



**HAL**  
open science

# Capteurs à ondes élastiques de déformation, température et champ magnétique directement intégrés sur pièces métalliques : applications en surveillance de santé des structures

Prince Warel Mengue M'Owono

## ► To cite this version:

Prince Warel Mengue M'Owono. Capteurs à ondes élastiques de déformation, température et champ magnétique directement intégrés sur pièces métalliques : applications en surveillance de santé des structures. Physique [physics]. Université de Lorraine, 2022. Français. ⟨NNT : 2022LORR0085⟩. ⟨tel-03797353⟩

**HAL Id: tel-03797353**

**<https://hal.univ-lorraine.fr/tel-03797353v1>**

Submitted on 4 Oct 2022

**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.



HAL Authorization



**UNIVERSITÉ  
DE LORRAINE**

**BIBLIOTHÈQUES  
UNIVERSITAIRES**

## AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact bibliothèque : [ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr](mailto:ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr)  
*(Cette adresse ne permet pas de contacter les auteurs)*

## LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

[http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg\\_droi.php](http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php)

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

# THESE

Présentée en vue d'obtenir le grade de  
**Docteur de l'Université de Lorraine**  
**En Physique – Nanosciences**

Par

**MENGUE M'OWONO Prince Warel**

---

## **Capteurs à ondes élastiques de déformation, température et champ magnétique directement intégrés sur pièces métalliques : applications en surveillance de santé des structures**

---

Thèse soutenue publiquement le 16 juin 2022 devant le jury d'examen :

|   |  |   |
|---|--|---|
| <i>Rapporteurs</i>  | Mme Marta CLEMENT<br>Mme Hamida HALLIL ABBAS                                   | Professeur, Universidad Politécnica de Madrid<br>Maître de Conférences HDR, Université de Bordeaux  |
| <i>Examineurs</i>   | M. Sergei ZHGOON<br>M. Pascal NICOLAY<br>M. Eloi BLAMPAIN<br>M. Thierry AUBERT | Professeur, National Research University, Moscou, Russie<br>Professeur, Carinthia University of Applied Sciences, Villach, Autriche<br>Professeur, Université des Sciences et Techniques de Masuku, Franceville, Gabon<br>Professeur, Université de Lorraine ( <i>Président du jury</i> ) |
| <i>Directeur de thèse</i><br><i>Co-directeur de thèse</i> | M. Omar ELMAZRIA<br>M. Sami HAGE-ALI   | Professeur, Université de Lorraine<br>Maître de Conférences HDR, Université de Lorraine   |



*« La valeur d'un homme tient dans sa capacité à donner  
et non dans sa capacité à recevoir. »*

*Albert Einstein*

*À ma famille,  
À mes amis,*





# Sommaire

---

---

|   |     |
|---|-----|
| Remerciements .....   | x   |
| Liste des abréviations.....   | xiv |
| Introduction .....  | 1   |
| Chapitre I : Synthèse bibliographique.....  | 7   |
| I.A. Surveillance de l'état de santé de structure (SHM).....                              | 8   |
| I.A.1 Introduction.....   | 8   |
| I.A.2 Capteurs et méthodes utilisés en SHM .....  | 10  |
| I.A.3. Les enjeux de la thèse .....   | 19  |
| I.B. Dispositifs à ondes acoustiques de surface : généralités et technique.....           | 21  |
| I.B.1. Dispositifs SAW.....   | 21  |
| I.C. Capteurs SAW conventionnels de déformation en température et défauts de collage..... | 40  |
| I.C.1. Procédés de collage et préparation de surface.....                                 | 40  |
| I.C.2. Capteurs SAW de déformation et limites du collage .....                            | 44  |
| I.C.3. Capteurs SAW intégrés sur substrat métallique : nouveau concept.....               | 50  |
| Conclusion et Objectifs de la thèse .....   | 53  |
| <br>  |     |
| Chapitre II : Capteur SAW réalisé sur substrat métallique structuré Al/ZnO/Métal.....     | 55  |
| II. A. Matériaux et configuration.....  | 57  |
| II.A.1. Choix des substrats métalliques.....  | 57  |
| II.A.2. Les électrodes interdigitées (IDTs) : Aluminium .....                             | 59  |

|   |            |
|---|------------|
| II.A.3. Couches de génération d'ondes élastiques .....  | 60         |
| II.A.4. Configuration résonateur .....  | 61         |
| II.B. Techniques théoriques et expérimentales des capteurs SAW sur substrats métalliques .....  | 63         |
| II.B.1. Modélisation et simulation numériques .....   | 63         |
| II.B.2. Étude expérimentale de la structure ZnO/substrat métallique .....   | 67         |
| II.B.3. Dépôt et caractérisation de couches cristallines.....   | 71         |
| II.B.4. Procédés de fabrication des IDTs : description des étapes technologique des dispositifs SAW.....  | 76         |
| II.C. Caractérisations électriques .....  | 80         |
| II.C.1. Caractérisation ex-situ sous pointes.....   | 80         |
| II.C.2. Caractérisations électriques .....  | 81         |
| II.C.3. Mesures de résonateurs sans fil sur la structure ZnO/titane .....   | 99         |
| <b>Conclusion .....</b>   | <b>104</b> |
|   |            |
| <b>Chapitre III : Dispositif SAW sur substrat métallique (Ti) combinant la fonction capteur et un code d'identification radio fréquence (RFID).....</b> | <b>107</b> |
| III.A. Systèmes d'identification automatique & RFID.....  | 108        |
| III.A.1. Principe.....  | 108        |
| III.A.2. Les RFID .....   | 108        |
| III.B. Tag SAW RFID.....  | 111        |
| III.B.1. RFID à base de tag SAW .....   | 111        |
| III.C. IDTs connectés : Nouveau concept pour des applications d'identification .....  | 113        |
| III.C.1. Configurations IDTs connectées : amélioration du signal RFID .....   | 113        |

|   |            |
|---|------------|
| III.C.2. Étude de la structure SAW RFID basée sur ZnO/Ti en configuration IDTs connectés .....                            | 116        |
| III.C.3. Applications sans fil de la structure ZnO/Ti.....  | 131        |
| III.C.4. Optimisation du signal de la structure IDTs connectés .....  | 133        |
| <b>Conclusion .....</b>   | <b>140</b> |
| <br>  |            |
| <b>Chapitre IV : Capteur SAW de champ magnétique (MSAW) sur substrat métallique magnétoélastique .....</b>                | <b>143</b> |
| IV.A. Capteurs de champ magnétique .....  | 145        |
| IV.A.1. Introduction .....  | 145        |
| IV.A.2. Exemples de capteurs de champ magnétique.....   | 146        |
| IV.B. Capteur de champ magnétique à SAW (MSAW).....   | 150        |
| IV.B.1. Généralités sur les capteurs MSAW.....  | 150        |
| IV.C. Capteur MSAW sur substrat métallique magnétoélastique .....   | 159        |
| IV.C.1. Concept : intérêt .....   | 159        |
| IV.C.2. Capteur MSAW à base de la structure ZnO/Nickel .....  | 160        |
| IV.C.3. Optimisation du capteur champ magnétique sur substrat magnétoélastique :<br>structure ZnO/Metglas (Fe-Si-B) ..... | 170        |
| <b>Conclusion .....</b>   | <b>180</b> |
| <b>Conclusion générale.....</b>   | <b>183</b> |
| <b>Table des figures.....</b>   | <b>189</b> |
| <b>Liste des tableaux .....</b>   | <b>197</b> |
| <b>Références bibliographiques .....</b>  | <b>199</b> |
| <b>Publications et communications.....</b>  | <b>212</b> |



# Remerciements

---

---

Les travaux présentés dans ce manuscrit ont été réalisés au sein de l'Institut Jean Lamour (IJL), un laboratoire du CNRS et de l'Université de Lorraine, avec le soutien financier combiné entre Campus France et de l'équipe 405 de l'IJL. Ses travaux ont nécessité de nombreuses compétences pour les mener à bien et les progrès effectués au sein de ses recherches n'ont été rendus possibles que via l'intervention de nombreuses personnes. Je tiens donc tout d'abord à présenter ma profonde reconnaissance à toutes ces personnes qui m'ont suivi et épaulé pendant ces quatre années de travaux.

Tout d'abord, je remercie le service de direction, et plus particulièrement M. Thierry Belmonte, directeur du laboratoire, pour son accueil chaleureux. Je tiens également à remercier Sergei Zhgoon pour les commentaires perspicaces qu'il a faits sur la thèse et son aide précieuse sur la compréhension et la maîtrise du logiciel COMSOL Multiphysics, améliorant ainsi la qualité de mon travail.

Mes remerciements se portent également vers les membres du jury Mme Marta CLEMENT, Mme Hamida HALLIL ABBAS, M Sergei ZHGOON, M Pascal NICOLAY, M Thierry AUBERT et M Eloi BLAMPAIN.

Je tiens aussi à remercier mes directeurs de thèse Omar ELMAZRIA et Sami HAGE-ALI pour leurs encadrements et leurs conseils avisés au cours de cette thèse. Leurs critiques constructives de mon travail m'ont beaucoup aidé. Les souvenirs et les expériences que j'ai vécues dans leur équipe resteront avec moi pour toujours.

Remerciement à Michel Hehn pour toute son aide, ses explications et ses conseils sur la compréhension de la partie magnétisme de cette thèse. Je remercie également Pascal Nicolay pour son aide dans la réalisation des tests de modélisation et simulation sur Comsol Multiphysics.

Je tiens également à remercier tous mes collègues de l'équipe 405 qui m'ont apporté leur aide et leur soutien sous différentes formes durant cette thèse : Didier Rouxel, Frédéric Sarry, Denis Beysen. Reconnaissances aussi à Hamid M'Jahed pour son aide dans la mise en place des tests en température réalisé à Polytech Nancy, mais aussi à Anne-Sophie, notre gestionnaire pour sa disponibilité en toutes circonstances.

Je transmets mes remerciements à Baptiste Paulmier pour son aide dans la conception du bâti de tests en flexion et aussi pour avoir développé un beau travail d'équipe.

Je remercie également sincèrement les membres du centre de nanofabrication MINALOR, en particulier Laurent Badie, Gwladys Lengaigne et Carlos Rojas Sanchez pour leur soutien indéfectible durant les nombreuses heures que j'ai passées en salle blanche. Leurs conseils et leur soutien dans ma formation avec les différents équipements ainsi que l'aide ultérieure chaque fois que j'en ai fait la demande m'ont beaucoup apporté.

Je remercie également Erwan Etienne pour les tests de polissage et découpe de pièces métalliques. Ma reconnaissance va aussi à Pascal Boulet pour la formation pour la diffraction et à l'atelier de mécanique pour l'aide disponibilité et leur aide technique.

Je tiens par ailleurs à remercier Thomas Hauet, Stéphane Suire pour leur aide et formation avec les équipements CC Magnétisme. De même, je tiens à remercier Cyril Noirel et Marc Ponçot pour leur aide et leur soutien dans la mise en place des tests de micro-traction

Je remercie également Sébastien Petit-Watelot de m'avoir permis d'utiliser son montage expérimental pour les mesures des réponses magnéto-acoustiques.

Je pense aussi à l'ensemble des doctorants que j'ai rencontrés et avec qui j'ai pu discuter et passer de bons moments : en particulier, Spencerh, Jordan, Youbi, Jeltretri et Danis. Je remercie aussi les docteurs qui ont pu participer de près ou de loin dans cette thèse. Je pense en particulier à Harshad, Jérémie, Cécile, Krupali, et Florian qui m'ont montré le chemin.

Je remercie également tous mes amis ici à Nancy et à l'IJL. Je ne prends aucun de leurs noms ici de peur de manquer quelqu'un de la longue liste. Les souvenirs créés dureront toute une vie, tout comme les amitiés.

En fin de compte, je remercie ma famille, Ndong Owono Antoine, Mengue Monique et Mélanie Emonet pour leur soutien indéfectible et leur patience envers moi tout au long de ce parcours difficile.





## Liste des abréviations

---

|                                |   |
|--------------------------------|---|
| SHM                            | Surveillance de la santé de structure           |
| AFM                            | Microscope à force atomique                     |
| CVD                            | Dépôt chimique en phase vapeur                  |
| DRX                            | Diffraction des rayons X                        |
| FEM                            | Méthode des éléments finis                      |
| COM                            | Couplage de mode                                |
| FWHM                           | pleine largeur à mi-hauteur                     |
| IDT                            | Transducteur interdigital                       |
| IJL                            | Institut Jean Lamour                            |
| ILAW                           | Onde acoustique à couche isolée                 |
| IdO                            | Internet des objets                             |
| ISM                            | Industriel Scientifique et Médical              |
| PVD                            | Dépôt physique en phase vapeur                  |
| RFID                           | Identification par radiofréquence               |
| SAW                            | Onde acoustique de surface                      |
| BAW                            | Onde acoustique de volume                       |
| TCF                            | Coefficient de température de fréquence         |
| WLAW                           | Onde acoustique de la couche de guidage d'ondes |
| SAW                            | Ondes acoustiques de surface                    |
| AlN                            | Nitride d'aluminium                             |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Alumine   |
| Al                             | Aluminium                                       |
| RF                             | Radiofréquence                                  |
| ZnO                            | Oxyde de zinc                                   |



# Introduction

---

---

Les structures (ponts, avions, bâtiment, etc.) sont constamment soumises à diverses contraintes physiques qui tendent à entraîner une dégénération des propriétés des matériaux qui les constituent, ce qui conduit à leur dégradation. Des solutions de maintenance programmées peuvent être mises en œuvre. Toutefois, ces méthodes restent inadaptées, car le contrôle de la structure se fait après un intervalle de temps pouvant être inadapté, ce qui a pour conséquence d'aggraver l'endommagement, s'il n'est pas pris en compte immédiatement lors de son apparition. Cela peut engendrer des risques au niveau de la sécurité et l'augmentation des coûts de maintenance.

Ces 20 dernières années, les systèmes de surveillance de santé de structure, aussi appelées systèmes SHM (en anglais *Structural Health Monitoring*) apparaissent comme une technologie capable de surveiller, détecter et d'anticiper ces endommagements avant que celles-ci ne fragilisent la structure. Cette technologie s'inscrit dans une stratégie de maintenance non destructive, prédictible in situ, économique et sécuritaire des structures à monitorer. L'idée majeure de ces systèmes consiste à fournir à la structure un réseau de capteurs dont le rôle sera de prélever et de traiter les signaux possédant des informations sur la structure. Ceci permet d'effectuer une surveillance continue ou permanente de l'intégrité des structures tout en présentant des données sur leur état de santé, leur durée de vie et les mesures nécessaires à entreprendre sur les interventions de maintenance de ladite structure. L'essor de la technologie SHM s'est fait par la convergence de nombreux facteurs, à savoir : l'utilisation des objets connectés (IoT pour *Internet of Things*) qui favorise la communication sans fil entre les capteurs et internet, les algorithmes de simulation numérique ; la réduction de la consommation des capteurs et leur fonctionnement en sans-fil.

En 2016, l'utilisation des objets connectés dans la technologie SHM apporte de grands profits dans le gain des parts de marché. En effet, le marché était évalué à près de 1,13 milliard de dollars, soit près de 811 millions d'euros selon *Allied Market Research* [1] et ceux-ci continuent de croître et devraient atteindre 3,22 milliards d'euros en 2023 avec une augmentation de 19%. Les capteurs occupent une place fondamentale dans la mise en pratique

des objets connectés. Ceux-ci doivent présenter des faibles coûts d'installation et de maintenance tout en étant capables de détecter et de localiser l'endommagement sur la structure. Nous l'avons bien compris, les capteurs jouent un rôle majeur dans les systèmes SHM. Ainsi, concevoir de nouveaux types de capteurs plus sophistiqués participe à l'amélioration des systèmes SHM. Le but étant de répondre à une demande d'optimisation du contrôle de l'intégrité de la structure. Dans ce contexte, les dispositifs à base d'ondes élastiques de surface (SAW pour *Surface Acoustique Wave*) sont très prometteurs du fait de leurs caractéristiques. Il s'agit d'une classe de dispositifs capables d'être sans fil, sans batterie, ultra fin, légers et interrogeables à distance.

Depuis les années 60, les dispositifs SAW dont le principe de fonctionnement se base sur la propagation des ondes élastiques de surfaces sont largement étudiés et développés. Basés sur des matériaux piézoélectriques, ils sont largement utilisés comme filtre, résonateur ou ligne à retard dans les systèmes de communication. Vu leur extrême sensibilité aux perturbations environnementales à l'exemple de la température, de la pression, de la déformation et/ou des espèces chimiques, ils ont suscité un grand intérêt dans leur utilisation en tant que capteurs.

Pour les applications SHM, les capteurs SAW de déformation sont particulièrement importants. Typiquement, le capteur est fixé à la pièce sous test par l'utilisation d'un adhésif, souvent une colle. Cependant, la mise en œuvre de colles présente un certain nombre de défis pour obtenir des mesures fiables et reproductibles : leur épaisseur est difficile à maîtriser, leurs propriétés mécaniques peuvent varier pour différentes raisons, par exemple si elles sont soumises à des températures variables. Surtout, elles sont typiquement quelques ordres de grandeur moins rigides que les capteurs SAW et les pièces sous test. On voit donc apparaître un effet de relaxation de contrainte dans la colle, seule une fraction des contraintes auxquelles est soumise la pièce sous test sera transmise au capteur SAW. Ceci entraîne la nécessité d'un calibrage précis du capteur ou a minima une modélisation efficace de l'empilement pièce sous test / colle / capteur SAW pour extraire des mesures fiables. Soumises à de fortes déformations, les colles peuvent aussi se délaminer.

Pour pallier ces problèmes, l'objectif de ce travail de thèse est de développer un nouveau type de capteurs SAW de déformation, de température et de champ magnétique (MSAW) directement intégrés sur des pièces métalliques, pour des applications de contrôle de santé de structure (SHM). Pour ce faire, des couches piézoélectriques sont déposées par pulvérisation cathodique sur le métal d'intérêt, le capteur SAW est réalisé au-dessus. Le but général de l'étude sera d'explorer ces structures atypiques qui permettront de se passer de l'adhésif, et

d'étudier les sensibilités des capteurs réalisés à la déformation, à la température et au champ magnétique.

Le présent document expose les principaux travaux conduits depuis trois ans au sein de l'équipe Micro et Nanosystèmes de l'Institut Jean Lamour sous la direction du Pr. Omar Elmazria et du Dr. Sami Hage-Ali avec le soutien financier de Campus France Gabon et du laboratoire Institut Jean Lamour. Ce projet de thèse s'inscrit plus largement dans le cadre de l'ANR SAWGOOD dont le but est de développer une plateforme de capteurs SAW sans fil multifonctionnels.

Ce manuscrit de thèse s'organise en quatre chapitres distincts :

Le premier d'entre eux est consacré à une présentation généralisée du contexte de l'étude avec, dans un premier temps, une introduction des technologies pour le SHM et des méthodes et capteurs utilisés dans le développement de ces systèmes. Dans un second temps, les notions concernant les dispositifs SAW et ces applications seront mises en évidence. Enfin, les principes sur l'application des contraintes de déformations en l'occurrence de la flexion et la traction sont discutés, ainsi que les procédés de préparation de surfaces de l'échantillon et de la pièce sous test pour des opérations de fixation par l'utilisation de l'adhésif. De plus, une analyse de la littérature permettra de mettre en évidence les problèmes liés à l'utilisation de la colle pour la réalisation des mesures de déformation en température et l'intérêt d'une intégration directe de couches piézoélectrique sur métal.

Le deuxième chapitre est dédié à l'étude des méthodes numériques et procédés expérimentaux utilisés pour la modélisation, la réalisation et la caractérisation filaire et sans fil de capteurs en configuration résonateur sur structures bicouche ZnO/métal. Les choix des matériaux de l'étude sont explicités et la croissance de ZnO sur différents métaux industriels étudiée. Après la microfabrication de résonateurs SAW sur ces bicouches, leurs paramètres caractéristiques sont déterminés, ainsi que leur comportement sous différentes déformations, à haute température, et à la déformation à différentes températures.

Le troisième chapitre présente une étude de lignes à retard permettant une identification (« IDtag » ou « SAW-Tag ») sur l'hétérostructure ZnO/Ti. Nous avons opté pour l'utilisation d'une structure avec des IDTs connectés, qui utilise des transmissions directes. Cette structure originale est intéressante pour des dispositifs SAW présentant des facteurs de couplage

électromécaniques modérés et des pertes de propagations ce qui est le cas de la structure ZnO/Ti. La configuration IDtag présente également l'avantage d'intégrer un code d'identification radio Fréquence (RFID) ce qui permettra d'interroger plusieurs capteurs à distance et de les différencier. L'hétérostructure ZnO/Ti en configuration IDtag sera également caractérisée en filaire et à distance en fonction de la déformation, la température et les deux combinées.

Pour finir, le quatrième chapitre se concentre sur la réalisation et caractérisation de capteurs de champ magnétique à ondes élastiques de surface (MSAW) directement réalisés sur substrat métallique magnétoélastique. En effet, l'expérience acquise dans la réalisation de capteurs SAW sur substrats métalliques sera mise à profit pour la réalisation de MSAW en utilisant des substrats à la fois métalliques et magnétoélastiques, donc sensibles aux variations du champ magnétique (amplitude et direction). Deux structures, ZnO/Nickel et ZnO/Metglas, seront développées et étudiées sous champ magnétique. Leurs sensibilités au champ magnétique seront déterminées et comparées à celles de la littérature, obtenues avec des configurations de MSAW conventionnelles. L'utilisation de substrat magnétoélastique présente l'avantage d'offrir une grande épaisseur de la couche sensible, ce qui améliore la sensibilité du capteur MSAW.

Une conclusion vient clore ce manuscrit en présentant une synthèse des principaux résultats obtenus à l'aide de cette nouvelle démarche qui consiste à réaliser des dispositifs SAW directement sur substrats métalliques. Des perspectives de ce travail seront ensuite données en lien avec nouveaux challenges et les différentes opportunités qu'ouvre cette nouvelle structure SAW.





# Chapitre I

## Synthèse bibliographique

---

---

*Ce chapitre procédera à une présentation des généralités sur les dispositifs à ondes élastiques de surface tout en introduisant les concepts de contrôle de santé des structures et de l'utilisation du collage des dispositifs SAW sur la pièce sous test.*

*Ce chapitre est divisé en trois parties, à savoir une première partie qui se concentre sur l'état de l'art des SHM. Dans cette partie, une description des systèmes de contrôle santé et des capteurs utilisés pour l'évaluation des dommages dans les structures est introduite.*

*La deuxième partie présentera les principes associés aux dispositifs SAW, des ondes élastiques et des différents champs d'application des systèmes SAW.*

*Dans la troisième partie, le lecteur y trouvera dans un premier temps une illustration des procédés de collage et préparation de surface utiles pour la fixation d'un capteur SAW sur une pièce sous test. De plus, on y trouvera une mise en évidence de quelques défauts dus à la fixation d'un capteur SAW conventionnel dans la réalisation des mesures de déformation, de température ou de la combinaison des deux. Pour finir, la conception d'un nouveau type de capteur de déformation SAW directement intégré sur pièce métallique sera introduite et discutée. Celui-ci sera présenté comme étant une des solutions principalement illustrées dans ce manuscrit pour remédier au problème dus au collage du capteur et donc d'alléger les difficultés importantes dans l'étalonnage des capteurs et la reproductibilité des mesures lors de la réalisation d'une étude bien spécifique en surveillance de santé de structure.*

## I.A. Surveillance de l'état de santé de structure (SHM)

### I.A.1 Introduction

Les 10 dernières années ont vu une augmentation rapide du nombre des recherches liées à la mise en œuvre d'une stratégie d'identification des dommages pour les infrastructures d'ingénierie aérospatiale, civile et mécanique, aussi appelé surveillance de l'état des structures (SHM). Les dommages sont définis comme des modifications comprises dans un système tel que les propriétés du matériel, les propriétés géométriques, les conditions aux limites et/ou la connectivité, qui ont un effet négatif sur les performances du système. L'intérêt accru pour les SHM et leurs potentiels pour les associés à la sécurité des personnes et aux avantages économiques a motivé de nombreuses recherches sur la détection et traitement des dommages le plus tôt possible, comme le montre la croissance significative du nombre d'articles réalisés sur cette thématique au cours des années (voir le Figure 1.1).

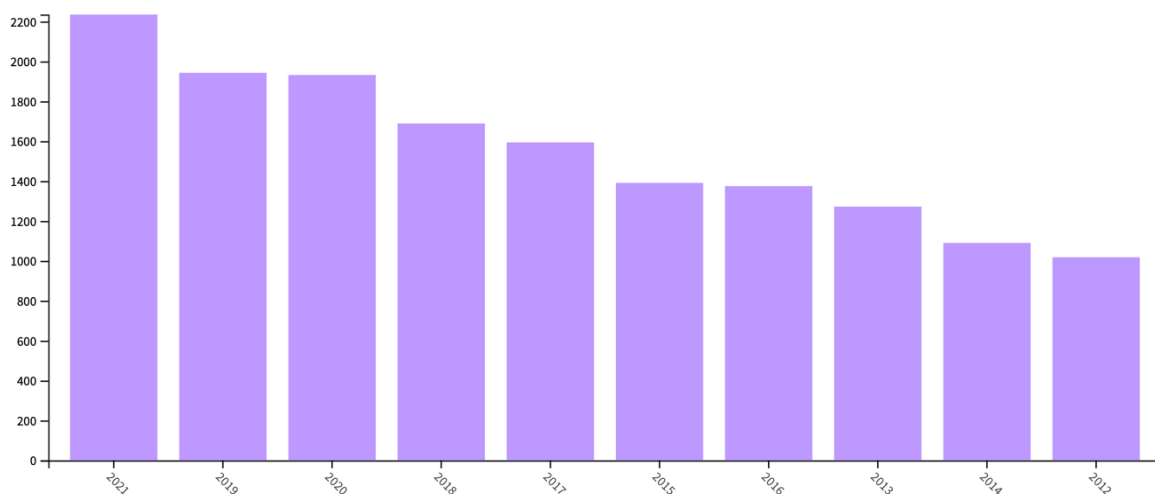


Figure 1.1 : Évolution du nombre de publications réalisées sur les systèmes SHM durant ces 10 dernières années (analyse obtenue à partir de "Web of Science Core Collection").

Le fonctionnement d'un système SHM se fait suivant un nombre bien défini d'étapes données par Rytter [2] et présentés dans la Figure 1.2 ci-dessous.

- La première étape consiste à définir les paramètres d'études, à savoir la taille de l'endommagement détectable, les conditions aux limites, le type de capteur, l'intervalle de fonctionnement en température du capteur, le positionnement des capteurs, l'intervalle d'acquisition des données.

- Par la suite, l'acquisition des données qui consiste à recueillir les signaux électriques liés au comportement de la structure extrait par les capteurs tout au long d'une certaine durée bien spécifique.
- La caractéristique de fonctionnement permet d'extraire des informations sur le fonctionnement de la structure à partir des données recueillies par les capteurs. Cette étape se termine par une comparaison entre les données à l'état sain (référence) et du nouvel état (état inconnu) de la structure.
- L'étape d'indicateur d'endommagement permet de révéler l'existence d'une modification ou non de la structure après comparaison entre l'état de référence et l'état inconnu.
- La détection d'endommagement permet quant à elle de valider l'existence d'un dommage après soustraction de toute influences extérieure telle que les bruits de mesure pouvant affecter l'exactitude de la mesure.
- L'étape de localisation permet de se situer sur la zone de l'endommagement.
- La classification favorise l'acquisition des informations sur le type d'endommagement présent dans la structure.
- L'estimation du degré de l'endommagement est une étape qui permet d'évaluer la sévérité de l'endommagement tel que la surface d'un impact, la longueur d'une fissure, etc.
- Enfin, l'étape de prévision donne des estimations sur l'évolution du comportement de l'endommagement dans un futur proche ou lointain et sur la durée de vie de la structure face à cet impact.

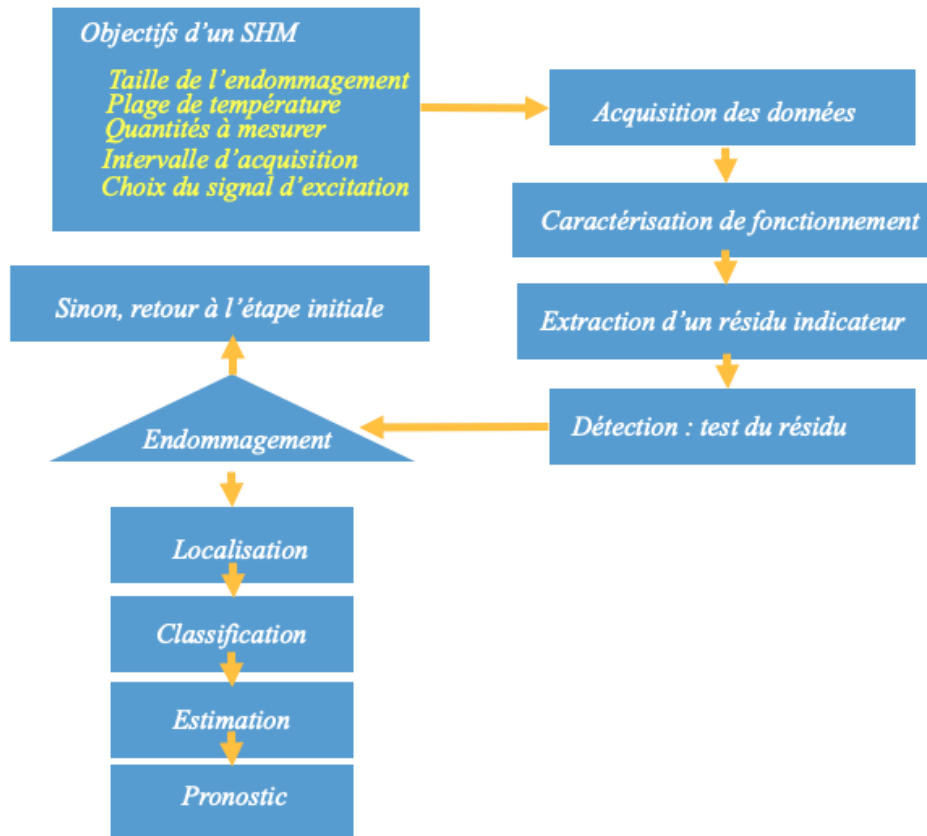


Figure 1. 2 : Étapes du procédé de surveillance des structures par Rytter [2]

## I.A.2 Capteurs et méthodes utilisés en SHM

Depuis quelques années, le SHM profite du développement global des objets connectés issus de la révolution 4.0 [3] dans le cadre de la connaissance en continu des paramètres de l'état de la structure. En effet, la structure est dotée d'un réseau de capteurs intelligents qui permettent de maintenir et d'optimiser son intégrité et sa durée de vie. En effet, cette nouvelle technique de maintenance consiste à doter la structure que l'on souhaite contrôler, des capteurs et d'actionneurs en plus d'un système d'acquisition et de traitement des données permettant de suivre son état de santé.

Tout en maintenant la stratégie des SHM qui est à la fois économe (faible coût de maintenance et d'installation) et sécuritaire (prévention) [4], le développement d'une diversité de capteurs de contraintes intelligentes a vu le jour dans les secteurs d'applications du génie civil, de l'environnement et de l'aéronautique. Dans la suite de cette partie, nous parlerons des différents types de capteurs et des méthodes utilisées dans le contrôle des structures.

Il existe une variété de capteurs en SHM selon la qualité de l'étude à réaliser. En effet, le choix des capteurs est conditionné par différentes caractéristiques telles que :

- La sensibilité en présence d'un endommagement.
- L'influence du capteur par et sur les conditions environnementales de la structure.
- La taille, le poids et la simplicité du capteur.
- Le coût et la fiabilité.

En SHM, les capteurs répondant à ces caractéristiques sont nombreux et parmi eux, nous pouvons citer : les capteurs à courant de Foucault, les capteurs piézoélectriques, les capteurs à fibre optique, les jauges de déformation et les capteurs MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems sensors). Dans cette partie, nous parlerons uniquement des capteurs piézoélectriques et à fibre optique du fait de leur très large utilisation dans le marché du SHM.

#### **I.A.2.1. Capteurs à fibre optique**

Les capteurs à fibre optique sont très largement utilisés dans le secteur du génie civil et représentent plus de 60 % du marché du SHM. En effet, ils disposent de caractéristiques intéressantes [5], [6] à savoir :

- Insensibles aux interférences électromagnétiques.
- Faciles à intégrer et peu coûteux.
- Résistant à la corrosion, aux agressions chimiques et très légères.
- Possibilité de multiplexage de plusieurs capteurs sur la même fibre optique.

On les retrouve dans de multiples applications et permettent la mesure de la contrainte mécanique, de la vitesse, de la pression, de la température, etc. Toutefois, ces capteurs présentent quelques inconvénients tels que :

- La fragilité
- La complexité de la connectique associée
- La limitation en température pour certaines fibres (complexe à installer dans des environnements hostiles où les températures de fonctionnement sont élevées)
- Un prix plus élevé que les capteurs traditionnels avec une performance limitée dans les applications usuelles

Parmi les technologies utilisant la fibre optique, l'on peut citer principalement quatre d'entre elles qui se partagent le marché des SHM.

**Capteurs réseaux de Bragg :** Parmi les capteurs à fibre optique, les capteurs de déformation à réseau de Bragg [5], [7]–[11] sont les plus utilisés (voir Figure 1.3). Ils permettent d’effectuer des mesures en de multiples points d’une fibre optique sur une zone sensible de quelques centimètres de plusieurs contraintes, en l’occurrence : la température, l’acoustique, la pression, l’accélération, l’humidité, la vibration et bien d’autres. Lorsque la fibre optique est contrainte ou lorsque sa température change, la longueur d’onde réfléchie varie proportionnellement. Les grilles optiques se décalent en présence d’une déformation et sont transmises. Les modifications de la structure de la fibre et des contraintes appliquées sont révélées par les variations du spectre réfléchi. Pour une détection plus précise des déformations, les zones de mesure sont échelonnées sur toute la longueur de la fibre.

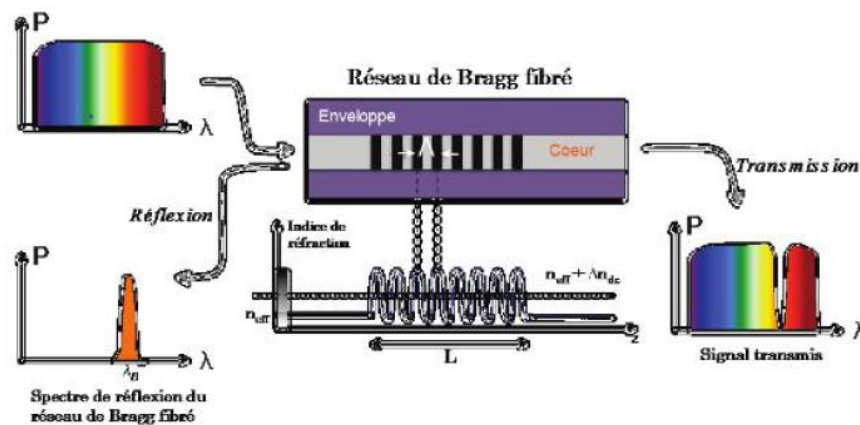


Figure 1. 3 : Principe des capteurs à réseau de Bragg [12].

De nombreuses recherches faisant mention de l’utilisation des capteurs à réseau de Bragg pour la surveillance de santé de structure ont été largement publiées. L’on retrouve dans la littérature, pour n’en citer que celles-ci, les recherches de Takeda *et al* [13] qui ont réalisé des études sur l’effet de différents types d’endommagements dans un stratifié CFRP (Carbon fiber reinforced plastics) sur les changements de la forme des spectres émis par les capteurs fibre de Bragg. Cette étude a permis de montrer que la forme des spectres est étroitement liée au type de défaut. Tsuda *et al* [10] quant à eux ont proposé un système à base de capteurs fibre de Bragg pour la détection d’endommagement dans les composites. Ils ont démontré que les capteurs fibre de Bragg sont comparables aux capteurs piézocéramiques pour la détection par

ultrasons et que ces capteurs montrent une efficacité intéressante pour la détection d'impacts dans les structures stratifiées en CFRP.

**Capteurs à interférométrie** : Les capteurs à interférométrie permettent de réaliser des mesures de déformations d'une structure en s'appuyant sur les modèles d'interférence de Michelson ou de Mach-Zender. Contrairement aux capteurs de réseaux de Bragg, ils apportent une zone sensible de mesure plus large allant jusqu'à quelques mètres. La détection de la déformation se fait par la différence de phase liée au déplacement d'une fibre fixée sur la structure à une fibre équivalente laissée libre. Cette technologie, à l'exemple de l'interférence de Michelson présente des capacités de mesure avec de plus hautes précisions que d'autres techniques utilisant la fibre optique.

**Capteurs de distribution** : ces capteurs réalisent des mesures distribuées par rétrodiffusion tout au long de la fibre optique. Ils fonctionnent essentiellement suivant trois phénomènes de rétrodiffusion de la lumière, à savoir :

- La rétrodiffusion Rayleigh : Suivant le fonctionnement de l'effet élastique, la rétrodiffusion de Rayleigh consiste à la réflexion d'une onde optique incidente dans la fibre et de même fréquence que l'onde réfléchie. Cette technique peut présenter de nombreux défauts dus à des zones où la densité du matériau est différente, ce qui a pour effet, de générer un certain nombre de pertes, de dispersion, etc. du signal incident. La diffusion de Rayleigh est largement utilisée pour les mesures des déformations très rapides.
- La rétrodiffusion Raman : Disposant de deux composants, à savoir Stokes et Anti-Stokes, la rétrodiffusion Raman consiste à effectuer un échange d'énergie entre le faisceau lumineux incident (les photons incidents) et les particules du milieu de propagation. Dans cette technologie, les composants Stokes et Anti-Stokes de fréquences décalés génèrent des pertes ou des gains d'énergie par les molécules du milieu suivant leurs états d'excitation et de relaxation. La diffusion de Raman est généralement utilisée pour les mesures en température dans des structures assez larges comme les ponts, barrages, etc.
- La rétrodiffusion Brillouin : Tout comme la rétrodiffusion de Raman, les capteurs de Brillouin grâce à leurs caractéristiques sont principalement utilisés dans des structures larges. L'effet Brillouin est un effet acousto-optique se traduisant par une diffusion

inélastique de la lumière par des ondes acoustiques et qui survient dans la fibre optique. Ces capteurs à fibre optique permettent de réaliser des mesures en continu en contraintes et températures.

**Capteurs à modulation d'intensité :** Dans ces capteurs, les contraintes générées par les mesurandes (température, déformation, pression, ...) induisent des variations du flux transmis et donc des pertes au sein de la fibre optique. L'évaluation de ces pertes se fait par l'intermédiaire de trois techniques, à savoir : les microcourbures périodiques, l'interaction avec le champ évanescent et les modifications du couplage entre deux fibres. De toutes les configurations utilisant la fibre optique, la technique de modulation d'intensité est de loin l'une des plus faciles à mettre en œuvre et qui favorise la détection de l'ensemble de mesurandes. De plus, elle a l'avantage d'être peu coûteuse et ne nécessite pas de montage complexe ou de fibres optiques spéciaux. Toutefois, elle présente une faible sensibilité en comparaison des autres technologies.

Contrairement aux capteurs à réseau de Bragg, dans la littérature, les capteurs interférométriques, de distribution et ceux basés sur l'intensité sont très peu utilisés pour l'application SHM.

### **I.A.2.2. Capteurs piézoélectriques**

L'utilisation des capteurs piézoélectriques est largement répandue pour l'évaluation des mesures de vibrations à basse ou haute fréquence dans les émissions acoustiques. En plus, dans les systèmes de surveillance de santé de structure, ils sont largement préférés aux sondes acoustiques conventionnelles pour leurs caractéristiques très intéressantes. En effet, leur faible coût, leur légèreté et leur petite taille font d'eux des composants très avantageux.

Suivant le principe de la piézoélectricité qui sera mentionnée plus en détail dans la partie suivante, les capteurs piézoélectriques sont très sensibles à l'environnement qui les entoure, de ce fait, en plus de leurs propriétés précédemment mentionnées, ils peuvent facilement être intégrés dans la structure à monitorer. Il existe une variété de matériaux piézoélectriques utilisés dans la conception des capteurs pour les applications SHM. Cette partie se limitera à une présentation brève des matériaux tels que les céramiques PZT (Titanio-Zirconate de plomb) et les PVDF (Polyfluorure de vinylidène en PolyVinylidène de Fluoride) du fait qu'ils sont les plus utilisés en SHM et qu'ils présentent d'excellentes propriétés.

- Les céramiques PZT (Titanate-zirconate de plomb) : les céramiques PZT sont des matériaux particulièrement utilisés dans l'industrie grâce à leur nombreuses caractéristiques intéressantes (voir Figure 1.4a). En effet, ces matériaux regroupent des propriétés spécifiques, à savoir qu'ils sont :
  - Ferroélectriques (disposent d'une polarisation électrique spontanée qui sous l'effet d'un champ magnétique peut être renversé)
  - Pyroélectrique (ils développent une différence de tension entre deux de leurs faces lorsqu'ils sont chauffés ou refroidis.)
  - Piézoélectriques (donc, ils développent une tension électrique entre ces deux faces une fois compressées et inversement sous l'action d'un champ électrique, ils se déforment physiquement), de par cette propriété, ces matériaux peuvent être utilisés pour des applications de capteur de température, de déformation, de pression et bien d'autres.

De plus, leur fort coefficient de couplage électromécanique, leurs faibles coûts et leur diversité de forme, rendent ces matériaux particulièrement intéressants, d'où leur grande utilisation dans l'industrie de la surveillance des structures.

De nombreuses recherches ont été menées sur ces matériaux, ce qui a donné lieu à un grand nombre de publications [14]–[18] s'articulant autour de leur utilisation dans des applications SHM. Pour n'en citer que quelques-unes, les recherches de Chittaranjan *et al* [14] montrent une technique d'impédance électromécanique (EMI) pour la détection des dommages au sein du béton à âge précoce dans l'élément structurel. Les résultats expérimentaux sont obtenus par l'application de patches piézocéramiques et montrent qu'en utilisant cette méthode de détection et de localisation, une estimation de la gravité est également possible. Fabrico G *et al* [15] ont réalisé une analyse théorique et expérimentale concernant la taille correcte des transducteurs PZT (Lead Zirconate Titanate) utilisés dans les systèmes SHM basés sur la technique d'impédance électromécanique (EMI). Les résultats montrent que la sensibilité des systèmes SHM pour la détection des dommages peut être optimisée si les transducteurs sont correctement dimensionnés selon la procédure proposée.

- Les polymères PVDF (PolyVynilDiFluorure) : Les polymères de synthèse PVDF piézoélectrique (voir Figure 1.4b) et ses dérivés sont les plus couramment utilisés dans l'industrie. Communément appelé poly fluore de vinylidène, les PVDF sont des fluoropolymère thermoplastique semi-cristallin. Ces polymères présentent une élasticité qui leur permet de mieux s'accommoder des surfaces courbes des structures à monitorer.

Toutefois, contrairement au PZT, ils présentent un faible coefficient de couplage électromécanique. Des études sur la conception de nouveaux matériaux piézoélectriques nommés AFC (pour Active Fiber Composite) regroupant les propriétés de flexibilité des PVDF (pour se conformer aux surfaces courbes) et un haut facteur de couplage électromécanique des céramiques PZT ont été réalisés [19] dans les travaux de Brunner A.J *et al.* Les AFC présentent une conformabilité élevée avec des performances piézoélectriques accrues. On les retrouve dans des surveillances de santé des structures composites [20], ainsi que dans le contrôle structurel actif du rotor d'hélicoptère [21].



Figure 1. 4 : (a) céramiques PZT (Titrano-Zirconate de plomb), (b) films PVDF (Polyfluorure de Vinylidène en PolyVinylidène Fluoride).

### I.A.2.3. Méthodes en contrôle des structures (SHM)

La détection et la localisation des dommages dans une structure se font suivant deux principales approches, à savoir les approches passives et actives.

- **Approche active** : Cette approche est axée sur l'utilisation des actionneurs et des capteurs. L'actionneur excite la structure à basse fréquence, le but étant ici de distribuer les capteurs sur la structure sans précision bien spécifique sur la zone du dommage. En présence d'un défaut, il survient une modification des propriétés de la structure, à savoir la rigidité, l'amortissement, la masse, ce qui modifie la réponse dynamique de celle-ci. Ce procédé présente des résultats satisfaisants, il permet de détecter, localiser et caractériser les défauts présents dans des structures de grandes dimensions, tout en ayant un nombre assez limité de capteurs. Toutefois, il présente quelques inconvénients, à savoir une faible sensibilité à des zones d'endommagement de petite taille. L'autre méthode plus locale de cette approche consiste à distribuer un grand nombre de capteurs tout au long de la zone de la structure sensible à l'endommagement et de l'exciter à haute fréquence, ce qui aura pour effet d'améliorer sa sensibilité. Comme autres

méthodes utilisant l'approche active, on retrouve la méthode par l'impédance électromécanique [22]–[24] et vibrations [25], [26].

- **Approche passive** : Dans cette approche n'utilisant que les capteurs pour la détection et la localisation des dommages au sein de la structure, l'excitation est générée par les contraintes extérieures. Contrairement à l'approche active, le traitement du signal ne se fait pas en continu. Les méthodes se concentrant sur l'émission acoustique [27], [28] font partie des plus utilisées en surveillance des structures.

Dans la suite de cette partie, une brève présentation des méthodes précédemment énoncées sera faite.

**Méthode acoustique** : Les méthodes acoustiques regroupent l'émission acoustique et les ultrasons. Cette méthode a vu son intérêt croître dans le contrôle de santé de structure par le développement des techniques numériques et les systèmes d'analyses.

L'approche par l'émission acoustique [29] pour l'évaluation des endommagements est généralement une méthode passive, elle consiste à l'analyse d'une onde élastique générée par la libération d'énergie au sein d'une structure sollicitée et présentant un endommagement. L'application de cette méthode s'accompagne d'une distribution de capteurs le long de la structure, ceux-ci enregistrent les ondes générées par le travail de la structure soumis à des contraintes. Les signaux prélevés par ces capteurs sont par la suite amplifiés et traités dans le but d'analyser l'état de santé de la structure. Cette méthode permet de suivre des défauts à l'exemple des déformations plastiques, corrosions, propagations de fissures, et bien d'autres dans les structures soumises à différentes contraintes externes (contraintes mécaniques, chimique et bien d'autres). Toutefois, cette méthode présente comme inconvénient la présence des bruits dans les données prélevées, ce qui a pour effet d'affecter la clarté des signaux mesurés.

Contrairement à l'approche par émission acoustique, l'approche par ultrason [30], [31] est une méthode active de contrôle de structure non-destructive qui consiste à émettre une onde ultrasonore par un transducteur placé à la surface de la structure à surveiller. L'utilisation de cette méthode permet de détecter et de spécifier la taille des défauts à l'intérieur d'une structure par l'analyse de l'onde ultrasonore transmise et réfléchiée dans la structure. L'une des applications les plus connues de la mise en pratique de l'onde ultrasonore est l'onde de Lamb [32][33], [34]. Les ondes de Lamb pénètrent dans la structure mince (structure de faible épaisseur) et la présence d'un endommagement entraîne une variation des propriétés de l'onde

(vitesse de propagation, réflexion de l'onde). L'analyse par la comparaison des caractéristiques de l'onde, à savoir telles que l'amplitude, la phase, etc. dans les états sains et endommagés permet de réaliser la surveillance de la santé de la structure. Les ondes de Lamb présentent de faibles atténuations, ce qui leur permet de rechercher les défauts dans une épaisseur de structure assez large et de ce fait participer à la réduction du nombre de capteurs utilisés dans le but de simplifier les systèmes d'évaluation.

**Méthode de vibration** : L'évaluation des dommages sur les structures basées sur la méthode de vibration est généralement une approche active. Elle repose sur le fait que la présence d'un endommagement entraîne des modifications des propriétés physiques de la structure, à savoir la rigidité, l'amortissement, la masse [35][26], [36]. Les propriétés de la structure étant fortement liées aux caractéristiques dynamiques de la structure, la réponse dynamique de celle-ci permet d'extraire des informations sur la nature de l'endommagement présent. Le traitement de la réponse dynamique se fait par l'analyse des caractéristiques telles que les fréquences propres, les courbures modales, les déformations modales et/ou les fonctions de réponse en fréquence. Il existe dans la littérature une variété d'approches de l'évaluation des dommages (SHM) se basant sur la méthode vibratoire, le lecteur désireux d'avoir plus d'informations sur ces méthodes pourra s'orienter vers les références [37].

**Méthode par l'impédance électromécanique** : La réalisation de la surveillance de santé des structures par l'approche de mesure de l'impédance électromécanique (IEM pour Electro-mechanical Impedance) consiste principalement à utiliser des constituants piézoélectriques fixés sur la structure sous test et qui joueront simultanément le rôle de capteur et actionneur [22], [38]. Dû à son fort coefficient de couplage électromécanique, le PZT fait partie des matériaux piézoélectriques largement préférés dans l'application de cette méthode. Le principe de surveillance de santé de la structure consiste à la réalisation d'une mesure l'impédance électromécanique qui reflète directement la rigidité structurelle du capteur piézoélectrique. À la suite, une comparaison des spectres fréquentiels de quelques centaines de kHz enregistrés à différents moments au cours du temps de la pièce permet de révéler ses dégradations [23]. Une longueur d'onde plus faible que l'endommagement permet une meilleure observation du défaut.

**Tableau récapitulatif de quelques capteurs utilisés en SHM :** Le tableau I.1 répertorie quelques capteurs de détection d'endommagement en système SHM utilisés dans treize articles.

Tableau I. 1 : Synthèse de quelques techniques de détection d'endommagement en SHM

| Article                           | Application          | Capteurs  | Méthode                             | Résultats                     |
|-----------------------------------|----------------------|---|-------------------------------------|-------------------------------|
| Mizutani <i>et al</i> [39]        | Stratifiés<br>CFRP   | Fibre optique   | Déformation                         | D+ - L+                       |
| Yoji Okabe <i>et al.</i><br>[11]  | Stratifiés<br>CFRP   | Fibre optique   | Déformation                         | D+ - L+                       |
| Tsuda <i>et al.</i> [10]          | Composites           | Fibre optique   | Déformation                         | D+ - L+                       |
| chittaranjan <i>et al</i> [14]    | Béton                | Piézoélectrique   | Déformation                         | D+ - L+                       |
| Fabrico G <i>et al</i> [15]       | Plaque               | Piézoélectrique   | Déformation                         | D+ - L+                       |
| J W Ayres <i>et al</i> [38]       | Joint de<br>pont     | Piézoélectrique   | Déformation                         | D+ - L-                       |
| Kessler S <i>et al</i> [33]       | Composites           | Piézoélectrique   | Déformation                         | D+ - L+                       |
| Giurgiutiu V <i>et al</i><br>[32] | Plaquettes           | Piézoélectrique   | Déformation                         | D+ - L-                       |
| Bastianini <i>et al.</i> [40]     | Pont                 | Fibre optique   | Déformation                         | D+ - L+                       |
| Chance <i>et al.</i> [41]         | Poutre               | Accéléromètres<br>Capteur de déplacement<br>Jauges de déformation | Courbure<br>Courbure<br>Déformation | D- - L-<br>D- - L-<br>D+ - L+ |
| Perchard <i>et al.</i> [42]       | Plaque<br>Cantilever | Accéléromètres<br>Jauges de déformation                           | Déformée<br>Modale<br>FRF           | D+ - L+<br>D+ - L-            |

Les abréviations D et L renvoient respectivement à la détermination et la localisation de l'endommagement. Les signes (+) et (-) devant D et L indiquent que la méthode a fourni des résultats de détection et de localisation satisfaisants et le contraire.

### I.A.3. Les enjeux de la thèse

L'exploitation d'un réseau de capteurs intelligents intégré dans la structure à monitorer à l'exemple de celui du système nerveux dont dispose le corps humain, favorise le contrôle de

l'intégrité des matériaux (aciers, composites, etc.). Les mesures à effectuer mettent à disposition un grand choix de capteurs de déformation intelligents et sophistiqués à intégrer sur la structure. Le compromis associé à la mise en œuvre d'une telle technologie est qu'elle nécessite la mise en place d'une procédure de fabrication et d'installation complexe, en plus d'avoir des coûts élevés. Toutefois, l'amélioration de la conception des capteurs, jusqu'à leur fixation sur la structure à monitorer, reste une étude très importante qui pourrait un jour faire des systèmes SHM une technologie utilisée pour minimiser de manière significative les incertitudes sur l'état d'une structure.

L'objectif principal du travail présenté dans ce mémoire de thèse consiste donc à étendre les études liées aux capteurs à ondes acoustiques de surface utilisés pour la surveillance de santé des structures. On introduit la conception d'un nouveau type de capteur à ondes élastiques léger, simple à fabriquer et peu coûteux, basé sur le principe piézoélectrique et réalisé directement sur un substrat métallique. Le but ici est d'éviter l'utilisation de l'adhésif servant à fixer les dispositifs SAW conventionnels sur la pièce sous test et par se faire améliorer les signaux contenant les informations sur l'état de la structure monitorée sans la présence des complexités et d'éventuelles erreurs de mesure que peut fournir l'utilisation de la colle.

## I.B. Dispositifs à ondes acoustiques de surface : généralités et technique

### I.B.1. Dispositifs SAW

La technologie à ondes élastiques de surface (*SAW : Surface acoustic waves*) regroupe en son sein un ensemble de techniques présents dans une large gamme d'application. Ils présentent l'avantage d'être pertinents dans les situations de miniaturisation et de contrôle par la mesure en continu. Son principe de fonctionnement repose en principalement trois concepts qui sont la piézoélectricité, les ondes élastiques (acoustiques) et les transducteurs interdigités.

#### I.B.1.1. La piézoélectricité : généralités

**Principe :** Historiquement, Jacques et Pierre curie ont en 1880 découverts la piézoélectricité par l'observation de la polarisation de certains cristaux sous l'effet d'une pression mécanique [43], [44]. Le phénomène de piézoélectricité couple l'énergie électrique et l'énergie mécanique. L'effet piézoélectrique est la capacité de certains matériaux à générer un potentiel électrique sous l'effet d'une sollicitation mécanique (effet piézoélectrique direct) [45], [46], et inversement à produire une contrainte mécanique sous l'effet d'un champ électrique (effet piézoélectrique inverse) [47]. Les matériaux tels que le quartz, la topaze ont permis la découverte du phénomène de la piézoélectricité. Toutefois, celui-ci est pris en compte dans les matériaux dont les barycentres des charges positives et négatives peuvent se séparer sous l'effet d'une sollicitation externe. Ceci permet d'affirmer que le phénomène de la piézoélectricité existe dans un ensemble assez large de matériaux. L'illustration du principe de la piézoélectricité suivant le principe direct et inverse est faite suivant l'exemple d'une maille hexagonale (Figure 1.5).

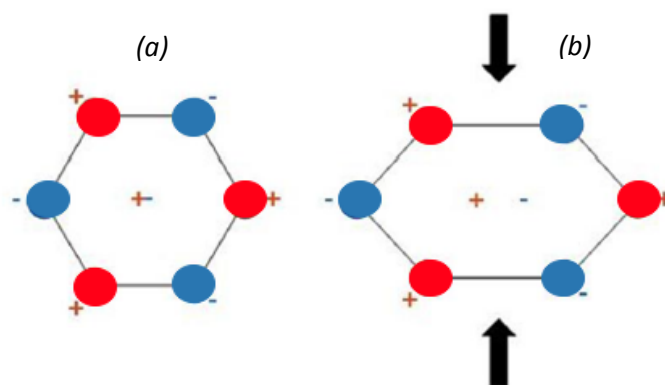


Figure 1. 5 : Principe de la piézoélectricité (a) avant sollicitation extérieure les barycentres sont confondus (b) après sollicitation extérieure, les barycentres se séparent : apparition d'un moment dipolaire [46].

L'utilisation et les recherches sur la piézoélectricité se sont accentuées durant la Première Guerre mondiale avec l'invention des sonars. D'autre part, l'effet piézoélectrique apparaît dans diverses applications du quotidien. L'on retrouve l'effet piézoélectrique direct dans les applications telles l'allume-gaz (briquet) et les capteurs de pression servant dans les secteurs de l'automobile ou aéronautique. L'effet piézoélectrique inverse se retrouve quant à lui dans la conception d'actionneurs dont l'extrême précision de positionnement lui est favorable. On peut citer par exemple les têtes de lecture d'un disque dur magnétique, les systèmes d'analyse AFM (Atomic Force Microscopique) et STM (Scanning Tunneling Microscope).

**Matériaux piézoélectriques :** En dehors des matériaux tels que le quartz, la topaze, la tourmaline, laberlinitite ou encore le saccharose qui ont permis la mise en évidence du phénomène de la piézoélectricité, il existe cinq grandes catégories de matériaux piézoélectriques, à savoir les cristaux, les céramiques, les couches minces à base d'AlN (nitrure d'aluminium) ou de ZnO (Oxyde de zinc), les polymères et les piézo-composites (Tableau I-2). Chaque famille dispose des propriétés physiques, thermiques, optiques, mécaniques, électriques et élastiques particulières qui se sont liées aux constantes et aux coefficients spécifiques tels que les constantes élastiques et coefficients de couplage électromécanique. Le milieu de propagation et la coupe cristallographique permettent de définir les constantes élastiques des matériaux. En fonction des applications visées, le choix des matériaux piézoélectriques diffère. Les paramètres tels que la vitesse de propagation des ondes de surface, le coefficient de couplage électromécanique et de température caractérisent le matériau piézoélectrique utilisé.

La vitesse de propagation des ondes élastiques de surface  $v$  qui est reliée à la fréquence est donnée par la formule ci-dessous :

$$f = \frac{v}{\lambda} \quad (1.1)$$

Avec  $\lambda$  la longueur d'onde du dispositif (se référer au paragraphe les transducteurs interdigités).

Le coefficient de couple électromécanique ( $K^2$ ) caractérise l'efficacité de la conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique et vice-versa. Il se calcule en % et est déterminé par

la formule suivante :

$$K^2 = 2 \frac{v_0 - v_m}{v_0} \quad (1.2)$$

Avec respectivement  $v_0$  et  $v_m$  la vitesse des ondes élastiques de surface en surface libre et métallisée. La détermination expérimentale du facteur  $K^2$  peut se faire en utilisant la formule suivante :

$$K^2 = 2 \frac{f_r - f_a}{f_r} \quad (1.3)$$

Avec  $f_a$  et  $f_r$  les fréquences d'antirésonance et de résonance.

Le coefficient de température /en fonction de la fréquence (TCF : Temperature Coefficient of Frequency) traduit la dérive de la fréquence sous l'effet de la température. Les dispositifs présentant une bonne stabilité en température disposent d'un TCF proche de 0. Pour réaliser des capteurs de température avec une grande sensibilité, un TCF élevé en valeur absolue est souhaitable. Ce coefficient est donné par l'expression suivante [48] :

$$TCF = \frac{1}{f_0} \frac{\Delta f}{\Delta T} \quad (1.4)$$

Avec  $f_0$  la fréquence fondamentale de l'onde élastique étudiée et  $\Delta f (f_0 - f_1)$  la variation fréquence entre deux instants T0 et T1 différents de la température.

Tableau I. 2 : Propriétés des matériaux piézoélectriques les plus utilisés

| Matériau                             | Vitesse (m/s) | $K^2$ (%) | TCF (ppm/°C) | Avantages   | Inconvénients                              |
|--------------------------------------|---------------|-----------|--------------|---|--|
| Quartz ST-X [49], [50]               | 3487          | 0,11      | 0            | Peu couteux   | Faible valeur de couplage électromécanique |
| Y-Z LiNbO <sub>3</sub> [50]          | 3487          | 4,8       | 94           | -Fort couplage électromécanique<br>-Faible niveau d'atténuation | -TCF élevée<br>-Fragile                    |
| 128Y-X LiNbO <sub>3</sub> [49], [50] | 3992          | 5,6       | 75           |   |  |
| 41Y-X LiNbO <sub>3</sub> [50]        | 4792          | 17,2      | 50           |   |  |

|   |              |           |          |   |  |
|---|--------------|-----------|----------|---|--|
| Y-Z LiTaO <sub>3</sub><br>36°Y-X<br>LiTaO <sub>3</sub> [50] | 3230<br>4160 | 0,74<br>5 | 35<br>32 | -Fort couplage<br>électromécanique<br>-Bon compromis<br>TCF/K <sup>2</sup>  | Fragile  |
| (0, 138.5,<br>26.8)<br>LGS [51]                             | 2734         | 0,34      | 1        | Possibilité d'utilisation<br>à très haute température   | Fortes pertes en<br>propagation à<br>haute température   |
| Titano-<br>Zirconate de<br>Plomb : PZT<br>[52]              | 3900         | 20-<br>35 | -1       | -Très fort coefficient de<br>couplage<br>-Forte constante<br>piézoélectrique  | -Gravure difficile<br>-Nécessite une<br>polarisation afin<br>d'observer l'effet<br>piézoélectrique |
| (0001) AlN<br>[53][54]                                      | 5607         | 0,30      | 19       | - Isolant électrique<br>- Fonctionnement à<br>haute fréquence et à<br>température élevée.<br>- Compatible avec la<br>technologie CMOS<br>- Peut être déposé sur un<br>substrat non<br>piézoélectrique | Faiblement<br>piézoélectrique  |
| ZnO [54],<br>[55]   | 2645         | 1,8       | 15       | Bon couplage<br>électromécanique  | Conducteur à<br>haute température  |
| Polyfluorure<br>de<br>vinylidène :<br>PVDF                  | 2600         | 15        | -        | Flexible  | Forte atténuation<br>des ondes   |

Pour les capteurs réalisés dans ces travaux de thèse, nous avons utilisé les couches minces piézoélectriques de nitrure d'aluminium et d'oxyde de zinc. Ils seront présentés plus en détail dans le chapitre suivant.

### I.B.1.2. Les ondes élastiques et transducteurs

**Les ondes élastiques :** L'on définit une onde comme étant la modification du système physique d'un milieu matériel ou immatériel. Ces ondes se propagent dans des directions diverses à la suite d'une sollicitation localisée et à des vitesses qui dépendent du milieu matériel traversé. Dans un milieu élastique, la propagation d'une perturbation peut ainsi traverser le milieu sans le modifier durablement. La perturbation se fait de proche en proche dans le milieu par transfert d'énergie sans transfert de matières à l'exemple des ondes sonores, les ondes sismiques ou les vagues. L'on distingue deux types d'ondes dont les ondes mécaniques et les ondes électromagnétiques. Les ondes mécaniques qui sont mises en évidence par la propagation d'une

perturbation dans un milieu élastique (ondes élastiques) retiendront tout particulièrement notre attention.

Il existe différents types d'ondes élastiques, chacune d'elles présente un déplacement bien spécifique. On regroupe les ondes élastiques en deux catégories, à savoir les ondes de volume lorsque la propagation des ondes se fait au sein du matériau et les ondes de surface lorsque la propagation des ondes reste confinée en surface.

**Les ondes de volume** : elles se propagent à l'intérieur de la matière et présentent des vitesses qui augmentent avec la profondeur. Elles sont regroupées en deux catégories, à savoir les ondes de compression encore appelées ondes primaires et les ondes de cisaillement aussi appelées ondes secondaires.

- Les ondes primaires (ondes longitudinales ou ondes P) se déplacent en mouvement de compression-dilatation, et provoquent des déplacements d'avant en arrière des particules et parallèle à la direction de propagation de l'onde dans le milieu (Figure 1.6a).
- Les ondes secondaires (ondes de cisaillement ou ondes S) se déplacent perpendiculairement à la direction de propagation de l'onde à des vitesses plus faibles que celles des ondes longitudinales (Figure 1.6b).

**Les ondes de surface** : elles sont moins rapides que les ondes de volume, mais disposent d'une amplitude plus forte. Parmi les ondes de surface les plus répandues, on distingue les ondes de Rayleigh et les ondes de Love.

- Les ondes de Rayleigh furent découvertes par l'onde Rayleigh en 1885 [56], [57]. Elles sont un déplacement complexe à la fois vertical et horizontal. Les ondes de Rayleigh combinent les ondes longitudinales et transverses verticales. Elles possèdent une polarisation elliptique avec une profondeur de pénétration de l'ordre d'une longueur d'onde (Figure 1.6c). Les propriétés ondulatoires telles que les pertes en propagation et la vitesse de propagation dépendent des caractéristiques physiques du milieu dans lequel elles se propagent. Grâce à leur facilité à être générées et détectées à la surface du matériau piézoélectrique, les ondes Rayleigh sont très employées dans la réalisation des dispositifs à ondes acoustiques de surface. Ces ondes feront principalement l'objet d'étude dans ce manuscrit.

- Les ondes de love quant à elles se déplacent de façon purement transversale par un ébranlement horizontal du matériau (Figure 1.6d). Elles ont été décrites mathématiquement par le britannique A.E.H. Love en 1911 [58]–[60].

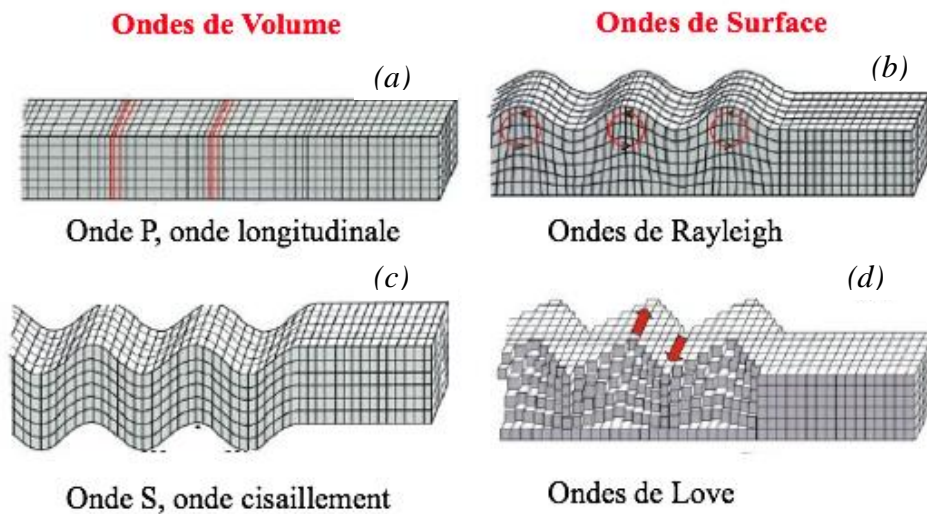


Figure 1. 6 : Illustration du déplacement des particules d’ondes de volume : (a) onde longitudinale, (b) onde de cisaillement [61]. Ondes de surface : (c) onde de Rayleigh [62], (d) onde de Love [61].

Le tableau I.3 donne la liste non exhaustive des autres types d’ondes de surface qui peuvent être rencontrées.

Tableau I. 3 : Liste des principales ondes de surfaces

| Nom de mode                    | Structure nécessaire                              |
|--------------------------------|---|
| Sezawa                         | Matériau massifs et multicouches                  |
| Lamb                           | Onde de Rayleigh dans une membrane                |
| Bleustein-Gulyaev              | Matériaux piézoélectrique massifs et multicouches |
| Shear Horizontal (SH)          | Matériaux massifs et multicouches                 |
| Surface transverse waves (STW) | Matériaux massifs et multicouches                 |

**Les transducteurs interdigités :** Les dispositifs à ondes acoustiques de surface prennent tout leur sens à partir de 1965 à l’université de Californie par la découverte des transducteurs à peigne interdigités grâce à White *et al* [62]. Les transducteurs interdigités, abrégés IDTs, sont

déposés par-dessus le matériau piézoélectrique servant de substrats en fine couche métallique de quelques nanomètres d'épaisseur (Figure 1.7a) et c'est par leur biais que sont générées et détectées les ondes acoustiques de surface. Ils permettent un lien entre le phénomène de la piézoélectricité direct et inverse, tout en favorisant l'exploitation des propriétés des matériaux piézoélectriques de façon simple. Les IDTs sont composés d'électrodes construites sous forme de peigne porté alternativement à des potentiels positifs (+VE) et négatifs (-VE) dans le but de créer des ondes de surface (Figure 1.7b). Les IDTs à partir de la période spatiale entre deux paires d'électrodes successives définissent également la longueur d'onde  $\lambda$  du système.

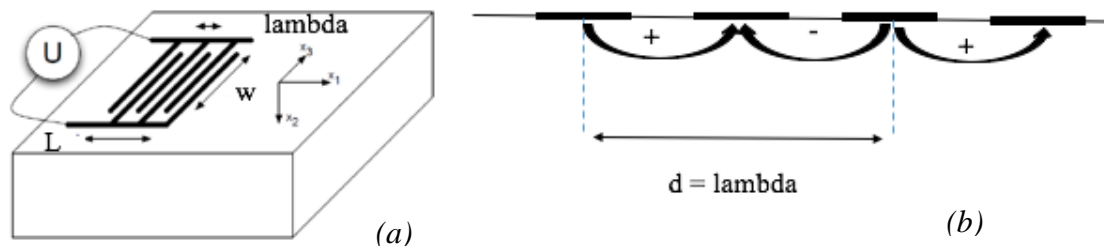


Figure 1. 7 : (a) Excitation des ondes acoustiques de surface à l'aide de peignes interdigités [63].

Il est important de noter que les paramètres tels que le choix des matériaux, l'épaisseur et la configuration (géométrie) des métaux utilisés comme IDTs dépendent grandement des applications visées.

Les matériaux généralement utilisés comme IDTs sont récapitulés dans le tableau I.4. On retrouve dans ce tableau les propriétés des métaux qui sont largement utilisés dans la conception de la géométrie des transducteurs interdigités. L'aluminium est l'un des matériaux les plus utilisés puisqu'il présente le meilleur compromis, à savoir une faible densité et une faible résistivité électrique. Il favorise ainsi une bonne limitation de l'atténuation de l'onde lors de sa propagation. Il permet de limiter les phénomènes de réflexion des ondes entre les IDTs et le substrat, car il dispose d'une impédance acoustique similaire à celles de la plupart des substrats piézoélectriques utilisés.

