HAL
open science

Capteurs à ondes élastiques de surface (SAW) pour champs magnétiques à base de structures multicouches piézo-magnétiques

Meriem Elhosni

To cite this version:

Meriem Elhosni. Capteurs à ondes élastiques de surface (SAW) pour champs magnétiques à base de structures multicouches piézo-magnétiques. Autre [cond-mat.other]. Université de Lorraine, 2015. Français. NNT : 2015LORR0321 . tel-01754628

HAL Id: tel-01754628

https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01754628v1

Submitted on 2 Sep 2021

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

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

UNIVERSITÉ DE LORRAINE

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 : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

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.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm

UNIVERSITÉ DE LORRAINE

Ecole doctorale EMMA

THÈSE

Pour l'obtention du titre de :

DOCTEUR de L'UNIVERSITÉ DE LORRAINE

Spécialité : Physique Nanosciences

Présentée par :

MERIEM ELHOSNI

Capteurs à ondes élastiques de surface (SAW) pour champs magnétiques à base de structures multicouches piézo-magnétiques

---

Thèse soutenue publiquement le 27 Novembre 2015 à Nancy devant le jury composé de :

M. Laurent Le Brizoual	Professeur, Université de Rennes1	Rapporteur
M. Jean-Michel Friedt	Maître de conférences, Université de Franche-Comté	Rapporteur
M. Sergei Zhgoon	Professeur, National Research University, Moscow	Examinateur
M. Abdelkrim Talbi	Maître de conférences, Ecole Centrale de Lille	Examinateur
M. Daniel Lacour	Chargé de recherche, CNRS	Examinateur
M. Omar Elmazria	Professeur, Université de Lorraine	Directeur de thèse

Institut Jean Lamour –Département N2EV– Equipe 405
Faculté des sciences et techniques, campus Aiguillette, 54506 Vandoeuvre les Nancy

Remerciements

Ce travail de thèse a été réalisé au sein des locaux de l'équipe 405 Micro et Nanosystèmes du département N2EV, Nanomatériaux, Electronique et vivant de l'institut Jean Lamour.

Je tiens tout d'abord à remercier mon directeur de thèse, Monsieur Omar Elmazria, Professeur à l'Université de Lorraine, d'avoir encadré l'ensemble de ces travaux de thèse. Je le remercie pour sa disponibilité et pour ses conseils.

Je remercie également Messieurs les membres du Jury : Je remercie Monsieur Laurent Le Brizoual, professeur à l'Université de Rennes1 et Monsieur Jean-Michel Friedt, maitre de conférences à l'Université de Franche-Comté d'avoir accepté de rapporter ce travail.

Je remercie vivement Monsieur Sergei Zhgoon, professeur à National Research University de Moscow pour son aide précieuse et pour ses idées lumineuses.

Je remercie sincèrement Monsieur Abdelkrim Talbi, maitre de conférences à l'Ecole Centrale de Lille pour son aide et sa collaboration. Je le remercie également pour ses conseils et son écoute.

Je remercie également Monsieur Daniel Lacour, chargé de recherche à l'Institut Jean Lamour d'avoir accepté d'examiner ce travail et pour sa collaboration.

Je remercie toutes les personnes que j'ai côtoyées pendant ces années de thèse.

Table de Matière

Introduction Générale 8
Chapitre I : Les dispositifs à ondes élastiques de surface 10
Introduction 10
Partie 1 : Les dispositifs SAW : Etat de l'art 11
I.1.1 Les Dispositifs SAW 11
I.1.2 Principe de fonctionnement des capteurs SAW 14
I.1.2.2 Effet piézoélectrique 18
I.1.2.2.1 Ecriture tensorielle 18
I.1.2.2.2 Onde élastiques 21
I.1.2.2.3 Ondes de volumes 21
I.1.2.2.4 Onde de surface 23
I.1.3 Application des capteurs SAW 24
Partie2 : Capteurs Magnétiques 25
I.2.1 Introduction 25
I.2.2 Types de capteurs magnétiques 25
I.2.2.1 Les capteurs magnétiques à effets inductifs 25
I.2.2.2 Les capteurs magnétiques à Effet de Hall 26
I.2.2.3 Les Capteurs magnétiques à magnétorésistance 27
I.2.2.4 Capteurs à magnéto résistance géante 27
I.2.2.5 Autres types de Capteurs magnétiques 29
Partie 3 : Capteurs magnétiques SAW 30
I.3.1 Introduction 30
I.3.2 Capteurs magnétiques passifs à base SAW 31
I.3.3 Capteurs magnétique SAW à magnéto-impédance géante-GMI 32
I.3.3.1 Notions de base de capteurs GMI 32
I.3.3.2 Les Capteurs GMI filaires 34
I.3.3.3 Capteurs GMI à Couche mince 35
I.3.3.4 Capteur GMI-SAW intégré 37
I.3.4 Les applications des capteurs magnétiques SAW 38
I.3.5 Les applications des capteurs magnétiques SAW 39

Chapitre II : Modèle théorique, mise en équation et validation du couplage magnétoélastique 41

Introduction 41
Partie 1 : Mise en équations du problème magnéto-élastique 42
II.1.1 Le ferromagnétisme 42
II.1.1.1 Les matériaux ferromagnétiques 42
II.1.1.2 Les terres rares 43
II.1.2 La magnétostriction 43
II.1.2.1Matériaux magnétostrictifs 44
II.1.3Mise en équation du couplage magnéto-élastique 46
II.1.3.1 Introduction 46
III.1.3.2 Les équations de base 47
II.1.3.3 Matériau Magnéto-élastique équivalent : Constantes élastiques et champ magnétique 49
II.1.5 Conclusion 52
Partie 2 : Modèle théorique et validation du couplage magnéto-élastique 53
II.2.1Introduction 53
II.2.2 Synthèse bibliographique 53
II.2.3 Sensibilité au champ magnétique 56
II.2.4 Validation du modèle Ni-IDT/Quartz 57
II.2.4.1 Choix du logiciel de modélisation 57
II.2.4.6 Couplage magnéto-élastique 64
II.2.4.6.1 Effet du taux de métallisation 73
II.2.4.6.2 Effet du taux de métallisation 73
II.2.6 Conclusion 73

Chapitre III : Conception et réalisation d'un capteur magnétique SAW à base de structure originale multicouche LiNbO3/IDT/ZnO/Ni 79
PartieI : Modélisation d'un capteur à base de structure multicouche Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$ 79
III.1.1Matériaux mis en œuvre dans la structure multicouche Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$ 82
III.1.2 Modélisation en éléments finis FEM 84
III.1.2.1 Etapes de modélisation 84
III.1.2.2 Constantes élastiques 85
III.1.2.3 Maillage 87
III.1.3 Résultats 87
III.1.3.1 Type de l'onde étudiée à la fréquence fondamentale 87
III.1.3.2 Optimisation des épaisseurs de Nickel et de ZnO 90

III.1.3.3 Réponses fréquentielles 92

III.1.4 Sensibilité au champ magnétique 96

III.1.5 Conclusion 99

Partie 2 : Protocole expérimentale utilisé pour la fabrication et la caractérisation des capteurs magnéto-élastique SAW à base des hétéro structures 100

III.2.1 Réalisation des dispositifs SAW multicouche Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$: procédé de fabrication 100

III.2.2 Procédé de fabrication des IDTs - lithographie UV et gravure 101

III.2.3 Technique de Dépôt de ZnO 102

III.2.3.1 Principe général de formation de couches minces 102

III.2.3.2 Définition du principe général 102

III.2.4 Dépots de couches magnétiques 102

III.2.5 Caractérisation du capteur magnétique à base d'une hétéro structure Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$: caractérisations magnétiques et électriques des dispositifs magnéto élastiques SAW 107

III.2.5.2 Caractérisation sous pointe 109

III.2.5.3 Etape de wire bonding 109

III.2.5.4 Caractérisation sous champ magnétique 109

Partie 3 : Etude expérimentale de la structure Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$ 111

III.3.1 Résultats et discussion 111

III.3.1.1 Caractérisation fréquentielle à champ magnétique nul 111

III.3.1.2 Mesure de couche magnétique (courbe d'aimantation) 113

III.3.2 Conclusion 117

Chapitre IV: Etude des paramètres influant sur la sensibilité du capteur de champ magnétique à structure SAW piézo-magnétique 118

Introduction 118

Partie 1 : Effet de la couche isolante sur la sensibilité du capteur 120

IV.1.1 Introduction 120

IV.1.2 Effet de la couche d'alumine sur la fréquence de résonance du capteur 120

IV.1.3 Effet de la couche isolante d'alumine sur la propagation de l'onde élastique 121

IV.1.4 Effet de la couche d'alumine sur la sensibilité au champ magnétique 122

IV.1.4.1 Champ magnétique appliqué dans une direction parallèle de la direction de propagation de l'onde élastique de surface. 122

IV.1.4.2 Champ magnétique appliqué perpendiculairement à la direction de propagation de l'onde élastique de surface. 123

IV.1.5 Facteur de qualité 125

IV.1.6 Conclusion 126
Partie 2 : Effet de la période spatiale de l'IDT sur la sensibilité du capteur SAW 128
IV.2.1 Introduction 128
IV.2.2 Réponse fréquentielle S_{11} 129
IV.2.3 Sensibilité au champ magnétique 129
IV.2.4 Facteur de qualité 130
IV.2.5 Conclusion 132
Partie3 : Capteur magnétique à base de structure multicouche CoFeB/ZnO/IDT/$LiNbO_3$ (λ=24µm) 133
IV.3.1 Introduction 133
IV.3.2 Modélisation de la structure CoFeB/ZnO/IDT/$LiNbO_3$ 134
IV.3.3 Effet de la couche magnétique sur la sensibilité du capteur SAW 134
IV.3.3.2.1 Etude théorique 138
IV.3.3.2.2 Etude expérimentale 138
IV.3.3.2.2.1 Etude de l'aimantation 138
IV.3.3.2.2.2 Caractérisation fréquentielle à champ magnétique nul 138
IV.3.3.2.2.2.1 Sensibilité du capteur quand le champ magnétique est appliqué dans une direction parallelle à la direction de propation de l'onde SAW 138
IV.3.3.2.2.2.2 Sensibilité du capteur quand le champ magnétique est appliqué dans une direction perpendiculaire à la direction de propation de l'onde SAW 138
IV.3.4 Combinaison de l'apport couche sensible et fréquence de fonctionnement du capteur sur la sensibilité au champ magnétique 138
IV.3.5Conclusion 146
Conclusion générale 147

Introduction Générale

Les dispositifs à ondes élastiques de surface sont le fruit de plusieurs années d'études et de recherche. Ils sont utilisés dans de très nombreux domaines, notamment les télécommunications, l'automobile, l'aéronautique, le biomédical, et l'industrie. Les dispositifs SAW représentent aujourd'hui un marché considérable dans le domaine des télécommunications grâce à leurs performances, et représentent le cœur d'activité de nombreuses entreprises. Il s'agit donc d'une technologie mature qui, grâce à un faible coût de fabrication, la petite taille des dispositifs et leur robustesse, trouve de plus en plus de nouvelles applications dans le domaine des capteurs qu'ils soient physiques (température, pression, contrainte, champs magnétique, accélération), chimiques ou biologiques.

Les capteurs magnétiques à ondes élastiques de surface constituent l'objectif de la présente thèse et constitue une nouveauté dans l'équipe Micro et Nano systèmes (MNS) de l'Institut Jean Lamour (IJL). Il est question d'étudier, concevoir, réaliser et caractériser des capteurs de champs magnétiques présentant la plus grande sensibilité possible et couvrant une large gamme de mesure. Les applications visées sont multiples allant des applications industrielles aux applications biomédicales. Les applications biomédicales visées entre autres par nos travaux sont en parfaite adéquation avec les activités du nouveau département de l'IJL Nanomatériaux Electronique Et Vivant (N2EV) dont fait partie notre équipe MNS.

Les capteurs magnétiques sont parmi les types de capteurs le plus répandus vue la grande variété des applications adressées (industrie, navigation, automobile, aéronautique et biomédical). La réalisation de capteurs magnétiques à base de dispositifs SAW permet de bénéficier des avantages classiques de la technologie SAW (coût, taille, robustesse, fiabilité) mais aussi du fait qu'ils peuvent être passifs (bateryless) et interrogeables à distance (wireless) ce qui ouvre la voie pour de nouvelles applications jusqu'alors inenvisageables.

Le travail qui sera présenté dans cette thèse porte sur une étude théorique et expérimentale des structures multicouches magnéto-élastiques formées de films minces magnéto élastique déposés sur un substrat piézoélectrique.

Ce manuscrit de thèse est organisé en quatre chapitres qui décrivent les travaux théoriques et expérimentaux depuis les premières réalisations jusqu'aux résultats sur des dispositifs optimisés.

- Le premier chapitre est organisé en trois parties. Dans la première, on présentera un historique et on décrira la technologie des dispositifs SAW. On détaillera particulièrement les dispositifs SAW de type capteurs et on expliquera leur principe de fonctionnement et donnerons des exemples d'applications. Dans la deuxième partie, on fera une présentation générale des principaux capteurs magnétiques et leurs domaines d'applications. Dans la troisième partie, on s'intéressera aux capteurs magnétiques à SAW : leur principe de fonctionnement et domaine d'applications.
- Dans le deuxième chapitre on développera dans la première partie, la mise en équation du problème magnéto-élastique. Dans la seconde partie, on décrira la méthode théorique utilisée pour la modélisation de capteurs magnétiques à base de structures multicouches SAW. La troisième et dernière partie sera consacrée à la validation de la méthode théorique par la comparaison des résultats du modèle avec des résultats expérimentaux issus de la littérature.
- Dans le troisième chapitre on exploitera le modèle réalisé pour étudier une structure SAW originale. En effet, on optimisera la structure Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$ qui servira de capteur SAW magnétique, on prédira ses performances par simulation qu'on validera expérimentalement. Ce chapitre sera scindé en trois parties. La première partie sera dédiée à l'étude théorique. La seconde partie précisera le protocole expérimental qui sera utilisé pour la réalisation et la caractérisation de capteurs magnétiques à structures magnéto-élastiques multicouches SAW. La troisième et dernière partie traitera de la caractérisation expérimentale du capteur réalisé et de la validation des prédictions théoriques.
- Le quatrième et dernier chapitre détaillera les différents paramètres permettant d'améliorer la sensibilité d'un tel capteur à structure magnéto-élastique multicouches en considérant les différents éléments constituants du capteur à

modifier. On étudiera par ailleurs théoriquement et expérimentalement l'effet de certains éléments à savoir, le type de la couche sensible comme Ni et CoFeB, le type de la couche isolante comme ZnO et $Al2O_3$ ou encore la géométrie des IDT.

- Une conclusion générale viendra clore ce manuscrit et donnera les perspectives permettant de réaliser des capteurs encore plus performants.

Chapitre I : Les dispositifs à ondes élastiques de surface

Introduction

Les dispositifs à ondes élastiques de surface ou « surface acoustic wave (SAW) devices, » d'après leur acronyme anglais, sont le résultat de plusieurs années d'études et de recherche désormais utilisés dans de nombreux domaines : télécommunications, automobile, aéronautique, médecine, communications filaires et communications sans fil. Du fait qu'ils sont passifs, interrogeables à distances, de petite taille et peu couteux quand ils sont fabriqués à grande quantités, ils présentent un fort potentiels dans le domaine de capteurs surtout dans des environnements sévères où les composants conventionnels ne peuvent fonctionner. Aujourd'hui les dispositifs SAW représentent un marché considérable et sont le cœur d'activité de nombreuses entreprises.

Les travaux de cette thèse s'inscrivent dans la cadre des activités de recherches de l'équipe Micro et Nano Systèmes de l'Institut Jean Lamour (IJL) et dans le domaine des capteurs SAW, en particulier les capteurs piézomagnétiques SAW qui constituent une nouveauté dans l'équipe Micro Nano systèmes du département N2EV de l'institut Jean Lamour.

Ce premier chapitre vise à définir la technologie SAW et celle magnéto élastique SAW (piézomagnétique).

Ce chapitre est divisé en trois parties. On présentera dans la première partie les dispositifs SAW, leur principe de fonctionnement et leurs domaines d'applications. La deuxième partie sera consacrée aux capteurs magnétiques. Dans la troisième partie, on développera la combinaison de ces deux technologies à savoir les capteurs magnétiques SAW.

Partie 1 : Les dispositifs SAW : Etat de l'art

I.1.1 Les Dispositifs SAW

I.1.1.1 Première apparition des dispositifs SAW

Si les premiers dispositifs SAW datent des années soixante (premier brevet déposé en 1963[1] et premier transducteur interdigité (IDT) en 1965[2]), leur invention est le fruit de travaux réalisés dans le domaine des radars pour répondre à des problématiques déjà exprimées durant la seconde guerre mondiale[3].

Leur utilisation a été adaptée pour répondre à différents besoins et ont été adoptés comme solutions technologiques dans plusieurs domaines. On citera le filtrage dans les systèmes de télécommunication où ils sont devenus incontournables, les lignes à retard pour la télévision couleur, l'analyse acoustique des matériaux et de plus en plus le domaine des capteurs. Le principe des dispositifs SAW est essentiellement basé sur le phénomène de la piézoélectricité qui fut découvert en 1880 par les frères Curie[3].

La piézoélectricité est la capacité naturelle de certains cristaux et matériaux à générer une tension électrique (Figure I.1) en réponse à une contrainte mécanique (effet piézoélectrique direct), ou une déformation en réponse à l'application d'un champ électrique (effet piézoélectrique inverse). Ainsi, un champ électrique est appliqué sur un substrat piézoélectrique, permet d'exploiter cette propriété pour faire vibrer ce dernier. La génération des ondes mécaniques au sein d'un matériau piézoélectrique est alors possible (Figure I.2).

---

[1] J.H. Rowen, « Tapped ultrasonic delay line and uses therefor », US Patent US3289114, déposé en 1963

[2] R.M. White and F.W. Voltmer, « Direct piezoelectric coupling to surface elastic waves », Appl. Phys. Lett., Vol. 7, pp. 314-316, 1965

[3] P. Nicolay : « Les capteurs à ondes élastiques de surface. Applications pour la mesure des basses pressions et haute température » Thèse de doctorat de l'université Henri Poincaré Nancy I, 10 Décembre 2007

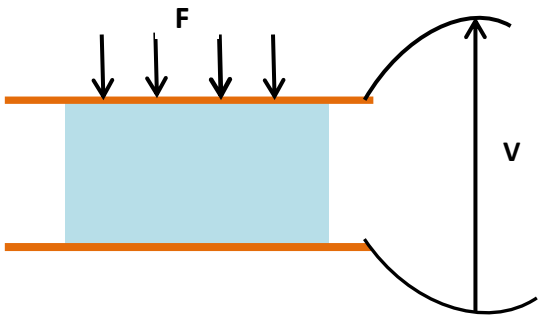


Figure I.1 : Principe de base de la piézoélectricité : Un matériau piézoélectrique soumis à des contraintes ou des déformations fait apparaître des charges de signes opposés sur ses faces entraînant ainsi une différence de potentiel (ddp) à ses bornes

La première application de la piézoélectricité était le sonar. Son apparition au monde doit beaucoup aux travaux du physicien français Paul Langevin[4].

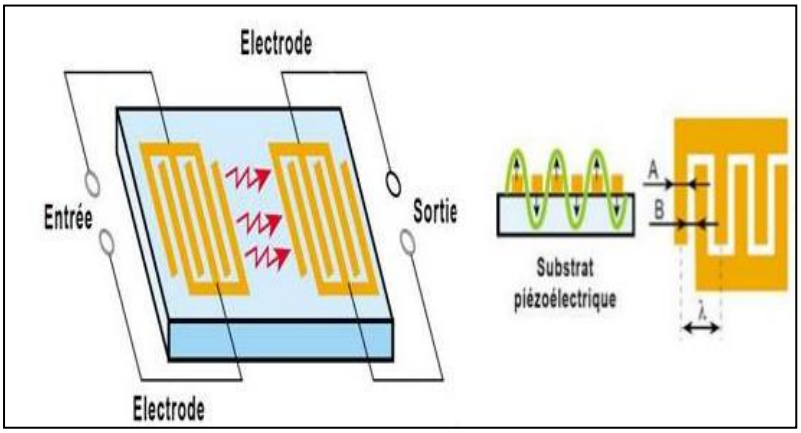


Figure I.2 **:** Génération d'ondes élastiques dans un matériau piézoélectrique grâce à la piézoélectricité[5].

