiNbO<sub>3</sub> substrates by RF-sputtering," *Applied surface science*, vol. 169, pp. 517-520, 2001.
- <sup>29</sup> A. Shvetsov, S. Zhgoon, I. Antcev, S. Bogoslovsky, and G. Sapozhnikov, "Quartz orientations for optimal power efficiency in wireless SAW temperature sensors," in 2016 European Frequency and Time Forum (EFTF), 2016, pp. 1–4.
- <sup>30</sup> J.-H. So, J. Thelen, A. Qusba, G. J. Hayes, G. Lazzi and M. D. Dickey, "Reversibly Deformable and Mechanically Tunable Fluidic Antennas," *Adv. Funct. Mater.*, vol. 19, no. 22, pp.3632-3637, 2009
- <sup>31</sup> S. Cheng, A. Rydberg, K. Hjort and Z. Wu, "Liquid metal stretchable unbalanced loop antenna," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 94, no. 14, pp.144103-3, 2009
- <sup>32</sup> M. Kubo, X. Li, C. Kim, M. Hashimoto, B. J. Wiley, D. Ham and G. M. Whitesides, "Stretchable Microfluidic Radiofrequency Antennas," *Adv. Mater.*, vol. 22, no. 25, pp.2749-2752, 2010
- <sup>33</sup> S. H. Jeong, A. Hagman, K. Hjort, M. Jobs, J. Sundqvist and Z. Wu, "Liquid alloy printing of microfluidic stretchable electronics," *Lab Chip*, vol. 12, no. 22, pp.4657-4664, 2012
- <sup>34</sup> Q. Liu, A. Robinson, K. Ford, R. Langley and S. Lacour, "Elastic dipole antenna prepared with thin metal films on elastomeric substrate," *Electronics Letters*, vol. 48, no. 2, pp.65-66, 2012
- <sup>35</sup> L. Song, A. C. Myers, J. J. Adams and Y. Zhu, "Stretchable and Reversibly Deformable Radio Frequency Antennas Based on Silver Nanowires," *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 6, no. 6, pp.4248-4253, 2014
- <sup>36</sup> <http://www.smartfortechtechnologies.com/products/smartprint>
- <sup>37</sup> V. Pizzella et al., "SQUID systems for biomagnetic imaging," *Super- cond. Sci. Technol.*, vol. 14, pp. R79–R114, 2001.
- <sup>38</sup> Harshad Mishra, Thèse de doctorat, Université de Lorraine, 2019
- <sup>39</sup> R. S. Popovic, *Hall Effect Devices*. Bristol, U.K.: Inst. Physics, 2004.
- <sup>40</sup> M. N. Baibich et. al., "Giant Magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr magnetic superlattices," *Phy. Rev. Lett.*, vol. 61, no. 21, Nov. 1988
- <sup>41</sup> Ganguly A. K., Davis K. L., Webb D. C. and Vittoria C., "Magnetic control of surface elastic waves in a novel layered structure", *J. Appl. Phys.*, 47, 2696, 1976.
- <sup>42</sup> Yamaguchi M., Hashimoto K. Y., Kogo H., and Naoe M., "Variable SAW delay line using amorphous TbFe<sub>2</sub> film", *IEEE Trans. Magn.*, 16, 916, 1980
- <sup>43</sup> Kadota M, Ito S, Ito Y, Hada T, And Okaguchi K, "Magnetic Sensor Based on Surface Acoustic Wave Resonators", *Jpn. J. Appl. Phys.*, 50: 07HD07, 2011.
- <sup>44</sup> H. Zhou, A. Talbi, N. Tiercelin, and O. Bou Matar, "Multilayer magnetostrictive structure based surface acoustic wave devices," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 104, no. 11, p. 114101, Mar. 2014.
- <sup>45</sup> M. Li, A. Matyushov, C. Dong, H. Chen, H. Lin, T. Nan, Z. Qian, M. Rinaldi, Y. Lin, and N. X. Sun, "Ultra-sensitive NEMS magnetoelectric sensor for picotesla DC magnetic field detection," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 110, no. 14, p. 143510, Apr. 2017.