Tableau I. 4 : Métaux utilisés comme IDTs et leurs propriétés

| Métal          | Densité (Kg/m <sup>3</sup> ) | Température de fusion | Résistivité (Ω.m) |
|----------------|------------------------------|-----------------------|-------------------|
| Aluminium (Al) | 2,5                          | 660                   | 2,7               |
| Cuivre (Cu)    | 8,4                          | 1083                  | 1,7               |
| Or (Au)        | 18,3                         | 1063                  | 2,3               |
| Platine (Pt)   | 20,2                         | 1769                  | 10,6              |

Le choix de l'épaisseur du matériau des IDTs est un paramètre important et dépend des applications visées. En effet, lorsque l'épaisseur est trop faible, la résistance électrique des électrodes devient élevée et cela entraîne une mauvaise conversion de l'énergie. Si l'épaisseur est élevée, l'onde se propage en grande partie dans le métal, entraînant un amortissement de l'onde. Elle est généralement de l'ordre de la centaine de nanomètres.

Les configurations (géométries) d'IDTs diffèrent suivant les applications visées. On distingue 2 familles de dispositifs SAW : les résonateurs et les lignes à retard.

**Les résonateurs SAW :** Ils sont également répartis en deux catégories de dispositifs SAW à savoir les résonateurs à un port (mono-port) ou à double port (bi-port).

- Les résonateurs à un port sont constitués d'un seul IDT et de deux réflecteurs (miroirs de Bragg) à chaque extrémité. L'onde est générée et émise par l'IDT central, les réflecteurs servent à renvoyer l'onde « émise par l'IDT vers elle-même et ce grâce à des réflexions multiples permet de piéger l'énergie dans la zone de l'IDT. Enfin, l'onde est reconvertie par l'IDT central (Figure 1.8). Ces résonateurs combinés en configuration ladder permettent de réaliser des filtres avec de très faibles pertes. On les retrouve dans les principaux systèmes de télécommunication et équipent notamment les smartphones.

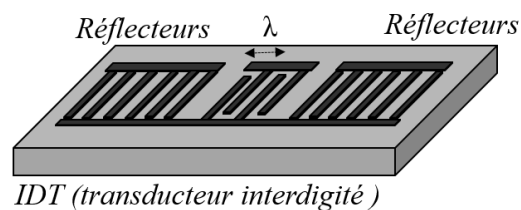


Figure 1. 8 : Configuration d'un résonateur SAW monoport.

- Les résonateurs à deux ports sont constitués d'un IDT d'entrée et d'un IDT de sortie et de deux réflecteurs disposés de part et d'autre des IDTs. L'IDT d'entrée génère l'onde acoustique et l'IDT de sortie récupère cette onde. (Figure 1.9). Ces résonateurs sont généralement utilisés pour réaliser des oscillateurs.

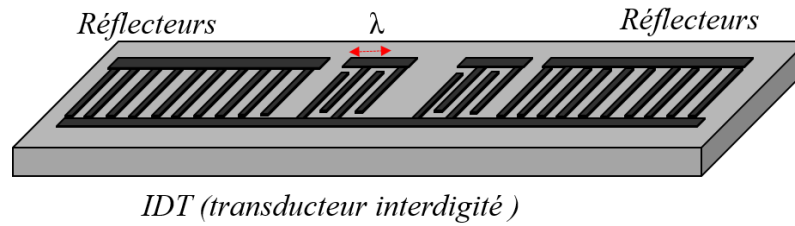


Figure 1. 9 : Configuration d'un résonateur SAW double-ports.

Le facteur de couplage électromécanique est un facteur très important dans la conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique et inversement. Toutefois, dans la configuration résonateur SAW le besoin de ce facteur est limité, ce qui permet d'utiliser les matériaux piézoélectriques présentant un faible couplage. Un facteur de qualité très élevé sera privilégié.

**Les lignes à retard :** elle est principalement constituée de deux paires d'électrodes (transducteurs bidirectionnels) sous forme de peignes interdigités construits sur un substrat piézoélectrique avec l'une servant à l'émission de l'onde (IDT d'entrée) l'autre la réception de l'onde (IDT de sortie) (voir Figure 1.9). Les deux IDTs sont à distance  $d$  (gap) l'un de l'autre. Le signal d'entrée (signal électrique) est converti en signal mécanique par le transducteur émetteur (piézoélectricité inverse), le signal mécanique va induire des déformations (dilatations et compression) dans le matériau piézoélectrique durant sa propagation et il sera reconverti en signal électrique par le transducteur récepteur (piézoélectricité directe). Des absorbeurs sont positionnés aux extrémités de part et d'autre des IDTs (Figure 1.10) dans le but d'éviter les phénomènes de réflexions provenant des bords du substrat ou de dispositifs voisins.

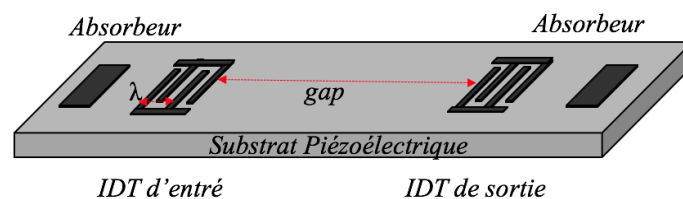


Figure 1. 10 : Configuration d'une ligne à retard.

Les paramètres tels que les propriétés du matériau piézoélectrique, le gap, l'état de surface des matériaux, les transducteurs interdigités et bien d'autres, influence énormément la réponse caractéristique du dispositif SAW. La fréquence fondamentale est définie par la formule ci-dessous :

$$v_{\text{SAW}} = \lambda \cdot f = f \cdot 2d \quad (1.5)$$

Avec  $f$ ,  $v_{\text{SAW}}$ ,  $\lambda$ ,  $d$  représentant respectivement la fréquence (Hz) de fonctionnement du dispositif, la vitesse (m/s) de propagation de l'onde de surface dans le matériau piézoélectrique, la longueur d'onde et la périodicité des doigts (m)

**Ligne à retard réfective** : IL s'agit d'une configuration particulière des lignes à retard qui autorise une interrogation sans fil. Il est constitué d'un IDT avec des réflecteurs multiples. Aussi appelé ID-tags, il permet de fournir une identification par un codage obtenu au moyen du nombre et de la position des réflecteurs (Figure 1.11). Leur géométrie favorise la réflexion d'une partie de l'onde.

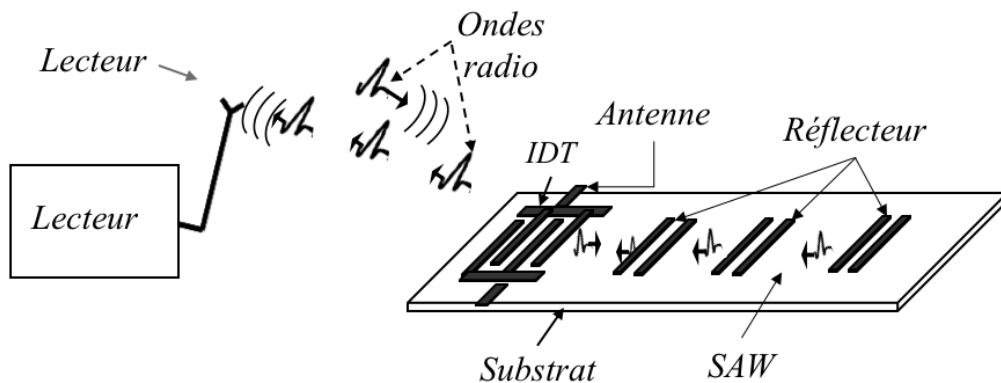


Figure 1. 11 : Configuration d'une ligne à retard réfective

### I.B.1.3. Dispositif SAW : applications

Les dispositifs à ondes élastiques de surface sont massivement utilisés comme filtres, résonateurs ou lignes à retard dans les objets communicants du quotidien. Plusieurs milliards d'unités SAW sont ainsi fabriquées chaque année. Par ailleurs, la fréquence de résonance et le délai de transmission des signaux des dispositifs SAW peuvent être très sensibles aux paramètres physiques de l'environnement : les dispositifs SAW ont été intensivement étudiés pour réaliser des capteurs miniatures permettant de mesurer une grande variété de paramètres tels que la température, la concentration d'une espèce en solution, la composition d'une atmosphère, la pression, la déformation, le champ magnétique, les radiations...

Les capteurs SAW présentent une valeur ajoutée très importante : ils sont entièrement passifs (sans batterie, sans électronique embarquée) et peuvent être enregistrés en utilisant des techniques sans fil. Les capteurs SAW constituant donc une solution particulièrement adaptée pour les sans-fils à haute température, où l'électronique à base de silicium n'est plus des mesures opérationnelles ( $T > 250^{\circ}\text{C}$ ). C'est dans ces conditions, pour les mesures en conditions difficiles, là où câbles et électronique embarquée sont tous deux proscrits (mesure sur pièce, en mouvement, à haute température, en milieu corrosif, sous haute pression, capteur inaccessible) que la solution SAW présente un intérêt majeur.

**Les filtres SAW en télécommunication :** En 1969, fut réalisé le premier dispositif à ondes acoustiques de surface sur un substrat de Quartz [49], [64]. Dans les années qui ont suivi, les dispositifs SAW ont équipé différents systèmes militaires ou civils. On peut citer par exemple des filtres de bande pour les applications radar ou des lignes à retard pour les récepteurs TV. Ils connaissent leur véritable essor dans les années 80, par la croissance industrielle des télécommunications dont ils occupent une place importante comme composants indispensables. En effet, grâce à leurs caractéristiques, à savoir leur petite taille, leur faible coût et leur grande plage fréquentielle, les composants constituent depuis plusieurs années l'un des plus indispensables éléments de filtrage utilisé en système de radiocommunication mobile. Les filtres SAW offrent de meilleures précisions comparés aux filtres conventionnels en plus d'être passifs.

## Les capteurs

**Définition et principe de fonctionnement :** Les capteurs sont des dispositifs qui convertissent en grandeur utilisable (signal électrique) une grandeur physique (mesurande) (Figure 1.12).



Figure 1. 12 : Principe du capteur.

À l'inverse des composants SAW utilisés dans les systèmes de communication et qui requièrent une grande stabilité en fréquence, les capteurs SAW exploitent quant à eux la variation fréquentielle. Dans les dispositifs SAW, l'onde acoustique concentre son énergie en surface avec une profondeur de pénétration d'une longueur d'onde, cela la rend parfaitement sensible aux perturbations environnementales comme le mentionne la formule :

$$S_m = -K(\sigma) \frac{2}{\rho\lambda} \quad (1.6)$$

Avec  $\rho$ ,  $\lambda$  et  $K(\sigma)$  représentant respectivement la masse volumique du matériau, la longueur d'onde de Rayleigh et une constante dépendant du coefficient de Poisson du matériau piézoélectrique.

Les caractéristiques des dispositifs SAW font d'eux des capteurs intéressants pour des évaluations des perturbations en température, pression, humidité et chimique. L'on distingue deux grandes catégories de modification, à savoir la déformation de la géométrie qui entraîne la modification de la distance de parcours et le changement des paramètres élastiques du matériau. Ces modifications sont exploitées dans les perturbations suivantes :

- Sous l'effet de la variation de température, le matériau se dilate ou se contracte ce qui entraîne une modification des propriétés physiques du matériau et ainsi fait varier la vitesse de propagation et la distance de parcours de l'onde (le paragraphe de sensibilité en température).
- Sous l'effet de variation de la géométrie du matériau par l'action d'une contrainte physique, la vitesse varie par modification des coefficients élastiques et piézoélectriques (cette partie sera plus détaillée dans le paragraphe sur la sensibilité à la déformation).
- L'augmentation de la masse par le dépôt d'espèces gazeuses ou la perturbation du champ électrostatique en surface entraîne la modification des coefficients élastiques ce qui fait varier la vitesse de propagation des ondes.
- L'ajout d'une couche de liquide ou solide sur la surface entraîne la modification des propriétés physiques de toute la structure et donc peut engendrer des modes à des fréquences bien précises. La couche mince qui sert de couche guidant influence fortement la vitesse des différents modes générés.

## Sensibilité aux perturbations des capteurs SAW

**Sensibilité en température** : La variation de la température dans un milieu matériel entraîne deux phénomènes principaux, à savoir :

- La dilatation ou la contraction du matériau qui a pour conséquence la modification de la période spatiale des IDTs ce qui influe sur la fréquence du dispositif.
- La modification des propriétés physiques du matériau tel que la densité et les constants élastiques ce qui influe sur la vitesse de propagation de l'onde.

Cette variation en fonction de la température des coefficients élastiques, de la permittivité et des coefficients piézoélectriques est donnée sous forme de série de Taylor dans laquelle les expressions des coefficients mentionnés sont dépendantes de la température. La relation en série de Taylor des constantes élastiques  $C_{ijkl}$  en fonction de la température est donnée par :

$$\text{Pour tout } (i, j, k, l), \quad C_{ijkl} = C_{ijkl}(T_0) + \frac{dC_{ijkl}}{dT}(T - T_0) + \frac{1}{2} \frac{d^2C_{ijkl}}{dT^2}(T - T_0)^2 + \dots$$

$$\Leftrightarrow C_{ijkl}(T) = C_{ijkl}(T_0)[1 + \theta_1^c(T - T_0) + \theta_2^c(T - T_0)^2 + \dots] \quad (1.7)$$

$$\text{Avec : } \theta_1^c = \frac{1}{C_{ijkl}} \frac{dC_{ijkl}}{dT}, \quad \text{et} \quad \theta_2^c = \frac{1}{2} \frac{1}{C_{ijkl}} \frac{d^2C_{ijkl}}{dT^2}$$

Avec  $T_0$  la température de référence à (20°C ou 25°C).  $\theta_1^c$  et  $\theta_2^c$  sont respectivement les coefficients du premier et du second ordre des constantes élastiques. L'extraction des coefficients piézoélectriques  $e_{ijk}$  et de la permittivité  $\epsilon_{ij}$  respecte aussi les mêmes principes.

La variation fréquentielle due à la variation de la température est donnée par la relation :

$$\frac{1}{f} \frac{df}{dT} = \frac{1}{v} \frac{dv}{dT} - \frac{1}{\lambda} \frac{d\lambda}{dT} \quad (1.8)$$

Avec  $\frac{1}{f} \frac{df}{dT}$  étant défini comme étant le TCF (Temperature coefficient of Fréquency) et permet

d'évaluer la sensibilité en température d'un dispositif. Le terme  $\frac{1}{v} \frac{dv}{dT}$  traduit l'expression du

TCV (Temperature coefficient of velocity) qui donne la sensibilité en vitesse de déplacement

de l'onde en fonction de la température et le terme  $\frac{1}{\lambda} \frac{d\lambda}{dT}$  aussi noté  $\alpha$  traduit la dilatation thermique du substrat. La relation précédente peut encore se réécrire sous la forme :

$$TCF = TCV - \alpha \quad (1.9)$$

Le choix des matériaux dans le cadre de la sensibilité en température se fait en fonction des applications recherchées.

- Pour des applications nécessitant une stabilité à température ambiante (environ 25°C), le choix du quartz (coupe ST-X) est généralement approprié, car celui-ci possède un TFC = 0 ppm/K à 25°C. Tout en allant dans le même objectif, une configuration permet d'avoir une compensation en température avec un TCF proche de 0 à savoir la compensation par multicouche. Cette configuration permet une compensation grâce à la superposition de couche présentant des valeurs de TCF signes opposés.
- Pour des applications nécessitant une grande sensibilité à la température, un TCF en valeur absolue élevée est généralement demandée. On peut le retrouver dans les matériaux tels que le LiNbO<sub>3</sub> pour la coupe Y-Z ou coupe Y+128°-X qui présentent tous deux des TCF respectif de -93,3 et -72,02 ppm/K.

Le tableau I.5 ci-dessous, donne les valeurs de K<sup>2</sup>, des vitesses et du TCF de quelques matériaux piézoélectriques.

Tableau I. 5 : Propriétés SAW de quelques matériaux

| Matériau                    | V <sub>0</sub> (m/s) | K <sup>2</sup> (%) | TCF (ppm/K) |
|-----------------------------|----------------------|--------------------|-------------|
| Quartz ST-X                 | 3158.5               | 0.105              | 0           |
| LiNbO <sub>3</sub> Y+128°-X | 3994.8               | 5.34               | -72.02      |
| LiNbO <sub>3</sub> Y-Z      | 3487.8               | 4.817              | -93.4       |
| ZnO                         | 2500                 | >1[65]             | -40[66]     |
| AlN                         | 5600                 | 0,3[53]            | 25[67]      |

La mesure de la température d'un objet ou d'un milieu est requise pour pratiquement toutes les applications. En effet, la mesure d'autres paramètres physico-chimiques nécessite souvent la connaissance de la température pour une évaluation précise. Les innovations sur l'évaluation de la température entraîneraient donc des retombés économiques très importantes.

Autres que les capteurs SAW de température existent différents types de capteurs aussi performants et qui ont fait leurs preuves. On peut les classer suivant deux catégories, à savoir les capteurs avec contact et sans contact. Dans la catégorie des capteurs thermiques avec contact, l'on peut retrouver :

- **Les thermocouples** : Ils fonctionnent suivant l'effet Seebeck (effets thermoélectriques), c'est-à-dire la manifestation de courant dans un circuit constitué de deux métaux (jonctions) dont les deux soudures se trouvent à des températures différentes. Les alliages thermocouple ont généralement l'apparence de fils. Il se produit une tension variable lorsque la jonction des deux métaux est chauffée, ce qui peut être converti en température. La gamme de températures de fonctionnement des thermocouples s'étend entre  $-200^{\circ}\text{C}$  à  $700^{\circ}\text{C}$  (ils peuvent aller au-delà de  $1200^{\circ}\text{C}$ ). Ils sont robustes tout en restant bon marché. De nombreux secteurs utilisent cette technologie, on peut citer le secteur industriel, le secteur électroménager à l'exemple des appareils domestiques (coupe-gaz du chauffe-eau) et bien d'autres.
- **Les thermomètres à dilatation** : ils fonctionnent suivant le principe selon lequel la dilatation d'un liquide, d'un solide ou d'un gaz sous l'effet de la chaleur entraîne un déplacement mesurable. Ces dispositifs sont les plus anciens, les plus simples et les moins performants. Dans le thermomètre à dilatation liquide, la variation de la température s'accompagne de variation du volume du liquide, cela est généralement donné par la relation suivante :

$$V = V_0(1 + \alpha.t) \quad (1.10)$$

Avec  $V$ ,  $V_0$  et  $\alpha$  représentant respectivement le volume du liquide à  $t^{\circ}\text{C}$ , le volume liquide à  $0^{\circ}\text{C}$  et le coefficient de dilatation du liquide en  $^{\circ}\text{C}^{-1}$ .

On retrouve ce fonctionnement de dilatation liquide dans les applications comme les thermomètres remplis de mercure ou d'alcool.

- **Les thermomètres à résistance variable** : Ils utilisent la propriété des métaux à devenir résistants lorsqu'ils sont traversés par un courant à mesure que leur température augmente. Les métaux choisis pour la conception des sondes à résistance sont pris en compte en fonction du milieu, du domaine de température de son emploi et des qualités particulières recherchées. L'on peut citer comme métaux le nickel, le cuivre, l'indium, et enfin comme le plus couramment utilisé, c'est-à-dire le platine (Pt). On parle couramment de capteur de température Pt100 en référence à une résistance de platine dont la valeur à  $0^{\circ}\text{C}$  est égale à  $100 \Omega$ .

**Sensibilité à la déformation** : Comme précédemment mentionné, la variation en température affecte les constantes élastiques, les valeurs de piézoélectricité et de permittivité des matériaux, ce qui entraîne la variation de la vitesse des ondes. Suivant le même principe, la variation de la géométrie d'un milieu matériel dû à l'action d'un champ de contrainte affecte les constantes élastiques, piézoélectriques et de permittivités du matériau. Les capteurs de déformation, de pression et de couple utilisent la sensibilité à la déformation mécanique. L'expression sous forme de développement en série de Taylor des constantes  $C_{ijkl}$ ,  $e_{ijk}$ ,  $\epsilon_{ij}$ , du matériau est donné comme suit :

$$\text{Quelque soit (i, j, k, l)} \quad C_{ijkl}(S_{mn}) = C_{ijkl}^0 + \frac{dC_{ijkl}}{dS_{mn}} S_{mn} + \frac{1}{2} \frac{d^2 C_{ijkl}}{dS_{mn} dS_{op}} S_{mn} S_{op} + \dots$$

$$\Leftrightarrow C_{ijkl}(S_{mn}) = C_{ijkl} + C_{ijklmn} S_{mn} + \frac{1}{2} C_{ijklmnop} S_{mn} S_{op} + \dots \quad (1.11)$$

Avec  $C_{ijkl}$ ,  $C_{ijklmn}$  et  $C_{ijklmnop}$  représentant respectivement les constantes élastiques du second, du troisième et du quatrième ordre. Les constantes piézoélectriques et des permittivités en fonction de déformation sont données en série de Taylor suivant les relations suivantes :

$$e_{ijl}(S_{mn}) = e_{ijl}^0 \quad (1.12)$$

$$\epsilon_{ij}(S_{mn}) = \epsilon_{ij}^0 \quad (1.13)$$

Sachant que les constantes du quatrième ordre sont généralement négligeables, les développements en série de Taylor des constantes élastiques peuvent se réécrire comme suit :

$$C_{ijkl}(S_{mn}) = C_{ijkl} + C_{ijklmn} S_{mn} \quad (1.14)$$

La connaissance des constantes élastiques d'un matériau permet de procéder par calcul à l'évaluation de sa sensibilité aussi bien pour les contraintes en température que pour les contraintes en déformation. Toutes les constantes du troisième ordre sont généralement peu connues, juste quelques matériaux piézoélectriques à l'exemple du quartz [69] et le LiNbO3 [69] ont des constantes du troisième ordre publié.

Il existe différentes possibilités de traduire une énergie mécanique en un signal électrique équivalent. Pour se faire, il existe une variété de capteurs, les plus utilisés sont : les capteurs de couple, de force, de déformation et de pression.

**Radiofréquence identification (RFID) :** Autre que les applications de filtre et de capteur, on retrouve une évolution exponentielle de l'utilisation des dispositifs à ondes acoustiques de surface en technologie radio identification (RFID pour radio Frequency Identification) permettant d'identifier et de reconnaître des objets, des individus porteurs d'étiquette émettant des signaux sous la forme d'onde radio (cette technologie sera plus développée dans le chapitre 3 de ce mémoire). Ce domaine d'étude est en pleine activité grâce à l'utilisation de la technologie des objets connectés (IoT) [70], [71].

#### **I.B.1.4. Dispositifs SAW hétéro-structures**

On appelle hétéro-structure ou encore structure multicouche la combinaison d'un empilement de couches présentant des caractéristiques différentes, et ce, dans le but d'obtenir une structure combinant plusieurs très bonnes propriétés ou le meilleur compromis suivant les applications visées. Les études menées sur ces structures sont loin d'être nouvelles puisqu'elles datent des années 80. Dans l'optique de répondre aux exigences de plus en plus sévères liées aux progrès des systèmes de télécommunication, il est désormais utile de mettre en œuvre de dispositifs SAW présentant des propriétés plus optimales en matière de performance que les dispositifs conventionnellement utilisés. Les performances telles que la miniaturisation, minimisation des pertes de propagation, l'extension de la gamme de températures, le faible coût de fabrication, la stabilité de la fréquence en température sont demandés. L'une des applications la plus illustrative de cette alternative est la réalisation des dispositifs stables en température, c'est-à-dire présentant un TCF proche de 0 [72], [73],[74]. En effet, la structure multicouche présente cet avantage de permettre de combiner des propriétés telles qu'un bon facteur de couplage électromécanique ( $K^2$ ) et une stabilité en température de la fréquence qui sont très complexes à regrouper dans un seul matériau monocristallin. De nombreuses recherches ont été menées sur ce type de structure dans le but d'améliorer un paramètre bien précis, l'on peut citer par exemple pour l'amélioration du TCF l'ajout de la couche de SiO<sub>2</sub> sur les substrats de LiNbO<sub>3</sub> [75] et de LiTaO<sub>3</sub> [76]. L'association AlN/Diamant [77] favorise l'augmentation de fréquence allant jusqu'à 4,5 GHz pour des résonateurs. D'autres recherches citées dans les

références [78] et [79] ont permis de mettre en exergue les avantages que présente l'utilisation des multicouches.

L'utilisation des hétéro-structures permet aussi la génération et l'exploitation des ondes d'interfaces qui se propagent dans la frontière entre deux milieux, à l'exemple des ondes de Stoneley [80]. Cette structure permet de concentrer l'énergie de l'onde à l'interface de deux matériaux différents (voir Figure 1.13), cela a l'avantage de protéger l'onde en la confinant et enfin ouvre des perspectives de conception de dispositifs sans boîtier de protection. Le choix des matériaux ainsi que l'ordre d'empilement influencent fortement l'apparition de ces ondes, la difficulté résidant dans la recherche de la combinaison adéquate de matériaux [81] ce qui limite leur utilisation.

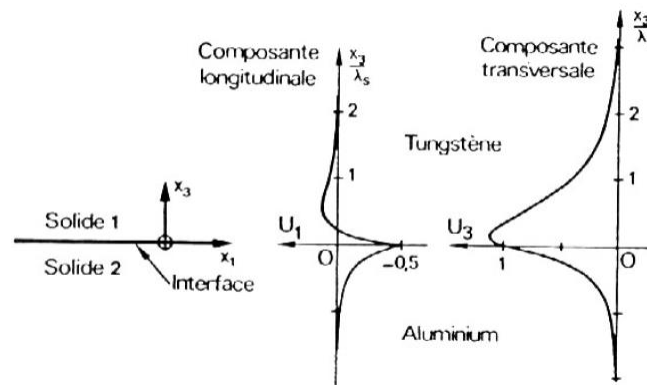


Figure 1. 13 : Déplacement acoustique d'une onde de Stoneley dans l'interface tungstène-aluminium [82].

Deux concepts différents de structure à onde confinée à savoir l'une suivant le principe d'onde isolée ILAW (Isolated Layer Acoustic wave) et l'autre à base d'onde guidée WLAW (Waveguiding Layer Acoustic wave) ont été proposé par K. Bhattacharjee, A. shvetsov et S.Zhgoon [83].

**La structure ILAW** fonctionne suivant le principe de l'isolation de l'onde. Elle est constituée d'un substrat piézoélectrique recouvert d'une couche de SiO<sub>2</sub> ou de Pyrex, et par-dessus une couche de forte impédance élastique (voir Figure 1.14a). Cet empilement de couches de différentes impédances entre les couches supérieures et la couche intermédiaire donne lieu à une isolation de l'onde qui limite le déplacement de particules sur la surface de la couche

supérieure. Cette combinaison de plusieurs couches de forte et de faible impédance forme une structure de type miroir de Bragg.

**La structure WLAW** permet le confinement de l'onde en se basant sur le principe de l'onde guidé. Cette structure tri-couche consiste à borner l'onde dans une couche de faible vitesse qui elle-même est comprise entre deux matériaux de forte vitesse acoustique (Figure 1.14b). Le gradient de vitesse permet alors à l'onde d'être confinées dans la couche intermédiaire qui joue le rôle couche guidante à l'exemple du principe des fibres optiques. De plus, l'onde est protégée des contraintes physiques extérieures.

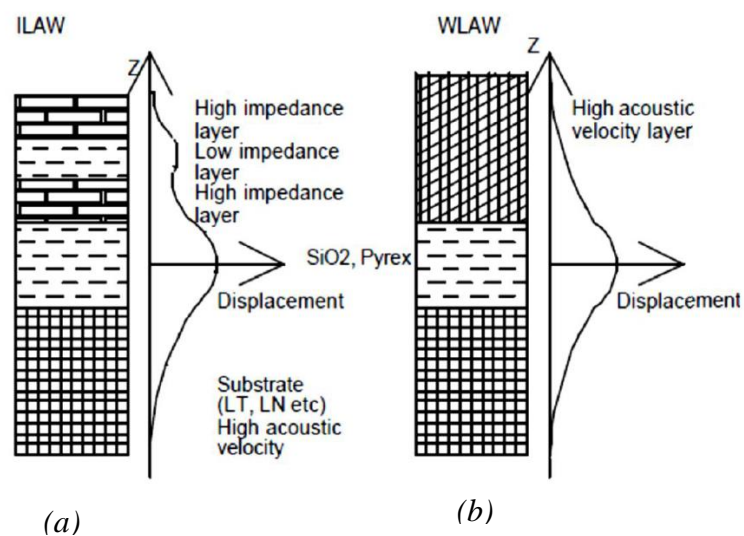


Figure 1. 14 : Schémas des structure (a) ILAW et (b) WLAW [83].

## **I.C. Capteurs SAW conventionnels de déformation en température et défauts de collage.**

La réalisation des capteurs SAW conventionnels se fait généralement sur des matériaux piézoélectriques, ce qui entraîne l'utilisation de la colle pour la fixation du capteur sur la pièce sous test. La mise en place d'une colle se fait suivant des procédés de collage et préparation de surface bien spécifique. Dans la partie qui suit, il sera question de faire une présentation de cette technique.

### **I.C.1. Procédés de collage et préparation de surface**

Ces dernières décennies ont vu la découverte de différents types de synthèse de colle à l'exemple des acryliques anaérobies qui se polymérisent en absence d'air et à l'aide des activateurs déposés sur l'une des pièces à assembler. On peut citer : les silicones, les plastisols (résines PVC), les résines phénoliques, les multiples formulations à base époxyde, et bien d'autres. En effet, l'utilisation de l'adhésif en industrie est en perpétuelle croissance et les applications mettant en œuvre le collage des structures en sont les principaux consommateurs. C'est en 1940 que le principe de collage structural a vu le jour avec le collage sur des structures métalliques à l'exemple de l'assemblage des pièces en aéronautique. De nos jours, cette notion est déjà bien utilisée dans de nombreuses applications industrielles, c'est le cas en automobile ou comme précédemment mention en aéronautique. Comme on peut le constater, l'utilisation de l'adhésif englobe un certain nombre d'avantages à savoir :

- Réduction du poids grâce à la suppression d'éléments d'assemblage mécanique
- Préservation des structures et de l'esthétisme (pas de perçage)
- Amortissement des chocs et vibrations
- Meilleure répartition des contraintes
- Liaison étanche
- Assemblage mixte
- Protection contre la corrosion des interfaces
- Réduction du bruit
- Meilleure tenue à la fatigue

Cette liste n'est pas exhaustive et bien d'autres qualités sont offertes par dans cette technique. L'adhésif est également un élément clef pour fixer les capteurs sur l'élément ou l'équipement

à monitorer. C'est ce type de collage qui présente un intérêt pour nos travaux dans ce cadre de ce mémoire.

### **I.C.1.1. Les adhésifs structuraux**

L'adhésif est généralement défini comme étant une technique permettant d'assembler deux éléments entre eux et assurer leur maintien permanent sous sollicitations extérieures ou pas et l'étanchéité entre les surfaces en contact des deux éléments. Les adhésifs structuraux sont des colles très réactives, qui durcissent par réaction chimique sous l'effet d'un apport de chaleur, d'un agent réticulation ou d'un rayonnement et qui conduisent à des résistances mécaniques allant à des valeurs supérieures à 20MPa [84]. Les résines époxydiques, les acryliques, les résines phénoliques et les polyuréthanes font partie des adhésifs structuraux couramment utilisés.

Les adhésifs sont généralement constitués à partir de la synthèse de polymères conduisant à des structures tridimensionnelles réticulées (élastomère) ou linéaires embranchés. (Thermoplastique). Elles sont le résultat des différentes interactions moléculaires qui sont des fortes liaisons chimiques covalentes et de van der Waal.

- **Les acryliques** : sont des substances liquides ou visqueuses qui peuvent être naturelles ou chimiques. Elles sont constituées d'un ou plusieurs composants actifs, à savoir le catalyseur qui augmente la durée de polymérisation et le durcisseur qui amplifie la résistance mécanique du solide. Ces composants ont pour but d'augmenter le pouvoir d'adhérence. Grâce à leur adaptation, à pratiquement tout types de matériau, leur gamme d'application est assez large. Il existe plusieurs types d'adhésifs acryliques, l'on peut citer par exemple les cyanoacrylates qui présentent une résistance élevée, une très bonne inertie chimique, un fort pouvoir couvrant et une résistance au cisaillement. On les retrouve dans l'assemblage des métaux.
- **Les polyuréthanes** : ils peuvent se présenter sous forme de colles mono ou bicomposant. Sous la forme de colle mono-composants, ils sont à base d'uréthane mono-composant et peuvent se polymériser soit à température ambiante soit, à chaud. Sous la forme de colle bi-composant, ils sont à base d'uréthane et d'un durcisseur situé dans deux composants distincts et peuvent se polymériser à température ambiante de par l'humidité de l'air. Ce sont des colles très résistantes en cisaillement et en traction. Ces colles peuvent être souples et rigides, ce qui

permet l'assemblage de matériaux présentant des coefficients de dilatations différents. Elles sont recommandées dans le cas de collage de matériaux poreux à l'exemple des isolants et du bois. Elles adhèrent aussi bien à différentes surfaces telles que le verre, le métal, le bois, le béton, etc.

- **Les époxydes** : Ils se présentent sous deux formes, à savoir la forme mono-composant et la forme bi-composant. Sous la forme mono-composant, ils sont constitués de résine époxyde et de durcisseur, c'est-à-dire qu'ils polymérisent à chaud (environ 120°C) et sous pression. Sous forme bi-composant, le mélange du durcisseur et de la résine époxyde se fait au moment de l'emploi et la formation des liaisons transversale se fait à température ambiante. Les colles époxy possèdent des performances mécaniques remarquables, mécaniques en l'occurrence en cisaillement. En outre, elles disposent d'une excellente adhérence sur les métaux, les matériaux composites [85], les polymères thermoplastiques et thermodurcissables.

**Les sollicitations** : ce sont les différentes contraintes mécaniques extérieures exercées sur le collage pour évaluer la résistance de l'assemblage. Il existe différents types de sollicitations dont les plus appliquées peuvent être classées suivant quatre catégories liées aux types d'assemblages à savoir : le cisaillement, la compression, le pelage, le clivage et la traction (Figure 15).

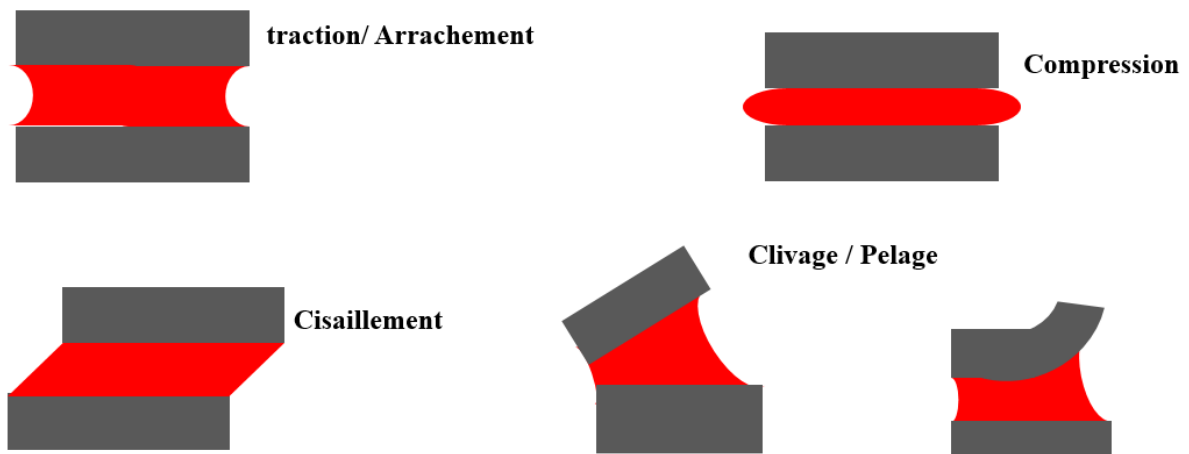


Figure 1. 15 : Les principaux types de sollicitations.

**Les ruptures :** elles apparaissent lorsqu'un collage est fortement sollicité. On retrouve différents types de ruptures tels que : les ruptures adhésives (rupture de la colle), les ruptures mixtes adhésives/cohésives (déchirure de l'adhésive), les ruptures du substrat (le substrat cède avant l'adhésive) (Figure 1.16).

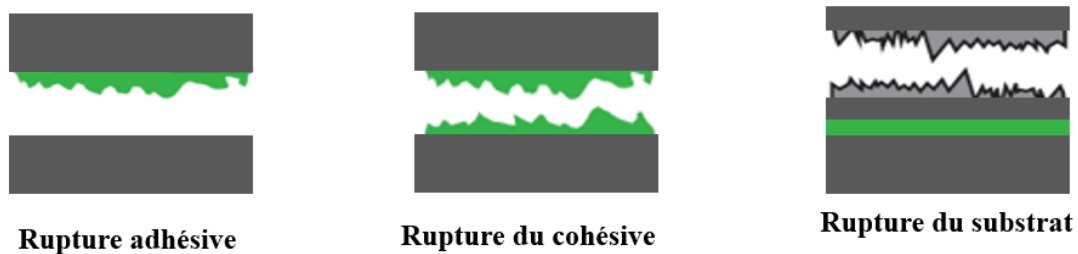


Figure 1. 16 : schématisation des types de rupture de l'adhésif

### I.C.1.2. La préparation de la surface

La préparation de surface est une phase très importante dans les procédés de collage. En effet, la connaissance de l'état et de la nature de la surface est une étape primordiale. Les surfaces des substrats font généralement l'objet de différentes contaminations telles que la graisse, la poussière, l'eau et bien d'autres. De ce fait, le traitement de la surface a pour objectif de retirer tous les résidus présents à la surface du substrat et qui agiraient à l'encontre de l'adhésion. Il existe différents types de traitement de surface qui peuvent être regroupés en deux catégories, à savoir les traitements mécaniques et chimiques.

#### Les traitements mécaniques

Ils se concentrent généralement sur la rugosité de surface du substrat qui a pour effet de favoriser la résistance mécanique de la liaison. De ce fait, le traitement mécanique a pour effet d'augmenter la rugosité en surface du substrat ce qui favorise l'accrochage de la colle, il permet en outre de retirer les couches de faible énergie de cohésion sur le substrat et d'optimiser le mouillage du substrat par l'adhésif. Les différentes étapes du traitement mécanique en surface sont données comme suit :

- L'abrasion est une étape de nettoyage primordiale qui par polissage permet de supprimer les irrégularités en surface, la graisse, la poussière et/ou la colle qui sont favorables à la création d'une couche de faible adhérence.
- Le sablage est une étape importante qui est favorable à la création de la rugosité et ainsi accroît l'accrochage de la colle.

#### Les traitements chimiques

En fonction des applications visées, les traitements mécaniques peuvent dans certains cas présenter certaines insuffisances. Ainsi, après traitement mécanique, on procède au traitement chimique, ce qui a pour effet de favoriser l'augmentation de l'énergie d'adhérence de la surface du substrat. Les fonctions principales des traitements chimiques sont le dégraissage, le décapage et la conversion.

- Le dégraissage élimine les graisses et les poussières à la surface du substrat traitée.
- Le décapage permet de retirer les oxydes et les revêtements métalliques.
- Traitement de conversion produit une couche de combinaison chimique entre le substrat et un réactif.

En somme, l'utilisation de l'adhésif pour relier deux éléments présente de nombreux avantages en plus d'être un composant très largement utilisé dans des secteurs divers. Toutefois, ses propriétés sont fortement impactées par la température, ce qui entraîne des relaxations de celle-ci. À des températures dépassant la température de transition vitreuse, c'est-à-dire la température à laquelle l'adhésif passe à des états vitreux ou caoutchouteux [86], on observe les ruptures d'une partie des interactions physiques, ce qui entraîne une mobilité des chaînes. L'utilisation de la colle nécessite donc une connaissance de ses caractéristiques physiques, ce qui servira à prévoir et à anticiper son comportement sous sollicitation mécanique dans un assemblage. De plus, le collage de deux éléments prend en compte la nature des substrats à assembler, des conditions d'utilisation, des contraintes appliquées, et du traitement de la surface du substrat. Toutes ces manipulations qui nécessitent une maîtrise complète des procédés de collage complexifient son exploitation.

## **I.C.2. Capteurs SAW de déformation et limites du collage**

### **I.C.2.1. Capteurs SAW conventionnels : Structure et matériaux utilisés.**

Conventionnellement, la réalisation des capteurs à ondes acoustiques de surface destinés pour l'évaluation des déformations en milieu hostile se plie à deux structures, à savoir la structure sur substrat piézoélectrique et la structure sur couches minces piézoélectriques.

- Les substrats piézoélectriques sont généralement des matériaux monocristallins obtenus par la découpe d'un cristal massif présentant des propriétés piézoélectriques. Ils permettent la génération des ondes acoustiques de surface et

leur angle de coupe se fait en prenant en compte principalement les angles d'Euler. L'angle de coupe définit les propriétés élastiques et piézoélectriques du substrat (wafer).

- Les couches minces piézoélectriques sont des fines couches issues d'un dépôt de matériaux piézoélectriques sur substrat présentant des propriétés piézoélectriques ou non. Grâce à leur fine couche, généralement de quelques centaines de nanomètres à quelques micromètres, ils permettent de générer des ondes acoustiques sur un substrat non piézoélectrique. Cette configuration est très intéressante car elle ouvre des perspectives sur l'exploitation des ondes élastiques de surface sur différentes structures (isolante et conductrice).

Nous allons présenter ici les substrats piézoélectriques généralement utilisés pour les applications de déformation en milieu hostile (haute température).

**Le niobate de lithium :** C'est un matériau très utilisé pour la conception des capteurs à ondes élastiques de surface, il présente une température Curie comprise entre 1070 et 1190 °C utiles pour des applications à haute température. Le type congruent (cLN) est la plaquette du LN la plus commercialement disponible, il peut aussi être sous la version stœchiométrique (sLN). Le niobate de lithium congruent présente une diminution de sa résistivité électrique dès que la température de fonctionnement avoisine les 600°C. Des modifications de sa composition en surface sont également observées dans le voisinage de cette température malgré sa température de Curie beaucoup plus élevée. Ceci présente comme inconvénient la génération des courants de fuites qui augmentent les pertes de propagations des ondes élastiques de surface. Une autre limite, est qu'ils ont une durée de vie limitée à 450°C à savoir de quelques heures [87], ce qui limite leur utilisation comme capteur SAW à des températures au-delà de 500°C en température sous sa version congrue.

**Le quartz :** Le quartz ( $\text{SiO}_2$ ) est l'un des substrats piézoélectriques les plus utilisés dans la conception des dispositifs SAW, notamment les résonateurs [49]. Du fait de son faible coefficient de couplage électromécanique ( $K^2$  compris entre 0,1 et 0,2), le quartz permet la réalisation de résonateurs présentant un fort facteur de qualité (Q). Sa vitesse de propagation des ondes acoustiques de surface est de l'ordre de 3000 m/s et dépend de la coupe considérée. Dans le cadre de l'évaluation en température, le quartz présente des coupes suffisamment

intéressantes qui font de lui un matériau très attractif pour des applications diverses. On peut citer la coupe ST qui a un TCF nul à température ambiante, ce qui rend cette coupe très intéressante pour des dispositifs qui requièrent une stabilité en température. De plus, d'autres coupes du quartz disposent d'un TCF relativement grand propice pour la réalisation de capteurs sensibles à la température. Le quartz subit une transition de phase à des températures autour de 500°C dû à l'augmentation du désordre cristallin [88], ceci limite son utilisation à très haute température.

**La langasite :** C'est un matériau stable qui ne présente aucune transition de phase jusqu'à sa température de fusion de 1470 °C. Contrairement au quartz, ce matériau présente des caractéristiques très intéressantes dans le cadre de la réalisation des capteurs SAW à des températures très élevées. En plus de son excellente stabilité en température, il vieillit très bien et des études ont montré qu'il restait stable durant près de 6 mois à 800 °C [89]. De plus, il dispose de plusieurs coupes différentes, stables en température et présente un coefficient de couplage électromécanique pouvant aller jusqu'à 0,5%. Ces propriétés ont fait de ce matériau un candidat intéressant et très étudié ces 20 dernières années. Toutefois, il souffre aussi de quelques insuffisances à savoir : il présente des pertes de propagation qui augmentent énormément à des températures élevées avec la fréquence. Ceci interdit son utilisation à très haute fréquence et pour les applications sans fil, limite son utilisation pour les bandes ISM à celle de 433 MHz. Une autre faiblesse du LGS est la diminution de sa résistivité électrique qui avoisine les  $10^6 \Omega \cdot \text{cm}$  [90] aux alentours de 650 °C. Ceci augmente les pertes de propagation et compromet une utilisation en sans-fil.

### **I.C.2.2. Capteurs SAW : Mesure de la déformation à haute température et défauts du collage**

Ces dernières années, de nombreux chercheurs ont effectué des investigations sur la réalisation de capteurs SAW de déformation en milieu hostile (haute température). Dans la suite de cette partie, nous présenterons quelques recherches qui ont été réalisées sur le sujet.

La langasite est l'un des matériaux les plus utilisés dans l'étude des contraintes à haute température. Dans l'étude de capteur SAW utilisant ce matériau, on peut citer :

**Anin Maskay et Mauricio Pereira da Cunha** [91] qui ont investigué sur des capteurs SAW de déformation à haute température en configuration résonateur. Ces capteurs ont été fabriqués sur un substrat de langasite d'angles d'Euler LGS ( $0^\circ, 138,5^\circ, 26,7^\circ$ ) en utilisant des électrodes à base d'alliage de Pt capables de résister à des températures allant jusqu'à  $1\ 000\ ^\circ\text{C}$ . Dans cet article, plusieurs aspects liés à l'adhésif et à ces contraintes ont été abordés. L'étape de fixation du capteur SAWR sur la pièce sous test représente une étape importante et critique dans la préparation et les performances du capteur pour les mesures de contrainte. En effet, les informations sur les contraintes arrivent aux capteurs par le biais de la couche de couplage adhésive. Deux types d'adhésifs ont été sélectionnés pour fixer les capteurs SAWR à la pièce sous test afin de réaliser des mesures de contraintes en température. Le but étant ici d'observer l'influence d'une variation d'adhésif sur ces mesures. Une colle à base de cyanoacrylate dont la température de fonctionnement à long terme est limitée à  $60\ ^\circ\text{C}$  et une colle d'époxy à base d' $\text{Al}_2\text{O}_3$  haute température ont été choisis pour une fixation rigide des capteurs SAWR à la surface de la pièce sous test. Par la suite, des tests de contrainte allant jusqu'à  $114\ \mu\epsilon$  à température ambiante ont été réalisés. Les résultats expérimentaux sont donnés dans la Figure 17 ci-dessous. Des courbes de régression linéaire dues à la contrainte de déformation donnent des sensibilités de  $-118\ \text{Hz}/\mu\epsilon$  lorsque l'adhésif utilisé est du cyanoacrylate (Figure 1.17a) et de  $-52\ \text{Hz}/\mu\epsilon$  lorsque c'est de l'époxyde haute température à base d' $\text{Al}_2\text{O}_3$  (Figure 1.17b).

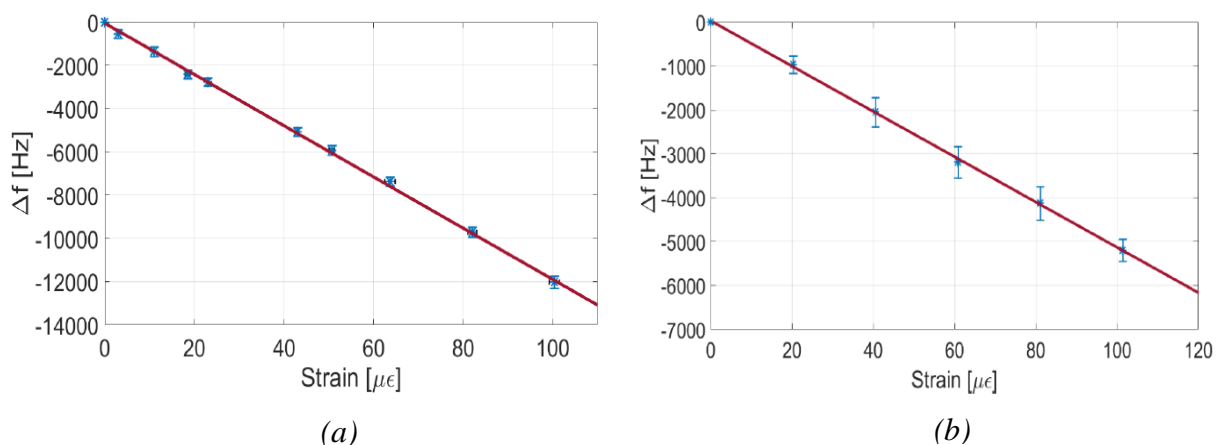


Figure 1. 17 : (a)Variation de fréquence SAWR mesurée à  $24^\circ\text{C}$  en utilisant l'adhésif à base de cyanoacrylate (fréquence de résonance SAWR non contrainte,  $f = 195,8\text{MHz}$ ). (b) Variation de fréquence SAWR mesurée  $24\ ^\circ\text{C}$  en utilisant de l'époxy à base d' $\text{Al}_2\text{O}_3$  (fréquence de résonance SAWR non contrainte,  $f = 195,2\ \text{MHz}$ )[91].

Ces résultats montrent l'importance du choix du type d'adhésif utilisé. En effet, la sensibilité du capteur fixé à l'aide l'adhésif à base de cyanoacrylate est plus de deux fois plus élevée que le capteur monté à l'aide de l'époxy haute température.

De plus, l'épaisseur de la couche d'adhésif joue un rôle important sur le transfert direct de la contrainte de la pièce sous test aux capteurs. Ce qui a pour effets, un écart dans la lecture de la contrainte et une réduction de la sensibilité du capteur SAWR. On note cette observation dans l'utilisation du film plus épais de l'époxyde à base d' $\text{Al}_2\text{O}_3$  par rapport au film d'adhérence à base de cyanoacrylate. Toutefois, l'utilisation de l'époxy à base d' $\text{Al}_2\text{O}_3$  présente un net avantage pour un fonctionnement du capteur à une température supérieure à la limite de  $65\text{ }^\circ\text{C}$  de l'époxy à base de cyanoacrylate adhésif.

Cet article montre les défaillances que présente l'utilisation de l'adhésif dans la réalisation des mesures de déformations par des capteurs SAWR fixés sur une pièce sous test.

**Lin Shu et al.** [92] ont procédé à la réalisation d'un capteur de contrainte haute température à onde acoustique de surface sans fil également sur un substrat de langasite. Dans ce travail, ils présentent l'étude de deux variantes de langasite d'angle d'Euler respective ( $0^\circ, 138,5^\circ, 117^\circ$ ) et ( $0^\circ, 138,5^\circ, 27^\circ$ ). Les deux résonateurs liés aux antennes dipôles ont été collés sur un porte-à-faux métallique à l'aide d'une colle en céramique haute température ( $1730^\circ\text{C}$ ), et ont été soumis à des contraintes mécaniques à des températures allant de  $20^\circ\text{C}$  à  $500^\circ\text{C}$ . L'évaluation du décalage fréquentiel est affectée par la combinaison des deux contraintes (déformation-température) qui sont plus grandes à des températures plus élevées. Les erreurs de mesures, c'est-à-dire les erreurs d'hystérésis due à l'utilisation l'adhésif et aux conditions de durcissement de celle-ci pour fixer les deux capteurs sur le porte-à-faux subviennent à des températures autour de  $500^\circ\text{C}$  et présentent des valeurs inférieures à 5%.

Bien d'autres études de contrainte à haute température utilisent la langasite comme substrat, à l'exemple **William C. et al** [93] qui ont procédé à des études sur la détection de défaillance de fixation à l'aide d'un capteur SAW de déformation.

Outre que la langasite, d'autres matériaux tels que le niobate de lithium ( $\text{LiNbO}_3$ ) et le quartz sont utilisés comme substrats dans la réalisation des capteurs de déformation à des températures moins hostiles.

**Hongsheng Xu et al** [94], ont réalisé des études sur des capteurs de contraintes SAW flexibles basés sur un monocristallin de niobate de lithium ( $\text{LiNbO}_3$ ). Dans cette étude, un adhésif a été utilisé pour coller le capteur SAW à la plaque d'acier, puis la structure a été soumise à des contraintes en température ( $90^\circ\text{C}$ ). Cette étude a montré la présence d'erreurs d'hystérésis de moins de 1,5% mais qui sont attribués à l'utilisation de la colle et des étapes de son traitement, à savoir l'épaisseur, la douceur et le temps de cuisson.

**Wen Wang et al** [95], ont quant à eux procédé au développement d'un capteur de contrainte SAW sans fil et passif à compensation en température. Dans cette étude, un monocristal de quartz de coupe  $35^\circ\text{-Y}$  utiliser comme substrat a été collé à l'extrémité fixe d'une poutre soumise à des déformations induites par la barre de progression. Cette étude a montré une bonne sensibilité à la déformation et une excellente stabilité en température ( $80^\circ\text{C}$ ) grâce aux propriétés en température que confère cette coupe de quartz. De plus, cette structure présente une hystérésis de moins de 1,1%.

Comme nous avons bien pu le montrer, la recherche sur l'évaluation des contraintes en milieu hostile est un domaine de recherche très important et en constante expansion. Ces quelques travaux sur les capteurs de déformation en température présentée ci-dessus, ne représentent qu'une énumération non exhaustive parmi bien d'autres.

L'utilisation de la colle se fait dans de nombreux domaines, toutefois son application reste complexe. Le choix de la colle, l'épaisseur appropriés, le temps de cuisson et le traitement en surface des deux éléments à assembler, voilà bien là tout un procédé à respecter dans l'optique d'obtenir la meilleure situation de collage. De plus, l'application de celle-ci pour fixer les systèmes de mesures à l'exemple des capteurs entraîne des erreurs d'hystérésis élastiques. Ceux-ci représentent un problème très embêtant dans l'étude de contrainte en milieu hostile ou la précision est très demandée. En effet, les problèmes de répétabilité de la mesure peuvent induire des erreurs d'interprétation des données recueillies et par conséquent perturber les démarches à entreprendre sur la maintenance de certaines structures.

Différentes solutions à ce problème ont été proposées à savoir l'utilisation de nanofoils hautement réactifs qui permettrait de souder les dispositifs SAW directement sur la pièce sous test [96]. L'une des autres solutions est de procéder directement à la réalisation du dispositif SAW sur la poutre métallique [97], [98], cette seconde solution sera principalement celle qui nous intéresse dans le cadre de cette thèse.

### **I.C.3. Capteurs SAW intégrés sur substrat métallique : nouveau concept**

Le concept de la réalisation des dispositifs à ondes acoustiques de surface directement intégrés sur des pièces métalliques est assez récent et dispose encore de plein de secteurs d'explorations. Ce concept a été principalement initié dans les travaux de Lin Shu et son équipe de State Key Laboratory of Electronic Thin Films and Integrated Devices de University of Electronic Science and Technology of China en 2015. Dans ces travaux, il procède à la conception d'un résonateur SAW sur une structure multicouche utilisant comme couche piézoélectrique le nitrure d'aluminium (AlN) directement intégré sur un alliage métallique de TC4 ou Titane de Grade 5, encore connu sous le nom de (Ti-6Al-4V). En effet, l'intégration directe de la couche piézoélectrique a pour but de faire abstraction de l'utilisation de tout type de collage et donc de s'affranchir des erreurs qui s'y génèrent lors de la réalisation des mesures en environnement sévères.

La structure AlN/TC4 étudiée par Lin Shu présente des propriétés très intéressantes à savoir : une sensibilité en température [97] de 89,4 ppm/°C (voir Figure 1.19a) ce qui représente une valeur très appropriée pour la réalisation des applications de capteurs de température. De plus, l'étude en déformation (essais de traction) [98] de la structure réalisée sur une poutre métallique comme l'illustre la Figure 1.18, montre des sensibilités de 1,61 à 1,26 ppm/ $\mu\epsilon$  pour des températures comprises entre 20 et 400°C (voir Figure 1.19b). Ces valeurs de sensibilités en température et en déformation rendent la structure sur métal très prometteuse pour les développements des capteurs SAW de déformation en température innovants sans contraintes liées à l'utilisation de colle.

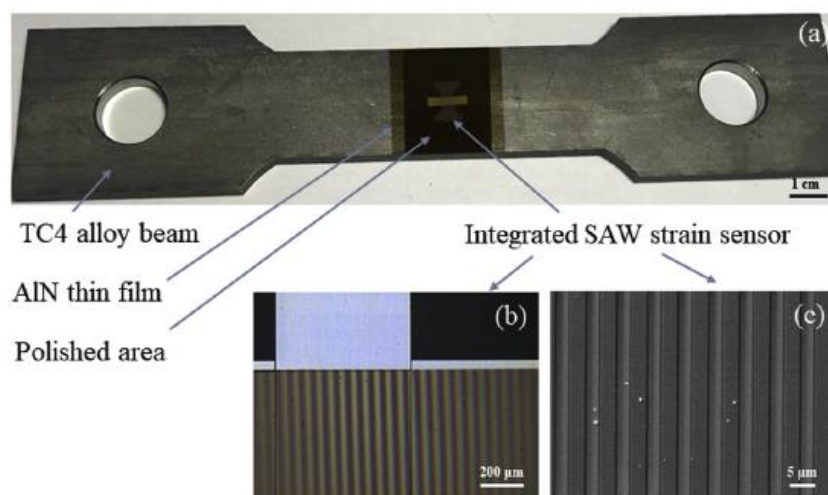


Figure 1. 18 : (a) Image du capteur de contrainte SAW intégré sur pièce métallique TC4, (b) photo des réseaux du capteur SAW et (c) photographie SEM des électrodes [99].

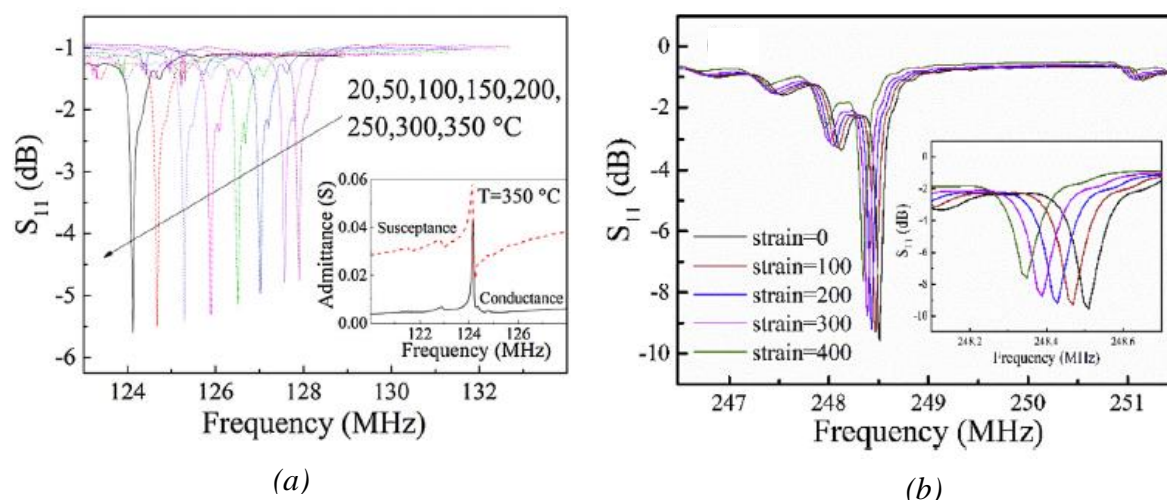


Figure 1. 19 : variation du signal fréquentiel en fonction (a) de la température [99], (b) de la contrainte de traction [98].

Toutefois, la réalisation de la structure basée sur AlN/substrat métallique par le dépôt de la couche de nitrure d'Aluminium présente un certain nombre de contraintes dans lesquelles on retrouve :

- Une température élevée dans le processus de dépôt de la couche d'AlN. En effet, la croissance d'une couche de nitrure d'aluminium de bonne qualité dans les plans d'orientation (002) qui constitue l'état de plus basse énergie, donc le plus stable,

nécessite une température avoisinant les 500 °C [100]. Ce paramètre constitue un véritable problème dans la réalisation des capteurs SAW directement implantés sur pièce industriels les plus utilisés à l'exemple de l'aluminium qui voit l'altération de ces propriétés à des températures avoisinante les 300 °C [100].

- Des limites dans la réalisation des contraintes de déformation au-delà de 400  $\mu\epsilon$  [99]. En effet, le film d'AlN présente des fissures à des déformations supérieur à 400  $\mu\epsilon$ , ce qui a pour effet de diminuer les propriétés piézoélectriques et élastiques du film, conduisant ainsi à une dégradation importante du capteur intégré [99].

Partant de ces observations, il peut être remarqué que la structure SAW sur métal possède un grand nombre d'avantages, cependant, la réalisation de celle-ci reste un challenge complexe à mettre en œuvre en plus de certains de ces limites mentionnées précédemment.

Tout en nous alignant dans la même dynamique d'innovation, de développement et d'optimisation des structures SAW sur des pièces métalliques industrielles, ce manuscrit s'inscrit dans l'objectif de développer des capteurs de contrainte SAW sans colle et sans fil directement réalisés sur des pièces métalliques présentant de bonnes propriétés en température, en déformation et en champ magnétique pour des réalisations de mesure en continu dans des milieux difficiles.

## Conclusion et Objectifs de la thèse

---

Les recherches menées sur le maintien de l'intégrité de structure par la mise en œuvre d'une stratégie d'identification des dommages pour les infrastructures d'ingénierie aérospatiale, civile et mécanique connaissent ces 10 dernières années une courbe de croissance importante. Ce domaine d'étude, aussi appelé surveillance de l'État des structures (SHM) permet d'identifier les modifications comprises dans un système qui ont un effet négatif sur les performances du système. De plus, l'utilisation accrue des objets connectés (IoT) rend ces systèmes plus attractifs dans le marché. Généralement, ils se constituent d'un réseau de capteurs intelligents qui permettent l'acquisition des données de l'intégralité de la structure et favorisent le maintien de l'intégrité et la durée de vie de celui-ci. Ainsi, il devient important de concevoir des capteurs sensibles à l'environnement extérieur disposant des caractéristiques innovantes et permettant de procéder à la surveillance en continu de la structure. Enfin, aller vers les matériaux intelligents instrumentés pour apporter de la valeur ajoutée.

Les dispositifs à onde acoustique de surface disposent d'une large gamme de caractéristiques innovantes qui fait d'eux des candidats très intéressants pour la surveillance de la santé de structure. En effet, grâce à leur sensibilité aux perturbations extérieures, ils permettent de réaliser des mesures des différentes mesurandes (température, pression, déformation, etc.) en continu. En plus, ces dispositifs peuvent être passifs (sans batterie) interrogeables à distance (sans fil) et auto protégés (sans packaging).

La combinaison des dispositifs SAW au système de surveillance de santé de structure est une démarche très prometteuse déjà utilisée dans la littérature. Toutefois, la réalisation des capteurs SAW conventionnels se fait généralement sur des matériaux piézoélectriques, ce qui entraîne l'utilisation de la colle pour la fixation du capteur sur la pièce sous test. La colle entraîne la mise en place d'un certain nombre de techniques complexes à réaliser, en plus d'une calibration de la structure fixer avant tout types de mesures. L'utilisation de celle-ci a pour effet, dans un premier temps, de générer des erreurs de mesure dues à la relaxation de la colle dans des environnements hostile et variable. Dans un second temps, un retard de mesure des contraintes de déformation due qui varie en fonction de l'épaisseur et de l'environnement des mesures. Dans un troisième temps, souvent très rare à observer le décollage du capteur.

**L'objectif des travaux de cette thèse est donc de développer des capteurs à onde acoustique de surface, de déformation, de température et de champ magnétique intégrés directement sur des pièces métalliques industrielles pour des applications de contrôle de santé de structure (SHM).**

## **Chapitre II**

# **Capteur SAW réalisé sur substrat métallique structuré Al/ZnO/Métal**

---

---

*Comme nous avons pu le voir dans le premier chapitre, l'utilisation de colles pour les capteurs de déformations SAW présente un grand nombre de défis : reproductibilité des procédés de collage, relaxation de contraintes dans la colle, variations des propriétés et délaminations éventuelles des colles sous fortes déformations/températures. Tout ceci contribue à des difficultés importantes dans l'étalonnage des capteurs et la reproductibilité des mesures.*

*Pour pallier à ces problèmes, il sera proposé dans ce chapitre d'introduire un nouveau type de capteur à ondes élastiques de surface sans adhésif, ultra-faible encombrement, relativement simple de fabrication et directement intégré sur pièces métalliques industrielles, grâce au dépôt des couches minces piézoélectriques. Ces capteurs sont basés sur l'empilement électrodes en aluminium/couche mince piézoélectrique/métal industriel.*

*L'étude de capteurs à ondes élastiques de surface sur des pièces métalliques nécessite la maîtrise d'un ensemble d'outils et de techniques aussi bien dans le cadre de la simulation que celui de l'expérience. Dans l'objectif de réaliser des capteurs SAW de déformation en température sur substrat métal, nous scinderons ce chapitre en trois parties :*

*Une première partie consistera à la présentation et à la sélection des matériaux utilisés. Par la suite, sur le plan théorique, la simulation sur le logiciel Comsol Multiphysics permettra de prévoir le type et la vitesse de l'onde générée. Sur le plan expérimental, la présentation des procédés expérimentaux (polissage, dépôt de couches minces, caractérisation et lithographie) utilisée pour la réalisation des dispositifs SAW sera mise en évidence. Ce chapitre se terminera*

*par la caractérisation électrique (VNA), l'évaluation de la sensibilité de la température, la déformation (flexion trois points, traction et traction à basse température), en plus des investigations menées sur l'interrogation à distance de la structure SAW à base de ZnO/titane (Titane Grade 2).*

## II. A. Matériaux et configuration

Le choix des matériaux et de la configuration d'étude est un des facteurs importants dans la réalisation d'un capteur à ondes élastiques de surface. Dans la structure couche piézoélectrique/substrat métallique, la couche piézoélectrique de quelques micromètres qui sert à générer l'onde élastique de surface doit être choisie avec beaucoup de précautions tout en prenant en compte le substrat métallique considéré. En effet, à cause de leurs caractéristiques élastiques, l'utilisation des métaux comme substrats peut-être l'une des sources des pertes énergétiques de l'onde élastique de surface générée. De ce fait, la nécessité de trouver le bon compromis entre le substrat métallique, la couche piézoélectrique et la géométrie des IDTs de la structure SAW illustrée dans la Figure 2.1 est primordiale.

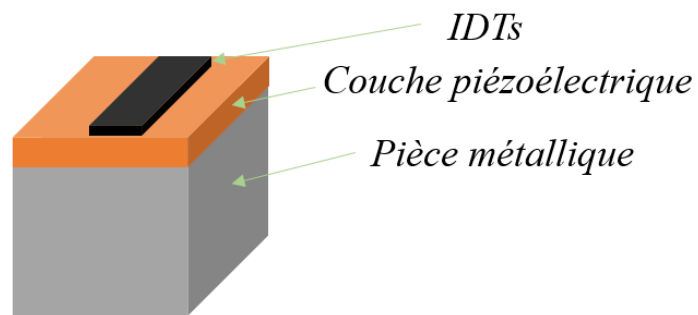


Figure 2. 1 : Structure SAW étudiée

### II.A.1. Choix des substrats métalliques

Dans cette étude, le choix s'est porté sur trois métaux, à savoir le duralumin, l'acier inoxydable et le titane Grade 2 (encore appelé Ti Gr2) dû au fait que ces métaux sont très utilisés dans les domaines industriels, en contrôle de santé des structures (SHM), génie civil, aéronautique ou en environnement.

#### II.A.1.1. Duralumin

L'utilisation de l'aluminium est très répandue dans de nombreuses applications telles que le transport, le bâtiment, l'industrie électrique et l'emballage. En effet, il regroupe en son sein différentes propriétés qui font de lui un métal indispensable et très utilisé. L'aluminium est un métal très léger avec une excellente conductivité électrique, un poids inférieur à celui du cuivre. De plus, sa bonne conductivité thermique à l'instar du cuivre explique sa présence dans les dispositifs de refroidissement. Comparé à l'acier, sa densité est d'environ 3 fois inférieure. Il dispose d'une bonne tenue à la corrosion en milieu marin, urbain, atmosphérique et industriel en plus d'être facile à entretenir. Cependant, celui-ci présente l'inconvénient d'être très mou,

d'où dans un contexte militaro-industriel est née le duralumin qui doit son nom au fait qu'il soit dur. Le duralumin (ou dural) est un alliage d'aluminium léger et solide à base d'aluminium (95%), de cuivre (4 %), de magnésium (0,5%) et de manganèse (0,5%). Bien qu'il soit plus dur que l'aluminium, il est relativement mou, ductile, facile à travailler à température normale et possède une résistance en déformation supérieure à l'aluminium. Néanmoins, le duralumin présente une conductivité thermique et électrique faible en comparaison à l'aluminium pur. Son faible poids et sa haute résistance comparés à l'acier fait de lui, un métal particulièrement apprécié dans l'industrie de l'aéronautique.

### **II.A.1.2. Acier inoxydable**

L'acier inoxydable, autrement nommé inox, est un métal largement utilisé dans de nombreux domaines comme : l'industrie mécanique, agroalimentaire, transports, médecine, chirurgie, etc. Il se constitue d'un assemblage d'acier, de fer, de carbone auquel on ajoute du chrome en solution au-delà de 10,5% qui entraîne la création d'une couche protectrice d'oxyde de chrome, qui le rends inoxydable. En fonction des propriétés recherchées, d'autres éléments peuvent être ajoutés à l'exemple du titane pour la stabilité en température autre que l'ambiante, le nickel pour l'amélioration des propriétés mécaniques dont la ductilité, etc. L'acier inoxydable présente une densité supérieure à celle de l'aluminium, en plus de sa dureté élevée qui s'accompagne d'une bonne résistance au frottement ou à l'abrasion. Enfin, sa résistance à la corrosion lui permet d'être très résistant aux facteurs tels que la rouille, la dégradation ou la dissolution.