I.1.1.2 Evolution des SAW

Le développement des dispositifs SAW s'est étendu sur trois périodes principales. La première période de 1970 à 1985, correspond à l'expansion rapide de la technologie SAW dans les applications grand public et notamment l'utilisation des SAW comme ligne à retard dans la télévision couleur. La deuxième période correspond plus à la

[4] G W. Taylor, "Piezoelectricity", ISSN 0275-9608 Gordon and Breach Science Publishers (1985)

[5] N.Ben Hassine, "Etude de la fiabilité des composants à ondes acoustiques de volume (BAW) pour des applications Radio Fréquence », Thèse de doctorat de L'université Joseph Fourier-Grenoble1, soutenue le 29 Ocotbre 2009

recherche des méthodes d'optimisations. Par ailleurs cette période s'est caractérisée par le perfectionnement d'une technologie qui est déjà mature, liée aux besoins d'une industrie (celle de la téléphonie mobile en particulier) et qui est soumise à ce qui exige le marché en termes de réduction des coûts et d'amélioration des performances. Durant cette seconde période, les travaux et efforts réalisés se sont focalisés en particulier sur les matériaux et leurs optimisations, le design des IDT(s) ainsi que l'analyse théorique et le développement de nouvelles applications.

Durant la troisième période du développement des SAW (après 1985), les scientifiques disposaient des méthodes complètes pour la conception des dispositifs SAW performants permettant de répondre aux nombreuses exigences de différentes applications en terme de matériaux, types d'ondes, IDT(s). Par ailleurs de nombreux réseaux et méthodes de simulations étaient tous bien connus et maîtrisés. Les plus grands domaines d'applications étaient identifiés pendant cette période[6,7]. Il s'agit d'une période de maturation qui a été dynamisée par les besoins de l'industrie des télécommunications liés au développement rapide de la téléphonie cellulaire. Les objectifs primordiaux étaient de réduire les coûts de productions, la taille des dispositifs, les pertes d'insertions ainsi qu'augmenter les fréquences de fonctionnements. Ces buts sont toujours d'actualité et sont le sujet de plusieurs sources d'innovations.

I.1.1.3 Les dispositifs SAW actuellement

Le succès des composants dans le domaine des télécommunications a été obtenu grâce à des atouts intéressants qui caractérisent les dispositifs SAW :

- La taille réduite : en effets les dispositifs SAW sont capables de s'adapter à des encombrements électroniques différents. Par exemple, la réduction de la taille des filtres est recherchée pour permettre une diminution de volume dans les téléphones portables et une augmentation du nombre de fonctions remplies par ces appareils. Au cours des années, le poids des téléphones et le volume des filtres SAW sont en diminution considérable.
- Le faible cout de production des dispositifs SAW.

[6] R.C. Williamson, "Case studies of successful surface-acoutic-wave devices", IEEE Ultrasonics Symp, pp. 460-468, (1977)

[7] C.S. Hartmann, "Systems impact of modern Rayleigh wave technology", in E.A. Ash and E.G.S. Paige (eds.), Rayleigh wave theory and application, Ed. Springer, pp. 238-253, (1985)

- Une grande variabilité en termes de réponse fréquentielle et aussi en bande de fréquence.

De nos jours, plusieurs entreprises se sont investies dans la production des dispositifs SAW en particuliers les filtres en insistant sur les paramètres fondamentaux qui caractérisent ces derniers qui sont : la fréquence centrale, la bande passante et les pertes d'insertion.

D'après une étude réalisée par *Frost et Sullivan,* l'industrie de télécommunication est estimée à 10 milliards de filtre SAW par an en 2015 alors qu'elle était de 4 milliards d'unité en 2005[8]. Parmi les acteurs majeurs qui dominent le marché mondial des dispositifs SAW actuellement, on cite : TDK-EPCOS et Murata qui représentent 80% du marché mondial d'après une étude réalisée en 2012 par *Yole développement*.

I.1.2 Principe de fonctionnement des capteurs SAW

Comme décrit précédemment, la conversion électromécanique est obtenue grâce à l'effet piézoélectrique qui est la capacité naturelle de certains cristaux et matériaux à générer une tension en réponse à une contrainte mécanique ou, réciproquement, une déformation en réponse à l'application d'un champ électrique (effet piézoélectrique inverse).

De nombreux matériaux possèdent cette propriété de piézoélectricité. Parmi les matériaux fortement piézoélectriques nous trouvons le Titano-Zirconate de Plomb (PZT), le Niobate de lithium ($LiNbO_3$) et le Tantalate de lithium ($LiTaO_3$) souvent utilisés dans les SAW. Le choix du matériau piézoélectrique est dépendant de l'application visée. Le PZT est surtout utilisé comme actionneur grâce à son facteur d_{33} élevé. Le $LiNbO_3$ et le $LiTaO_3$ comme filtre à large bande pour leur large facteur de couplage électromécanique, le quartz comme résonateur grâce à sa grande stabilité en température et son grand facteur de qualité.

Pour les applications capteurs type SAW, le $LiNbO_3$ est utilisé pour les capteurs de température vu son grand coefficient de température (TCF pour *Temperature Coefficient of Frequency*) et pour d'autres grandeurs, le quartz est choisi. Notons qu'il sera toujours

[8] https://www.sensors.co.uk

possible de compenser les effets de température ou d'autres paramètres en utilisant deux ou plusieurs capteurs pour la compensation.

I.1.2.1 Les paramètres fondamentaux d'un capteur SAW

- **La fréquence de fonctionnement**

La fréquence centrale (f_c) d'un dispositif à ondes élastique de surface est déterminée par deux paramètres : la géométrie des IDT qui impose la longueur d'onde et les caractéristiques du matériau piézoélectrique utilisé.

$$fc = \frac{V}{\lambda} \qquad (1)$$

Avec : v est la vitesse de l'onde élastique de surface du matériau piézoélectrique, λ est la longueur d'onde.

- Un capteur SAW est caractérisé en plus de sa fréquence centrale, de la bande passante et les pertes d'insertion comme le représente la figure I.3 pour un filtre à onde élastique de surface

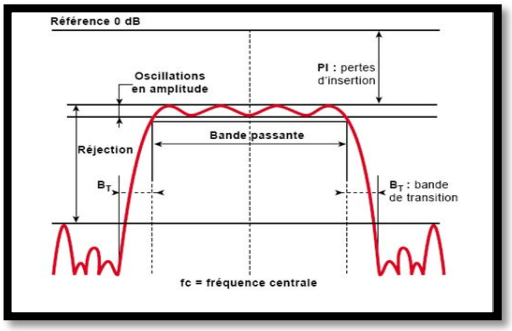


Figure I.3 : Réponse en fréquence d'un filtre à ondes élastiques de surface et sa bande passante[9]

- On définit également le coefficient de couplage électromécanique (K^2) qui est propre au matériau utilisé. Il caractérise l'énergie mécanique transformée en énergie électrique et inversement. Il peut être approximé par la formule ci-dessous :

$$K^2 = \frac{\pi}{2}\frac{fr}{fa}\,\mathrm{tg}\left(\frac{\pi}{2}\frac{fa-fr}{fa}\right) \qquad (2)$$

[9] H. Trézéguet, « Les filtres à ondes de surface » dossier www.01.net Electronique - n° 156 (Mars 2005)

Avec, f_r est la fréquence de résonnance et fa est la fréquence d'antirésonance de l'admittance.

- **Les électrodes Inter digités**

D'après la relation (1), la fréquence centrale d'un dispositif à ondes élastiques de surface est définie par la longueur d'onde élastique qui est imposée par la période spatiale des électrodes interdigitées. La fréquence maximale de fonctionnement est limitée par la technologie et la résolution des techniques de lithographies utilisées.

Les IDT sont déposées à la surface du substrat piézoélectrique, elles introduisent des variations d'impédance électrique et mécanique en surface, qui donnent lieu à des réflexions quand l'onde élastique rencontre un IDT.

- **Matériaux utilisés**

La vitesse des ondes élastiques de surface est une caractéristique propre au matériau piézoélectrique utilisé pour le dispositif SAW. Avec la longueur d'onde, elle définira la fréquence de fonctionnement du dispositif SAW. Un coefficient de couplage électromécanique important du matériau piézoélectrique permet de limiter les pertes d'insertion du dispositif SAW.

Outre ces caractéristiques, le matériau piézoélectrique doit également être stable thermiquement afin de limiter les variations fréquentielles et temporelles en fonction de la température de fonctionnement. Le choix du matériau piézoélectrique dépend aussi du domaine d'application et des utilisations visées ainsi que sa capacité d'intégration dans les procédés de fabrication.

Le tableau I.1, présente quelques matériaux piézoélectriques classés en quatre grandes familles ainsi que leurs propriétés électroacoustiques associées

Dans le cas de notre étude, le choix des matériaux piézoélectriques utilisés dépendra des critères suivants : leurs disponibilités et notamment la possibilité de les fabriquer au laboratoire ainsi que les fréquences de fonctionnement du dispositif SAW visées par l'application.

Tableau I.1 : Matériaux piézoélectriques[10]

	Matériaux	***K^2 (%)***	***Avantages***	***Inconvénients***
Monocristaux	*Quartz[11, 12] (Coupe-ST)*	*0,11*	*Peu coûteux, TCF=0*	*Faible couplage*
	LiNbO3 (Coupe- 128Y)	*5,5*	*Fort couplage, faible niveau d'atténuation*	*TCF élevée Fort effet Pyroélectrique,*
	LiTaO3 (Coupe-36Y)	*4,7*	*Fort couplage, bon compromis TCF/K^2*	*Fragile*
	5.2 Langasite[13]	*8*	*Utilisation à très haute température*	*Fortes pertes en propagation à haute température*
Films minces	*AlN/Saphir [14]*	*0,3*	*Isolant électrique*	*Faiblement Piézoélectrique*
	AlN (massif)[15], [16]	*6,53*	*Travail à haute fréquence et à température élevée. Compatible CMOS*	
	ZnO/Si[17] ZnO (massif)	*8,5*	*Bon couplage*	*Conducteur à haute température*
Polymères	*PVDF[18]*	*11*	*Flexible*	*Forte atténuation des ondes*
Piézocomposites	*PVDF(TrFe)*	*7*	*Flexible*	*Forte atténuation des ondes*

[10] O.legrani, "Etude, élaboration et caractérisation d'hétérostructures « autoprotégées » à base d'ondes élastiques » thèse Soutenue le 14 novembre 2012, Université de Lorraine

[11] C.K. Campbell, "Surface Acoustic Wave Devices for Mobile and Wireless Communications", Academic press, 1998.

[12] P. Hartemann, Revue de physique appliquée, vol. 12, p. 843, (1977).

[13] J. Tichý, J. Erhart, E. Kittinger, J. Prívratská, "Fundamentals of Piezoelectric Sensorics: Mechanical, Dielectric, and Sensorics", Berlin: Springer, (2010).

[14] C. Caliendo, Appl. Phys. Lett., vol. 92, p. 033505, 2008

[15] T. Pensala, « Thèse de doctorat d'université d'Aalto, Finlande, (2011).

[16] K.M. Lakin, TFR Technologies, 6 1 (2001).

[17] O. Legrani, O. Elmazria, S. Zhgoon, P. Pigeat et A. Bartasyte, « Packageless AlN/ZnO/Si structure for SAW devices applications » IEEE Sensors Journal, 487-491, (2013).

[18] J. Fraden, Handbook of Modern Sensors, "Physics, Designs, and Applications", New-York: Springer, (2010).

I.1.2.2 Effet piézoélectrique

I.1.2.2.1 Ecriture tensorielle

La piézoélectricité est définie sous la forme de ces deux équations fondamentales mais sous une approche tensorielle du couplage entre les systèmes électriques et mécaniques. Elle fait intervenir les vecteurs de déplacement électrique D [C/m^2] et le champ électrique E [V/m] et les tenseurs de déformations S et de contrainte T [N/m^2] :

$$\begin{cases} S = Se \times T + dt \times E \\ D = d \times T + \in t \times E \end{cases} \quad (3)$$

Se: Définit la souplesse à champ électrique constant (matrice 6×6) ;

$\in t$: Définit à contrainte constante (matrice 3×3) en [F/m] ;

d: Définit La constante de charge (matrice 3×6) en [C/N] ;

Le tableau I.2, permet de préciser les différentes notations utilisées. Ces équations traduisent l'effet direct de la piézoélectricité soit la polarisation électrique due à une contrainte mécanique ou l'effet inverse de la déformation mécanique qui est dû à une polarisation électrique. Ces équations définissent bien la propriété linéaire de l'effet piézoélectrique et sa dépendance au signe du champ et à son amplitude. Le choix des paramètres d'entrée permet de définir d'autres équations caractéristiques

$$\begin{cases} T = cD \times S - hD \\ E = -h \times S + \beta s \times D \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} S = Se \times T + d \times E \\ D = d \times T + \in T \times E \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} S = sD \times T + g \times D \\ E = -g \times T + \beta T \times D \end{cases} \quad (6)$$

Les différents coefficients piézoélectriques sont reliés entre eux par les relations fondamentales de piézoélectricité suivantes :

$$sD = sE - dt \times \beta T \times d \quad (7)$$

$$g = \beta\, T \times d \quad (8)$$

$$\beta = 1/\varepsilon \quad (9)$$

$$h = \beta\, s \times c \times d \quad (10)$$

Tableau I.2 : Différentes notations utilisées en piézoélectricité

Type	*Symbole*	*Définition*	*Unités*
Electrique	*D* *E* *ϵ*	*Déplacement électrique ou induction* *Champ électrique* *Permittivité électrique*	$C.m^{-2}$ $V.m^{-1}$ $F.m^{-1}$
Mécanique	*S* *T* *S* *c*	*Déformation relative* *Contrainte* *Souplesse* *Raideur*	 $N.m^{-2}$ $m^2.N$ $N.m^{-2}$
Piézoélectrique	*d* *e* *g* *h*	*Constante reliant la contrainte T et l'induction D à E constant* *Constante reliant la déformation S et l'induction D à E constant* *Constante reliant la contrainte T et le champ E à D constant* *Constante reliant la déformation S et le champ E à D constant*	$C.N^{-1}$ *ou* $m.V^{-1}$ Cm^{-2} *ou* $N.(V\,m)^{-1}$ $V\,m.N^{-1}$ *ou* $m2.C^{-1}$ $V.m^{-1}$ *ou* $N.C^{-1}$

Le tenseur piézoélectrique est un tenseur d'ordre 3 défini dans l'équation (3). Il s'exprime en Coulomb par mètre carré (C/m^2) puisque la déformation est sans unité. Comme *S* et *T* sont symétriques, il est caractérisé par sa symétrie par rapport à ses deux derniers indices. Il possède donc 18 composantes rangés dans une tabulation de 3 lignes et 6 colonnes.

Les conditions qui imposent la symétrie de la maille élémentaire du matériau imposent une invariance dans les composantes du tenseur piézoélectrique suivant certaines directions voire leurs propriétés de nullité. La forme du tenseur pour un cristal hexagonal de symétrie telle que par exemple dans les matériaux suivants (AlN, ZnO ou PZT) est définie comme suit :

$$e_{i\alpha} = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 & 0 \\ e_{31} & e_{31} & e_{33} & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

La Figure I.4 regroupe les formes des tenseurs des rigidités, des permittivités ainsi que des constantes piézoélectriques des cristaux qui appartiennent aux différentes classes de symétrie ponctuelle. Les éléments sont disposés en suivant le modèle de la Figure I.5.

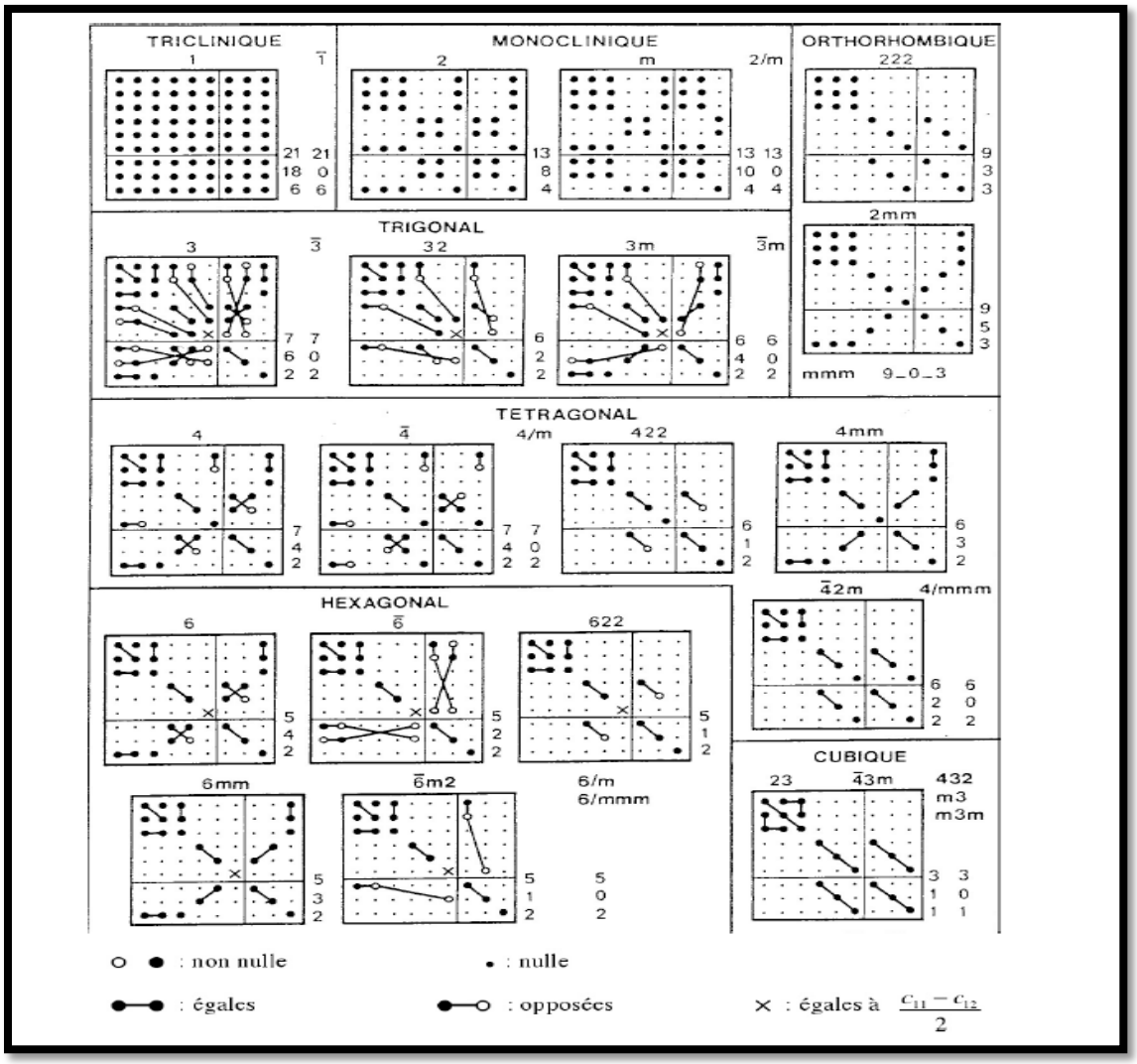


Figure I.4: Tenseurs pour les différentes classes de cristaux[19]

[19] D. Royer et E. Dieulessaint, « Ondes élastiques dans les solides, Tome 1 : Propagation libre et guidée. MASSON », (1996).

$$
\begin{array}{cccccc|ccc}
c_{11} & c_{12} & . & . & . & . & e_{11} & e_{21} & e_{31} \\
c_{12} & c_{22} & . & . & . & . & e_{12} & . & . \\
. & . & . & . & . & . & . & . & . \\
. & . & . & c_{\alpha\beta} & . & . & . & e_{i\alpha} & . \\
. & . & . & . & . & . & . & . & . \\
. & . & . & . & . & . & . & . & . \\
\hline
e_{11} & e_{12} & . & . & . & . & \varepsilon_{11} & . & . \\
e_{21} & . & . & e_{i\alpha} & . & . & . & \varepsilon_{ij} & . \\
e_{31} & . & . & . & . & . & . & . & .
\end{array}
$$

Figure I.5 : Modèle du tableau de la Figure I.4

L'application d'un champ électrique sur un matériau piézoélectrique permet la création d'une déformation mécanique. Ainsi, des ondes élastiques peuvent être générées par un signal électrique périodique. Par ailleurs, leur propagation et leur polarisation dépendent dans ce cas des propriétés et des caractéristiques électromécaniques du matériau. La résolution des systèmes d'équations détaillés dans la partie précédente permet de déterminer la réponse du système et intègre tous les éléments de symétrie du problème. Ceci nous amène à définir les différents types d'ondes élastiques qui peuvent être générées dans un tel dispositif SAW

I.1.2.2.2 Onde élastiques

Lorsqu'un matériau est soumis à une déformation alternative, il se génère au sein de celui-ci des contraintes qui entrainent la propagation d'une onde mécanique. Une perturbation se transmet de proche en proche dans le milieu. Celle-ci permet de transférer de l'énergie ou les ondes sismiques. Il peut y exister différentes sortes d'ondes élastiques et chacune de ces ondes se déplace de façon distincte et peut par ailleurs être de deux natures différentes : cette onde est de volume si elle se propage au sein d'un matériau, et elle est de surface si sa propagation reste confinée en surface.