- <sup>46</sup> P. Smole, W. Ruile, C. Korden, A. Ludwig, E. Quandt, S. Krassnitzer, and P. Pongratz, "Magnetically tunable SAW-resonator," in IEEE International Frequency Control Symposium and PDA Exhibition Jointly with the 17th European Frequency and Time Forum, 2003. Proceedings of the 2003, 2003, pp. 903–906.
- <sup>47</sup> Huan Zhou, Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lille, 2014
- <sup>48</sup> A. Kittmann, P. Durdaut, S. Zabel, J. Reermann, J. Schmalz, B. Spetzler, D. Meyners, N. X. Sun, J. McCord, M. Gerken, G. Schmidt, M. Höft, R. Knöchel, F. Faupel, and E. Quandt, "Wide Band Low Noise Love Wave Magnetic Field Sensor System," Scientific Reports, vol. 8, no. 1, p. 278, Jan. 2018.
- <sup>49</sup> R. Fachberger, G. Bruckner, R. Hauser, and L. Reindl, "Wireless SAW based high-temperature measurement systems," in 2006 IEEE International Frequency Control Symposium and Exposition, 2006, pp. 358–367.
- <sup>50</sup> Y. Wang, G. Sha, C. Harlow, M. Yazbeck, and M. Khafizov, "Impact of nuclear reactor radiation on the performance of AlN/sapphire surface acoustic wave devices," Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, vol. 481, pp. 35–41, Oct. 2020.
- <sup>51</sup> L. Xie, X. Zhu, Z. Liu, X. Liu, T. Wang, and J. Xing, "A rebar corrosion sensor embedded in concrete based on surface acoustic wave," Measurement, vol. 165, p. 108118, Dec. 2020
- <sup>52</sup> T. Aubert, O. Elmazria, B. Assouar, L. Bouvot, and M. Oudich, "Surface acoustic wave devices based on AlN/sapphire structure for high temperature applications," Appl. Phys. Lett., vol. 96, no. 20, p. 203503, May 2010.
- <sup>53</sup> T. Aubert, O. Elmazria, B. Assouar, E. Blampain, A. Hamdan, D. Genève, and S. Weber, "Investigations on AlN/sapphire piezoelectric bilayer structure for high-temperature SAW applications," IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, vol. 59, no. 5, pp. 999–1005, May 2012.
- <sup>54</sup> R. Hauser, L. Reindl, and J. Biniash, "High-temperature stability of LiNbO<sub>3</sub> based SAW devices," in IEEE Symposium on Ultrasonics, 2003, 2003, vol. 1, pp. 192-195 Vol.1.
- <sup>55</sup> B. Wall, R. Gruenwald, M. Klein, and G. Bruckner, "C3.3 - A 600°C Wireless and Passive Temperature Sensor Based on Languisite SAW-Resonators," Proceedings SENSOR 2015, pp. 390–395, May 2015.
- <sup>56</sup> W. C. Wilson, M. D. Rogge, B. H. Fisher, D. C. Malocha, and G. M. Atkinson, "Fastener Failure Detection Using a Surface Acoustic Wave Strain Sensor," IEEE Sensors Journal, vol. 12, no. 6, pp. 1993–2000, Jun. 2012.
- <sup>57</sup> A. Maskay, D. M. Hummels, and M. Pereira da Cunha, "SAWR dynamic strain sensor detection mechanism for high-temperature harsh-environment wireless applications," Measurement, vol. 126, pp. 318–321, Oct. 2018.
- <sup>58</sup> <https://www.soitec.com/fr/produits/poi>
- <sup>59</sup> T. Takai, H. Iwamoto, Y. Takamine, H. Yamazaki, T. Fuyutsume, H. Kyoya, T. Nakao, H. Kando, M. Hiramoto, T. Toi, M. Koshino and N. Nakajima, "Incredible high performance SAW resonator on novel multi-layered substrate," 2016 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS), 18-21 Sept. 2016
- <sup>60</sup> P. Nicolay, J. Bardong, H. Chambon and P. Dufilié, "Glue-Less and Robust Assembly Method for SAW Strain Sensors," 2018 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS) pp.1-4, 22-25 Oct. 2018
- <sup>61</sup> S Hage-Ali, unpublished results
- <sup>62</sup> D. Schaubert, E. Kollberg, T. Korzeniowski, T. Thungren, J. Johansson and K. Yngvesson, "Endfire tapered slot antennas on dielectric substrates," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 33, no. 12, pp.1392-1400, Dec 1985
- <sup>63</sup> <https://www.comsol.com/model/substrate-integrated-waveguide-leaky-wave-antenna-16021>
- <sup>64</sup> S. Keyrouz and D. Caratelli, "Dielectric Resonator Antennas: Basic Concepts, Design Guidelines, and Recent Developments at Millimeter-Wave Frequencies," International Journal of Antennas and Propagation, 27-Oct-2016. [Online]. Available: <https://www.hindawi.com/journals/ijap/2016/6075680/>
- <sup>65</sup> S. C. Moulzolf, R. Behanan, T. Pollard, R. J. Lad and M. P. da Cunha, IEEE Ultrasonics Symposium, pp.255-258, 2013
- <sup>66</sup> D. Girbau, Á. Ramos, A. Lazaro, S. Rima and R. Villarino, "Passive Wireless Temperature Sensor Based on Time-Coded UWB Chipless RFID Tags," in IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 60, no. 11, pp. 3623-3632, Nov. 2012, doi: 10.1109/TMTT.2012.2213838.
- <sup>67</sup> S. Tedjini, N. Karmakar, E. Perret, A. Vena, R. Koswatta and R. E-Azim, "Hold the Chips: Chipless Technology, an Alternative Technique for RFID," in IEEE Microwave Magazine, vol. 14, no. 5, pp. 56-65, July-Aug. 2013, doi: 10.1109/MMM.2013.2259393.