### **II.A.1.3. Titane Grade 2**

Le titane est un composant relativement utilisé dans l'industrie de l'aérospatiale et la production de l'énergie nucléaire. Il présente une densité (4,5 g/cm<sup>3</sup>) comprise entre celles de l'aluminium (2,7 g/cm<sup>3</sup>) et du fer (7,9 g/cm<sup>3</sup>) et des propriétés mécaniques proches de celle de l'acier. Il dispose d'une excellente résistance à la corrosion supérieure à celle de l'acier inoxydable. Sa stabilité en milieux à caractère oxydant neutre (eau de mer, milieux organiques et atmosphériques) est exceptionnelle. De plus, il comprend une résistance mécanique importante et une bonne ductilité en température. Le titane comprend de nombreux alliages dont en l'occurrence le titane Grade 2 qui sera largement utilisé dans le cadre de ce mémoire. Le titane Grade 2 encore appelé titane CP3 (Ti Gr2) est un alliage alpha ( $\alpha$ ) du titane commercialement pur. Il présente une bonne ductilité en plus d'avoir une bonne résistance à la corrosion notamment en milieux chlorés ce qui est favorable aux applications en milieux marins. Sa bonne résistance à l'oxydation est due au fait qu'en présence d'oxygène, celui-ci

crée une couche passive de l'ordre du nm ce qui a pour effet de le doter d'une excellente résistance à la corrosion. De plus, il dispose d'une excellente biocompatibilité pour des applications dans le corps humain. Enfin, il est très utilisé comme métal pour des applications biomédicales, chirurgicales et dentaires de la micro mécanique à l'exemple des implants. Dans l'ensemble de cette étude, le titane de Grade 2 sera nommé titane (Ti).

#### **II.A.1.4. Propriétés des métaux pour les ondes SAW**

Les caractéristiques élastiques pour la conception des dispositifs à ondes SAW sont spécifiques d'un métal à un autre. Parmi les trois métaux choisis comme substrat, le duralumin est plus léger avec des vitesses d'ondes longitudinales et transversales respectivement de 6420 et 3040 m/s [101], cependant, il est relativement mou, ce qui n'est pas favorable à la propagation des ondes SAW.

L'acier inoxydable quant à lui présente une dureté plus élevée que celle de l'aluminium favorable à la propagation des SAW. De plus, il présente des vitesses d'ondes longitudinales et transversales respectivement de 5950 et 3240 m/s [101]. Ces propriétés font de lui un métal bien adapté pour la réalisation de dispositifs SAW.

Le titane est un métal relativement très dur en comparaison à l'aluminium et l'acier inoxydable et en plus d'être léger. Ceci fait de lui un candidat plus prometteur pour la propagation des ondes SAW. Enfin et en plus des propriétés intéressantes préalablement mentionnées, il présente des vitesses d'ondes longitudinales et transversales respectivement de 6070 et 3125 m/s [101].

#### **II.A.2. Les électrodes interdigitées (IDTs) : Aluminium**

La réalisation des IDTs dans les dispositifs SAW se fait à partir d'une couche mince métallique de quelques dizaines à quelques centaines de nanomètres d'épaisseur. Le choix de l'épaisseur des électrodes peut affecter le dispositif, car une épaisseur trop faible entraîne une augmentation de la résistance électrique au sein de celles-ci [102], à l'inverse, une grande épaisseur entraînerait un amortissement important des SAW [103]. En fonction des applications visées, les matériaux sélectionnés pour réaliser les IDTs et leurs épaisseurs diffèrent selon l'application visée. Les matériaux doivent regrouper les caractéristiques suivantes :

- Être bon conducteur électrique dans le cadre de l'optimisation du signal à onde élastique de surface, ce qui permet de limiter les pertes électriques.

- Avoir une température de fusion largement supérieure aux températures de fonctionnement visées.
- Être chimiquement inerte à haute température et dans l'atmosphère de fonctionnement.

Le tableau II.1 regroupe les propriétés physiques de plusieurs métaux conventionnels. Y sont précisées la vitesse élastique transversale ( $V_T$ ), la densité volumique ( $\rho$ ) et l'impédance acoustique ( $Z$ ).

Tableau II. 1 : Propriétés des électrodes les plus utilisées.

|   | Aluminium | Cuivre | Or   | Platine |
|---|-----------|--------|------|---------|
| $V_T$<br>(m/s)                            | 3200      | 2900   | 1500 | 1900    |
| $\rho$<br>( $10^3 \text{ Kg/m}^3$ )       | 2,7       | 8,9    | 19,3 | 21,4    |
| $Z$<br>( $10^7 \text{ Kg/m}^2/\text{s}$ ) | 0,9       | 2,6    | 2,9  | 3,9     |

Le choix de l'aluminium comme électrode s'est fondé sur ces propriétés physiques à savoir qu'il est bon conducteur électrique, son impédance acoustique [104] est très proche des substrats les plus couramment utilisés ce qui a pour effet de réduire les réflexions des ondes acoustiques sur les électrodes et il est moins onéreux que les autres métaux (platine, cuivre, or, argent, etc.). Il est également moins dense que les métaux précédemment cités ce qui baisse l'impact du poids des IDTs sur la fréquence de fonctionnement des dispositifs SAW (« *mass loading* »). De plus, l'intervalle d'étude en température visé par nos travaux n'excédera pas les 400°C, de ce fait, l'aluminium avec sa température de fusion de 660°C s'est présenté pour nous comme étant le bon candidat.

### II.A.3. Couches de génération d'ondes élastiques

Dans cette partie, il sera question de procéder au choix du matériau piézoélectrique déposé sous forme de couche mince sur la pièce ou substrat métallique. Les deux matériaux généralement utilisés puisque leur dépôt en couche mince est maîtrisé sont l'oxyde de zinc (ZnO) et le nitrure d'aluminium (AlN).

#### II.A.3.2. Le nitrure d'aluminium (AlN)

Le nitrure d'aluminium est un matériau piézoélectrique qui présente des propriétés électroacoustiques et thermique intéressantes. C'est un candidat désirable dans des applications

de capteurs SAW à haute température [105] en plus d'avoir une grande vitesse élastique de 5600 m/s considéré comme la plus grande vitesse des matériaux piézoélectriques. Il présente également une excellente stabilité en température allant jusqu'à 1000°C, une très grande résistivité atteignant  $10^{10} \Omega.m$  à 1000°C [106] avec un TCF de -19 ppm/°C. Cependant, il possède certaines limites, notamment un faible coefficient de couplage  $K^2$  ce qui représente un point faible pour des applications sans fil. De plus, une croissance de couche d'AlN épaisse de bonne qualité cristalline sur un métal industriel quelconque présente de grandes difficultés rendant problématique son utilisation dans le cadre de notre application.

### II.A.3.1. L'oxyde de Zinc (ZnO)

L'oxyde de zinc est un matériau largement utilisé dans la réalisation des dispositions à ondes élastiques de surface. En effet, celui-ci peut se cristalliser sous la forme wurtzite, blende de zinc ou rocksalt. Il est étudié majoritairement sous la forme wurtzite du groupe d'espace P63mc qui est sa seule structure piézoélectrique en condition normale de température et de pression. Cette forme se constitue d'un empilement de plans d'atomes de zinc de charge positive et d'atomes d'oxygène de charge négative. Cet empilement constitue plus précisément deux sous-réseaux interpénétrés du type hexagonal compact. Il regroupe plusieurs avantages, à savoir qu'il est faiblement coûteux et cristallise à faible température, facile à faire croître sur un grand nombre de substrats et même sur du plastique. De plus, il présente un coefficient de couplage ( $K^2$ ) relativement grand ( $K^2 > 1\%$ ), ce qui est favorable aux applications sans fil [107], [108] et un TCF de -40 ppm/°C favorable pour la réalisation de capteurs de température [109]. Il sera donc le matériau sélectionné dans le cadre de ce manuscrit.

Le tableau ci-dessous résume les propriétés fonctionnelles des deux couches minces piézoélectriques considérées, à savoir le ZnO et l'AlN.

Tableau II. 2 : Propriétés des couches d'AlN et de ZnO piézoélectriques les plus utilisés

| Matériaux | $K^2(\%)$ | $V_{saw}$ (m/s) | TCF (ppm/°C) |
|-----------|-----------|-----------------|--------------|
| ZnO       | >1%       | 2700            | -40          |
| AlN       | 0.3       | 5600            | -19          |

### II.A.4. Configuration résonateur

Dans le cadre de ce chapitre, la configuration résonateur synchrone à un port est celle qui a été retenue dans un premier temps parmi les configurations mentionnées dans le chapitre

précédent. Celle-ci, se constitue de deux ensembles de 2 réflecteurs composés chacun de 200 électrodes métalliques court-circuitées par un bus-bar de part et d'autre d'un peigne interdigité (IDT) central composé de 100 paires de doigts métalliques. La largeur des électrodes est de  $\lambda/4$  dans le cas d'un taux de métallisation de 50% (voir la Figure 2.2). Cette configuration permet d'exciter des modes de vibration stationnaires à l'intérieur d'une cavité résonante.

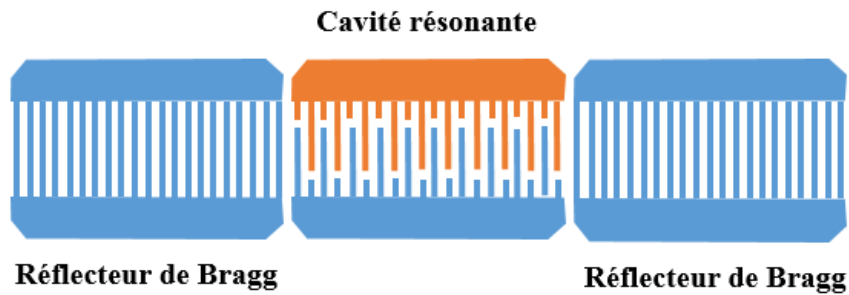


Figure 2. 2 : Représentation d'un résonateur simple port. Un peigne interdigité au centre entouré de deux réflecteurs en configuration miroir de Bragg.

La fréquence de résonance dans un résonateur est donnée par la relation :

$$f = v \cdot \lambda \quad (2.1)$$

Avec  $v$  la vitesse de propagation de l'onde et  $\lambda$  la longueur d'onde du dispositif. La période du réseau d'électrodes  $p = \lambda/2$

## II.B. Techniques théoriques et expérimentales des capteurs SAW sur substrats métalliques

### II.B.1. Modélisation et simulation numériques

#### II.B.1.1 Simulation numérique d'un dispositif SAW

La plupart des logiciels de simulation utilisent des programmes tels que la méthode par élément de frontière (BEM, de l'anglais Boundary Element Method) et la méthode par élément fini (FEM pour Finite Element Method).

- La méthode de calcul numérique BEM est permet de résoudre des équations différentielles partielles linéaires qui ont été formulées sous forme d'équations intégrales, pour l'étude des problèmes de l'acoustique, de l'électromagnétisme et de la mécanique des fluides.
- La méthode FEM permet de procéder à la discrétisation par éléments finis de la structure à simuler dans le but de résoudre le problème.

Dans le cadre de la simulation d'un dispositif à ondes élastiques de surface (SAW) généralement constitué d'un substrat disposant de propriétés piézoélectriques et d'électrodes interdigités, le modèle physico-mathématique combine les équations de la mécanique du solide en plus des déformations du matériau piézoélectrique relié aux champs électriques. Les relations suivantes font intervenir les coefficients élastiques et piézoélectriques :

$$D_i = e_{ikl} S_{kl} + \varepsilon_{ij} E_j \quad (2.2)$$

$$T_{ij} = c_{ijkl} S_{kl} - e_{kij} E_k \quad (2.3)$$

Avec  $D_i$  le tenseur de déplacement électrique,  $e_{ikl}$  le tenseur piézoélectrique,  $S_{kl}$  le tenseur de déplacement mécaniques,  $\varepsilon_{ij}$  le tenseur de permittivité,  $E_k$  le vecteur champ électrique et  $T_{ij}$  le tenseur des contraintes mécaniques et  $c_{ijkl}$  le tenseur d'élasticité [105].

L'optimisation de la simulation des dispositifs SAW classiques en configuration résonateur consistera à réduire son modèle globalement tridimensionnel en un modèle à deux dimensions (Figure 2.3) ou grâce aux opérations de périodicité, à ramener le modèle tridimensionnel global à un modèle tridimensionnel à une ou deux électrodes (Figure 2.4). Ceci a pour effet de réduire le temps de calcul et de rendre le modèle plus souple durant le procédé de simulation. Ces modèles seront présentés plus en détail dans la suite de ce manuscrit.

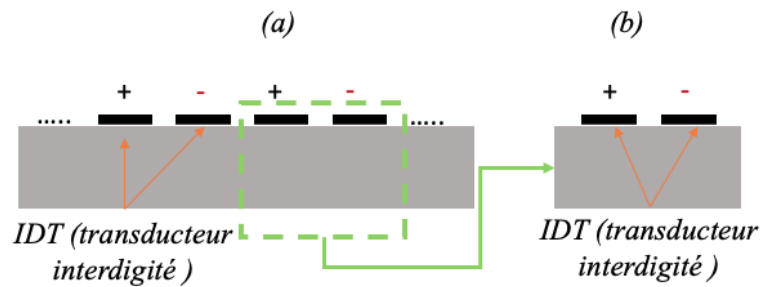


Figure 2. 3 : Représentation (a) d'un modèle 2D d'un réseau infini d'électrodes, (b) d'une cellule 2D d'un modèle périodique.

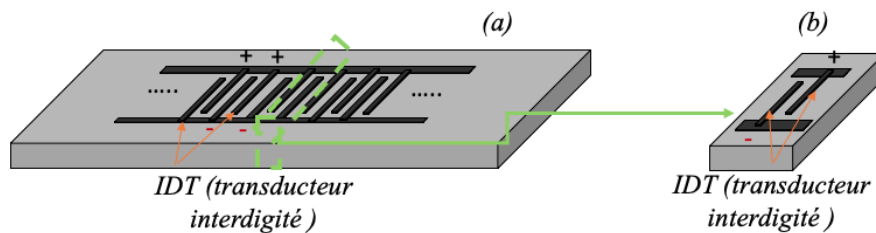


Figure 2. 4 : Représentation (a) d'un modèle 3D d'un réseau infini d'électrodes, (b) d'une cellule 3D d'un modèle périodique.

### II.B.1.2. Simulation numérique de la structure ZnO/substrat métallique

La structure ZnO/substrat métallique en configuration résonateur a été modélisée de manière simplifiée sur Comsol Multiphysics grâce à un modèle développé par le Pr. S. Zhgoon (voir Figure 2.5)

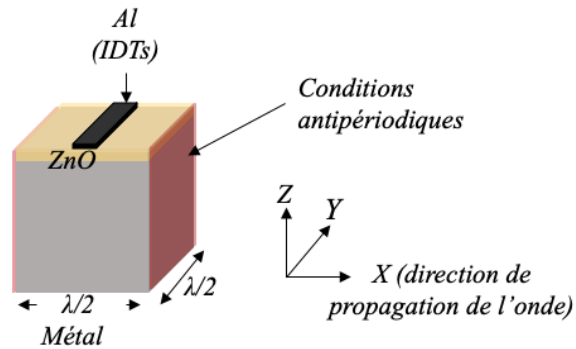


Figure 2. 5 : modèle 3D d'une cellule antipériodique simulée à l'aide de Comsol Multiphysics.

Le modèle prend en compte une électrode déposée sur un empilement de couches et présentant des conditions aux frontières d'antipériodicité. Cette géométrie permet de faire le calcul par simulation d'une structure infinie présentant de bonnes approximations d'un résonateur synchrone complet. Le calcul réalisé sur ce logiciel utilise la méthode par élément fini (FEM) qui par des discrétisations de la structure permet de résoudre les équations de propagation d'une onde dans un milieu piézoélectrique. La détermination des constantes de rigidité, de piézoélectricité, de permittivité et de la densité des matériaux considérés dans la structure est faite au niveau de la bibliothèque du logiciel Comsol Multiphysics ou de la littérature [111], [112]. La largeur de l'électrode précisée par le taux de métallisation (50%) est de  $\lambda/4$ , et l'ouverture est de  $\lambda/2$ . L'épaisseur du substrat est prise de sorte à favoriser un calcul optimal aussi bien dans les résultats que dans le temps de calcul. Celle-ci est autour de  $100\ \mu\text{m}$  avec une condition absorbante progressive sur le demi-volume inférieur et un encastrement appliqué à la face inférieure de sorte à fixer la structure. L'étape du maillage est très importante. En effet, le choix du maillage doit se faire suivant le compromis du temps de calcul et de la précision du résultat. De ce fait, plus celui-ci est fin, plus le résultat est précis, mais plus le temps de calcul est long. À l'inverse, plus le maillage est large, plus le temps de calcul est court, mais le résultat est erroné. De plus, un bon maillage doit prendre en compte la nature de l'onde que l'on souhaite générer. Dans notre cas sont des ondes de surface dont la propagation se fait principalement en surface. Dans ce cas, il est plus judicieux d'avoir un maillage fin en surface pour terminer par un maillage large dans la zone inférieure. On peut dire qu'un maillage est optimisé quand la réduction de la taille des mailles n'influe quasiment plus sur les résultats de simulation.

Enfin, l'étape de simulation, nous permet de rentrer en possession des caractéristiques de la structure, à savoir les fréquences d'apparition des ondes et donc leurs vitesses, en plus

d'autres paramètres comme le coefficient de couplage électromécanique ( $K^2$ ). On peut aussi observer les déplacements particuliers des différentes ondes générées dans la structure pour l'identification de la nature des ondes.

### Onde de Rayleigh dans la structure ZnO/substrat métallique

Dans les investigations faites sur la structure ZnO /substrat métallique, l'étude théorique a été effectuée sur trois métaux, à savoir le duralumin, l'acier inoxydable et le titane pris comme substrats. La couche piézoélectrique de ZnO a  $2 \mu\text{m}$  d'épaisseur est présente sur le substrat métallique et la longueur d'onde d'étude est fixée à  $\lambda=8\mu\text{m}$ . Les admittances  $|Y_{11}|$  des ondes de surface pour des substrats métalliques de différentes natures sont tracées dans la Figure 2.6. Ces courbes montrent que les fréquences des trois structures sont dans le même ordre de grandeur avec des fréquences propres de 319 MHz, 332MHz et 355 MHz respectivement pour les structures ZnO/duralumin, ZnO/acier inoxydable et ZnO/ titane. De manière attendue, c'est sur le substrat de titane (matériau à la fois dur et léger) que la vitesse de l'onde reste la plus élevée.

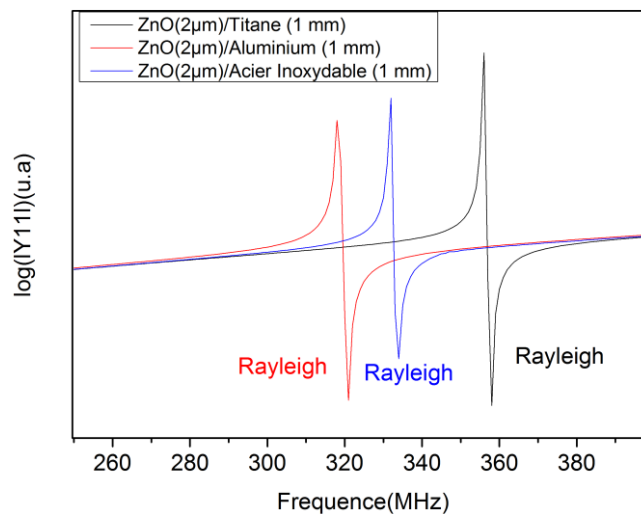


Figure 2. 6 : Évolution de l'admittance  $|Y_{11}|$  en fonction de la fréquence obtenue par simulation pour différents substrats métalliques.

La Figure 2.7 montre les déplacements particuliers de l'onde de Rayleigh sur les trois directions (axes) dans la structure ZnO/Ti. Le déplacement particulier pour cette onde est maximal suivant l'axe Z, faible selon X et nul suivant l'axe Y, ce qui correspond à la

polarisation elliptique typique de l'onde de Rayleigh. Notons que pour permettre une meilleure comparaison, l'échelle et le code couleur utilisée sont identiques pour toutes les directions.

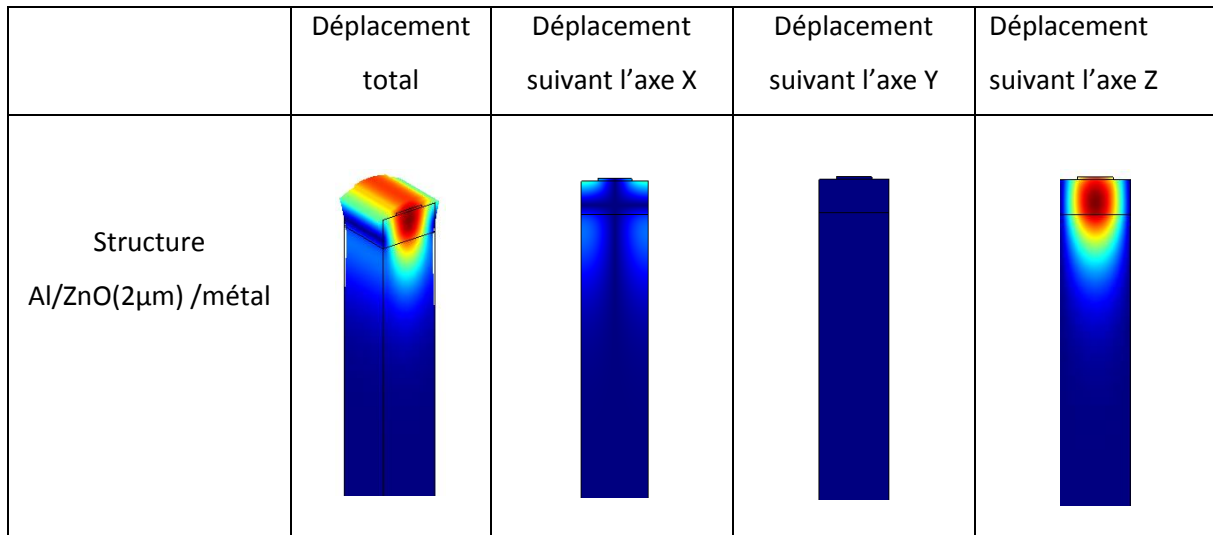


Figure 2. 7 : Déplacements particuliers de l'onde de Rayleigh dans la structure ZnO/Ti suivant les trois directions (XYZ) à la fréquence 355 MHz.

## II.B.2. Étude expérimentale de la structure ZnO/substrat métallique

### II.B.2.1. Préparation de la surface des substrats métalliques

Dans l'objectif de réaliser un dispositif SAW directement intégré sur substrat métallique, le procédé de fabrication prend en compte plusieurs étapes à savoir : le découpage et la préparation de la surface du substrat par polissage, la croissance du film mince piézoélectrique et enfin la fabrication des électrodes interdigitées (IDTs). Chaque étape est suivie d'une caractérisation de contrôle.

#### II.B.2.1.1. Découpe

Dans l'objectif de partir de métaux industriels « bruts », des plaques métalliques d'acier inoxydable, de duralumin et de titane ont été prises au niveau de l'atelier de l'Institut Jean Lamour. Elles ont par la suite été découpées suivant les dimensions désirées pour suivre les étapes de microfabrication en salle blanche. La Figure 2.8 illustre un exemple de plaque de titane brute prise au sein de l'atelier.



Figure 2. 8 : Plaque de titane.

La tronçonneuse Accutom de Struers (voir figure 2.9) a été utilisée dans le but de réaliser la découpe de la pièce métallique. Cette machine permet une grande précision et une facilité d'utilisation qui favorise une optimisation de la découpe.



Figure 2. 9 : Tronçonneuse Accutom de Struers.

La figure 2.10 montre une illustration d'un échantillon de titane après découpe suivant la dimension  $25 \times 20 \times 1$  mm

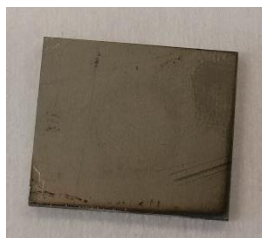


Figure 2. 10 : Échantillon de titane après découpe.

### II.B.2.1.2 Polissage qualité miroir : procédés.

La préparation de l'état de surface du substrat métallique est une étape très importante dans le but d'améliorer la rugosité de surface. En général, une surface polie « miroir » avec une rugosité de quelques nanomètres est requise pour la réalisation des techniques de microfabrication. La préparation du substrat se fera suivant deux étapes, à savoir la découpe et le polissage.

Le polissage est réalisé en utilisant comme machine la polisseuse Tegrapol de Struers (voir Figure 2.11). Celle-ci permet de réaliser des polissages de haute qualité présentant de faibles rugosités par l'utilisation de feuilles et papiers de carbure de silicium, en plus des solutions diamantées.



Figure 2. 11 : Équipement de pré polissage et de polissage Accutom de Struers.

- **Feuilles et papiers en carbure de silicium** : elles permettent d'obtenir un prépolissage rapide et flexible. Elles présentent de nombreuses qualités à savoir qu'elles garantissent une bonne reproductibilité des résultats en plus d'être compatibles avec toutes les installations. Elles disposent de tailles de grains différentes allant de 21,5 à 5  $\mu\text{m}$ . (Voir Figure 2.12.a)
- **Solutions diamantées** : l'utilisation des solutions diamantées permet d'affiner et de lisser la surface de l'échantillon. En effet, elles éliminent efficacement les rayures introduites par le prépolissage sans causer des déformations « beurrage » de la microstructure en plus. Une solution diamantée combine suspension, drap de

polissage et lubrifiant. (Voir Figure 2.12.b). La taille des grains de diamant est comprise entre 3 à 0,25  $\mu\text{m}$ .

- **Solution de suspension aux oxydes de Struers** : la suspension aux oxydes Struers aussi appelée OPS est une suspension à silice colloïdale particulièrement adaptée au polissage des métaux très ductiles à savoir le titane, l'aluminium, le tungstène et autres. Elle combine l'abrasion douce et l'action chimique de sorte à aboutir à une surface totalement lisse sans présence de rayures.



Figure 2. 12 : (a) Papiers en carbure de silicium, (b) solutions diamantées.

La Figure 2.13 illustre l'état de surface obtenu sur les trois pièces métalliques, à savoir respectivement le titane, le duralumin et l'acier inoxydable après les opérations de polissage. Il peut être observé un état de surface lisse présentant l'apparence d'une surface miroir. Les caractérisations en microscopie à force atomique (Atomic Force Microscopy, AFM) de l'état de surface des trois métaux après polissage sont donnés dans la Figure 2.14. Pour un procédé de polissage identique, ceux-ci présentent des rugosités respectives de 9,3 nm pour le duralumin, 14 nm pour l'acier inoxydable et 16 nm pour le titane.

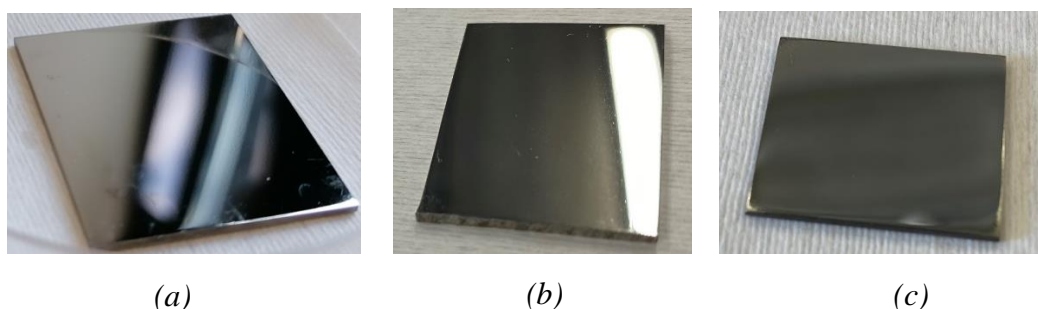


Figure 2. 13 : Échantillon de (a) titane, (b) duralumin et (c) acier inoxydable poli.

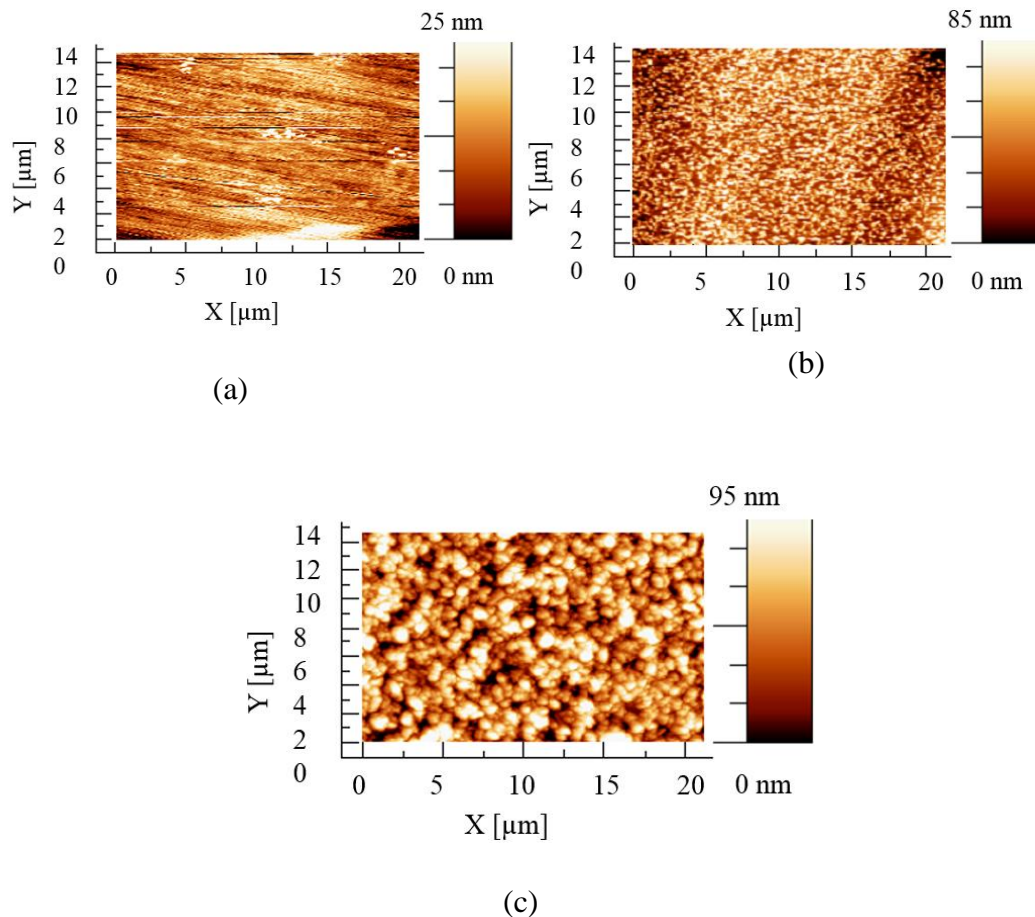


Figure 2. 14 : Caractérisation AFM de l'état de surface des métaux (a) Duralumin, (b) Acier inoxydable et (c) Titane.

### II.B.3. Dépôt et caractérisation de couches cristallines

#### II.B.3.1. Dépôt par pulvérisation cathodique : techniques de croissance de ZnO et AlN

Les techniques de croissances de couches de ZnO et d'AlN sont diverses et les plus utilisées sont : le dépôt chimique en phase vapeur (CVD pour chemical vapor deposition) [113], l'évaporation [114], la pulvérisation cathodique [115], l'épitaxie par jets moléculaires (MBE pour Molecular Beam Epitaxy) [116]. Chaque méthode de dépôt présente ses propres spécificités. Dans le cadre de ce manuscrit, nous avons fait le choix de la croissance par pulvérisation cathodique réactive magnétron au vu de la maîtrise de ce procédé dans l'équipe.

La pulvérisation cathodique réactive magnétron est une des variantes des techniques (PVD) de dépôt physique en phase vapeur. Elle consiste à bombarder d'ions le matériau à déposer via un plasma froid créé dans une chambre. La chambre est précédemment mise sous vide poussé (autour de  $10^{-7}$  mbar), ce qui a pour but de remédier au problème de contamination.

Par la suite, l'introduction d'un gaz, une différence de potentiel entre la cathode (cible) de potentiels négatifs et l'anode (le substrat) est appliquée, ce qui entraîne l'accélération des électrons présents dans le gaz. Les collisions entre ces électrons et les atomes du gaz entraînent leur ionisation et la génération d'un plasma. Les ions créés sont accélérés vers la cible (gaine cathodique) et acquièrent ainsi une énergie cinétique qu'ils libèrent suite au choc à la surface de la cible. Ceci entraîne l'éjection d'un atome de la cible qui va par la suite se déposer sur le substrat pour ainsi former la couche mince (Figure 2.15).

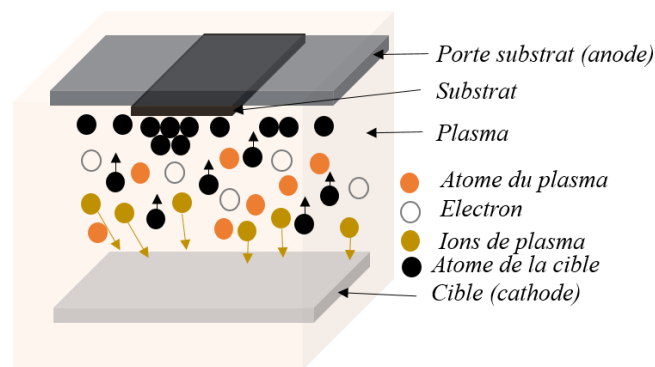


Figure 2. 15 : Schéma du principe de pulvérisation d'une cible.

Dans l'objectif de confiner les ions au voisinage de la cible et d'accroître la vitesse de croissance, les machines sont généralement équipées d'un procédé magnétron. En effet, la présence d'un aimant sous la cible crée une superposition d'un champ magnétique et d'un champ électrique à la surface de celle-ci (Figure 2.16), ce qui aura pour effet d'augmenter la densité ionique dans cette zone, ce qui augmente le nombre d'impacts et ainsi accroît la vitesse de croissance.

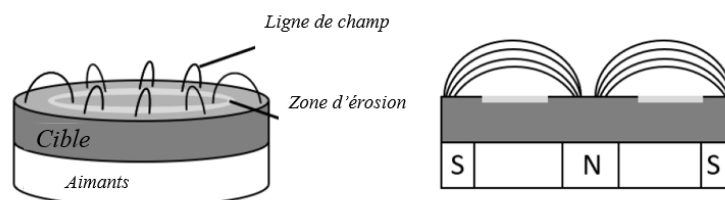


Figure 2. 16 : Schéma d'une cathode magnétron plane et représentation des lignes de champ magnétiques [104].

La méthode de pulvérisation cathodique réactive magnétron a largement été utilisée dans notre groupe pour la réalisation de couches minces dans le bâti DP650 de la marque

Alliance Concept (Figure 2.17). Celui-ci se constitue comme suit : une chambre constituée de 6 cibles de matériaux différents de taille 4 pouces généralement maintenus dans un vide secondaire ( $10^{-7}$  mbar), un sas par lequel on introduit le porte substrat qui sera par la suite transféré dans la chambre grâce à l'utilisation d'un bras manuel localisé dans le sas. Pour des mélanges de gaz bien spécifiques lors des dépôts, trois lignes de gaz reliées à la chambre permettent d'introduire du diazote ( $N_2$ ), du dioxygène ( $O_2$ ) et de l'argon ( $Ar$ ). Le port substrat est situé à 10 cm de la cible dans l'enceinte de la chambre, lors la réalisation des dépôts à chaud, l'élément chauffant peut monter jusqu'à  $800^\circ C$ . L'ensemble est refroidi par un système de circulation d'eau.

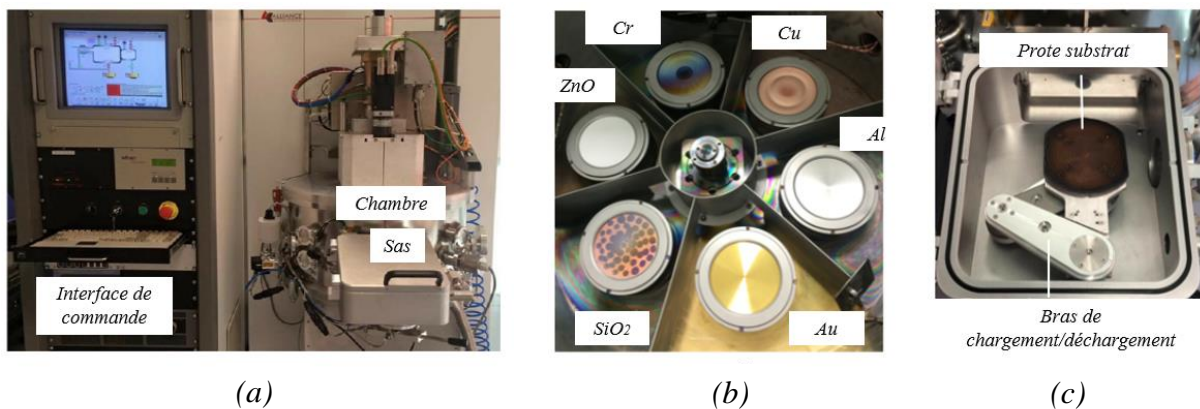


Figure 2. 17 : Bâti de DP650 (Alliance Concept) : (a) vue globale, (b) intérieur de la chambre contenant les cibles, (c) intérieur du sas de chargement [117].

Par ailleurs, il est important de noter que la réalisation des dépôts prend en compte plusieurs paramètres, à savoir la température, la pression, la puissance, la nature du substrat, son orientation et ainsi que le matériau à déposer. Sur ce bâti, la génération du plasma peut se faire par décharge cathodique continue (DC) ou par décharge radiofréquence (RF) qui a été utilisée dans le cadre de ces recherches.

### **Paramètre de dépôt de la couche mince piézoélectrique de ZnO**

Le film mince piézoélectrique de ZnO pour la structure Al/ZnO/métal a été déposé par pulvérisation cathodique réactive magnétron suivant les paramètres mentionnés dans le tableau II.3 au sein du bâti de la DP650 en mode RF. La réalisation de la couche d'oxyde de zinc s'est

faite à l'aide d'une cible d'oxyde de zinc riche en oxygène en présence du dioxygène et d'argon à la température de 170 °C, ce qui a pour but de favoriser la cristallisation du matériau déposé.

Tableau II. 3 : Paramètre de dépôt de la couche d'oxyde de zinc (ZnO)

| Cible                   | ZnO                                |
|-------------------------|------------------------------------|
| Gaz                     | 8 sccm O <sub>2</sub><br>8 sccm Ar |
| Température du substrat | 170°C                              |
| Pression                | 6.10 <sup>-3</sup> mbar            |
| Puissance               | 150 W                              |
| Épaisseur visée         | 2 µm                               |

### II.B.3.2. Caractérisation de couches cristallines

La caractérisation structurale des couches cristallines est une étape importante qui permet d'étalonner les paramètres de dépôt, d'optimiser les propriétés des films minces et d'apporter des éléments d'analyse et d'interprétation des caractéristiques physico-chimiques des matériaux. Dans ce manuscrit, les études de la structure cristalline et de la morphologie à la surface du dépôt se sont faites par diffraction à rayon X (DRX) et par microscopie AFM.

#### II.B.3.2.1. Diffraction des rayons X

La diffraction à rayon X est une technique de caractérisation non destructive qui permet de fournir des informations sur l'état cristallin d'une structure et son orientation de phase. Son principe de fonctionnement est donné dans [118]. Le diffractomètre D8 Advance-Burker a été utilisé dans le cadre de la caractérisation des couches minces. Cet équipement dispose d'une configuration  $\theta$ - $2\theta$  qui permet de faire diverger le faisceau incident et ainsi offre un faisceau fin d'une intensité supérieure. De plus, il effectue ses mesures via une longueur d'onde  $K\alpha_1$  du cuivre ( $\lambda = 1,54056 \text{ \AA}$ ).

La Figure 2.18 correspond au diagramme  $\theta$ - $2\theta$  de la bicouche ZnO (2µm) /Ti (1 mm). Celui-ci présente une orientation préférentielle d'une seule famille du ZnO à savoir celle du plan (002), ce qui montre une couche piézoélectrique texturée. De plus, le tracé rocking curve réalisé par l'équipement X'pert Pro MRD (PA Nalytical) donne une désorientation des grains estimée à 2.1° pour l'orientation (002). Cette valeur est un très bon résultat pour une croissance sur un métal industriel.

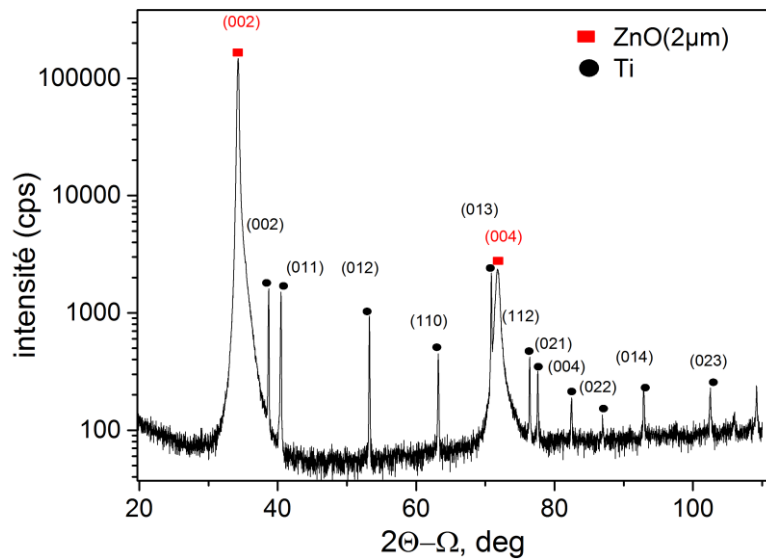


Figure 2. 18 : Diagramme DRX  $\theta$ - $2\theta$  de la structure ZnO(2 $\mu$ m) /Ti.

### II.B.3.2.2. Microscope à force atomique (AFM)

L'état de surface joue un rôle très important dans l'élaboration de notre structure. La caractérisation de celui-ci s'est faite par l'utilisation d'un microscope à force atomique. L'équipement de topographie de surface utilise une pointe AFM précédemment rendue conductrice par un revêtement métallique, de diamant dopé ou des pointes de diamant dopé massif. La sonde AFM est reliée à un convertisseur de courant-tension de grande sensibilité, la tension appliquée entre la pointe AFM et le support du porte échantillon est converti en courant et le courant collecté est cartographié à la topographie de la surface l'échantillon.

La caractérisation AFM faite sur la couche piézoélectrique de ZnO dans la structure ZnO (2 $\mu$ m) /Ti est illustrée dans la Figure 2.19. Celle-ci donne une valeur de rugosité de 20,2 nm, qui peut encore être optimisé, mais reste suffisamment acceptable pour une réalisation d'électrodes interdigitées avec des longueurs d'onde de l'ordre de 10  $\mu$ m.

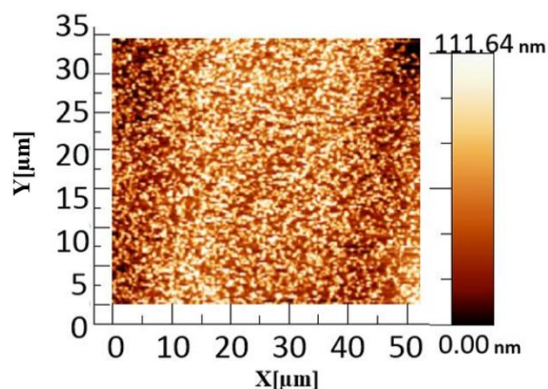


Figure 2. 19 : Cartographie 2D de la topographie de la couche de ZnO texturée sur pièce métallique.

## II.B.4. Procédés de fabrication des IDTs : description des étapes technologique des dispositifs SAW

La réalisation des électrodes interdigitées fait partie des étapes les plus importantes de la réalisation de nos dispositifs. En fonction de leur design, ils influencent l'évolution du système aussi bien sur la taille du dispositif à concevoir que sur les applications recherchées. Dans ce chapitre, la réalisation d'électrodes se fera en configuration résonateur. Toute la réalisation a été effectuée au sein de la centrale de micro et nanofabrication de l'Institut Jean Lamour au centre de compétence (CC) de MiNaLor, notre salle blanche.

### II.B.4.1. Réalisation de motif par lift-off : procédé général

La réalisation des motifs dans ce travail s'est faite par un procédé de lift-off. La Figure 2.20 résume les différentes étapes du procédé de lift-off utilisant une bicouche de résines LOR3A/S1813 afin de former un profil casquette. Cette technique consiste à faire le dépôt d'une couche métallique par évaporation sur une résine préalablement texturée par photolithographie, suivi d'une dissolution de la résine dans un solvant.

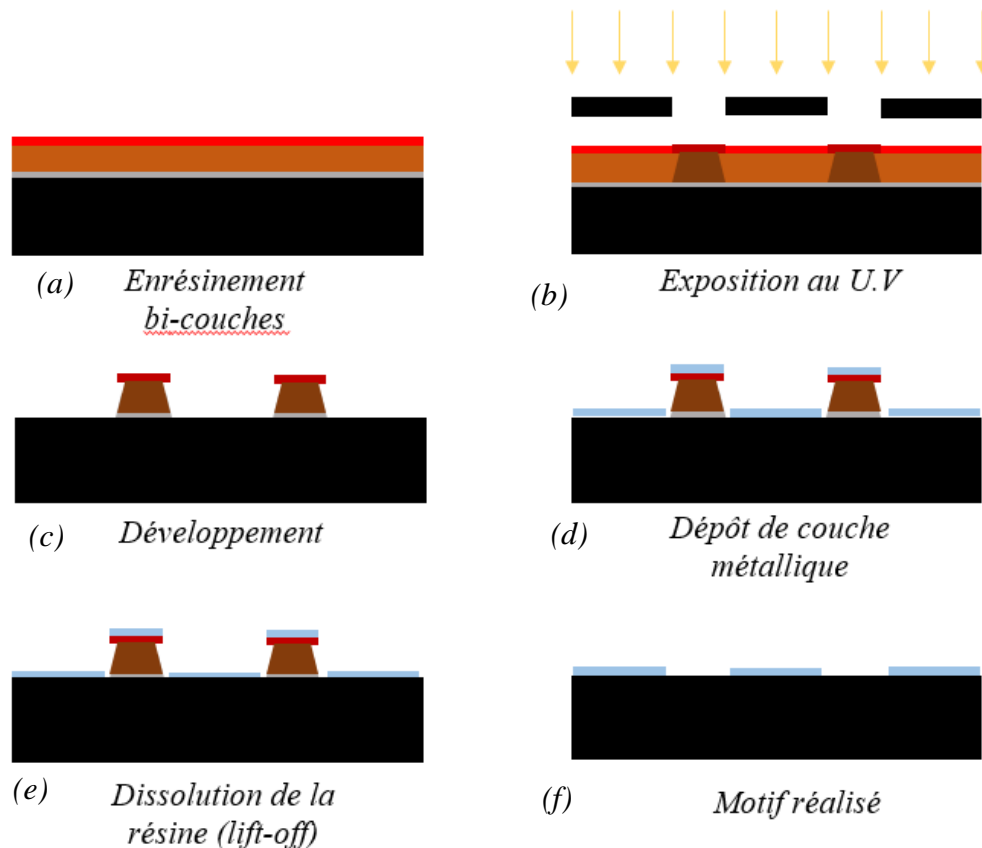


Figure 2. 20 : Schéma du procédé de fabrication d'IDTs par lift-off basé sur l'utilisation d'une bi-couche LOR3A/S1813.

#### II.B.4.1.1. L'énrésinement

L'énrésinement consiste à recouvrir d'une couche de résine toute la surface de l'échantillon. Dans cette étude, l'enduction réalisée en salle blanche sur la surface de l'échantillon s'est faite en trois étapes (figure 2.20a). Pour faciliter l'adhésion des couches de résine, un premier revêtement de Primer a été réalisé. Une couche de résine (LOR 3A) sensible au développeur (MF 319) et au solvant de dissolution a donc été appliquée suivant une configuration de rotation bien spécifique, puis polymérisée. Enfin, une deuxième couche de résine photosensible (positive S1813) a ensuite été enduite et également polymérisée. Le tableau II-4 ci-dessous résume les différentes configurations utilisées dans le cadre de la réalisation de l'énrésinement.

Tableau II. 4 : paramètre de configuration d'énrésinement.

| Couche | Vitesse     | Accélération  | Temps | Température et temps de recuit. |
|--------|-------------|---------------|-------|---------------------------------|
| Primer | 7000 tr/min | 1000 tr/min/s | 30    | 115°C (60s)                     |

|        |             |               |    |              |
|--------|-------------|---------------|----|--------------|
| LOR 3A | 7000 tr/min | 1000 tr/min/s | 30 | 140°C (120s) |
| S1813  | 10000 rpm   | 7000 rpm/s    | 60 | 115°C (60s)  |

#### II.B.4.1.2. L'insolation et le développement

L'insolation est l'étape qui suit immédiatement la polymérisation de la résine, elle consiste à faire une exposition de la résine à la lumière ultraviolette, ce qui déclenche une série de réactions chimiques dans la résine. Dans le cadre notre étude, l'aligneur de masque MJB4 (SUSS MicroTec) a été utilisé pour réaliser l'insolation (voir Figure 2.21). Cet appareil permet d'effectuer l'alignement puis le plaquage d'un masque en plaque de verre avec un revêtement de chrome contenant le motif et l'échantillon. Durant l'exposition, la lumière ultraviolette traverse les zones non protégées du masque (zones transparentes) avec une longueur d'onde de 365 nm, il s'ensuit une rupture des chaînes du polymère dans les zones exposées qui seront par la suite solubles à la solution de développement (MF 319) comme illustré dans la figure 2.20c. Un ajustement précis des temps d'exposition et de temps de développement est nécessaire sachant que ces paramètres varient en fonction des substrats utilisés. Il est donc important de faire un bon étalonnage de ces paramètres pour éviter une dégradation des motifs.

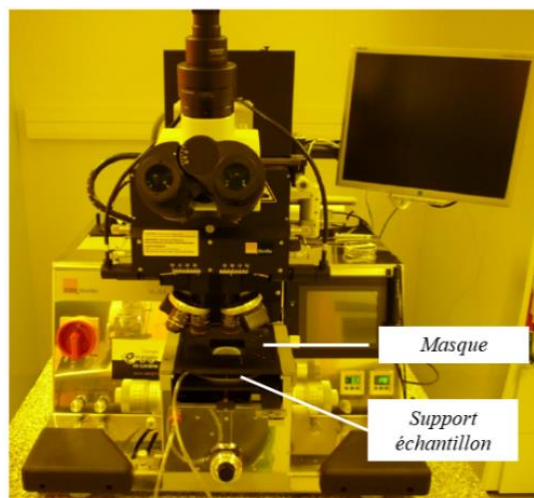


Figure 2. 21 : Aligneur MJB4 (SUSS MicroTec).

#### II.B.4.1.3. Dépôt de la couche métallique et dissolution de la résine

Après l'étape de développement, le dépôt de la couche mince métallique en aluminium de 150 nm d'épaisseur est réalisé sur le bâti d'évaporation comme le montre la Figure 2.22.



Figure 2. 22 : Bâti d'évaporation par canon à électrons.

La dernière étape est la dissolution de la résine par l'utilisation d'une solution de Remover 1165. Celui-ci va dissoudre la première couche de résine (LOR 3A) pour enfin révéler les motifs structurés par la couche métallique (voir Figure 2.23). Le nettoyage final du dispositif se fait par l'utilisation d'un bain d'acétone et d'isopropanol.

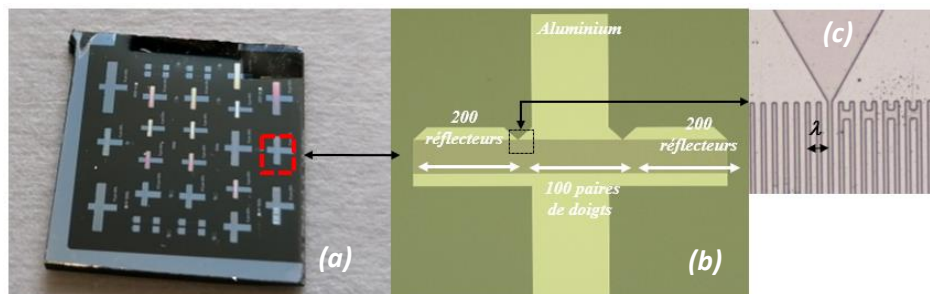


Figure 2. 23 :(a) Photo des peignes interdigités en Al de longueur d'onde  $8\ \mu\text{m}$  réalisés par lift-off sur substrat métallique en Ti (vue du dessus), (b) image microscopique d'un résonateur ( $\lambda=8\ \mu\text{m}$ ), (c) zoom du bord englobant les électrodes interdigitées et les réflecteurs.

## II.C. Caractérisations électriques

### II.C.1. Caractérisation ex-situ sous pointes

Les mesures fréquentielles des dispositifs du type résonateur conçus plus haut, ont été réalisées sur un banc de de mesure sous-pointes (PM5 SUSS MicroTec), relié à un analyseur réseau vectoriel (VNA Agilent-N 5230A) comme indiqué dans la Figure 2.24. Ce banc permet en outre de déterminer la sensibilité en température (TCF) du dispositif.

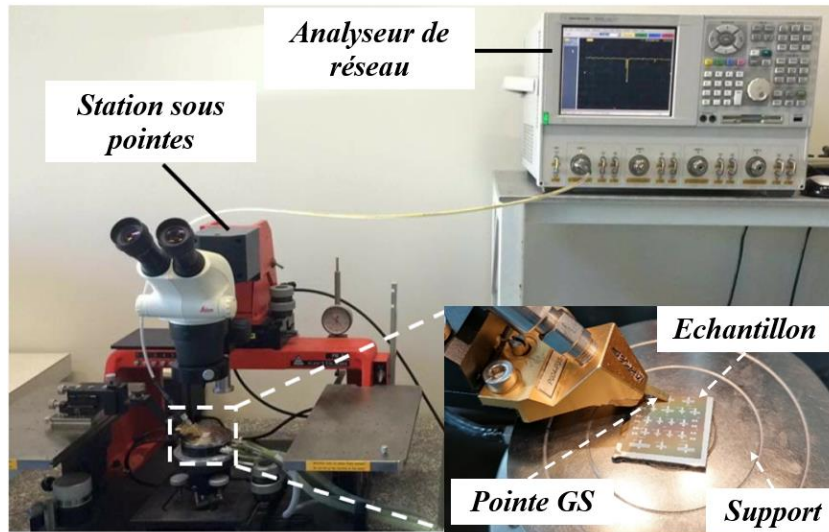


Figure 2. 24 : Banc de mesure sous pointe.

Le coefficient de réflexion  $S_{11}$  extrait de la mesure sous-pointes permet de donner des informations sur l'adaptation d'impédance à la référence  $50 \Omega$ . De plus, il permet d'extraire l'impédance et l'admittance qui donnera par la suite des informations sur les fréquences de résonance  $f_r$  et d'antirésonance  $f_a$  du dispositif, le facteur de qualité  $Q$  et le coefficient de couplage  $K^2$ .

L'extraction de l'admittance et de l'impédance se fait suivant les formulations mentionnées ci-dessous.

$$S_{11} = \frac{Z_{11} - Z_0}{Z_{11} + Z_0} \quad (2.4)$$

Avec  $Z_{11}$  et  $Z_0$  représentant respectivement l'impédance du dispositif et l'impédance de référence à  $50 \Omega$ .

Sachant que  $Z_{11} = \frac{1}{Y_{11}}$ ,

On obtient :

$$Z_{11} = \frac{Z_0(S_{11} + 1)}{(1 - S_{11})} \quad (2.5)$$

et

$$Y_{11} = \frac{(1 - S_{11})}{Z_0(S_{11} + 1)} \quad (2.6)$$

Sous sa forme complexe le paramètre  $S_{11} = a + ib$ , et en remplaçant cette expression dans l'expression de l'admittance, on retrouve :

$$\text{Re}(Y_{11}) = \frac{1 - a^2 - b^2}{Z_0[(a + 1)^2 + b^2]} \quad \text{et} \quad \text{Im}(Y_{11}) = \frac{-2b}{Z_0[(a + 1)^2 + b^2]} \quad (2.7)$$

La partie réelle  $\text{Re}(Y_{11})$  et le module de l'admittance  $|Y_{11}|$  permettent de déterminer les paramètres fonctionnels du dispositif à savoir le facteur de qualité à la résonance ( $Q$ ) et le coefficient de couplage électromécanique ( $K^2$ ) respectivement par les relations suivantes :

$$Q = \frac{f_0}{\Delta f} \quad \text{et} \quad K^2 = \frac{2(f_a + f_r)}{f_r} \quad (2.8)$$

Avec  $f_0$  la fréquence correspondant au maximum de  $\text{Re}(Y_{11})$ ,  $\Delta f$  la largeur à mi hauteur du pic de  $\text{Re}(Y_{11})$ .  $f_r$ , la fréquence de résonance et  $f_a$  la fréquence d'antirésonance sont déterminées par le maximum et le minimum de  $|Y_{11}|$  respectivement [119].

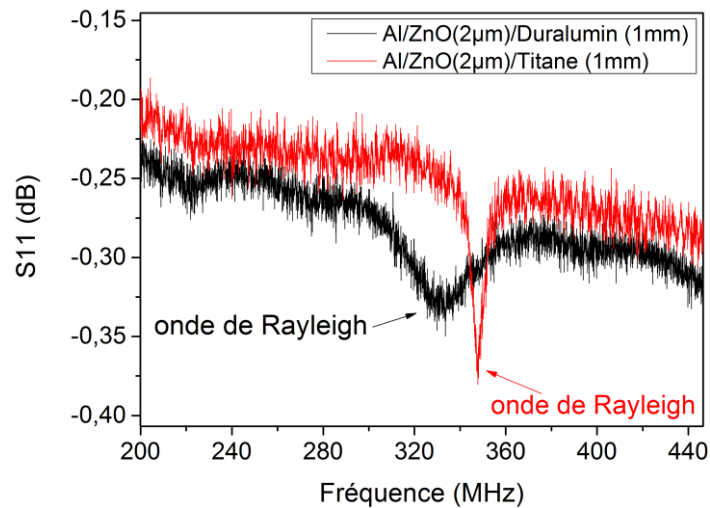
## II.C.2. Caractérisations électriques

### II.C.2.1 Caractérisation électrique des structures Al/ZnO/métal et choix du titane comme substrat métallique.

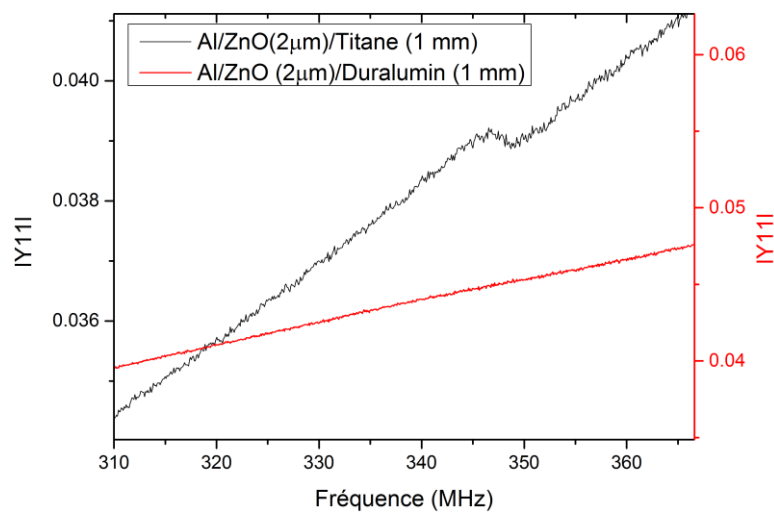
La caractérisation électrique a été réalisée sur des structures présentant comme substrat le duralumin, l'acier inoxydable et l'alliage de titane. Le choix du substrat métallique pour la suite des études réalisées dans ce manuscrit s'est fait suivant différentes étapes mentionnées ci-dessous.

La première étude s'est faite sur les structures Al(150nm) /ZnO(2 $\mu$ m) /Duralumin (1mm) et Al(150nm) /ZnO(2 $\mu$ m) /Ti (1mm) pour une longueur d'onde ( $\lambda=8\mu$ m) sachant que le titane dispose de propriétés mécaniques proches de l'acier. Il est à noter que l'épaisseur de ZnO est donc ici de  $\lambda/4$ . Le but étant d'effectuer les premières observations expérimentales de la réalisation des capteurs SAW sur substrat métal en plus d'obtenir des informations sur le substrat métallique présentant le moins de pertes élastiques.

La Figure 2.25 donne les mesures expérimentales du coefficient de réflexion  $S_{11}$  (dB) et des admittances des résonateurs SAW réalisés sur des substrats de duralumin et du titane, avec le design donné en section II.A.4.



(a)



(b)

Figure 2. 25 : Paramètres (a)  $S_{11}$  (dB) expérimentaux et (b)  $Y_{11}$  des structures sur duralumin et alliage titane.

Ces structures présentent des fréquences de résonance similaires à celles de la simulation (Figure 2.6) et l'onde de Rayleigh est ainsi identifiée. On constate ici une adaptation à  $50 \Omega$  très faible, avec un coefficient de réflexion autour de  $-0.35$  dB, dont la cause est attribuable notamment à la forte capacité statique entre les électrodes et le métal industriel, alors que le design utilisé est prévu pour des substrats piézoélectriques classiques.

Plus problématique, les courbes d'admittance font apparaître un signal SAW très faible. Au vu des simulations (Figure. 2.7), l'interprétation préliminaire qui peut être faite à ce stade est, qu'avec une épaisseur de ZnO de  $\lambda/4$ , une partie significative de l'onde se propage dans le substrat métallique, et que celui-ci présente des pertes importantes par absorption. Les pertes par rayonnement sont également à considérer, mais, en première approche, ce n'est le mécanisme privilégié, au vu des modélisations numériques.

Il est à noter que la résolution du pic  $S_{11}$  dans la structure ZnO( $2\mu\text{m}$ )/Ti est meilleure que celle de la structure ZnO( $2\mu\text{m}$ )/Duralumin ce qui est sûrement dû aux propriétés mécaniques du titane. Cette observation a permis de favoriser dans la suite de cette partie l'utilisation des métaux tels que titane et l'acier inoxydable au vu de leurs propriétés similaires à bien des niveaux dans le but de l'optimiser la structure ZnO/métal.

### II.C.2.2 Optimisation de la structure Al/ZnO/Métal

Il semble donc qu'une approche pour optimiser la structure revient à limiter la propagation de l'onde dans le substrat métallique. Pour ce faire, l'une des solutions serait de concentrer une grande partie de la propagation de l'onde dans le matériau piézoélectrique par l'augmentation de l'épaisseur de celui-ci. Cette solution a été majoritairement appliquée dans ces travaux.

Les simulations de la structure présentant des épaisseurs différentes de couche ZnO ont été réalisées sur Comsol Multiphysics. La Figure 2.26 illustre les tests théoriques réalisés sur la structure Al( $150\text{nm}$ )/ZnO/Ti ( $100\mu\text{m}$ ) à des épaisseurs différentes de ZnO. L'augmentation de la couche piézoélectrique entraîne une concentration de l'onde élastique dans le matériau piézoélectrique et donc moins de pertes liées aux propriétés élastiques absorbantes des métaux

utilisés comme substrats. De plus, la simulation montre qu'à partir de 6  $\mu\text{m}$  de ZnO une grande partie de l'onde élastique reste dans le matériau piézoélectrique, cependant, dans une mesure d'assurance, l'épaisseur de 8  $\mu\text{m}$  de ZnO a été préférée dans la suite de cette partie.

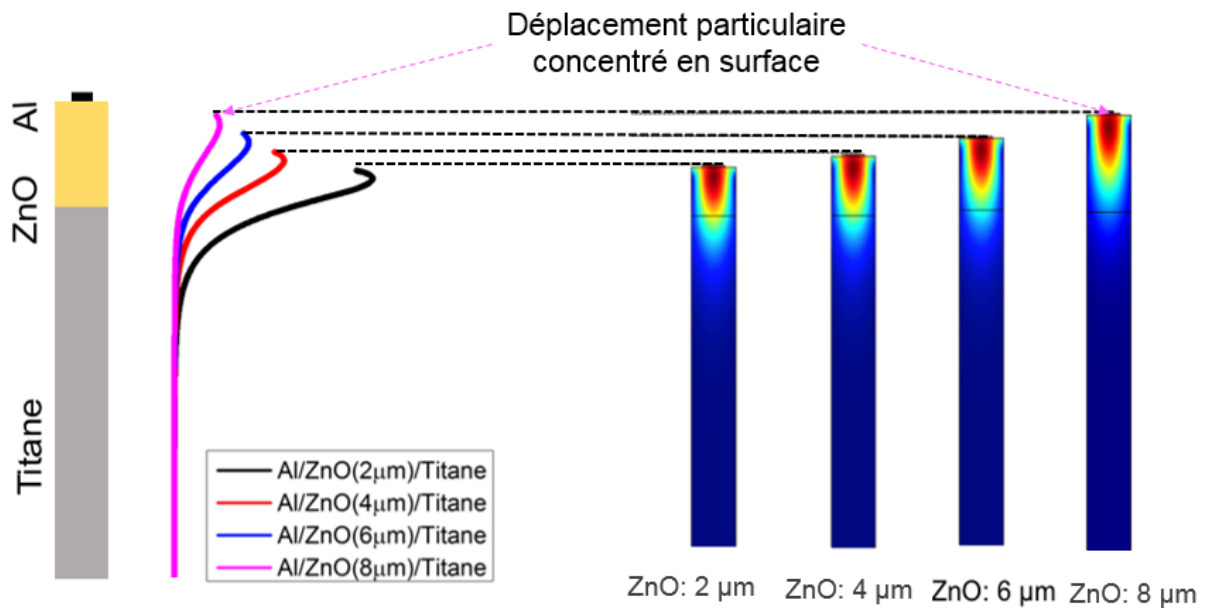


Figure 2. 26 : Déplacement particulaire total (1D à gauche et 2D à droite) de la structure Al/ZnO/Titane

Une épaisseur de 8  $\mu\text{m}$  de ZnO a donc été déposée sur des substrats métalliques d'acier inoxydable et de titane. La couche a par la suite été caractérisée par diffraction au rayon X puis l'état de surface a été cartographié par AFM. La figure 2.27a et 2.27b présente respectivement le diagramme  $\theta$ - $2\theta$  des structures ZnO(8  $\mu\text{m}$ ) / Ti(1mm) et ZnO(8  $\mu\text{m}$ ) / Acier inoxydable (1mm). Les couches de ZnO présentent une orientation préférentielle du plan (002) et une désorientation des grains (Rocking curve) de 4,5° et 2,96° ce qui montre une couche piézoélectrique texturée pour une couche de 8  $\mu\text{m}$  d'épaisseur.

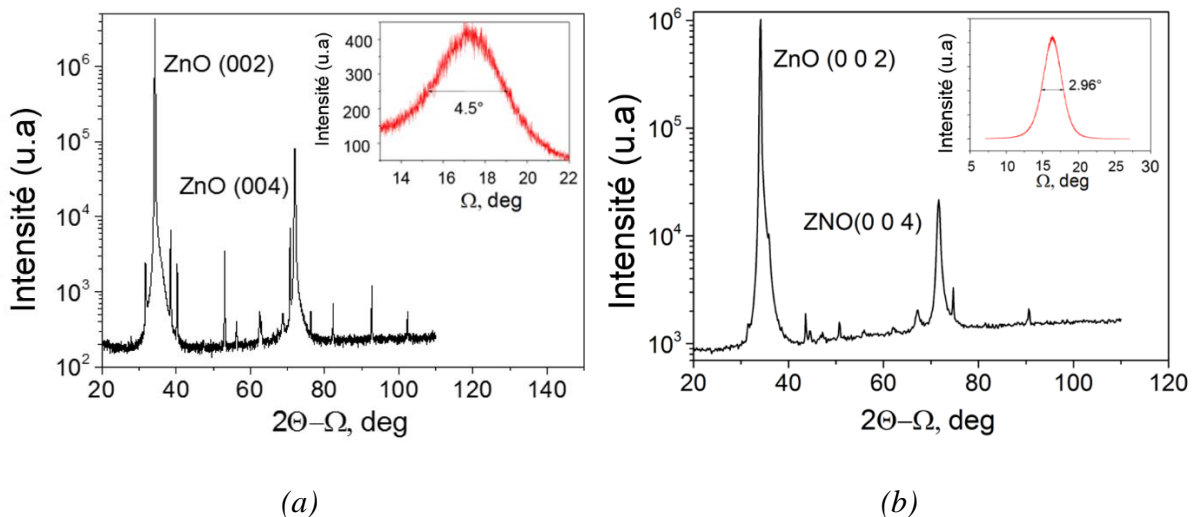


Figure 2. 27 : (a) Diagramme  $\theta$ -2 $\theta$  de la structure ZnO(8 $\mu$ m) /Ti (b) de la structure ZnO(8 $\mu$ m) /Acier inoxydable.

La cartographie par AFM de la surface de ZnO présente des rugosités de surface respectives de 49,3 nm et 20,4 nm sur les substrats métalliques de Ti et de l'acier inoxydable. La Figure 2.28 illustre la topographie (représentation 2D à gauche et 3D à droite) de la couche de ZnO sur titane. Les croissances sont donc meilleures sur acier inoxydable, que sur Titane.

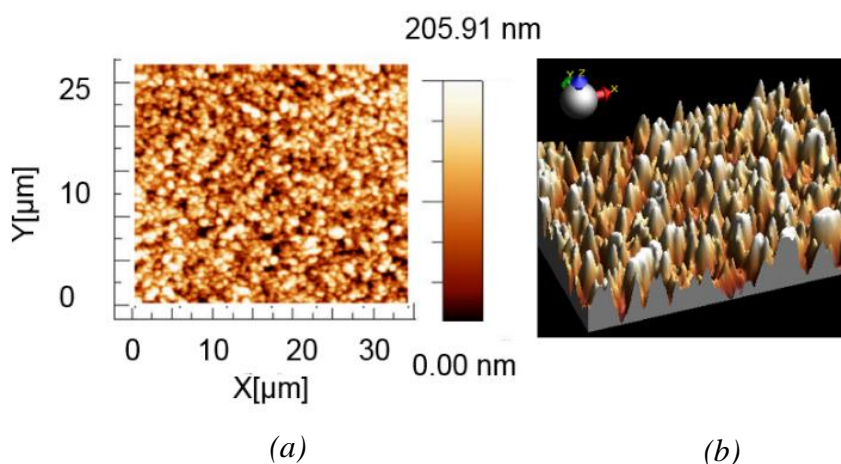


Figure 2. 28 : Cartographie de la topographie de la couche de ZnO texturée sur pièce métallique (a) 2D, (b) 3D.