I.1.2.2.3 Ondes de volumes

On peut distinguer deux types d'ondes de volumes : les ondes dites ondes de compression ou aussi longitudinales, et les ondes de cisaillement dites aussi transversales.

Les ondes longitudinales ou ondes de compression (Figure I.6) possèdent une polarisation colinéaire à la direction de propagation. Les particules du milieu effectuent des va-et-vient autour de leur position de repos. Les plans parallèles contenant ces particules forment alors une succession de compressions et de dilatations et reproduisent à leur tour le mouvement du plan précédent, ce qui rend ces ondes les plus rapides[20].

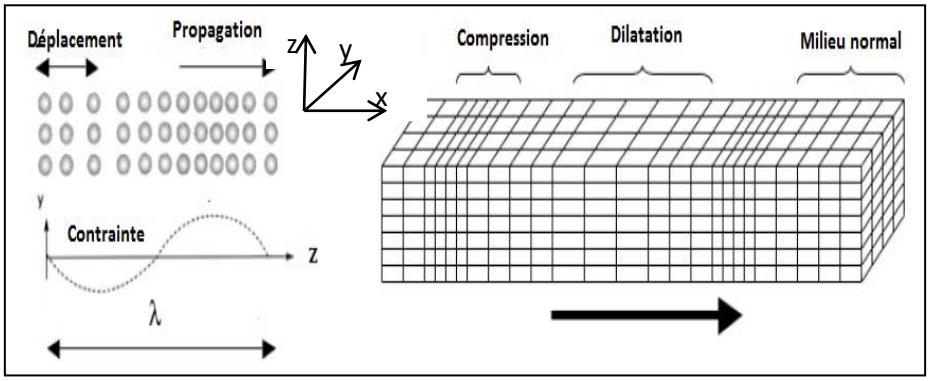


Figure I.6 : Onde longitudinale ou onde de compression[10]

L'onde de cisaillement se propage plus lentement que l'onde de compression (environ deux fois moins vite). Ce type d'onde ne se propage pas dans les liquides et se déplace dans le plan perpendiculaire à la direction de propagation ce qui permet d'induire un déplacement latéral des particules. (Figure I.7)

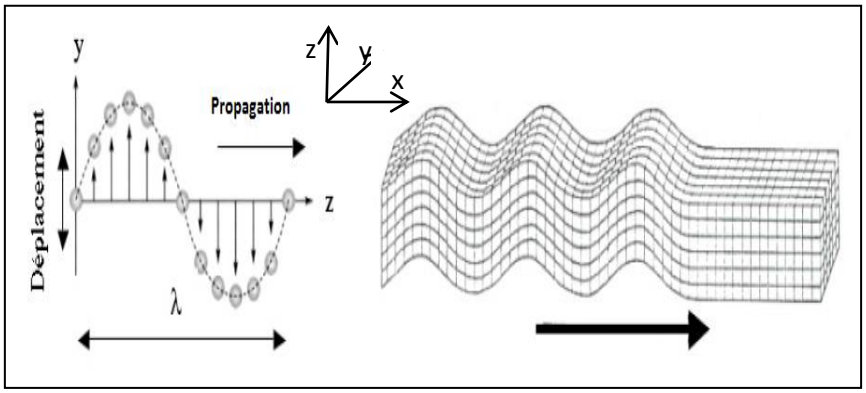


Figure I.7 : Onde transversale ou onde de cisaillement[10]

Ces ondes existent dans les matériaux isotropes et, suivant des directions particulières, dans les matériaux anisotropes. Les ondes élastiques sont des combinaisons linéaires de des trois composantes d'ondes. Une combinaison des trois ondes peut se propager dans

[20] M. Brissaud , « Matériaux piézoélectriques: Caractérisation, modélisation et vibration », Lausanne: Presses Polythechniques et Universitaires Romandes, (2007).

les matériaux piézoélectriques, chacune avec sa propre vitesse : une onde quasi longitudinale, faisant un angle non nul avec la direction de propagation, et deux ondes transversales, une dite rapide et une un peu plus lente.

I.1.2.2.4 Onde de surface

Les ondes de surface sont caractérisées par une amplitude plus forte que les ondes de volume et elles sont moins rapides. Parmi les ondes de surface, on peut citer les ondes de Love et les ondes de Rayleigh. Les ondes de Love, ont été décrites mathématiquement par le britannique A.E.H. Love en 1911[21,22, 23]. Le déplacement de ces ondes peut être assimilé à celui d'un serpent engendrant un ébranlement horizontal du matériau.

Les ondes de Rayleigh sont nommées en référence au Physicien Lord Rayleigh qui a prédit mathématiquement l'existence de ce type d'onde en 1885[24]. Le déplacement des ondes de Rayleigh est une combinaison d'ondes transversales et longitudinals. On parle alors de polarisation elliptique[25].

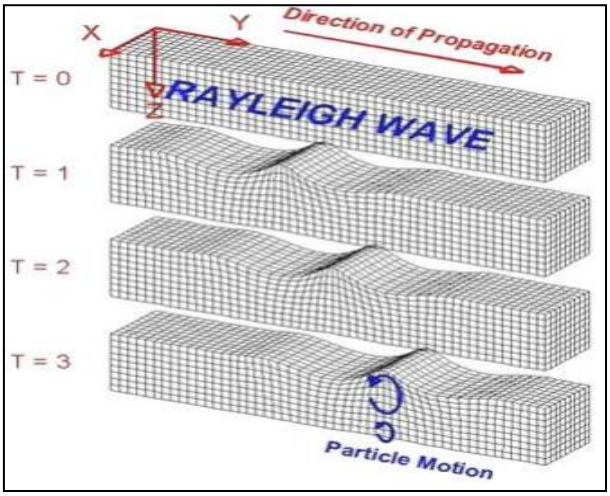


Figure I.8 : Onde élastique de surface[24]

De plus, si on parle d'ondes de surface, il est intéressant de faire la différence entre les différents termes qui caractérisent une telle onde. Dans Le tableau I.3, on donne un aperçu de toutes les ondes rencontrées dans la littérature. Il est précisé dans le tableau I.3, s'il s'agit d'une pseudo onde de surface (P) ou d'une onde surface pure (S), ainsi que les conditions d'existence ou de dégénération.

[21] E. H. Love, "Some problems of geodynamics", New York: Dover: Cambridge Univ. Press, (1967).
[22] M.B. Dobrin, «Dispersion in Sismiques Surface Waves» chez Géophysics 16, p. 63, (1951).
[23] A. Victorov, "Surface acoustic waves in solids", Moscow: Nauka, (1981).
[24] L. Rayleigh, Proc. London Math. Soc., vol. 17, p. 4, (1885).

Tableau I.3 **:** Les différents types d'ondes et de pseudo ondes de surface

Nom	Type	Conditions d'existence
Rayleigh	**S**	Dans des matériaux massifs et des multicouches
Sezawa	**S**	Uniquement dans les multicouches ; l'onde de Sezawa correspond au deuxième mode de l'onde Rayleigh dans une structure multicouche
Lamb	**Plaque S**	Cas particulier ; il s'agit d'ondes de Rayleigh présentes dans une membrane dont l'épaisseur est comparable à la longueur d'onde (mode de plaques)
Love	**S**	Uniquement dans les structures multicouches, à condition que la vitesse acoustique de la couche guidante soit inférieure à celle du substrat ($v_{cg} < v_s$)
Leaky SAW	**P**	Mono- et multicouches
PSAW et HVPSAW	**P**	Matériaux multicouches
Surface Skimming Bulk Wave	**P**	Matériaux massifs

I.1.3 Application des capteurs SAW

Vu la très grande sensibilité des dispositifs SAW aux perturbations environnementales, leur utilisation comme capteur est envisagée dans de nombreux domaines (capteurs de pression, de gaz, liquides, capteurs de températures, magnétiques, de polluants, de contraintes, de radiation). Leurs utilisations peuvent ainsi intéresser plusieurs secteurs d'activités comme la chimie, la biologie, la médecine etc. Les capteurs SAW présentent en plus l'avantage d'être passifs et d'être interrogeables à distance (wireless), cela permet leur utilisation dans des milieux hostiles où d'autres capteurs ne pourraient pas fonctionner tels que : les environnements à hautes températures, milieux radiatifs ou corrosifs.

Dans ce qui va suivre nous nous intéresseront aux capteurs de champs magnétiques en général, et aux capteurs magnétique à base de SAW en particulier.

Partie 2 : Capteurs Magnétiques

I.2.1 Introduction

Les capteurs de champ magnétique sont utilisés dans des applications très variées telles que l'imagerie magnétique, le codage de position et d'angle, le contrôle de positionnement à l'échelle spatiale, la mesure de courant électrique Parmi ces capteurs magnétiques, on peut citer les capteurs utilisant l'électronique de spin qui se caractérisent par une grande sensibilité sur une petite échelle spatiale.

Les capteurs magnétiques ont envahi le marché grand public et on les trouve en grand nombre d'objets technologiques qui nous entourent. On les trouve également dans une machine à laver, dans un réfrigérateur, et même certaines chaussures de sport. Les capteurs magnétiques offrent aussi des possibilités variées liées à la transmission d'information sans contact ou aussi à la détection à distance ou à la mesure d'un courant électrique.

I.2.2 Types de capteurs magnétiques

Les capteurs magnétiques se sont développés et leur nombre est de plus en plus important. Leurs applications se sont diversifiées en fonction de leurs plages de mesures et de résolution, et aussi en fonction de leurs coûts.

Parmi ces capteurs, on peut citer les capteurs magnétiques inductifs, les capteurs magnétiques à effets de Hall, les capteurs magnétiques à effet magnéto résistifs, les capteurs magnétiques à fibres optiques, les capteurs magnétiques à résonnance magnétique nucléaire (RMN) et les capteurs magnétiques à ondes élastiques de surface.

I.2.2.1 Les capteurs magnétiques à effets inductifs

Ces capteurs sont utilisés comme : lecteurs de magnétophones et de magnétoscopes, capteurs de pressions, détecteurs de défaut dans des structures mécaniques.

Tout en utilisant l'effet inductif, dans ce type de capteurs, un bobinage est réalisé autour d'un circuit magnétique dont le rôle est de canaliser le champ magnétique. Dans les capteurs magnétiques à effet inductif, leur principe de fonctionnement utilise les courants de Foucault générés dans le matériau. Le parcours de ces courants est modifié en présence de défaut mécanique.

I.2.2.2 Les capteurs magnétiques à Effet de Hall

Les premiers générateurs de Hall intégrés utilisaient une technologie MOS dans les films de semi-conducteurs fins qui sont fabriqués par évaporation ou déposition de vapeur chimique et structurés à l'aide de la photolithographie. Les capteurs magnétiques à effet de Hall sont réalisés avec des matériaux de type Arséniure d'Indium (InAs) ou Antimoine d'Indium (InSb). Ces matériaux sont caractérisés par des mobilités très grandes par rapport à de l'Arséniure de Gallium (AsGa), par exemple. L'avantage, est de pouvoir polariser le capteur en question avec des courants plus importants afin d'obtenir une sensibilité plus élevée, tout en limitant l'échauffement du dispositif.[26]
Le tableau I.4 donne les mobilités des principaux matériaux utilisés dans la fabrication des capteurs à effet de Hall.

Tableau I.4 : Mobilité des matériaux utilisables pour un générateur de Hall[26]

	InAs	**InSb**	**AsGa**
µn (cm^2 /Vs)	33000	78000	8500
µp (cm^2/Vs)	460	750	400

Le rapport longueur sur largeur de la plaquette, la dimension réelle des électrodes de Hall interviennent fortement dans la diffusion des courants en présence d'induction magnétique et permettent en pratique, d'optimiser les caractéristiques d'un générateur. La Figure I.9, montre un type de géométrie utilisée par Siemens pour des capteurs magnétiques à effet de Hall[26].

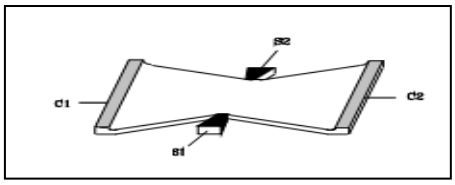


Figure I.9 Forme de papillon proposée par Siemens pour concentrer le courant dans la région du centre et obtenir une forte sensibilité aux flux magnétiques[26] .

I.2.2.3 Les capteurs magnétiques à magnétorésistance

Les capteurs magnéto résistifs sont fabriqués en utilisant plusieurs méthodes. Par exemple l'entreprise Philips utilise une technique de photolithographie à partir de permalloy (Ni18Fe19). Ce matériau magnétique est par la suite évaporé et oxydé sur un support en silicium afin de linéariser la caractéristique de la tension en fonction de l'induction magnétique.

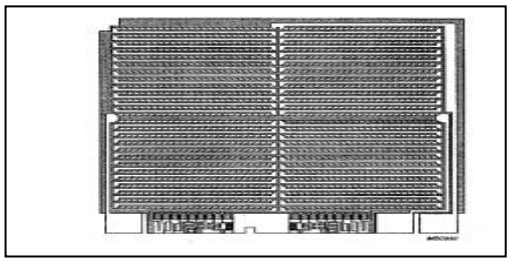


Figure I.10: Capteur magnéto résistif réalisé par Philips[26]

Comme matériaux magnéto résistifs, Siemens par exemple utilise de l'antimoine de nickel (NiSb) ou de l'antimoine d'indium (InSb) afin de réaliser le barreau de semi-conducteur. Les aiguilles formant les matériaux et disposées parallèlement sur la longueur, se comportent comme des courts-circuits et constituent des directions favorables de passage du courant. En présence d'induction magnétique, les lignes de courant sont déviées et le courant ne passe plus au travers des aiguilles.

I.2.2.4 Capteurs à magnéto résistance géante

Comme pour la magnétorésistance, un champ magnétique permet de modifier la trajectoire d'un électron en mouvement et il y a par conséquence une modification de la

[26] P. P. Poulichet , « Capteurs magnétiques » http://www.incertitudes.fr/robot/capteurs-magnetique.pdf.

résistance du matériau par rapport au champ magnétique. Cet effet est très faible pour la plupart des métaux. En 1988, les études de Baibich et al [27] ont permis de mesurer une variation de la résistance de 50% après l'application du champ magnétique sur des films minces multicouches caractérisés par des épaisseurs très faibles de quelques dizaines d'Angström. Cette variation de la résistance fut appelée Magnétorésistance géante et notée GMR.

L'effet de magnétorésistance géante apparaît lorsqu'un sandwich composé d'une couche ferromagnétique et de couches de matériaux non magnétiques comme (FeCr, FeNiAg, FeNiCu) est soumis à un champ magnétique extérieur. Les épaisseurs des différentes couches doivent être beaucoup plus faibles comparées au libre parcours moyen (longueur moyenne entre deux collisions) dans le multicouche. Dans le cas de la couche FeCr les épaisseurs sont par exemple de l'ordre de 30Å pour le fer et 9Å pour le Cr.

L'effet de magnétorésistance géante a été découvert en utilisant un échantillon multicouche de fer et de chrome. Dans ce cas, quand le champ magnétique est nul, le couplage anti-ferromagnétique entre les couches de fer au travers des couches de chrome maintient les couches successives de fer dans une orientation antiparallèle. Quand un champ magnétique externe est appliqué, les interactions entre les différentes couches s'estompent et les couches de fer se magnétisent dans la direction imposée par le champ magnétique extérieur. La résistance de passage du courant transversalement aux couches est plus faible quand les couches sont magnétisées dans le même sens que le moment magnétique extérieur, que dans le cas où la magnétisation est orientée alternativement dans un sens et dans l'autre. La magnétorésistance découle donc de cet effet.

La résistance d'un courant électrique dans un métal dépend du processus de diffusion et du nombre de collisions que subissent les porteurs de charges dans le métal. Si le processus de diffusion est fort, le libre parcours moyen entre deux collisions est faible et la résistance est importante. Dans le cas contraire, si le processus de diffusion est faible, le libre parcours moyen entre deux collisions est grand et par conséquent la résistance faible.

---

[27] M. N. Baibich, J. M. Broto, A. Fert, F. Nguyen Van Dau, F. Petroff, P. Etienne, G. Creuzet, A. Friederich, and Chazelas "Giant Magnetoresistance of (001) Fe/ (001)Cr Magnetic Superlattices" Phys. Rev. Lett. 61, 2472, (1988).

I.2.2.5 Autres types de capteurs magnétiques

Le tableau I.5 présenté ci-dessous résume les différents types de capteurs magnétiques présents sur le marché et leurs principales caractéristiques et domaines d'applications

Tableau I.5: Tableau résumant les divers types de capteurs magnétiques[28]

Type	Fréquence (Hz)	Type de Matériau	Détectivité[29]	Amplitude du Champ (Tesla)	Applications
Magnétorésistance (AMR)	DC – 10	Film mince	1 nT/ √Hz	10^{-9} – 10^{-3}	Capteurs de courant, boussoles
Magnétorésistance tunnel (TMR)	DC – 10^{8}	Film mince	0,1 nT/√Hz[30]	10^{-9} – 10^{-3}	Têtes de lecture
Magnéto-optique (MO)	DC – 10^{8}	Discret	1 pT/√Hz	10^{-5} – 10^{2}	Imagerie
Résonance Magnétique Nucléaire (RMN)	DC – 10^{2}	Massif	1 nT/√Hz	10^{-10} – 10	Référence de champ, IRM
Bobines à air	10^{-3} – 10^{9}	Massif	1 pT/√Hz	10^{-10} – 10	Antennes, IRM haut champ, courants AC
Fluxgates	DC – 10^{3}	Massif	10 pT/√Hz	10^{-10} – 10^{-3}	Magnétométrie terrestre
SQUID (Bas Tc)	DC – 10^{9}	Film mince	2 fT/√Hz	10^{-15} – 10^{-2}	MEG, IRM très bas champ
SQUID (Haut Tc)	DC – 10^{4}	Film mince	30 fT/√Hz	10^{-15} – 10^{-2}	Imagerie
Magnétomètres atomiques	DC – 10^{2}	Massif	3 fT/√Hz	10^{-15} – 10^{-9}	MCG, MEG, IRM très bas champ

[28] B. Li, H. Al Rowais and J. Kosel; "Surface Acoustic Wave Based Magnetic Sensors, Modeling and Measurement Methods for Acoustic Waves and for Acoustic Microdevices", Prof. Marco G. Beghi (Ed.): 978-953-51-1189-4, (2013).

[29] La détectivité est le niveau de champ magnétique telle que le rapport signal bruit est égal à 1, pour une bande de fréquence de mesure de 1 Hz.

[30] Les GMRs, les TMRs ont un bruit en 1/f à basse fréquence, ce qui permet de limiter leurs performances.