## I. Liste des figures

Figure 1 : Quelques exemples réalisations issues de ma thèse de doctorat.....	7
Figure 2 : Quelques exemples de réalisation d’antennes maillées résonant autour de 2 GHz : .....	8
Figure 3 : Dispositif RF biorésorbable.....	9
Figure 4 : Capteur d’hydratation et de contrainte [R6] .....	10
Figure 5: Antenne millimétrique en encre argent .....	11
Figure 6 : (a) Résonateur en configuration sans fil (b) Ligne à retard réfective (R-DL) en configuration sans fil .....	14
Figure 7 : Dispositif « prêt à tatouer » .....	16
Figure 8 (a) Principe de base d’un dispositif WLAW (adapté de <sup>11</sup> ) (b) Exemple de modélisation COMSOL du champ de déplacement acoustique d’un onde confinée WLAW .....	17
Figure 9 : (a) Modèle Comsol Multiphysics <sup>5</sup> (b) Simulation du module de l’admittance $ Y_{11} $ de la structure pour $\lambda=4,4 \mu\text{m}$ <sup>5</sup> .....	19
Figure 10 : Champs de déplacement pour différents modes d’intérêt dans les structures ZnO/LN-Y128 et AlN/ZnO/LN-Y128 <sup>5</sup> .....	20
Figure 11 Résonateur synchrone réalisé en lithographie électronique <sup>5</sup> .....	20
Figure 12 : (a)(b) Visualisations MEB d’un tricouche AlN/ZnO/LN-Y128 <sup>5</sup> (c) Diagramme de diffraction X $\theta$ -2 $\theta$ de la structure <sup>5</sup> (d) Rocking curve d’un dépôt de ZnO sur LN-Y128 <sup>5</sup> .....	21
Figure 13 : Module de l’admittance $ Y_{11} $ de la structure AlN/ZnO/LN-Y128 aux différentes étapes <sup>5</sup> ...	22
Figure 14 : (a) Dispositif WLAW sous test en contact avec le perturbateur Solaris <sup>5</sup> (b) Mesure du coefficient de réflexion $S_{11}$ <sup>5</sup> .....	22
Figure 15 : Coefficient température-fréquence (TCF) du LN-Y128 et de la structure AlN/ZnO/LN-Y128 pour les ondes de type Rayleigh <sup>5</sup> .....	23
Figure 16 : Déplacements particuliers 1D / 2D dans différents tricouches NCD/ZnO/LN-Y128 ou AlN/ZnO/LN-Y128 <sup>5</sup> .....	24
Figure 17 : (a) Réacteur DAA du LSPM, image de F. Bénédic (b) Visualisation MEB de la structure NCD/AlN/ZnO/Si .....	25
Figure 18 : (a) Visualisation MEB de la surface d’une dépôt NCD/AlN/ZnO/LN-Y128 .....	25
Figure 19 : (a) Dépôt de NCD sur AlN/ZnO/IDTs/ LN-Y128 et zoom (b) Présence de craquelures.....	26
Figure 20 : Vitesses simulées (par N. Naumenko) et expérimentales de deux modes se propageant dans la structure bicouche AlN / IDT (Pt) / LN-Y128: (a) en fonction de l’épaisseur de Pt (b) en fonction de l’épaisseur d’AlN placée entre les électrodes de Pt d’épaisseur fixée à $0,1\lambda$ (c) en fonction de l’épaisseur AlN au-dessus des électrodes de Pt d’épaisseur fixée à $0,1\lambda$ . .....	27
Figure 21 : (a) Micrographie MEB et détails de conception du résonateur en platine (b) Zoom sur les IDTs et les réflecteurs (c) Coupe transversale MET – Micrographie en champ clair (Bright Field) de la géométrie de l’électrode.....	28
Figure 22 : Visualisations MET de dépôts : (a)(b) sans chauffage intentionnel, et (c)(d) à 480°C .....	29
Figure 23 (a) Mesure du $S_{11}$ de la structure AlN (480°C) /IDT(Pt)/LN-Y128 entre 30°C and 300°C. (b) Décalage en fréquence relatif dans la structure AlN/IDT(Pt)/LN-Y128. ....	30
Figure 24 : Déplacements particuliers 1D et 2D dans la structure AlN/ZnO/LN-Z pour $\lambda=4,4\mu\text{m}$ <sup>5</sup> .....	31
Figure 25 : (a) Cliché TEM d’une couche de ZnO sur LN-Z <sup>5</sup> (b) Rocking curve <sup>5</sup> (c) Cliché TEM d’une couche de ZnO sur LN-Y128 <sup>5</sup> .....	32

Figure 26 : (a) Echantillon WLAW AlN/ZnO/LN-Z <sup>5</sup> (b) Conductance d'un dispositif à 40 paires d'IDT à différentes étapes de fabrication <sup>5</sup> .....	33
Figure 27 : (a) Coefficient de réflexion d'un dispositif AlN/ZnO/LN-Z <sup>5</sup> (c) TCFs d'un dispositif LN-Z et AlN/ZnO/LN-Z <sup>5</sup> .....	33
Figure 28 : (a) Dispositif WLAW sur LN-Z aminci 60µm (b) Module de l'admittance du dispositif à différents étapes de dépôts des couches .....	34
Figure 29 : (a) Motif unitaire en méandre <sup>5</sup> (b) Antenne dipôle conçue sur cette base. ....	36
Figure 30 : (a) Design de l'antenne <sup>5</sup> ; Coefficient de réflexion et réactance (b) dans l'air (c) placée sur une section de corps humain <sup>5</sup> .....	37
Figure 31 : Principales étapes du procédé de fabrication des antennes étirables <sup>5</sup> .....	37
Figure 32 : (a) Dispositif expérimental pour l'interrogation à distance d'un capteur SAW ultrafin tatoué (b) Coefficient de réflexion de l'antenne d'interrogation .....	39
Figure 33 : (a) Interrogation sans fil d'un SAW LN-Z aminci avec une antenne placée sur plexiglas <sup>5</sup> ....	40
Figure 34 : (a) Dispositif WLAW AlN/ZnO/LN-Z(60µm) connecté à une antenne étirable <sup>5</sup> (b) Coefficient de réflexion de l'antenne d'interrogation <sup>5</sup> .....	40
Figure 35 : Plages typiques de quelques classes de capteurs de champ magnétique .....	43
Figure 36 : Différentes configurations de capteurs MSAW <sup>38</sup> (a) Résonateur (b) Lignes à retard (c) Magnétoimpédance (d) Multicouches .....	44
Figure 37 : (a) Schéma de la structure multicouche Ni/ZnO/LN-Y128, (b) Modélisation COMSOL des champs de déplacement pour le fondamental et les harmoniques 3 et 5 (c) Courbes de sensibilité pour un champ magnétique appliqué dans la direction de propagation. ....	45
Figure 38 : (a) Apparition de domaines dans des doigts TbCo/FeCo (en haut) MFM (en bas) modélisations micromagnétiques (b) Aimantation d'un multicouche TbCo/FeCo en configuration film plein, et dans deux configurations « doigts » .....	47
Figure 39 : Caractéristique en température du capteur à ondes de Love CoFeB/ZnO/ QST X+90° .....	48
Figure 40 : Capteur multifonctionnel basé sur des « stripes » de CoFeB (a) design (b) topologie AFM ...	49
Figure 41 : Courbes d'aimantation pour une couche magnétique pleine plaque vs microstructurée, en fonction de la température pour les axes difficiles .....	49
Figure 42 : Courbes de sensibilité au champ magnétique du capteur pour un onde de type Love, en fonction de la température. ....	50
Figure 43 : (a) Design de la structure CoFeB/SiO <sub>2</sub> /ZnO/QST(X+90°) (b) Sensibilité au champ magnétique dirigé selon l'axe difficile d'aimantation : calculs et mesures (c) Facteur de qualité en fonction du champ .....	51
Figure 44 : (a) Mesure d'un résonateur asynchrone à 872 MHz (b) Dépendance en température jusqu'à 593°C .....	53
Figure 45 : Evolution en température d'un résonateur AlN/Saphir optimisé .....	54
Figure 46 : (a) Ligne à retard classique (b) Ligne à retard de type « IDT connectés » <sup>5</sup> .....	54
Figure 47 : Coefficients de réflexion expérimentaux dans le domaine temporel d'une structure R-DL standard (1IDT) vs IDT connectés (3IDT) sur LN-Y128 <sup>5</sup> .....	55
Figure 48 : Coefficients de réflexion expérimentaux dans le domaine temporel d'une structure R-DL standard (1IDT) vs IDT connectés (3IDT) sur LGS <sup>5</sup> .....	55
Figure 49 : Coefficients de réflexion expérimentaux dans le domaine temporel d'une structure à IDT connectés sur (a) LGS (b) LN-Y128 avec des métallisation platine <sup>5</sup> .....	56