Les figures 2 .29 montrent les réponses fréquentielles du paramètre  $S_{11}$  mesurées pour :  
 (a) la structure Al(150nm) / ZnO(8 $\mu$ m) / Ti(1mm) réalisée avec une longueur d'onde de 8 $\mu$ m.  
 (b) la structure Al(150(nm) / ZnO(8 $\mu$ m) / Acier inoxydable(1mm) réalisée avec  $\lambda=10\mu$ m. On note que la qualité du signal est meilleure comparée aux résultats obtenus pour une épaisseur de 2  $\mu$ m.

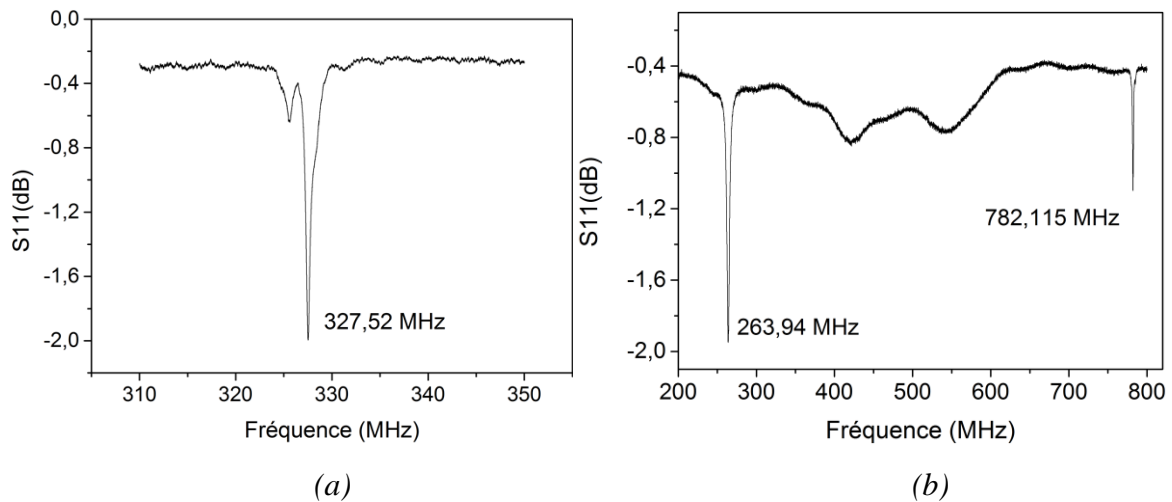


Figure 2. 29 : Paramètres S11 (dB) des structures (a) Al(150nm) /ZnO(8µm) /Ti (1mm), (b) Al(150(nm)/ZnO(8µm) /Acier inoxydable (1mm).

L'observation expérimentale montre que l'augmentation de l'épaisseur de la couche piézoélectrique a eu pour effet l'améliorer l'adaptation d'impédance à  $50\Omega$ , ce qui peut s'expliquer par la diminution de la capacité statique entre électrodes et substrats métallique. Toutefois, cette méthode comporte quelques complexités, dont la croissance de la couche mince qui devient moins bonne lors de la cristallisation des dépôts épais. De plus, les vitesses de propagation de l'onde SAW entre la couche de ZnO (2700 m/s) [120] et les métaux servant de substrat (Titane 2958 m/s [101], acier inoxydable) sont très proches, de ce fait le guidage de l'onde en surface n'est pas forcément optimal. Une partie de l'énergie de l'onde reste susceptible de se dissiper dans le substrat métallique qui présente des pertes importantes par absorption, donc causer des pertes au niveau de l'onde élastique de surface.

L'une des solutions pour pallier ce problème serait de rajouter une couche d'AlN sous la couche de ZnO, car l'AlN présente une vitesse d'onde SAW nettement plus grande,  $v= 5760$  m/s [121], ce qui aurait pour effet de mieux guider l'onde élastique dans la couche « lente » de ZnO par gradient de vitesse. L'AlN présente également une grande résistivité électrique, ce qui assurera une bonne isolation entre électrode et substrat métallique et permettre par conséquent de réduire l'épaisseur du ZnO. L'ajout de la couche d'AlN ne sera pas considéré dans ce travail, mais prévu ultérieurement.

À ce stade, il a donc été démontré la possibilité de réaliser des dispositifs SAW directement sur pièces métalliques industrielles (Figures 2.29 et 2.25). Sur certains métaux, à

l'exemple de l'aluminium (métaux « mous »), les structures présentent plus de pertes que sur d'autres métaux plus rigides comme le titane et l'acier inoxydable (métaux durs). Les propriétés telles que la résistance aux hautes et basses températures, le non-magnétisme, l'anti-corrosivité, la légèreté et la non-toxicité du titane comparé à l'acier inoxydable ont permis de favoriser dans ce travail la structure ZnO/titane.

### II.C.2.3 Admittance et paramètres d'un résonateur sur la structure Al(150nm) /ZnO(8 $\mu$ m) /Ti (1mm) avec $\lambda=8\mu$ m

La Figure 2.30 présente l'admittance d'un résonateur sur Al(150nm) /ZnO(8 $\mu$ m) /Ti (1mm) avec une longueur d'onde  $\lambda=8\mu$ m. Les réflexions en entrée de bande d'arrêt des réflecteurs, ainsi que les modes parasites empêchent une estimation précise des fréquences de résonance et d'antirésonance et donc du coefficient de couplage  $K^2$ . Un modèle BVD (Butterworth-Van-Dyke) a donc été réalisé (Figure 2.31a) afin d'extraire les fréquences de résonance et d'antirésonance (Figure 2.31b).

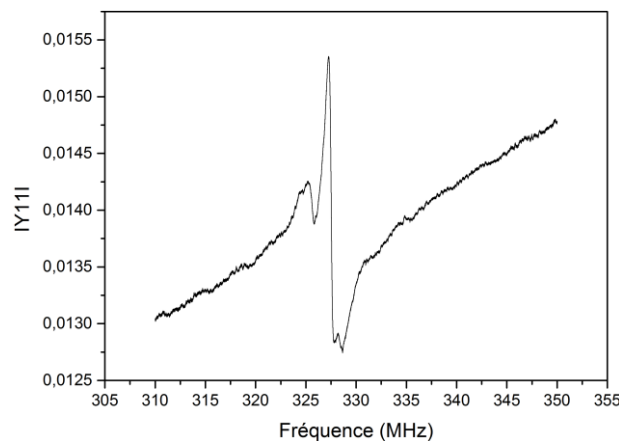


Figure 2. 30 : Module  $|Y_{11}|$  de l'admittance expérimentale de la structure Al(150nm) /ZnO(8 $\mu$ m) / Ti (1mm).

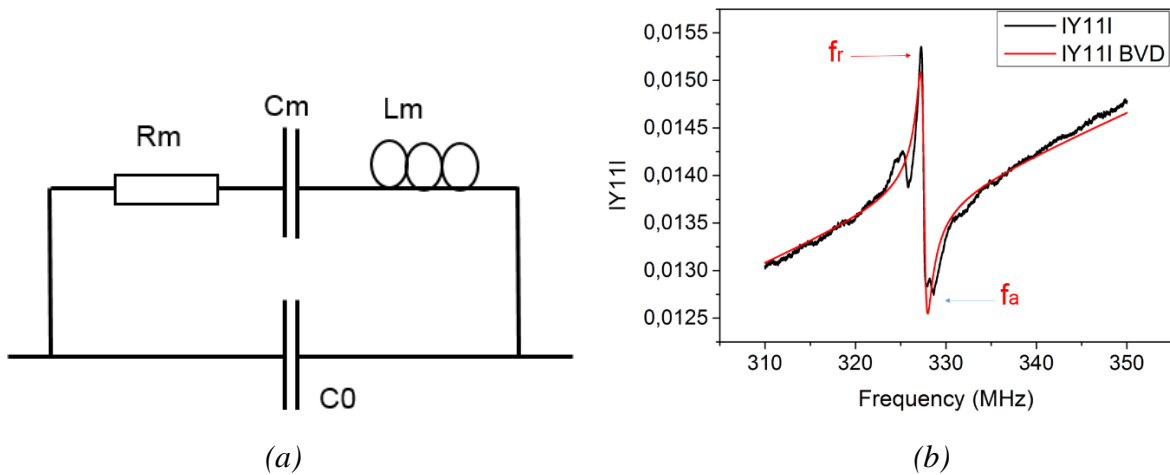


Figure 2. 31 : (a) Circuit BVD équivalent, (b) courbe d’admittance expérimentale (noir) et fit BVD (rouge) de la structure Al(150nm)/ZnO(8µm)/alliage de titane(1mm).

Le circuit équivalent du modèle BVD a permis de réaliser le fit de la courbe d’admittance et par la suite d’extraire les paramètres de capacitance ( $C_m$ ), de l’inductance ( $L_m$ ) et de la résistance ( $R_m$ ) de la branche motionnelle LCR en plus de la capacité statique ( $C_0$ ). Le tableau II-5 donne les paramètres extraits du modèle BVD de la structure.

Tableau II-5 : paramètres du modèle BVD.

|       |          |
|-------|----------|
| $C_0$ | 6,687 pF |
| $C_m$ | 3,022 fF |
| $R_m$ | 388,721Ω |
| $L_m$ | 0,7813µH |

Le calcul du coefficient de couple  $K^2$  se fait par la relation ci-dessous :

$$K^2_{BVD} = K_{C.BVD} = \frac{C_m}{C_0} \quad (2.9)$$

La structure dispose d’un coefficient de couplage  $K^2$  de 0,48% à 25°C. Le facteur de qualité  $Q$  est extrait de la courbe de la partie réelle de l’admittance (Figure 2.32). Celui-ci présente une valeur de 413,5. Le produit  $Q \times K^2$  aussi appelé facteur de mérite donne une valeur de 1.987. Cette valeur est intéressante pour des applications de mesure sans fil, car il est possible d’envisager un rendement de re-rayonnement de 50% dans le cas d’une adaptation conjuguée entre résonateur et antenne [122].

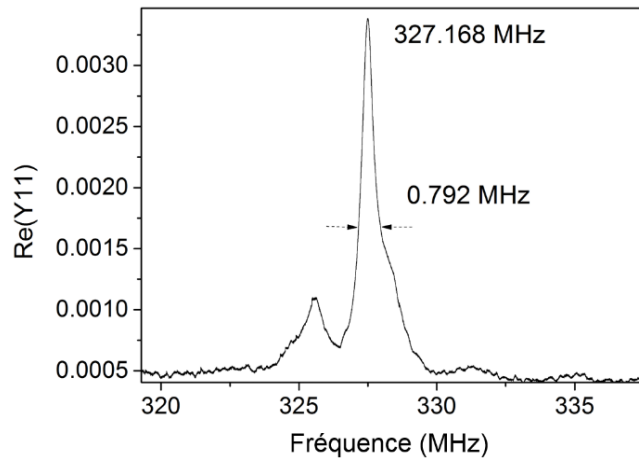


Figure 2. 32 : Conductance du dispositif SAW sur Titane en fonction de la fréquence.

#### II.C.2.4. Sensibilité en température de la structure Al/ZnO/titane

L'étude en température du dispositif SAW sur métal structuré ZnO/Ti fait partie des études importantes de ces travaux. En vue d'utiliser la structure comme capteur SAW de température, des tests en température allant de 20°C à 450°C ont été réalisés sous pointes, avec un banc de test spécifique qui permet le refroidissement à eau de ces dernières. La Figure 2.33a illustre la variation en fréquence de paramètre  $S_{11}$  (dB) de la structure ZnO(8 $\mu$ m) / Ti ( $\lambda=8\mu$ m) en fonction de la température. On remarque une dégradation du signal avec l'augmentation de la température due au fait que la couche de ZnO devient conductrice à des températures supérieures à 350°C [123]–[125]. Toutefois, le signal permet d'extraire très clairement la fréquence de résonance en fonction de la température. La sensibilité en température (TCF) de la structure donne une valeur de -46,4 ppm/°C ce qui est une bonne valeur pour les capteurs SAW en température, de plus, le signal présente une bonne linéarité et réversibilité lors du processus de chauffage et de refroidissement (Figure 2.33b).

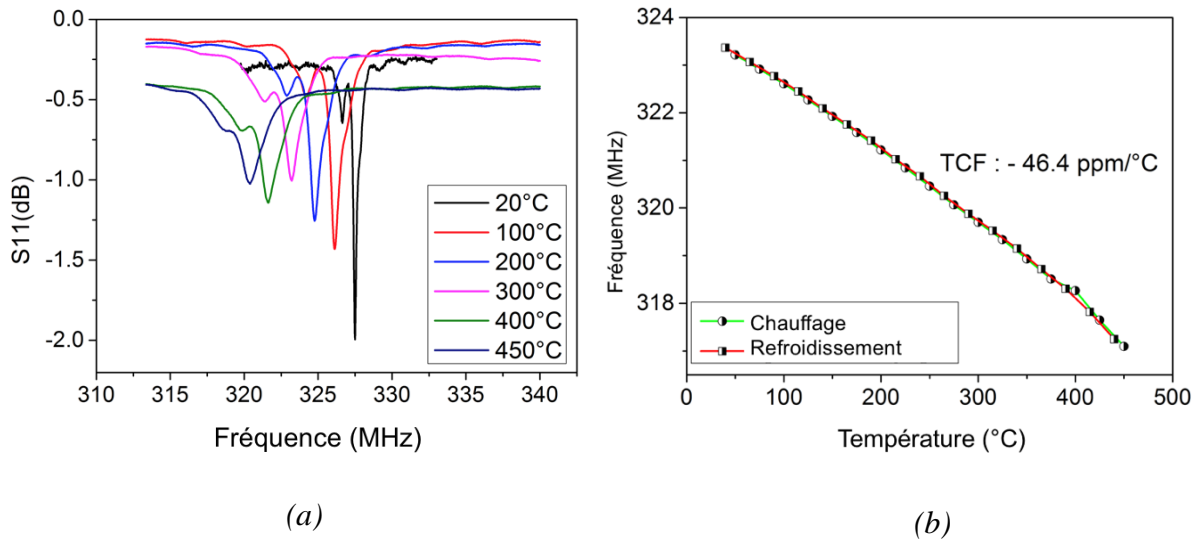
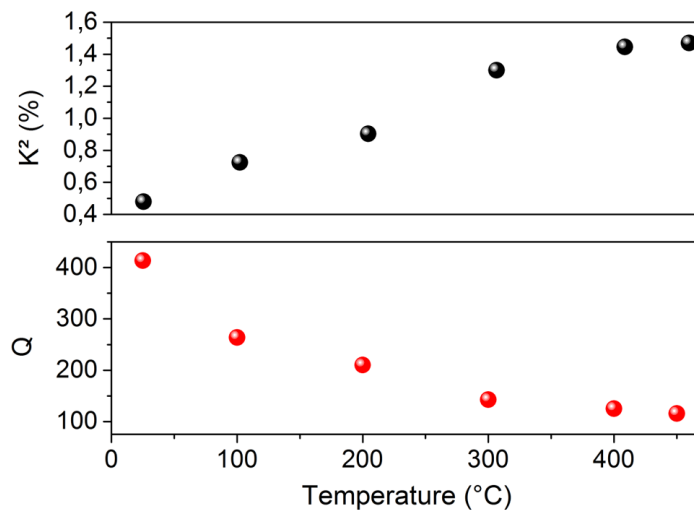
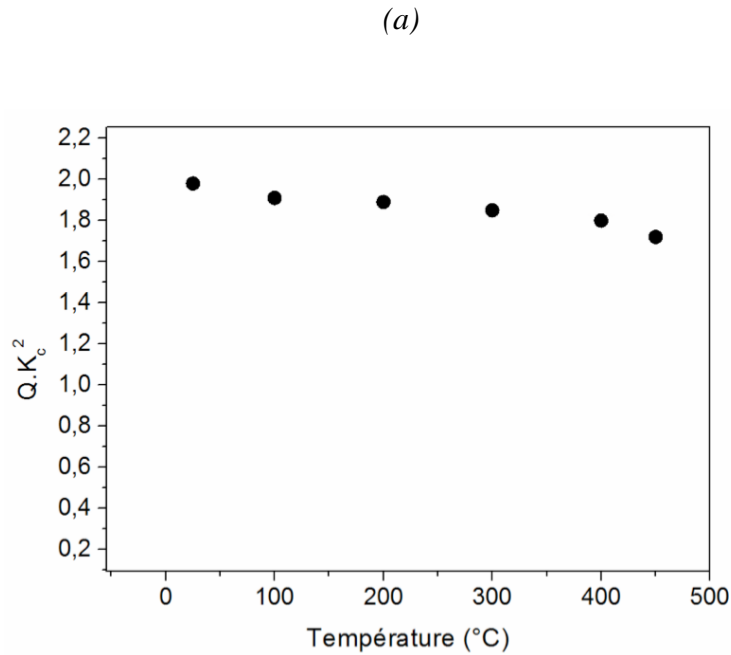


Figure 2. 33 : Sensibilité en température : (a) mesure de l'évolution du coefficient de réflexion S11 à des températures allant de 20 à 450°C (b) variation de la fréquence de résonance durant le cycle de chauffage et le refroidissement jusqu'à 450°C.

La variation en température affecte également les propriétés du dispositif SAW à savoir le facteur de qualité  $Q$  et le coefficient de couplage  $K^2$ . La Figure 2.34a montre l'évolution du facteur  $Q$  qui diminue avec la température en allant de 413 à 125 et celle couplage  $K^2$  qui lui a contrario augmente en allant de 0,48 à 1,4%. Le facteur  $K^2$  est extrait par la même méthode BVD utilisée précédemment. Le facteur de mérite [122] qui représente un paramètre très important servant à caractériser les performances du dispositif SAW sur son interrogation en sans-fil a été par la suite évalué dans la Figure 2.34b. Celui-ci est déterminé par le produit  $Q \times K^2$ . On peut noter une légère baisse de ce facteur (de 1,97 à 1,7) quand la température passe de l'ambient à 450°C. Toutefois, et malgré cette baisse, ces valeurs restent bonnes pour des applications sans fil.





(b)

Figure 2. 34 : (a) Mesure de l'évolution du facteur Q et du coefficient de couplage  $K^2$  (b) du facteur de mérite du dispositif SAW en fonction de la température.

#### II.C.2.4. Sensibilité en déformation de la structure Al/ZnO/titane

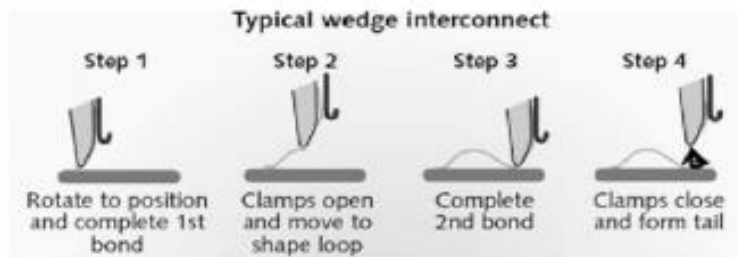
L'étude en déformation représente une autre partie importante de ces travaux pour les applications SHM. La structure représentée dans la Figure 2.35c a été déformée en traction et flexion trois points, dans le but d'évaluer sa sensibilité.

Pour ce faire, un barreau à l'état brut de titane a été découpé suivant les dimensions  $5\text{mm} \times 2,5\text{mm} \times 1\text{mm}$  (Figure 2.35a), puis poli par les techniques énoncées précédemment. Par la suite, une couche de  $8\mu\text{m}$  de ZnO (Figure 2.35b) a été déposée par pulvérisation cathodique réactive magnétron, suivie de la réalisation des électrodes interdigitées en configuration résonateur par procédé lift-off.

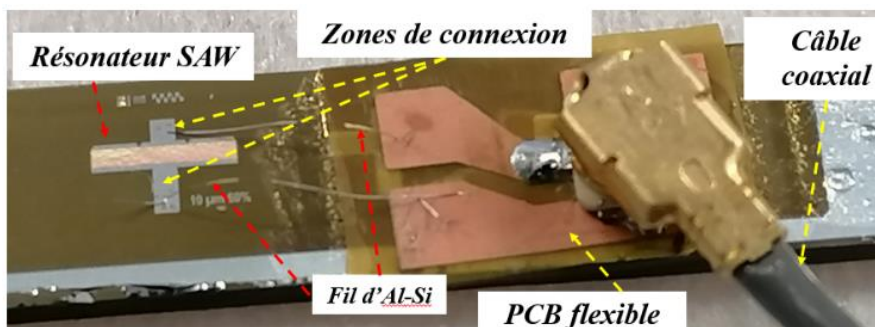


Figure 2. 35 : (a) Barreau d'alliage de titane rugueux, (b) couche de ZnO sur le barreau poli, (c) Résonateur réalisé sur la structure ZnO/alliage de titane.

Un microcâblage du dispositif SAW au câble coaxial s'est fait à travers une feuille de PCB flexible réalisé sur une feuille de Kaptons cuivré. Les fils d'alliage d'aluminium ( $Al_x-Si_y$ ) ont permis par le procédé de wedge bonding (Figure 2.36a) de faire la connexion entre les pads du résonateur et le PCB flexible (Figure 2.36b).



(a)



(b)

Figure 2. 36 : (a) Principe de wedge bonding (b) Illustration de la connexion entre résonateur et PCB flexible par wedge bonding.

### II.C.2.4.1 Déformation en flexion trois points de la structure Al/ZnO/titane

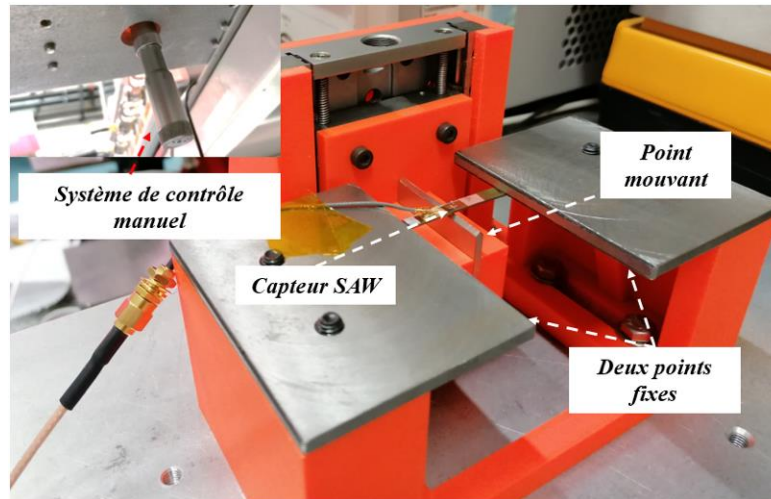
Le banc de test de flexion trois points (Figure 2.37a) a été réalisé au sein de notre équipe par Baptiste Paulmier. Il est constitué de deux points de contact fixes et un point de contact central mouvant de haut vers le bas par l'intermédiaire d'un système de contrôle manuel gradué (1 tour équivaut à 500  $\mu\text{m}$  de déplacement). Le schéma de la Figure 2.37b illustre le principe de flexion appliqué à la poutre. La poutre est fléchie suivant un rayon de courbure  $R$  relié à la déformation par rapport à la relation mentionnée ci-dessous [126] :

$$\varepsilon = \frac{t/2}{R} \quad (2.10)$$

Avec  $t$  la somme des épaisseurs du barreau métallique et du capteur (cette dernière est négligeable ici).

$$R^2 = (R - \delta)^2 + \left(\frac{l}{2}\right)^2 \quad (2.11)$$

Avec  $R$  le rayon de courbure,  $\delta$  la flèche et  $l$  la largeur entre les points d'appuis.



(a)

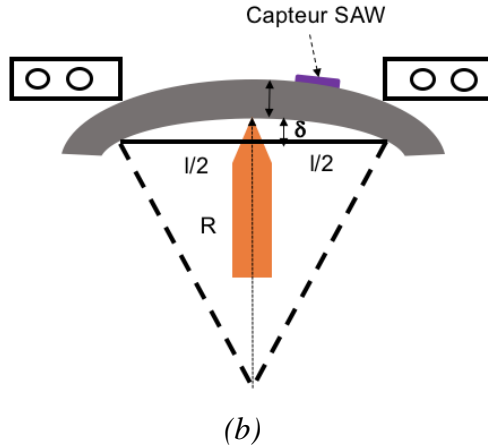


Figure 2. 37 : (a) Illustration du banc de test de flexion trois points sur le barreau structuré ZnO/Alliage de titane, (b) principe de fonctionnement de la flexion adapté de la référence [126].

Les résultats des tests en flexion et en traction réalisés sur un résonateur SAW (ici avec  $\lambda=10\mu\text{m}$ ) directement intégré dans un barreau métallique de titane sont donnés dans les courbes de la figure 2.37. La Figure 2.38a montre la variation du signal de réflexion  $S_{11}$  du dispositif en fonction de la déformation en flexion. Dans la gamme de mesure considérée (0 à 1800  $\mu\epsilon$ ), le signal  $S_{11}$  se dégrade quand la déformation augmente. Ceci est probablement en partie dû à la dégradation des propriétés du matériau piézoélectrique.

Toutefois, malgré l'application des déformations allant jusqu'à de très fortes déformations de 1800  $\mu\epsilon$ , le signal reste toujours visible et la couche de ZnO ne se délamine pas du substrat. Les tests de déformation en flexion trois points donnent une progression assez linéaire de la fréquence du dispositif lors d'un cycle allant de 0 à 1800 $\mu\epsilon$  (Figure 2.38b) et une très bonne sensibilité de 1,49 ppm/ $\mu\epsilon$ .

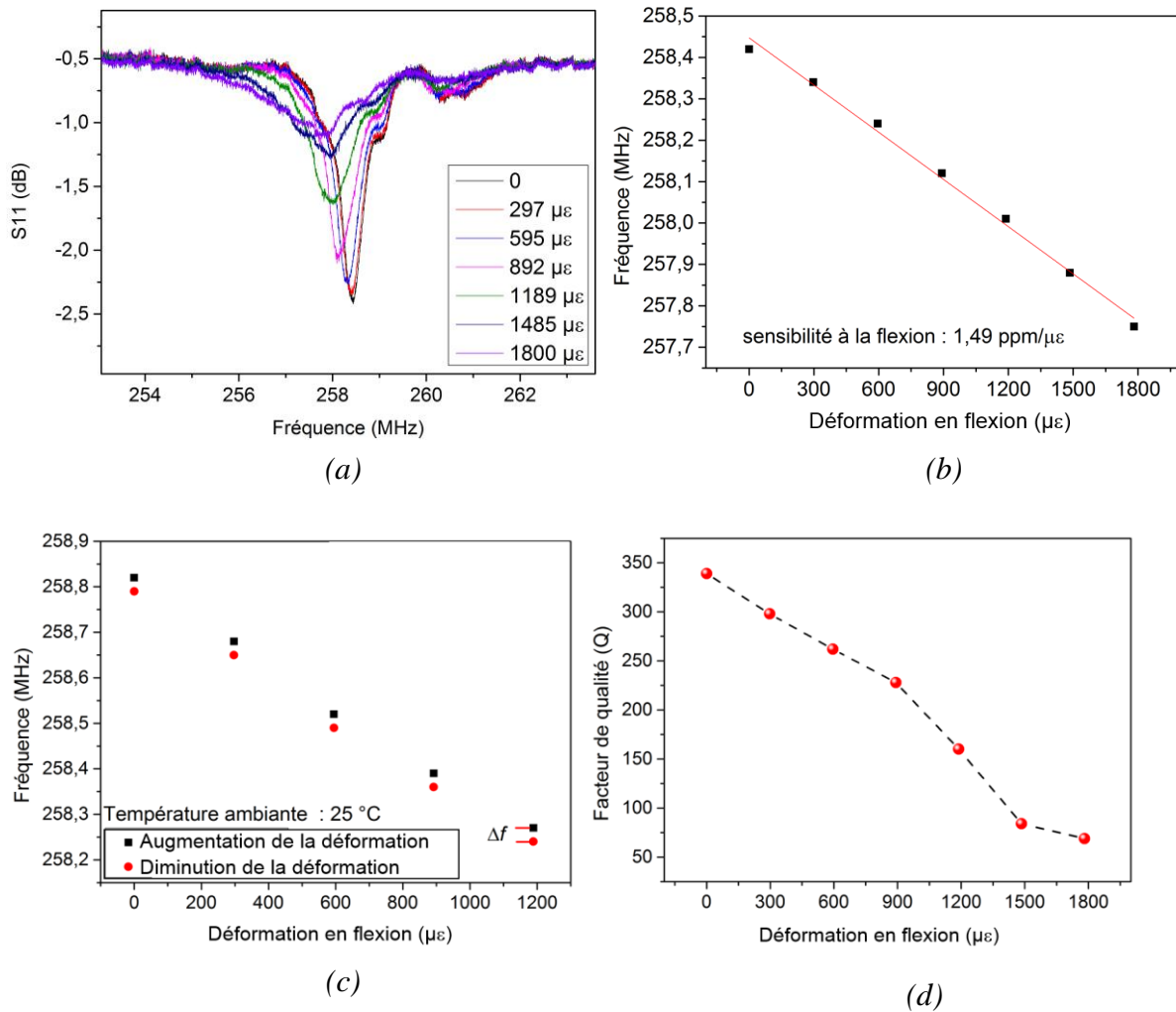


Figure 2.38 : Sensibilité en flexion (a) évolution expérimentale du coefficient de réflexion S11 de 0 à 1800  $\mu\epsilon$  (b) variation de la fréquence de résonance du capteur SAW en fonction de la déformation en flexion, (c) variation de la fréquence durant un cycle complet (augmentation et diminution) de la déformation en flexion (d) évolution expérimentale du facteur de couplage (Q) en fonction de la déformation en flexion (0 à 1800  $\mu\epsilon$ ).

L'erreur d'hystérésis a été extraite par les formules [127], [128] :

$$\delta_{fm} = \frac{\Delta fm}{Y_{FS}} 100\% \quad (2.12)$$

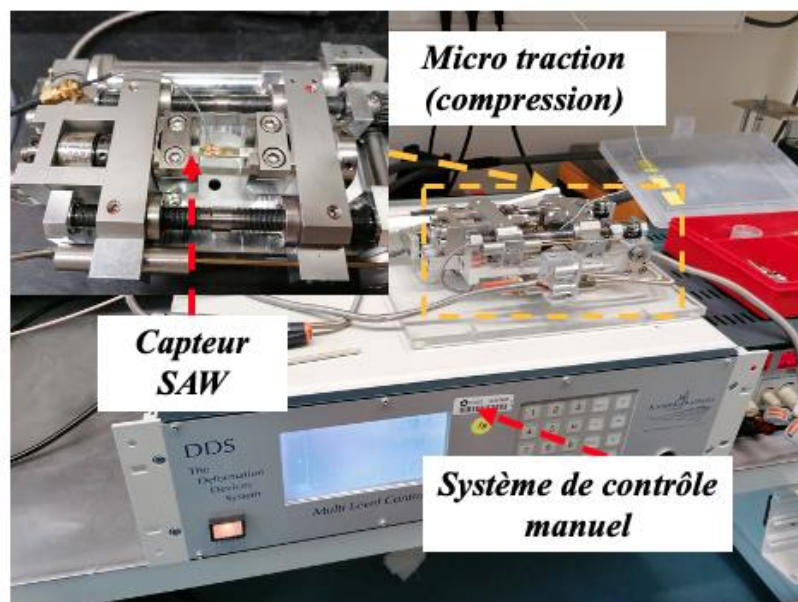
Avec  $\Delta fm$  et  $Y_{FS}$  représentant respectivement l'écart maximal entre la valeur de sortie du capteur durant le cycle d'augmentation et de diminution de la déformation en flexion et la plage de mesure complète du capteur. La Figure 2.38c montre les mesures réalisées sur la structure durant un cycle d'augmentation et de la baisse de la déformation appliquée. La formule mentionnée précédemment donne une faible valeur d'erreur d'hystérésis de 0,11% de la

structure ZnO/ Ti en comparaison à l'étude réalisée par Stonley et *al.* [129]. La structure ZnO/Ti représente donc une bonne candidate pour la réalisation des capteurs SAW de flexion.

On observe dans la Figure 2.38d la variation du facteur de couplage (Q) en fonction de la déformation. On remarque que le facteur de qualité (Q) diminue quasi-linéairement de 340 à 69 pour des déformations comprises entre 0 à 1800  $\mu\epsilon$ . Ceci est probablement dû à la dégradation des propriétés du matériau piézoélectrique. Néanmoins, cette évolution est réversible ce qui montre une bonne stabilité de la couche de ZnO, même soumise à des déformations très fortes.

#### II.C.2.4.2 Déformation en traction de la structure Al/ZnO/titane

La Figure 2.39 présente le montage de test de traction. On peut observer une mini machine de marque Kammrath & Weiss qui permet de réaliser des essais à microtraction (compression), les déplacements (traction ou compression) sont identifiés à travers un dispositif de contrôle qui permet de préciser la valeur du déplacement et la force appliquée. Ce dispositif peut accueillir des échantillons dont les dimensions sont comprises entre 20 et 60 mm en longueur et entre 5 à 15 mm en largeur. Différents types de supports et de mors sont disponibles pour pouvoir ajuster l'équipement aux besoins des expériences recherchées.



(a)

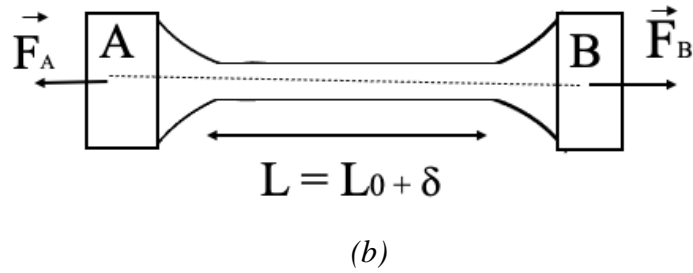


Figure 2. 39 : (a) Illustration le Montage de test de traction sur le barreau structuré ZnO/ Ti [130] (b) principe de fonctionnement de la flexion et la traction respectivement.

Les tests en traction de la structure réalisée sont illustrés à la Figure 2.40, dans laquelle on observe une courbe de sensibilité de la structure en fonction de la déformation en traction. La courbe présente un caractère linéaire de la variation fréquentielle durant un cycle allant de 0 à 650  $\mu\epsilon$  avec une sensibilité de 0,22 ppm/  $\mu\epsilon$ , une sensibilité inférieure à la sensibilité obtenue en flexion. Une étude théorique serait ici nécessaire pour mieux comprendre l'effet de ces deux sollicitations sur les ondes de Rayleigh dans les structures ZnO/métal. Toutefois, cette sensibilité de 0,22 ppm/  $\mu\epsilon$  est tout à fait compatible avec des applications pratiques de mesure de traction.

Il est également important de noter que cette structure métal/ZnO permet des mesures de déformation jusqu'à 650  $\mu\epsilon$  au moins en traction, alors que la structure AlN/TC4, plus fragile, et développé par Lin Shu et *al.* [98] qui montre des fissures du film d'AlN à partir de 400  $\mu\epsilon$  de déformations. De plus, à des valeurs de déformations de plus de 400  $\mu\epsilon$ , le capteur est susceptible de ne plus fonctionner ou d'être complètement détruit.

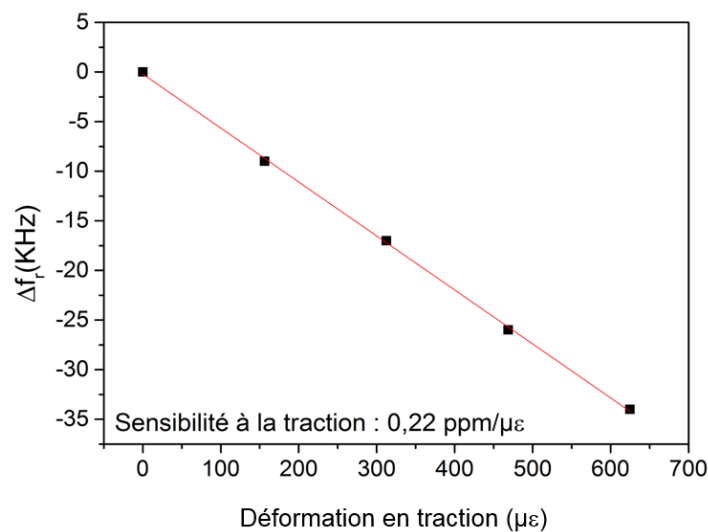


Figure 2. 40 : Sensibilité en traction : variation de la fréquence en fonction de la déformation de traction.

### II.C.2.4.2.1 Sensibilité en traction sous chauffage basse température

L'évaluation simultanée de la sensibilité des structures SAW en déformation et en température représente une étude fondamentale dans de nombreuses applications. Pour ce faire, l'étude de la sensibilité en traction en température a par la suite été réalisée sur la structure (Al/ZnO/ Ti) précédemment mentionnée. Le montage de test en micro-traction, présenté dans la Figure 2.39, est muni en plus d'un système chauffant. La déformation a donc été appliquée de 0 à 650  $\mu\epsilon$  pour des températures allant de 20°C à 80°C. La Figure 2.41 montre les courbes de variations fréquentielles en fonction de la traction en température.

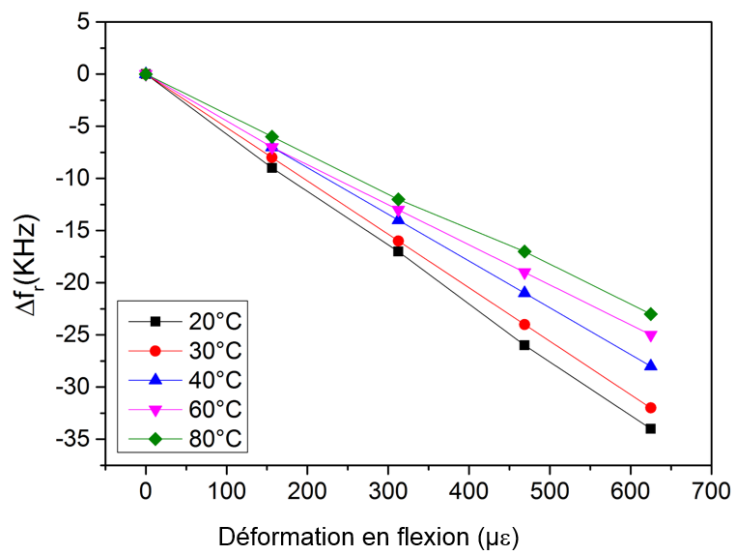


Figure 2. 41 : Variation de la fréquence de résonance du capteur SAW en fonction de la déformation en température.

On peut observer un comportement assez linéaire de leur évolution durant le cycle de traction en température. De plus, on remarque une baisse de la sensibilité de la structure à mesure que la température augmente. La valeur de cette sensibilité passe de 0,22 ppm/ $\mu\epsilon$  à 20°C à 0,14 ppm/ $\mu\epsilon$  à 80°C.

La réalisation de ces premiers tests de traction en température sur cette structure montre des résultats plutôt prometteurs et gagnerait à être optimisée à l'exemple de la structure réalisée dans les travaux de Lin Shu [98].

### II.C.3. Mesures de résonateurs sans fil sur la structure ZnO/titane

La mesure sans-fil est une caractéristique de plus en plus demandée dans la conception des capteurs. En effet, offre de multiples avantages, notamment :

- **Sécurité** : les capteurs sans fil optimisent la surveillance et le maintien en continu des structures à des milieux à accès difficiles dus aux conditions extrêmes tels que la haute température, la pression, le PH, etc.
- **Commodité** : en matière de commodité, les capteurs sans fil permettent de former des réseaux qui servent à la surveillance de différentes structures à différents endroits en même temps, ce qui permet un contrôle centralisé d'une usine ou d'une structure entière.
- **Coût** : le contrôle d'une structure par les capteurs sans fil entraîne la réduction du coût de la surveillance par l'élimination des fils d'extension et d'autres accessoires coûteux.

Donc nous pouvons le voir, la réalisation de capteurs sans fil offre au capteur des caractéristiques plus flexibles et attrayantes dans les systèmes de surveillance de santé de structure.

Dans cette section, des tests sans fil en température et en déformation du capteur SAW à base de ZnO/titane ont été réalisés.

#### II.C.3.1. Antenne dipôle

Une antenne dipôle a été utilisée dans la réalisation des tests expérimentaux sans fil de la structure ZnO/Ti réalisé au sein de ce manuscrit. Il s'agit d'une antenne de demi-longueur d'onde ( $\lambda/2$ ) symétrique (voir Figure 2.42) et installée de façon horizontale. L'antenne dipôle est facile à mettre œuvre et permet d'effectuer la réalisation des premiers tests expérimentaux sans fil de nos dispositifs SAW. L'impédance de rayonnement ( $73 \Omega$  en théorie) est proche de l'impédance de  $50 \Omega$  visée à terme pour les dispositifs réalisés dans cette étude.

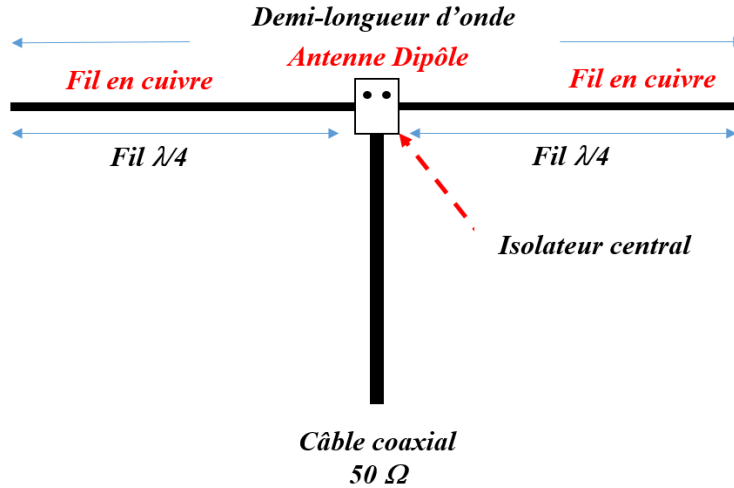


Figure 2. 42 : Schéma de l'antenne dipôle demi-longueur d'onde (fil en cuivre)

### II.C.3.2. Mesure sans fil

L'interrogation à distance du dispositif SAW sur métal structuré ZnO(8 $\mu$ m) / Ti (1mm) a été réalisée. Le coefficient de réflexion de la structure (voir Figure 2.29a) indique une faible adaptation du dispositif à 50  $\Omega$  à la fréquence de résonance du dispositif. Toutefois, celui-ci présente un bon facteur de mérite ( $Q \times K^2 : 1,98$ ) qui donne la possibilité de réaliser des mesures à distance dans le cadre de ces structures. L'antenne dipôle a donc été connectée au PCB flexible (Figure 2.43) lui-même relié au dispositif par l'utilisation du procédé de wedge bonding. Le dispositif a ensuite été interrogé à distance grâce au deuxième antenne dipôle de même design relié à l'analyseur réseau (VNA) suivant la configuration de la Figure 2.44.

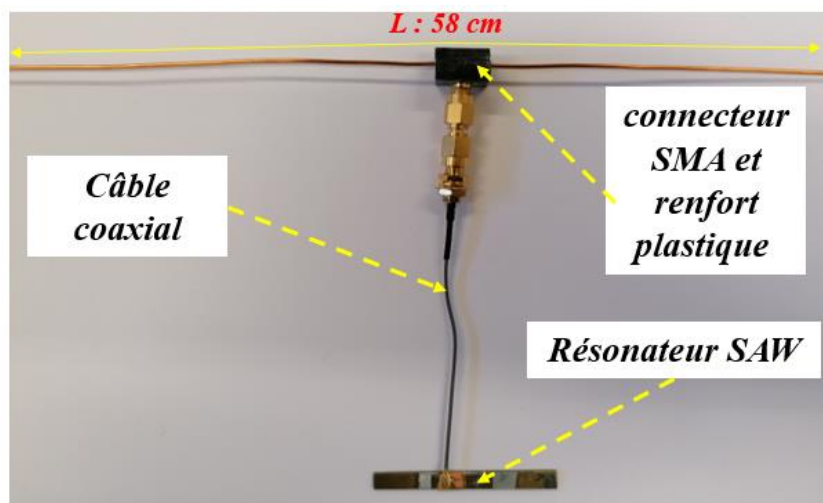


Figure 2. 43 : Dispositif SAW connecté à une antenne dipôle.

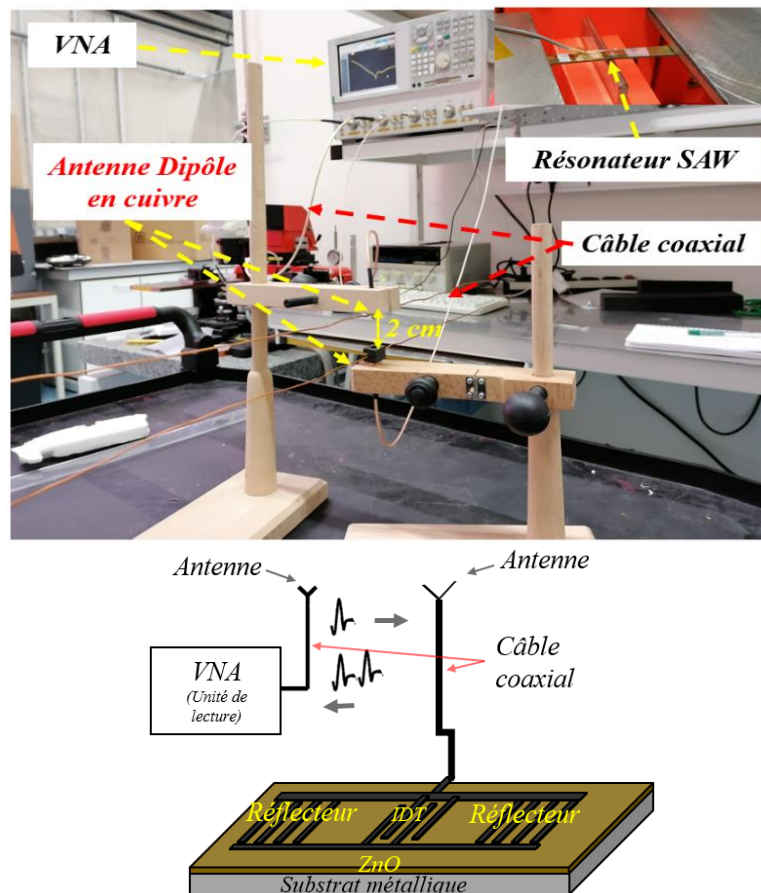


Figure 2. 44 : Montage expérimental d'une mesure sans fil d'un dispositif SAW sur titane.

La mesure sans fil réalisée a montré la présence du signal SAW correspondant à l'onde de Rayleigh à 259 MHz (voir Figure 2.45a), ce qui valide l'interrogation à distance. La mesure montre la détection du signal SAW à des distances allant jusqu'à 14 cm (Figure 2.45b). Ce résultat est très important, car il montre la réalisation de la première interrogation sans fil d'un dispositif SAW intégré directement sur pièce métallique. Notons que l'ensemble de la chaîne de mesure est perfectible. L'optimisation de l'ensemble du système sort du cadre de cette thèse, mais sera réalisé dans un futur projet. En effet, plusieurs pistes sont possibles pour améliorer la qualité du signal collecté et donc augmenter la distance d'interrogation, on peut citer à titre d'exemple :

- Adaptation d'impédance entre le SAW et l'antenne embarquée.
- Remplacement du VNA par un système d'interrogation plus adapté
- Utilisation d'antenne avec un fort gain.

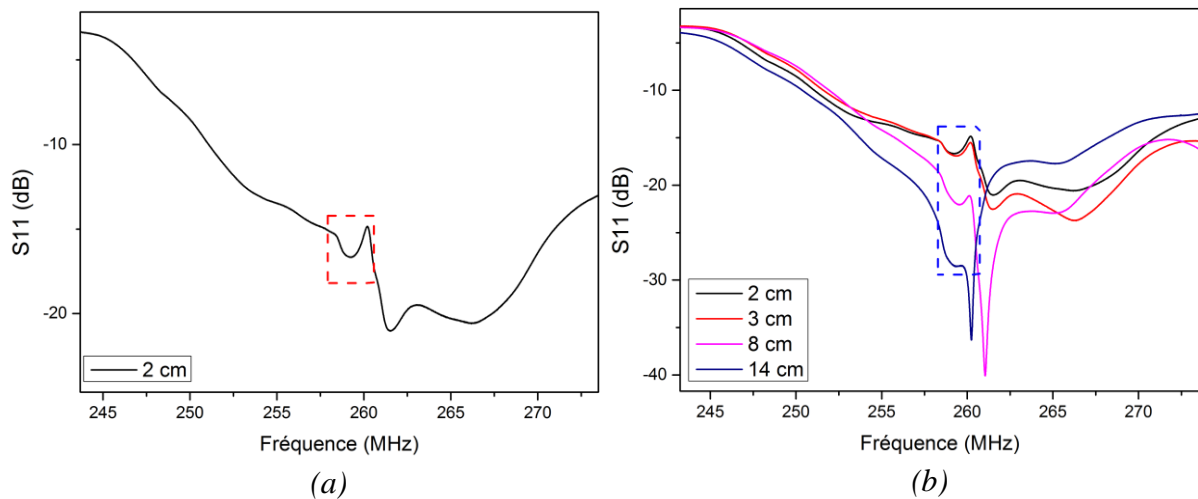


Figure 2. 45 : Interrogation à distance d'un dispositif SAW sur métal : (a) coefficient de réflexion S11 (dB) du dispositif SAW (b) détection du signal jusqu'à 14 cm.

### II.C.3.3. Tests sans fil en température et en déformation

Les mesures sans fil à une distance d'interrogation de 4 cm ont été réalisées en température et en déformation. La Figure 2.46a montre un décalage fréquentiel à des températures de 25°C et 55°C. Celui-ci montre une variation fréquentielle  $\Delta f$  de 0,35 MHz aux alentours de la fréquence fondamentale, 259 MHz de l'onde de Rayleigh identifiée.

Les déformations en flexion trois points allant jusqu'à 1189  $\mu\epsilon$  ont été appliqués sur la structure ZnO/ Ti en mesure sans fil à 4 cm de distance suivant le principe de la Figure 2.44. La Figure 2.46b montre la variation du coefficient de réflexion en fonction de la déformation appliquée. Malgré sa faible amplitude, le signal reste détectable à des valeurs de la déformation inférieures à 1200  $\mu\epsilon$ . La structure présente une bonne sensibilité à la flexion mesure sans fil. Cette sensibilité est de 1.55 ppm/ $\mu\epsilon$ , ce qui est proche de la sensibilité mesurée en flexion lors des tests filaires de ladite structure.

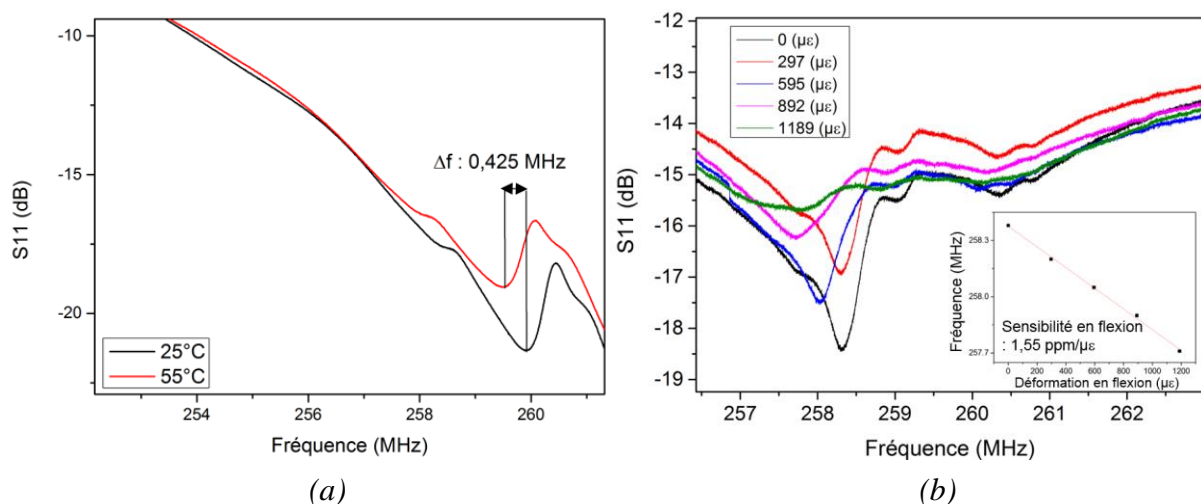


Figure 2. 46 : Mesure à distance des mesurandes (Température et déformation), (a) décalage fréquentiel du signal du dispositif SAW à des températures différentes, (b) variation de la fréquence du dispositif SAW en fonction de la déformation en flexion.

Au vu de ces résultats, il est remarqué que la structure ZnO/ Ti présente des propriétés très prometteuses pour son utilisation comme capteur de température et/ou de déformation. En plus ces capteurs pourront être interrogeables à distance, ce qui très intéressant dans le cadre des applications de monitoring de structure dans des environnements difficiles.

## Conclusion

---

Ce chapitre englobe une étude des capteurs à ondes élastiques de surface intégrés directement sur pièces métalliques en configuration résonateur. Ils ont été étudiés sous différents aspects à savoir par modélisations, réalisations et caractérisation physico-chimiques et électriques, tests en température et en déformation en configuration filaire et sans-fil. Une partie de ces développements ont été valorisé dans [131].

Dans un premier temps, il était question de la justification du choix des matériaux utilisés puis de la configuration à étudier. Par la suite, grâce aux techniques de modélisation de la structure à étudier par le logiciel Comsol Multiphysics, l'identification de l'onde de Rayleigh qui est principalement l'onde d'étude de ce travail a été mise en évidence. La simulation a permis de conforter le choix de l'épaisseur adéquate de la couche piézoélectrique. Une épaisseur de la couche piézoélectrique de ZnO équivalent à une longueur d'onde (ici  $\lambda=8\mu\text{m}$ ) permet de concentrer l'essentiel de l'énergie de l'onde Rayleigh dans la couche piézoélectrique et d'éviter une grande partie des pertes pouvant provenir du métal industriel.

L'étude expérimentale s'est faite en deux grandes étapes, à savoir la réalisation et la caractérisation du capteur SAW sur métal. La première étape s'est concentrée sur la réalisation du dispositif SAW sur métal. Pour ce faire, trois pièces métalliques, à savoir le duralumin, l'acier inoxydable et le titane ont été prises à l'état brut, puis elles ont été polies. S'est ensuivi le dépôt de la couche piézoélectrique par pulvérisation cathodique et la fabrication des IDTs par procédés de lithographie et gravure. Dans un deuxième temps ont été effectués les caractérisations physiques de la structure (DRX, AFM), puis électriques (analyseur de réseau) ce qui a permis de valider la possibilité de réalisation des dispositifs SAW sur métal. Le choix du ZnO comme couche piézoélectrique est également conforté, car sa croissance et son utilisation pour la génération d'ondes élastiques de surface est satisfaisante sur des métaux industriels variés.

Par la suite, le choix de la structure ZnO/ Ti a été préféré dans cette étude due à ses propriétés plus intéressantes, et ses caractéristiques électriques en présence des mesurandes

telles que la température et la déformation ont été étudiées en détail. La structure a révélé des sensibilités réversibles à la température, à la flexion et à la traction respectivement de -46 ppm/°C jusqu'à 450°C, 1,49 ppm/με jusqu'à 1800με et 0,22 ppm/με jusqu'à 650με au moins, ce qui montre l'intérêt de cette structure dans de fortes plages de température et de déformation. Ce dernier point (plages de déformation) permet un dépassement de l'état de l'art pour des structures de ce type. Enfin, une interrogation sans fil a été effectuée jusqu'à 14 cm, ce qui rend cette structure intéressante dans les applications de surveillance de la santé des structures dans des environnements difficiles. Il s'agit également d'une première pour cette catégorie de capteurs directement intégrés sur métal.

À ce stade, il a donc été montré que la structure ZnO/Ti présente des propriétés intéressantes en configuration résonateur. Dans l'objectif d'étendre le domaine d'application vers des solutions « multi-capteurs » identifiables, un point important en santé des structures, une étude des dispositifs ID-tag de type ligne à retard est proposée au chapitre 3.



## Chapitre III

# Dispositif SAW sur substrat métallique (Ti) combinant la fonction capteur et un code d'identification radio fréquence (RFID)

---

---

*Ce chapitre a pour objectif l'étude des capteurs de température et de déformation SAW sur substrat métallique (ici du Ti Gr2) en configuration ligne à retard et intégrant un code d'identification radiofréquence (RFID). Cette configuration, qui a l'avantage de permettre l'interrogation de multiples capteurs, est ici rendue possible par le coefficient de couplage satisfaisant du ZnO. Elle n'a jamais été explorée auparavant pour les capteurs SAW intégrés directement sur métal.*

*Le chapitre sera scindé en trois grandes parties :*

*Une première partie dans laquelle il sera question de procéder à une courte présentation de la technologie RFID utilisée pour l'identification et la traçabilité des objets.*

*Une deuxième partie qui mettra plus l'accent sur l'apport des dispositifs SAW pour l'intégration des deux fonctionnalités : capteur et code RFID.*

*La dernière partie se subdivisera en trois sections, à savoir une première section qui se concentrera sur les systèmes SAW RFID en configuration IDTs connectés dans l'optique de faire la preuve de ce nouveau concept dans l'amélioration du signal. La deuxième section consistera à la conception et à la caractérisation électrique de la structure ZnO/Ti. Des études de la sensibilité de la structure en température, en déformation et en déformation sous une variation de la température seront mises en œuvre. De plus, une étude de la structure en interrogation sans fil pour la détection du signal sera faite. Dans la dernière section, il sera question de mettre en exergue une technique d'optimisation de l'amplitude du signal à la sortie de la structure par l'amélioration de la durée de pulsation du signal à l'entrée du dispositif.*

## **III.A. Systèmes d'identification automatique & RFID**

### **III.A.1. Principe**

L'identification, la localisation et le suivi des objets par des équipements électroniques aussi nommés systèmes d'identification automatique sont un domaine qui regroupe un large champ d'application dans les domaines industriels, aérien, naval, environnemental, etc. En effet, ces systèmes utilisent les propriétés électromagnétiques, piézoélectriques, optiques des matériaux pour effectuer des applications de traçabilité, d'identification et d'analyse de données. Ainsi, ils fournissent des informations sur des produits, des animaux voire des humains et existent sous différentes technologies, à savoir le code à barres, les cartes intelligentes, les systèmes biométriques, les RFID et bien d'autres. Dans cette partie, on se concentrera sur une présentation brève des systèmes RFID.

### **III.A.2. Les RFID**

Depuis les années 1940 [132], la technologie d'identification radiofréquence (RFID : *Radio Frequency Identification*) [133] n'a eu de cesse de progresser. En effet, elle permet de réaliser l'identification [134] et la traçabilité des produits et des individus porteurs d'étiquette émettant/réfléchissant des signaux sous la forme d'onde radio à des distances plus ou moins grandes. Ces systèmes sont présents dans les domaines de la production, de la logistique, de la distribution ou de la sécurité [135].

Les systèmes RFID comprennent un assez grand nombre d'avantages qui fait d'eux des dispositifs très intéressants dans les applications d'identifications et de traçabilité [136]. Comme caractéristiques intéressantes, ils sont interrogeables à d'assez grandes distances (distance plus grande que les codes à barre), les étiquettes peuvent être lues de façon simultanée à des vitesses élevées, la zone de vue entre le lecteur et l'étiquette n'a pas besoin d'être maintenue. Les systèmes RFID peuvent être utilisés comme capteurs dans les applications de mesure [137] et également offrir un espace de stockage. L'information contenue dans l'étiquette peut être modifiée par l'interrogateur [138].

Les systèmes RFID conventionnels sont principalement constitués d'une station de lecture prenant en compte l'interface entre l'identification du tag présent dans sa zone de lecture et le système relatif à l'application, d'une étiquette aussi appelé tag (transpondeur) constitué

d'une puce et d'une antenne et d'une machine de traitement d'informations (ordinateur) [139] voir Figure 3.1. La présence du tag dans la zone de lecture permet au lecteur de l'activer par l'envoi d'un rayonnement de fréquence sous forme de champ électromagnétique en continu. Par la suite, le tag réagit et renvoie l'information qu'elle contient au lecteur, l'information est récupérée par l'application hôte du lecteur et traitée par l'ordinateur. En fonction de la procédure de l'alimentation de l'étiquette RFID, il est possible de distinguer deux types de système RFID, à savoir les systèmes passifs ou actifs. De plus, la fréquence de fonctionnement constitue le paramètre principal qui permet de différencier un système RFID d'un autre dans une application à une autre.

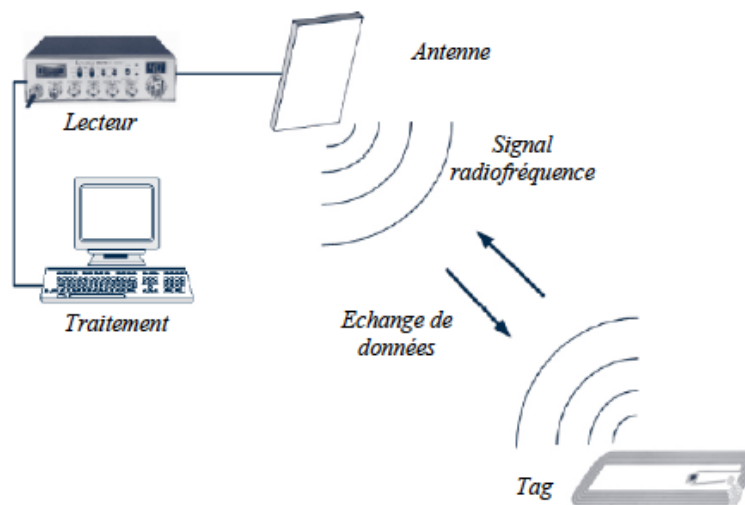


Figure 3. 1 :Schéma et principe de fonctionnement d'un système RFID [139].

Il existe un large éventail de systèmes RFID et ils peuvent être énumérés en fonction de leurs caractéristiques physiques (fréquence d'émission, distance d'interrogation et l'alimentation avec ou sans batterie). Les étiquettes contenues dans les systèmes RFID sont soit passifs ou actifs selon les applications recherchées. Toutefois, les avantages qu'apporte le caractère passif d'un système, à savoir le faible coût et la simplicité de fabrication et la durée de vie de la batterie rendent favorable une exploitation plus répandue des étiquettes passives [140].

### III.A.2.1 RFID UHF

Parmi les systèmes RFID à étiquette les plus utilisés, on retrouve les systèmes RFID *Ultra High Frequency* (UHF). Le tableau III.1 donne un comparatif des caractéristiques telles que la bande de fréquence, la distance de lecture, le taux de transmission des données, la pénétration, le coût et les types de tag utilisés des différents systèmes RFID. Les systèmes RFID

UHF ont une pénétration du signal moins bonne que ceux de la bande HF, toutefois, ils permettent d'obtenir des taux de transmission et des distances de détection très élevés, comprise entre 3-6 mètres pour les tags passifs et plus de 30 mètres pour les tags actifs. Les tags UHF fonctionnent dans les bandes fréquentielles ISM : à 433 MHz, 850-950 MHz et 2,45 GHz ce qui est favorable à la réduction de la taille des antennes [141][142][143]. Les systèmes UHF fonctionnent suivant le principe de la rétrodiffusion. En effet, les ondes électromagnétiques sont émises par le lecteur, le tag RFID reçoit une partie de l'onde et la renvoie à l'interrogateur (le lecteur). Les systèmes UHF peuvent être répartis en deux variétés, à savoir les systèmes avec ou sans puce électronique. Les RFID sans puce ont un faible coût de fabrication dû à l'absence de la puce. De plus, le code d'identification ou les informations ne sont pas mémorisées dans la puce, mais compris dans la géométrie des motifs du tag. La technologie des tags RFID sans puce peut être également utilisée comme capteur pour la détermination des grandeurs physiques comme la température, la vitesse de rotation ou l'humidité.

Tableau III. 1 : Comparaison des différents systèmes RFID

|                           | (BF)        | (HF)      | UHF              |
|---------------------------|-------------|-----------|------------------|
| Bande de fréquence        | 125-134 KHz | 13-56 MHz | 840-960 MHz      |
| Distance de lecture       | 0 à 50 cm   | 0 à 1 m   | 0 à 8 m          |
| Données                   | +           | ++        | +++              |
| Pénétration               | +++         | ++        | +                |
| Coût                      | +++         | ++        | ++               |
| Type d'étiquette utilisée | Passive     | Passive   | Passive & Active |

## III.B. Tag SAW RFID

### III.B.1. RFID à base de tag SAW

#### III.B.1.1. Tag SAW : fonctionnement

Les systèmes RFID à base de tag SAW permettent de réaliser la mesure des grandeurs physiques ou chimiques (température, pression, déformation, champs magnétiques, humidité, gaz, etc.) ainsi que l'identification du capteur par l'analyse de délai des ondes acoustiques. Comparé au RFID passif « classique », ils ont l'avantage de combiner intrinsèquement les fonctions capteurs et identification, peuvent résister aux environnements hostiles, et présentent, à puissance égale, une plus grande distance d'interrogation sans fil, car ils ne sont pas limités par les niveaux de puissance minimaux de l'électronique semi-conductrice [71].

La conception des tags SAW se fait par la réalisation des électrodes métalliques interdigitées (IDTs) et réflecteurs sur un substrat piézoélectrique. Les IDTs et les réflecteurs jouent des rôles primordiaux dans le fonctionnement des tags SAW à savoir que les IDTs (transducteurs) servent à générer et à recevoir les signaux à ondes acoustiques de surface et les réflecteurs grâce à leur disposition et leur nombre servent à modifier (encodage) le signal émis par le lecteur avant de le renvoyer. En fonction de l'alignement des réflecteurs la réflectivité du signal est maximale (Figure 3.2b) ou réduite pour l'homogénéité au niveau des réflecteurs (Figure 3.2a).

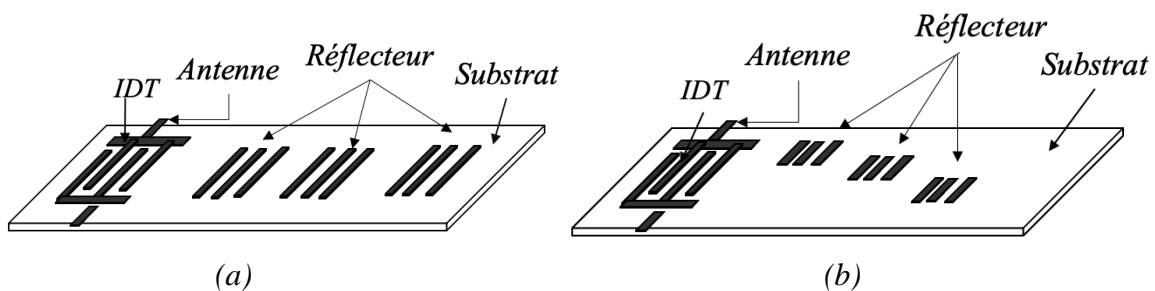


Figure 3. 2 : (a) Tag SAW, (b) Tag SAW à plusieurs rangées de réflecteurs.

La Figure 3.3 illustre le principe de fonctionnement des tags SAW, à savoir qu'une onde radio (RF) est générée au niveau du lecteur, celle-ci arrive au niveau du transducteur interdigité par l'antenne du tag. L'onde radio est convertie en ondes acoustiques de surface [71] par les phénomènes de la piézoélectricité, ensuite va se propager le long de la surface du matériau piézoélectrique avec des paramètres tels que l'amplitude, la vitesse, la fréquence et la phase

bien spécifique. L'impulsion SAW sera partiellement réfléchiée et transmise par les éléments réfléchissants (réflecteurs) situés à des positions bien précises à la surface du substrat. La réflexion du signal SAW par des réflecteurs à des positions bien déterminées contient un code qui est par la suite retransmis aux IDTs sous forme d'impulsion SAW. Ce précepte de code connu sous le nom de Time Position Encoding (TPE) consiste à coder en se basant sur la temporisation des impulsions réfléchies. L'onde acoustique qui revient au niveau des IDTs est convertie en ondes RF et celle-ci est renvoyée au lecteur avec les informations de la propagation de l'onde en surface du substrat SAW. En effet, le signal renvoyé au lecteur dépend fortement des facteurs environnementaux tels que la température ou le stress, ce qui permet de procéder à l'étude de ces mesurandes par le traitement du délai mesuré entre deux impulsions réfléchies. Il est également caractéristique de la conception du dispositif (forme et position des réflecteurs) et peut donc être utilisé pour l'identification du capteur. Ce fonctionnement des tags RFID SAW est retrouvé dans l'évaluation d'une variété de grandeurs physiques [144].

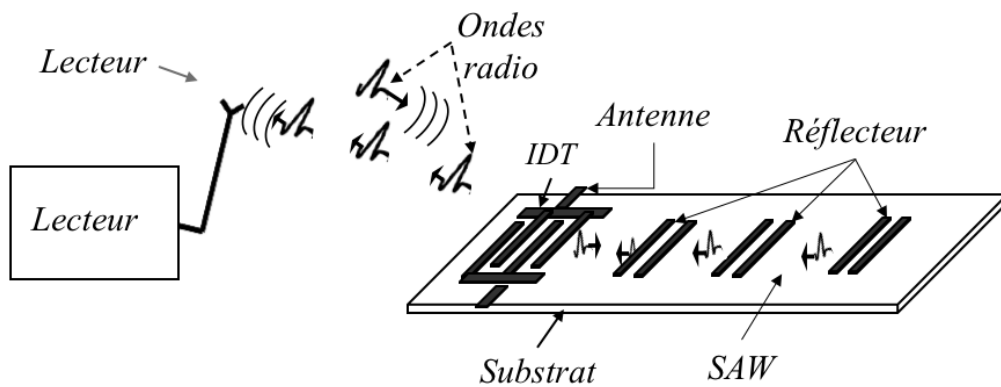


Figure 3. 3 : Principe de fonctionnement d'un tag RFID SAW.

Cependant, les systèmes Tags SAW présentent un certain nombre d'inconvénients, à savoir leur grande taille, les problèmes de réflexions multiples, des pertes d'insertions élevées et une certaine complexité de codage.

### **III.C. IDTs connectés : Nouveau concept pour des applications d'identification**

La configuration ID-tag SAW présente de nombreux avantages aussi bien pour des applications d'identification que pour l'évaluation de mesurandes telle que la température, la déformation, la pression, l'humidité, etc.