Partie 3 : Capteurs magnétiques SAW

I.3.1 Introduction

Un grand nombre de recherches a été menées au cours des dernières décennies dans le domaine des capteurs SAW, et par conséquent, différents capteurs SAW filaires et aussi sans fil ont été développés pour mesurer divers paramètres physiques comme décrit dans le précédent chapitre. Ces paramètres peuvent être physiques ou chimiques, tels que la température, la déformation mécanique, la pression, l'humidité et aussi le champ magnétique,[31, 32 , 33 , 34 ,35].

Les capteurs magnétiques à base de SAW n'ont, jusqu'à présent, pas été suffisamment étudiés bien qu'ils soient passifs et qu'ils permettent une interrogation sans fil ce qui permet d'envisager des applications jusqu'alors inaccessibles. Au début de l'année 1975, un déphaseur magnétique à SAW a été proposé par Ganguly et al[36] Un film mince de matériau magnétostrictif a été déposé sur une ligne à retard d'un dispositif SAW. Un décalage de phase a été observé en raison de la dépendance de la vitesse de propagation de l'onde du champ magnétique externe. Récemment, un nouveau concept de capteur magnétique basé sur un résonateur SAW a été publié[35] Un matériau magnétostrictif, le nickel, a été utilisé pour fabriquer des transducteurs interdigités (IDT) du résonateur

[31] T M. Reeder and D E Cullen; "Surface-acoustic-wave pressure and temperature sensors". Proceedings of the IEEE 64: 754-756, (1976).

[32] K.Lee, W. Wang, G. Kim and S. Yang ; "Surface Acoustic Wave Based Pressure Sensor with Ground Shielding over Cavity on 41° YX LiNbO3". Jpn. J. Appl. Phys. 45: 5974–5980, (2006)

[33] A. Pohl, "Wirelessly interrogable surface acoustic wave sensors for vehicular applications". IEEE T. Instrum. Meas. 46: 1031-1038, (1997).

[34] G S .Calabrese, H .Wohltjen, M K .Roy; "Surface acoustic wave devices as chemical sensors in liquids: Evidencedisputing the importance of Rayleigh wave propagation", Anal. Chem. 59: 833–837, (1987).

[35]M.Kadota, S. Ito, Y.Ito, T .Hada, And K. Okaguchi "Magnetic Sensor Based on Surface Acoustic Wave Resonators". Jpn. J. Appl. Phys. 50: 07HD07, (2011).

[36] A .Ganguly, K L. Davis, D.Webb, C. Vittoria, D W.Forester "Magnetically tuned surface-acoustic-wave phase shifter". *Electronics Letters*. 11: 610-611 (1975)

SAW. La fréquence de résonance du dispositif change avec le champ magnétique externe (Figure I.11).

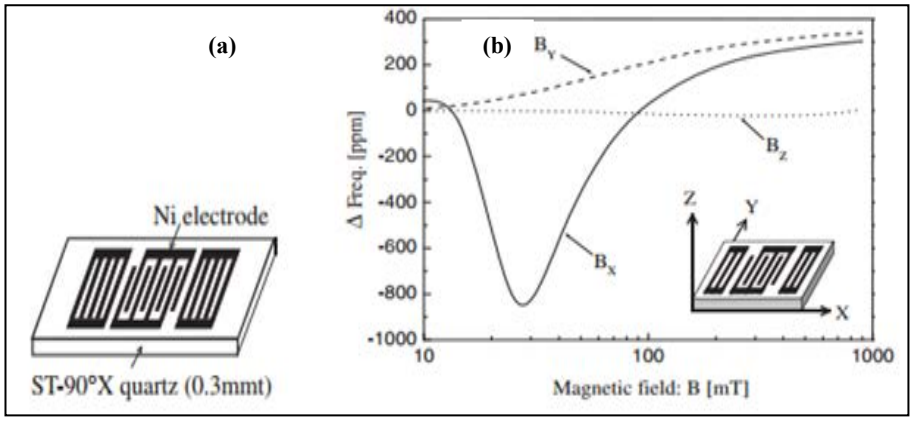


Figure I.11: Résonateur magnétique SAW (a) et variation de la fréquence en fonction du champ magnétique appliqué suivant les axes X, Y et Z (b).

Une autre idée a été mise en avant par Hauser et Steindl [37, 38, 39] combinant un dispositif SAW (ligne à retard) combiné avec un micro-fil à magnéto-impédance géante (GMI) le micro-fil utilisé comme impédance qui charge l'IDT du SAW est utilisé comme transducteur. Les variations de l'intensité du champ magnétiques induisent une variation d'impédance et par conséquence une variation des caractéristiques du dispositif SAW et notamment en pertes d'insertion.

I.3.2 Capteurs magnétiques passifs à base SAW

Un capteur magnétique SAW peut être réalisé soit par l'ajout d'une couche de matériau sensible aux champs magnétiques dans le chemin de l'onde, soit par l'utilisation de matériaux magnétostrictif pour réaliser les IDT, soit en chargeant les IDT de sortie dans le cas d'une ligne à retard par un transducteur magnétique (type GMI). Dans le premier et le deuxième cas, le champ magnétique induit des contraintes sur la couche

[37] H .Hauser et al. "Wirelessly Interrogable Magnetic Field Sensor Utilizing Giant Magneto-Impedance Effect and Surface Acoustic Wave Devices". IEEE T INSTRUM MEAS. 49: 648-652 (2000)
[38] R. Steindl, Ch. Hausleitner, A. Pohl, H. Hauser, Nicolics J "Passive wirelessly requestable sensors for magnetic field measurements". Sens. & Actuators A. 85: 169-174 (2000)
[39] H .Hauser, J .Steurer, J. Nicolics, L .Musiejovsky, I. Giouroudi "Wireless Magnetic Field Sensor". Journal of Electrical Engineering 57: 9-14 (2006)

sensible et modifie ainsi les propriétés élastiques de la structure et donc la vitesse élastique de l'onde. Alors que dans le troisième cas, le champ magnétique modifie l'impédance de charge et donc les caractéristiques du signal réfléchi. Dans le cadre du 3ème cas, les capteurs à magnéto impédance géante GMI sont considérés comme les candidats les plus appropriées car ils ont une sensibilité magnétique élevée et une fréquence de fonctionnement élevée.

Un résonateur passif à ondes élastiques de surface permettant la détection de champ magnétique a été mis récemment au point par Kadota *et al* [35]. Le nickel, qui est un matériau magnétostrictif, a été utilisé pour fabriquer les IDT sur un substrat de quartz (figure I.14-(a))

Suite à l'application d'un champ magnétique, le stress induit par le substrat est dû à une variation des contraintes mécaniques dans les électrodes de nickel. Cette variation provoque un changement dans la fréquence de résonance. Ce capteur a montré une une pente de variation de fréquence de 4ppm/mT appliqué perpendiculairement à la direction de propagation de l'onde élastique de surface.

I.3.3 Capteurs magnétique SAW à magnéto-impédance géante-GMI

I.3.3.1 Notions de base de capteurs GMI

L'effet GMI a été observé pour la première fois dans les fils amorphes à base de cobalt par Panina et Mohri en 1994 [40] et, depuis a attiré un vif intérêt en raison de sa sensibilité permettant la mesure de champ magnétique avec une résolution de l'ordre nT.

L'effet GMI est la variation de l'impédance d'un conducteur ferromagnétique effectuée sur la variation d'un champ magnétique. Le changement d'impédance relative, aussi appelé rapport GMI, est exprimée par

$$\text{GMI Ratio (\%)} = \frac{100\% \times Z(H) - Z(H_0)}{Z(H_0)} \quad (1)$$

où Z (H_0) est l'impédance à champ magnétique nul et Z (H_{max}) est l'impédance au champ de saturation. Les deux définitions ont des aspects particuliers qui doivent être pris en considération. Généralement $Z(H_0)$ dépend de l'état rémanent du matériau magnétique. L'effet GMI s'explique par l'électromagnétisme classique. Le changement de l'impédance

[40] L V. Panina et al. Appl. Phys. Lett. 65: 1189-1191(1994)

complexe provient en particulier du changement de la perméabilité complexe. Analytiquement, l'impédance complexe (Z) d'un conducteur est définie par

$$Z = \frac{U_{ac}}{I_{ac}} = x = \frac{\int Jz\,(S)d_z}{\iint qI_z d_q} \quad (2)$$

Où U_{ac} est défini par la tension alternative appliquée sur la structure, le courant est défini par I_{ac}, L est la longueur de la structure et ζ définit la conductivité. S et q se réfèrent respectivement à la surface et la section transversale du conducteur. J_z est la densité de courant dans la direction longitudinale obtenue par la résolution des équations de Maxwell. Dans les matériaux ferromagnétiques, en négligeant les courants de déplacement (D=0), les équations de Maxwell peuvent être rédigées comme suit :

$$\nabla \times \mathrm{H} = J \quad (3)$$

$$\nabla \times \mathrm{J} = -\frac{\mu_0}{\rho_f} \times (H + M) \quad (4)$$

$$\nabla \times (\mathrm{H} + \mathrm{M}) = 0 \quad (5)$$

J, étant la densité de courant, H est le champ magnétique appliqué. L'aimantation du matériau ferromagnétique est définie par M, ρf est la densité de charge libre et μ_0 est la perméabilité du vide.

Des équations (3) à (5), l'expression peut être dérivée de l'équation (6) et peut être résolue en utilisant l'équation de Landau-Lifshitz, qui concerne M et H.

$$\nabla^2\mathrm{H} - \frac{\mu_0}{\rho_f}\mathrm{H} = \frac{\mu_0}{\rho_f}\mathrm{M} - \nabla(\nabla.\mathrm{M}) \quad (6)$$

$$\mathrm{M} = \gamma \mathrm{M} \times \mathrm{H}_{\mathrm{eff}} - \frac{\alpha}{Ms}\mathrm{M} \times \mathrm{Mf} \quad (7)$$

Où γ est le rapport gyromagnétique, Ms est l'aimantation à saturation, α est le paramètre d'amortissement et H_{eff} est le champ magnétique efficace, exprimée comme suit[41].

$$\mathrm{H}_{\mathrm{eff}} = \mathrm{H} + \mathrm{H}_{\mathrm{a}} + \frac{2A}{\mu_0 M_s}\nabla^2\mathrm{M} \quad (8)$$

Où H est le champ magnétique interne qui comprend le champ appliqué et le champ de démagnétisation, H_a est le champ d'anisotropie.

En combinant les équations (1) à (8), un modèle d'impédance théorique peut être évalué pour les capteurs GMI avec différentes géométries[42].

[41] M. Knobel, M. Vazquez, and L. Kraus, K.H.J Buschow ed "Giant Magnetoimpedance, Handbook of magnetic materials". 15: 497-563 (2003)

[42] L V. Panina, D P Makhnovskiy, D J. Mapps, and D S. Zarechnyuk "Two dimensional analysis of magnetoimpedance in magnetic/metallic multilayers". J. Appl. Phys. 89: 7221 (2001).

Bien que l'effet GMI expérimentalement obtenu montre une grande sensibilité par rapport à d'autres effets exploités pour les capteurs magnétiques, les valeurs estimées théoriquement n'ont pas encore été atteintes. Par conséquent, beaucoup d'efforts ont été faits pour améliorer les propriétés magnétiques les capteurs GMI[43] .

I.3.3.2 Les Capteurs GMI filaires

Les capteurs GMI filaires ont été largement étudiés. Sur la base de l'électromagnétisme classique, le modèle théorique a été étudié par Panina et al, 1994 [42]. Ce dernier est défini par un paramètre fondamental :

$$Z = \frac{R_{dc}\, k\, r\, \zeta_0\, K\, r}{2\zeta_1\,(k_r)} \qquad (9)$$

où K est défini par $K = \frac{1+j}{\sigma_m}$ (12) et $\sigma m = \frac{C}{\sqrt{4\pi^2 f \sigma \mu_ø}}$ (10)

R_{dc} est la résistance en courant continu du fil, ζ_0, ζ_1 sont les fonctions de Bessel, r est le rayon du fil, j est le symbole imaginaire, δ_m désigne la profondeur de pénétration, *C* désigne la vitesse de la lumière, f est la fréquence du courant alternatif et $\mu_ø$ est l'anisotropie magnétique circonférentiel. L'origine de l'effet GMI est située dans la dépendance de $\mu_ø$ du champ magnétique axial qui entraîne un changement de δm. Afin d'obtenir un rapport élevé GMI, la valeur de δm doit être proche de l'épaisseur du conducteur.

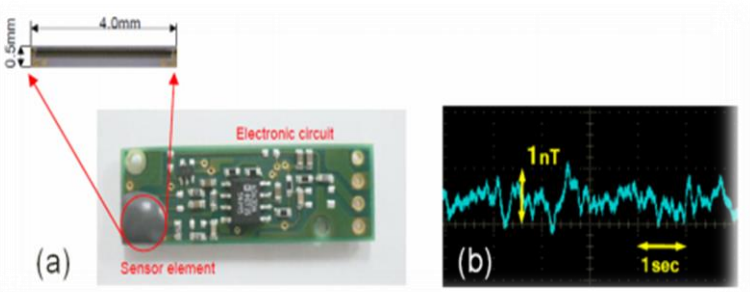


Figure I.12: Détecteur GMI développé par Aichi Steel Co., qui a une très grande sensibilité de valeur de 1V / µT et un niveau de bruit 1 nT [44]

[43] T. Morikawa, Y. Nishibe, H. Yamadera, Y. Nonomura, M Takeuchi, Y. Taga "Giantmagneto-Impedance Effect in Layered Thin Films". IEEE Trans. Magn. 33: 4367 (1997).

[44] B. Li et al. "Surface Acoustic Wave Based Magnetic Sensors, Modeling and Measurement Methods for Acoustic Waves and for Acoustic Microdevices", Prof. Marco G. Beghi (Ed.): 978-953-51-1189-4 (2013).

Une anisotropie magnétique circonférentiel bien définie en combinaison avec un comportement magnétique doux est souhaitable car elle permet d'établir un grand changement de la perméabilité aux faibles champs magnétiques.
Différents matériaux ferromagnétiques amorphes ont été utilisés pour fabriquer des fils GMI[45] et présentent des propriétés exceptionnelles en termes de la distribution d'anisotropie magnétique.

I.3.3.3 Capteurs GMI à Couche mince

En théorie, un film mince magnétique est une couche similaire à un ruban magnétique, et les mêmes expressions analytiques sont appliquées pour la modélisation de l'effet GMI. En pratique, la différence principale réside dans le procédé de fabrication. Dans ce cas, la fabrication de couches minces fait appel aux techniques de dépôts les plus évoluées qui permettent de produire des films avec des épaisseurs qui peuvent varier de quelques nanomètres à quelques micromètres avec une précision atomique. Les couches minces des capteurs GMI présentent l'avantage d'être compatibles avec les procédés de la micro-électronique. Combinés avec les techniques de la micro et nanotechnologie, ils peuvent être déposés et structurés sur le même substrat que le circuit électronique.
En général, un capteur à haute sensibilité GMI est constitué d'un empilement de plusieurs couches de matériaux. Dans le cas d'un élément à trois couches, une couche conductrice est prise en sandwich entre deux couches magnétiques comme le montre la Fig.I.16(c). La couche conductrice assure une haute conductivité, et grâce à son association avec des couches magnétiques très perméables, un effet de peau est obtenu. [46,47].

Les capteurs magnétiques GMI à couche mince sont fabriqués par le biais de différents matériaux magnétostrictifs comme Co-Fe et les alliages à base magnétiques amorphes tel que NiFe qui est devenu populaire grâce à une très grande perméabilité, et un procédé de fabrication aisé. Les caractéristiques des matériaux magnétostrictifs les plus utilisés dans les capteurs GMI à couches minces sont résumés dans le tableau I.6.

---

[45] M H. Phan, H X. Peng "Giant magnetoimpedance materials: Fundamentals and applications. Progress in Materials Science". 53: 323–420 (2008).
[46] http://www.aichi-steel.co.jp/ENGLISH/pro_info/pro_intro/elect_3.html
[47] A .Sukstanskii and V. Korenivski "Impedance and surface impedance of ferromagnetic multilayers: the role of exchange interaction" J. Phys. D 34: 3337 (2001).

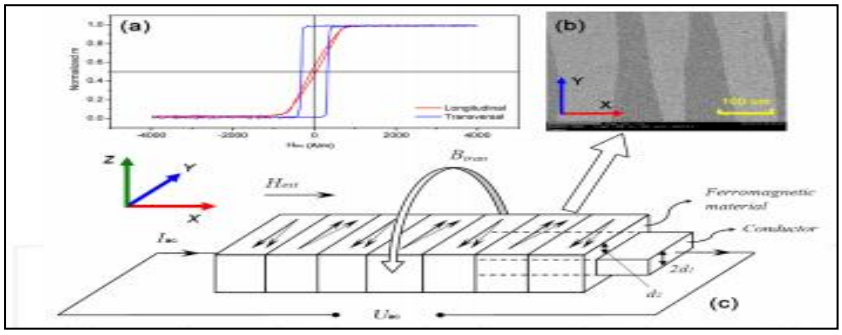


Figure I.13: Courbes (a) de l'aimantation obtenue par magnétométrie à échantillon vibrant d'un film mince magnétique (100 nm de Ni80Fe20) en directions transversales et longitudinales. (b) domaine de la couche magnétique. (c) Schéma d'une structure multicouche typique GMI. Les flèches dans le matériau ferromagnétique indiquent l'aimantation des domaines individuels (simplifiées). Lors de l'application d'un champ magnétique H_{ext} de l'extérieur, l'aimantation tourne dans le sens des flèches (H_{ext} pointillés) [45]

Tableau I.6: Les résultats sur les capteurs magnétiques GMI à film mince

Année	Matériaux	Fréquence du fonctionnement du capteur	Ratio GMI (%)	Sensibilité (%Oe)	Réference
1999	FeNiCrSiB/Cu/FeNiCrSiB	13MHz	77	2.8	[48]
2000	FeSiBCuNb/Cu/FeSiBCuNb	13MHz	80	2.8	[49]
2004	Ni81Fe19/Au/Ni81Fe19	300MHz	150	30	[50]
2004	$(Ni81Fe19/Ag)_n$	1.8GHz	250	9.3	[51]
2005	FeCuNbSiB/SiO2/Cu/SiO2/FeCuNbSiB	5.45GHz	33	1.5	[52]
2011	NiFe/Ag/NiFe	1.8GHz	55	1.2	[53]
2011	NiFe/Cu/NiFe	20MHz	166	8.3	[54]

[48] S .Xiao, Y .Liu, Y.Dai , L .Zhang , S.Zhou , and G. Liu " Giant Magnetoimpedance Effect in Sandwiched Films". J. Appl. Phys. 85: 4127 (1999).

[49] S. Xiao S, Y. Liu ,S. Yan , Y. Dai , L. Zhang , and L. Mei "Giant Magnetoimpedance and Domain Structure in FeCuNbSiB Films and Sandwiched Films". Phys. Rev. B 61: 5734-5739 (2000).

[50] D. de Cos, L V, Panina, N. Fry, I. Orue, A. Garcia-Arribas , JM. Barandiaran "Magnetoimpedance in narrow NiFe/Au/NiFe multilayer film systems". IEEE Transactions on Magnetic. 41: 3697 – 3699 (2005).

[51] A M H .de Andrade, R B .da Silva, M A. Correa, A D C. Viegas, A M. Severino, R L .Sommer "Magneto impedance of NiFe/Ag multilayers in the 100 kHz–1.8 GHz range. Journal of Magnetism and Magnetic Materials" 272–276: 1846–1847 (2004).

[52] X. Li, W .Yuan, Z. Zhao, J. Ruan and X .Yang "The GMI effect in Nanocrystalline FeCuNbSiB Multilayered Films with a SiO2 Outer Layer". J. Phys. D: Appl. Phys. 38: 1351–1354 (2005).

[53] M A. Corrêa, F .Bohn, V M. Escobar, M S. Marques, A D C .Viegas, L F .Schelp, and R L .Sommer "Wide Frequency Range Magnetoimpedance" in Tri-layered Thin NiFe/Ag/NiFe Films: Experiment and Numerical Calculation. J. Appl. Phys. 110: 093914 (2011).