Figure 50 : Diagramme de diffraction du (a) niobate stœchiométrique (b) niobate congruent après 48h à 800 °C .....	57
Figure 51 : Sensibilité en température de capteurs sur sLN.....	57
Figure 52 : Antenne PIFA et capteur SAW sous test sur une palplanche.....	58
Figure 53 : Antenne PIFA à plan de masse réduit (a) design (b) prototype.....	58
Figure 54 : (a) Coefficient de réflexion expérimental de l'antenne PIFA réduite placée dans l'air ou sur un large plan métallique (b) Modélisation HFSS du diagramme de rayonnement de l'antenne placée sur un plan de métallique de large taille .....	59
Figure 55 : (a) Capteur de déformation langasite (b) Banc de traction en température (c) Banc en flexion développé par B. Paulmier.....	61
Figure 56 : Dispositif SAW Al/ZnO/Ti et son coefficient de réflexion en fonction de la température de 20° à 450 °C .....	62
Figure 57 : Chambre anéchoïde de l'Institut Jean Lamour .....	63
Figure 58: (a) Antenne patch microruban étirable (b) Antennes à ondes progressives (c) Antenne SIW à fentes .....	63

## J. Liste des tableaux

Tableau I – Quelques capteurs de température, sans fil ou en électronique sur peau, et leurs caractéristiques .....	18
Tableau II – Caractéristiques des dispositifs SAW sur substrats flexibles (adapté de <sup>5</sup> ).....	18
Tableau III– Résumé des paramètres de dépôt .....	21
Tableau IV– Paramètres de dépôts.....	28

## Partie 2 : Autres activités

## A. Présentation des activités d'enseignement

Mes activités d'enseignement en électronique ont commencé en tant que vacataire à l'École Centrale de Lille entre 2008 et 2011 et pendant l'année 2013-2014.

Depuis mon recrutement en 2014 en tant que Maître de Conférences au sein du Département Électronique et Électrotechnique à la Faculté des Sciences et Technologies de l'Université de Lorraine, j'interviens en licence SPI (préalablement licence SPI-EEAPR) et dans le master EEA (préalablement master I2E2I). J'ai effectué également quelques interventions ponctuelles à l'IUTNB département R&T et à Polytech Nancy sur la thématique des antennes & télétransmissions.

Après mon recrutement je suis tout d'abord intervenu dans un grand nombre d'UE, en électronique analogique et numérique en fonction des besoins du département, avant de connaître une implication plus poussée sur les enseignements liés aux hyperfréquences, capteurs / micronanotechnologies et à la microfabrication en salle blanche, des domaines dans lesquels je suis spécialisé. Ainsi, je suis responsable des UE suivantes :

- Modélisation multiphysique appliquée aux systèmes en L3 SPI
- Hyperfréquence et capteurs sans fil en M1 EEA
- TP Microtechnologies en M1 EEA
- Avancées récentes des micronanotechnologies en M2 EEA

En 2016, j'ai été un des référents en électronique pour un investissement dans le processus d'accréditation de la licence SPI et du master EEA.

Une grande partie de mon travail pédagogique a consisté dans le montage du parcours « Capteurs intelligents et micronanotechnologies » (CIM) au sein du master EEA, parcours sous la responsabilité du Pr Didier Rouxel et dont je suis le responsable d'année en M1 depuis 2018.

En 2016, le projet CNFM « Simulation de microsystèmes et dispositifs RF » de 20 k€ coordonné par M. Oudich et auquel j'ai participé, a permis de financer l'acquisition COMSOL Multiphysics, qui nous sert d'outil de modélisation pour enseigner la physique appliquée en L3 SPI (ondes, mécanique, thermique) et modéliser les microcapteurs et dispositifs hyperfréquence en master EEA parcours CIM.