Par contre, elle nécessite de manière générale des substrats piézoélectriques permettant à la fois des coefficients de couplage électromécaniques élevés, ainsi que des pertes de propagation faibles, comme le LN-Y128, pour obtenir des niveaux de signaux satisfaisants dans le domaine temporel.

Dans le cadre de ces travaux, nous avons pu voir au chapitre 2 que :

- les structures ZnO/métal pouvaient présenter un coefficient de couplage correct ( $K^2$  égal environ à 0,5% pour l'onde Rayleigh)
- mais également que la propagation sur substrats métalliques industriels pouvait entraîner de fortes pertes par absorption, en particulier si l'épaisseur de ZnO est faible par rapport à la longueur d'onde.

Il convient donc de maîtriser/compenser ces pertes et l'optimisation de la configuration ID-tag devient un sujet d'étude très important, notamment dans la perspective d'applications sans fil. Pour ce faire, la structure dite « IDTs connectés », une configuration originale qui favorise une amélioration de l'amplitude des signaux temporels, est proposée et étudiée dans cette partie.

#### **III.C.1. Configurations IDTs connectées : amélioration du signal RFID**

Le design des transducteurs interdigités (IDTs) connectés est principalement constitué d'une série de transducteurs interdigités connectés sur les mêmes « bus-bars » comme le montre la Figure 3.4 et le code est généré par l'espace entre les transducteurs. Contrairement à la structure ID-tag ou l'énergie collectée proviens des réflexions simples au niveau des réflecteurs, dans la structure IDTs connectés, l'énergie provient fondamentalement des transmissions directes au niveau des IDTs. Cette caractéristique a pour effet d'améliorer l'amplitude du signal comme montré par Floer *et al.* [145].

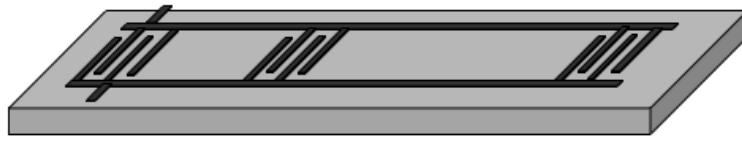
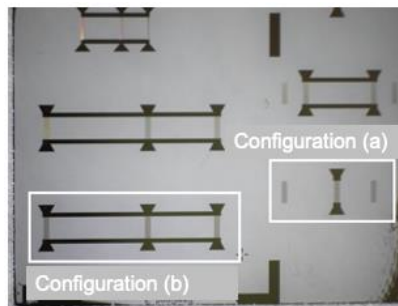
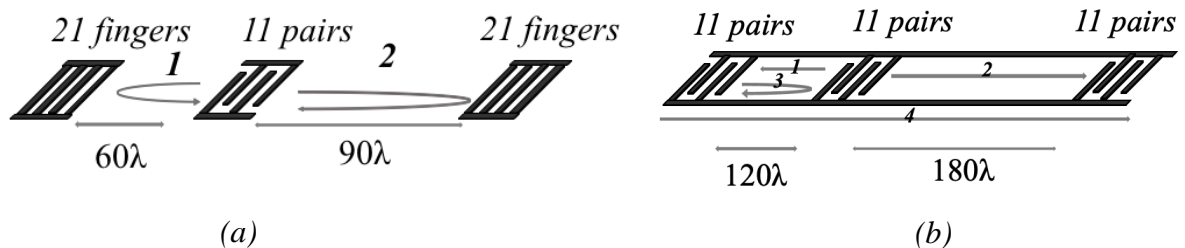


Figure 3. 4 : Configuration IDTs connectés.

Dans cet article ([145]), une comparaison entre les structures SAW RFID à savoir ID-tag SAW conventionnels et IDTs connectés sur un substrat piézoélectrique de LN-128 a été réalisée. Les Figures 3.5a et 3.5b montrent les configurations géométriques de l'ID-tag « classique » et des « IDTs connectés ». La réalisation expérimentale des deux configurations sur substrat de LN-Y128 est illustrée dans la figure 3.5c. La géométrie de la structure ID-tag conventionnelle se constitue d'un IDT centrale entouré de part et d'autre par des réflecteurs. Afin d'assurer une superposition des courbes des deux structures, les paramètres mentionnés dans les Figures 3.5a et 3.5b ont été pris en compte sachant que la distance entre les deux IDTs connectés sont deux fois plus grandes que celles comprises entre l'IDT central et les réflecteurs. En effet, dans le cas (a) le temps du trajet correspond à un aller-retour alors que dans le cas (b) ce temps correspond à un aller simple.



(c)

Figure 3. 5 : Configuration géométrique, (a) structure ID-tag classique, (b) structure IDTs connectés. Les gaps ont des longueurs de  $120\lambda$  et  $180\lambda$  et les distance centre à centre sont  $131\lambda$  et  $191\lambda$  (c) Réalisation des dispositifs expérimentaux des deux configurations (IDTs aluminium) sur un substrat de LN-Y128. [145]

La Figure 3.6a montre les résultats du coefficient de réflexion  $S_{11}$  des deux structures dans le domaine temporel. Dans ces figures, les deux premiers pics correspondent aux deux premières transmissions directes dans le cadre de la configuration IDTs connectés (courbe en rouge) et aux deux premières réflexions dans le cas de la configuration ID-tag (courbe en bleu). La différence d'amplitude entre la structure ID-tag et IDTs connectés réalisée sur LN-Y128 est très significative et est due au nombre de conversions électromécaniques successives. Les conversions sont de quatre au niveau de l'ID-tag conventionnel, à savoir une première aux niveaux des IDTs dans le processus de l'émission (électrique-mécanique), les deux suivantes au niveau des réflecteurs (mécanique-électrique puis électrique-mécanique, plus également une réflexion purement mécanique ici plus faible) et une dernière à la réception des IDTs (mécanique-électrique). Par contre, les conversions électromécaniques sont de deux au niveau de la structure IDTs connectés en raison d'une à chaque IDT (électrique-mécanique puis mécanique-électrique). La Figure 3.6-b montre les résultats expérimentaux des deux configurations sur la langasite, un substrat de référence pour les mesures à haute température. On note que les pics disparaissent pour la configuration conventionnelle (en bleu) alors qu'ils restent détectables pour configuration IDTs connectés malgré le faible coefficient de couplage de la langasite (0.34% [146]), . Cela prouve bien l'efficacité de la structure IDTs connectés à améliorer l'amplitude du signal même dans les structures présentant un faible coefficient  $K^2$  mais des propriétés intéressantes sur d'autres mesurandes. Suite aux nombreuses observations susmentionnées, la structure qui sera développée dans ce manuscrit se concentrera sur la configuration IDTs connectés.

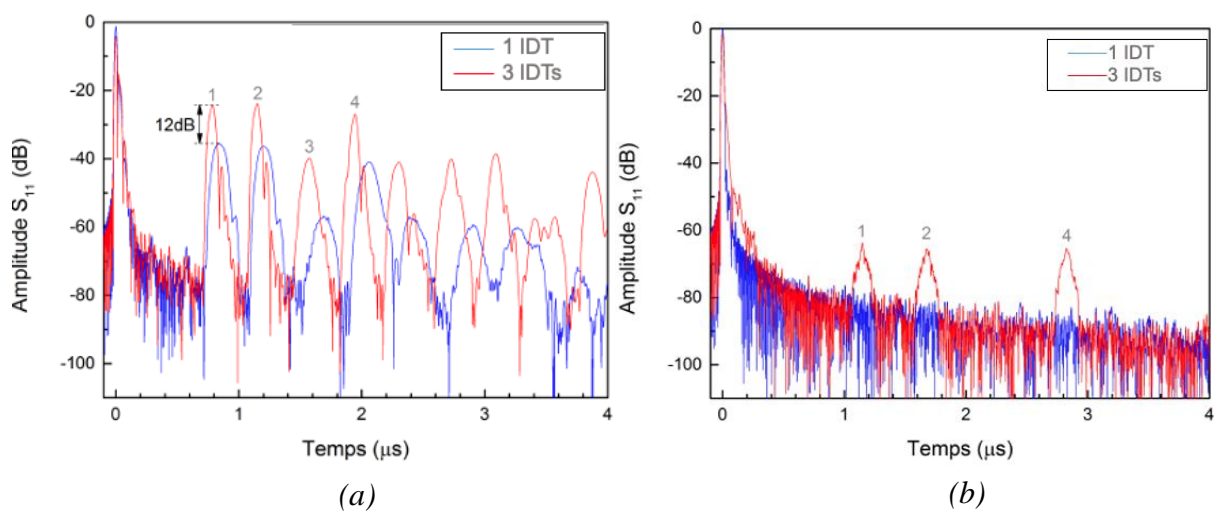


Figure 3. 6 : Coefficient de réflexion  $S_{11}$  dans le domaine temporel des structures ID-tags et IDTs connectés, (a) résultats expérimentaux sur le LN-Y128, (b) résultats expérimentaux sur la LGS [145].

### **III.C.2. Étude de la structure SAW RFID basée sur ZnO/Ti en configuration IDTs connectés**

Comme nous avons pu le voir au chapitre 2, les dispositifs à ondes acoustiques de surface réalisés sur substrats métalliques disposent de très bonnes caractéristiques dans l'évaluation de mesurandes telles que la température et la déformation. Il s'agit à présent d'y adjoindre la fonctionnalité d'identification, via des configurations de type SAW-tag.

La structure ZnO/Ti Gr2 a donc été réalisée et étudiée en configuration IDTs connectés. Dans toute la suite de cette partie, nous utiliserons la dénomination « Ti » à la place de « Titane de Grade 2 » ou « Ti Gr2 ».

#### **III.C.2.1. Étude expérimentale : réalisation de la structure ZnO/Ti**

##### **III.C.2.1.1 Dépôt de la couche ZnO et caractérisation DRX de la structure ZnO/Ti**

Des études théoriques et expérimentales ont été réalisées sur la structure ZnO/Ti en configuration IDTs connectés. Comme mentionné dans le chapitre précédent, l'augmentation de l'épaisseur de la couche d'oxyde de zinc favorise l'amélioration des propriétés élastiques dans la structure ZnO/Ti. De plus, la configuration SAW RFID implique la propagation de l'onde dans des structures « longues » au sens du nombre de longueur d'ondes parcourues, ce qui nécessite d'optimiser les pertes énergétiques de l'onde acoustique. De ce fait, l'idée est ici de concentrer une grande partie de la propagation de l'onde acoustique dans la couche piézoélectrique d'oxyde de zinc pour diminuer les pertes élastiques dans le Ti.

Différentes épaisseurs de 4  $\mu\text{m}$ , 8  $\mu\text{m}$ , 10  $\mu\text{m}$  et 12  $\mu\text{m}$  de ZnO ont été déposées sur des pièces de titane précédemment polies (voir Figure 3.7a) avec comme rugosité de surface avant dépôt évaluée à 100 Å par AFM (voir figure 3.7b). Les Figures 3.8a et 3.8b illustrent l'évolution des caractérisations DRX respectives de 4  $\mu\text{m}$  et 8  $\mu\text{m}$  puis de 10  $\mu\text{m}$  et 12  $\mu\text{m}$  de la couche de ZnO sur un substrat de Ti. Il peut être remarqué qu'à une épaisseur de 4  $\mu\text{m}$  de dépôt de la couche de ZnO, la représentation du diagramme DRX montre une très bonne croissance de la couche piézoélectrique avec une orientation préférentielle de (002) (voir Figure 3.8a courbe noire). A partir d'une épaisseur de la couche de 8  $\mu\text{m}$ , il est observé l'apparition d'une nouvelle famille d'orientation, notamment la (100) à gauche du pic (002) (voir Figure 3.8a diagramme en rouge), ce qui est également le cas pour les croissances de 10 et 12  $\mu\text{m}$  (Figure 3.8b en rouge

et noir). L'impact de telles croissances sur la génération et la propagation d'ondes élastiques de surface reste à étudier précisément, mais il est possible que cela conduise à l'apparition de modes parasites.

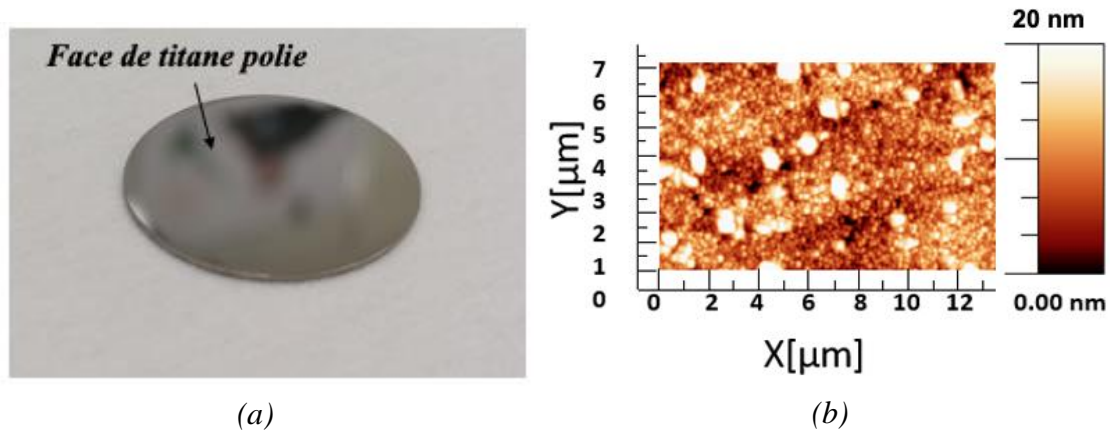


Figure 3. 7 : (a) échantillon de Ti poli sur une face, (b) Mesure AFM de la surface du Ti.

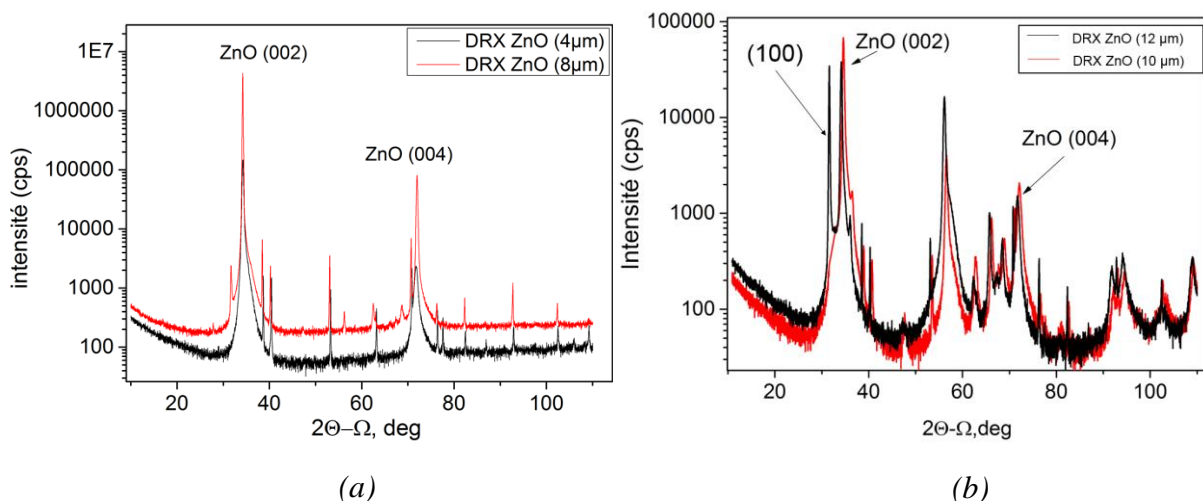


Figure 3. 8 : Diagramme de structures (a) ZnO (4  $\mu\text{m}$ ) courbe en rouge et ZnO (8  $\mu\text{m}$ ) courbe en noir sur substrat de titane (0,5 mm) (b) ZnO (10  $\mu\text{m}$ ) courbe en rouge et ZnO (12  $\mu\text{m}$ ) courbe en noir sur substrat de titane (0,5 mm).

### III.C.2.1.2 Caractérisation électrique : influence de l'épaisseur de la couche de ZnO

La structure IDTs connectés sur ZnO/Ti a été réalisée expérimentalement (voir Figure 3.9) suivant les mêmes procédés de lithographie et de gravure que ceux mentionnés dans le chapitre précédent. Une observation de l'influence de l'épaisseur de la couche piézoélectrique (ZnO) sur la qualité du signal a été réalisée en considérant des épaisseurs de 8  $\mu\text{m}$ , 10  $\mu\text{m}$  et 12  $\mu\text{m}$ . La Figure 3.9 donne la représentation du coefficient de réflexion dans le domaine temporel

pour la structure SAW à des épaisseurs de couche de ZnO différents (8  $\mu\text{m}$ , 10  $\mu\text{m}$  et 12  $\mu\text{m}$ ) avec une longueur d'onde  $\lambda = 9,2 \mu\text{m}$ . Toute une série de pics apparaissent et leur identification sera traitée dans la section suivante.

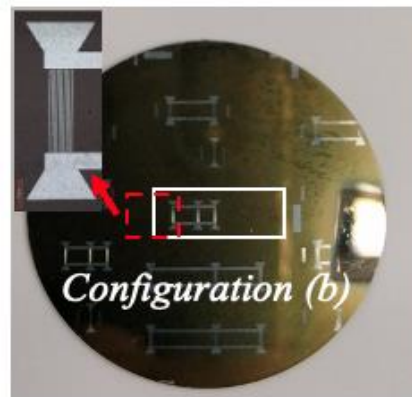


Figure 3. 9 : Réalisation expérimentale de la configuration à trois IDTs connectés.

Il est remarqué que l'augmentation de l'épaisseur de la couche de ZnO de 8  $\mu\text{m}$  à 10  $\mu\text{m}$  améliore l'amplitude du premier pic SAW à  $t=0,45\mu\text{s}$  de 6 dB et de 16 dB lorsque l'épaisseur de ZnO passe à 12  $\mu\text{m}$  (voir Figure 10). Cette étude permet de mettre en exergue l'importance de la concentration de l'énergie de l'onde acoustique dans la couche piézoélectrique afin d'obtenir des signaux présentant moins de pertes acoustiques, dans le cadre de la réalisation de capteurs sur pièces métalliques. La structure ZnO(12  $\mu\text{m}$ )/Ti (0,5 mm) pour  $\lambda = 9,2 \mu\text{m}$  a donc principalement été la structure développée dans la suite de cette partie.

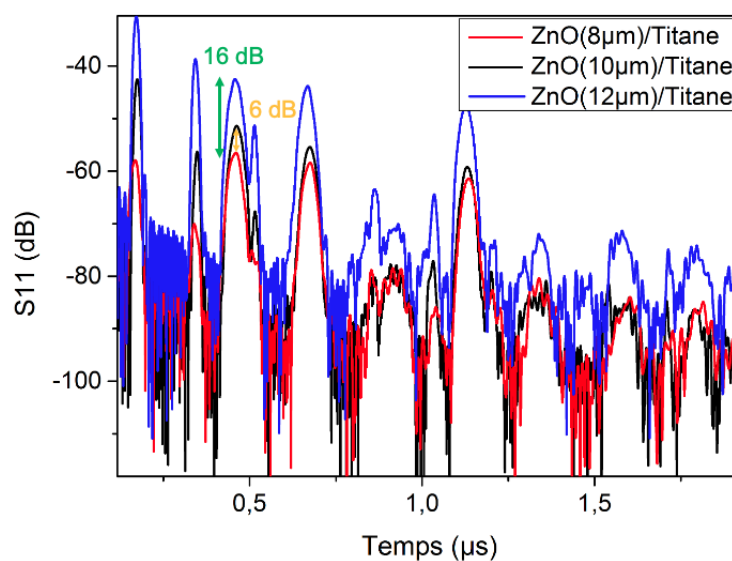


Figure 3. 10 : Coefficient de réflexion S11 pour des épaisseurs de 8  $\mu\text{m}$  (courbe rouge), 10  $\mu\text{m}$  (courbe noire) et 12  $\mu\text{m}$  (courbe bleue) de couche de ZnO.

### III.C.2.1.3 Caractérisation électrique : identification des ondes et influence de la longueur d'ondes sur l'onde SAW

Dans le but d'observer l'influence de la longueur d'onde sur la structure ZnO/Ti (0,5 mm), une étude a été réalisée en considérant une épaisseur fixée à 12  $\mu\text{m}$  de la couche piézoélectrique. Deux dispositifs présentant les longueurs d'onde de 24  $\mu\text{m}$  et 9,2  $\mu\text{m}$  ont été réalisés sur le même substrat. Les coefficients de réflexion dans le domaine fréquentiel pour ces deux dispositifs sont présentés dans la figure 3.11. On remarque la présence d'un ensemble de pics dont l'espacement  $\Delta f$  ( $\Delta f_1 = 5,9$  MHz et  $\Delta f_2 = 4,42$  MHz) permet de différencier deux catégories d'ondes distinctes.

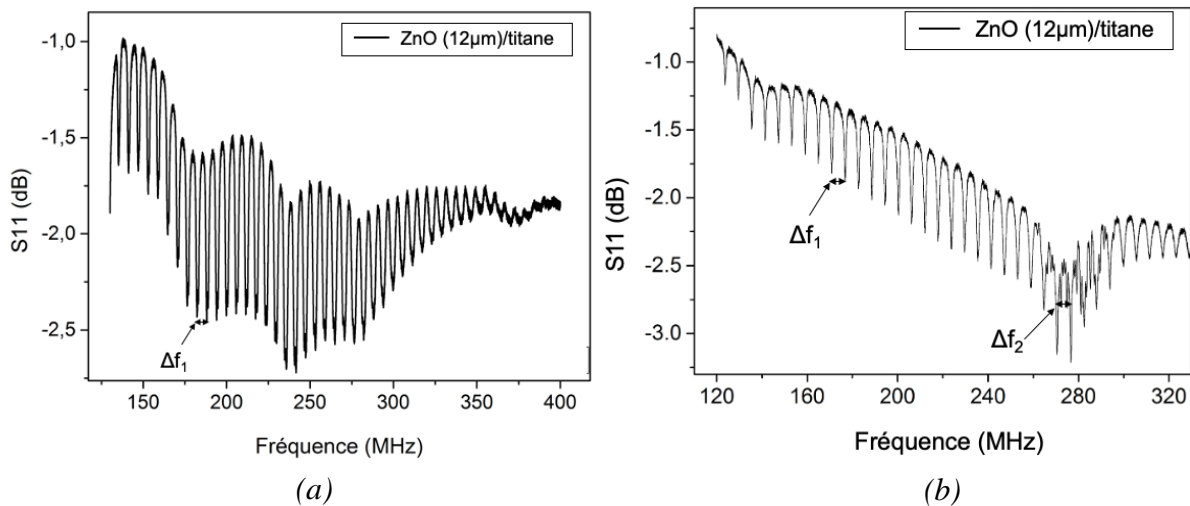


Figure 3. 11 : Évolution fréquentielle du signal électrique (a) ( $\lambda = 24 \mu\text{m}$ ) (b) ( $\lambda = 9,2 \mu\text{m}$ ).

Les coefficients de réflexion sont également tracés dans le domaine temporel (Figure 3.13). Les courbes temporelles montrent une représentation très distincte des deux types d'ondes qui sont par la suite identifiés comme étant les ondes de surface et de volume. La génération simultanée de ces deux ondes est un résultat imprévu, car il n'est pas observé dans la même structure en configuration résonateur, mais elle rend cette structure particulièrement intéressante pour des applications de capteurs. Les ondes de surface (SAW) sont générées suivant la géométrie (configuration b – Figure 3.9) réalisée par les électrodes en aluminium et les ondes de volume quant à elles sont générées par les réflexions de l'onde acoustique sur la surface inférieure du substrat métallique (voir Figure 12). Pour ces dernières, les pads de connexion et les bus-bar sur la partie supérieure jouent un rôle prépondérant.

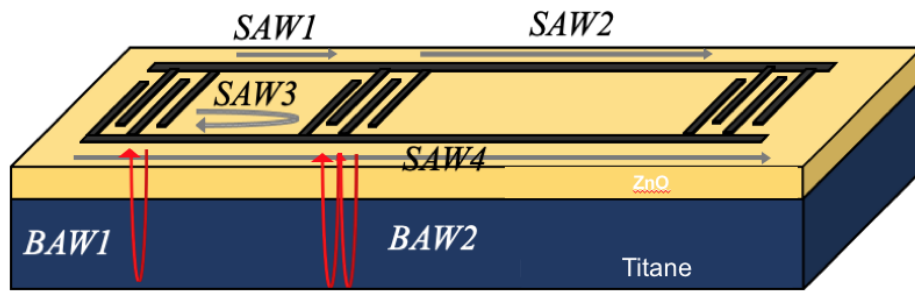
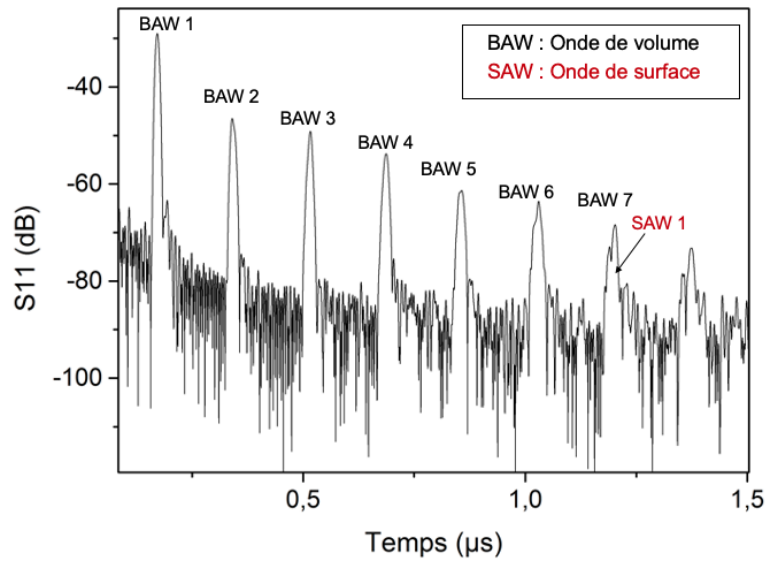
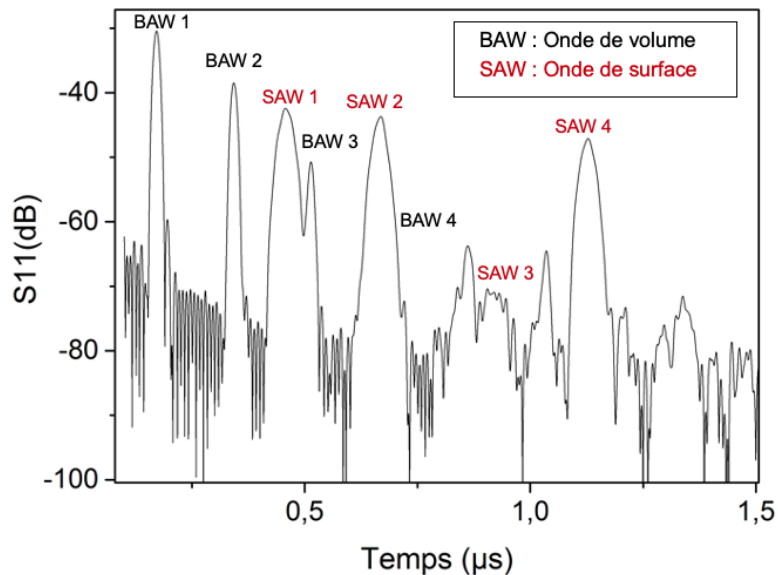


Figure 3. 12 : Déplacement des ondes SAW et BAW dans la structure ZnO/Ti

Pour les deux dispositifs avec  $24\ \mu\text{m}$  et  $9,2\ \mu\text{m}$  de longueur d'onde, les pics d'ondes de volume nommés BAW sont clairement identifiés, car ceux-ci ne varient pas en fonction de la longueur d'onde des IDTs. Contrairement aux pics d'ondes de volume, les pics d'ondes de surface sont quant à eux liés à la longueur d'onde. En effet, l'onde de surface générée est ici une onde de Rayleigh dont la profondeur de pénétration est de l'ordre d'une longueur d'onde. De ce fait, elle se propagera presque en totalité dans la couche du ZnO de  $12\ \mu\text{m}$  pour  $\lambda=9,2\ \mu\text{m}$  alors pour  $\lambda=24\ \mu\text{m}$ , une bonne partie de l'onde se propagera dans le substrat métallique ce qui induira l'augmentation des pertes de propagation élastiques comme illustré dans les Figures 3.13a et 3.13b. Le premier pic d'onde de surface dans les structures à  $24\ \mu\text{m}$  et à  $9,2\ \mu\text{m}$  localisé à des délais de  $1,22\ \mu\text{s}$  et  $0,45\ \mu\text{s}$  (avec  $v = 2576,56\text{m/s}$  et  $d = 131\lambda$ ) ont respectivement une amplitude  $-74\ \text{dB}$  et de  $-42\ \text{dB}$  soit une différence de  $32\ \text{dB}$ . En s'appuyant sur ce constat, la suite de l'étude présentée dans ce manuscrit se concentrera sur le dispositif avec la longueur d'onde  $\lambda = 9,2\ \mu\text{m}$  et une épaisseur de ZnO de  $12\ \mu\text{m}$ .



(a)



(b)

Figure 3. 13 : Coefficient de réflexion  $S_{11}$  dans le domaine temporel (a) dispositif avec  $\lambda = 24 \mu\text{m}$  (b) dispositif avec  $\lambda = 9,2 \mu\text{m}$ .

### III.C.2.2 Étude théorique : modélisation et simulation de la structure ZnO/Ti

L'étude numérique de la structure ZnO/Ti s'est faite suivant deux techniques de simulation distinctes. Dans le premier cas, la méthode des éléments finis (FEM) été utilisée sous Comsol Multiphysics dans le but de mettre en exergue le déplacement particulière des ondes élastiques comme on peut le voir dans la Figure 3.15a. La géométrie du modèle 2D de la structure étudiée théoriquement avec les grandeurs assimilables aux grandeurs réelles est

illustrée dans la Figure 3.14. La condition aux limites *Low Reflecting Boundary* a été appliquée sur les deux faces (gauche-droite) de la structure afin de laisser les ondes sortir du domaine sans générer de réflexions. Aucune condition n'a été appliquée sur la face inférieure de la structure, ce qui favorise les réflexions de l'onde acoustique dans le volume et donne une meilleure approximation de l'étude expérimentale. Le signal temporel du coefficient  $S_{11}$  simulé et expérimental est illustré dans la Figure 3.15b. On peut observer un comportement légèrement similaire entre les ondes élastiques de surface de l'étude théorique et expérimentale, ce qui est loin d'être le cas pour les ondes de volumes.

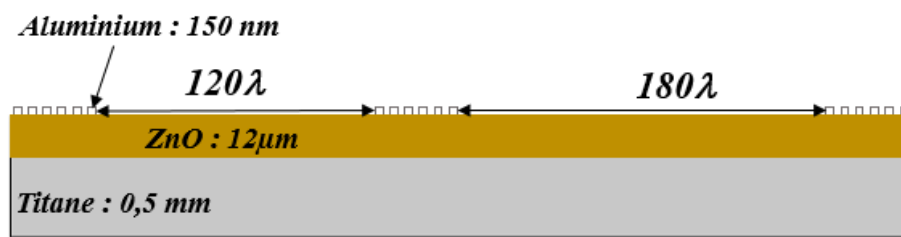
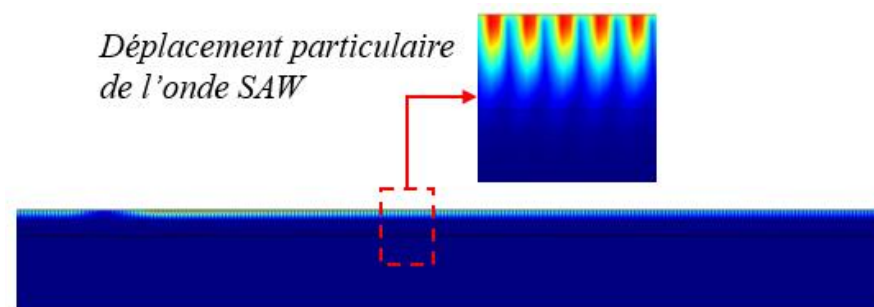
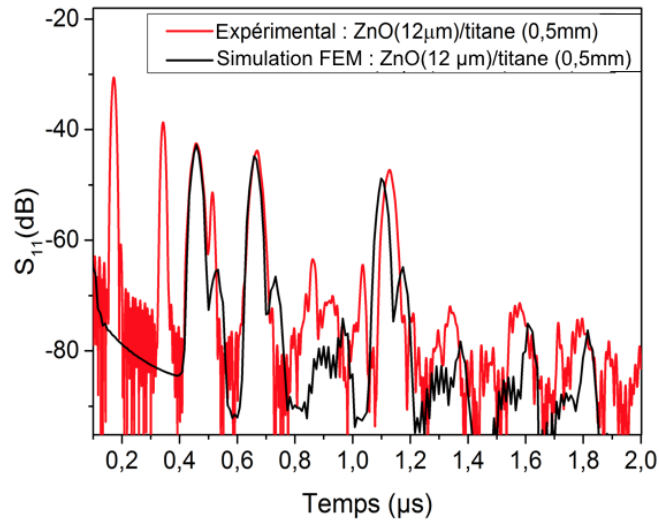


Figure 3. 14 : Schéma 2D de la géométrie réalisée sous Comsol Multiphysics.

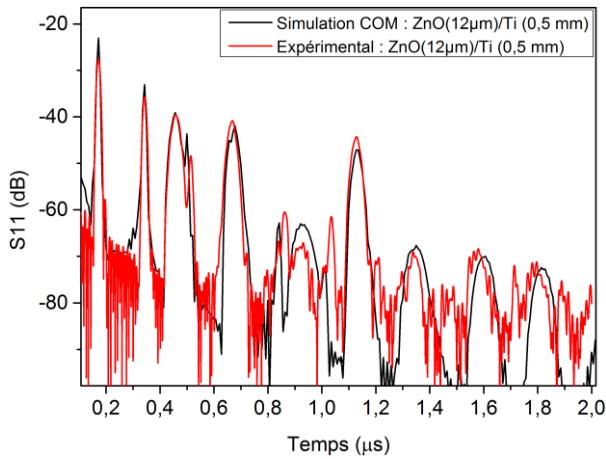
Dans le but d'optimiser le signal de réflexion pour un bon accord entre l'expérimental et la théorie, la méthode de simulation COM (Coupling of Mode) utilisée dans l'étude théorique de la structure Al/LN Y-128 en configuration IDTs connectées [145] a été développée. Ce modèle réalisé par P. Nicolay permet d'extraire des paramètres COM des modélisations de l'admittance par la méthode des éléments finis et est par la suite utilisé dans un algorithme de type P-matrice. Le tableau III.2 donne les paramètres COM de la structure ZnO/Ti utilisés. Les Figures 3.15c et 3.15d illustre le coefficient de réflexion  $S_{11}$ (dB) dans les domaines temporels fréquentiels respectivement. On peut observer un bon accord entre simulation et expérience, ce qui permet de valider l'étude de ce modèle et serait favorable au développement d'un modèle numérique qui permettrait l'amélioration de cette structure pour plus de performances.



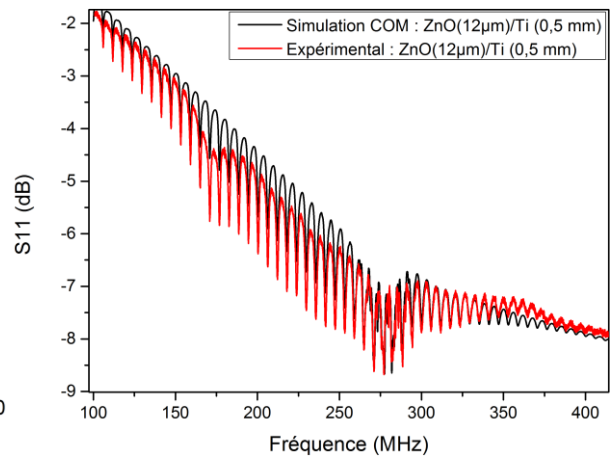
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 3. 15 : (a) Déplacement particulière théorique de l'onde SAW (b) coefficient de réflexion  $S_{11}$  dans le domaine temporel : simulation sur FEM et expérience (c) simulation COM et expérience (d). Coefficient de réflexion  $S_{11}$  dans le domaine fréquentiel, simulation COM et expérience.

Tableau III. 2 : Paramètre COM utilisés dans la simulation de la structure ZnO/Ti

|                          |            |
|--------------------------|------------|
| Vitesse                  | 2538 (m/s) |
| Vitesse en surface libre | 2554 (m/s) |
| Réfectivité (Kappa)      | 1,74%      |

|                                   |                     |
|-----------------------------------|---------------------|
| Coefficient de couplage normalisé | 12,28E-5            |
| Perte (dB/λ)                      | 0,04                |
| Capacité normalisée               | 8.10 <sup>-17</sup> |

### III.C.2.3 Propriétés caractéristiques de la structure ZnO/Ti

La structure ZnO/Ti en configuration IDTs connectés présente des propriétés très intéressantes, en plus des avantages précédemment mentionnés (absence de colle, amélioration de l'amplitude, etc.), elle dispose d'un rapport de pertes en amplitude des trois pics de transmission directe SAW1, SAW2 et SAW4 relativement faible (voir Figure 3.16) et ce malgré son faible facteur de couplage électromécanique. La structure ZnO/Ti présente principalement des pertes de propagation dues à l'utilisation d'un substrat métallique présentant de faibles propriétés élastiques, ce qui explique la linéarité observée. Cependant, le niveau des pertes en amplitude témoigne d'une assez bonne propagation de l'onde acoustique dans la structure ZnO/Ti.

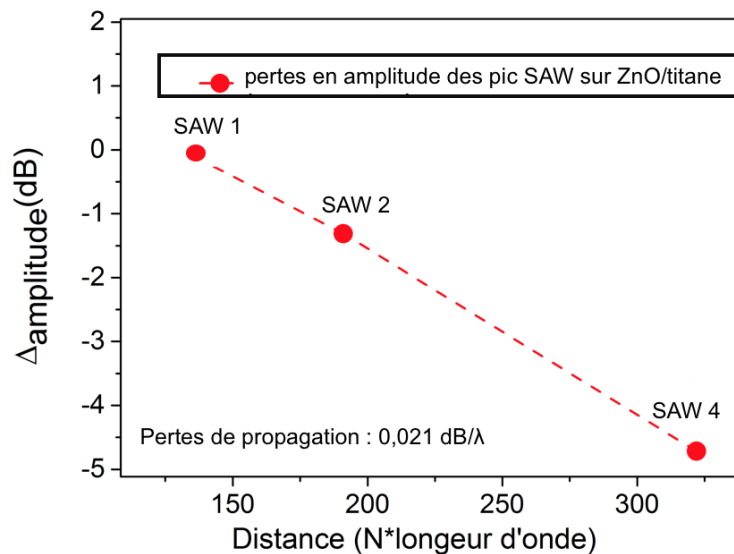
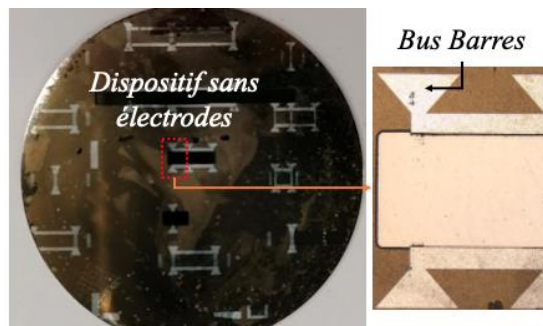


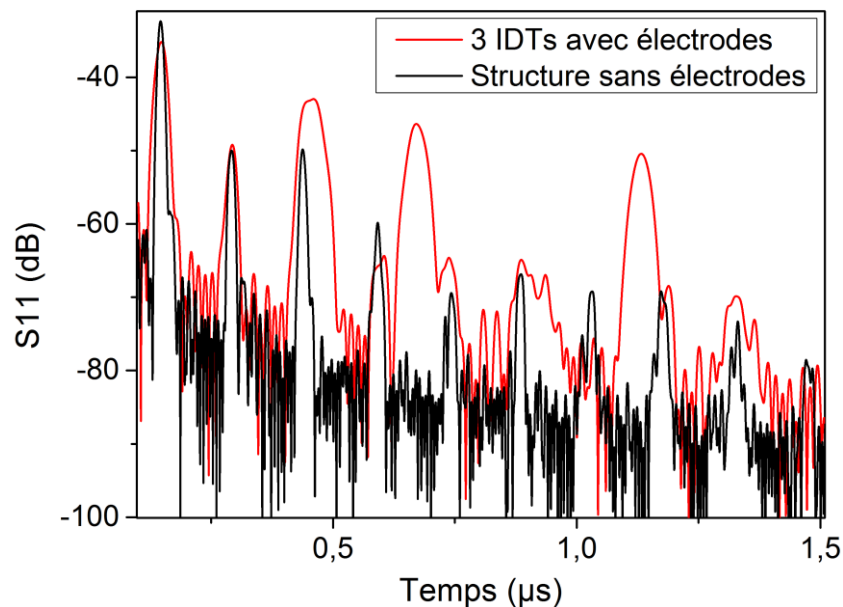
Figure 3. 16 : Pertes en amplitude des pics de transmission direct dans la structure ZnO/Ti.

De plus, le fait qu'elle génère deux types d'ondes, à savoir l'onde de surface et de volume, la rend encore plus attrayante pour la réalisation de capteur à onde acoustique prenant en compte la compensation de la température ou de la déformation. De plus, ces dispositifs peuvent servir à la mise en place des capteurs multi sensoriels à des mesurandes différentes.

Enfin, une des particularités intéressantes de cette structure est sa simplicité à isoler l'onde de volume. Pour ce faire, l'une des techniques consiste à complètement graver les électrodes interdigitées et laisser uniquement les bus barre comme l'illustre la Figure 3.17a. Dans la Figure 3.17b, les courbes expérimentales de la structure en configuration IDTs connectés avec et sans la présence d'électrodes interdigitées sont représentées. Une parfaite superposition des ondes de volumes est parfaitement illustrée entre la structure avec électrodes (courbe en rouge) et la courbe sans électrodes (courbe en noir). De plus et comme prévu, dans la courbe sans électrodes (courbe en noir), les pics SAW ont complètement disparu. Cette configuration est intéressante, car elle permettrait l'isolation et l'exploitation unique de l'onde longitudinale de volume pour des applications précises.



(a)



(b)

Figure 3. 17 : Coefficient de réflexion  $S_{11}$  dans le domaine temporel du dispositif réalisé (a) avec et (b) sans présence d'électrodes interdigitées.

### III.C.2.4. Étude de la sensibilité en température

La température est un paramètre très important de cette étude. La structure ZnO/Ti en configuration IDTs a été évaluée en température à partir de la station sous-pointe (S-1160, signatone) qui peut monter à des températures allant jusqu'à 600°C (voir Figure 3.18). La Figure 3.19a illustre la variation en fréquence de paramètre  $S_{11}$ (dB) de la structure ZnO(12 $\mu$ m)/Ti (0,5mm) avec  $\lambda=9,2\ \mu$ m en fonction de la température.

La sensibilité en température (TCF) des pics SAW1 et BAW1 représentant respectivement les premiers pics d'ondes de surface et de volume de la structure donne des valeurs de -121 ppm/°C pour l'onde de volume et -43 ppm/°C pour l'onde de surface (voir Figure 3.19b). Ces valeurs montrent de bonnes sensibilités en température et présentent l'onde de volume comme un parfait candidat pour la réalisation d'un capteur de température.



Figure 3. 18 : Station sous pointe S-1160, Signatone

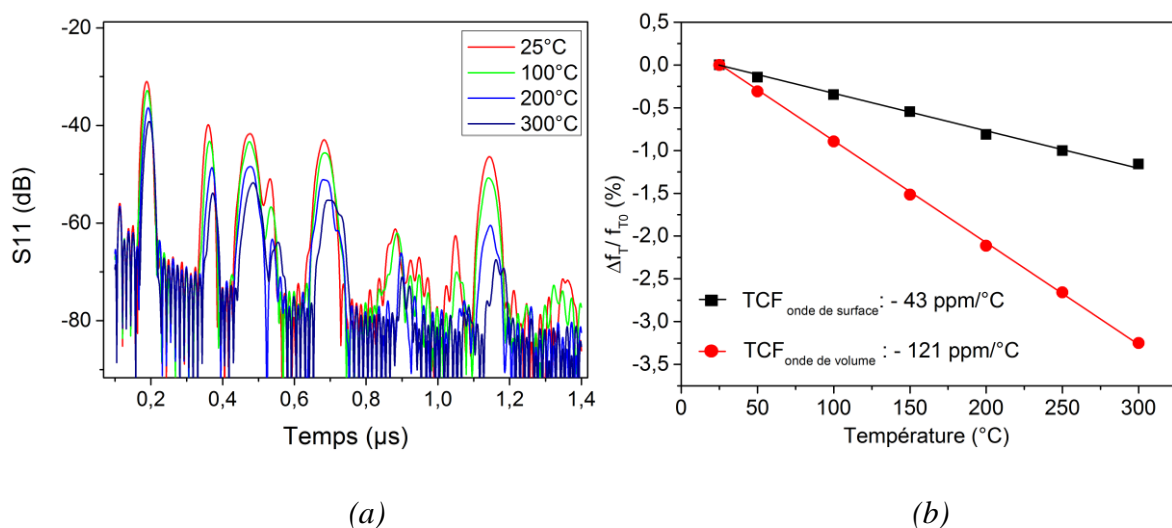


Figure 3. 19 : (a) Coefficient de réflexion  $S_{11}$  dans le domaine temporel du dispositif réalisé sur titane en fonction de la variation en température. (b) Sensibilité en température des ondes de volume et de surface de la structure ZnO/Ti (les variations de fréquence sont déterminées à phase constante sur le signal fréquentiel correspondant aux premiers pics BAW et SAW).

Les différences en amplitude des signaux et des temps retards mesurés des pics SAW1 et BAW1 des ondes de surface et de volume en fonction de la température sont illustrées dans la Figure 3.20. Les amplitudes des pics SAW1 (carré en noir) et BAW1 (cercle en rouge) tendent à diminuer avec l'augmentation de la température. L'amplitude de pic SAW réduit plus rapidement que celui de l'onde de volume (au moins de deux fois) à des températures supérieures à 200°C. Cela témoigne d'une assez bonne stabilité en amplitude de l'onde de volume contrairement à l'onde de surface. Les retards mesurés des deux pics d'onde de volume (rond rouge) et de surface (rond noir) montrent une sensibilité deux fois plus élevée du pic de surface par rapport au pic de volume.

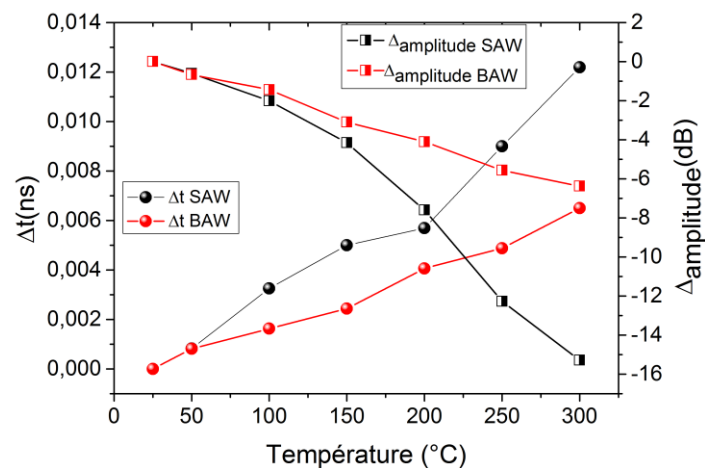


Figure 3. 20 : Caractérisation du dispositif en configuration IDTs connectés (Al) sur ZnO/Ti : évolution du niveau de signal et du temps de retard pour les premiers pics BAW et SAW

### III.C.2.5. Étude de la sensibilité en déformation

Des études de déformation, à savoir en flexion trois points et en traction ont par la suite été réalisées sur la structure. La Figure 3.21 illustre la surface de la poutre métallique à différentes étapes du procédé de réalisation jusqu'à la structuration des électrodes interdigitées (IDTs). La poutre métallique en titane a été précédemment découpée suivant les dimensions 5cm×2,5cm×1mm (Figure 3.21a), puis un dépôt de la couche d'oxyde de zinc de 12 μm a été réalisé au-dessus (figure 3.21b) de la face précédemment polie. Le dispositif SAW RFID en

configuration IDTs connectés a ensuite été réalisé en structurant des IDTs en aluminium sur la surface de la couche de ZnO par photolithographie et gravure (Figure 3.21c).

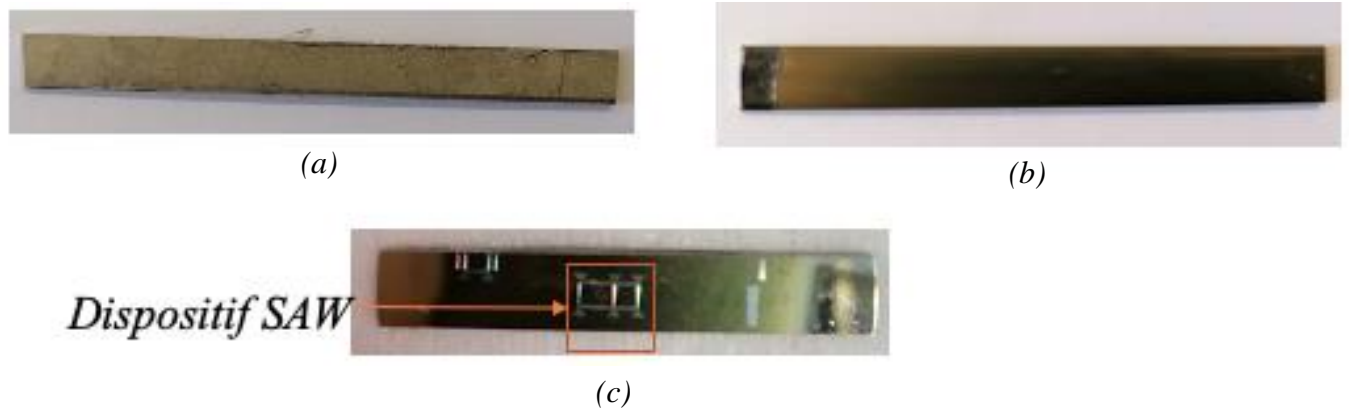


Figure 3. 21 : (a) Poutre métallique à l'état brut (b) poutre métallique après dépôt de 12  $\mu\text{m}$  de couche de ZnO (c) dispositif SAW réalisé sur la poutre métallique.

### III.C.2.5.1. Étude de la sensibilité de déformation en flexion trois points

La structure ZnO(12 $\mu\text{m}$ ) /titane(1mm) a été soumise à des déformations allant jusqu'à 1800  $\mu\epsilon$  par pas de 100  $\mu\epsilon$ . La Figure 3.22 représente le banc de test permettant la flexion trois points de la poutre métallique.



Figure 3. 22 : Illustration du banc de test de flexion trois points sur une barre structurée ZnO (12  $\mu\text{m}$ ) / Ti (1mm).

L'évolution du coefficient de réflexion  $S_{11}$  dans le domaine temporel en fonction de la flexion est illustrée dans la figure 3.23a. Celle-ci montre une variation du signal de l'onde de surface beaucoup plus élevée que celle de l'onde de volume. Dans le cadre d'un effort de flexion avec glissement de ce type, c'est assez logique, car la plaque de titane se déforme peu dans son

épaisseur et ne subira pas de changement significatif dans ses paramètres élastiques. La détermination de la sensibilité à la flexion trois pointes a été faite par le suivi de l'évolution de la phase des signaux SAW et BAW dans le domaine fréquentiel durant l'application de la déformation. La figure 3.23b met en évidence les sensibilités des deux premiers pics SAW1 et BAW1 de la structure. Conformément à l'observation faite au niveau de coefficient de couplage  $S_{11}$  des pics d'ondes de surface et de volume, la sensibilité du pic SAW1 est très grande comparée au pic BAW avec des valeurs respectives de 2,2 ppm/ $\mu\epsilon$  et de 0,02 ppm/ $\mu\epsilon$ . La sensibilité en flexion de l'onde SAW est également meilleure que pour le résonateur du chapitre 2 (1,49 ppm/ $\mu\epsilon$ ). Il faudra noter que le rapport  $h_{ZnO}/\lambda$  est différent (ici 1,3 vs 0,8 pour le résonateur testé en flexion au chapitre 2).

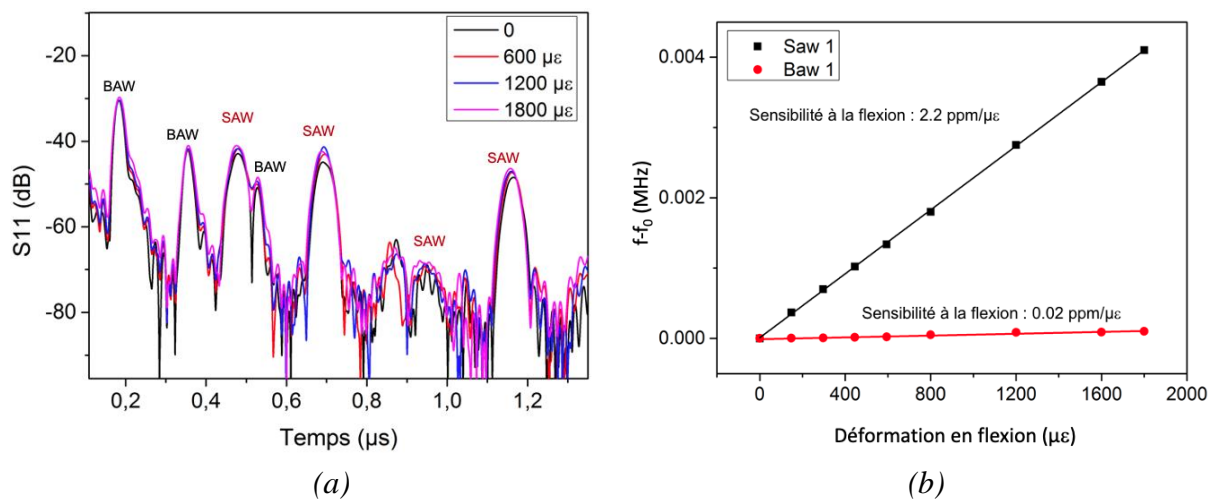


Figure 3. 23 : Mesure de l'évolution du coefficient de réflexion  $S_{11}$  (dB) dans le domaine temporel du dispositif (a) et de l'évaluation de la sensibilité des ondes de volume (BAW1) et de surface (SAW1) (b) en fonction de la déformation en flexion.

A ce stade, on voit donc apparaître une caractéristique très intéressante de la structure à IDT connectés ZnO/Ti avec génération mixte d'ondes SAW et BAW, a minima pour les sollicitations en flexion : une onde BAW fortement sensible à la température et très peu à la flexion qui pourra servir de capteur de référence de température, et une onde SAW présentant une forte sensibilité en déformation.

### III.C.2.5.2. Étude de la sensibilité en traction

Par la suite, la structure a été soumise à des déformations en traction allant jusqu'à 900  $\mu\epsilon$ . La Figure 2.39 donnée dans le chapitre 2 illustre le montage en traction de la poutre métallique.

L'évolution de la phase du pic SAW1 a été réalisée durant l'application de la contrainte afin d'extraire la sensibilité de la structure. La figure 3.24 met en évidence la sensibilité du pic SAW1 qui tourne autour de la valeur de 0,42 ppm/ $\mu\epsilon$ .

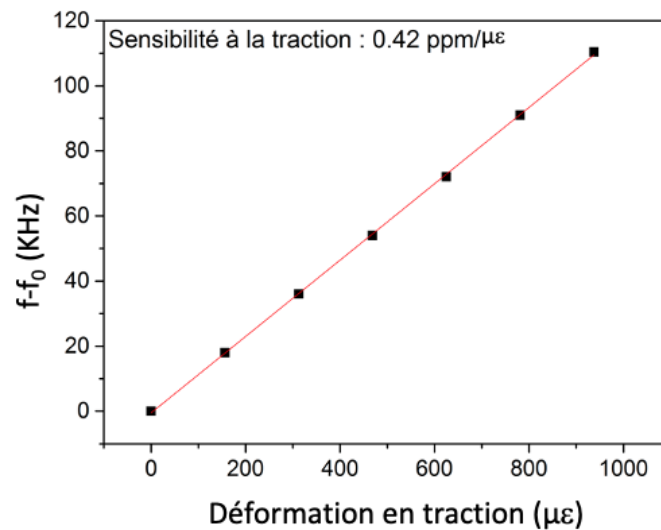


Figure 3. 24 : Évaluation de la sensibilité de l'onde de surface (SAW1) en fonction de la traction.

Les tests à la déformation montrent de très bonnes valeurs de sensibilité de l'onde SAW en flexion trois points et en traction respectivement de 2,2 ppm/ $\mu\epsilon$  et de 0,42 ppm/ $\mu\epsilon$  de la structure. Ces résultats sont très intéressants et présentent la structure SAW RFID en configuration IDTs connectés sur substrat métallique comme un excellent candidat pour des applications évaluant la déformation dans un milieu tout en intégrant un système d'identification et de compensation en température.

### III.C.2.6. Sensibilité en traction sous chauffage basse température

L'équipement dont nous disposons au laboratoire nous permet de faire des tests en traction à différentes températures, mais dans la gamme 20 à 80°C. La sensibilité de la structure à la traction à différentes températures a donc été réalisée en utilisant le montage de la Figure 2.39 du chapitre 2. La traction a été appliquée à plus de 900  $\mu\epsilon$  pour des températures allant de 20°C à 80°C. La Figure 3.25 montre les courbes de variation de la fréquence en fonction de la déformation de traction pour différentes températures. On remarque un comportement assez linéaire de l'évolution de la phase du pic de l'onde SAW durant les cycles de traction en

température. De plus, on observe que la sensibilité de la structure diminue avec la température. Cette sensibilité passe de 0,42 ppm/ $\mu\epsilon$  pour  $T=20^{\circ}\text{C}$  à 0,15 ppm/ $\mu\epsilon$  pour  $80^{\circ}\text{C}$ .

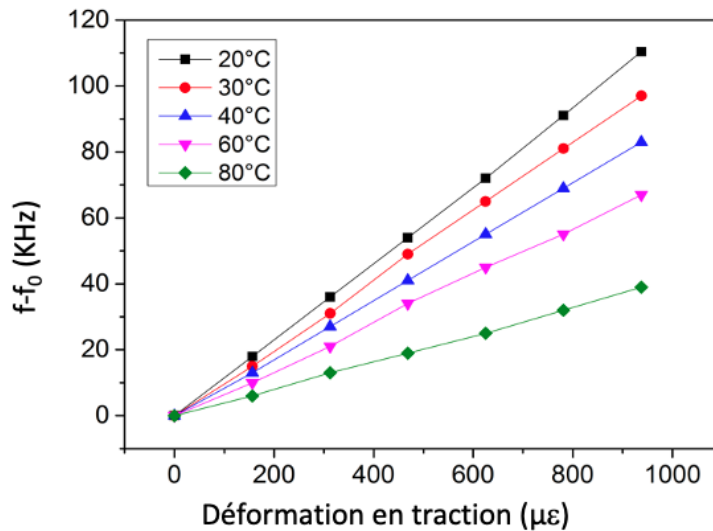


Figure 3. 25 : Évaluation de la sensibilité de l'onde de surface (SAW1) en fonction de la déformation de traction et de la température.

### III.C.3. Applications sans fil de la structure ZnO/Ti

Le caractère sans fil étant un facteur très important et généralement demandé dans la conception des capteurs. De par les propriétés précédemment mentionnées qu'il apporte, à savoir la sécurité, la commodité et l'apport économique.

Dans cette partie, et afin d'évaluer le potentiel de notre capteur en configuration sans fil, des études permettant une interrogation et donc une mesure à distance ont été réalisées sur la structure ZnO/Ti.

#### III.C.3.1. Mesure sans fil de la structure ZnO/Ti

La structure ZnO/Ti a été interrogée en configuration sans fil. Le montage expérimental utilisé dans le cadre de la réalisation des mesures sans fil est illustré dans la Figure 3.26. Le dispositif a été relié à une antenne dipôle par le même procédé de connexion utilisé dans le chapitre 2. La deuxième antenne dipôle était directement reliée à la sortie de l'analyseur de réseau vectoriel (VNA) comme illustré dans la Figure 3.26.

La Figure 3.27 met en évidence les essais en sans-fil réalisés sur le dispositif allant jusqu'à des distances de 25 cm. Ces tests ont principalement été réalisés en considérant les ondes

acoustiques de surface (le pic SAW 1). Il est observé que l'amplitude du signal de réflexion diminue avec l'augmentation de la distance d'interrogation. Toutefois, celui-ci reste parfaitement détectable jusqu'à des distances supérieures à 15 cm. A partir de 25 cm de distance d'interrogation, le signal réduit fortement, mais reste cependant légèrement visible.

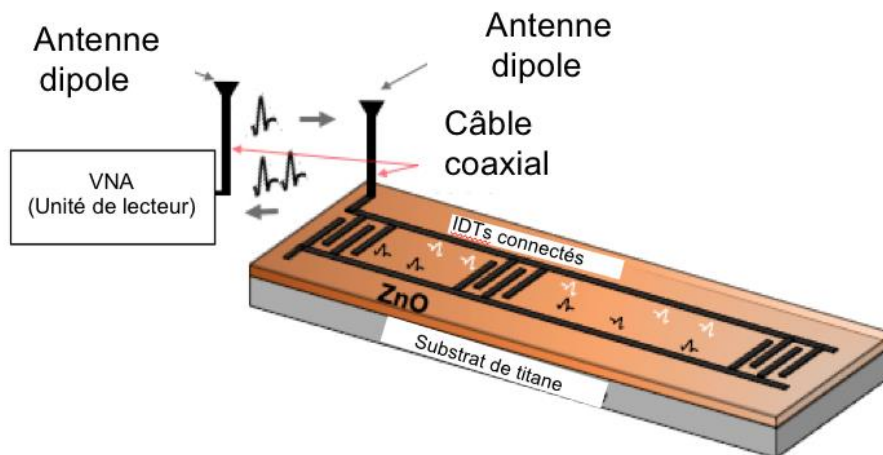
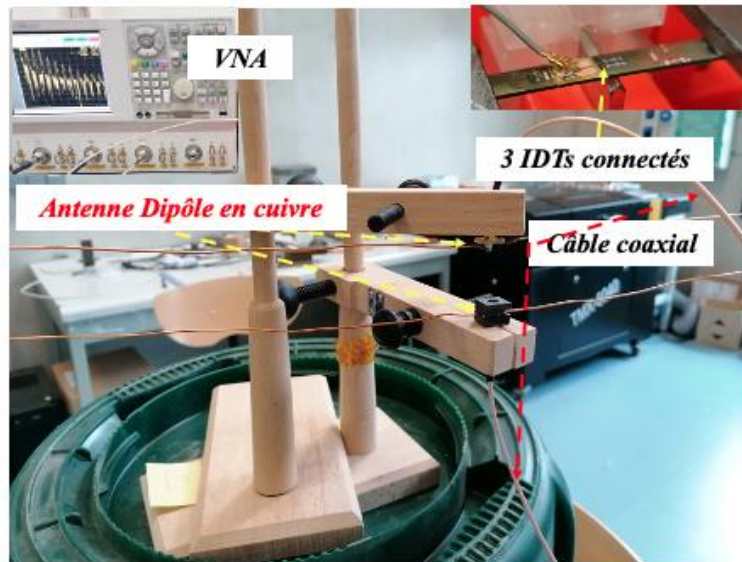


Figure 3. 26 : Montage expérimental d'une mesure sans fil d'un dispositif SAW RFID sur métal en configuration IDTs connectés.

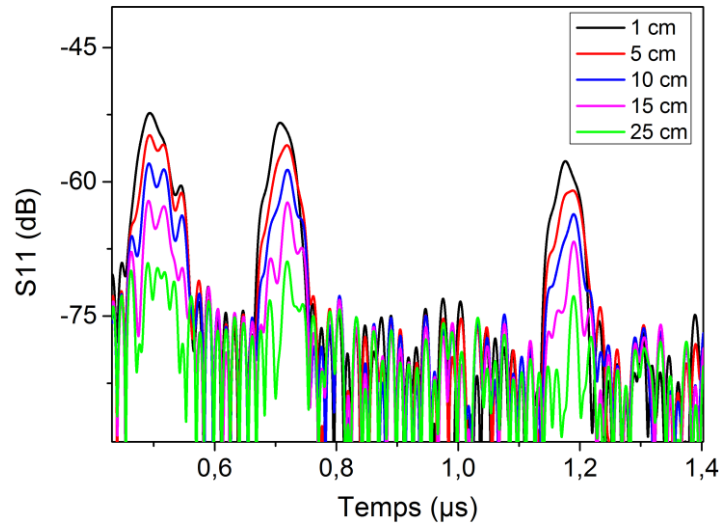


Figure 3. 27 : Interrogation sans fil du dispositif SAW en configuration IDTs connectés : représentation du coefficient de réflexion  $S_{11}$  dans le domaine temporel.

La structure ZnO/Ti en configuration IDTs connectés présente des propriétés très intéressantes, en plus d'être interrogeable sans fil à des distances allant jusqu'à 25 cm, même si la qualité des signaux sans fil doit encore être améliorée.

Notons que la méthode utilisée pour l'interrogation à distance et utilisant un analyseur de réseau a le mérite d'être simple à mettre en œuvre, mais ne permet pas d'interrogation en conditions optimales. En effet, le signal généré par l'analyseur de réseau est émis en continu, les réflexions sur les différents obstacles constituent un bruit s'ajoutant au signal provenant du dispositif SAW. Des méthodes plus adaptées permettront de réduire le niveau du bruit, améliorer la qualité du signal provenant du SAW et donc augmenter la distance d'interrogation. Cette distance pourra également être améliorée par la conception d'antennes à plus fort gain.

Une méthode alternative d'interrogation sera présentée dans la section suivante.

### III.C.4. Optimisation du signal de la structure IDTs connectés

L'amélioration de l'amplitude du signal est un facteur clé dans le développement des structures, en effet un signal optimisé implique de faibles pertes de propagation et ainsi favorise l'augmentation de la distance d'interrogation lors des mesures sans fil, en plus, permet la mise en œuvre des structures permettant la réalisation de capteurs auto protégés (*packageless*) tel que la configuration WLAW. [147]

Dans cette sous-section, il est question d'améliorer l'amplitude du signal généré par les dispositifs SAW RFID en configuration IDTs connectés. L'optimisation de la durée d'impulsion du signal d'entrée fera principalement l'objet de cette étude. Des investigations sur le plan théorique et expérimental seront mises en œuvre. Le but étant d'appliquer cette technique d'optimisation sur toutes les structures SAW RFID, y compris celles réalisées sur substrat métallique.

### III.C.4.1. Optimisation théorique de la structure LN-Y128°

La durée du burst fréquentiel du signal d'interrogation appliquée à l'entrée de la structure est un paramètre important, car il a une influence considérable sur la qualité du signal à la réception et issus des différentes réflexions dans le dispositif. Le signal d'interrogation influe sur le signal rétrodiffusé dans la structure SAW qui présentera une amplitude plus ou moins optimale. Ainsi, dans cette méthode, il sera principalement question d'optimiser la durée du signal sinusoïdal d'interrogation à l'entrée de la structure, ce qui aura pour effet d'améliorer l'amplitude du signal à la réception.

La Figure 3.28 illustre le schéma de principe de l'interrogateur. De plus, les Figures 3.28a et 3.28b présentent respectivement les signaux à la sortie de l'oscilloscope lorsque la durée du burst du signal d'entrée est insuffisante et optimisée. On y observe clairement que le signal réfléchi présente une amplitude 15 fois plus grande dans le cas d'une durée du burst optimisée.

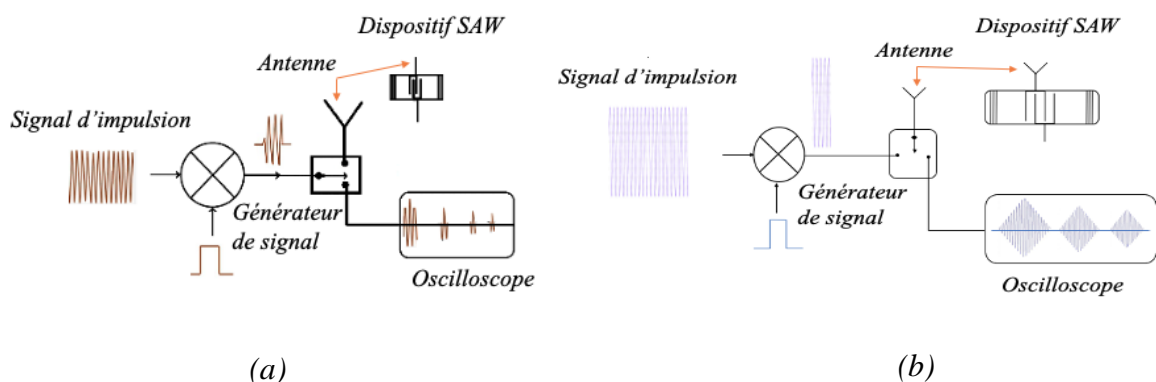


Figure 3. 28 : Schéma de principe du banc expérimental (a) signal à la sortie de l'oscilloscope avec une faible durée de la pulsation du signal d'entrée (b) signal à la sortie de l'oscilloscope avec une durée de la pulsation du signal d'entrée optimisé.

Dans la suite de cette partie, il sera question de démontrer de manière théorique l'importance d'optimiser le signal d'entrée pour améliorer l'amplitude du signal à la sortie. L'étude théorique

réalisée s'est faite suivant la géométrie illustrée dans la Figure 3.29a avec un modèle 2D de la structure à trois IDTs connectés sur LN-Y128, identique à la structure expérimentale. La simulation a été réalisée sur Comsol multiphysics suivant le domaine d'étude temporel. Un signal sinusoïdal périodique (Figure 3.29b) avec des formes de burst très proche de celles fournies par le générateur expérimental a été introduit à l'entrée de la structure. Comme illustré dans la Figure 3.30, on observe un déplacement particulière des ondes SAW dans le domaine temporel à des temps de (a) 0s, (b) 0,3 $\mu$ s et (c) 4,6  $\mu$ s. A 0s les ondes SAW sont générées au niveau de chaque paire d'IDTs et se propagent dans les deux sens du milieu (voir Figure 3.30a). A 0,3  $\mu$ s, l'onde élastique générée parcourt la distance de  $131\lambda$  et est reconverti en signal électrique au niveau de IDTs. Ce premier pic correspond à la génération de la première transmission directe de l'onde de surface (SAW1) (Figure 3.30b). A 4,6  $\mu$ s, l'onde élastique générée parcourt la distance de  $191\lambda$  et est reconverti en signal électrique au niveau de IDTs. Ce deuxième pic correspond à la seconde transmission directe de l'onde de surface (SAW2) (Figure 3.30c).