[54] Z. Zhou et al." Longitudinal and Perpendicular Giant Magnetoimpedance Effects in a Compact Multiturn Meander NiFe/Cu/NiFe Trilayer Film" Sensor. Meas. Sci. Technol. 22: 035202 (2011).

Les capteurs GMI en couches minces offrent non seulement les avantages de la micro fabrication standard et donc une intégration dans le même substrat que les dispositifs SAW, mais, comme on peut le voir dans le tableau I.5, la fréquence de fonctionnement de capteurs GMI à couche mince est également compatible avec celle les dispositifs SAW (domaine RF) et peut être ajustés dans une large gamme.

I.3.3.4 Capteur GMI-SAW intégré

Dans les premières études, les résonateurs SAW GMI ont été combinés pour former des dispositifs sans fil interrogeables à distance[55,56, 57]. Des GMI en forme filaire ont été sélectionnés pour leurs sensibilités élevées, et ils ont été liés à l'IDT de sortie d'une ligne à retard SAW, qui fonctionne comme un réflecteur, de manière à agir en tant qu'impédance de charge. La forte dépendance de l'impédance GMI au champ magnétique provoque une dépendance considérable de l'amplitude du signal réfléchi au champ magnétique. Malgré les résultats intéressant que ce type de capteur a pu fournir en termes de capteurs magnétiques interrogeables à distance, le procédé de fabrication n'est pas compatible avec la microfabrication standard, ceci constitue un problème considérable en ce qui concerne la reproductibilité et les coûts. Pour remédier à ce problème, une conception SAW-GMI entièrement intégrée utilisant des procédés standards de micro-fabrication a été proposée. L'option la plus fiable est d'utiliser une GMI en couche mince comme transducteur et cela pour les raisons suivantes :

- Les couches minces des capteurs GMI peuvent être produites par les mêmes procédés de dépôt que les IDTs de dispositifs SAW.
- La technique de photolithographie standard garantit un alignement précis et une reproductibilité des deux dispositifs.
- Les couches minces des capteurs GMI fournissent une large gamme de fréquences de travail allant jusqu'à quelques GHz, ce qui correspond à l'exigence de haute fréquence des résonateurs SAW.

---

[55] H. Hauser, R.Steindl, Ch. Hausleitner, A. Pohl, J. Nicolas, "Wirelessly Interrogable Magnetic Field Sensor Utilizing Giant Magneto-Impedance Effect and Surface Acoustic Wave Devices". IEEE T INSTRUM MEAS. 49: 648-652(2000).

[56] R.Steindl et al. "Passive wirelessly requestable sensors for magnetic field measurements". Sensors and Actuators A. 85: 169-174 (2000).

[57] H Hauser et al. "Wireless Magnetic Field Sensor". Journal of Electrical Engineering 57: 9-14(2006).

- Les capteurs GMI à couches minces peuvent avoir une conception simple et flexible ainsi qu'une grande sensibilité au champ magnétique.

I.3.3.5 Conception des Capteur GMI-SAW intégré

La figure I.14 montre un schéma d'un capteur à film mince GMI intégré d'une ligne à retard SAW développé par Bodong Li *et al* [58]. Un signal est appliqué à l'IDT d'entrée (IDT1) et converti en une onde SAW se propageant vers l'autre extrémité du substrat, où il est réfléchi à au niveau de l'IDT référence (IDT2) et ensuite de l'IDT chargé (IDT3). Les ondes réfléchies seront reconverties en ondes RF au niveau de l'IDT1 et ensuite transmises via l'antenne vers l'unité d'interrogation distante.

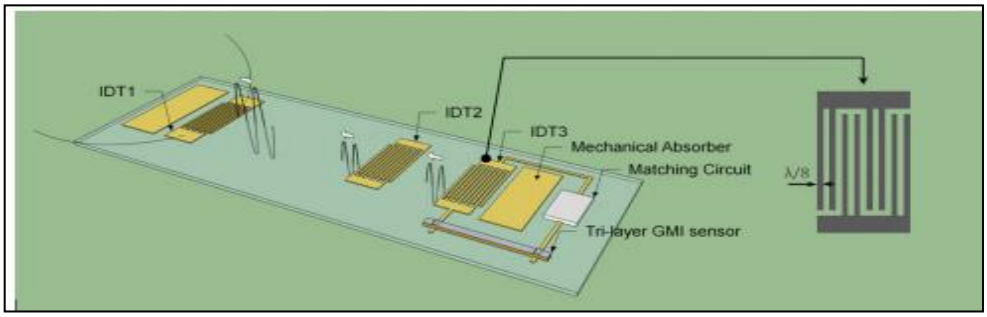


Figure I.14: Représentation schématique d'un capteur de champ magnétique passif et à distance intégrée constitué d'une ligne à retard SAW et d'un capteur GMI à film mince[59].

Afin d'obtenir une sensibilité au champ magnétique élevée, le détecteur GMI est adapté à l'IDT de sortie (IDT3) à la fréquence de travail du dispositif SAW. Comme l'impédance du capteur GMI change avec le champ magnétique appliqué, l'adaptation se détériore, ce qui conduit l'amplitude du signal réfléchi par IDT3 à changer. Etant donné que le matériau piézo-électrique est sensible aux modifications de l'environnement, par exemple la température, un IDT de référence est utilisé pour fournir un signal qui permet la suppression de ce bruit au moyen de traitement de signal. Deux plots métalliques utilisés comme absorbeurs sont placés avant l'IDT1 et après l'IDT3 afin de supprimer les réflexions parasites et notamment celles provenant des bords du substrat[55]. Par

[58] B.Li, et al. "Optimization of Autonomous Magnetic field sensor consisting of giant magneto impedance sensor and surface acoustic wave transducer", IEEE transactions on magnetics, vol 48, No, 11, November (2012).
[59] H.Hauser, R. Steindl, Ch. Hausleitner, A.Pohl, J. Nicolics Wirelessly Interrogable Magnetic Field Sensor Utilizing Giant Magneto-Impedance Effect and Surface Acoustic Wave Devices. IEEE T INSTRUM MEAS. 49: 648-652 (2000)

conséquent, l'influence de la charge sur le signal réfléchi sur l'IDT3 peut être déterminé et liée à la variation du champ magnétique.

I.3.4 Les applications des capteurs magnétiques SAW

Les capteurs de champs magnétiques sont parmi les capteurs les plus couramment utilisés pour de nombreuses applications. Comme indiqué dans les sections précédentes, les capteurs SAW ont été développés pour différentes applications, et cette technologie fournit également une plate-forme pour la réalisation de capteurs magnétiques ainsi que pour ceux sans fil et passifs. Ils peuvent fournir des solutions pour diverses applications, par exemple, là où les capteurs doivent résister à des conditions environnementales sévères.

Sur les innombrables applications de capteurs magnétiques passifs et interrogeables à distance basés sur les dispositifs SAW, quelques-uns seront mis en évidence dans ce qui suit. En effet ces derniers sont de plus en plus développés dans les systèmes de nanotechnologie, et miniaturisés dans le domaine du biomédical. Les technologies basées sur les effets magnétiques sont particulièrement intéressantes car ils peuvent être contrôlés à distance par des champs magnétiques. Par exemple, la société NVE a récemment mis au point un capteur magnétique à pile pour être utilisé comme un commutateur magnétique pour des dispositifs implantables. Quand un champ magnétique est appliqué, le capteur de déclenchement se met en marche. Il s'éteint lorsque le champ est supprimé. Le capteur fonctionne à un point de fonctionnement stable de 15 Oe[60].

L'industrie automobile utilise largement les capteurs magnétiques pour différentes applications, par exemple pour mesurer le courant dans les véhicules électriques[61] ou la vitesse de rotation des roues[62]. Une autre application utilise des capteurs magnétiques pour détecter les véhicules qui passent à l'aide de marqueurs de voie[63]. Ces systèmes pourraient également être utilisés pour détecter la vitesse des véhicules en mesurant le temps entre deux bornes d'une distance fixe. Dans une autre application, développée par

[60] http://www.medicalelectronicsdesign.com/products/nanopower-magnetic-sensors-fit- implantable-devices

[61] P. Ripka "Sensors based on bulk soft magnetic materials: Advances and challenges. Journal of Magnetism and Magnetic Materials". 320: 2466-2473 (2008).

[62] J Lenz, S Edelstein "Magnetic sensors and their applications". IEEE Sensors Journal. 6: 631-649 (2006).

[63] Y. Nishibe, N. Ohta, K. Tsukada, H. Yamadera, Y. Nonomura, K. Mohri, T. Uchiyama "Sensing of passing vehicles using a lane marker on a road with built-in thin- film MI sensor and power source". IEEE Transactions on Vehicular Technology. 53: 1827- 1834 (2004).

Stendl et al[64], l'usure du pneumatique d'un véhicule est détectée en mesurant le champ magnétique noyé dans le caoutchouc de bandes de roulement pneumatiques. La valeur du champ magnétique varie en fonction de la taille de la bande de roulement.
Comme future application visée pour les capteurs sans fil : le suivi à long terme des renforts métalliques dans, par exemple, des ponts ou des bâtiments qui nécessitent des capteurs passifs et éloignés, capables de détecter les changements des propriétés du métal lié à des défauts internes ou à de la corrosion.

I.3.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons développé les dispositifs SAW, les capteurs magnétiques, et aussi les capteurs magnétiques SAW. Pour ces derniers, la sensibilité aux champs magnétiques peut être obtenue soit en modifiant les propriétés de l'IDT dans un résonateur : ainsi les IDTs sont formés par des matériaux magnéto-élastiques sensibles au champ magnétique, ou en utilisant des lignes à retard SAW formées de couches de films magnétiques déposées dans le chemin de l'onde ou en chargeant les IDTs de sortie par une GMI.
De ce fait, les capteurs magnétiques SAW combinent deux physiques couplées à savoir la piézoélectricité sur laquelle s'appuie le fonctionnement des dispositifs SAW, et aussi la magnétostriction qui caractérise les matériaux magnéto élastiques, qui déterminent la variation fréquentielle quand la structure est soumise à un champ magnétique.
Dans le prochain chapitre, on introduira théoriquement et analytiquement les physiques des matériaux magnéto-élastiques sur lesquelles se basent le fonctionnement des dispositifs magnétiques élastiques SAW. Ainsi, on développera la mise en équation du problème magnéto élastique, que, sur lequel nous allons nous baser pour la construction des différents modèles théoriques des structures magnéto élastiques multicouches qui seront utilisées dans les prochains chapitres de ce document.

[64] R. Steindi, C. Hausleitner, H. Hauser, W Bulst "Wireless magnetic field sensor employing SAW transponder, Applications of Ferroelectrics". Proceedings of the 12th IEEE International Symposium on. 2: 855-858 (2000).

Chapitre II : Modèle théorique, mise en équation et validation du couplage magnéto élastique

Introduction

Le présent chapitre vise à valider le couplage magnéto-élastique en comparant les résultats obtenus par simulation aux résultats expérimentaux récemment publiés par Kadota et al[65]. Tout d'abord nous détaillerons la mise en équation du problème magnéto élastique, ensuite nous détaillons les différentes étapes d'implémentation de notre modèle avec le logiciel Comsol multiphysics. Ce modèle couplant deux physiques : piézoélectrique et magnétique, va-nous permettre d'étudier la sensibilité des capteurs magnétiques SAW aux champs magnétiques. Ensuite un résonateur SAW utilisant le quartz comme substrat et le Nickel comme IDT sera construit en utilisant comme paramètres d'entrée les mêmes données utilisées par Kadota *et al.* pour réaliser leur capteur SAW. Les résultats théoriques concernant les variations, en fonction de l'intensité du champ magnétique et sa direction, de la fréquence de résonance, du facteur de couplage électromécanique et du facteur de qualité du dispositif SAW seront comparés aux résultats expérimentaux en vue de la validation du modèle.

[65] M. Kadota, S. Ito,Y. Ito, T.Hand , K.Okaguchi, "Sensitivity of surface acoustic wave magnetic sensors composed of various Ni Electrode structures" ,J J. Appl. Phys. 51,07GC21, (2012) .

Partie 1 : Mise en équations du problème magnéto-élastique

II.1.1 Le ferromagnétisme

Certains corps possèdent la particularité de s'aimanter sous l'effet d'un champ magnétique externe. Pour certains corps, ils peuvent garder une aimantation importante même après que le champ magnétique externe disparaisse.

Chaque atome se comporte comme une boussole au sein d'un matériau ferromagnétique. Chaque petit atome de la matière est symbolisé par une petite boussole : ce sont les dipôles propres à chaque matériau.

Sous l'effet d'un champ magnétique externe, les dipôles atomiques s'orientent dans le même sens et le matériau va, dans ce cas, s'aimanter. L'aimantation à saturation correspond à l'alignement de tous les dipôles atomiques dans le même sens. Si le champ magnétique est retiré, le matériau peut garder son aimantation ou la perdre complètement.

Le point en commun des matériaux ferromagnétiques est qu'ils sont à base de fer ou bien d'autres métaux comme le cobalt ou le nickel.

II.1.1.1 Les matériaux ferromagnétiques

Certains matériaux ferromagnétiques présentent des variations dimensionnelles qui se manifestent par le changement de l'aimantation (effet Joules), et inversement, le changement de l'aimantation lorsqu'ils sont soumis à des contraintes mécaniques (effet Villari). Ce phénomène est appelé magnétostriction[66].

Pendant la première moitié du vingtième siècle, la magnétostriction observée dans les matériaux ferromagnétiques disponibles a orienté l'intérêt des recherches vers des applications de capteurs intelligents comme les systèmes de sonar à base de nickel.

Dans les années soixante-dix, l'introduction de nouveaux matériaux dont l'effet magnétostrictif est plus élevé, a ouvert les portes à de nouvelles applications à des fréquences élevées et présentant un fort rendement.

Dans les dernières décennies, l'intérêt pour les matériaux magnétostrictifs est porté sur la compréhension de l'origine du phénomène magnétostrictif, la caractérisation des propriétés des matériaux, et de la modélisation du comportement couplé présentée par ces matériaux.

II.1.1.2 Les terres rares

Les terres rares possèdent des coefficients de magnétostriction extrêmement importants. Ainsi les matériaux composites $TbFe_2$ et $SmFe_2$ fournissent la plus grande magnétostriction à température ambiante.

Pour ces alliages le terme "magnétostriction géante" est utilisé. Dans ces alliages, la température de curie inférieure à 500°C[66] et entraîne une variation des propriétés magnétostrictives de ces derniers.

Les coefficients magnétostrictifs des matériaux amorphes sont beaucoup plus faibles que ceux des matériaux qui sont polycristallins. Malgré cela, ces matériaux amorphes possèdent l'avantage d'avoir une déformation importante sous faible champ. De plus, du fait de leur utilité en couche mince, ils conviennent parfaitement aux applications microsystèmes. L'obtention de déformations significatives sous très faible champ est un aspect intéressant pour ces applications.

II.1.2 La magnétostriction

La Magnétostriction désigne la propriété que possèdent les matériaux ferromagnétiques de se déformer sous l'effet d'un champ magnétique. Ce phénomène physique est découvert par James Prescott Joule en 1842.

Le phénomène de la magnétostriction, est une transformation de l'énergie mécanique en énergie magnétique et vice-versa. Ce phénomène physique traduit un couplage magnéto-mécanique entre les champs magnétiques et mécaniques dans le matériau magnétostrictif.

L'origine de ce phénomène peut être attribuée à l'alignement des domaines magnétiques au sein du matériau. La figure II.1 présente la variation des domaines magnétiques (les cercles) et l'orientation des moments magnétiques (les flèches) dans le matériau magnétostrictif en absence et en présence d'un champ magnétique.

[66] P.Hartemann « Effets et matériaux magnétostrictifs » Techniques de l'ingénieur, 10 juin 1992

En absence de champ magnétique (H), la série de domaines et moments magnétiques sont orientés aléatoirement. Quand un champ magnétique est appliqué, la série de domaines tournés à s'aligner partiellement ou totalement (quand l'intensité du champ magnétique est élevée) à la direction du champ magnétique résultant une déformation du matériau magnétostrictif (ε)

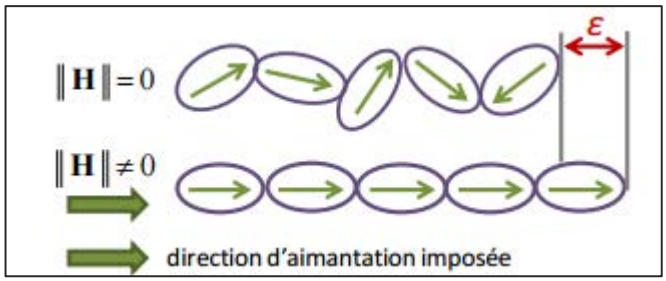


Figure II.1 : Représentation schématique de l'effet de magnétostriction avec une déformation élastique notée ε entre l'état désaimanté et un état d'aimantation non nulle[67].

II.1.2.1 Matériaux magnétostrictifs

Les matériaux magnétostrictifs appartiennent à des groupes principaux : les métaux (fer, cobalt, nickel principalement), les alliages métalliques et ferrites d'un côté et les composés de terres rares de l'autre.

C'est sur le nickel et sur les alliages métalliques que les premiers effets magnétostrictifs ont été observés. Leur température de Curie est très élevée et assure une bonne stabilité thermique (supérieures à 500 °C).

Les ferrites ont ensuite été mises au point : leur effet magnétostrictif est plus important. Par ailleurs, elles peuvent être utilisées à des fréquences élevées et présentent un fort rendement électroacoustique. Leur inconvénient majeur est leur fragilité.

La famille présentant des effets magnétostrictifs les plus exacerbés, est celle des alliages aux terres rares, du type Terbium-Dysprosium-Fer, commercialement appelés Terfenol-D. Le Terfenol-D atteint une magnétostriction maximale de l'ordre de 0,1 à 0,2 % d'élongation et 1 kN/cm de contrainte de compression.

[67] C.ROUGE « Modélisation du rayonnement ultrasonore par un traducteur EMAT dans une pièce ferromagnétique » Thèse de doctorat de l'université de Bordeaux, soutenue le : 17 / 12 / 2013

On présente dans le tableau II.1 les propriétés des matériaux magnétostrictifs suivants : Nickel, et Terfenol-D.

TableauII.1 : Comparaison entre les propriétés du Nickel, Terfenol- D et CoFeB

	Terfenol-D[68]	**Nickel**[63,69]
Plan pratique pour la magnétostriction	<110>	<111>
Module d'élasticité (GPa)	25-35	207
Résistance à la traction (MPa)	28	500
Limite élastique à la traction (MPa)	28	140
Aimantation à saturation (Tesla)	1	0.6
Perméabilité relative	2~8	0 110~600
Température de Curie	357	627
Résistivité électrique (μΩ.cm)	60	6.4

La modélisation des matériaux magnétostrictifs

Plusieurs études se sont intéressés à simuler le couplage magnéto élastique au sein des matériaux magnétostrictifs. En effet, des modélisation magnéto-élastiques ont été développées pour des applications statiques et acoustiques de Terfenol-D utilisant des codes commerciaux tels que Attila [70],[71] et Comsol multiphysics[72] . Des études ont été menées par Anjanappa et al.[73] Introduisant un modèle afin de simuler le comportement

[68] Matweb.com.
[69] G. Engdalh, "Handbook of Giant Magnetostrictive Materials", Academic press, 2000.
[70] ATILA -3-D CAD software for piezoelectric and magnetostrictive structures, ISEN, Lille, Distr. CEDRAT, Meylan & MAGSOFT.
[71] F.Stillesjö, G.Engdahl, Z.Wei, and T. Cedell. "Dynamic simulation and performance of magnetostrictive transducers for ultrasonic applications",Proc. Of SPIE: Smart structure and Materials,Vol. 3992, pp 594-602, 2000.
[72] J. C. Slaughter "Coupled Structural and Magnetic Models: Linear Magnetostriction in COMSOL" Excerpt from the Proceedings of the COMSOL Conference 2009 Boston
[73] M. Anjanappa, and Y.Wu. "Magnetostrictive particulate actuators configurations, modeling and characterization. *Smart Structures and Materials"*, **6**,393- 402, 1997.

d'un mini-actionneur magnétostrictif. Wu et Anjanappa[74] et Krishnamurthy et al.[75] ont développé un modèle permettant de calculer la réponse d'un composite magnétostrictif. Pradhan et al.[76] ont étudié les effets des propriétés des matériaux et la disposition de chacune des couches sur les vibrations dans une plaque composite formée par des multicouches magnétostrictives. Les constantes de couplage dynamique d'un actionneur magnétostrictif ont été établies par Claeyssen et al.[77] en utilisant une structure tridimensionnelle, couplée, linéaire simulée par la méthode des éléments finis.