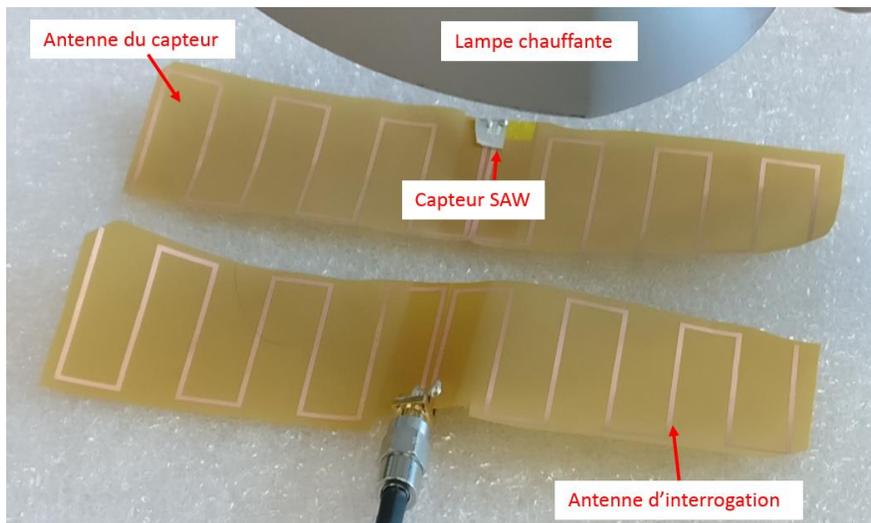
En 2017, j'ai porté le projet CNFM « Microcapteurs communicants », cofinancé par le CNFM (budget total 24 k€) pour l'achat de matériel de TPs innovants et qui nous a permis de financer matériel RF, d'électronique numérique et de nanotechnologies pour une grande variété de nouveaux TPs.

Ces deux projets CNFM ont permis de financer le développement de 200h - élèves de nouveaux TP innovants à travers un grand nombre d'unités d'enseignement. À titre personnel, j'ai notamment développé 80h de nouveaux TP totalement neufs, dont deux TPs en salle blanche.

En particulier le module intégré de 45h « TP microtechnologies » permet aux étudiants d’entièrement modéliser, réaliser en salle blanche et tester un capteur sans fil à ondes élastiques de surface. Les développements liés à ces projets CNFM, ainsi que l’approche pédagogique de ce module sont décrits dans la publication pédagogique suivante :

[PP1] **S. Hage-Ali**, M. Oudich, J. Claudel, J. Strèque, E. Tisserand, J. Mainka, D. Rouxel, C. Floer, O. Elmazria, M. Hehn, F. Weinachter, S. Weber, “Microsystèmes communicants : modélisation, fabrication et mesures,” *J3eA*, vol. 18, 2019, hors-série 1, texte : <https://doi.org/10.1051/j3ea/20191007>

Il est à noter que le fort investissement de l’Institut Jean Lamour et de son centre de compétence salle blanche CC-Minalor (Centrale Lorraine de Micro-Nanotechnologies) dans la « formation par la recherche » a permis, dans le cadre de ce module, et d’autres, l’accès des étudiants à des ressources de très haut niveau.



Capteur SAW sans fil à 390 MHz réalisé par les étudiants dans le cadre du module du M1 EEA « TP microtechnologies »

Le bilan des heures d’enseignement à l’Université de Lorraine est le suivant :

Année universitaire	Nombre d’heures enseignées en « présentiel » (HETD)	Décharges / CRCT / Délégation CNRS
2014 - 2015	286	/
2015 - 2016	257	/
2016 - 2017	201	/
2017 - 2018	193,75	/
2018 - 2019	158,5	Demie-délégation CNRS
2019 - 2020	225	/
2020 – 2021	225 (prévisionnel)	/

## B. Animation de la recherche et responsabilités

- **Fondateur et président du IEEE France Sensors Council Chapter depuis Janv. 2018.**

Le chapitre vise à structurer la communauté française des capteurs (académique et industrielle), organiser de l'animation scientifique et favoriser les dépôts de projets / collaborations.

Le chapitre étant encore très jeune, la mise en place a constitué un travail important : organiser des événements/rencontres, mise en place des outils de communication, développement de relations institutionnelles, implémentation de la stratégie de développement décidée par le bureau composé de :

Président : Sami Hage-Ali, IJL, Nancy

Vice-présidente : Hamida Hallil, IMS, Bordeaux

Secrétaires et vice secrétaires, chargés de missions Animation interne

Jérôme Rossignol, ICB, Dijon

Emmanuel Le Clezio, IES, Montpellier

Trésorier : Abdelkrim Talbi, IEMN, Lille

Chargé de mission Accueil IEEE Sensors Conference : Elie Lefeuvre, C2N, Paris

Chargée de mission Young Professionals/ Women in Sensors : Sandrine Bernardini, IM2NP, Aix-Marseille.

Le chapitre a connu un développement rapide (moins de 110 membres à environ 150 membres). Il compte des membres très actifs de toute la France. Ceux-ci ont été en mesure d'organiser des événements qui ont fait date dans notre communauté, avec de nombreux industriels, dont les trois premières éditions du workshop annuel du chapitre à Nancy et Dijon et Lille, ainsi que d'autres, organisés en partenariat avec l'impact LUE "Nanomaterials for Sensors".

Le chapitre a également été extrêmement proche d'accueillir la conférence flagship "IEEE Sensors" à Bordeaux en 2023 (2ème / 20 candidatures internationales). Ce n'est d'ailleurs que partie remise.