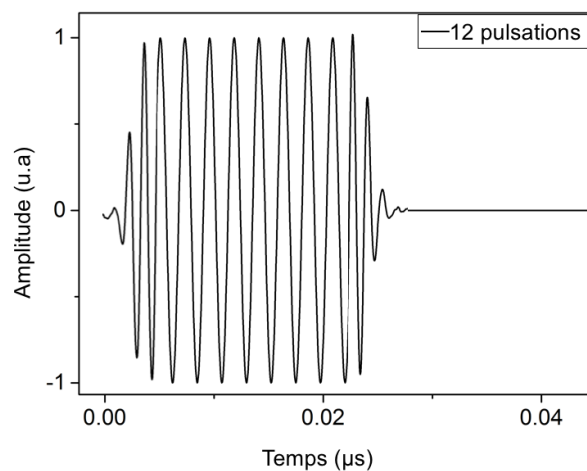
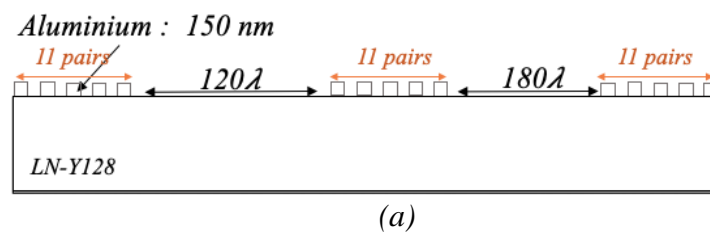


Figure 3. 29(a) Schéma 2D de la structure IDTs connectés sur LN-Y128 simulé, (b) signal d'impulsion périodique.

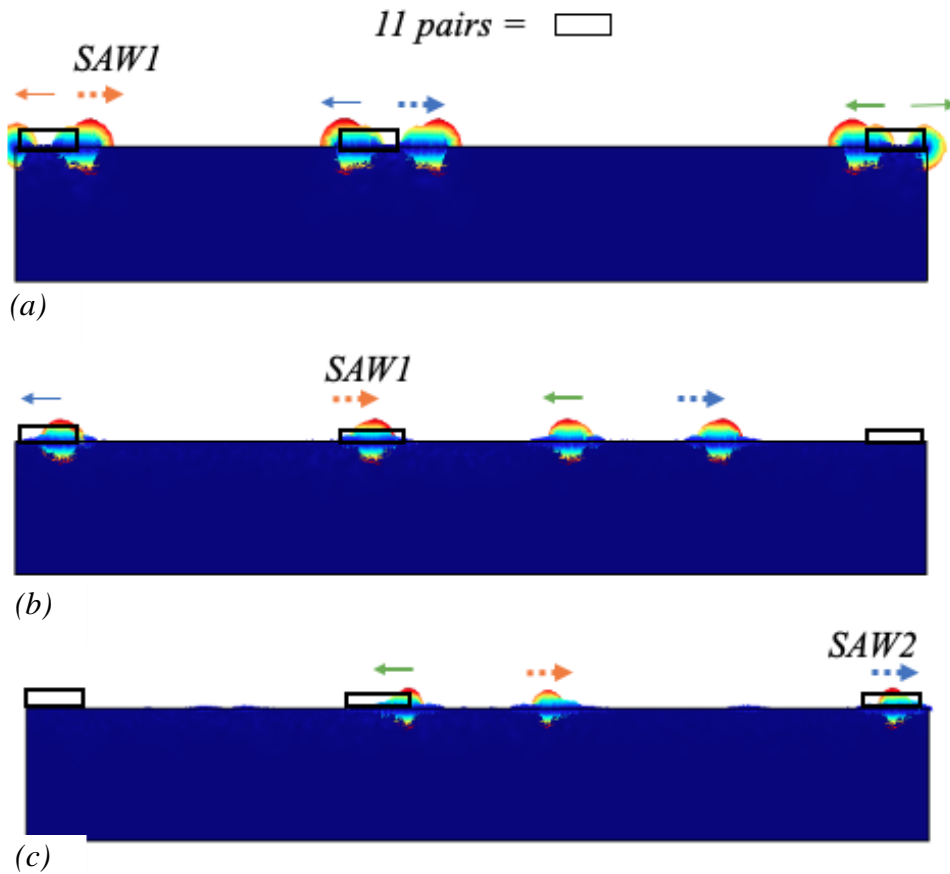


Figure 3. 30 : Déplacement des ondes acoustiques de surface dans le domaine temporel à des temps de (a) 0s, (b)  $0,3\mu\text{s}$  et (c)  $4,6\mu\text{s}$ .

La Figure 3.31 donne la réponse en amplitude du dispositif SAW dans le domaine temporel à des durées de pulsation de 8ns, 27ns et 46ns. Il est clairement observé qu'à mesure que l'on augmente la durée de pulsation du signal d'entrée, l'amplitude du signal de sortie augmente jusqu'à atteindre une durée optimale qui avoisine la valeur équivalente à onze fois la période correspondant aux 11 pairs d'IDTs de la structure. La durée équivalente à 11 pairs d'IDTs dans cette structure est de 27ns ( $27\text{ ns} = 11 \times T$  avec T la période du signal pseudo-sinusoïdal qui est donné par l'inverse de la fréquence de résonance qui est de 433 MHz dans notre cas), au-delà de cette valeur l'amplitude du signal de sortie reste pratiquement la même. Il est aussi clair qu'augmenter la durée du burst a pour conséquence d'élargir la durée des pics, ce qui les rend difficilement détectables et limite également le nombre de pics et donc de codes différents.

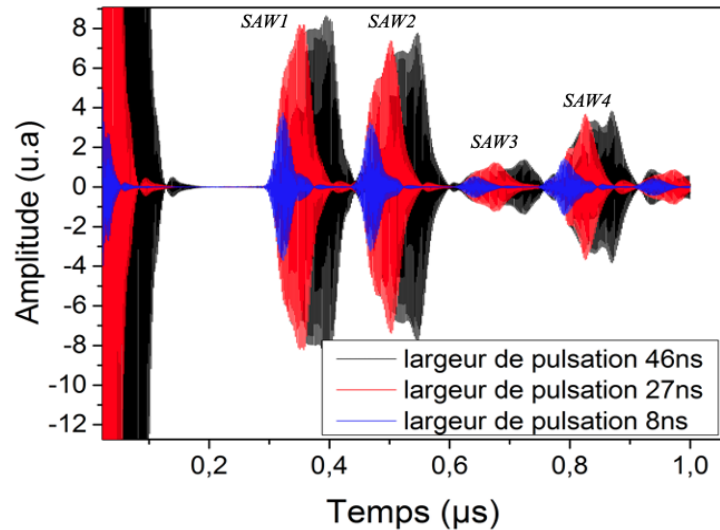


Figure 3. 31 : Réponse en amplitude théorique du dispositif SAW dans le domaine temporel à des durées du burst de 8ns, 27ns et 46ns.

### III.C.4.2. Étude expérimentale et optimisation des structures LN-Y128° et ZnO/Ti en configuration IDTs connectés

L'étude expérimentale a été réalisée en utilisant le banc expérimental montré dans la Figure 3.32 (illustration schématique, voir Figure 3.28). Cette installation contient un oscilloscope numérique avec une bande passante de 6 GHz, un générateur d'impulsions réglable, un générateur de fréquence RF, une alimentation continue (DC), un amplificateur de puissance RF, une station sous-pointe avec une pointe GS connectée à l'oscilloscope. Le générateur de fréquence permet d'imposer la fréquence du signal d'interrogation en l'adaptant à la fréquence du dispositif SAW. Ce générateur permet également de fournir un signal modulé en amplitude dont le modulant sera le signal impulsionnel qui permettra donc d'ajuster la durée du burst et sa périodicité.

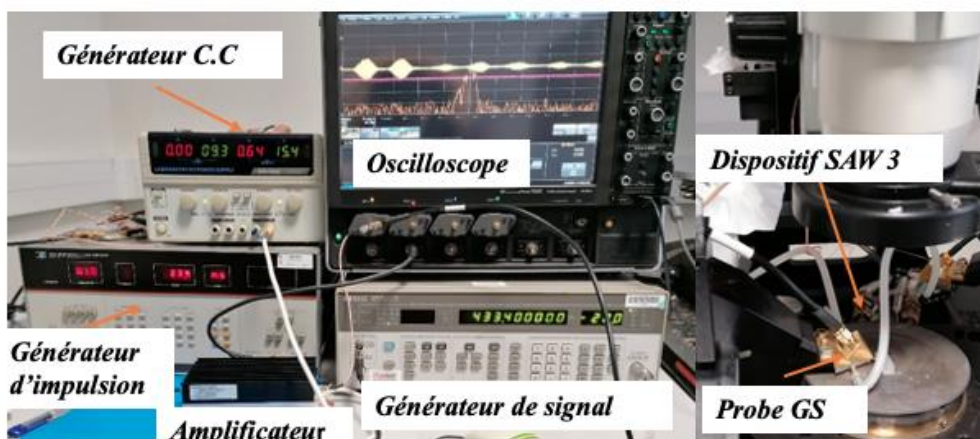
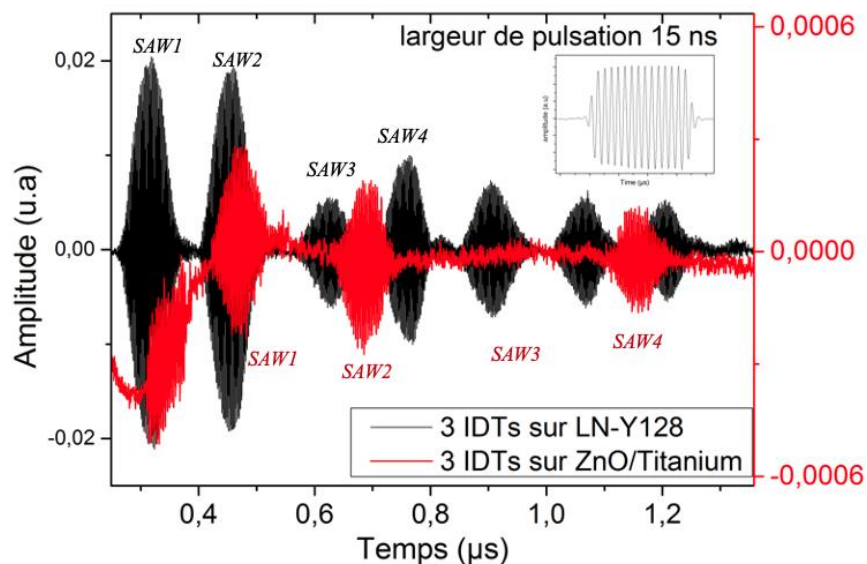


Figure 3. 32 : Banc expérimental utilisé pour l'amélioration de l'amplitude du signal de sortie de la structure IDTs connectés.

Les tests expérimentaux ont été réalisés sur les structures LN-Y128 et ZnO/Ti, la fréquence porteuse fournie par le générateur RF a été fixée respectivement à 433 MHz et 283 MHz pour la structure LN-Y128 et ZnO/Ti. Dans un premier temps, la Figure 3.33a montre les signaux des deux structures extraites de l'oscilloscope avec une durée de durée d'impulsion autour de 15ns soit 7 fois la période pour la structure LN-Y128 et 5 fois celle de la structure ZnO/Ti. Dans un deuxième temps, la Figure 3.33b présente les signaux de sortie avec une durée de pulsation autour de 27 et de 38 ns soit 11 fois la période de la structure LN-Y128 et ZnO/Ti respectivement. Le rapport de l'amplitude des SAW observé entre les deux graphes est approximativement de 15 et de 17 pour la structure sur LN-Y128 et ZnO/Ti respectivement. Ces résultats permettent de mettre en évidence l'utilité de l'optimisation de la durée du burst du signal d'entrée, et ce, pour augmenter l'amplitude du signal à la sortie de la structure à IDTs connectés.

Cette étude est très importante, car elle met en exergue la prise en compte d'un facteur autre que les propriétés piézoélectriques du substrat et de la configuration des électrodes interdigitées pour l'optimisation de l'amplitude dans une structure : la qualité de l'équipement et de la méthode d'interrogation sont également cruciaux.



(a)

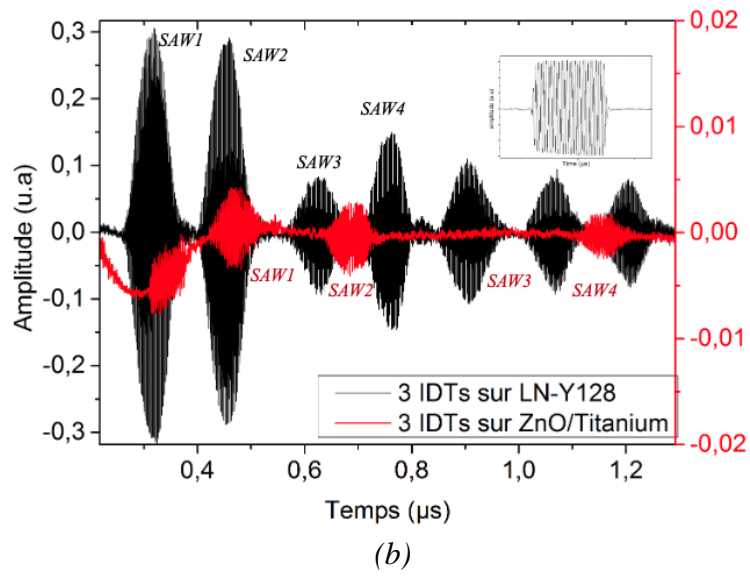


Figure 3. 33 : Réponse en amplitude expérimental du dispositif SAW dans le domaine temporel à des durées du burst de (a) 15ns, (b) 27ns et 38ns pour les structures LN-Y128 et ZnO/Ti.

Dans ce chapitre, il était question de développer des capteurs SAW intégrant un code d'identification RF sur pièce métallique en configuration ligne à retard. Une structure ID-Tag de type « IDT connectés » présentant de forts niveaux de signaux a été réalisée, caractérisée électriquement, en température, en déformation et en configuration sans-fil. De plus, une étude sur l'optimisation du signal d'interrogation pour optimiser la durée et l'amplitude du signal de sortie de la structure a été mise en évidence.

Dans un premier temps, une brève présentation des différentes technologies d'identification a été donnée, notamment les systèmes RFID. Grâce à la technologie SAW, dans des configurations de type ligne à retard munies d'un code physiquement réalisé sur le dispositif, il devient possible de combiner les fonctionnalités d'identification avec la mesure de grandeurs physiques telles que la température, la déformation ou l'humidité. Ainsi, des systèmes de mesure multi-capteurs sont rendus possibles.

Par la suite, une structure ligne à retard présentant trois IDTs électriquement connectés sur ZnO/Ti a été étudiée. Cette configuration, dont les travaux réalisés par [145] ont montré qu'elle améliorait le niveau des signaux par rapport aux lignes à retard réfléchives « classiques » été utilisée pour optimiser les signaux sur ZnO/Ti. En effet, les structures ZnO/métal industriel présentent un coefficient de couplage électromécanique modéré pour les ondes Rayleigh et surtout des pertes élastiques pouvant être très importantes.

Une des grandes étapes de cette étude consistait à la réalisation expérimentale de la structure sur pièce métallique de titane utilisé dans l'industrie. Un dépôt par pulvérisation cathodique de 12  $\mu\text{m}$  de la couche de ZnO a été réalisé sur le titane dans le but de conserver la majeure partie de l'énergie dans la couche piézoélectrique lorsque  $\lambda=9,2 \mu\text{m}$ . Les caractérisations électriques ont permis d'observer l'existence de deux types d'ondes, à savoir les ondes élastiques de surface (SAW) et les ondes longitudinales de volume, qui n'étaient pas apparus en configuration résonateur.

Dans un second temps, l'évaluation de la sensibilité de la structure en température et en déformation a été faite par l'application de ces deux mesurandes sur le dispositif. Pour l'onde SAW, des sensibilités respectives en température, flexion trois points et traction de  $-43 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ ,

2,2 ppm/ $\mu\epsilon$  et 0,42 ppm/ $\mu\epsilon$  ont été mesurées. Pour l'onde de volume, des sensibilités respectives en température et flexion trois points de -121 ppm/ $^{\circ}\text{C}$  et 0,02 ppm/ $\mu\epsilon$  ont été mesurées. Au vu de ces valeurs (faible sensibilité en flexion pour l'onde de volume et fort TCF, forte sensibilité à la déformation de l'onde de surface), la structure ZnO/Ti en configuration IDTs connectés apparaît comme étant un candidat très prometteur dans le cadre de la réalisation d'un capteur multi sensoriel en température et en déformation, car l'onde de volume pourra servir de capteur de température de référence. Enfin, une interrogation sans fil de la structure ZnO/ Ti a été réalisée. Celle-ci montre une détection du signal temporel à des distances allant jusqu'à 25 cm.

Enfin, une étude sur l'amélioration de l'amplitude du signal à la sortie de la structure a été réalisée. Celle-ci a montré que l'optimisation de la durée de l'impulsion (burst) du signal d'interrogation avait pour effet d'améliorer l'amplitude du signal à la sortie jusqu'à une certaine limite, ce qui permettra in fine d'augmenter la distance d'interrogation sans fil du dispositif.

Rappelons qu'à ce stade, la réalisation des dispositifs SAW sur pièces métalliques a été démontrée par l'intermédiaire de la structure ZnO/Ti. Il a été observé de très bonnes propriétés de la structure aussi bien en configuration résonateur qu'en configuration ligne à retard. En effet, la structure ZnO/Ti présente de très bonnes sensibilités en température et en déformation en plus d'être interrogeable à distance. Ses caractéristiques font de ce dispositif un candidat très intéressant dans des applications diverses dont la surveillance de santé de structure.

Dans le chapitre suivant, le champ d'étude de ce type de capteurs à ondes élastiques directement intégrés sur substrats métalliques sera étendu aux capteurs de champ magnétique, un domaine particulièrement important industriel et porteur scientifiquement.



## Chapitre IV

### Capteur SAW de champ magnétique (MSAW) sur substrat métallique magnétoélastique

---

---

*Les capteurs de champ magnétique sont largement exploités dans de nombreux domaines en industrie, navigation, automobile, aéronautique et biomédical. Parmi une grande variété de capteurs, les capteurs SAW de champ magnétique, abrégés MSAW, sont susceptibles d'apporter un grand nombre d'avantages, à savoir qu'ils sont robustes, de petite taille, sans batterie et sans fil. Ils exploitent généralement une couche magnétoélastique, dont -comme son nom l'indique- les propriétés élastiques peuvent varier fortement sous l'effet du champ magnétique, et ainsi créer un changement de vitesse pour une onde élastique de surface se propageant dans le matériau.*

*Dans ce chapitre, il est question de développer un nouveau capteur champ magnétique (MSAW) sur substrat métallique magnétoélastique dans le but d'améliorer la sensibilité au champ magnétique des dispositifs SAW existants. L'étude proposée est novatrice dans le sens où les capteurs MSAW de la littérature exploitent tous des couches minces magnétoélastiques et non des substrats, et est particulièrement complémentaire des travaux présentés aux chapitres précédents. Nous scinderons ce chapitre en trois parties :*

*Dans la première partie, il sera question de procéder à une introduction non exhaustive des capteurs magnétiques existants et leurs applications. Par la suite, une présentation de la technologie MSAW et de son principe de fonctionnement sera mise en exergue, en plus d'une étude bibliographique de quelques capteurs MSAW. Enfin, il sera question dans la dernière partie de procéder au développement des capteurs MSAW sur substrat métallique magnétoélastique. Le but de cette structure est d'améliorer la sensibilité au champ magnétique par l'augmentation l'épaisseur du matériau sensible par rapport à la longueur d'onde. Les*

*substrats tels que le Nickel et le Metglas (Fe-Si-B) 1K101 (métal amorphe magnétoélastique) seront utilisés. La structure sur métal à base de ZnO/Nickel sera étudiée dans un premier temps, et sera par la suite améliorée par la structure ZnO/Metglas, qui présente une bien meilleure sensibilité au champ.*

## IV.A. Capteurs de champ magnétique

### IV.A.1. Introduction

Le développement des capteurs pour la détection de champ magnétique a ouvert un large champ d'application dans des domaines divers et variés. En effet, ceux-ci trouvent leur intérêt dans des applications telles que le codage de position et d'angle, l'imagerie magnétique (IRM pour imagerie de résonance magnétique, voir Figure 4.1a), le contrôle de positionnement (à l'exemple du contrôle du trafic, voir Figure 4.1b). De plus, le potentiel de mesure/détection à distance du courant, par exemple pour les lignes haute tension, font d'eux des dispositifs très intéressants et attrayants.

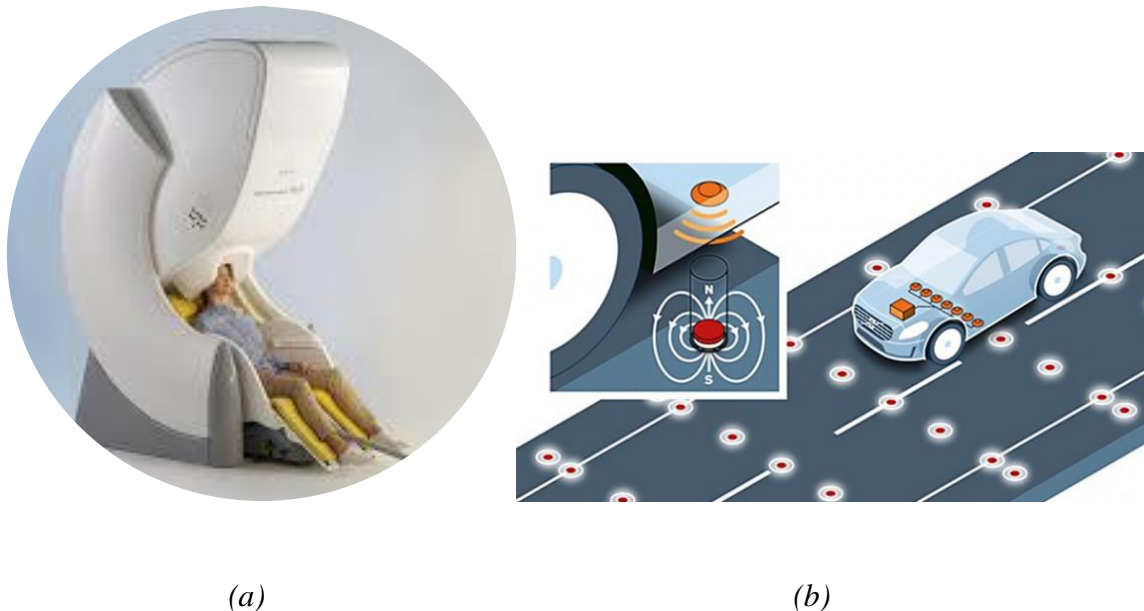


Figure 4. 1 : (a) Cartographie du cerveau par MEG (magnétoencéphalographie) (b) contrôle du trafic [148].

Les capteurs de champ magnétique peuvent être regroupés suivant trois catégories selon la sensibilité et l'intervalle de détection de l'intensité du champ magnétique. On peut citer :

- Les capteurs pour la détection de champs magnétiques élevés : ceux-ci concernent des champs magnétiques dont l'intensité est plus élevée que celle du champ géomagnétique (i.e.  $B > 1\text{mT}$ ).

- Les capteurs pour les champs magnétiques de moyenne intensité : ils permettent de réaliser des mesures dans une plage basée sur la direction du champ magnétique terrestre ( $50 \mu\text{T}$ ), à savoir que le champ magnétique évalué par ces capteurs est situé autour de  $0,1$  et  $10\mu\text{T}$ .
- Les capteurs pour champs magnétiques faibles : ceux-ci permettent de réaliser des mesures des gradients de champs magnétiques induits ou des moments dipolaires. Il s'agit donc des capteurs magnétiques les plus sensibles avec des sensibilités pouvant atteindre le pico-Tesla, voire moins, et une gamme de mesures allant du pico-Tesla au micro-Tesla. Les applications de ces capteurs sont nombreuses, à savoir la biomédicale (cartographie neuronale du cerveau par magnétoencéphalographie (MEG), la magnéto cardiographie (MCG), etc.), l'imagerie et la détection d'anomalies magnétiques.

#### **IV.A.2. Exemples de capteurs de champ magnétique**

La diversification des études menées dans diverses applications à travers l'utilisation du champ magnétique a permis aux capteurs magnétiques de se développer et leur nombre jusqu'à ce jour connaît une croissance exponentielle. Les propriétés telles que la résolution, la sensibilité, le coût et la plage de mesure permettent de les différencier. La variété des capteurs de champ magnétique existants comprend les capteurs suivants :

- Les capteurs de champ magnétiques inductifs : ce sont des bobines de différentes formes géométriques (plates ou solénoïdes) et la plupart de temps, ils sont constitués d'un noyau ferromagnétique généralement placé au centre de la bobine dans le but est de concentrer le champ et d'augmenter la sensibilité. Ils utilisent l'effet d'induction afin de transformer le champ magnétique qui les traverse en tension par la loi de Lenz-Faraday [149]. Les capteurs à effet d'induction restent encore très intéressants grâce à leur robustesse et leur précision, toutefois, ils sont limités par l'induction et la résistance de la bobine. On les retrouve dans les applications comme : servos hydrauliques dans les systèmes de commande aérospatiaux (ailerons, moteur et carburant), les capteurs de détections de défauts dans des structures mécaniques et des capteurs de pression.
- Le capteur de champ magnétique à effet Hall. L'effet Hall consiste à la création d'une différence de tension sur une fine plaque conductrice ou semi-conducteur exposée à un champ magnétique hors du plan et traversée par un courant suivant sa longueur (voir Figure 4.2). Plus précisément, la tension de Hall est générée par le déplacement des

électrons à travers le champ magnétique et subissant la force de Lorentz. Le capteur Hall est très sensible, bon marché en plus d'être très solide (grande résistance mécanique et insensible à l'environnement). Ce capteur est adapté pour mesurer des champs magnétiques dont l'intensité est comprise entre  $10^{-3}$  et  $10^{-1}$ T. Son utilisation couvre diverses applications dont l'automobile, l'aéronautique, la mécanique de précision.

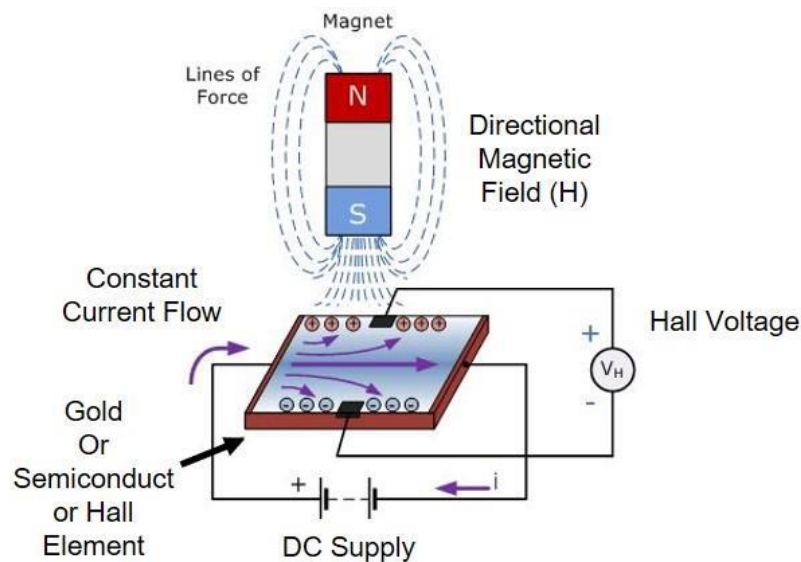


Figure 4. 2 : – Principe de fonction du capteur à effet Hall [150]

- Les capteurs de champ magnétique à magnéto résistifs : Ce sont généralement des alliages mixtes de constituants à l'exemple du Nickel, cuivre, Fer et or. Ils sont caractérisés par la variation de la résistance électrique de l'alliage ferromagnétique lors de l'application d'un champ magnétique externe. Ils se caractérisent par le fait d'être ultrasensibles par la détection des valeurs de champ magnétique de l'ordre du mT. Ces capteurs disposent de nombreux avantages à savoir qu'ils sont très petits, robustes, économiques. Ils disposent d'un vaste domaine d'applications à l'exemple de la mesure des distances et des angles, la détermination de faibles champs magnétiques, la mesure du courant et bien d'autres.
- Les capteurs champ magnétique à magnétorésistance géante (GMR) : l'effet GMR a été découvert à la fin des années 1980 par deux prix Nobel européens [151]. Leur principe de fonctionnement se base sur le déplacement de spin d'électrons qui varie en vitesse

en fonction de l'orientation de l'aimantation et du fait que la conductivité d'un matériau est liée à la vitesse des électrons qui la traversent [152]. En effet, un capteur GMR est généralement constitué d'un empilement de deux couches ferromagnétiques (la particularité de certains matériaux de s'aimanter sous l'effet d'un champ magnétique à l'exemple du Fer) prenant en sandwich une couche d'un matériau conducteur non magnétique (à l'exemple du chrome). Ces couches sont très fines, soit de l'ordre de quelques nanomètres. Sous l'influence d'un champ magnétique, l'orientation de l'une des deux couches ferromagnétiques est forcée et l'autre couche dispose d'une aimantation variable en fonction du champ comme on peut le voir dans la Figure 4.3.

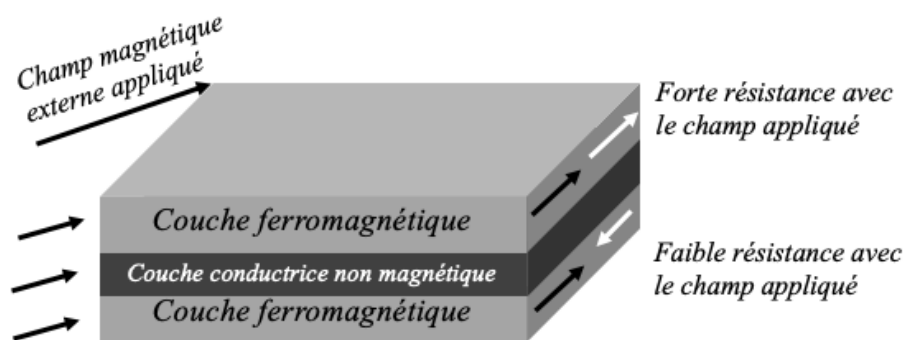


Figure 4. 3 : Principe de fonctionnement d'un capteur basé sur la magnétorésistance géante

Sous la présence d'un champ magnétique, la couche ferromagnétique à aimantation variable a une aimantation qui soit s'aligne au champ appliqué ou s'aligne parallèlement à l'aimantation de la couche à aimantation fixe. Lorsque les couches sont magnétisées dans le même sens que le moment magnétique extérieure, la résistance de passage du courant est plus faible que lorsque la magnétisation est orientée alternativement dans un sens et dans l'autre. En d'autres termes, la résistance du courant dans les couches conductrices est fonction du nombre de collisions subies par les porteurs de charges dans les métaux. Les capteurs magnétiques à GMR offrent une variation de résistance plus importante, de l'ordre de 50%, à comparer à ceux à magnétorésistance. Ils ont permis de mettre en œuvre la mesure d'infimes variations d'intensité de champs magnétiques, ce qui a favorisé des applications pratiques dans les technologies de l'enregistrement et de lecteur magnétique d'information sur des disques durs.

Le tableau IV.1 présente les autres types de capteurs de champs magnétiques commercialisés et quelques propriétés qui les constituent, cette liste étant bien sûr non-exhaustive [153].

Tableau IV. 1 : Tableau de capteurs champ magnétique existant dans le marché [153].

| Type                                 | Type de matériaux | Délectivité                | Amplitude du champ   | Application                  |
|--------------------------------------|-------------------|----------------------------|----------------------|------------------------------|
| Magnétorésistance tunnel             | Film mince        | 0,1 nT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ | $10^{-9} - 10^{-3}$  | Têtes de lecture             |
| Magnéto-optique (MO)                 | Discret           | 1 pT/ $\sqrt{\text{Hz}}$   | $10^{-3} - 10^2$     | Imagerie                     |
| Magnétorésistance (AMR)              | Film mince        | 1 nT/ $\sqrt{\text{Hz}}$   | $10^{-9} - 10^{-3}$  | Capteur de courant, boussole |
| Résonance Magnétique Nucléaire (RMN) | Massif            | 1 nT/ $\sqrt{\text{Hz}}$   | $10^{-10} - 10$      | Référence du champ, IRM      |
| Fluxgates                            | Massif            | 10 pT/ $\sqrt{\text{Hz}}$  | $10^{-10} - 10^{-3}$ | Magnétométrie terrestre      |
| SQUID (Bas Tc)                       | Film mince        | 2 fT/ $\sqrt{\text{Hz}}$   | $10^{-13} - 10^{-3}$ | MCG, MEG, IRM très bas Champ |
| SQUID (Haut Tc)                      | Film mince        | 30 fT/ $\sqrt{\text{Hz}}$  | $10^{-13} - 10^{-2}$ | Imagerie                     |
| Magnétomètres Atomiques              | Massif            | 3 fT/ $\sqrt{\text{Hz}}$   | $10^{-15} - 10^{-9}$ | MCG, MEG, IRM très bas Champ |

## **IV.B. Capteur de champ magnétique à SAW (MSAW)**

Le domaine d'étude du champ magnétique est en constante évolution et dans ce milieu les dispositifs à ondes acoustiques de surface ont apporté une contribution notable. Les capteurs MSAW sont largement étudiés, toutefois, ils réservent encore un énorme potentiel, car en plus d'être passifs, ils sont interrogeables à distance, ce qui constitue des atouts très intéressants. Les domaines applicatifs visés sont nombreux :

- La détection de la circulation des véhicules le long d'une voie balisée pour la surveillance de leur nombre et de leur vitesse.
- En surveillance de santé des structures par la variation du champ magnétique des tuyaux ferromagnétiques dû aux perturbations localisées. Cela favorisera le suivi à long terme des structures métalliques comme des ponts ou des bâtiments.
- Dans le domaine du biomédical, on retrouve des capteurs champs magnétiques basses fréquence pour les dispositifs implantables dans le corps humain.
- Pour le développement d'une biopuce microfluidique (« lab-on-chip ») à base de capteurs GMR, pouvant détecter individuellement et de façon efficace des cibles biologiques marquées magnétiquement.
- Dans l'industrie automobile, ils peuvent être utilisés pour des applications diverses à savoir la mesure du courant et de la vitesse des roues dans les véhicules.

### **IV.B.1. Généralités sur les capteurs MSAW.**

#### **IV.B.1.1. Capteurs MSAW : configurations.**

La conception des capteurs MSAW se fait généralement suivant deux principales configurations, à savoir les configurations résonateur et ligne à retard. Dans la configuration résonateur, le matériau magnétoélastique peut être utilisé comme électrodes interdigitées [154] (Figure 4.4a) ou une couche déposée sur la structure SAW [155] (Figure 4.4b). Dans la configuration ligne à retard (Figure 4.4c) ou RD-L (2 ports), le matériau magnétoélastique peut être déposé en fine couche sur le chemin de parcours de l'onde élastique de surface [156], ou sous forme de couche qui recouvre tout le dispositif, y compris les électrodes IDTs [157] (Figure 4.4d). La Figure 4.4e illustre un autre exemple de capteurs MSAW en configuration ligne à retard dans lequel, les électrodes de sortie sont combinées avec une magnétoimpédance géante (SAW GMI pour Giant-Magneto-impédance [158]). Le tableau IV-2 présente une liste non exhaustive de variétés de configuration de capteurs MSAW de la littérature.

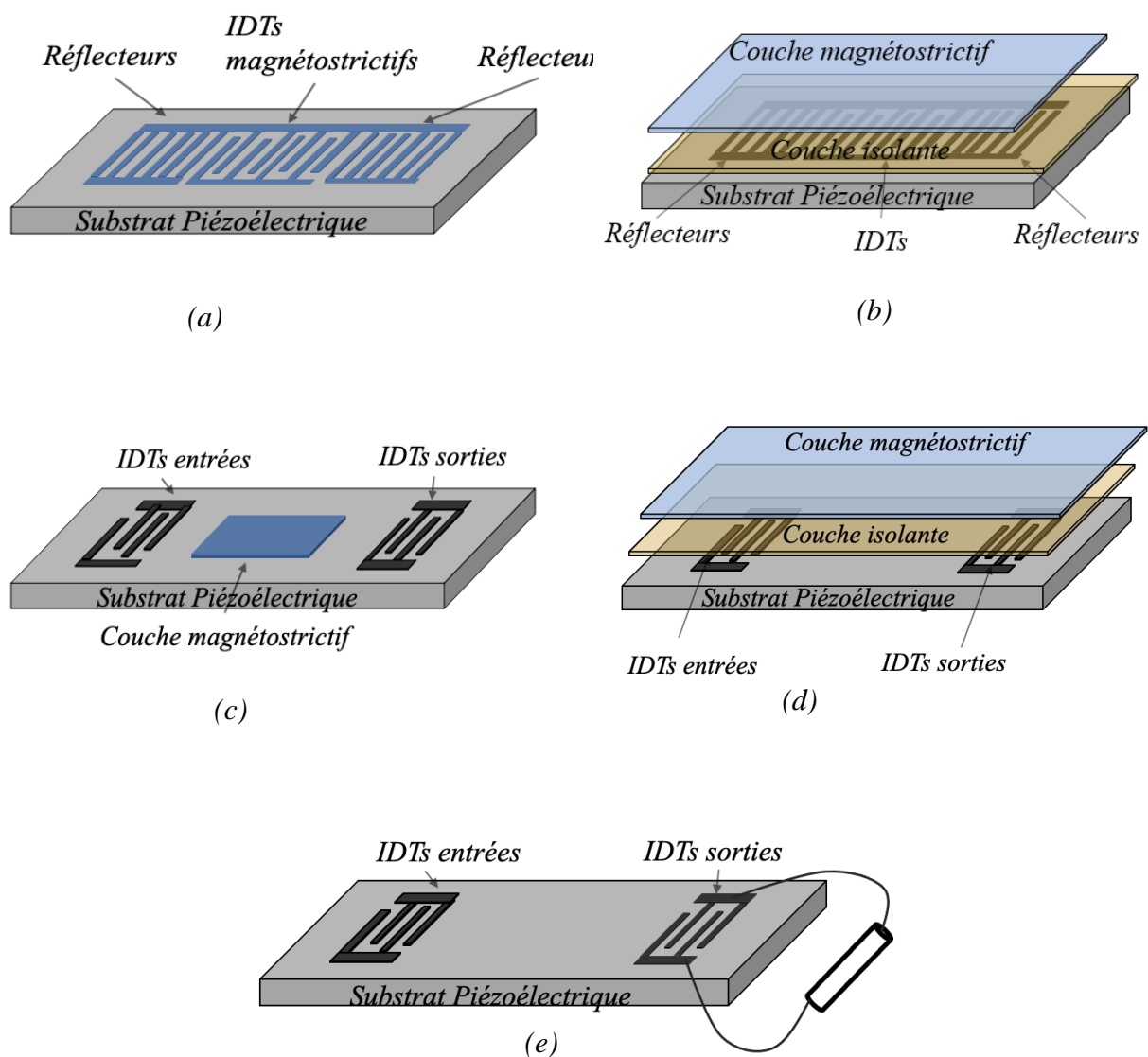


Figure 4. 4 : Structure d'un capteur MSAW. Configuration résonateur (a) classique et (b) structure multicouche. Configuration ligne à retard (c) structure classique, (d) structure multicouche et GMI.

Tableau IV. 2 : Tableau de capteurs champ magnétique de la littérature

| Structure                         | Configuration MSAW | Couche sensible              | Reference |
|-----------------------------------|--------------------|------------------------------|-----------|
| Quartz (ST-90X)                   | Résonateur SAW     | Ni                           | [154]     |
| LiNbO <sub>3</sub> (128Y-X) + ZnO | Résonateur SAW     | 25×[TbCo <sub>2</sub> /FeCo] | [159]     |
| Quartz (ST-90X) + ZnO             | Résonance SAW      | CoFeB                        | [155]     |
| LiNbO <sub>3</sub> (128° Y-X)     | Ligne à retard SAW | FeCo                         | [160]     |

|  |                    |                        |       |
|--|--------------------|------------------------|-------|
| LiNbO <sub>3</sub> (Y cut)               | Ligne à retard SAW | FeCo/TbCo <sub>2</sub> | [156] |
| ST-cut Quartz + SiO <sub>2</sub>         | Ligne à retard SAW | FeCoSiB                | [161] |
| Quartz (ST-90X) + ZnO + SiO <sub>2</sub> | Résonateur SAW     | CoFeB                  | [162] |
| ZnO on FeCoSiB                           | Résonateur SAW     | FeCoSiB                | [163] |

#### IV.B.1.2. Principe de fonctionnement

Pour comprendre le fonctionnement des capteurs magnétiques SAW, nous considérons le cas d'un résonateur SAW réalisé avec un substrat piézoélectrique avec des électrodes interdigitées (IDTs) en matériau magnétoélastique (voir la Figure 4.5a). La couche piézoélectrique permet la propagation de l'onde acoustique de surface et les électrodes magnétoélastiques (sensibles au champ magnétique) permettent quant à eux d'appliquer un champ électrique qui par le principe de la piézoélectrique inverse génère l'onde mécanique et inversement. De plus, le fait que les électrodes soient magnétoélastiques permet à ceux-ci de servir à la fois de générateur de l'onde élastique, mais aussi de matériau sensible au champ magnétique externe.

En présence d'un champ magnétique, les domaines magnétiques au sein du matériau magnétoélastique se réorientent, entraînent un changement des paramètres élastiques, ce qui est appelé effet de manière simplifiée effet  $\Delta E/\Delta G$ . Ainsi, la vitesse de propagation de l'onde élastique de surface est modifiée, ce qui entraîne un décalage de fréquentiel [154], [163], [164].

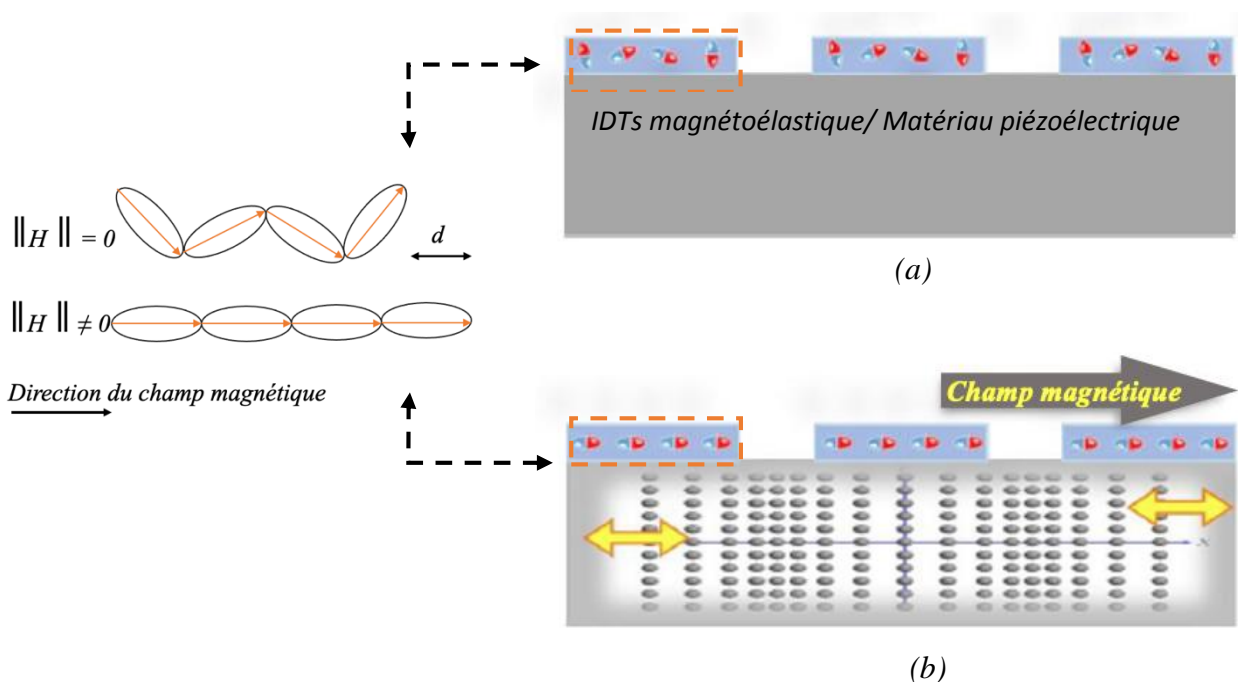


Figure 4. 5 : (a) Schéma du résonateur SAW avec IDTs magnétoélastiques, (b) Comportement du résonateur sous l'influence d'un champ magnétique [150]

L'équation mentionnée ci-dessous permet de mettre en relation la vitesse de propagation de l'onde acoustique et de l'effet  $\Delta E$  dans le cas de [163].

$$v = \left[ E \cdot (1 - K_{33}^2) \frac{1}{\rho} \right]^2 \quad (4.1)$$

Avec : E le module de Young,  $\rho$  la densité et  $K_{33}$  le coefficient de couplage magnéto-élastique du matériau.

La Figure 4.6 illustre le comportement du changement de vitesse, du facteur de couplage magnéto-élastique ( $K^2$ ) et de l'effet  $\Delta E$  en fonction du champ magnétique appliqué dans le cas d'une onde longitudinale.

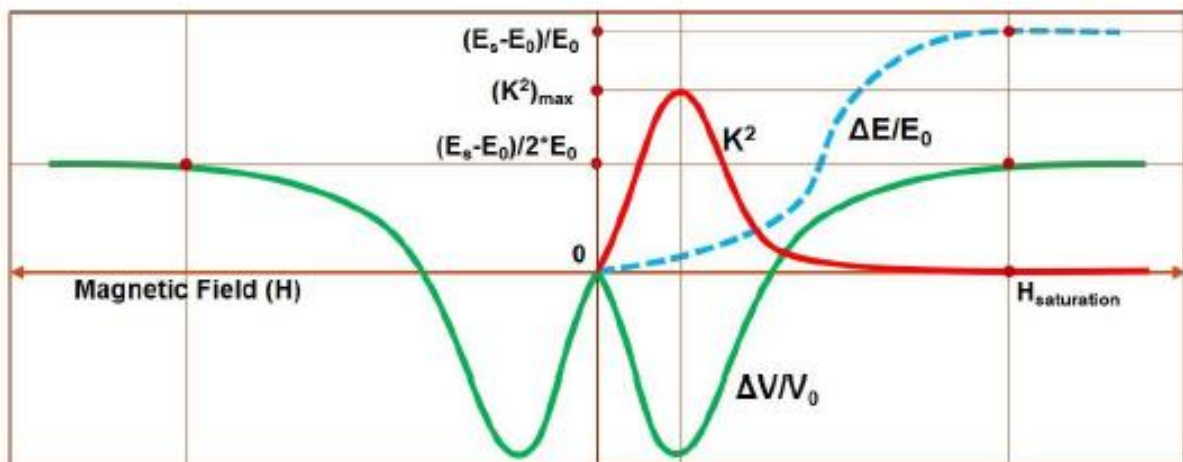


Figure 4. 6 : Courbe représentative de l'évolution de l'effet  $\Delta E$ , de la vitesse  $v$  et facteur de couplage magnéto-élastique  $K^2$  pour une onde longitudinale [150]

#### IV.B.1.4. Capteurs MSAW : synthèse bibliographique

Dans cette partie, il sera question de procéder à une présentation succincte de quelques capteurs MSAW de configurations diverses réalisés.

La recherche de l'amélioration de la sensibilité au champ magnétique des capteurs MSAW a motivé le développement de nombreux capteurs. Ces recherches ont par la suite été valorisées dans plusieurs publications dans lesquelles on retrouve :

- **Kadota et al.** [165] dans ces travaux ont présenté, un capteur MSAW en configuration résonateur avec des électrodes magnétoélastiques. Le nickel a été utilisé pour la réalisation des IDTs sur un substrat de quartz ST X+90°. La figure 4.7, illustre la configuration utilisée dans cette structure. Cette structure a révélé une sensibilité au champ de 2.2 ppm/mT à la fréquence de 315 MHz.

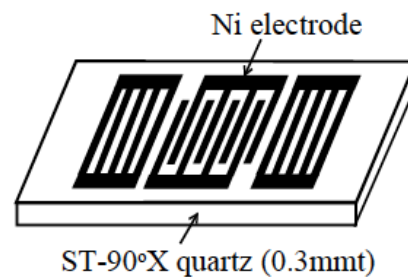


Figure 4. 7 : Schéma d'un résonateur un port MSAW[20].

- **H. Mishra et al.** [155] ont procédé à l'étude d'un résonateur multicouche MSAW. La structure CoFeB/ZnO/IDT/Quartz ST x+90° comme illustré dans la Figure 4.8 a été réalisé. Ces recherches se sont focalisées sur deux principaux objectifs, à savoir l'amélioration de la sensibilité des capteurs MSAW et la compensation en température de la structure (insensibilité aux effets thermiques).

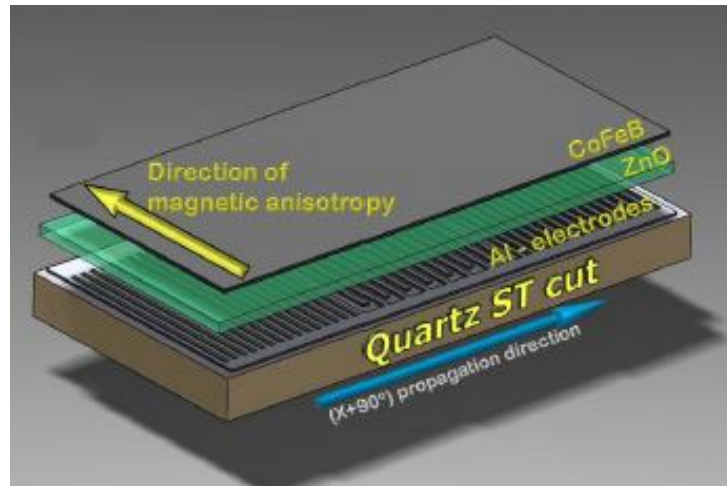


Figure 4. 8 : Schéma du résonateur MSAW multicouche [155].

Les recherches de Kittmann *et al.* [161] ont montré que les capteurs à ondes de Love présentent une sensibilité beaucoup plus élevée aux champs magnétiques. De ce fait, l'onde de cisaillement horizontal (déplacement transversal dans le plan) est principalement l'objet d'étude dans cette structure. Le but étant ici, que l'interaction entre les moments magnétiques (suivant l'orientation de l'anisotropie magnétique de la couche de CoFeB compris dans le plan) et l'onde acoustique (transversale dans le plan) soit très forte. De plus, la température est une contrainte qui peut être très gênante dans l'évaluation précise de la sensibilité au champ magnétique d'un capteur. Concevoir une structure compensée en température, c'est-à-dire avec un coefficient de température de fréquence (TCF) nul, est un critère très important.

La structure multicouche formée d'un empilement avec des épaisseurs bien spécifiques des matériaux présentant des TCF positif et négatif a été réalisée afin de permettre une structure compensée en température (TCF proche 0). L'évaluation de la sensibilité de la sensibilité s'est faite suivant la direction de propagation de l'onde élastique et celle-ci, montre une sensibilité au champ magnétique de 35,21 ppm/mT soit 15,53 MHz/T.

- **Y. Yang *et al.*** [162][166] ont dans leurs travaux procédé à l'optimisation de la sensibilité magnétique de la structure CoFeB/ZnO/IDT/Quartz ST  $x+90^\circ$  [155]. L'un des inconvénients de la structure [155] est l'isolation entre la couche magnétostrictive et les électrodes interdigitées (IDTs). En effet, une mauvaise isolation crée énormément de pertes. La structure CoFeB/SiO<sub>2</sub>/ZnO/Quartz ST- $X+90^\circ$  développée par Y. Yang *et al.* [166] a permis d'apporter quelques éléments d'optimisation à la structure précédente. Dans cette structure, en plus de la couche de ZnO, une couche de dioxyde de silicium

(SiO<sub>2</sub>) a été ajoutée entre les couches de ZnO et de CoFeB. Ce qui a permis d'augmenter l'épaisseur et la qualité de la zone d'isolation. De plus, la couche de SiO<sub>2</sub> est un meilleur isolant que la couche de ZnO en plus d'avoir un TCF positif, ce qui favorise une compensation en température de la structure tout en améliorant la qualité du signal. La Figure 4.9 donne une illustration schématique de la structure CoFeB/SiO<sub>2</sub>/ZnO/Quartz ST-X+90° étudiée.

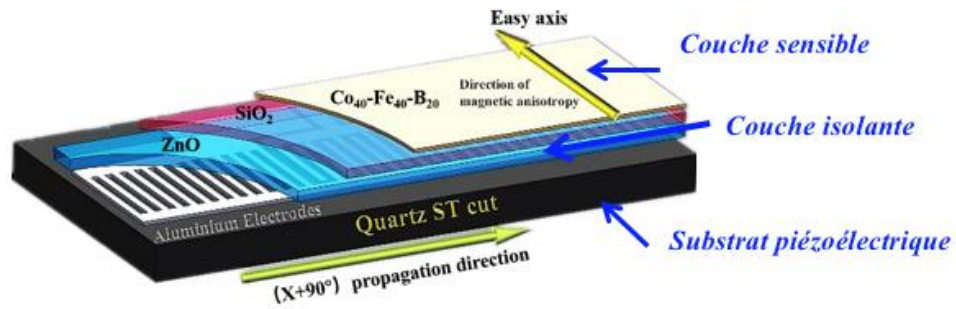


Figure 4. 9 : Schéma illustratif du résonateur MSAW structuré CoFeB/SiO<sub>2</sub> /ZnO/Quartz ST-X+90° [162].

La caractérisation sous champ magnétique de la structure montre une amélioration de la sensibilité au champ magnétique suivant l'axe de propagation de l'onde élastique compris entre -420 ppm/mT et 620 ppm/mT soit une augmentation d'un facteur 12 supérieur à la structure précédente [155].

Ces travaux présentés par H. Mishra *et al.* [155] et Y. Yang *et al.* [162][166] dans lesquels j'y ai participé comme co-auteur, nous ont permis d'améliorer largement la sensibilité magnétique des capteurs SAW multicouche par l'utilisation d'une couche sensible de CoFeB.

- **A. Mazzamurro *et al.*** [167] ont réalisé une étude sur un capteur MSAW en configuration ligne à retard. Un multicouche de TbCo<sub>2</sub>/FeCo à anisotropie uniaxiale présentant un effet  $\Delta E$  élevé a été déposé le chemin de parcours de l'onde élastique de substrat Quartz ST-X+90° comme l'illustre le Figure 4.10. L'étude s'est principalement concentrée sur la propagation d'une onde de cisaillement horizontale. La vitesse de phase étant un paramètre étroitement lié à la fréquence, celui-ci a été évalué sous champ magnétique. La structure a permis la génération de deux modes de cisaillement, à savoir une fondamentale (410 MHz) et une troisième harmonique (1,2 GHz). L'étude de

l'harmonique sous champ a montré une sensibilité élevée de 2500 ppm/mT avec un déphasage maximal proche de 2,5 %.

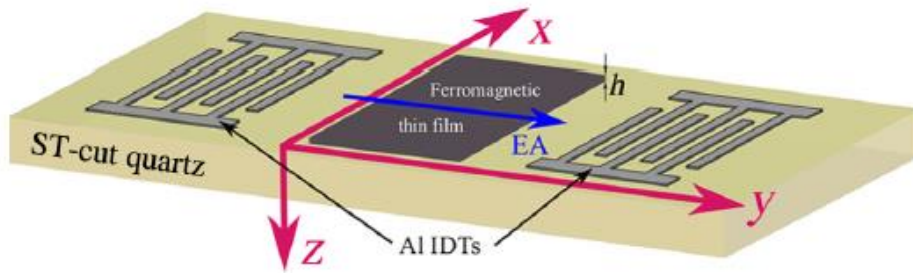


Figure 4. 10 : Schéma illustratif d'une structure MSAW structurée TbCo<sub>2</sub>/FeCo sur Quartz ST-X+90° [167].

- **P. Smole et al.** [163] quant à eux, ont réalisé une structure multicouche basée sur ZnO/FeCoSi B/adhésif époxy/substrat support (voir Figure 4.11). Une couche amorphe magnétostrictive présentant un effet  $\Delta E$  élevé a été reportée sur un substrat support par l'intermédiaire d'une colle époxy et un film mince de ZnO a été déposé par-dessus. Sous l'influence d'un champ externe, la rigidité élastique de la structure se voit modifier dû à l'effet  $\Delta E$  élevé. Cela a pour effet, d'entraîner un changement de la vitesse de phase de propagation de l'onde et par conséquent un décalage de la fréquence de la structure. L'évaluation sous champ magnétique de la structure à une fréquence de 1,6 GHz a montré une sensibilité estimée à 15000 ppm/mT [163] pour un champ compris entre 30 et 37 Oe. Cette estimation de la sensibilité sous champ reste la plus élevée connue en ce jour.

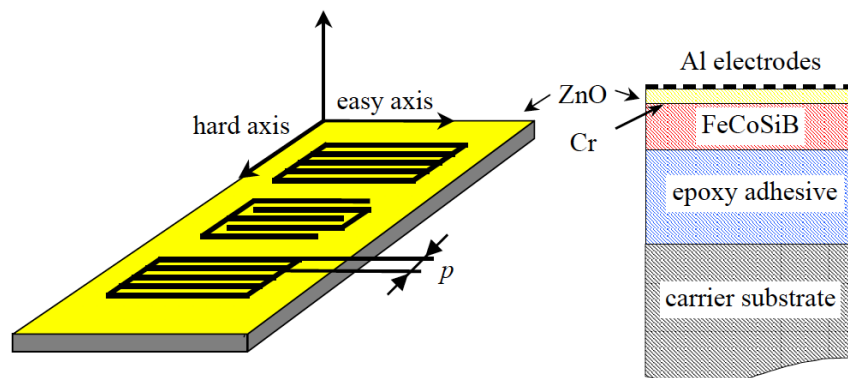


Figure 4. 11 : Schéma illustratif du résonateur MSAW multicouche de composition ZnO/(Fe<sub>90</sub>Co<sub>10</sub>)<sub>78</sub>Si<sub>12</sub>B<sub>10</sub>/adhésif époxy/substrat support.

Les recherches citées ci-dessus font partie d'un ensemble beaucoup plus vaste de travaux se concentrant dans le développement des capteurs MSAW, ce qui témoigne de l'importance de ces dispositifs. Tout en nous servant des connaissances développées dans les recherches préalablement mentionnées et ayant pour objectif l'amélioration de la sensibilité des capteurs MSAW, dans la partie qui suit, il sera question de concevoir un nouveau type de capteurs champ magnétiques SAW directement réalisé sur substrat magnétoélastique. L'avantage de cette structure provenant de l'épaisseur relativement élevée du matériau sensible par rapport à la longueur d'onde.

## IV.C. Capteur MSAW sur substrat métallique magnétoélastique

### IV.C.1. Concept : intérêt

Les dispositifs SAW sensibles au champ magnétique sont généralement conçus suivant deux types de configuration soit par l'utilisation d'électrodes [154], [165] ou de couches minces [155], [166] magnétoélastiques. Ces structures ont présenté des propriétés en champ magnétique très intéressantes, ce qui a fait office de nombreuses recherches et publications [155], [161], [163], [166], [168]. Dans l'objectif de développer des structures MSAW plus sensibles, il est question dans cette section de concevoir de nouvelles structures MSAW plus sensibles et intégrés sur substrat métallique magnétoélastique (Figure 4.12).

La particularité de ces capteurs MSAW est qu'ils utilisent comme substrat un matériau massif comme matériau magnétoélastique sensible, dont l'épaisseur peut être largement supérieure à la longueur d'onde. Il est donc possible d'avoir une propagation de l'onde acoustique dans une « grande » épaisseur de matériau magnétoélastique, ce qui est susceptible d'améliorer la sensibilité. Par contraste, les capteurs MSAW présentés dans la bibliographie présentent des couches minces sensibles dont l'épaisseur est très inférieure à la longueur d'onde, et seule une faible partie de l'énergie de l'onde s'y propage.

Dans cette partie, les capteurs MSAW seront réalisés sur deux substrats magnétoélastiques différents, à savoir le Nickel et le Metglas, un matériau typiquement utilisé comme conducteur magnétique dans les transformateurs. Pour le Metglas, on utilisera un ruban amorphe métallique magnétoélastique (1K101) de composition Fe-Si-B.

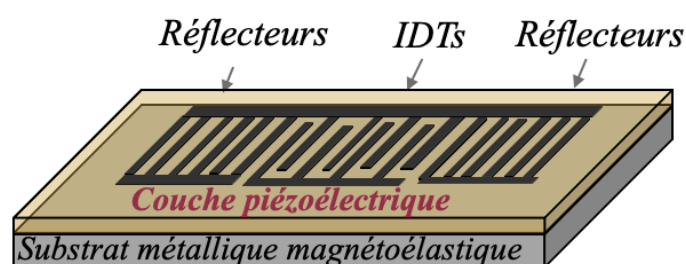


Figure 4. 12 : Schéma illustratif du résonateur magnétique SAW réalisé sur substrat magnétoélastique.

## IV.C.2. Capteur MSAW à base de la structure ZnO/Nickel

### IV.C.2.1. Conception et caractérisation de la structure ZnO/Nickel

La structure ZnO/nickel a été réalisée expérimentalement suivant les mêmes procédés de fabrication lithographique mentionnés dans les chapitres précédents. En effet, différentes épaisseurs de couche de piézoélectrique de ZnO ont été déposées sur des pièces métalliques de Nickel polie sur une face de rugosité de surface 30Å et de dimension 50×50×5 mm.

Le choix de l'épaisseur approprié de la couche piézoélectrique qui servira de couche de génération de l'onde acoustique et d'isolation électrique entre les électrodes interdigitées et le substrat magnétoélastique est un paramètre très important qui influe sur la qualité de l'onde élastique et donc les performances du capteur. Pour ce faire, deux épaisseurs différentes de la couche de ZnO, à savoir 2 μm et 6μm, ont été déposées par pulvérisation sur une pièce métallique de Nickel. Les paramètres de dépôt sont les mêmes que ceux mentionnés dans le tableau II.3. Par la suite, les électrodes ont été réalisées suivant la configuration résonateur avec une longueur d'onde de 10 μm. La Figure 4.13 montre une image de microscopie à différentes échelles de la vue de dessus du résonateur SAW réalisé sur Nickel. Il s'agit là du dispositif avec une épaisseur de 6μm de ZnO.

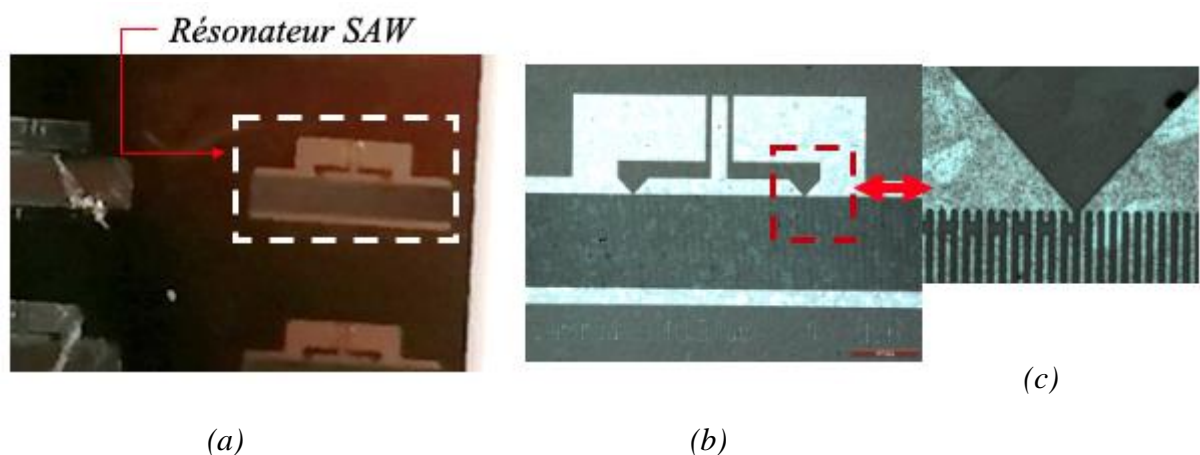


Figure 4. 13 : (a) Résonateur MSAW sur substrat Nickel, (b) image microscopique du résonateur SAW, (c) Zoom des IDTs interdigités du résonateur ( $\lambda = 10\mu\text{m}$ ).

#### IV.C.2.1.1. Caractérisation électrique de la structure ZnO/Nickel

Le dispositif MSAW (ZnO/Nickel) a été par la suite caractérisé électriquement sous-pointes par l'analyseur réseau vectoriel (VNA agilent-N 5230A). Les résultats observés dans la Figure 4.14a montre l'existence de pics fréquentiels, signature d'une onde de surface, pour le dispositif avec une épaisseur de 6  $\mu\text{m}$  de ZnO, alors que pour le dispositif avec 2  $\mu\text{m}$  d'épaisseur de ZnO aucune onde de surface n'est détectée. Ceci laisse à penser qu'avec 2  $\mu\text{m}$  d'épaisseur de ZnO, l'onde élastique de surface subit des pertes énormes dû à la dissipation de la quasi-totalité de l'énergie de l'onde dans le substrat métallique. Ces pertes peuvent également s'expliquer par une épaisseur de ZnO insuffisante pour assurer une bonne isolation électrique entre IDT et substrat métallique. Concernant le dispositif avec une épaisseur de 6  $\mu\text{m}$  de ZnO, on observe des signaux à des fréquences bien spécifiques. L'existence d'un signal pour cette épaisseur de la couche de ZnO s'explique par une meilleure isolation entre électrodes (IDTs) et substrat, mais aussi par une concentration partielle de l'énergie de l'onde élastique dans la couche piézoélectrique. En effet, la longueur d'onde est du même ordre de grandeur de l'épaisseur de la couche de ZnO. La concentration de l'onde dans le ZnO est encore plus importante quand il s'agit des harmoniques, ce qui est positif pour les pertes, mais a priori négatif pour la sensibilité au champ magnétique.

La Figure 4.14b donne la réponse fréquentielle du signal de la structure ZnO(6 $\mu\text{m}$ )/Nickel(0,5mm). Cette structure permet de générer une onde de Rayleigh à la fréquence 262,07 MHz, une harmonique (H3) à la fréquence 759,49 MHz à et une harmonique (H7) à la fréquence 1792,14 MHz. L'absence de l'harmonique 5 est liée au taux de métallisation du dispositif [49]. Afin d'identifier les ondes correspondantes à chaque pic et pour éviter toute confusion entre harmonique et modes supérieurs, une étude théorique a été réalisée sur le logiciel de modélisation à éléments finis (FEM) Comsol Multiphysics. Les résultats présentés dans la Figure 4.15 montrent une bonne correspondance entre l'expérimental et la théorie en ce qui concerne les fréquences de résonance. Les représentations 2D du déplacement total des particules calculées aux fréquences de résonance sont données Fig. 4.20d.