II.1.3 Mise en équation du couplage magnéto-élastique

II.1.3.1 Introduction

Après avoir défini les principaux phénomènes physiques des matériaux magnétostrictifs sur lesquels se basent les dispositifs magnétiques SAW, on présente dans ce paragraphe les équations mathématiques de formulation du problème magnéto-élastique dans un film ferromagnétique étudié par O. Boumatar et al[78]. Ces équations décrivent le couplage magnéto élastique dans un matériau magnétostrictif. En effet, les propriétés acoustiques des matériaux magnéto-élastiques dépendent du champ magnétique appliqué sur l'échantillon et aussi de ses propriétés magnétiques. Afin de contourner le couplage piézo-magnétique, le matériau sensible au champ magnétique est équivalent à un matériau ferromagnétique. Dans ce cas, les constantes élastiques, la perméabilité magnétique et les constantes piézomagnétiques, qui le définissent sont proportionnelles au champ magnétique externe appliqué au film ferromagnétique. Cette proportionnalité traduit la contrôlabilité des propriétés magnéto-élastiques par un champ magnétique externe appliqué sur les matériaux magnétostrictifs.

---

[74] M.Anjanappa and Y.Wu. "Magnetostrictive particulate actuators configurations, modeling and characterization. Smart Structures and Materials", 6,393-402, 1997.

[75] A.V. Krishnamurty, M. Anjanappa, and Y.Wu, "Use of magnetostrictive particle actuators for vibration attenuation of flexible beams", Journal of Sound and Vibration, 206(2):133{149, 1997.

[76] S C.Pradhan, TY.Ng, KY.Lam and J N .Reddy. "Control of laminated composite plates using magnetostrictive layers" Smart Materials and Structures, 10(4), 657-667, 2001.

[77] F.Claeyssen, R.Bossut, and D.Boucher "Modeling and characterization of the magnetostrictive coupling" Power Transducers for Sonics and Ultrasonics, 1991.

[78] O.Bou Matar, J.F.Robillard, J.O. Vasseur, A.-C. Hladky-Hennion, P. A. Deymier et al.," Band gap tunability of magneto-elastic phononic crystal", JOURNAL OF APPLIED PHYSICS 111, 054901 (2012).

Dans un premier temps on définira les équations fondamentales du couplage magnéto-élastique, ensuite l'état d'équilibre lorsqu'un champ magnétique externe est appliqué sur les matériaux ferromagnétiques, est défini[79].

III.1.3.2 Les équations de base

On se considère dans le cas d'une onde magnéto-élastique dans un film ferromagnétique déposé sur un substrat puis aimanté jusqu'à la saturation. Dans ce cas, l'amplitude de l'aimantation M est une constante Ms.

Le système d'équations mécaniques et magnétiques couplées, les équations de mouvement Landau-Lifshitz ont la forme suivante :

$$\frac{\partial 2ui}{\partial T2} = \frac{\partial Tij}{\partial xj} \quad (1)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} = -\mu_0[M \times H_{eff}] - \alpha\frac{\partial \mu_0}{M_s}(M \times Heff) - \boldsymbol{\alpha}\frac{\gamma\mu_0}{M_s}(M \times (M \times H_{eff})) \quad (2)$$

Dans cette équation, $\boldsymbol{\alpha}$ est le coefficient d'atténuation, γ définit le coefficient gyromagnétique, u_i définit la $i^{ème}$ composante du déplacement particulaire, les x_j déterminent les coordonnées eulériennes du système. La constante $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ F/m définit la perméabilité magnétique du vide et E_{kl} est le tenseur de déformations défini comme suit :

$$E_{kl} = \frac{1}{2} \times \left(\frac{\partial u_k}{\partial x_l} + \frac{\partial u_l}{\partial x_k}\right) \quad (3)$$

Le tenseur de constantes élastiques T_{ij} et le champ magnétique interne sont donnés par

$$H_{eff} = H - 1\frac{1}{\mu_0}\frac{\partial U}{\partial M} \quad et \ T_{ij} = \frac{\partial U}{\partial E_{ij}} \quad (4)$$

La densité d'énergie interne locale est définie par la constante U qui s'exprime sous la forme :

$$E = E_{an} + E_{me} + E_e \ (5)$$

L'énergie d'anisotropie magnéto-cristalline est définie par :

$$E_{an} = -K_1\alpha^2 \quad (6)$$

[79] H. Zhou "Etude théorique et expérimentale de systèmes à ondes de surface dans des structures multicouches piézomagnétiques pour des applications en contrôle santé intégré de MEMS par imagerie acoustique non linéaire »

où $\alpha = \frac{M_i}{M_s}$ est le cosinus directeur de M suivant l'axe facile induit, et K_1 est la constante d'anisotrope magnétique liée au champ d'anisotropie H_A, et qui est défini par :

$$K_1 = \frac{\mu_0 M_s H_a}{2} \quad (7)$$

L'énergie de couplage magnéto-élastique est de la forme :

$$Eme = r_{ijkl}\alpha_i\alpha_j E_{kl} \quad (8)$$

où r_{ijkl} définissent les constantes élastiques et $\alpha_i = \frac{Mi}{Ms}$ les cosinus directeurs de M. L'énergie élastique du système est alors définie :

$$U_e = \frac{1}{2} C_{ijkl} E_{ij} E_{kl}. \quad (9)$$

avec C_{ijkl} représente le tenseur des constantes élastiques de second ordre.

En se basant sur les équations définies ci-dessus, L'équation de Landau-Lifshitz est équivalente à l'équation de Landau-Lifshitz-Gilbert[80]:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = -\gamma\mu_0[M \times Meff] + \frac{\mu\alpha}{Ms}[M \times \frac{\partial M}{\partial t}] \qquad (10)$$

Si on considère le cas d'un film ferromagnétique amorphe, considéré d'un point de vue élastique et magnéto-élastique comme étant isotrope, la densité d'énergie locale interne aura la forme :

$$E = -K1\alpha^2 + \frac{r_1}{3}(E_{11}+E_{22}+E_{33}) + r_2(E11(\alpha^2 - \frac{1}{3}) + E_{33}(\alpha^2 - \frac{1}{3})) + \frac{C11}{2}(E_{11}E_{11} + E_{22}E_{22} + E_{33}E_{33}) + (C_{11}-2C_{44})(E_{11}E_{22}+E_{11}E_{33}+E_{22}E_{33}) + 2C_{44}(E_{12}+E_{12}+E_{23})$$

avec r_1 et r_2, les constantes magnéto élastiques.

Dans le cas où on considère la propagation de l'onde élastique, il n'y a que les petites perturbations dynamiques autour de l'équilibre qui sont considérées :

$$H = H_0 + h,\ M = M_0 + m \text{ et } E = E_0 + e \quad (11)$$

H_0 étant le champ interne et E_0, la déformation spontanée induite par la magnétostriction. Les constantes h, m, et e sont respectivement le champ magnétostatique, la magnétisation et la déformation qui est causée par les ondes magnéto-élastique. Dans ce cas, le champ magnétostatique h satisfait les conditions magnétostatiques suivantes :

$$\nabla \times h = 0 \quad (12)$$

$$\nabla . b = \nabla . \mu_0(h + m) \quad (13)$$

[80] A.G Gurevich and G.A Melkov " Magnetisation Oscillations and Waves". CRC Press, Boca Raton, (1996).

La constante b définit l'induction magnétique dynamique.

Toutes les contributions du champ et des termes anharmoniques provenant de l'énergie élastique du deuxième et troisième ordre sont négligées[81,82] car nous sommes seulement

Intéressés par les variations du champ dépendantes des propriétés élastiques et piézomagnétiques, résultant du couplage magnéto-élastique du premier ordre.

II.1.3.3 Matériau Magnéto-élastique équivalent[83] : Constantes élastiques et champ magnétique

Le matériau ferromagnétique équivalent et polarisé autour de la position d'équilibre. Les équations de Laudau-Lifshitz s'écrivent sous la forme :

$$\frac{\partial\theta}{\partial t}=-\frac{\gamma}{M_s\,sin\theta}\frac{\partial U}{\partial\varphi}+\gamma\mu_0 H_\varphi=\mu_0 H_{eff}\quad (1)$$

$$\frac{\partial\varphi}{\partial t}=-\frac{\gamma}{M_s\,sin\theta}\frac{\partial U}{\partial\theta}-\frac{\gamma\mu_0}{sin\theta}H_\theta=-\frac{\gamma\mu_0}{sin\theta}H_{eff}\quad (2)$$

Avec $H_\varphi=-H_x\,sin\varphi+H_y cos_\varphi$ *et* $H_\theta=H_x\cos\theta\ +H_y\cos\theta sin_\varphi-H_z\,sin_\theta\,\theta$

Autour de la position d'équilibre, l'énergie est de la forme suivante :

$$U=U_0+U\theta\boldsymbol{\delta}_\theta+U\varphi\ \boldsymbol{\delta}_\varphi+\frac{U_{\theta\theta}}{2\boldsymbol{\delta}\varphi_2}+U\theta\varphi\boldsymbol{\delta}_\theta\boldsymbol{\delta}_\varphi+U\theta\boldsymbol{\delta}_\theta\frac{\partial ui}{\partial xj}+U\varphi\boldsymbol{\delta}_\varphi\frac{\partial ui}{\partial xj}\quad (3)$$

Dans cette équation, les paramètres U_{xy} représentent les dérivés de second degré suivant x-y.

Ces conditions permettent de réécrire δ_θ et δ_φ

$$\delta_\theta=\frac{\mu_0}{D}M_s U_{\varphi_\varphi}h_\theta-\frac{\mu_0}{D}M_s\,sin\theta h_\varphi U_{\theta\varphi}+\frac{1}{D}(U_{\theta\varphi}U_\varphi-U_{\varphi\varphi})\frac{\partial u_i}{\partial x_j}\ (4)$$

$$\delta\varphi=-\frac{\mu_0}{D}M_s U_{\theta\varphi}h_\theta+\frac{\mu_0}{D}M_s\,sin\theta h\varphi U_{\theta\theta}+\frac{1}{D}(U_{\theta\varphi}U_\theta-U_{\theta\theta})\frac{\partial u_i}{\partial x_j}\ (5)$$

Le paramètre D= $U_{\theta\theta}U_{\varphi\varphi}-U_{\theta\varphi}$ et en introduisant ces dernières équations dans celles de l'aimantation dynamique :

$$Mi=\frac{q_{ikl}}{\mu_0}\frac{\partial uk}{\partial xl}+\chi_{il}\,h_l\quad (6)$$

Le terme χ_{il} désigne la susceptibilité magnétique du matériau ferromagnétique.

---

[81] D.E.Eastman. "Ultrasonic study of first order and second order magneto elastic properties of yttrium iron garnet". Physical Review, 148(2)530-542, (1966).

[82] J.Rouchy and E. Du Trémolet de Lacheisserie. « Elastic properties of freemagnetic single Crystal with cubic symmetry". Zeitschrift fur Physik B condensed Matter, 67-80, (1979).

[83] H. Zhou. « Etude théorique et expérimentale de systèmes à ondes de surface dans des structures multicouches piézomagnétiques pour des applications en contrôle santé intégré de MEMS par imagerie acoustique non linéaire », Ecole Centrale de Lille, (2014).

Les constants élastiques des matériaux ferromagnétiques soumis à un champ magnétique externe sont de la forme :

$$C'_{ij} = C_{ijkl} + \Delta C_{ijkl} \quad (7)$$

ΔC_{ijkl} sont définis par les équations suivantes telles que le terme B désigne le coefficient de couplage magnéto-élastique[78].

$$\Delta C_{11} = -\frac{4B^2}{Ms^2}\cos^2\varphi_0\,\chi_{11}\,\sin^2\theta_0 \quad (8)$$

$$\Delta C_{12} = -\frac{4B^2}{Ms^2}\sin\varphi_0\cos\varphi_0\chi_{12}\,\sin^2\theta_0 \quad (9)$$

$$\Delta C_{13} = -\frac{4B^2}{Ms^2}\cos\varphi_0\cos\theta_0\sin\theta_0\,\chi_{13} \quad (10)$$

$$\Delta C_{14} = -\frac{B^2}{Ms^2}\cos\varphi_0\sin\theta_0\,(\sin\theta_0\sin\varphi_0\,\chi_{13} + \cos\theta_0\,\chi_{12}) \quad (11)$$

$$\Delta C_{15} = -\frac{B^2}{Ms^2}\cos\varphi_0\sin\theta_0\,(\sin\theta_0\cos\varphi_0\,\chi_{13} + \cos\theta_0\,\chi_{11}) \quad (12)$$

$$\Delta C_{16} = -\frac{B^2}{Ms^2}\cos\varphi_0\sin\theta_0\,(\sin\theta_0\cos\varphi_0\,\chi_{12} + \sin\theta_0\sin\varphi_0\,\chi_{11}) \quad (13)$$

$$\Delta C_{22} = -\frac{4B^2}{Ms^2}\sin^2\varphi_0\,\chi_{22}\,\sin^2\theta_0 \quad (14)$$

$$\Delta C_{23} = -\frac{4B^2}{Ms^2}\sin\theta_0\cos\theta_0\sin\varphi_0\chi_{23} \quad (15)$$

$$\Delta C_{24} = -\frac{B^2}{Ms^2}\sin\varphi_0\sin\theta_0\,(\sin\theta_0\cos\varphi_0\,\chi_{23} + \cos\theta_0\,\chi_{22}) \quad (16)$$

$$\Delta C_{25} = -\frac{B^2}{Ms^2}\sin\varphi_0\sin\theta_0\,(\sin\theta_0\cos\varphi_0\,\chi_{23} + \cos\theta_0\,\chi_{12}) \quad (17)$$

$$\Delta C_{33} = -\frac{4B^2}{Ms^2}\cos^2\theta_0\,\chi_{33} \quad (18)$$

$$\Delta C_{34} = -\frac{B^2}{Ms^2}\cos\theta_0\,(\sin\theta_0\sin\varphi_0\,\chi_{33} + \cos\theta_0\,\chi_{23}) \quad (19)$$

$$\Delta C_{35} = -\frac{B^2}{Ms^2}\cos\theta_0\,(\sin\theta_0\cos\varphi_0\,\chi_{33} + \cos\theta_0\,\chi_{13}) \quad (20)$$

$$\Delta C_{36} = -\frac{B^2}{M_{2s}}\cos\theta_0\,(\sin\theta_0\cos\varphi_0\,\chi_{23} + \sin\theta_0\sin\varphi_0\,\chi_{13}) \quad (21)$$

$$\Delta C_{44} = -\frac{B^2}{4Ms^2}\,(\sin^2\theta_0\sin^2\varphi_0\,\chi_{33} + \cos^2\theta_0\,\chi_{22} + 2\cos\theta_0\sin\theta_0\sin\varphi_0\chi_{23}) \quad (22)$$

$$\Delta C_{45} = -\frac{B^2}{4Ms^2}(\sin^2\theta_0\cos\varphi_0\sin\varphi_0\,\chi_{33} + \cos^2\theta_0\,\chi_{12} + \cos\theta_0\sin\theta_0\cos\varphi_0\chi_{22} + \cos\theta_0\sin\theta_0\cos\varphi_0\chi_{13}) \quad (23)$$

$$\Delta C_{46} = -\frac{B^2}{4Ms^2}(\sin^2\theta_0\cos\varphi_0\sin\varphi_0\,\chi_{23} + \sin^2\theta_0\sin^2\varphi_0\chi_{13} + \cos\theta_0\sin\theta_0\cos\varphi_0\chi_{22} + \cos\theta_0\sin\theta_0\sin\varphi_0\chi_{12}) \quad (24)$$

$$\Delta C_{55} = -\frac{B^2}{4Ms^2}(\sin^2\theta_0\cos^2\varphi_0\sin\varphi_0\,\chi_{33} + \cos^2\theta_0\,\chi_{11} + 2\cos\theta_0\sin\theta_0\cos\varphi_0\chi_{13}) \quad (25)$$

$$\Delta C_{56} = -\frac{B^2}{4Ms^2}(\sin^2\theta_0 \cos\varphi_0 \sin\varphi_0\, \chi_{13} + \sin^2\theta_0 \cos^2\theta_0\, \chi_{23} + \cos\theta_0 \sin\theta_0 \cos\varphi_0 \chi_{12} + \sin\theta_0 \cos\theta_0 \sin\varphi_0 \chi_{11}) \quad (26)$$

$$\Delta C_{66} = -\frac{B^2}{4Ms^2}(\sin 2\theta 0 \cos^2\varphi_0\, \chi_{22} + \sin^2\theta_0 \cos^2\varphi_0\, \chi_{11} + 2\sin^2\theta_0 \sin\varphi_0 \cos\varphi_0 \chi_{12}) \quad (27)$$

Quand un champ magnétique externe est appliqué aux matériaux ferromagnétiques constituant le dispositif SAW, les nouveaux constants élastiques changent de valeurs et seront dépendantes du champ magnétique.

Ces équations peuvent être utilisées dans des simulations numériques de conception des dispositifs magnétiques SAW afin de prédire les résultats préliminaire tout en utilisant des logiciels commerciaux de calculs numériques tel que Comsol Multiphysics.

II.1.4 COMSOL Multiphysics : Couplage entre le module piézoélectrique (structural mechanics) et magnétique (AC/DC)

Dans un matériau magnétostrictif, deux physiques se couplent à savoir : la piézoélectricité et le magnétisme. Nous avons fixé notre choix de modéliser des structures magnétiques SAW formées par des matériaux magnétostrictifs avec le logiciel de modélisation COMSOL Multiphysics. Dans ce cas, et avec ce logiciel, et afin d'établir ce couplage entre ces deux physiques, un couplage entre les domaines (modules) définissant ces physiques, s'impose. Ces domaines sont :

- Structural Mechanics : C'est le domaine qui permet d'introduire les propriétés élastiques du matériau magnétostrictif.
- AC/DC : C'est le domaine qui permet d'introduire les propriétés magnétiques du matériau magnétostrictif.

Afin de traduire le comportement magnétostrictif de tels matériaux, nous avons implémenté le couplage entre les deux domaines sous Comsol en se basant sur les équations piézomagnétiques suivantes :

$$S = \eta \times T + q \times H \quad (1)$$

$$B = q \times T + \mu \times H \quad (2)$$

Avec T, η et q désignent respectivement les matrices de contraintes, de déformation et de couplage piézomagnétique. H étant le champ magnétique variable, B est la densité de flux magnétique et μ est l'inverse de la perméabilité.

Les termes relatifs au champ magnétiques sont implémentés dans le tableau « variable » du module « structural mechanics ». Et les termes relatifs aux contraintes mécaniques sont implémentés dans le tableau de densité de flux magnétique dans le module « AC/DC ».

II.1.5 Conclusion

Dans cette partie du chapitre, nous avons mis en valeur la dépendance magnéto-élastique au sein d'un film ferromagnétique entre les constantes élastiques du matériau et le champ magnétique externe appliqué et aussi les équations fondamentales du couplage entre les modules de Comsol Multiphysics afin d'établir le couplage piézomagnétique au sein du film magnétostrictif avec cette méthode de couplage entre les modules du logiciel Comsol Multiphysics.

Nous avons aussi cité quelques études qui se sont intéressées à l'implémentation analytique du coulage piézomagnétique avec des outils de modélisation numérique.

Ce couplage sera implémenté dans nos modèles magnétiques pour simuler le comportement des dispositifs SAW à l'aide de Comsol Multiphysics. Ces modèles qui seront décrits dans les prochains chapitres de ce document, permettront de prédire les propriétés magnétiques et élastiques de dispositifs SAW et donc optimiser la conception de capteurs magnétiques qui seront réalisés par la suite.