- **Responsable de l'axe "Capteurs sans fil pour applications biomédicales et hautes températures"** au sein du projet ISITE Lorraine Université d'Excellence, impact "Nanomaterials for sensors" depuis Octobre 2016 - 2020

La tâche consiste à piloter l'animation scientifique d'un groupe d'une quinzaine de permanents et non permanents de différentes équipes de l'IJL sur la thématique citée.

a) Dans ce cadre j'ai notamment organisé, depuis 2016, 20 séminaires internes dans le cadre de la série de séminaire SAWSENS seminar series, de manière à amplifier les échanges scientifiques internes.

b) En coordination avec le Pr Omar Elmazria, nous avons aussi organisé l'invitation de sommités internationales sur les sujets liés à cet axe avec la venue de :

- pour une semaine (Nov.2018) et 6 séminaires du IEEE Distinguished Lecturer Pr Kenji Ushino

- Pr Paul Muralt (IEEE DL également) pour un séminaire le 29 Septembre 2017

- **Membre du comité de pilotage de la salle blanche de l'IJL** depuis Janvier 2018

Pilotage l'organisation et de la politique de moyens de la salle blanche

- **Correspondant de formation** du département N2EV à l'IJL depuis Jan 2018

Elaboration du Plan de Formation de l'Unité (PFU). Définition de la stratégie de formation de l'IJL.

- **Membre élu du Conseil de Laboratoire** depuis le 30 Mars 2018

## C. Rayonnement national et international

### (a) Prix, distinctions & concours

- « Outstanding chapter award 2019 », du IEEE sensors Council pour le chapitre français dont je suis le président fondateur, « for the development and the structuration of the French sensors community » (cf. section précédente). La remise de ce prix collectif a eu lieu le 27 Octobre 2020 lors de la conférence flagship IEEE Sensors.



- Récipiendaire de la PEDR A depuis 2019

### (b) Membre de jury de thèse externe

Examineur de la thèse de Marianne Sagnard, UNIVERSITE BOURGOGNE FRANCHE-COMTE, Besançon, 03/12/2018, "Conception et développement de composants à ondes élastiques de surface, dédiés à la détection passive et sans fil de grandeurs physiques et au filtrage radiofréquences à bandes multiples"

### (c) Conférences invitées

- [16] **S. Hage-Ali**, C. Floer, Prince Mengue and O. Elmazria, "Surface acoustic wave sensors for industrial and biomedical applications", *GMC-ElecEng conference*, Valencia, Spain, Sept 2020 (**keynote**)
- [15] **S. Hage-Ali**, C. Floer and O. Elmazria " Skin-printed wireless SAW sensors for biomedical applications", *IEEE International Conference on Sensors and Nanotechnology*, July 2019, Penang, Malaysia
- [14] **S. Hage-Ali**, C. Floer, H. Mishra, J. Streque, F. Bartoli, S. Zhgoon, S. Mc Murtry, H. M'Jahed, T. Aubert, P. Pigeat and O. Elmazria, "Tattooed surface acoustic wave sensors for wireless, passive and imperceptible "e-skin" applications", *Nanomaterials conference*, 24-28 Sept 2018, Nancy

[I3] **O. Elmazria, S. Hage-Ali**, C. Floer, Florian Bartoli, Sergei Zhgoon and T. Aubert, "Surface Acoustic Waves Technology as 3less sensors: Wireless, Batteryless & Packageless", Sensors and Actuator congress, Stockholm, Sweden, Sept 2018

[I2] **S. Hage-Ali**, "Microsystèmes RF ultrasouples pour la santé", Journée scientifique de la priorité 6 de l'IJL « Matériaux et vivant », Nancy, 13 Novembre 2014

[I1] **S. Hage-Ali**, Y. Orlic, N. Tiercelin, R. Sauleau, P. Pernod, V. Preobrazhenski and P. Coquet, "Millimeter-Wave Elastomeric Antennas, " *ADVANCED ELECTROMAGNETICS SYMPOSIUM, AES 2012*, 16-19 avril 2012, Paris, France

#### (d) Review d'articles et conférences

- 1 review pour le journal Surface and Coating technology en 2018
- 1 review pour l'International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems en 2018
- 8 review d'articles de conférence pour la conférence IEEE Sensors 2017, Glasgow
- 4 review d'articles de conférence pour la conférence IEEE Sensors 2018, New Delhi
- 3 review d'articles de conférence pour la conférence IEEE Sensors 2020, Rotterdam

## D. Expertises

- Expert pour les bourses Franco-américaine **Fulbright Programme "Chercheurs" et "Doctorants"** en 2017, 2018 et 2020

Rôle chaque année : 16 entretiens à Paris basés sur l'expertise de 16 dossiers de 50 pages. 2020 : examen des dossiers uniquement.

<https://fulbright-france.org/fr/bourses-fulbright-partenaires/programmes/chercheurs>

<https://fulbright-france.org/fr/bourses-fulbright-partenaires/programmes/doctorants>

- 1 Expertise pour l'ANR (PRCI) Appel à projet générique en 2019
- 1 Expertise écrite pour l'attribution d'une Bourse postdoctorale de la fondation autrichienne pour la science (FWO) en 2017 (sujet : électronique souple, dossier de 50 pages)

## E. Activité contractuelle

### Comme porteur :

- 2015-2016 : Projet Appel d'Offre Région Lorraine "Capteurs sans fil étirables"  
Budget : **30 k€**
- 2016-2019 : Projet ISITE PIA Lorraine Université d'Excellence (LUE) : « Wireless passive stretchable devices based on confined acoustic waves : application to magnetic field sensing »  
Budget : **91 k€** (bourse de thèse Harshad Mishra avec O. Elmazria) + **45 k€** accompagnement
- 2016-2019 : Bourse de thèse DGA 100 % Cécile Floer (avec O. Elmazria)  
Budget : **91 k€** + **6k€** accompagnement