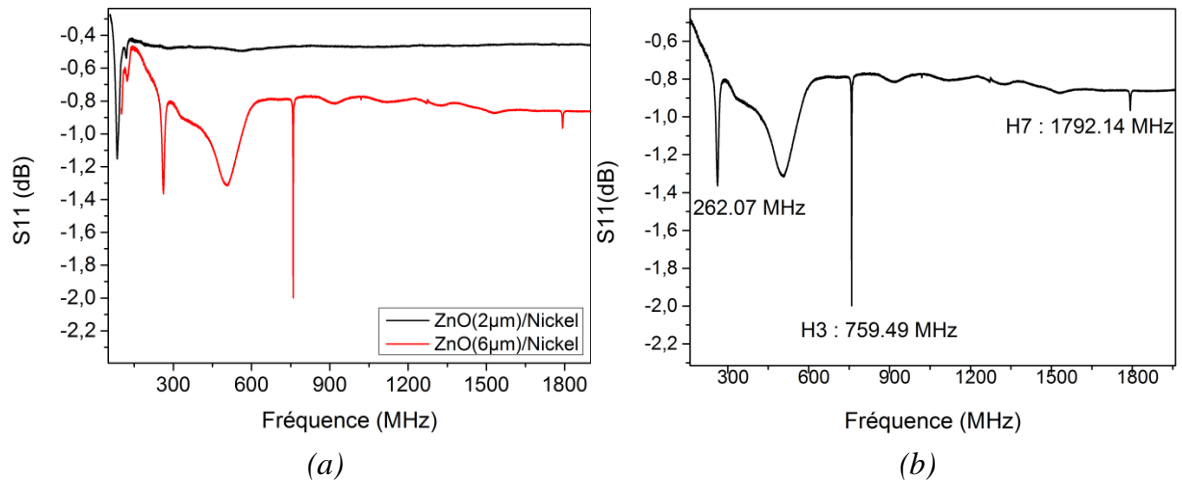


Figure 4. 14 : Réponse fréquentielle large bande S11 (a) des structures ZnO(2µm)/Nickel (courbe en noir), ZnO(6µm)/Nickel (courbe en rouge), (b) identification des pics fréquentiels observés dans la structure ZnO(6µm)/Nickel avec des fréquences H0 à 262,07 MHz, H3 à 759,49 MHz et H7 à 1792,14 MHz

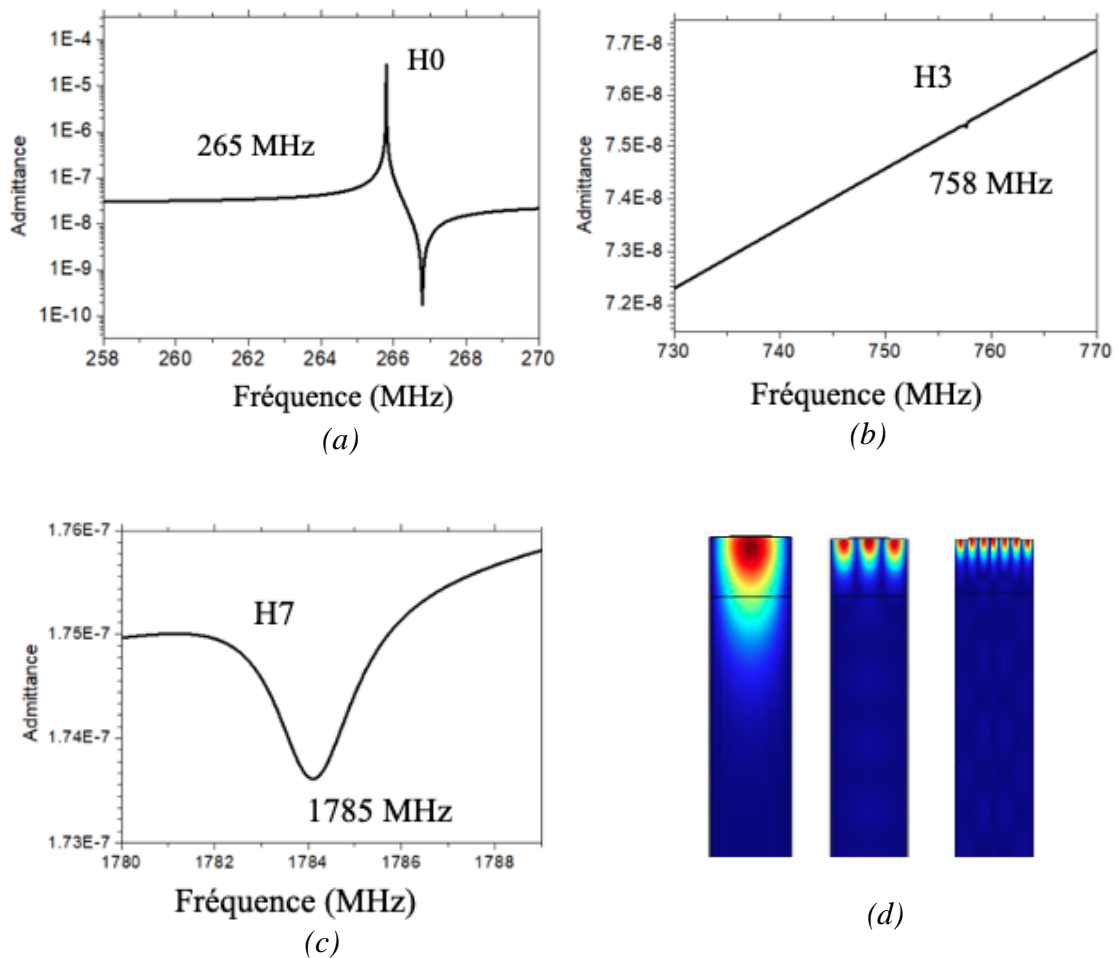


Figure 4. 15 : Réponse fréquentielle théorique de l'admittance de la structure ZnO(6 $\mu$ m)/Nickel, (a) fréquence fondamentale à 265 MHz, (b) fréquence H3 à 759,49 MHz, (c) fréquence H7 à 1792,14 MHz, (d) Représentation 2D du déplacement total des particulaires calculées aux fréquences H0, H3 et H7.

#### IV.C.2.1.2. Caractérisation en température du dispositif ZnO(6 $\mu$ m)/Nickel

L'étude en température a donc été réalisée uniquement sur le dispositif avec 6  $\mu$ m de ZnO qui présente des pics d'intérêt. La présence de trois pics fréquentiels rend la caractérisation en température très intéressante, car le dispositif peut servir de capteur multisensoriel avec une compensation en température de l'un des pics présents. La variation en température a ainsi été réalisée théoriquement et expérimentalement jusqu'à 60°C sur les fréquences H0, H3 et H7. La Figure 4.16 illustre la représentation des sensibilités en température des fréquences H0, H3 et H7 déterminées expérimentalement et par simulation. On observe une assez bonne concordance entre mesure et calcul. Le pic fondamental de la structure (H0) et les harmoniques (H3 et H7) présentent des sensibilités respectives de -45 ppm/°C, -28 ppm/°C et de -30 ppm/°C. Cette différence de sensibilité entre le pic fondamental et l'harmonique peut être favorable à la réalisation des capteurs MSAW plus ou moins compensés en température pour les pics (H3 et H7) dus à leur faible TCF par l'ajout d'une couche présentant un TCF positif à l'exemple de SiO2 [155].

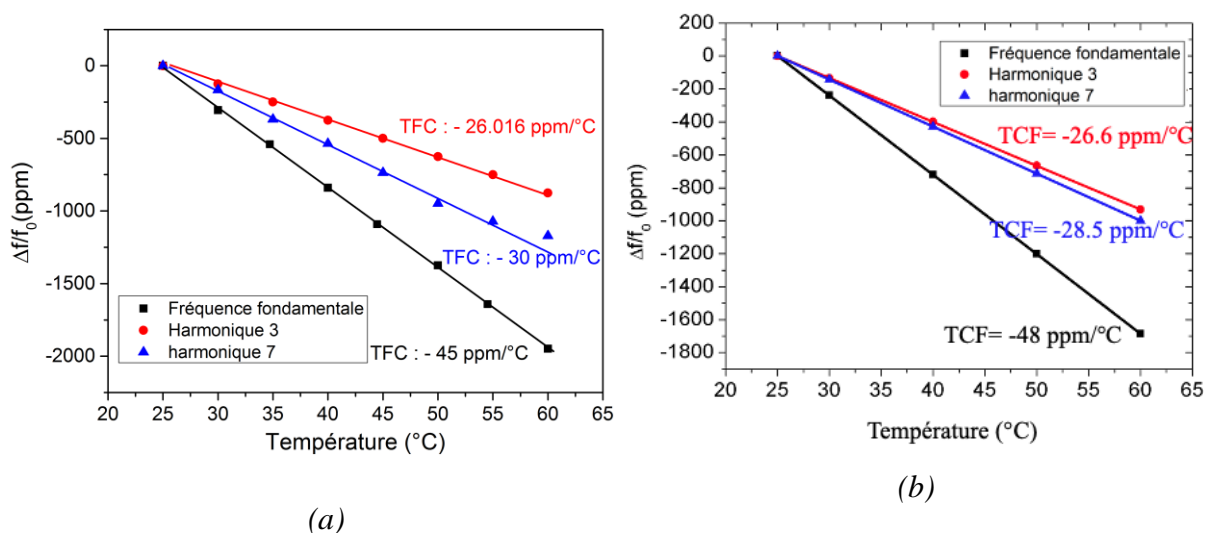


Figure 4. 16 : Sensibilité en température des fréquences H0 (Fréquence fondamentale), H3 (Harmonique 3) et H7 (harmonique 7), (a) étude expérimentale, (b) étude théorique.

## IV.C.2.2. Sensibilité en champ magnétique

### IV.C.2.2.1. Mesure des courbes d'aimantation

L'étude de la sensibilité au champ magnétique de la structure ZnO(6 $\mu$ m)/Nickel a débuté par la détermination des propriétés magnétiques du substrat magnétoélastique de Nickel. La caractérisation magnétique du Nickel a été réalisée à l'aide du magnétomètre à échantillon vibrant VSM (Vibrating Sample Magnetometer) conventionnel (voir Figure 4.17) avec un champ magnétique appliqué dans le plan (suivant les axes X et Y). Les résultats faits sur l'échantillon de Nickel à température ambiante sont observés dans la Figure 4.18. Un même comportement de la courbe d'aimantation dans les directions X et Y du plan est observé, ce qui montre le caractère isotrope dans le plan X-Y du substrat du nickel.

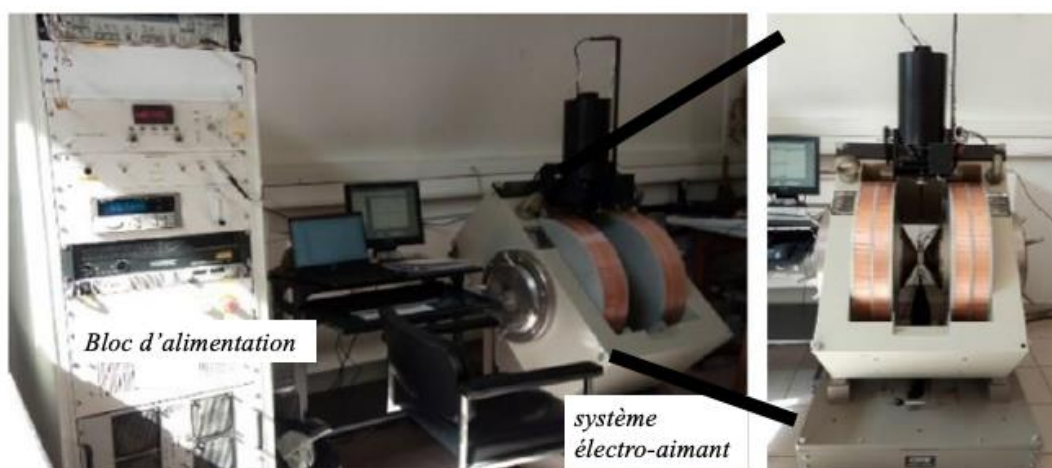


Figure 4. 17 : Installation expérimentale de magnétométrie à échantillon vibrant (GMW 3474)

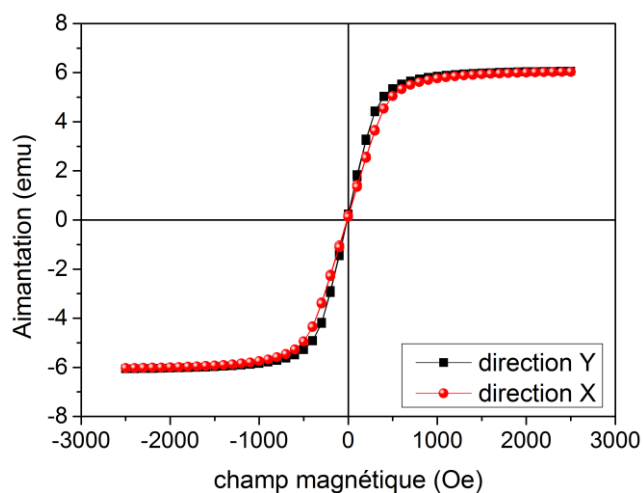


Figure 4. 18 : Courbe d'aimantation suivant l'axe X (courbe en rouge), l'axe Y (courbe en noir).

#### IV.C.2.2.2. Caractérisation en champ magnétique du dispositif MSAW ZnO/Nickel

La caractérisation fréquentielle sous champ du dispositif MSAW avec une station sous-vide amagnétique. Il s'agit de la sonde cryogénique LakeShore (modèle EMPX-HF) connectée à un analyseur réseau VNA (Agilent-N 5230A) par un câble coaxial (muni de connecteurs K) et des pointes RF GSG (40GHz) de la marque pico probes GGB comme illustrer dans la Figure 4.19. La station est constituée d'un électroaimant capable de générer des champs magnétiques allant jusqu'à 6000 mT, de plus une zone de sondage entre les pôles de l'électroaimant à l'intérieur d'une armoire centrale est maintenue sous vide (zone A sur la Figure 4.19). Le VNA quant à lui permet de suivre l'évolution du signal  $S_{11}$  du dispositif SAW sous la variation du champ magnétique. Les pico probes (40GHz) GGB reliés à un câble K permettent de faire la connexion entre le dispositif SAW et le VNA.

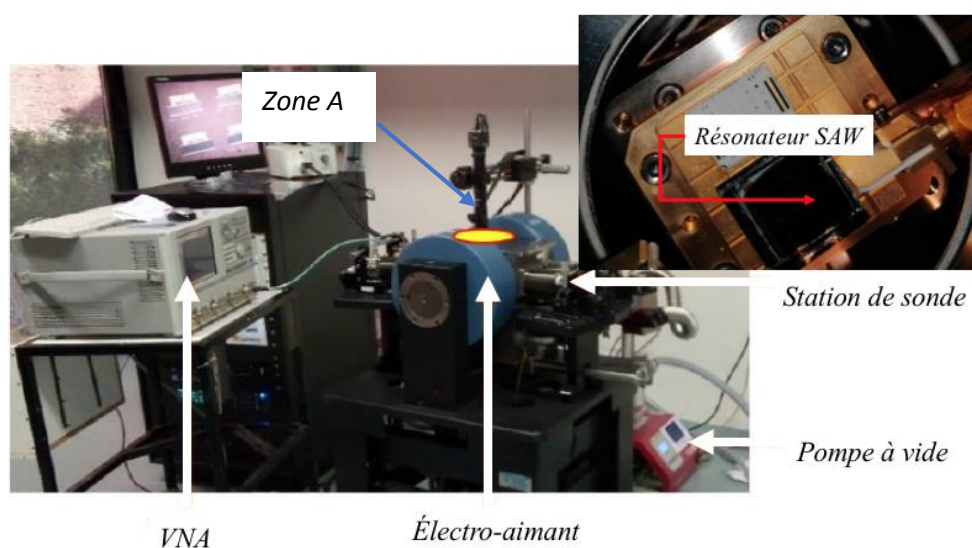


Figure 4. 19 : Configuration de l'installation expérimentale utilisée pour les mesures sous champ magnétique.

La chambre sous vide permet d'assurer la stabilité des mesures réalisées sur le dispositif des effets de l'environnement externe. Enfin, le système est initialement calibré à l'aide d'un kit de calibration GGB à l'extrémité de la sonde RF.

Le dispositif MSAW ZnO(6 $\mu$ m)/Nickel a donc par la suite été caractérisé sous champ. Le dispositif a été soumis à des champs magnétiques orientés suivants les axes X et Y du plan.

Les Figures 4.20 et 4.21 donnent les variations relatives des fréquences de résonances H0, H3 et H7 à des champs magnétiques dont l'intensité est comprise entre -600mT et 600 mT suivant les directions X et Y respectivement.

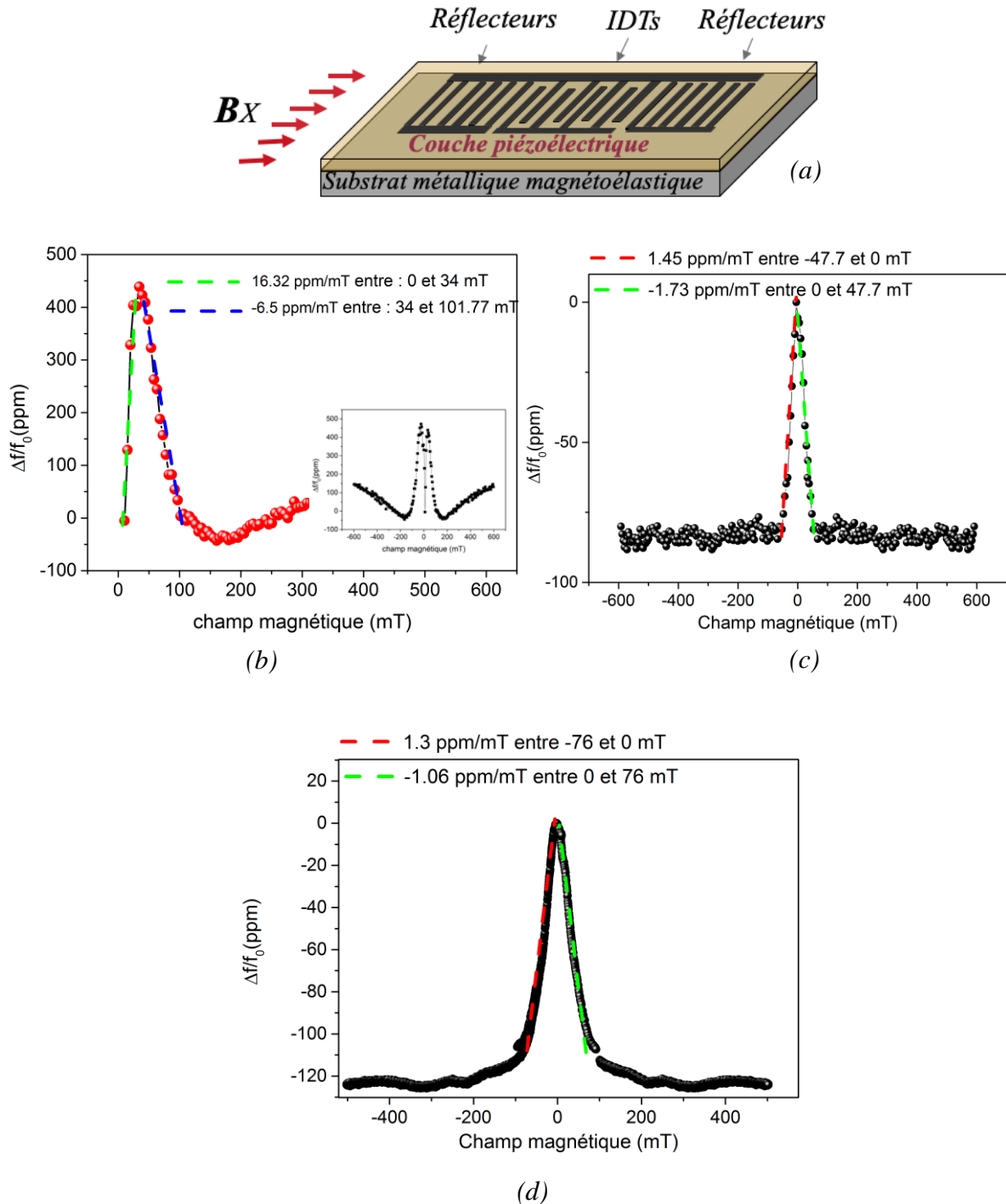


Figure 4. 20 : (a) Schéma illustratif de l'application du champ suivant la l'axe X. (b) Variation relative des fréquences des pics H0 (262,07 MHz), (c) H3 (759,49 MHz) et (d) H7 (1785 MHz) sous un champ magnétique appliqué suivant l'axe X.

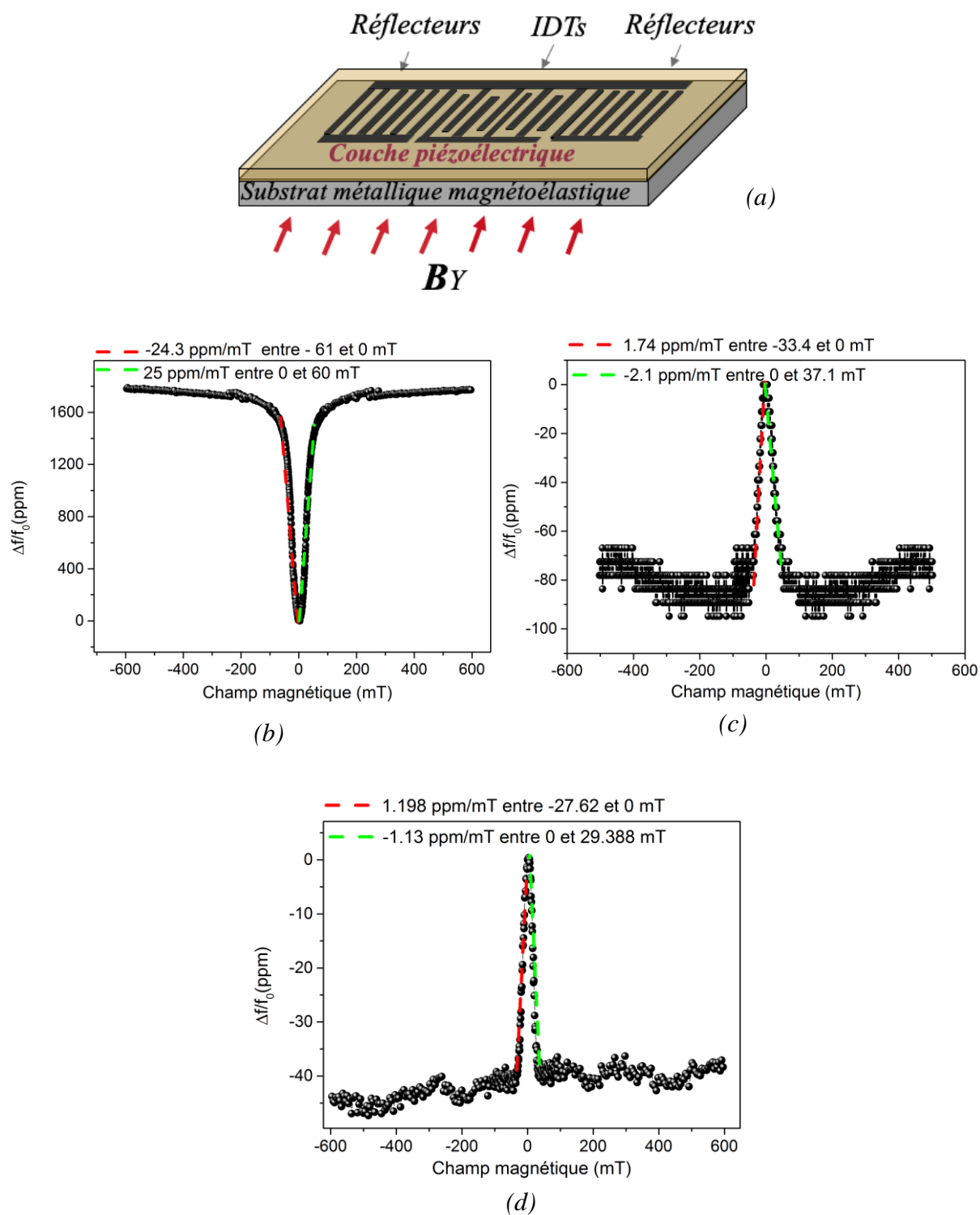


Figure 4. 21 : (a) Schéma illustratif de l'application du champ suivant la l'axe X. (b) Variation relative des fréquences des pics H0 (262,07 MHz), (c) H3 (759,49 MHz) et (d) H7 (1785 MHz) sous un champ magnétique appliqué suivant l'axe des Y.

Les réponses magnéto-acoustiques des trois pics H0, H3 et H7 lorsque le champ magnétique est appliqué suivant l'orientation de l'axe X montrent un comportement monotone et quasi-linéaire entre 0 et 34 mT, qui peut être exploité pour des applications de détection de champ magnétique. Les mesures au niveau de ces trois pics donnent une plus forte sensibilité au champ en valeur absolue du pic H0 (Rayleigh) de 16,32 ppm/mT comparé aux pics H3 et H7 de valeur respective de 1,73 ppm/mT et de 1,04 ppm/mT (voir Figure 4.20). Ce résultat peut s'expliquer par le fait que l'onde de Rayleigh correspondant au pic fondamental pénètre plus dans le substrat magnétoélastique du Nickel qui représente la couche sensible. En effet, sa propagation dans le substrat est plus grande que celle de ces harmoniques, de ce fait, il est grandement influencé par la variation du champ. De même, l'harmonique H3 présente une plus grande sensibilité que l'harmonique H7. La profondeur de pénétration étant proportionnelle à la longueur d'onde, donc inversement proportionnelle à l'ordre de l'harmonique.

Les réponses magnéto-acoustiques des trois pics H0, H3 et H7 lorsque le champ magnétique appliqué suivant l'orientation de l'axe Y (Voir Figure 4.21) montrent une bonne linéarité de la mesure entre 0 et 30 mT. Les sensibilités au champ des pics H0 (Rayleigh), H3 et H7 donnent en valeur absolue des valeurs respectives de 25 ppm/mT, 2,1 ppm/mT et 1,13 ppm/mT. Il peut aussi être remarqué que la réponse au champ magnétique de la structure pour l'onde de Rayleigh suivant l'axe Y présente une valeur plus élevée que celle obtenue suivant l'axe X.

La sensibilité au champ magnétique appliqué le long de l'axe Y mesuré pour le dispositif MSAW ZnO(6um)/Nickel est de 25ppm/mT entre 0 et 30mT. Celle-ci est beaucoup plus sensible qu'aux résultats de Kadota *et al.* (2,2 ppm/mT) [154] et Elhosni *et al.* (0,43 ppm/mt et 16 ppm/mT) [157] qui utilise du Nickel comme couche sensible. La sensibilité que nous obtenons avec le Nickel comme substrat peut être comparé travaux utilisant des couches beaucoup plus sensibles que le Nickel à l'exemple les résultats de Zhou *et al.* [156], Mishra *et al.* [155] qui ont obtenu des sensibilités d'environ 48 ppm/mT et de 36 ppm/mT (calculé à partir de leurs résultats expérimentaux). Le dispositif MSAW basé sur ZnO/Nickel est une structure intéressante qui présente déjà des résultats très prometteurs et gagnerait à être optimisée notamment par l'utilisation d'un substrat présentant une plus grande sensibilité aux champs magnétique.

A ce stade, nous venons de démontrer la possibilité de réaliser un capteur MSAW présentant comme substrat un matériau métallique magnétoélastique. Toutefois, dans la suite de ce travail, il sera question de développer des capteurs de champ magnétique SAW sur substrat magnétoélastique avec de meilleures sensibilités. Pour ce faire, différentes solutions peuvent être investiguées :

- L'optimisation de l'épaisseur de la couche piézoélectrique de ZnO qui pourrait améliorer la qualité du capteur, optimiser la pénétration de l'onde dans la couche sensible et ainsi améliorer sa sensibilité.
- L'utilisation d'un autre type d'onde, à l'image de l'onde de Lamb, se propageant plus dans le substrat.
- L'utilisation d'un substrat magnétoélastique présentant une plus grande sensibilité au champ magnétique.

De ces différentes solutions, nous développerons la dernière dans la partie du chapitre qui suit.

### **IV.C.3. Optimisation du capteur champ magnétique sur substrat magnétoélastique : structure ZnO/Metglas (Fe-Si-B)**

Dans le cadre de l'amélioration de la sensibilité de la structure MSAW sur substrat magnétoélastique, la dernière hypothèse énoncée précédemment sera prise en compte. Pour ce faire, il s'agira de remplacer le substrat magnétoélastique de Nickel par un substrat (Metglas (Fe-Si-B)) présentant une sensibilité au champ magnétique plus grand dû à son effet  $\Delta E$  très élevé. De plus, l'épaisseur de la couche piézoélectrique sera optimisée dans le but de favoriser la propagation de l'onde élastique plus profondément dans le substrat magnétoélastique tout en limitant le plus possible les pertes de propagation dans le substrat métallique.

De plus, l'étude de sensibilité au champ magnétique sera présentée pour des champs appliqués dans le plan, mais aussi hors du plan, ce dernier point n'étant pas fréquemment abordé dans la littérature.

#### **IV.C.3.1. Réalisation et caractérisation de la structure MSAW ZnO/Metglas**

##### **IV.C.3.1.1. Réalisation expérimentale**

Un ruban métallique amorphe de 1K101 Metglas magnétoélastique disponible commercialement (composition FeSiB avec le Fe > 91%, Si compris entre 5 et 6% et Bore compris entre 2,4 et 3 %) a été choisi comme substrat magnétique du fait de sa sensibilité au champ magnétique très élevée comme peuvent en témoigner de nombreuses publications à l'exemple de [169] pour n'en citer que celle-ci. Dans sa version 1K101, il s'agit d'un matériau ultra bas coût (qq USD/kg) qui sert essentiellement, un fois enroulé dans une forme spécifique, de conducteur magnétique pour les transformateurs.

La structure ZnO/Metglas a donc été réalisée expérimentalement suivant les différents procédés qui seront mentionnés par la suite.

Les rubans de Metglas sont généralement de faible épaisseur de l'ordre de 25  $\mu\text{m}$  comme l'illustre la Figure 4.22a. Cela a pour effet de rendre assez complexe la réalisation d'un dispositif SAW après dépôt de la couche de ZnO. En effet, comme le montre la Figure 4.22b, après le dépôt par pulvérisation cathodique d'une couche de ZnO, le substrat a tendance à se déformer par effet bilame dû aux contraintes résiduelles et à garder cette forme un peu rebondie. De ce fait, la réalisation des électrodes interdigitées par les techniques de photographique reste

assez difficile, car l'étape d'insolation ultraviolette sur l'aligneur MJB4 nécessite une surface plane.



Figure 4.22 : (a) pièce de Metglas, (b) pièce de Metglas après dépôt de la couche de ZnO

Pour remédier à ce problème de planéité de surface, la structure ZnO/Metglas a donc par la suite été plaquée sur une pièce de silicium par l'utilisation d'un scotch double face (voir Figure 4.23a). L'épaisseur de  $2\ \mu\text{m}$  de la couche de ZnO a été dans ce cas suffisante pour la génération et la détection de l'onde élastique de surface. Le résonateur a ainsi été ensuite réalisé sur la couche piézoélectrique comme le montre la Figure 4.23b.

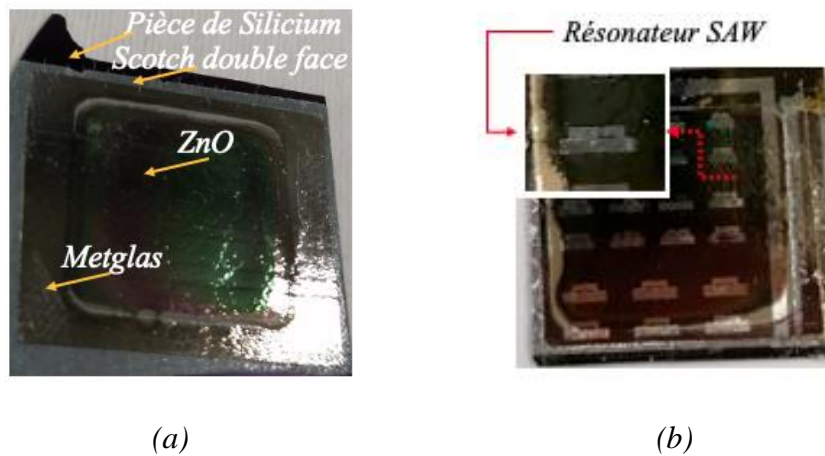
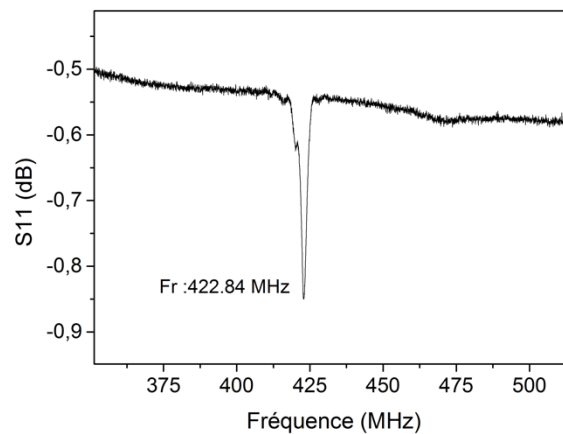


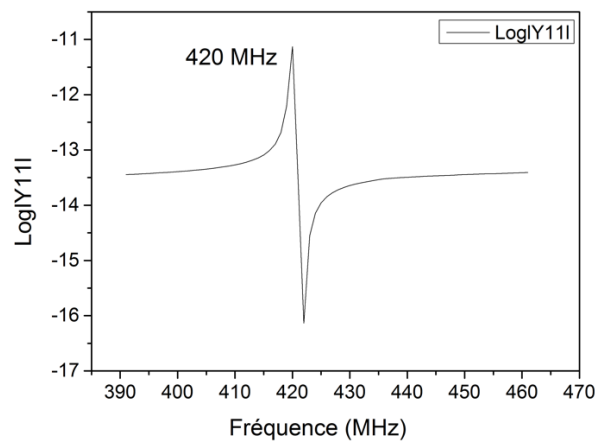
Figure 4.23 : (a) structure ZnO/Metglas fixé sur une pièce de silicium, (b) Réalisation expérimentale du résonateur SAW sur ZnO/Metglas.

#### IV.C.3.1.2. Caractérisation fréquentielle du dispositif MSAW

Le résonateur SAW structuré ZnO(2 $\mu$ m)/Metglas(25 $\mu$ m) de longueur d'onde 6,5  $\mu$ m a été caractérisé électriquement sous-pointes par l'analyseur réseau vectoriel (VNA agilent-N 5230A). Les résultats observés dans la Figure 4.24a montre la présence d'un pic fréquentiel à 422,84 MHz correspondant à l'onde acoustique de Rayleigh et a été validé théoriquement modélisation sur Comsol Multiphysics (Figure 4.24b).



(a)



(b)



(c)

Figure 4. 24 : (a) Réponse fréquentielle expérimentale du signal S11 de la structure ZnO(2 $\mu$ m)/Metglas, (b) Réponse simulée de la structure à la fréquence fondamentale à 420 MHz, (c) Représentation 2D du déplacement total des particules calculé à la fréquence de résonance 420 MHz.

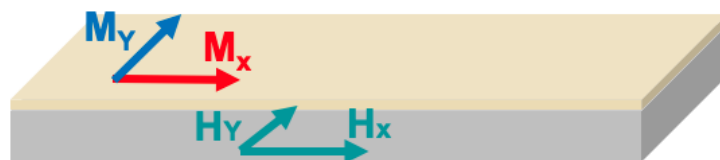
L'existence d'un pic fréquentiel dans le signal  $S_{11}$  pour une couche de  $2\mu\text{m}$  d'épaisseur de ZnO présente l'intérêt du substrat de Metglas par rapport au Nickel puisqu'il permet une plus faible dissipation de l'énergie de l'onde élastique. De plus, cette épaisseur favorise une meilleure pénétration de l'onde acoustique dans le substrat magnétoélastique, par conséquent cette structure permettra d'améliorer grandement la sensibilité au champ magnétique.

#### IV.C.3.2. Sensibilité en champ magnétique de la structure ZnO/Metglas

##### IV.C.3.2.1. Mesure des courbes d'aimantation

L'étude de la sensibilité au champ magnétique de la structure ZnO/Metglas débute par la détermination des propriétés magnétiques du ruban métallique amorphe 1K101 Metglas au VSM. Le champ magnétique a été appliqué à température ambiante dans le plan (suivant l'axe X et Y) et hors du plan (suivant l'axe Z). Pour les mesures où le champ est appliqué hors du plan, il est présenté des mesures dites « vectorielles » dans le sens où l'aimantation (encore noté  $M_x$ ,  $M_y$  et  $M_z$ ) est détectée à la fois hors du plan (dans la direction d'application du champ) et dans le plan. Comme on le verra, ces mesures sont importantes pour la compréhension du comportement du capteur.

Les courbes données dans la Figure 4.25 donnent l'aimantation de la feuille de Metglas lorsque le champ est appliqué dans le plan. On peut remarquer que la courbe d'aimantation dans le plan présente le même comportement, que ce soit dans la direction X que dans la direction Y, ce qui montre un caractère isotrope dans le plan du Metglas. De plus, la courbe d'aimantation atteint une saturation à faible champ (moins de 10 mT), ce qui est important pour obtenir des capteurs MSAW très sensibles à bas champ.



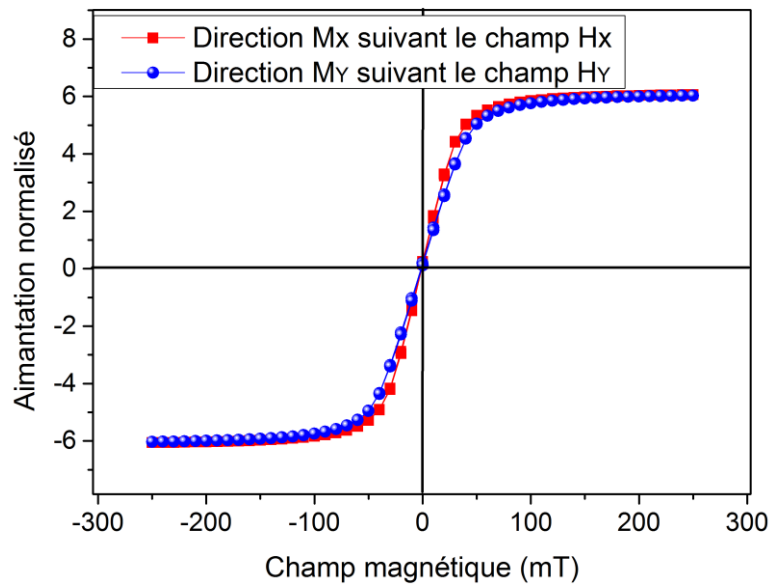


Figure 4. 25 : Courbe d’aimantation du Metglas dans le plan suivant l’axe X (courbe en rouge) et l’axe Y (courbe en bleue).

La Figure 4.26 illustre l’aimantation hors du plan (suivant l’axe Z) de la feuille de Metglas. On constate que lors de l’application du champ hors du plan suivant l’axe Z, les moments magnétiques ont du mal à s’orienter hors du plan (Figure 4.26a), ce qui conduit à une saturation à 2,5 T. A bas champ, les moments ont tendance à s’orienter dans le plan lors que le champ est appliqué hors du plan, ce qui traduit une anisotropie (Figure 4.26b). Ces caractéristiques sont susceptibles d’impacter le fonctionnement du capteur MSAW quand le champ est appliqué dans cette direction. L’origine de cette anisotropie est encore à étayer.



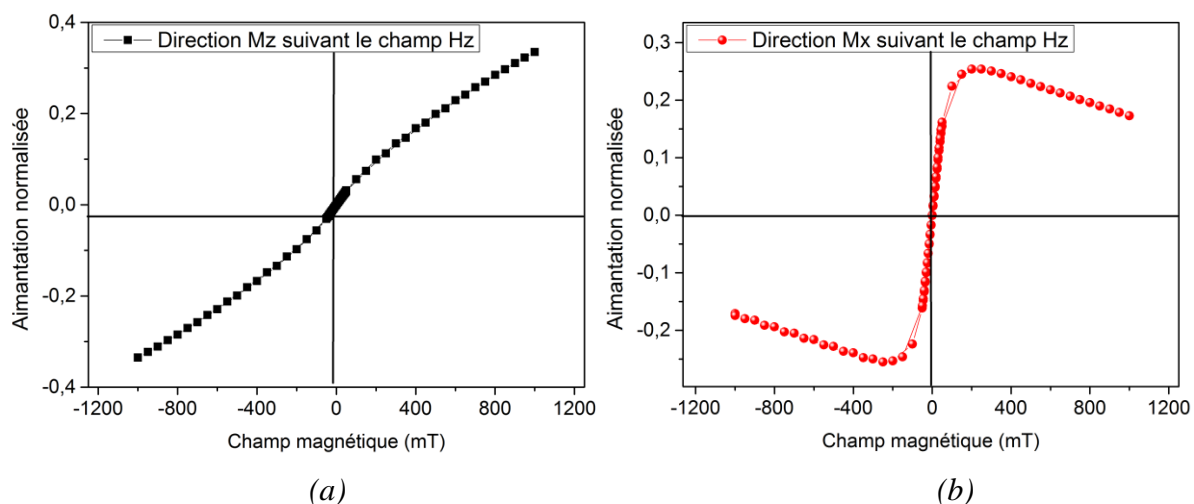


Figure 4. 26 : Courbe d'aimantation du Metglas hors du plan (a) aimantation selon Z (direction du champ appliqué) (b) aimantation dans le plan.

Des études plus larges sur l'aimantation hors du plan ont été réalisées dans la Figure 4.27, le but ici étant de mieux comprendre ce phénomène particulier de la feuille de Metglas. Pour ce faire, l'aimantation hors du plan s'est réalisée tout en changeant l'angle de l'échantillon de  $0$  à  $4^\circ$  par pas de  $1^\circ$  (voir Figure 4.28). La Figure 4.28a illustre l'aimantation hors du plan pour un champ appliqué dans la direction Z, et celle-ci varie peu en fonction de l'angle. L'aimantation dans le plan, quant à elle est assez sensible aux petites variations d'angles (Voir Figure 4.28b). Lors de l'application du champ hors du plan, les moments semblent donc s'orienter dans le plan, mais pas nécessairement dans une direction en particulier.

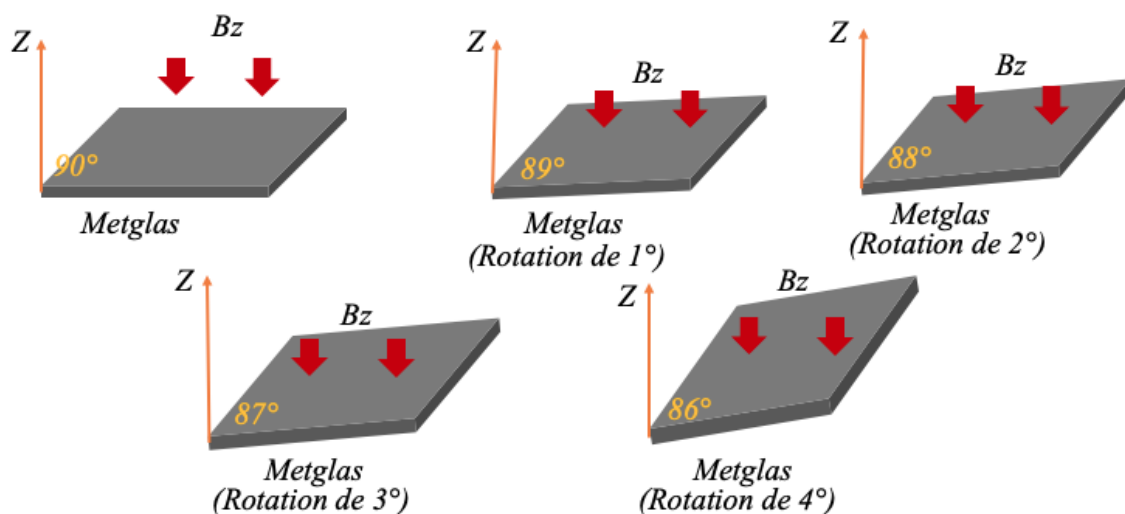


Figure 4. 27 : Schéma illustratif de l'application du champ suivant la l'axe Z avec rotation de l'échantillon.

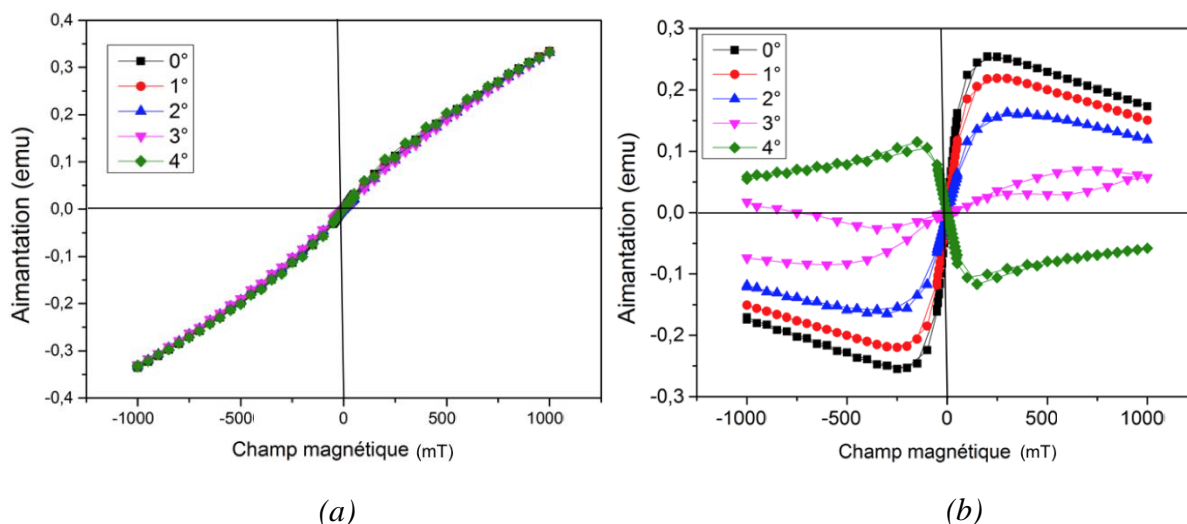


Figure 4. 28 : Courbe d'aimantation du Metglas hors du plan avec rotation de l'échantillon (a) domaines magnétique orienté suivant l'axe Z, (b) domaines magnétique orienté dans le plan.

#### IV.C.3.2.2. Caractérisation sous champ magnétique de la structure ZnO/Metglas

La réalisation de mesures sous champ de la structure ZnO(2 $\mu$ m)/Metglas(25 $\mu$ m) ont été effectuées suivant les mêmes procédés d'étude adoptés pour la structure précédente. Le dispositif a été soumis à des champs magnétiques orientés suivants les axes X du plan et l'axe Z hors du plan et le pic de résonance à la fréquence 422,84 MHz a été traqué en fonction de l'amplitude et l'orientation du champ magnétique.

La Figure 4.29a illustre les variations relatives de la fréquence de résonance fondamentale sous champ magnétique suivant l'axe X. La réponse magnéto-acoustique montre des comportements linéaire et monotone entre différentes régions du champ dont l'intervalle 1,33 et 2,28 mT (pointillés en vert dans la Figure 4.29a) qui présente une sensibilité très élevée de **2793 ppm/mT** soit 1,18 Hz/nT. Ce résultat présent au meilleur de nos connaissances **la seconde meilleure sensibilité obtenue avec des capteurs MSAW, un résultat majeur de ces travaux**. Cette sensibilité à bas champ est nettement supérieure à ce qui est publié dans les références [155], [156], [160], [161], [166]. Elle peut s'interpréter par la combinaison de 3 facteurs décrits précédemment : a) le large effet  $\Delta E$  dans le Metglas b) la propagation d'une

partie significative de l'onde dans le Metglas c) le champ de saturation très faible dans le Metglas pour un champ magnétique appliquée dans le plan.

Les sensibilités aux champs magnétiques hors-du-plan des capteurs MSAW sont rarement abordées dans littérature, car elles sont très faibles. Vraisemblablement, cela est causé par la forte anisotropie de forme dans les couches minces magnétoélastiques majoritairement utilisés. Pourtant, dans un certain nombre d'applications industrielles contraintes (par exemple la mesure de vitesse dans les roulements automobiles), le capteur de champ peut difficilement être placé dans une direction autre que perpendiculairement à la direction du champ magnétique : il convient donc d'aborder cette question.

La Figure 4.29b donne une évaluation de la sensibilité magnétique hors du plan du capteur SAW. La réponse magnéto-acoustique présente des comportements quasi-linéaire et monotone dans des zones spécifiques. La région du champ comprise entre -19,8 et -9,92 mT (représenté en pointillés rouges de la Figure 4.29b) donne une sensibilité de **1482 ppm/mT** soit 0,638 Hz/nT). A notre meilleure connaissance, **il s'agit de la meilleure sensibilité obtenue pour un capteur MSAW pour une mesure du champ hors du plan**. Il est également à noter une variation de vitesse de phase de 16000 ppm dans l'intervalle de champ donné, donc 1,6 %, ce qui est très élevé. Au vu du point d'inflexion autour de 25 mT dans la courbe de sensibilité, il apparaît que le mécanisme d'aimantation influent sur la sensibilité à bas champ est l'aimantation du Metglas dans le plan, malgré l'application du champ hors du plan, donné Fig. 4.31b et 4.33b.

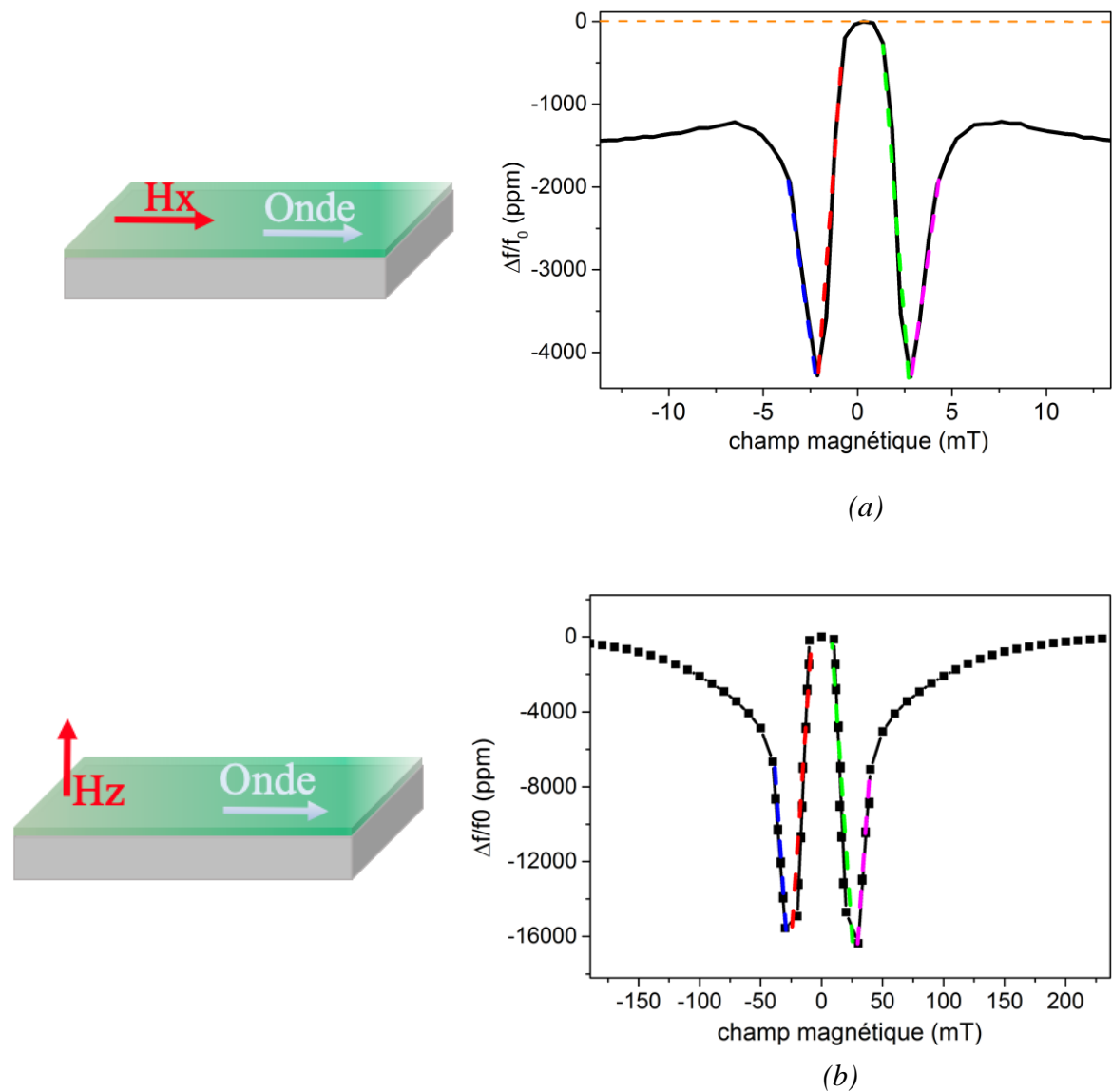


Figure 4. 29 : Variation relative de la fréquence du pic H0 (autour de 422,84 MHz à champ nul) sous champ magnétique appliqué (a) dans le plan suivant l'axe X (b) hors du plan suivant l'axe Z.

En résumé, ces résultats sont très prometteurs et rejoignent le palmarès des plus hautes sensibilités au champ magnétique obtenues dans la littérature pour les dispositifs MSAW. Ils ne sont surclassés que par les résultats de P. Smole et al [163]. De plus, ces valeurs de sensibilité magnétique obtenues sur le Substrat du ruban de Metglas sont à notre connaissance la deuxième meilleure sensibilité dans le plan et de loin la meilleure sensibilité hors du plan rapporté dans la littérature.

Pour permettre de positionner ces derniers résultats par rapport à l'état de l'art, le Tableau IV.3 résume les propriétés de certains dispositifs MSAW de la littérature, leurs structures, couches sensibles et sensibilités.

Tableau IV. 3 : Comparaison des capteurs magnétique basé sur les ondes SAW et de leurs performances

| <b>Matériaux piézoélectrique</b>                  | <b>Configuration</b> | <b>Couche sensible</b>         | <b>Sensibilité relative maximale</b> |
|---|----------------------|--------------------------------|--------------------------------------|
| Quartz (ST-90X) [154]                             | Résonateur SAW       | Ni                             | 2.2 ppm/mT (in plane)                |
| LiNbO <sub>3</sub> (128°Y-X) + ZnO [150]          | Résonateur SAW       | 25 × [TbCo <sub>2</sub> /FeCo] | 4.3 ppm/mT                           |
| Quartz (ST-90X) + ZnO [155]                       | Résonateur SAW       | CoFeB                          | 36 ppm/mT                            |
| LiNbO <sub>3</sub> (128°Y-X) [160]                | Ligne à retard SAW   | FeCo                           | 59 ppm/mT                            |
| LiNbO <sub>3</sub> (Y cut) [156]                  | Ligne à retard SAW   | FeCo/TbCo <sub>2</sub>         | 48 ppm/mT                            |
| ST-cut Quartz + SiO <sub>2</sub> [161]            | Ligne à retard SAW   | FeCoSiB                        | 300 ppm/mT                           |
| Quartz (ST-90X)+ZnO+SiO <sub>2</sub> [166]        | Résonateur SAW       | CoFeB                          | 390 ppm/mT-620 ppm/mT                |
| ZnO on FeCoSiB [163]                              | Ligne à retard SAW   | FeCoSiB                        | environ 15000 ppm/mT                 |
| TbCo <sub>2</sub> /FeCo on Quartz ST cut [167]    | Résonateur SAW       | TbCo <sub>2</sub> /FeCo        | 2500 ppm/mT                          |
| <b>ZnO on Metglas Substrate (Notre structure)</b> | Résonateur SAW       | FeSiB                          | <b>2793</b> ppm/mT (in plane)        |
| <b>ZnO on Metglas Substrate (Notre structure)</b> | Résonateur SAW       | FeSiB                          | <b>1482</b> ppm/mT (out-of-plane)    |

Ce chapitre avait pour but le développement d'un nouveau type de capteur magnétique SAW directement réalisé sur substrat métallique magnéto-élastique à des fins d'amélioration de la sensibilité magnétique des dispositifs SAW. Grâce à l'utilisation de substrats et non pas de couches minces, il est possible d'avoir une propagation de l'onde acoustique sur une forte épaisseur de matériau magnétoélastique. Ainsi, les structures ZnO/Nickel et ZnO/Metglas en configuration résonateur ont été élaborées, caractérisées électriquement, et la sensibilité de ces dispositifs a été évalué par des mesures sous champ magnétique.

Dans la première partie de ce chapitre, une courte introduction sur les capteurs de champ magnétique les plus utilisés à l'exemple des capteurs à effet Hall, induction, magnéto-résistif, magnéto-résistif géant et leurs applications a été faite.

La deuxième partie de ce chapitre s'est, dans un premier temps, principalement concentré sur les avantages, les configurations et le principe de fonctionnement des dispositifs MSAW, puis sur une synthèse bibliographique de quelques capteurs MSAW réalisés.

Enfin, dans la dernière partie du chapitre, il était question de développer un nouveau type de capteur MSAW sur substrat métallique et magnétoélastique, le but étant d'améliorer la sensibilité au champ magnétique. La structure ZnO (6 $\mu$ m)/ Nickel a été premièrement élaborée en configuration résonateur. La caractérisation magnétique de cette structure a donné une sensibilité magnétique de l'onde SAW (onde Rayleigh à 267,07 MHz) de 25 ppm/mT. Ce premier résultat, plutôt intéressant, a permis de monter une sensibilité plus forte quand la couche sensible est le substrat Ni, par rapport à des couches minces Ni. Les sensibilités restent toutefois relativement modérées.

Dans le but d'améliorer la sensibilité, il a ensuite été étudié une structure MSAW sur métal amorphe Metglas 1K101 de 25 $\mu$ m d'épaisseur avec une épaisseur de ZnO plus fine (2 $\mu$ m). En plus d'être très peu coûteux, faible épaisseur, et facile à laminer sur une surface cible, ce matériau possède un effet  $\Delta E$  élevé, c'est-à-dire que ses paramètres élastiques (tenseur de rigidité) varient fortement sous l'effet du champ magnétique. Les propriétés d'aimantation du Metglas ont été mesurées en détail au magnétomètre à échantillon vibrant. Les caractérisations électriques sous champ magnétique de la structure ZnO(2  $\mu$ m)/Metglas (25 $\mu$ m) ont été réalisées

autour de la fréquence de fonctionnement de 422 MHz, celles-ci ont donné des sensibilités à bas champ de 2793 ppm/mT lorsque le champ magnétique est parallèle à l'axe de propagation et de 1482 ppm/mT lorsque le champ magnétique est appliqué hors du plan. A notre meilleure connaissance, la sensibilité dans le plan est la seconde meilleure rapportée dans la littérature et la sensibilité hors du plan établi un nouveau record pour les capteurs MSAW. Ce dernier résultat est particulièrement important pour un certain nombre d'applications industrielles pratiques où le champ est perpendiculaire au capteur.



## Conclusion générale

---

---

Dans ce manuscrit, la réalisation des capteurs à onde élastiques de surface (SAW) de déformation, de température et de champ magnétique directement intégrés sur substrat métallique pour des applications de contrôle de santé de structures (SHM) a été principalement étudiée. Les travaux développés dans ce sujet de thèse ont mis en relation de multiples disciplines dans lesquelles on retrouve les thématiques de l'acoustique, du traitement de l'état de surface sur pièce métallique, de déformation, de température et de champ magnétique. Les systèmes ont été étudiés théoriquement et expérimentalement puis valorisés dans de nombreuses communications scientifiques.

Dans le chapitre I, il était question dans un premier temps de procéder à l'introduction de la technologie SHM, son importance dans de multiples domaines, à l'exemple du génie civil, de l'ingénierie aérospatiale, et bien d'autres. Les capteurs et méthodes utilisés pour la réalisation de la surveillance de l'intégrité de la structure ont par la suite été présentés. Ce processus de surveillance a pour but d'optimiser le coût de la maintenance et d'assurer la sûreté de la structure. De plus, leur combinaison avec les objets connectés (IoT) qui bénéficient déjà d'un marché en pleine croissance a favorisé leur progression exceptionnelle.

Un large choix de capteurs utilisés sous la forme de réseau, réparti sur toute la structure surveillée et permettant l'acquisition des données liées à son intégrité, est proposé. Ceux-ci se distinguent par un ensemble de caractéristiques innovantes favorisant la surveillance en continu de la structure. Parmi ces capteurs, on retrouve les dispositifs SAW qui présentent un grand nombre de caractéristiques innovantes et pertinentes. En effet, leur sensibilité aux perturbations extérieures leur permet de réaliser des mesures en continu de différents paramètres telles que la température, la pression, la déformation, etc. De plus, ces dispositifs peuvent être passifs (sans batterie) interrogeables à distance (sans fil) et autoprotégés (sans boîtier de protection). Leur utilisation dans la surveillance de santé de structure est déjà largement rependue dans l'évaluation des mesures de vibrations à basse ou haute fréquences dans les émissions acoustiques. Les systèmes SAW de mesure de déformation sont généralement réalisés sur des substrats piézoélectriques. L'une des problématiques se situe dans la fixation de ces dispositifs

sur la pièce sous test par l'utilisation de colles, qui est difficile à maîtriser et entraîne des relaxations de contraintes, rendant ainsi les mesures difficiles à fiabiliser.

Un nouveau type de capteur à ondes acoustiques de surface sans colle directement intégré sur une pièce métallique industrielle a été proposé dans le but de remédier aux problèmes dus à l'utilisation de la colle et d'améliorer la précision de mesure.

Le développement d'un capteur à ondes acoustiques de surface sur substrats métalliques a été abordé dans le chapitre II. Des structures basées sur ZnO/métal en configuration résonateur ont été simulées, élaborées et caractérisées. Après évaluation de plusieurs métaux industriels, le choix du Titane Grade 2 a été fait pour son utilisation courante dans l'industrie, sa disponibilité au sein du laboratoire et ces nombreuses propriétés intéressantes, à savoir sa bonne ductilité, résistance à l'oxydation, à la corrosion et son excellente biocompatibilité.

La réalisation de la structure SAW sur du métal industriel suppose quelques conditions à prendre en compte dont la principale est liée aux propriétés élastiques des métaux industriels qui ne sont pas particulièrement favorables à la propagation des ondes acoustiques. Pour apporter quelques éléments de réponse à ce problème, la simulation par éléments finis sur le logiciel *Comsol Multiphysics* a permis d'évaluer l'épaisseur de la couche de ZnO piézoélectrique appropriée pour la génération et la propagation d'ondes susceptibles de présenter des pertes de propagation possible : une épaisseur *a minima* de l'ordre de la longueur d'onde élastique est souhaitable. De plus, la simulation a servi à l'identification de l'onde élastique de surface de Rayleigh qui sera la principale onde étudiée. Un résonateur SAW avec  $\lambda=8\mu\text{m}$  sur ZnO( $8\mu\text{m}$ ) /Ti (1 mm) a été réalisé expérimentalement par des opérations de microfabrication. Le dépôt de la couche piézoélectrique ZnO s'est fait par pulvérisation cathodique suivie de la fabrication des IDTs en configuration résonateur par procédés de lithographie et de gravure sur une face précédemment polie avec une rugosité de 16 nm de titane pris à l'état brut. Les caractérisations de la structure (DRX, AFM) ont permis d'évaluer l'état de la surface de la structure qui présentait une rugosité de 49,29 nm après dépôt de  $8\mu\text{m}$  de ZnO et une qualité cristalline de la couche déposée d'orientation préférentielle du plan (002) et une désorientation des grains (Rocking curve) de  $4,5^\circ$ . Les caractérisations électriques réalisées sur analyseur de réseau (VNA) ont donné un facteur de qualité de 413, un coefficient de couplage de 0,48% et un facteur de mérite de 1,987. De plus, les sensibilités en fonction des mesurandes

appliqués à savoir la température (de 20° à 450°C), la déformation (de 0 à 1800  $\mu\epsilon$ ) et la traction (de 0 à 650  $\mu\epsilon$ ) ont donné respectivement -46,4 ppm/°C, 1,49 ppm/ $\mu\epsilon$  et 0,22 ppm/  $\mu\epsilon$ . Ces différentes études ont permis de valider la réalisation des dispositifs SAW sur pièce métallique, en plus d'une amélioration de la sensibilité aux déformations. De plus, des tests de déformation en configuration sans-fil ont été réalisés sur la structure, et ceux-ci ont montré une détection du signal fréquentiel à des distances de l'ordre de 14 cm. Cela fait de cette structure un candidat prometteur pour des applications de surveillance de santé de structure dans des environnements difficiles.

Dans le chapitre III, une structure SAW sur substrat métallique basée sur ZnO/Ti a été développée sous une configuration ligne à retard intégrant un code d'identification RF. Elle fait appel à une nouvelle géométrie, à savoir des IDTs connectées dans le but d'améliorer l'amplitude du signal. Pour ce faire, le dispositif SAW ZnO/Ti avec des électrodes en géométrie IDTs connectées sur la couche piézoélectrique de ZnO a été réalisé, caractérisé électriquement, en température, en déformation et en configuration filaire et sans-fil.

La structure ZnO/Ti a été étudiée théoriquement à l'aide du logiciel Comsol Multiphysics par la méthode de simulation COM (Coupling of Mode) et expérimentalement. Dans le but de conserver une grande partie de l'énergie dans la couche piézoélectrique, une épaisseur de 12  $\mu\text{m}$  a été préférée. Le dispositif ZnO(12  $\mu\text{m}$ )/Ti (0,5 mm) a été caractérisé électriquement à l'aide d'un analyseur de réseau (VNA), cela a permis d'observer l'existence de deux types d'ondes, à savoir l'onde acoustique de surface et l'onde longitudinale de volume.

Par la suite, la structure a été soumise aux mêmes tests que la structure résonateur mentionnée dans le chapitre 2. L'évaluation des sensibilités de la structure a été réalisée en température (jusqu'à 300°C), en déformation de flexion trois points (jusqu'à 1800  $\mu\epsilon$ ) et en traction (jusqu'à 900  $\mu\epsilon$ ). Celle-ci a donné respectivement -121 ppm/°C pour l'onde de volume et -43 ppm/°C pour l'onde de surface en température, 2,2 ppm/ $\mu\epsilon$  pour l'onde de surface et de 0,02 ppm/ $\mu\epsilon$  pour l'onde de volume en flexion et 0,42 ppm/ $\mu\epsilon$  pour l'onde de surface en traction. Celles-ci ont montré de très bonnes sensibilités de contraintes de température et de déformation respectivement pour l'onde longitudinale de volume et l'onde de surface. Ces sensibilités élevées présentent la structure ZnO/Ti en configuration IDTs connectés comme étant un candidat très prometteur dans le cadre de la réalisation d'un capteur multi sensoriel en température et en déformation. La structure a par la suite été interrogée à distance. Cette étude

a révélé des détections du signal à des distances de l'ordre de 25 cm. Ces résultats sont très encourageants pour la réalisation de capteurs sans fil adaptés aux applications SHM, comprenant une fonctionnalité d'indentification (RFID)

L'étude de la structure SAW sur substrat métallique a montré de très bonnes propriétés en déformation et en température aussi bien en configuration résonateur qu'en ligne à retard, en plus d'être interrogeable à distance.

Dans le chapitre IV, il a été proposé d'étendre ces concepts à l'étude de capteurs de champ magnétique, basés sur des substrats métalliques magnétoélastiques, dans le but de réaliser un nouveau type de capteur MSAW très sensible.

En effet, les capteurs SAW de champs magnétiques (MSAW) exploitent généralement pour la partie sensible des couches minces magnétoélastiques. Le volume relatif, par rapport à la longueur d'onde, du matériau sensible limite la sensibilité globale du capteur. Dans ce chapitre, il est question de développer des capteurs MSAW directement intégrés sur un substrat métallique magnétoélastiques, ce qui a pour effet d'augmenter l'épaisseur de la couche sensible et de ce fait d'améliorer sa sensibilité.

Les structures ZnO/Nickel et ZnO/Metglas en configuration résonateur ont été élaborées, caractérisées en aimantation et électriquement et sous champ. L'évaluation de la sensibilité sous champ de la structure ZnO(6 $\mu$ m) /Nickel a montré des résultats intéressants et des sensibilités nettement supérieures à celle obtenue par d'autres MSAW utilisant le Nickel comme couche mince sensible ou comme IDT. Cette sensibilité reste cependant encore faible par rapport aux performances visées.

Pour ce faire, l'optimisation de la structure a été réalisée par la prise en compte de deux paramètres, à savoir :

- Le substrat a été remplacé par un ruban métallique amorphe de 1K101 Metglas (F-Si-B) présentant un effet  $\Delta E$  élevé et par conséquent une sensibilité au champ magnétique beaucoup plus grande que celui du Nickel.
- L'épaisseur de la couche piézoélectrique de ZnO a été réduite à 2  $\mu$ m, celle-ci était suffisante pour permettre la génération et la détection du signal dans Metglas. De plus, la baisse de l'épaisseur de ZnO favorise un déplacement de l'onde acoustique plus

profondément dans le matériau magnétoélastique et ainsi rend l'onde plus sensible au champ magnétique.

La prise en compte de ces deux paramètres, nous a permis de procéder à la réalisation de la structure ZnO (2 $\mu$ m)/Metglas (25 $\mu$ m). La caractérisation sous champ de la structure a révélé des sensibilités aux champs magnétiques très élevées de 2793 ppm/mT et de 1482 ppm/mT lorsque le champ magnétique est orienté parallèlement à l'axe de propagation de l'onde acoustique et hors de plan de propagation acoustique respectivement. Cette dernière sensibilité constitue un record. Ces sensibilités font donc partie de ce qui se fait de mieux à l'état de l'art et font ainsi de la structure ZnO/Metglas un candidat très solide dans l'évaluation du champ magnétique dans les domaines de l'énergie, de l'industrie et de l'automobile. En plus, ces dispositifs combinent une simplicité de réalisation avec un coût et une épaisseur totale très faible, une facilité de laminage sur n'importe quelle cible et des valeurs de sensibilité élevées.

Les résultats observés sur la structure SAW intégrée sur une pièce métallique sont très prometteurs et ouvrent un vaste champ de recherche dans un domaine très peu étudié. Cette structure a montré des sensibilités en déformation et en température élevées. De plus, l'exploitation de cette structure pour des applications magnétiques l'a présentée comme candidat sérieux pour les dispositifs MSAW.

La structure SAW sur substrat métallique présente une simplicité dans la conception, une facilité de laminage et fixation sur n'importe quelle cible par les techniques de soudure (laser, arc ou à point), de vissage ou encore en utilisant du nanofoil. En-dehors des applications surveillance des santé de structure, cette structure peut servir pour des applications dans d'autres domaines tels que les milieux biologiques (dans le corps humain), pour les applications utilisant le champ magnétique telles que le contrôle du trafic routier, dans les machines d'imagerie par résonance et de détection d'anomalie magnétique. Les dispositifs sur métal présentés ici ne sont qu'une première étape de cette large nouvelle étude et l'optimisation de ces propriétés physiques ( $Q$ ,  $K^2$ ) par la mise en place de configurations géométriques plus adaptées et des systèmes d'adaptation d'impédance plus appropriés à la structure feront partie des recherches à explorer dans l'avenir.