Partie 2 : Modèle théorique et validation du couplage magnéto-élastique

II.2.1 Introduction

La modélisation numérique du couplage magnétoélastique nécessite la définition des paramètres permettant de présenter au mieux la réalité. Ainsi le but d'implémenter un modèle est de prédire des résultats.

Afin de valider le couplage piézomagnétique, nous avons implémenté un modèle en se basant sur des résultats expérimentaux récemment publiés.

Ce modèle vise à simuler une structure de résonateur SAW dont les paramètres d'entrée sont basés sur ceux d'une étude expérimentale publiée par Kadota et al.

Cette partie du chapitre présente les différents résultats expérimentaux d'un résonateur piézomagnétique publiés récemment ainsi que la validation de ce modèle : On décrira ainsi les différentes étapes de modélisation et implémentation du modèle ainsi que les résultats de simulations obtenus.

II.2.2 Synthèse bibliographique

Dans cette étude, en vue d'obtenir une plus grande sensibilité magnétique, l'étude expérimentale est basée sur un résonateur formé par un substrat de quartz et des électrodes en Ni comme présenté sur la figure I.14 (a).

Le choix de ce type de dispositifs SAW pour la réalisation des capteurs magnétiques est dû principalement aux raisons suivantes :

- Comme nous l'avons mentionné dans les chapitres 1, la technologie SAW est parmi les meilleures technologies qui assurent la réalisation des capteurs sans fils. Pour cela Kadota *et al.* ont choisi cette technologie d'une part pour leur faible coût de fabrication et de commercialisation et d'autre part cela permettra d'aborder des capteurs magnétiques sans fils. En effet les capteurs magnétiques classiques tels que les capteurs à effet de Hall ou bien les capteurs magnétiques à magnétorésistance géantes GMR nécessitent une alimentation électrique dans leur fonctionnement.

D'autre part, les capteurs SAW passifs sans fils ont été utilisés pour la mesure de la température et de la pression, et aussi pour la détection du champ magnétique[84],[85] , ceci a été développé dans le précédent chapitre et ce qui constitue l'importance de ce type de dispositifs.

- Cependant, quelques capteurs magnétiques abordés dans la littérature ne peuvent pas être appliqués au système de capteurs sans fil. Ceci est dû au facteur de qualité Q qui est trop faible. En effet, la valeur du facteur de qualité Q du résonateur SAW est très critique pour fabriquer un système de communication sans batterie et sans fil. Le dispositif décrit dans cette étude exploite une onde de cisaillement obtenue en utilisant des électrodes métalliques avec une forte densité volumique (Ni) déposé sur un substrat de quartz de coupe Quartz ST-90° X (dont la direction de propagation est perpendiculaire à l'axe X). Cette coupe de substrat présente l'avantage d'avoir un facteur de couplage électromécanique deux fois plus important que celui obtenu une onde de Rayleigh sur une coupe ST-X du quartz. Le coefficient de réflexion est également 20 fois plus grand que celui obtenu avec des électrodes conventionnelles d'aluminium déposées sur une coupe ST-X[86].
- Notons que les électrodes en nickel joueront également le rôle de couche sensible aux champs magnétiques. En effet, le nickel est un matériau magnétostrictif qui dans cette étude a permis aux même auteurs, Kadota *et al.*, de réaliser un capteur SAW magnétique[87] avec une sensibilité de l'ordre de 800ppm/50mT à une fréquence de fonctionnement de l'ordre du GHz.
- Il a été rapporté que les électrodes Cu sur un substrat de YX-$LiNbO_3$ permettent d'obtenir un facteur de couplage supérieur à celui obtenu avec des électrodes conventionnelles[88]. D'autre part, il a été rapporté que les électrodes en Cu rainurées sur une structure 42°YX-$LiTaO_3$ offre un facteur de qualité Q plus élevé que dans le cas des électrodes en aluminium.

---

[84] M. Yamaguchi, K. Y. Hoshimoto, H. Kogo and N. Naoe, "Variable SAW delay line using amorphous TbFe2film", IEEE Trans. Mag., vol. 16, p.916, (1980).

[85] P. Smole, W. Ruile, C. Korden, A. Ludwig, E. Quandt, S. Krassnitzer and P. Pongratz "MAGNETICALLY TUNABLE SAW-RESONATOR" ,IEEE International Freq. Contr. Symp., p.903,(2003).

[86] M. Kadota, T. Yoneda, K. Fujimoto, T. Nakao, and E. Takata: "Resonator Filters Using Shear Horizontal-Type Leaky Surface Acoustic Wave Consisting of Heavy-Metal Electrode and Quartz Substrate". IEEE Trans. UFFC. Vol. 51, No.2, p.202, (2003).

[87] 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, 07HD07, (2011).

[88] M.Kadota, T.Kimura and Y.Ida "Tunable Filters Using Ultrawide-Band Surface Acoustic Wave Resonator Composed of Grooved Cu Electrode on $LiNbO_3$" Jpn.J.Appl.Phys. vol.49, 07HD26,2010.

- Dans l'étude de Kadota *et al,* les auteurs ont essayé d'appliquer dans leurs structures des électrodes en nickel déposées sur un substrat piézoélectrique de ST-90° X quartz. Ceci est dans le but d'obtenir un plus grand facteur de couplage et un facteur de qualité Q important quand le capteur est utilisé en configuration sans fil.

Le résonateur SAW Ni-IDT/Quartz est caractérisé par une longueur d'onde de λ= 14,6µm, et un nombre de paires de doigts de l'IDT fixé à 40, deux réseaux de réflecteurs sont placés des deux côtés de l'IDT formant un miroir de Bragg. Chaque réflecteur est constitué de 50 paires de doigts. Le taux de métallisation a été optimisé en fonction de la sensibilité du capteur et a été fixé à 80%. Une valeur plus grande rendrait la réalisation expérimentale problèmatique. La figure II.2 montre l'évolution de la sensibilité du capteur avec le taux de métallisation[87].

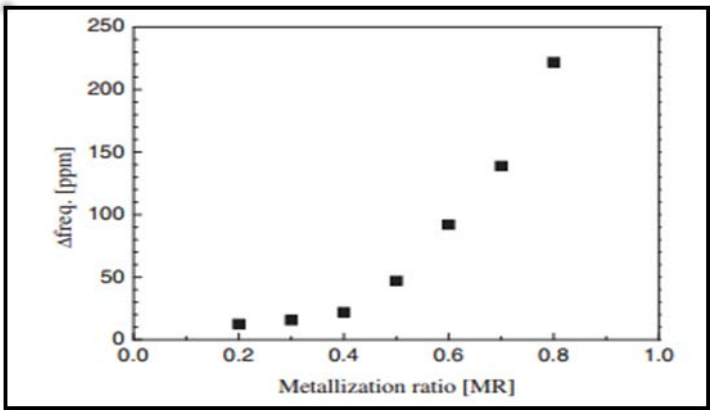


Figure II.2 : Dépendance de la variation de fréquence de résonance en fonction du champ magnétique appliqué suivant l'axe Y pour différentes valeurs du taux de métallisation.

II.2.3 Sensibilité au champ magnétique

Les champs magnétiques sont appliqués suivant trois directions du plan Bx, By, Bz, respectivement parallèle à la direction de propagation de SAW, et dans les deux directions perpendiculaires à la propagation des ondes élastiques de surface du dispositif. La figure I.14 représente les résultats expérimentaux de la variation de la fréquence en ppm (sensibilité) en fonction du champ magnétique appliqué suivant les trois directions. La sensibilité présente une variation beaucoup plus importante quand le champ magnétique est appliqué suivant les directions X et Y et une variation quasi-nulle suivant l'axe Z.

La pente de sensibilité suivant l'axe X est égale à 53ppm/mT. Quand le champ magnétique est appliqué suivant l'axe Y, cette valeur est de l'ordre de 2,5ppm/ mT. Cependant, quand le champ est appliqué suivant l'axe X, le facteur de qualité du résonateur présente une détérioration importante dont l'évolution est similaire à la variation de la fréquence de résonance. L'intensité du champ magnétique qui présente la plus grande plus grande variation de la fréquence, présente également le plus faible facteur de qualité (Q). Cette faible valeur de Q compliquera voire rend impossible l'utilisation de capteur SAW en configuration sans fil. Malgré une faible sensibilité suivant l'axe Y, les auteurs ont privilégié l'utilisation de leur capteur suivant l'axe Y puisque le facteur de qualité n'est pas dégradé. Il présente même une amélioration quand le champ magnétique est augmenté. Le facteur Q passe de 12500 pour un champ nul à 14000 pour un champ de 100mT (Figure II.3).

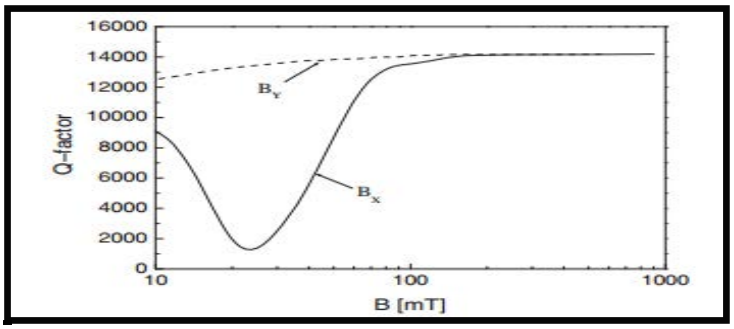


Figure II.3 : Variation du facteur de qualité en fonction du champ magnétique appliqué suivant les trois directions respectivement X, Y et Z. D'après Kadota *et al.*

Cette étude présente un grand intérêt dans la mesure où elle a permis de confirmer que la réalisation d'un capteur magnétique SAW sans fil est tout à fait possible avec un facteur

de qualité très important (de l'ordre de 10000). Notons que l'interrogation à distance pourra être assurée même avec des facteurs de qualité de plus faibles valeurs pour des structures présentant un fort couplage électromécanique ou/et avec l'utilisation d'une électronique d'interrogation ultrasensible.

Les résultats expérimentaux de cette étude seront utilisés comme première base pour valider le couplage magnéto-élastique. Nous allons donc construire un modèle à l'aide du logiciel Comsol Multiphysics qui utilise comme paramètre d'entrée (matériaux et géométrie) la structure du résonateur étudié par Kadota *et al.* et qui intègre le couplage magnéto-élastique.

II.2.4 Validation du modèle Ni-IDT/Quartz

II.2.4.1 Choix du logiciel de modélisation

Il existe plusieurs logiciels commerciaux qui permettent de modéliser les problèmes mécaniques, piézoélectrique et aussi magnétique par les méthodes d'éléments finis. Néanmoins, dans notre étude on a besoin d'un logiciel qui permet des calculs multi physiques faisant appel à des couplages de natures différentes à savoir la piézoélectricité, l'acoustique, la magnétostatique, la magnéto élastique…).

À choisir entre les deux logiciels modélisation multiphysique à éléments finis les plus répandus et les plus performants à savoir ANSYS et COMSOL, nous avons opté pour le second et cela pour différentes raisons :

- Il présente plus de souplesse au niveau du couplage de différentes équations aux dérivées partielles,
- Plus adapté pour les applications microsystèmes. Il offre déjà un module « piézoélectricité » qui est compatible avec les applications MEMS.
- Le logiciel est déjà disponible au laboratoire et les membres de notre équipe l'ont déjà utilisé pour la modélisation de dispositifs SAW.

Pour pouvoir introduire l'effet magnéto élastique dans nos simulations il fallait développer le module « magnétostriction », ce qui a été fait en couplant le module mécanique « Contraintes/Déformations » au module «AC/DC, Magnétostatique ». Conception du modèle théorique. Dans les paragraphes suivants on détaillera les différentes étapes de modélisation allant de l'implémentation de la structure jusqu'à la présentation des résultats obtenus.

II.2.4.2 Géométrie du modèle

A l'aide de Comsol Multiphysics nous avons choisi de réaliser dans une première étape un modèle en deux dimensions (2D) correspondant à une demi-période de la structure périodique infinie SAW à simuler. La figure II.4 montre la géométrie de la structure 2D à implémenter.

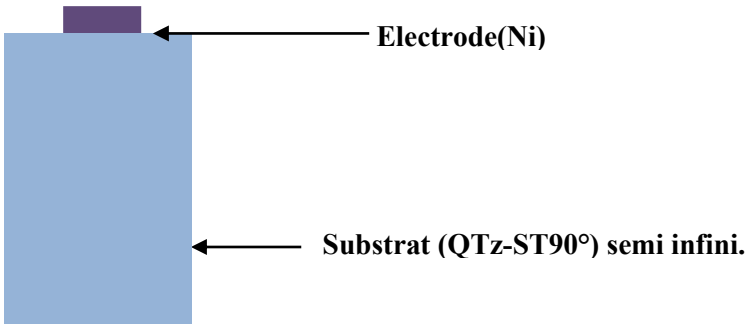


Figure II.4 : Vue schématique du modèle 2D implémenté sous Comsol

A chaque domaine de la géométrie sera associé le matériau correspondant. Dans le présent exemple, le substrat qui est considéré comme un domaine semi-infini sera défini comme du Quartz ST-90°X. Le domaine 2 qui correspond à l'électrode sera défini comme du nickel (Ni).

II.2.4.3 Conditions aux limites

Les conditions aux limites pour une structure infinie et périodique sous Comsol sont définies de façon à ce que la structure possède les mêmes conditions quand elle se multiplie dans l'espace.

La structure modélisée en deux dimensions est une demi-période.

Comme on a vu dans le premier chapitre le principe du fonctionnement d'un dispositif SAW se base essentiellement sur la piézoélectricité qui consiste à appliquer un potentiel électrique à la surface des électrodes du SAW qui aboutit à son tour à une variation des contraintes mécaniques dans la structure. Le potentiel électrique doit de même être défini dans les conditions aux limites initiales de la structure modélisée quel que soit le type de géométrie, 2D ou 3D sous Comsol (figure II.5)

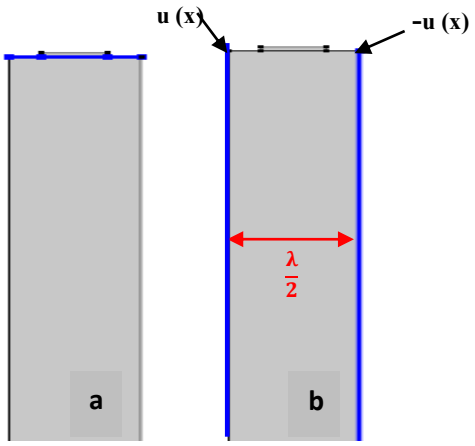


Figure II.5 : Vue schématique des conditions aux limites initiales (périodicité) (a) et potentiel électrique (b) introduites dans le modèle résonateur Ni(IDT) /Quartz

II.2.4.4 Propriétés piézoélectriques

- **Quartz ST-90°X**

La bibliothèque de COMSOL attribue à chaque matériau les propriétés piézoélectriques qui lui sont propre. Néanmoins, pour modéliser la structure de Kadota, il est nécessaire d'implémenter les paramètres piézoélectriques du substrat quartz présentant la coupe ST-90°X. Ainsi, à l'aide d'un programme Matlab disponible dans le laboratoire nous avons déterminé les constants élastiques associés au Quartz ST-90°X. Par la suite, on les a implémentées sous COMSOL.

- **Le Nickel**

Comme les propriétés cristallines du nickel déposé sur le Quartz ST-90°X n'ont pas été mentionnées dans la publication de Kadota, nous avons implémenté les constants élastiques du nickel isotrope disponibles dans la bibliothèque de Comsol.

Les matrices de constantes élastiques des matériaux de la structure implémentée à savoir le Quartz ST-90°X et le Nickel sont présentées dans le tableau II.2

Tableau II.2 : Constantes élastiques du quartz ST-90° et du nickel

Constantes élastiques [Pa] ($\times 10^{11}$)	Quartz ST-90°X	Nickel
C_{11}	0.9659	2.7
$C_{12}=C_{21}$	0.2749	11.6
$C_{13}=C_{31}$	0.0478	11.6
$C_{15}=C_{51}$	-0.1345	0
C_{22}	0.8670	2.7
$C_{25}=C_{52}$	-0.0104	0
$C_{23}=C_{32}$	-0.0859	11.6
C_{33}	1.3067	2.7
$C_{35}=C_{53}$	0.0183	0
C_{44}	0.3032	7.7
$C_{46}=C_{64}$	-0.0759	0
C_{55}	0.4122	7.7
C_{66}	0.6743	7.7

II.2.4.5 Maillage

Maillage automatique

Avec Comsol Multiphysics, afin effectuer des calculs sur une géométrie, il est nécessaire de la mailler, autrement dit de la discrétiser dans l'espace. En respectant les dimensions et les formes de la géométrie bien sûr, mais aussi les échelles de longueur des phénomènes physiques en jeu. Nous allons montrer comment choisir et construire les maillages les plus adaptés au modèle : maillage structuré et non-structuré. Et aussi l'effet du maillage sur la réponse fréquentielle et sur les précisions des calculs.

Le logiciel assure un maillage automatique qui permet d'adapter la forme et dimensions des mailles à la géométrie de la structure à modéliser. Une étude d'optimisation du

maillage préalable est donc nécessaire pour trouver un compromis entre le temps de calcul et la précision des calculs.

Nous allons tout d'abord étudier l'effet du maillage sur les résultats de simulation, tous les autres paramètres par ailleurs seront fixés. Nous adopterons dans un premier temps le maillage automatique proposé par le logiciel Comsol et discuterons ses avantages et limites. Comme présenté dans la figure II.6, nous testons 3 épaisseurs du maillage automatique (normal, fin et plus fin) sur la structure Ni/Quartz.

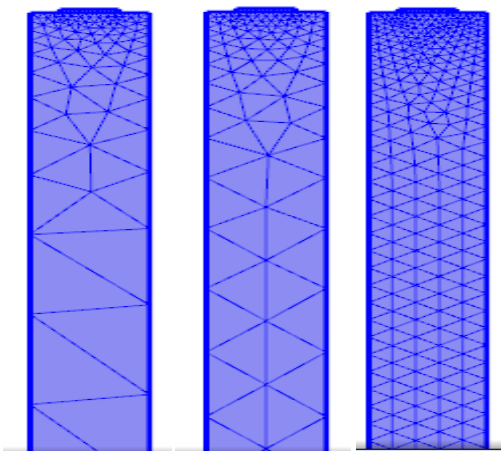


Figure II.6 : Vue schématique de différents maillages automatiques définis par défaut sur Comsol pour notre structure (a) maillage normal (b) maillage fin et (c) maillage plus fin

Vu qu'il s'agit d'une structure SAW périodique infinie, nous allons calculer la réponse en réflexion (S_{11}). Nous allons donc comparer les réponses fréquentielles du gain S_{11} (en dB) calculées pour différents maillages. La figure II.7 montre le déplacement total de l'onde élastique de surface calculé pour les trois finesses du maillage. L'échelle des couleurs utilisée étant la même pour les 3 figures (a, b et c), on peut donc remarquer aisément que les résultats sont différents. En effet, la profondeur de pénétration de l'onde semble plus importante quand le maillage est plus fin. Cela indique qu'avec un maillage relâché, on obtient des résultats imprécis.

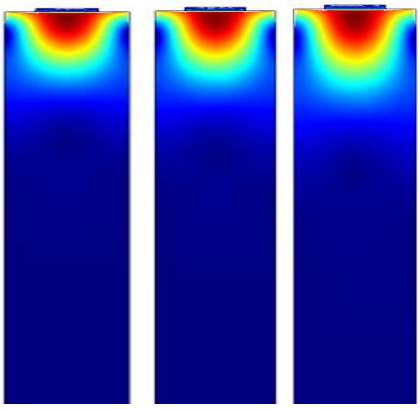


Figure II.7 : Effets du maillage sur le déplacement total de l'onde acoustique de surface en utilisant respectivement :(a) maillage normal, (b) maillage fin et (c) maillage très fin

Dans la figure II.8, on présente la réponse fréquentielle obtenu pour les 3 types de maillages de la structure IDT/Qtz de longueur d'onde 14.6µm. On y voit clairement l'effet du maillage sur le résultat du calcul. En effet, la fréquence de résonance calculée varie de plus de 2% d'un type de maillage à un autre.