- 2018-2019 : Projet Institut Carnot en Lorraine " 3less "  
Budget : **25k€**, qui ont permis de mobiliser **116 k€** supplémentaires du CPER MatDS pour l'achat et l'installation d'une chambre anéchoïde
- 2018-2022: **ANR JCJC SAWGOOD** "Wireless Stretchable SAW devices: a new path to multifunctional, on-skin, fully passive sensors"  
Budget: **235 k€**
- 2018-2021 : Bourse de thèse Campus France Gabon Prince Mengue (avec O. Elmazria)  
Budget : **~60k€**
- 2019-2022 : Bourse de thèse DGA 50 % Baptiste Paulmier (avec O. Elmazria)  
Budget : **56k€ DGA + 56k€ IJL**

**Comme participant :**

- 2015-2019: ANR SALSA "Surface Acoustic Wave micro-sensors based on ALuminium nitride/Sapphire Structure for high temperature Applications"  
Porteur : O. Elmazria  
Budget IJL : **206k€/560k€** total  
Rôle : Responsable Design antennes pour la haute température
- 2017-2020 : PICS CNRS avec U. Mahatma Gandhi.  
Porteur : Didier Rouxel  
Budget : **20 k€**
- 2020-2021 : Projet ICEEL/FEDER CAPMAT  
Porteur : Stéphane Mangin  
Budget : **550 k€**
- 2020-2021 : Projet interne IJL SMS  
Porteur : Omar Elmazria  
Budget : **20 k€**
- 2020-2022 : PHC HIBISCUS 2020 intitulé « Label-Free Detection of Glycosylation and microRNA (miR-16) for detection of Prostate Cancer (PCa) » avec l'Université de Perlis, Malaisie  
Porteurs : Frederic Sarry / Khairuddin Arshad  
Budget : **13 k€**
- 2020-2024: ANR WISSTITWIN "Wireless and Integrated multi-parameters SAW Sensors Technologies for Implementation of a digital TWIN for electrical machines"  
Porteur : A. Talbi (IEMN)  
Responsable scientifique IJL : Michel Hehn  
Budget IJL : **185k€/640k€** total  
Rôle : télétransmissions

**En cours d'évaluation :**

Je suis également WP Leader dans l'ANRI (avec NCTU Taiwan) PPG-Stretch, actuellement en cours d'évaluation.

## F. Organisation de congrès /workshop

- **Chairman du workshop "First IEEE France Sensor Council workshop"**

Nancy, 17-18 Juin 2018, 75 personnes, budget : 4k€

Tâches : Demandes de financements (laboratoire, pôle M4, ISITE LUE). Invitations de 17 orateurs invités, dont le IEEE Distinguished Lecturer Pr : Ravinder Dahiya. Organisation pratique.

- **Membre du comité d'organisation** de la journée 1st French Indian Workshop on Polymers nanoparticles and nanocomposites, Vandoeuvre les Nancy, 25 Septembre 2017.
- **Membre du comité d'organisation** de la journée Nanomaterials for Sensors, Septembre 2018  
Invitation et accueil de 4 IEEE Distinguished lecturers du Sensors Council (Veena Misra, John Kitching, Sandro Carrara, Paul Chao) en coordination avec S. Mangin et Aurore Calmels.
- **Membre du comité d'organisation** du 2nd IEEE France Sensors Workshop Dijon 23-24 Mai 2019.
- **General co-chair avec O. Elmazria** de la One day Smart Sensors & Systems Conference avec les invités internationaux Prs KeeKeun Lee, Pallavi Dhagat, Sergei Zhgoon et 4 invités nationaux. Nancy 19 Nov. 2019.
- **Membre du comité d'organisation et "special sessions chair"** de la conférence IEEE MetroInd Rome 2020 3-5 Juin 2020 <http://www.metroind40iot.org/home>
- **Membre du comité d'organisation** de la journée "Sensors 2020" prévue à Nancy en Septembre 2020, puis finalement reportée.
- **TPC member**, GMC-ElecEng Mic Sensors, Valence, 2-3 Septembre 2020.
- **Membre du comité d'organisation** du 3rd IEEE France Sensors Workshop prévu les 26-27 Novembre 2020 à Lille.
- **Membre du comité d'organisation et "special sessions chair"** de la conférence IEEE MetroInd Rome 2021 7-9 Juin 2021 <http://www.metroind40iot.org/home> .

## G. Relations internationales

- **Chercheur invité à l'université Mahatma Gandhi**, groupe du **Pr Sabu Thomas** (Honoris Causa Univ Lorraine), Kottayam, Kerala (Juin à mi-juillet 2016), **collaboration** valorisée par la publication [R9]. Le Pr Thomas a également donné 2 séminaires lors d'invitations.
- **Collaboration internationale avec le Pr Sergei Zhgoon (Moscow Power Electronics Institute)** depuis **2014** valorisée par [R7], [R10], [R12], [R16], [R17], [P9], [P12], [P14], P15], [P16]... En plus de la collaboration, le Pr Sergei Zhgoon a été invité 5 fois une semaine ces dernières années à l'IJL et donné 3 séminaires.
- **Collaboration internationale avec le Pr Edvard Kokanyan** dans le cadre d'un LIA UL, initiée par le LMOPS (T. Aubert). Cette collaboration a été valorisée dans [R13].