## Table des figures

|  |    |
|--|----|
| Figure 1. 1 : Évolution du nombre de publications réalisées sur les systèmes SHM durant ces 10 dernières années (analyse obtenue à partir de "Web of Science Core Collection").....  | 8  |
| Figure 1. 2 : Étapes du procédé de surveillance des structures par Rytter [2] .....  | 10 |
| Figure 1. 3 : Principe des capteurs à réseau de Bragg [12]. .....  | 12 |
| Figure 1. 4 : (a) céramiques PZT (Titanio-Zirconate de plomb), (b) films PVDF (Polyfluorure de VinyliDène en PolyVinyliDene Fluoride).....   | 16 |
| Figure 1. 5 : Principe de la piézoélectricité (a) avant sollicitation extérieur les barycentres sont confondus (b) après sollicitation extérieur, les barycentres se séparent : apparition d'un moment dipolaire [46]. .....   | 22 |
| Figure 1. 6 : Illustration du déplacement des particules d'ondes de volume : (a) onde longitudinale, (b) onde de cisaillement [61]. Ondes de surface : (c) onde de Rayleigh [62], (d) onde de Love [61]. .....   | 26 |
| Figure 1. 7 : (a) Excitation des ondes acoustiques de surface à l'aide de peignes interdigités [63].<br>.....  | 27 |
| Figure 1. 8 : Configuration d'un résonateur SAW monoport. ....   | 28 |
| Figure 1. 9 : Configuration d'un résonateur SAW double-ports.....  | 29 |
| Figure 1. 10 : Configuration d'une ligne à retard.....   | 29 |
| Figure 1. 11 : Configuration d'une ligne à retard réfléchive.....  | 30 |
| Figure 1. 12 : Principe du capteur. ....   | 31 |
| Figure 1. 13 : Déplacement acoustique d'une onde de Stoneley dans l'interface tungstène-aluminium [82]......   | 38 |
| Figure 1. 14 : Schémas des structure (a) ILAW et (b) WLAW [83]......   | 39 |
| Figure 1. 15 : Les principaux types de sollicitations.....   | 42 |
| Figure 1. 16 : schématisation des types de rupture de l'adhésif.....   | 43 |
| Figure 1. 17 : (a)Variation de fréquence SAWR mesurée à 24°C en utilisant l'adhésif à base de cyanoacrylate (fréquence de résonance SAWR non contrainte, $f = 195,8\text{MHz}$ ). (b) Variation de fréquence SAWR mesurée 24 °C en utilisant de l'époxy à base d' $\text{Al}_2\text{O}_3$ (fréquence de résonance SAWR non contrainte, $f = 195,2\text{ MHz}$ )[91]..... | 47 |
| Figure 1. 18 : (a) Image du capteur de contrainte SAW intégré sur pièce métallique TC4, (b) photo des réseaux du capteur SAW et (c) photographie SEM des électrodes [99]......   | 51 |

|  |    |
|--|----|
| Figure 1. 19 : variation du signal fréquentiel en fonction (a) de la température [99], (b) de la contrainte de traction [98].                                  | 51 |
| Figure 2. 1 : Structure SAW étudiée  | 57 |
| Figure 2. 2 : Représentation d'un résonateur simple port. Un peigne interdigité au centre entouré de deux réflecteurs en configuration miroir de Bragg.        | 62 |
| Figure 2. 3 : Représentation (a) d'un modèle 2D d'un réseau infini d'électrodes, (b) d'une cellule 2D d'un modèle périodique.                                  | 64 |
| Figure 2. 4 : Représentation (a) d'un modèle 3D d'un réseau infini d'électrodes, (b) d'une cellule 3D d'un modèle périodique.                                  | 64 |
| Figure 2. 5 : modèle 3D d'une cellule antipériodique simulée à l'aide de Comsol Multiphysics.  | 65 |
| Figure 2. 6 : Évolution de l'admittance $Y_{11}$ en fonction de la fréquence obtenue par simulation pour différentes substrats métalliques.                    | 66 |
| Figure 2. 7 : Déplacements particuliers de l'onde de Rayleigh dans la structure ZnO/Ti suivant les trois directions (XYZ) à la fréquence 355 MHz.              | 67 |
| Figure 2. 8 : Plaque de titane.  | 68 |
| Figure 2. 9 : Tronçonneuse Accutom de Struers.   | 68 |
| Figure 2. 10 : Échantillon de titane après découpe.  | 68 |
| Figure 2. 11 : Équipement de pré polissage et de polissage Accutom de Struers.   | 69 |
| Figure 2. 12 : (a) Papiers en carbure de silicium, (b) solutions diamantées.   | 70 |
| Figure 2. 13 : Échantillon de (a) titane, (b) duralumin et (c) acier inoxydable poli.  | 70 |
| Figure 2. 14 : Caractérisation AFM de l'état de surface des métaux (a) Duralumin, (b) Acier inoxydable et (c) Titane.  | 71 |
| Figure 2. 15 : Schéma du principe de pulvérisation d'une cible.  | 72 |
| Figure 2. 16 : Schéma d'une cathode magnétron plane et représentation des lignes de champ magnétiques [104].   | 72 |
| Figure 2. 17 : Bâti de DP650 (Alliance Concept) : (a) vue globale, (b) intérieur de la chambre contenant les cibles, (c) intérieur du sas de chargement [117]. | 73 |
| Figure 2. 18 : Diagramme DRX $\theta$ - $2\theta$ de la structure ZnO(2 $\mu$ m)/Ti.   | 75 |
| Figure 2. 19 : Cartographie 2D de la topographie de la couche de ZnO texturée sur pièce métallique.  | 76 |

|  |    |
|--|----|
| Figure 2. 20 : Schéma du procédé de fabrication d'IDTs par lift-off basé sur l'utilisation d'une bi-couche LOR3A/S1813.....  | 77 |
| Figure 2. 21 : Aligneur MJB4 (SUSS MicroTec). .....  | 78 |
| Figure 2. 22 : Bâti d'évaporation par canon à électrons.....   | 79 |
| Figure 2. 23 :(a) Photo des peignes interdigités en Al de longueur d'onde 8 $\mu\text{m}$ réalisés par lift-off sur substrat métallique en Ti (vue du dessus), (b) image microscopique d'un résonateur ( $\lambda=8\mu\text{m}$ ), (c) zoom du bord englobant les électrodes interdigités et les réflecteurs. .... | 79 |
| Figure 2. 24 : Banc de mesure sous pointe.....   | 80 |
| Figure 2. 25 : Paramètres (a) S11 (dB) expérimentaux et (b)  Y11  des structures sur duralumin et alliage titane. ....   | 83 |
| Figure 2. 26 : Déplacement particulaire total (1D à gauche et 2D à droite) de la structure Al/ZnO/Titane .....   | 84 |
| Figure 2. 27 : (a) Diagramme $\theta$ -2 $\theta$ de la structure ZnO(8 $\mu\text{m}$ ) /Ti (b) de la structure ZnO(8 $\mu\text{m}$ ) /Acier inoxydable. ....  | 85 |
| Figure 2. 28 : Cartographie de la topographie de la couche de ZnO texturée sur pièce métallique (a) 2D, (b) 3D.....  | 85 |
| Figure 2. 29 : Paramètres S11 (dB) des structures (a) Al(150nm) /ZnO(8 $\mu\text{m}$ ) /Ti (1mm), (b) Al(150(nm)/ZnO(8 $\mu\text{m}$ ) /Acier inoxydable (1mm).....  | 86 |
| Figure 2. 30 : Module $ Y_{11} $ de l'admittance expérimentale de la structure Al(150nm) /ZnO(8 $\mu\text{m}$ ) / Ti (1mm).....  | 87 |
| Figure 2. 31 : (a) Circuit BVD équivalent, (b) courbe d'admittance expérimentale (noir) et fit BVD (rouge) de la structure Al(150nm)/ZnO(8 $\mu\text{m}$ )/Alliage de Titane(1mm).....   | 88 |
| Figure 2. 32 : Conductance du dispositif SAW sur Titane en fonction de la fréquence. ....  | 89 |
| Figure 2. 33 : Sensibilité en température : (a) mesure de l'évolution du coefficient de réflexion S11 à des températures allant de 20 à 450°C (b) variation de la fréquence de résonance durant le cycle de chauffage et le refroidissement jusqu'à 450°C. ....  | 90 |
| Figure 2. 34 : (a) Mesure de l'évolution du facteur Q et du coefficient de couplage $K^2$ (b) du facteur de mérite du dispositif SAW en fonction de la température. ....   | 91 |
| Figure 2. 35 : (a) Barreau d'alliage de titane rugueux, (b) couche de ZnO sur le barreau poli, (c) Résonateur réalisé sur la structure ZnO/alliage de titane. ....   | 92 |
| Figure 2. 36 : (a) Principe de wedge bonding (b) Illustration de la connexion entre résonateur et PCB flexible par wedge bonding.....  | 92 |

|  |     |
|--|-----|
| Figure 2. 37 : (a) Illustration du banc de test de flexion trois points sur le barreau structuré ZnO/Alliage de titane, (b) principe de fonctionnement de la flexion adapté de la référence [126].<br>.....  | 94  |
| Figure 2. 38 : Sensibilité en flexion (a) évolution expérimentale du coefficient de réflexion S11 de 0 à 1800 $\mu\epsilon$ (b) variation de la fréquence de résonance du capteur SAW en fonction de la déformation en flexion, (c) variation de la fréquence durant un cycle complet (augmentation et diminution) de la déformation en flexion (d) évolution expérimentale du facteur de couplage (Q) en fonction de la déformation en flexion (0 à 1800 $\mu\epsilon$ ). ..... | 95  |
| Figure 2. 39 : (a) Illustration le Montage de test de traction sur le barreau structuré ZnO/ Ti [130] (b) principe de fonctionnement de la flexion et la traction respectivement. ....   | 97  |
| Figure 2. 40 : Sensibilité en traction : variation de la fréquence en fonction de la déformation de traction.....  | 97  |
| Figure 2. 41 : Variation de la fréquence de résonance du capteur SAW en fonction de la déformation en température. ....  | 98  |
| Figure 2. 42 : Schéma de l'antenne dipôle demi-longueur d'onde (fil en cuivre) .....   | 100 |
| Figure 2. 43 : Dispositif SAW connecté à une antenne dipôle. ....  | 100 |
| Figure 2. 44 : Montage expérimental d'une mesure sans fil d'un dispositif SAW sur titane.  | 101 |
| Figure 2. 45 : Interrogation à distance d'un dispositif SAW sur métal : (a) coefficient de réflexion S11 (dB) du dispositif SAW (b) détection du signal jusqu'à 14 cm.....   | 102 |
| Figure 2. 46 : Mesure à distance des mesurandes (Température et déformation), (a) décalage fréquentiel du signal du dispositif SAW à des températures différentes, (b) variation de la fréquence du dispositif SAW en fonction de la déformation en flexion.....   | 103 |
| <br>   |     |
| Figure 3. 1 :Schéma et principe de fonctionnement d'un système RFID [139]......  | 109 |
| Figure 3. 2 : (a) Tag SAW, (b) Tag SAW à plusieurs rangées de réflecteurs.....   | 111 |
| Figure 3. 3 : Principe de fonctionnement d'un tag RFID SAW.....  | 112 |
| Figure 3. 4 : Configuration IDTs connectés.....  | 114 |
| Figure 3. 5 : Configuration géométrique, (a) structure ID-tag classique, (b) structure IDTs connectés. Les gaps ont des longueurs de $120\lambda$ et $180\lambda$ et les distance centre à centre sont $131\lambda$ et $191\lambda$ (c) Réalisation des dispositifs expérimentaux des deux configurations (IDTs aluminium) sur un substrat de LN-Y128. [145].....  | 114 |

|  |     |
|--|-----|
| Figure 3. 6 : Coefficient de réflexion $S_{11}$ dans le domaine temporel des structures ID-tags et IDTs connectés, (a) résultats expérimentaux sur le LN-Y128, (b) résultats expérimentaux sur la LGS [145].   | 115 |
| Figure 3. 7 : (a) échantillon de Ti poli sur une face, (b) Mesure AFM de la surface du Ti. ..  | 117 |
| Figure 3. 8 : Diagramme de structures (a) ZnO (4 $\mu\text{m}$ ) courbe en rouge et ZnO (8 $\mu\text{m}$ ) courbe en noir sur substrat de titane (0,5 mm) (b) ZnO (10 $\mu\text{m}$ ) courbe en rouge et ZnO (12 $\mu\text{m}$ ) courbe en noir sur substrat de titane (0,5 mm).   | 117 |
| Figure 3. 9 : Réalisation expérimentale de la configuration à trois IDTs connectés.  | 118 |
| Figure 3. 10 : Coefficient de réflexion $S_{11}$ pour des épaisseurs de 8 $\mu\text{m}$ (courbe rouge), 10 $\mu\text{m}$ (courbe noire) et 12 $\mu\text{m}$ (courbe bleue) de couche de ZnO. ....  | 118 |
| Figure 3. 11 : Évolution fréquentielle du signal électrique (a) ( $\lambda = 24 \mu\text{m}$ ) (b) ( $\lambda = 9,2 \mu\text{m}$ ).<br>.....   | 119 |
| Figure 3. 12 : Déplacement des ondes SAW et BAW dans la structure ZnO/Ti .....   | 120 |
| Figure 3. 13 : Coefficient de réflexion $S_{11}$ dans le domaine temporel (a) dispositif avec $\lambda = 24 \mu\text{m}$ (b) dispositif avec $\lambda = 9,2 \mu\text{m}$ .   | 121 |
| Figure 3. 14 : Schéma 2D de la géométrie réalisée sous Comsol Multiphysics. ....   | 122 |
| Figure 3. 15 : (a) Déplacement particulaire théorique de l'onde SAW (b) coefficient de réflexion $S_{11}$ dans le domaine temporel : simulation sur FEM et expérience (c) simulation COM et expérience (d). Coefficient de réflexion $S_{11}$ dans le domaine fréquentiel, simulation COM et expérience.   | 123 |
| Figure 3. 16 : Pertes en amplitude des pics de transmission direct dans la structure ZnO/Ti.   | 124 |
| Figure 3. 17 : Coefficient de réflexion $S_{11}$ dans le domaine temporel du dispositif réalisé (a) avec et (b) sans présence d'électrodes interdigitées.  | 125 |
| Figure 3. 18 : Station sous pointe S-1160, Signatone .....   | 126 |
| Figure 3. 19 : (a) Coefficient de réflexion $S_{11}$ dans le domaine temporel du dispositif réalisé sur titane en fonction de la variation en température. (b) Sensibilité en température des ondes de volume et de surface de la structure ZnO/Ti (les variations de fréquence sont déterminées à phase constante sur le signal fréquentiel correspondant aux premiers pics BAW et SAW).. | 127 |
| Figure 3. 20 : Caractérisation du dispositif en configuration IDTs connectés (Al) sur ZnO/Ti : évolution du niveau de signal et du temps de retard pour les premiers pics BAW et SAW ..  | 127 |
| Figure 3. 21 : (a) Poutre métallique à l'état brut (b) poutre métallique après dépôt de 12 $\mu\text{m}$ de couche de ZnO (c) dispositif SAW réalisé sur la poutre métallique. ....  | 128 |

|   |     |
|---|-----|
| Figure 3. 22 : Illustration du banc de test de flexion trois points sur une barre structuré ZnO (12 $\mu\text{m}$ ) / Ti (1mm).   | 128 |
| Figure 3. 23 : Mesure de l'évolution du coefficient de réflexion S11 (dB) dans le domaine temporel du dispositif (a) et de l'évaluation de la sensibilité des ondes de volume (BAW1) et de surface (SAW1) (b) en fonction de la déformation en flexion.           | 129 |
| Figure 3. 24 : Évaluation de la sensibilité de l'onde de surface (SAW1) en fonction de la traction.   | 130 |
| Figure 3. 25 : Évaluation de la sensibilité de l'onde de surface (SAW1) en fonction de la déformation de traction et de la température.   | 131 |
| Figure 3. 26 : Montage expérimental d'une mesure sans fil d'un dispositif SAW RFID sur métal en configuration IDTs connectés.   | 132 |
| Figure 3. 27 : Interrogation sans fil du dispositif SAW en configuration IDTs connectés : représentation du coefficient de réflexion S <sub>11</sub> dans le domaine temporel.  | 133 |
| Figure 3. 28 : Schéma de principe du banc expérimental (a) signal à la sortie de l'oscilloscope avec une faible largeur de la pulsation du signal d'entrée (b) signal à la sortie de l'oscilloscope avec une largeur de la pulsation du signal d'entrée optimisé. | 134 |
| Figure 3. 29(a) Schéma 2D de la structure IDTs connectés sur LN-Y128 simulé, (b) signal d'impulsion périodique.   | 135 |
| Figure 3. 30 : Déplacement des ondes acoustiques de surface dans le domaine temporel à des temps de (a) 0s, (b) 0,3 $\mu\text{s}$ et (c) 4,6 $\mu\text{s}$ .  | 136 |
| Figure 3. 31 : Réponse en amplitude théorique du dispositif SAW dans le domaine temporel à des durées du burst de 8ns, 27ns et 46ns.  | 137 |
| Figure 3. 32 : Banc expérimental utilisé pour l'amélioration de l'amplitude du signal de sortie de la structure IDTs connectés.   | 138 |
| Figure 3. 33 : Réponse en amplitude expérimental du dispositif SAW dans le domaine temporel à des durées du burst de (a) 15ns, (b) 27ns et 38ns pour les structures LN-Y128 et ZnO/Ti.  | 139 |
| <br>  |     |
| Figure 4. 1 : (a) Cartographie du cerveau par MEG (magnétoencéphalographie) (b) contrôle du trafic [148].   | 145 |
| Figure 4. 2 : – Principe de fonction du capteur à effet Hall [150].   | 147 |
| Figure 4. 3 : Principe de fonctionnement d'un capteur basé sur la magnétorésistance géante  | 148 |

|  |     |
|--|-----|
| Figure 4. 4 : Structure d'un capteur MSAW. Configuration résonateur (a) classique et (b) structure multicouche. Configuration ligne à retard (c) structure classique, (d) structure multicouche et GMI. ....   | 151 |
| Figure 4. 5 : (a) Schéma du résonateur SAW avec IDTs magnétoélastiques, (b) Comportement du résonateur sous l'influence d'un champ magnétique [150].....   | 153 |
| Figure 4. 6 : Courbe représentative de l'évolution de l'effet $\Delta E$ , de la vitesse $v$ et facteur de couplage magnéto-élastique $K_2$ pour une onde longitudinale [150].....   | 153 |
| Figure 4. 7 : Schéma d'un résonateur un port MSAW[20]. ....  | 154 |
| Figure 4. 8 : Schéma du résonateur MSAW multicouches [155].....  | 155 |
| Figure 4. 9 : Schéma illustratif du résonateur MSAW structuré CoFeB/SiO <sub>2</sub> /ZnO/Quartz ST-X+90° [162].....   | 156 |
| Figure 4. 10 : Schéma illustratif d'une structure MSAW structurée TbCo <sub>2</sub> /FeCo sur Quartz ST-X+90° [167].....   | 157 |
| Figure 4. 11 : Schéma illustratif du résonateur MSAW multicouche de composition ZnO/(Fe <sub>90</sub> Co <sub>10</sub> ) <sub>78</sub> Si <sub>12</sub> B <sub>10</sub> /adhésif époxy/substrat support.....   | 157 |
| Figure 4. 12 : Schéma illustratif du résonateur magnétique SAW réalisé sur substrat magnéto-élastique.....   | 159 |
| Figure 4. 13 : (a) Résonateur MSAW sur substrat Nickel, (b) image microscopique du résonateur SAW, (c) Zoom des IDTs interdigités du résonateur ( $\lambda = 10 \mu\text{m}$ ).....  | 160 |
| Figure 4. 14 : Réponse fréquentielle large bande S <sub>11</sub> (a) des structures ZnO(2 $\mu\text{m}$ )/Nickel (courbe en noir), ZnO(6 $\mu\text{m}$ )/Nickel (courbe en rouge), (b) identification des pics fréquents observés dans la structure ZnO(6 $\mu\text{m}$ )/Nickel avec des fréquences H <sub>0</sub> à 262,07 MHz, H <sub>3</sub> à 759,49 MHz et H <sub>5</sub> à 1792,14 MHz..... | 162 |
| Figure 4. 15 : Réponse fréquentielle théorique de l'admittance de la structure ZnO(6 $\mu\text{m}$ )/Nickel, (a) fréquence fondamentale à 265 MHz, (b) fréquence H <sub>3</sub> à 759,49 MHz, (c) fréquence H <sub>5</sub> à 1792,14 MHz, (d) Représentation 2D du déplacement total des particulaires calculées aux fréquences H <sub>0</sub> , H <sub>3</sub> et H <sub>7</sub> .....            | 163 |
| Figure 4. 16 : Sensibilité en température des fréquences H <sub>0</sub> (Fréquence fondamentale), H <sub>3</sub> (Harmonique 3) et H <sub>7</sub> (harmonique 7), (a) étude expérimentale, (b) étude théorique.....  | 163 |
| Figure 4. 17 : Installation expérimentale de magnéto-métrie à échantillon vibrant (GMW 3474) .....   | 164 |
| Figure 4. 18 : Courbe d'aimantation suivant l'axe X (courbe en rouge), l'axe Y (courbe en noir). .....   | 165 |

|  |     |
|--|-----|
| Figure 4. 19 : Configuration de l'installation expérimentale utilisée pour les mesures sous champ magnétique.....  | 165 |
| Figure 4. 20 : (a) Schéma illustratif de l'application du champ suivant la l'axe X. (b) Variation relative des fréquences des pics H0 (262,07 MHz), (c) H3 (759,49 MHz) et (d) H7 (1785 MHz) sous un champ magnétique appliqué suivant l'axe X. ....   | 166 |
| Figure 4. 21 : (a) Schéma illustratif de l'application du champ suivant la l'axe X. (b) Variation relative des fréquences des pics H0 (262,07 MHz), (c) H3 (759,49 MHz) et (d) H7 (1785 MHz) sous un champ magnétique appliqué suivant l'axe des Y. ....   | 167 |
| Figure 4. 22 : (a) pièce de Metglas, (b) pièce de Metglas après dépôt de la couche de ZnO. ....  | 171 |
| Figure 4.23 : (a) structure ZnO/Metglas fixé sur une pièce de silicium, (b) Réalisation expérimentale du résonateur SAW sur ZnO/Metglas.....   | 171 |
| Figure 4. 24 : (a) Réponse fréquentielle expérimentale du signal S11 de la structure ZnO(2 $\mu$ m)/Metglas, (b) Réponse simulée de la structure à la fréquence fondamentale à 420 MHz, (c) Représentation 2D du déplacement total des particules calculé à la fréquence de résonance 420 MHz..... | 172 |
| Figure 4. 25 : Courbe d'aimantation du Metglas dans le plan suivant l'axe X (courbe en rouge) et l'axe Y (courbe en bleue). ....   | 174 |
| Figure 4. 26 : Courbe d'aimantation du Metglas hors du plan (a) aimantation selon Z (direction du champ appliqué) (b) aimantation dans le plan.....  | 175 |
| Figure 4. 27 : Schéma illustratif de l'application du champ suivant la l'axe Z avec rotation de l'échantillon.....   | 176 |
| Figure 4. 28 : Courbe d'aimantation du Metglas hors du plan avec rotation de l'échantillon (a) domaines magnétiques orienté suivant l'axe Z, (b) domaines magnétique orienté dans le plan. ....  | 176 |
| Figure 4. 29 : Variation relative de la fréquence du pic H0 (autour de 422,84 MHz à champ nul) sous champ magnétique appliqué (a) dans le plan suivant l'axe X (b) hors du plan suivant l'axe Z. ....  | 178 |

## Liste des tableaux

---

|   |     |
|---|-----|
| Tableau I. 1 : Synthèse de quelques techniques de détection d'endommagement en SHM ....                   | 19  |
| Tableau I. 2 : Propriétés des matériaux piézoélectriques les plus utilisés.....                           | 23  |
| Tableau I. 3 : Liste des principales ondes de surfaces.....   | 26  |
| Tableau I. 4 : Métaux utilisés comme IDTs et leurs propriétés .....                                       | 27  |
| Tableau I. 5 : Propriétés SAW de quelques matériaux .....   | 34  |
|   |     |
| Tableau II. 1 : Propriétés des électrodes les plus utilisées. ....  | 60  |
| Tableau II. 2 : Propriétés des couches d'AlN et de ZnO piézoélectriques les plus utilisés .....           | 61  |
| Tableau II. 3 : Paramètre de dépôt de la couche d'oxyde de zinc (ZnO).....                                | 74  |
| Tableau II. 4 : paramètre de configuration d'enrésinement. ....   | 77  |
|   |     |
| Tableau III. 1 : Comparaison des différents systèmes RFID .....   | 110 |
| Tableau III. 2 : Paramètre COM utilisés dans la simulation de la structure ZnO/Ti .....                   | 123 |
|   |     |
| Tableau IV. 1 : Tableau de capteurs champ magnétique existant dans le marché [153]. .....                 | 149 |
| Tableau IV. 2 : Tableau de capteurs champ magnétique de la littérature .....                              | 151 |
| Tableau IV. 3 : Comparaison des capteurs magnétique basé sur les ondes SAW et de leurs performances ..... | 179 |



## Références bibliographiques

---

- [1] “Structural Health Monitoring Market Trends, Growth Analysis - 2027,” *Allied Market Research*. <https://www.alliedmarketresearch.com/structural-health-monitoring-market> (accessed Jul. 14, 2021).
- [2] Rytter, A. (1993), “Vibration Based Inspection of Civil Engineering Structures,” *Ph. D. Dissertation, Department of Building Technology and Structural Engineering, Aalborg University, Denmark*.
- [3] J. Wan, H. Cai, and K. Zhou, “Industrie 4.0: Enabling technologies,” in *Proceedings of 2015 International Conference on Intelligent Computing and Internet of Things*, Jan. 2015, pp. 135–140. doi: 10.1109/ICAOT.2015.7111555.
- [4] “Damage Identification and Assessment in Composite Structures - ScienceDirect.” <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705817320325> (accessed Jan. 03, 2022).
- [5] K. Peters, “Fiber-Optic Sensor Principles,” in *Encyclopedia of Structural Health Monitoring*, John Wiley & Sons, Ltd, 2009. doi: 10.1002/9780470061626.shm023.
- [6] G. Rajan and B. G. Prusty, Eds., *Structural Health Monitoring of Composite Structures Using Fiber Optic Methods*. Boca Raton: CRC Press, 2016. doi: 10.1201/9781315369815.
- [7] T. MIZUTANI, Y. OKABE, and N. TAKEDA, “Quantitative evaluation of transverse cracks in carbon fiber reinforced plastic quasi-isotropic laminates with embedded small-diameter fiber Bragg grating sensors,” *Smart mater. struc.*, vol. 12, no. 6, pp. 898–903, 2003.
- [8] M. D. Todd, G. A. Johnson, and S. T. Vohra, “Deployment of a fiber Bragg grating-based measurement system in a structural health monitoring application,” *Smart Mater. Struct.*, vol. 10, no. 3, pp. 534–539, Jun. 2001, doi: 10.1088/0964-1726/10/3/316.
- [9] N. TANAKA, Y. OKABE, and N. TAKEDA, “Temperature-compensated strain measurement using fiber Bragg grating sensors embedded in composite laminates,” *Smart mater. struc.*, vol. 12, no. 6, pp. 940–946, 2003.
- [10] H. Tsuda, N. Toyama, K. Urabe, and J. Takatsubo, “Impact damage detection in CFRP using fiber Bragg gratings,” *Smart Mater. Struct.*, vol. 13, no. 4, pp. 719–724, May 2004, doi: 10.1088/0964-1726/13/4/009.
- [11] Y. Okabe, S. Yashiro, T. Kosaka, and N. Takeda, “Detection of transverse cracks in CFRP composites using embedded fiber Bragg grating sensors,” *Smart Mater. Struct.*, vol. 9, no. 6, pp. 832–838, Nov. 2000, doi: 10.1088/0964-1726/9/6/313.
- [12] “[PDF] Les capteurs de type réseaux de Bragg dans les composites - Free Download PDF.” [https://nanopdf.com/download/les-capteurs-de-type-reseaux-de-bragg-dans-les-composites\\_pdf](https://nanopdf.com/download/les-capteurs-de-type-reseaux-de-bragg-dans-les-composites_pdf) (accessed Jul. 14, 2021).
- [13] S. Yashiro, T. Okabe, N. Toyama, and N. Takeda, “Monitoring damage in holed CFRP laminates using embedded chirped FBG sensors,” *International Journal of Solids and Structures*, vol. 44, no. 2, pp. 603–613, Jan. 2007, doi: 10.1016/j.ijsolstr.2006.05.004.
- [14] C. Nayak, U. Jagadale, and W. Deulkar, *structural health monitoring using PZT a review*. 2018.

- [15] F. G. Baptista, J. V. Filho, and D. J. Inman, "Sizing PZT Transducers in Impedance-Based Structural Health Monitoring," *IEEE Sensors Journal*, vol. 11, no. 6, pp. 1405–1414, Jun. 2011, doi: 10.1109/JSEN.2010.2098865.
- [16] A. Kulakovskiy, B. Chapuis, O. Mesnil, N.-R. Bedreddine, O. D'almeida, and A. Lhémy, "Defect imaging on CFRP and honeycomb composite structures by guided waves generated and detected by a sparse PZT array," Sep. 2017, vol. Isbn: 978-1-60595-330-4. doi: 10.12783/shm2017/13888.
- [17] C. Adreades and F. Ciampa, "Embedded piezoelectric transducers in carbon fibre composites for nonlinear ultrasonic applications: 11th International Workshop on Structural Health Monitoring 2017: Real-Time Material State Awareness and Data-Driven Safety Assurance, IWSHM 2017," *Proceedings of the 11th International Workshop on Structural Health Monitoring, IWSHM 2017*, pp. 739–746, 2017.
- [18] E. LIZÉ, C. Hudin, M. REBILLAT, N. MECHBAL, and C. Bolzmacher, "Numerical and Experimental Study of First Symmetric and Antisymmetric Lamb Wave Modes Generated and Received by Dual-PZTs in a Composite Plate," Stanford, United States, Sep. 2017. doi: 10.12783/shm2017/14053.
- [19] A. J. Brunner, M. Barbezat, Ch. Huber, and P. H. Flüeler, "The potential of active fiber composites made from piezoelectric fibers for actuating and sensing applications in structural health monitoring," *Mat. Struct.*, vol. 38, no. 5, pp. 561–567, Jun. 2005, doi: 10.1007/BF02479548.
- [20] "Continuous sensors for structural health monitoring." <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/5046/0000/Continuous-sensors-for-structural-health-monitoring/10.1117/12.484120.short> (accessed Jan. 03, 2022).
- [21] S. R. Hall and E. F. Precht, "Development of a piezoelectric servoflap for helicopter rotor control," *Smart Mater. Struct.*, vol. 5, no. 1, pp. 26–34, Feb. 1996, doi: 10.1088/0964-1726/5/1/004.
- [22] V. Giurgiutiu and C. A. Rogers, "Recent advancements in the electromechanical (E/M) impedance method for structural health monitoring and NDE," in *Smart Structures and Materials 1998: Smart Structures and Integrated Systems*, Jul. 1998, vol. 3329, pp. 536–547. doi: 10.1117/12.316923.
- [23] V. Giurgiutiu and A. Zagari, "Damage Detection in Thin Plates and Aerospace Structures with the Electro-Mechanical Impedance Method," *Structural Health Monitoring*, vol. 4, no. 2, pp. 99–118, Jun. 2005, doi: 10.1177/1475921705049752.
- [24] P. Malinowski, T. Wandowski, and W. Ostachowicz, "The use of electromechanical impedance conductance signatures for detection of weak adhesive bonds of carbon fibre-reinforced polymer," *Structural Health Monitoring*, vol. 14, no. 4, pp. 332–344, Jul. 2015, doi: 10.1177/1475921715586625.
- [25] C. P. Fritzen, "Vibration-Based Structural Health Monitoring – Concepts and Applications," *Key Engineering Materials*, vol. 293–294, pp. 3–20, 2005, doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.293-294.3.
- [26] D. Montalvao, N. M. M. Maia, and A. M. R. Ribeiro, "A review of vibration-based structural health monitoring with special emphasis on composite materials," Jul. 2006, Accessed: Jan. 03, 2022. [Online]. Available: <http://uhra.herts.ac.uk/handle/2299/8438>
- [27] M. Wevers and K. Lambrechts, "Applications of Acoustic Emission for SHM: A Review," in *Encyclopedia of Structural Health Monitoring*, John Wiley & Sons, Ltd, 2009. doi: 10.1002/9780470061626.shm011.
- [28] M. Burchak, I. R. Farrow, I. P. Bond, C. W. Rowland, and F. Menan, "Acoustic emission

energy as a fatigue damage parameter for CFRP composites,” *International Journal of Fatigue*, vol. 29, no. 3, pp. 457–470, Mar. 2007, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2006.05.009.

[29] D. Valentin and A. R. Bunsell, “A Study of Damage Accumulation in Carbon Fibre Reinforced Epoxy Resin Structures During Mechanical Loading Monitored By Acoustic Emission,” *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 1, no. 4, pp. 314–334, Oct. 1982, doi: 10.1177/073168448200100403.

[30] O. Abraham, Y. Zhang, X. Chapeleau, O. Durand, and V. Tournat, “Monitoring of a Large Cracked Concrete Sample with Non-Linear Mixing of Ultrasonic Coda Waves,” presented at the EWSHM - 7th European Workshop on Structural Health Monitoring, Jul. 2014. Accessed: Jan. 04, 2022. [Online]. Available: <https://hal.inria.fr/hal-01021034>

[31] O. Abraham, J. S. Popovics, L.-M. Cottineau, and O. Durand, “Laser ultrasonics for civil engineering : some applications in development for concrete nondestructive testing,” *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 278, p. 012014, Jan. 2011, doi: 10.1088/1742-6596/278/1/012014.

[32] “Piezoelectric Wafer Embedded Active Sensors for Aging Aircraft Structural Health Monitoring - Victor Giurgiutiu, Andrei Zagrai, Jing Jing Bao, 2002.” <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/147592170200100104> (accessed Jan. 04, 2022).

[33] S. S. Kessler, S. M. Spearing, and C. Soutis, “Damage detection in composite materials using Lamb wave methods,” *Smart Mater. Struct.*, vol. 11, no. 2, pp. 269–278, Apr. 2002, doi: 10.1088/0964-1726/11/2/310.

[34] R. Lammering, U. Gabbert, M. Sinapius, T. Schuster, and P. Wierach, “Lamb-Wave Based Structural Health Monitoring in Polymer Composites,” *Research Topics in Aerospace*, 2018, Accessed: Jan. 04, 2022. [Online]. Available: <http://thuvienso.bvu.edu.vn/handle/TVDHBRVT/16812>

[35] “Vibration-based structural damage identification | Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences.” <https://royalsocietypublishing.org/doi/abs/10.1098/rsta.2000.0717> (accessed Jul. 14, 2021).

[36] “Vibration Based Condition Monitoring: A Review - E. Peter Carden, Paul Fanning, 2004.” <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/1475921704047500> (accessed Jan. 04, 2022).

[37] D. Najm, “Quels capteurs de vibrations pour la surveillance de santé des structures mécaniques” These de doctorat, Paris Est, 2015. Accessed: Jan. 04, 2022. [Online]. Available: <https://www.theses.fr/2015PEST1072>

[38] J. W. Ayres, F. Lalande, Z. Chaudhry, and C. A. Rogers, “Qualitative impedance-based health monitoring of civil infrastructures,” *Smart Mater. Struct.*, vol. 7, no. 5, pp. 599–605, Oct. 1998, doi: 10.1088/0964-1726/7/5/004.

[39] T. Mizutani, Y. Okabe, and N. Takeda, “Quantitative evaluation of transverse cracks in carbon fiber reinforced plastic quasi-isotropic laminates with embedded small-diameter fiber Bragg grating sensors,” *Smart Mater. Struct.*, vol. 12, no. 6, pp. 898–903, Sep. 2003, doi: 10.1088/0964-1726/12/6/006.

[40] F. Matta, A. Rizzo, N. Galati, and A. Nanni, *Overview of Recent Bridge Monitoring Applications using Distributed Brillouin Fiber Optic Sensors*.

[41] J. Chance, G. R. Tomlinson, and K. Worden, “A simplified approach to the numerical and experimental modeling of the dynamics of a cracked beam,” in *Proceedings of 12th International Modal Analysis Conference*, 1994, pp. 778–785.

[42] D. R. Perchard, “Crack detection in slender cantilever plates using modal analysis,” Apr. 1993,

Accessed: Jan. 05, 2022. [Online]. Available: <https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/7232725>

- [43] G. Kovacs, G. W. Lubking, M. J. Vellekoop, and A. Venema, "Love waves for (bio)-chemical sensing in liquids," in *IEEE 1992 Ultrasonics Symposium Proceedings*, Oct. 1992, pp. 281–285 vol.1. doi: 10.1109/ULTSYM.1992.275995.
- [44] C. McMullan, H. Mehta, E. Gizeli, H. Mehta, and C. R. Lowe, "Modelling of the mass sensitivity of the Love wave device in the presence of a viscous liquid," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 33, no. 23, pp. 3053–3059, Nov. 2000, doi: 10.1088/0022-3727/33/23/307.
- [45] A. Ballato, "Piezoelectricity: old effect, new thrusts," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 42, no. 5, pp. 916–926, Sep. 1995, doi: 10.1109/58.464826.
- [46] "Développement par compression de l'électricité polaire dans les cristaux hémicédrogones à faces inclinées - Persée." [https://www.persee.fr/doc/bulmi\\_0150-9640\\_1880\\_num\\_3\\_4\\_1564](https://www.persee.fr/doc/bulmi_0150-9640_1880_num_3_4_1564) (accessed Jul. 14, 2021).
- [47] G. Lippmann, "Principe de la conservation de l'électricité, ou second principe de la théorie des phénomènes électriques," *J. Phys. Theor. Appl.*, vol. 10, no. 1, pp. 381–394, 1881, doi: 10.1051/jphysap:0188100100038100.
- [48] C. Zimmermann, D. Rebière, C. Déjous, J. Pistré, E. Chastaing, and R. Planade, "A love-wave gas sensor coated with functionalized polysiloxane for sensing organophosphorus compounds," *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 76, no. 1, pp. 86–94, Jun. 2001, doi: 10.1016/S0925-4005(01)00578-0.
- [49] C. K. Campbell, *Surface Acoustic Wave Devices for Mobile and Wireless Communications, Four-Volume Set*. San Diego: Academic Press, 1998.
- [50] D. Ciplys and R. Rimeika, "Electromechanical coupling coefficient for surface acoustic waves in proton-exchanged 128°-rotated Y-cut lithium niobate," *Applied Physics Letters*, vol. 73, pp. 2417–2419, Nov. 1998, doi: 10.1063/1.122452.
- [51] M. K. M. Kadota and M. M. M. Minakata, "Piezoelectric Properties of ZnO Films on a Sapphire Substrate Deposited by an RF-Magnetron-Mode ECR Sputtering System," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 37, no. 5S, p. 2923, May 1998, doi: 10.1143/JJAP.37.2923.
- [52] J. Cho, M. Anderson, R. Richards, D. Bahr, and C. Richards, "Optimization of electromechanical coupling for a thin-film PZT membrane: I. Modeling," *J. Micromech. Microeng.*, vol. 15, no. 10, pp. 1797–1803, Aug. 2005, doi: 10.1088/0960-1317/15/10/002.
- [53] "Theoretical and experimental investigation of gigahertz-band, temperature-compensated electromechanical coupling configurations based on AlN films: Applied Physics Letters: Vol 92, No 3." <https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.2837179> (accessed Jul. 14, 2021).
- [54] K. M. Lakin, "TFR Technologies, Inc. 6/1/2001 11:19 AM Thin Film Resonators and High Frequency Filters."
- [55] O. Legrani, O. Elmazria, S. Zhgoon, P. Pigeat, and A. Bartaszyte, "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.
- [56] P. N. T. Wells, "Lord Rayleigh: John William Strutt, third Baron Rayleigh," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 54, no. 3, pp. 591–596, Mar. 2007, doi: 10.1109/TUFFC.2007.281.
- [57] Lord Rayleigh, "On Waves Propagated along the Plane Surface of an Elastic Solid,"

*Proceedings of the London Mathematical Society*, vol. s1-17, no. 1, pp. 4–11, 1885, doi: 10.1112/plms/s1-17.1.4.

[58] “dispersion in seismic surface waves | geophysics.” <https://library.seg.org/doi/abs/10.1190/1.1437652> (accessed Jul. 14, 2021).

[59] “Problems Geodynamics Being Essay by Love - AbeBooks.” <https://www.abebooks.com/book-search/title/problems-geodynamics-being-essay/author/love/> (accessed Jul. 14, 2021).

[60] Y. V. Gulyaev, “Review of shear surface acoustic waves in solids,” *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 45, no. 4, pp. 935–938, Jul. 1998, doi: 10.1109/58.710563.

[61] D. ROYER and E. Dieulesaint, *Elastic Waves in Solids I: Free and Guided Propagation*. Springer Science & Business Media, 1999.

[62] R. M. White and F. W. Voltmer, “Direct piezoelectric coupling to surface elastic waves,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 7, no. 12, pp. 314–316, Dec. 1965, doi: 10.1063/1.1754276.

[63] R. Daniel, “Ondes élastiques dans les solides vol.2,” Jan. 2017, Accessed: Sep. 13, 2021. [Online]. Available: <http://archives.umc.edu.dz/handle/123456789/119070>

[64] D. P. Morgan, *Surface-Wave Devices for Signal Processing*. Elsevier Science, 1991.

[65] H. Ieki and M. Kadota, “ZnO thin films for high frequency SAW devices,” in *1999 IEEE Ultrasonics Symposium. Proceedings. International Symposium (Cat. No.99CH37027)*, Oct. 1999, vol. 1, pp. 281–289 vol.1. doi: 10.1109/ULTSYM.1999.849403.

[66] P. Nicolay, “Les capteurs à ondes élastiques de surface : applications pour la mesure des basses pressions et des hautes températures,” phdthesis, Université Henri Poincaré - Nancy 1, 2007. Accessed: Jul. 14, 2021. [Online]. Available: <https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01748241>

[67] “Gigahertz-band electroacoustic devices based on AlN thick films sputtered on Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> at low temperature: Applied Physics Letters: Vol 83, No 23.” <https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.1631739> (accessed Jul. 14, 2021).

[68] “Third-Order Elastic Coefficients of Quartz: Journal of Applied Physics: Vol 37, No 1.” <https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.1707824> (accessed Jul. 14, 2021).

[69] “Third-order elastic constants of lithium niobate: Journal of Applied Physics: Vol 44, No 9.” <https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.1662881?journalCode=jap> (accessed Jul. 14, 2021).

[70] C. S. Hartmann and L. T. Claiborne, “Fundamental Limitations on Reading Range of Passive IC-Based RFID and SAW-Based RFID,” in *2007 IEEE International Conference on RFID*, Mar. 2007, pp. 41–48. doi: 10.1109/RFID.2007.346148.

[71] V. P. Plessky and L. M. Reindl, “Review on SAW RFID tags,” *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 57, no. 3, pp. 654–668, Mar. 2010, doi: 10.1109/TUFFC.2010.1462.

[72] K. Onishi *et al.*, “A novel temperature compensation method for SAW devices using direct bonding techniques,” in *1997 IEEE Ultrasonics Symposium Proceedings. An International Symposium (Cat. No.97CH36118)*, Oct. 1997, vol. 1, pp. 227–230 vol.1. doi: 10.1109/ULTSYM.1997.663015.

[73] “Temperature-compensated PbTiO<sub>3</sub> ceramics for surface acoustic wave applications: Applied Physics Letters: Vol 35, No 8.” <https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.91220> (accessed Jul. 15, 2021).

- [74] A. Talbi *et al.*, “ZnO/quartz structure potentiality for surface acoustic wave pressure sensor,” *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 128, no. 1, pp. 78–83, Mar. 2006, doi: 10.1016/j.sna.2006.01.008.
- [75] “Surface Acoustic Wave Duplexer Composed of SiO<sub>2</sub>/Cu Electrode/LiNbO<sub>3</sub> Structure Having Convex and Concave Portions - IOPscience.” <https://iopscience.iop.org/article/10.1143/JJAP.48.07GG02/meta> (accessed Jul. 15, 2021).
- [76] G. Kovacs *et al.*, “A SAW duplexer with superior temperature characteristics for US-PCS,” in *IEEE Ultrasonics Symposium, 2004*, Aug. 2004, vol. 2, pp. 974–977 Vol.2. doi: 10.1109/ULTSYM.2004.1417923.
- [77] T. Omori, A. Kobayashi, Y. Takagi, K. Hashimoto, and M. Yamaguchi, “Fabrication of SHF range SAW devices on AlN/Diamond-substrate,” in *2008 IEEE Ultrasonics Symposium*, Nov. 2008, pp. 196–200. doi: 10.1109/ULTSYM.2008.0048.
- [78] H. Nakahata *et al.*, “SAW devices on diamond,” in *1995 IEEE Ultrasonics Symposium. Proceedings. An International Symposium*, Nov. 1995, vol. 1, pp. 361–370 vol.1. doi: 10.1109/ULTSYM.1995.495599.
- [79] H. Nakahata, A. Hachigo, K. Itakura, S. Fujii, and S. Shikata, “SAW resonators of SiO<sub>2</sub>/ZnO/diamond structure in GHz range,” in *Proceedings of the 2000 IEEE/EIA International Frequency Control Symposium and Exhibition (Cat. No.00CH37052)*, Jun. 2000, pp. 315–320. doi: 10.1109/FREQ.2000.887373.
- [80] M. F. Lewis, “On Rayleigh Waves and Related Propagating Acoustic Waves,” in *Rayleigh-Wave Theory and Application*, Berlin, Heidelberg, 1985, pp. 37–58. doi: 10.1007/978-3-642-82621-4\_4.
- [81] “Legrani - Etude, élaboration et caractérisation d’hétérostru.pdf.” Accessed: Jul. 15, 2021. [Online]. Available: [http://docnum.univ-lorraine.fr/public/DDOC\\_T\\_2012\\_0186\\_LEGRANI.pdf](http://docnum.univ-lorraine.fr/public/DDOC_T_2012_0186_LEGRANI.pdf)
- [82] “Handling of SAW actuated droplets for biological applications: La Houille Blanche: Vol 92, No 3.” <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1051/lhb%3A200603003> (accessed Jul. 15, 2021).
- [83] K. Bhattacharjee, A. Shvetsov, and S. Zhgoon, “Packageless SAW Devices with Isolated Layer Acoustic Waves (ILAW) and Waveguiding Layer Acoustic Waves (WLAW),” in *2007 IEEE International Frequency Control Symposium Joint with the 21st European Frequency and Time Forum*, May 2007, pp. 135–140. doi: 10.1109/FREQ.2007.4319049.
- [84] BRETTON, Chantal et VILLOUTREIX, Gilbert., “Familles d’adhésifs et caractérisation d’un collage structural.” *Techniques de l’ingénieur. Matériaux fonctionnels*, vol. 1, 2005.
- [85] P. Davies *et al.*, “Influence of adhesive bond line thickness on joint strength,” *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 29, no. 7, pp. 724–736, Oct. 2009, doi: 10.1016/j.ijadhadh.2009.03.002.
- [86] [www.unitheque.com](http://www.unitheque.com), “Science et technologie du collage,” *Unithèque*. <https://www.unitheque.com/science-technologie-collage/presses-polytechniques-universitaires-romandes/Livre/33878> (accessed Jul. 15, 2021).
- [87] R. Hauser, L. Reindl, and J. Biniash, “High-temperature stability of LiNbO<sub>3</sub> based SAW devices,” in *IEEE Symposium on Ultrasonics, 2003*, Oct. 2003, vol. 1, pp. 192–195 Vol.1. doi: 10.1109/ULTSYM.2003.1293386.
- [88] “Phys. Rev. 80, 712 (1950) - Piezoelectric Constants of Alpha- and Beta-Quartz at Various Temperatures.” <https://journals.aps.org/pr/abstract/10.1103/PhysRev.80.712> (accessed Jul. 15, 2021).

- [89] M. Pereira da Cunha, R. J. Lad, T. Moonlight, G. Bernhardt, and D. J. Frankel, “High temperature stability of langasite surface acoustic wave devices,” in *2008 IEEE Ultrasonics Symposium*, Nov. 2008, pp. 205–208. doi: 10.1109/ULTSYM.2008.0050.
- [90] H. Takeda, J. Yamaura, T. Hoshina, and T. Tsusumi, “Growth, structure and electrical properties of aluminum substituted langasite family crystals,” *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 18, no. 9, p. 092020, Sep. 2011, doi: 10.1088/1757-899X/18/9/092020.
- [91] A. Maskay and M. Pereira da Cunha, “High-temperature static strain langasite SAW sensor: Temperature compensation and numerical calibration for direct strain reading,” *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 259, pp. 34–43, Jun. 2017, doi: 10.1016/j.sna.2017.03.023.
- [92] L. Shu, B. Peng, Z. Yang, R. Wang, S. Deng, and X. Liu, “High-Temperature SAW Wireless Strain Sensor with Langasite,” *Sensors*, vol. 15, no. 11, pp. 28531–28542, 2015, doi: 10.3390/s151128531.
- [93] 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, doi: 10.1109/JSEN.2011.2181160.
- [94] “Flexible surface acoustic wave strain sensor based on single crystalline LiNbO<sub>3</sub> thin film: Applied Physics Letters: Vol 112, No 9.” <https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.5021663> (accessed Jul. 15, 2021).
- [95] W. Wang, X. Xue, S. Fan, M. Liu, Y. Liang, and M. Lu, “Development of a wireless and passive temperature-compensated SAW strain sensor,” *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 308, p. 112015, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.sna.2020.112015.
- [96] P. Nicolay, J. Bardong, H. Chambon, and P. Dufilie, “Glue-Less and Robust Assembly Method for SAW Strain Sensors,” Oct. 2018, pp. 1–4. doi: 10.1109/ULTSYM.2018.8580224.
- [97] L. Shu, B. Peng, Y. Cui, D. Gong, X. Liu, and W. Zhang, “High temperature characteristics of AlN film SAW sensor integrated with TC4 alloy substrate,” *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 249, pp. 57–61, Oct. 2016, doi: 10.1016/j.sna.2016.08.018.
- [98] L. Shu *et al.*, “The investigation of integrated SAW strain sensor based on AlN/TC4 structure,” *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 293, pp. 14–20, Jul. 2019, doi: 10.1016/j.sna.2019.04.012.
- [99] L. Shu *et al.*, “The investigation of integrated SAW strain sensor based on AlN/TC4 structure,” *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 293, pp. 14–20, Jul. 2019, doi: 10.1016/j.sna.2019.04.012.
- [100] F. Bartoli, “Croissance de films minces piézoélectriques de ScxAl<sub>1-x</sub>N par pulvérisation cathodique pour la réalisation de dispositifs à ondes élastiques confinées, destinés à des applications haute-température,” phdthesis, CentraleSupélec, 2019. Accessed: Mar. 14, 2022. [Online]. Available: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02872215>
- [101] D. R. Lide, *CRC Handbook of Chemistry and Physics, 85th Edition*. CRC Press, 2004.
- [102] J. Temmyo and S. Yoshikawa, “Aluminum Evaporation Conditions for SAW Interdigital Transducers,” *IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics*, vol. 27, no. 4, pp. 219–220, Jul. 1980, doi: 10.1109/T-SU.1980.31177.
- [103] C. K. Campbell, *Surface Acoustic Wave Devices for Mobile and Wireless Communications, Four-Volume Set*. San Diego: Academic Press, 1998.
- [104] O. Legrani, “Étude, élaboration et caractérisation d’hétérostructures «auto-protégées» à base d’ondes élastiques,” phdthesis, Université de Lorraine, 2012. Accessed: Jul. 23, 2021. [Online].

Available: <https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01749602>

- [105] J. Hornsteiner, E. Born, G. Fischerauer, and E. Riha, "Surface acoustic wave sensors for high-temperature applications," in *Proceedings of the 1998 IEEE International Frequency Control Symposium (Cat. No.98CH36165)*, May 1998, pp. 615–620. doi: 10.1109/FREQ.1998.717964.
- [106] T. Kim, J. Kim, R. Dalmau, R. Schlessler, E. Preble, and X. Jiang, "High-temperature electromechanical characterization of AlN single crystals," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 62, no. 10, pp. 1880–1887, Oct. 2015, doi: 10.1109/TUFFC.2015.007252.
- [107] "Flexible surface acoustic wave resonators built on disposable plastic film for electronics and lab-on-a-chip applications | Scientific Reports." <https://www.nature.com/articles/srep02140> (accessed Jul. 23, 2021).
- [108] H. Ieki and M. Kadota, "ZnO thin films for high frequency SAW devices," in *1999 IEEE Ultrasonics Symposium. Proceedings. International Symposium (Cat. No.99CH37027)*, Oct. 1999, vol. 1, pp. 281–289 vol.1. doi: 10.1109/ULTSYM.1999.849403.
- [109] C. Floer *et al.*, "AlN/ZnO/LiNbO<sub>3</sub> Packageless Structure as a Low-Profile Sensor for Potential On-Body Applications," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 65, no. 10, pp. 1925–1932, Oct. 2018, doi: 10.1109/TUFFC.2018.2839262.
- [110] *Propagation Et Generation Des Ondes Elastiques*. Ed. Techniques Ingénieur.
- [111] K. Tsubouchi, K. Sugai, and N. Mikoshiba, "AlN Material Constants Evaluation and SAW Properties on AlN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and AlN/Si," in *1981 Ultrasonics Symposium*, Oct. 1981, pp. 375–380. doi: 10.1109/ULTSYM.1981.197646.
- [112] G. Kovacs, M. Anhorn, H. E. Engan, G. Visintini, and C. C. W. Ruppel, "Improved material constants for LiNbO<sub>3</sub> and LiTaO<sub>3</sub>," in *IEEE Symposium on Ultrasonics*, Dec. 1990, pp. 435–438 vol.1. doi: 10.1109/ULTSYM.1990.171403.
- [113] S. K. Ghandhi, R. J. Field, and J. R. Shealy, "Highly oriented zinc oxide films grown by the oxidation of diethylzinc," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 37, no. 5, pp. 449–451, Sep. 1980, doi: 10.1063/1.91960.
- [114] G. A. Nyberg and R. A. Buhrman, "Summary Abstract: Preparation and optical properties of reactively evaporated VO<sub>2</sub> thin films," *Journal of Vacuum Science & Technology A*, vol. 2, no. 2, pp. 301–302, Apr. 1984, doi: 10.1116/1.572587.
- [115] M. B. Assouar, M. El Hakiki, O. Elmazria, P. Alnot, and C. Tiusan, "Synthesis and microstructural characterisation of reactive RF magnetron sputtering AlN films for surface acoustic wave filters," *Diamond and Related Materials*, vol. 13, no. 4, pp. 1111–1115, Apr. 2004, doi: 10.1016/j.diamond.2003.11.064.
- [116] M. A. L. Johnson, S. Fujita, W. H. Rowland, W. C. Hughes, J. W. Cook, and J. F. Schetzina, "MBE growth and properties of ZnO on sapphire and SiC substrates," *JEM*, vol. 25, no. 5, pp. 855–862, May 1996, doi: 10.1007/BF02666649.
- [117] C. Floer, "Capteurs à ondes élastiques confinées, sans fil et étirables: application à l'électronique imperceptible sur peau," These de doctorat, Université de Lorraine, 2019. Accessed: Mar. 22, 2022. [Online]. Available: <https://www.theses.fr/2019LORR0188>
- [118] F. Bartoli, "Croissance de films minces piézoélectriques de SexAl<sub>1-x</sub>N par pulvérisation cathodique pour la réalisation de dispositifs à ondes élastiques confinées, destinés à des applications haute-température," phdthesis, CentraleSupélec, 2019. Accessed: Jul. 23, 2021. [Online]. Available:

<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02872215>

- [119] K. Hashimoto, “Resonators,” in *Surface Acoustic Wave Devices in Telecommunications: Modelling and Simulation*, K. Hashimoto, Ed. Berlin, Heidelberg: Springer, 2000, pp. 123–161. doi: 10.1007/978-3-662-04223-6\_5.
- [120] M. B. Assouar, “Etude de dispositifs à ondes acoustiques de surface (SAW) à structure multicouche nitrure d’aluminium diamant : croissance de matériaux en couches minces et technologie de réalisation,” These de doctorat, Nancy 1, 2001. Accessed: Jul. 23, 2021. [Online]. Available: <https://www.theses.fr/2001NAN10202>
- [121] G. Bu, D. Ciplys, M. Shur, L. J. Schowalter, S. Schujman, and R. Gaska, “Surface acoustic wave velocity in single-crystal AlN substrates,” *IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Control*, vol. 53, no. 1, pp. 251–254, Jan. 2006, doi: 10.1109/tuffc.2006.1588412.
- [122] 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)*, Apr. 2016, pp. 1–4. doi: 10.1109/EFTF.2016.7477825.
- [123] K. Saravanakumar *et al.*, “The influence of substrate temperature on the electrical properties of zno films prepared by the rf magnetron sputtering technique,” *NANO*, vol. 03, no. 06, pp. 469–476, Dec. 2008, doi: 10.1142/S1793292008001362.
- [124] A. Khudiar, “Fabrication temperature sensing by using ZnO Nanoparticles,” *Journal of THIQAR SCIENCE ISSN 1991- 8690*, vol. 4, p. 75, Jul. 2013.
- [125] S. Richa, “Investigation on Temperature Sensing of Nanostructured Zinc Oxide Synthesized via Oxalate Route,” *Journal of Sensor Technology*, vol. 2012, Mar. 2012, doi: 10.4236/jst.2012.21002.
- [126] K. Eun, K. J. Lee, K. K. Lee, S. S. Yang, and S.-H. Choa, “Highly sensitive surface acoustic wave strain sensor for the measurement of tire deformation,” *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, vol. 17, no. 6, pp. 699–707, Jun. 2016, doi: 10.1007/s12541-016-0087-8.
- [127] X. Lü, W. Lu, and C. Zhu, “Compensated SAW Yarn Tension Sensor,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 63, no. 12, pp. 3162–3168, Dec. 2014, doi: 10.1109/TIM.2014.2328452.
- [128] X. Lü and W. Lu, “Building output–input function of catalytic combustion sensor to diesel vapor,” *Measurement*, vol. 43, no. 4, pp. 596–602, May 2010, doi: 10.1016/j.measurement.2010.01.003.
- [129] R. Stoney, D. Geraghty, and G. E. O’Donnell, “Characterization of Differentially Measured Strain Using Passive Wireless Surface Acoustic Wave (SAW) Strain Sensors,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 14, no. 3, pp. 722–728, Mar. 2014, doi: 10.1109/JSEN.2013.2285722.
- [130] K. B. Hafsia, “Identification des micro-mécanismes de déformation du PET amorphe et semi-cristallin in situ au cours d’un essai mécanique,” phdthesis, Université de Lorraine, 2016. Accessed: Apr. 14, 2022. [Online]. Available: <https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01752357>
- [131] P. Mengue *et al.*, “Direct integration of SAW resonators on industrial metal for structural health monitoring applications,” *Smart Mater. Struct.*, vol. 30, no. 12, p. 125009, Oct. 2021, doi: 10.1088/1361-665X/ac2ef4.
- [132] H. Stockman, “Communication by Means of Reflected Power,” *Proceedings of the IRE*, vol. 36, no. 10, pp. 1196–1204, Oct. 1948, doi: 10.1109/JRPROC.1948.226245.
- [133] OECD, *L’économie de la sécurité*. OECD Publishing, 2004.

- [134] M. R. Rieback, B. Crispo, and A. S. Tanenbaum, "The evolution of RFID security," *IEEE Pervasive Computing*, vol. 5, no. 1, pp. 62–69, Jan. 2006, doi: 10.1109/MPRV.2006.17.
- [135] "RFID technology market by application worldwide 2014-2025," *Statista*. <https://www.statista.com/statistics/781314/global-rfid-technology-market-revenue-by-application/> (accessed Mar. 02, 2022).
- [136] "Réalisation à l'aide d'une plateforme NI PXI-e d'un lecteur RFID reconfigurable pour des applications en milieux hostiles - Cognitio." <http://depot-e.uqtr.ca/id/eprint/7987/> (accessed Sep. 22, 2021).
- [137] R. Want, "An introduction to RFID technology," *IEEE Pervasive Computing*, vol. 5, no. 1, pp. 25–33, Jan. 2006, doi: 10.1109/MPRV.2006.2.
- [138] M. Bolic, D. Simplot-Ryl, and I. Stojmenovic, *RFID Systems: Research Trends and Challenges*. John Wiley & Sons, 2010.
- [139] Hauet, J. P., "L'identification par radiofréquence (RFID) Techniques et perspectives: Les générateurs électrochimiques.," p. (10), 79-88., 2006.
- [140] J. Laurent and H. Nono Wouafo, "Contrôle de capteurs bio sourcés par liaison RFID," Jul. 2011. Accessed: Sep. 22, 2021. [Online]. Available: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00662690>
- [141] G. Pope, T. E. Myers, S. Kaye, and J. Burchell, "Shelf-life monitoring sensor-transponder system," US7495558B2, Feb. 24, 2009 Accessed: Sep. 22, 2021. [Online]. Available: <https://patents.google.com/patent/US7495558B2/en>
- [142] I. J. Forster, "RFID temperature device and method," US6847912B2, Jan. 25, 2005 Accessed: Sep. 22, 2021. [Online]. Available: <https://patents.google.com/patent/US6847912B2/en>
- [143] H. Liu, M. Bolic, A. Nayak, and I. Stojmenovi, "Integration of RFID and Wireless Sensor Networks," in *Encyclopedia on Ad Hoc and Ubiquitous Computing*, WORLD SCIENTIFIC, 2009, pp. 319–347. doi: 10.1142/9789812833495\_0013.
- [144] L. Reindl, A. Pohl, G. Scholl, and R. Weigel, "SAW-Based radio sensor systems," *Sensors Journal, IEEE*, vol. 1, pp. 69–78, Jul. 2001, doi: 10.1109/JSEN.2001.923589.
- [145] C. Floer *et al.*, "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, Jun. 2020, doi: 10.1109/TUFFC.2019.2943310.
- [146] N. Naumenko and L. Solie, "Optimal cuts of langasite, La/sub 3/Ga/sub 5/SiO/sub 14/ for SAW devices," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 48, no. 2, pp. 530–537, Mar. 2001, doi: 10.1109/58.911736.
- [147] C. Floer *et al.*, "AlN/ZnO/LiNbO<sub>3</sub> Packageless Structure as a Low-Profile Sensor for Potential On-Body Applications," *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelectr., Freq. Contr.*, vol. 65, no. 10, pp. 1925–1932, Oct. 2018, doi: 10.1109/TUFFC.2018.2839262.
- [148] "Volvo testar magneter i vägen för självkörande bilar," *Teknikens Värld*. <https://www.teknikensvarld.se/nyheter/miljo-och-teknik/volvo-testar-magneter-i-vagen-for-sjalvkorande-bilar-116931/> (accessed Feb. 23, 2022).
- [149] C. Coillot, J. Moutoussamy, R. Lebourgeois, S. Ruocco, and G. Chanteur, "Principle and Performance of a Dual-Band Search Coil Magnetometer: A New Instrument to Investigate Fluctuating Magnetic Fields in Space," *IEEE Sensors Journal*, vol. 10, no. 2, pp. 255–260, Feb. 2010, doi: 10.1109/JSEN.2009.2030977.

- [150] H. Mishra, “Magnetic field sensor based on micro-structured magnetoelastic surface acoustic waves devices,” phdthesis, Université de Lorraine, 2019. Accessed: Feb. 23, 2022. [Online]. Available: <https://hal.univ-lorraine.fr/tel-03137749>
- [151] “The Nobel Prize in Physics 2007,” *NobelPrize.org*. <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2007/summary/> (accessed Feb. 23, 2022).
- [152] P. Ripka, *Magnetic Sensors and Magnetometers, Second Edition*. Artech House, 2021.
- [153] M. G. Beghi, *Modeling and Measurement Methods for Acoustic Waves and for Acoustic Microdevices*. BoD – Books on Demand, 2013.
- [154] M. Kadota, S. Ito, Y. Ito, T. Hada, and K. Okaguchi, “Magnetic Sensor Based on Surface Acoustic Wave Resonators,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 50, no. 7S, p. 07HD07, Jul. 2011, doi: 10.1143/JJAP.50.07HD07.
- [155] H. Mishra *et al.*, “Temperature compensated magnetic field sensor based on love waves,” *Smart Mater. Struct.*, vol. 29, no. 4, p. 045036, Mar. 2020, doi: 10.1088/1361-665X/ab7857.
- [156] 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, doi: 10.1063/1.4868530.
- [157] M. Elhosni *et al.*, “Experimental Study of Multilayer Piezo-magnetic SAW Delay Line for Magnetic Sensor,” *Procedia Engineering*, vol. 120, pp. 870–873, Jan. 2015, doi: 10.1016/j.proeng.2015.08.743.
- [158] H. Hauser, R. Steindl, C. Hausleitner, A. Pohl, and J. Nicolics, “Wirelessly interrogable magnetic field sensor utilizing giant magneto-impedance effect and surface acoustic wave devices,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 49, no. 3, pp. 648–652, Jun. 2000, doi: 10.1109/19.850409.
- [159] H. Mishra *et al.*, “Intrinsic versus shape anisotropy in micro-structured magnetostrictive thin films for magnetic surface acoustic wave sensors,” *Smart Mater. Struct.*, vol. 28, no. 12, p. 12LT01, Nov. 2019, doi: 10.1088/1361-665X/ab522d.
- [160] W. Wang, Y. Jia, X. Xue, Y. Liang, and Z. Du, “Grating-patterned FeCo coated surface acoustic wave device for sensing magnetic field,” *AIP Advances*, vol. 8, no. 1, p. 015134, Jan. 2018, doi: 10.1063/1.5012579.
- [161] A. Kittmann *et al.*, “Wide Band Low Noise Love Wave Magnetic Field Sensor System,” *Sci Rep*, vol. 8, no. 1, Art. no. 1, Jan. 2018, doi: 10.1038/s41598-017-18441-4.
- [162] Y. Yang *et al.*, “Wireless Multifunctional Surface Acoustic Wave Sensor for Magnetic Field and Temperature Monitoring,” *Advanced Materials Technologies*, vol. 7, no. 3, p. 2100860, 2022, doi: 10.1002/admt.202100860.
- [163] P. Smole *et al.*, “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*, May 2003, pp. 903–906. doi: 10.1109/FREQ.2003.1275210.
- [164] M. Yamaguchi, K. Hashimoto, H. Kogo, and M. Naoe, “Variable SAW delay line using amorphous TbFe<sub>2</sub>film,” *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 16, no. 5, pp. 916–918, Sep. 1980, doi: 10.1109/TMAG.1980.1060738.
- [165] M. Kadota and S. Ito, “Sensitivity of Surface Acoustic Wave Magnetic Sensors Composed of Various Ni Electrode Structures,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 51, no. 7S, p. 07GC21, Jul. 2012, doi:

10.1143/JJAP.51.07GC21.

[166] Y. Yang *et al.*, “Enhanced Performance Love Wave Magnetic Field Sensors with Temperature Compensation,” *IEEE Sensors Journal*, pp. 1–1, 2020, doi: 10.1109/JSEN.2020.2998826.

[167] A. Mazzamurro *et al.*, “Giant Magnetoelastic Coupling in a Love Acoustic Waveguide Based on TbCoFeCo Nanostructured Film on ST-Cut Quartz,” *Phys. Rev. Applied*, vol. 13, no. 4, p. 044001, Apr. 2020, doi: 10.1103/PhysRevApplied.13.044001.

[168] A. Mazzamurro *et al.*, “Highly Sensitive Surface Acoustic Wave Magnetic Field Sensor Using Multilayered TbCo<sub>2</sub>/FeCo Thin Film,” *Proceedings*, vol. 2, no. 13, Art. no. 13, 2018, doi: 10.3390/proceedings2130902.

[169] L. Huang, Q. Lyu, D. Wen, Z. Zhong, H. Zhang, and F. Bai, “Theoretical investigation of magnetoelectric surface acoustic wave characteristics of ZnO/Metglas layered composite,” *AIP Advances*, vol. 6, no. 1, p. 015103, Jan. 2016, doi: 10.1063/1.4939846.



## Publications et communications

---

### Revue internationale à comité de lecture

- ❖ **P. Mengue**, S. Hage-Ali, S. Zhgoon, B. Paulmier, C. Floer, F. Bartoli, and O. Elmazria, “Direct integration of SAW resonators on industrial metal for Structural Health Monitoring applications,” *Smart Mater. Struct.*, 2021. <https://doi.org/10.1088/1361-665X/ac2ef4>
- ❖ Y. Yang, **P. Mengue**, H. Mishra, C. Floer, S. Hage-Ali, S. Petit-Watelot, D. Lacour, M. Hehn, T. Han, and O. Elmazria, “Wireless Multifunctional Surface Acoustic Wave Sensor for Magnetic Field and Temperature Monitoring,” *Advanced Materials Technologies*, vol. 7, no. 3, p. 2100860, Oct. 2021. <https://doi.org/10.1002/admt.202100860>
- ❖ H. Mishra, M. Hehn, S. Hage-Ali, S. Petit-Watelot, **P. W. Mengue**, S. Zhgoon, 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>
- ❖ 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>
- ❖ H. Mishra, J. Streque, M. Hehn, **P. Mengue**, H. M’Jahed, 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>

## Conférences internationales avec actes

- ❖ **P. Mengue**, B. Paulmier, S. Hage-Ali, C. Floer, H. M’Jahed, A. Shvetsov, S. Zhgoon, O. Elmazria “SAW-RFID temperature and strain sensors on metallic substrates”, *IEEE Sensors 2021*, Sydney, Australia, Nov. 2, 2021, oral.  
[10.1109/SENSOR47087.2021.9639571](https://doi.org/10.1109/SENSOR47087.2021.9639571)
- ❖ **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>
- ❖ Shvetsov, S. Zhgoon, A. Merkulov, N. Belyankin, **P. W. Mengue** and O. Elmazria, "Sensitive Elements for Wirelessly Interrogated High Temperature SAW Deformation Sensors," 2021 Joint Conference of the European Frequency and Time Forum and IEEE International Frequency Control Symposium (EFTF/IFCS), 2021, pp. 1-4, [doi: 10.1109/EFTF/IFCS52194.2021.9604338](https://doi.org/10.1109/EFTF/IFCS52194.2021.9604338).

## Conférences internationales sans acte

- ❖ **P. Mengue**, B. Paulmier, S. Hage-Ali, C. Floer, H. M’Jahed, A. Shvetsov, S. Zhgoon, O. Elmazria, “Temperature and strain characteristics of SAW-RFID onto industrial metallic part for SHM applications”, *SAW Sensor & Actuator Symposium 2021*, Dresden, 14-15 October 2021, oral
- ❖ **P. Mengue**, S. Hage-Ali, O. Elmazria, S. Zhgoon, “Characterization of SAW resonators based on ZnO-metal parts structure for health monitoring applications”, *IEEE Sensors France International Workshop 2020*, Lille (virtual), November 26<sup>th</sup>-27<sup>th</sup> 2020, poster. (best student poster award, 1<sup>st</sup> place)

## Workshops et séminaires

- ❖ **P. Mengue**, B. Paulmier, S. Hage-Ali, C. Floer, H. M’Jahed, A. Shvetsov, S. Zhgoon and O. Elmazria, “ Capteurs de température et de déformation SAW-RFID sur une pièce métallique industrielle pour les applications SHM ”, *IEEE Sensors France Chapter Workshop 2021*, Marseille (virtual), November 18<sup>th</sup>-19<sup>th</sup> 2021, oral.