- **Collaboration internationale et industrielle** avec le Dr-Habil **Pascal Nicolay**, (Carinthian Tech Research AG, puis FH Kärnten), valorisée dans [R16], [P15] [CI7]. Le Dr Nicolay a été invité 3 fois à Nancy et donné 2 séminaires. Nous avons envoyé 2 stagiaires de master 2 EEA en 2018 et 2019 au CTR.
- **Collaboration internationale** avec Dr **Natalya Naumenko** (National University of Science and Technology “MISIS”, Moscou), valorisée dans [CI7], [CI15], [CI16]. Le Dr Naumenko a effectué un séjour d'une semaine à l'IJL en 2018 et donné un séminaire.
- **Collaboration internationale** avec le groupe du **Pr Tao Han** (Shanghai Jiao Tong University). Le Pr Han a été invité 1 semaine en 2019 et a donné 2 séminaires, tandis que son doctorant Yang Yang a passé 6 mois comme invité dans notre équipe. Cette collaboration a été valorisée dans [R15], [R19] et la soumission [R24].
- **Collaboration internationale** avec le groupe du **Dr Eloi Blampain** (Université des Sciences et Techniques de Masuku, Gabon), valorisée dans [R21].
- **Collaboration internationale** avec le **Pr Paul Chao** (National Chiao Tung University, Taiwan). Le Pr Chao a été invité à Nancy lors du workshop fondateur du chapitre français du IEEE Sensors Council à Nancy en 2018. Cette collaboration a donné lieu au dépôt d'ANR PPG-Stretch en cours d'évaluation.

## H. Relations avec l'industrie et activités de prestation

- Janvier 2015, **contrat de prestation** : appui au développement de capteurs RFID aux ingénieurs de la PME EFSYS avec le transfert de la compétence "mesure en impédancemétrie RF".
- **Trois formations pratiques d'une journée de salariés d'entreprises à la pulvérisation cathodique** (IJL / Société Française du Vide, 15 Mai 2018, 12 Mai 2017, Mai 2015)  
 Démonstration de dépôts de couches minces dans un bâti de pulvérisation cathodique, suivi par la pratique directe de salariés d'entreprise du secteur aéronautique/défense et du luxe pour l'essentiel.
- Novembre 2018, **contrat de prestation** : Mise en place de capteurs sans fil développés dans le cadre de notre collaboration avec Arcelor Mittal Maizières Research (AMMR), valorisation issue du projet ANR SALSA. Transfert de la compétence aux techniciens AMMR : implémentation de capteurs en milieu industriel.
- Septembre 2020, **contrat de prestation** avec un industriel de la métallurgie/fonderie, sur la mesure de hautes températures en environnement industriel rotatif. Evaluation de la liaison sans fil.

## I. Vulgarisation scientifique et animation grand public

- **Journée portes ouvertes de la Faculté des sciences 2018**, 17 Février 2018

Présentation au public des possibilités d'enseignement et recherche sur le campus de la Faculté des Sciences de Nancy

- **Organisation et réalisation de deux visites à l'intérieur de la salle blanche** de l'IJL aux élèves de la faculté des sciences le 20/05/2016 et 18/04/2018

- **Article de vulgarisation** C. Floer, S. Hage-Ali et O. Elmazria, "Les capteurs de demain seront-ils tatoués ?", The Conversation France, 29/04/2019, <https://theconversation.com/les-capteurs-de-demain-seront-ils-tatoues-115410>

- **Fête de la science 2019** : Animation de mon stand « Capteurs de plein de choses » à l'IJL, 5 Octobre 2019

- **Participation au reportage France 3** sur mon ex-doctorante « Les tatouages connectés de Cécile Floer » <https://www.youtube.com/watch?v=ToT0AJXHLQI&t=9s> Décembre 2019

- **Semaine de la recherche 2020** : Visite du laboratoire IJL pour 40 élèves de licence SPI et master EEA, 20 Janvier 2020

## Capteurs sans fil à ondes élastiques de surface pour applications biomédicales, mesure du champ magnétique et environnements industriels

### Résumé

Basés sur des matériaux piézoélectriques, les capteurs à ondes élastiques de surface (SAW) ont attiré l'attention grâce à leur grande versatilité. Ils peuvent être sensibles aux variations d'un grand nombre de paramètres physiques de l'environnement. Les capteurs à base de SAW présentent l'avantage d'être passifs (batteryless) et peuvent être interrogés en utilisant des techniques sans fil (wireless). Dans leur version sans encapsulation, ils sont dits packageless. Nous avons donc appelé les capteurs issus de notre activité sous le nom de 3less.

Ce manuscrit présente des travaux de capteurs SAW sans fil pour les applications suivantes :

- le biomédical avec le développement d'une nouvelle génération de capteurs « tatoués » sur peau combinant dispositifs à ondes élastiques confinées et antennes étirables
- la mesure du champ magnétique grâce à des structures originales
- les environnements industriels difficiles notamment à haute température pour la mesure de température et de déformation.

---

## Wireless surface wave acoustic wave sensors for biomedical applications, magnetic field measurements and industrial environments

### Abstract

Based on piezoelectric materials, surface acoustic wave (SAW) sensors have attracted attention due to their great versatility. They can be sensitive to the variations of numerous physical parameters. SAW-based sensors have the advantage of being passive (battery-less) and can be interrogated at a distance (wireless). In their version without encapsulation, they are packageless. We have therefore call the sensors from our activity 3less.

This manuscript presents wireless SAW sensors for the following applications:

- biomedical, with the development of a new generation of sensors "tattooed" onto the skin, combining confined elastic waves devices and stretchable antennas
- the measurement of the magnetic field thanks to original structures
- harsh industrial environments, particularly at high temperature for temperature and strain measurements.