Pour cette raison nous avons opté pour l'utilisation d'un maillage réalisé d'une manière manuelle en vue d'obtenir une meilleure précision en terme de fréquence de résonance.

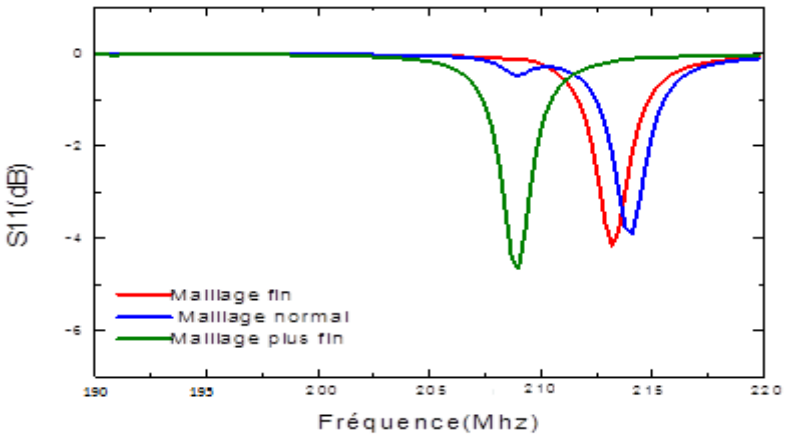


Figure II.8 : Effets du maillage sur la réponse fréquentielle en utilisant le maillage automatique de Comsol respectivement :(a) maillage normal, (b) maillage fin et (c) maillage le plus fin

Maillage manuel Optimisé

Après une étude approfondie dans différents modèles que nous avons réalisés sous Comsol, nous avons choisi d'utiliser un maillage rectangulaire, en passant d'un maillage rectangulaire normal à celui le plus fin (Figure II.9). Pour chaque type de maillage nous avons étudié son effet sur le déplacement de l'onde élastique de surface et sur la réponse fréquentielle.

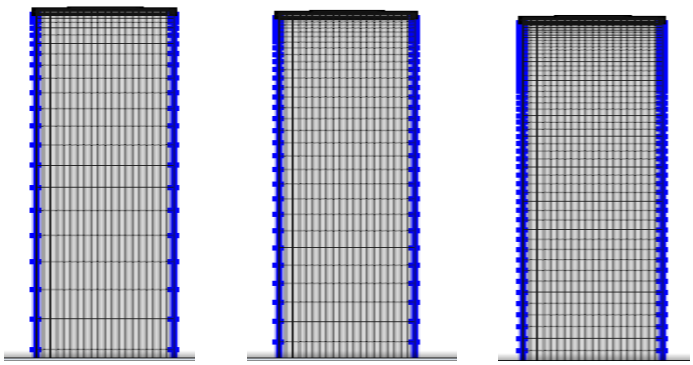


Figure II.9 : Vue schématique de différents maillages manuels implémentés sous Comsol, (a) maillage normal (b) maillage fin et (c) maillage plus fin

Comme on peut le constater dans la figure II.10 présentant les réponses fréquentielles de la structure IDT/Quartz calculée pour les différents types de maillages rectangulaires, la valeur de la fréquence est atteinte quand le maillage rectangulaire est plus fin et les points limitant le maillage sont les plus serrées entre eux. Pour la suite des calculs nous allons adopter ce maillage en utilisant le type le plus fin. Notons que pour un maillage correct, nous imposons au moins 10 nœuds sur la dimension latérale de l'électrode et 5 sur la dimension verticale.

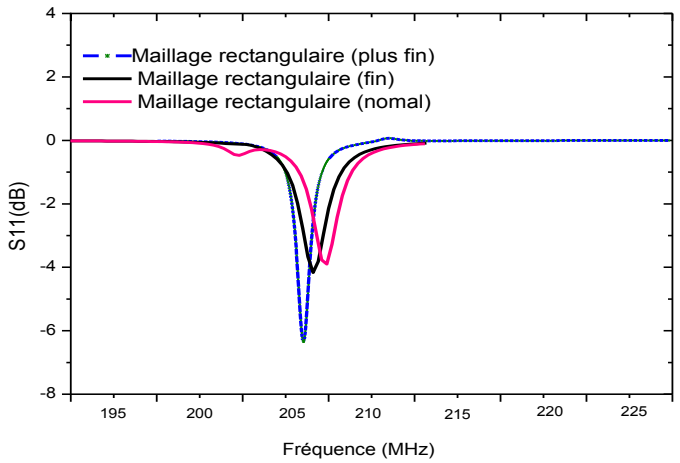


Figure II.10 : Réponse fréquentielle S_{11} en utilisant différents maillages rectangulaires respectivement :(a) maillage normal, (b) maillage fin et (c) maillage le plus fin

II.2.4.6 Couplage magnéto-élastique

II.2.4.6.1 Application au film mince considéré : Formulation du problème

En se basant sur les équations du couplage magnéto élastique détaillées dans la troisième partie du chapitre1, nous avons développé ces équations dans le modèle Comsol tout en tenant en compte de la dépendance des constantes élastiques au champ magnétique dans le matériau nickel formant les électrodes.

Les propriétés élastiques du matériau magnéto-élastique (le nickel) qu'on a utilisé dépendent du champ magnétique appliqué. Afin de contourner le problème piézo-magnétique, le nickel est alors considéré comme équivalent à un matériau ferromagnétique. Dans ce cas, les constantes élastiques qui le définissent sont dépendantes du champ magnétique externe appliqué au film ferromagnétique. Cette dépendance traduit la contrôlabilité des propriétés magnéto-élastiques par un champ magnétique externe appliqué sur les matériaux magnétostrictifs.

Par la suite on se considère dans le cas d'une onde magnéto-élastique dans un film ferromagnétique déposé sur un substrat puis aimanté jusqu'à la saturation, dans ce cas, l'amplitude de l'aimantation M est une constante Ms. Le système d'équations mécaniques et magnétiques couplées, les équations de mouvement Landau-Lifshitz ont la forme suivante :

$$\frac{\partial^2 u_i}{\partial T_2} = \frac{\partial T_{ij}}{\partial x_j} \quad (1)$$

Pour la considération du champ magnétique statique dans toutes les directions, la méthode des coordonnées cylindriques proposée par Smit et Beljers[89] et Shul[90] dans le but d'étudier la résonnance ferromagnétique dans un milieu magnétique anisotrope est utilisée.

Deux variables φ et θ au lieu de trois composantes de M_i sont suffisante pour décrire le modèle à étudier.

Les équations de Laudau-Lifshitz s'écrivent en coordonnées sphériques sous la forme

$$\frac{\partial\theta}{\partial t}=-\frac{\gamma}{Ms\,sin\theta}\frac{\partial U}{\partial\varphi}+\gamma\mu_0 H_\varphi=\mu_0 H_{eff} \qquad (2)$$

$$\frac{\partial\varphi}{\partial t}=-\frac{\gamma}{Ms\,sin\theta}\frac{\partial U}{\partial\theta}-\frac{\gamma\mu_0}{sin\theta}H_\theta=-\frac{\gamma\mu_0}{sin\theta}H_{eff} \qquad (3)$$

Avec $H\varphi=-H_x\,sin\varphi+H_y cos\,\varphi$ et $H_\theta=H_x\cos\theta+H_y\cos\theta sin\ \varphi-H_z\,sin\theta$

Une rotation de l'aimantation est engendrée par la perturbation acoustique et cela vers une nouvelle orientation définie par les angles θ et φ avec $\theta=\theta_0+\boldsymbol{\delta}_\theta$; $\varphi=\varphi_0+\boldsymbol{\delta}_\varphi$ et les variations $\boldsymbol{\delta}_\theta$ et $\boldsymbol{\delta}_\varphi$ sont negligeables avec $\boldsymbol{\delta}_\varphi,\boldsymbol{\delta}_\theta$ <<1.

Autour de la position d'équilibre, l'énergie est de la forme suivante :

$$U=U_0+U_\theta\boldsymbol{\delta}_\theta+U_\varphi\boldsymbol{\delta}_\varphi+\frac{U\theta\theta}{2\boldsymbol{\delta}\varphi_2}+U_{\theta\varphi}\boldsymbol{\delta}_\theta\boldsymbol{\delta}_\varphi+U_\theta\boldsymbol{\delta}_\theta\frac{\partial ui}{\partial xj}+U_\varphi\boldsymbol{\delta}_\varphi\frac{\partial ui}{\partial xj} \qquad (4)$$

Dans cette équation les paramètres U_{xy} représentent les dérivés de second degré suivant x-y.

Ces conditions permettent de réécrire $\delta\theta$ et $\delta\varphi$

$$\delta\theta=\frac{\mu_0}{D}MsU_{\varphi\varphi}h_\theta-\frac{\mu_0}{D}M_s\,sin\theta h_\varphi U_{\theta\varphi}+\frac{1}{D}\left(U_{\theta\varphi}U_\varphi-U_{\varphi\varphi}\right)\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \qquad (5)$$

$$\delta\varphi=-\frac{\mu_0}{D}M_sU_{\theta\varphi}h_\theta+\frac{\mu_0}{D}M_s\,sin\theta h_\varphi U_{\theta\theta}+\frac{1}{D}\left(U_{\theta\varphi}U_\theta-U_{\theta\theta}\right)\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \qquad (6)$$

Le paramètre D= $U\theta\theta U\varphi\varphi-U\theta\varphi$ Et en introduisant ces dernières équations dans Celles de l'aimantation dynamique :

$$Mi=\frac{q_{ikl}}{\mu_0}\frac{\partial u_k}{\partial x_l}+\chi_{il}\,h_l \qquad (7)$$

Le terme χ_{il} désigne la susceptibilité magnétique du matériau ferromagnétique.

Les constantes élastiques des matériaux ferromagnétiques soumis à un champ magnétique externe sont de la forme :

$$C'_{ij}=C_{ijkl}+\Delta C_{ijkl} \qquad (8)$$

[89] J. Smit and H. G. Beljers, Philips Res. Rep. 10, 113 (1955).
[90] H. Suhl, Phys. Rev. 97, 555 (1955).

ΔC_{ijkl} sont définis par les équations suivantes telles que le terme B désigne le coefficient de couplage magnéto-élastique[78] :

$$\Delta C_{11}=-\frac{4B^2}{Ms^2}\cos^2\varphi_0\,\chi_{11}\,\sin^2\theta_0 \quad (9)$$

$$\Delta C_{12}=-\frac{4B^2}{Ms^2}\sin\varphi_0\cos\varphi_0\,\chi_{12}\,\sin^2\theta_0 \quad (10)$$

$$\Delta C_{13}=-\frac{4B^2}{Ms^2}\cos\varphi_0\cos\theta_0\sin\theta_0\,\chi_{13} \quad (11)$$

$$\Delta C_{14}=-\frac{B^2}{Ms^2}\cos\varphi_0\sin\theta_0\,(\sin\theta_0\sin\varphi_0\,\chi_{13}+\cos\theta_0\,\chi_{12}) \quad (12)$$

$$\Delta C_{15}=-\frac{B^2}{Ms^2}\cos\varphi_0\sin\theta_0\,(\sin\theta_0\cos\varphi_0\,\chi_{13}+\cos\theta_0\,\chi_{11}) \quad (13)$$

$$\Delta C_{16}=-\frac{B^2}{Ms^2}\cos\varphi_0\sin\theta_0\,(\sin\theta_0\cos\varphi_0\,\chi_{12}+\sin\theta_0\sin\varphi_0\,\chi_{11}) \quad (14)$$

$$\Delta C_{22}=-\frac{4B^2}{Ms^2}\sin^2\varphi_0\,\chi_{22}\,\sin^2\theta_0 \quad (15)$$

$$\Delta C_{23}=-\frac{4B^2}{Ms^2}\sin\theta_0\cos\theta_0\sin\varphi_0\chi_{23} \quad (16)$$

$$\Delta C_{24}=-\frac{B^2}{Ms^2}\sin\varphi_0\sin\theta_0\,(\sin\theta_0\cos\varphi_0\,\chi_{23}+\cos\theta_0\,\chi_{22}) \quad (17)$$

$$\Delta C_{25}=-\frac{B^2}{Ms^2}\sin\varphi_0\sin\theta_0\,(\sin\theta_0\cos\varphi_0\,\chi_{23}+\cos\theta_0\,\chi_{12}) \quad (18)$$

$$\Delta C_{33}=-\frac{4B^2}{Ms^2}\cos^2\theta_0\,\chi_{33} \quad (19)$$

$$\Delta C_{34}=-\frac{B^2}{Ms^2}\cos\theta_0\,(\sin\theta_0\sin\varphi_0\,\chi_{33}+\cos\theta_0\,\chi_{23}) \quad (20)$$

$$\Delta C_{35}=-\frac{B^2}{Ms^2}\cos\theta_0\,(\sin\theta_0\cos\varphi_0\,\chi_{33}+\cos\theta_0\,\chi_{13}) \quad (21)$$

$$\Delta C_{36}=-\frac{B^2}{M_{2s}}\cos\theta_0\,(\sin\theta_0\cos\varphi_0\,\chi_{23}+\sin\theta_0\sin\varphi_0\,\chi_{13}) \quad (22)$$

$$\Delta C_{44}=-\frac{B^2}{4Ms^2}\,(\sin^2\theta_0\sin^2\varphi_0\,\chi_{33}+\cos^2\theta_0\,\chi_{22}+2\cos\theta_0\sin\theta_0\sin\varphi_0\chi_{23}) \quad (23)$$

$$\Delta C_{45}=-\frac{B^2}{4Ms^2}(\sin^2\theta_0\cos\varphi_0\sin\varphi_0\,\chi_{33}+\cos^2\theta_0\,\chi_{12}+\cos\theta_0\sin\theta_0\cos\varphi_0\chi_{22}+\cos\theta_0\sin\theta_0\cos\varphi_0\chi_{13}) \quad (24)$$

$$\Delta C_{46}=-\frac{B^2}{4Ms^2}(\sin^2\theta_0\cos\varphi_0\sin\varphi_0\,\chi_{23}+\sin^2\theta_0\sin^2\varphi_0\chi_{13}+\cos\theta_0\sin\theta_0\cos\varphi_0\chi_{22}+\cos\theta_0\sin\theta_0\sin\varphi_0\chi_{12}) \quad (25)$$

$$\Delta C_{55}=-\frac{B^2}{4Ms^2}(\sin^2\theta_0\cos^2\varphi_0\sin\varphi_0\,\chi_{33}+\cos^2\theta_0\,\chi_{11}+2\cos\theta_0\sin\theta_0\cos\varphi_0\chi_{13}) \quad (26)$$

$\Delta C_{56} = -\frac{B^2}{4Ms^2}(\sin^2\theta_0 \cos\varphi_0 \sin\varphi_0 \chi_{13} + \sin^2\theta_0 \cos^2\theta_0 \chi_{23} + \cos\theta_0 \sin\theta_0 \cos\varphi_0 \chi_{12} + \sin\theta_0 \cos\theta_0 \sin\varphi_0 \chi_{11})$ (27)

$\Delta C_{66} = -\frac{B^2}{4Ms^2}(\sin 2\theta 0 \cos^2\varphi_0 \chi_{22} + \sin^2\theta_0 \cos^2\varphi_0 \chi_{11} + 2\sin^2\theta_0 \sin\varphi_0 \cos\varphi_0 \chi_{12})$ (28)

Les expressions constantes de couplage piézomagnétiques effectives dépendantes du champ magnétique sont[78] :

$q_{11} = -\frac{2B}{M_s} \sin\theta_0 \cos\varphi_0 \chi_{11} - \mu_0 M_s \sin\theta_0 \cos\varphi_0$ (29)

$q_{12} = -\frac{2B}{M_s} \sin\theta_0 \sin\varphi_0 \chi_{12} - \mu_0 M_s \sin\theta_0 \cos\varphi_0$ (30)

$q_{13} = -\frac{2B}{M_s} \cos\theta_0 \chi_{13} - \mu_0 M_s \sin\theta_0 \cos\varphi_0$ (31)

$q_{14} = -\frac{B}{2M_s} (\sin\theta_0 \sin\varphi_0 \chi_{13} + \cos\theta_0 \chi_{12})$ (32)

$q_{15} = -\frac{B}{2M_s} (\sin\theta_0 \cos \chi_{13} + \cos\theta_0 \chi_{11})$ (33)

$q_{16} = -\frac{B}{2M_s} (\sin\theta_0 \cos\varphi_0 \chi_{12} + \sin\theta_0 \sin\varphi_0 \chi_{11})$ (34)

$q_{21} = -\frac{2B}{M_s} \sin\theta_0 \cos\varphi_0 \chi_{12} - \mu_0 M_s \sin\theta_0 \sin\varphi_0$ (35)

$q_{22} = -\frac{2B}{M_s} \sin\theta_0 \cos\varphi_0 \chi_{22} - \mu_0 M_s \sin\theta_0 \sin\varphi_0$ (36)

$q_{23} = -\frac{2B}{M_s} \cos\theta_0 \chi_{23} - \mu_0 M_s \sin\theta_0 \sin\varphi_0$ (37)

$q_{24} = -\frac{B}{2M_s} (\sin\theta_0 \sin\varphi_0 \chi_{23} + \cos\theta_0 \chi_{22})$ (38)

$q_{25} = -\frac{B}{2M_s} (\sin\theta_0 \cos\varphi_0 \chi_{23} + \cos\theta_0 \chi_{12})$ (39)

$q_{26} = -\frac{B}{2M_s} (\sin\theta_0 \cos\varphi_0 \chi_{22} + \sin\theta_0 \sin\varphi_0 \chi_{12})$ (40)

$q_{31} = -\frac{2B}{M_s} \sin\theta_0 \cos\varphi_0 \chi_{13} - \mu_0 M_s \cos\theta_0$ (41)

$q_{32} = -\frac{2B}{M_s} \sin\theta_0 \cos\varphi_0 \chi_{13} - \mu_0 M_s \cos\theta_0$ (42)

$q_{33} = -\frac{2B}{M_s} \cos\theta_0 \chi_{33} - \mu_0 M_s \cos\theta_0$ (43)

$q_{34} = -\frac{B}{2M_s} (\sin\theta_0 \sin\varphi_0 \chi_{22} + \sin\theta_0 \sin\varphi_0 \chi_{12})$ (44)

$q_{35} = -\frac{B}{2M_s} (\sin\theta_0 \sin\varphi_0 \chi_{33} + \cos\theta_0 \chi_{13})$ (45)

$q_{36} = -\frac{B}{2M_s} (\sin\theta_0 \cos\varphi_0 \chi_{23} + \sin\theta_0 \sin\varphi_0 \chi_{13})$ (46)

Les expressions des perméabilités magnétiques μ_{ij} variables en fonction du champ magnétique sont[78] :

$$\mu_{11} = \mu_0 (1+\chi_{11}) \quad (47)$$

$$\mu_{12} = \mu_0 \chi_{12} \quad (48)$$

$$\mu_{13} = \mu_0 \chi_{13} \quad (49)$$

$$\mu_{22} = \mu_0 (1+\chi_{22}) \quad (50)$$

$$\mu_{23} = \mu_0 \chi_{23} \quad (51)$$

$$\mu_{22} = \mu_0 (1+\chi_{33}) \quad (52)$$

Nous avons tracé la variation de ces constantes élastiques effectives non nulles ΔC_{11} *et* ΔC_{44} du nickel en fonction du champ magnétique externe appliqué suivant deux directions parallèle et perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde élastique de surface c'est à dire suivant l'axe facile et perpendiculairement à l'axe facile de nickel. Dans la figure II.11, on trace le comportement des constantes élastiques en fonction du champ magnétique parallèle (Figure II.11 (a)) et un champ magnétique perpendiculaire (Figure II.11b)).

Cette étude nous permet de savoir si le comportement de la variation de la fréquence de résonnance vis-à vis du champ magnétique est dû aux constantes élastiques ou pas. Dans les paragraphes suivant nous allons étudier cette variation.

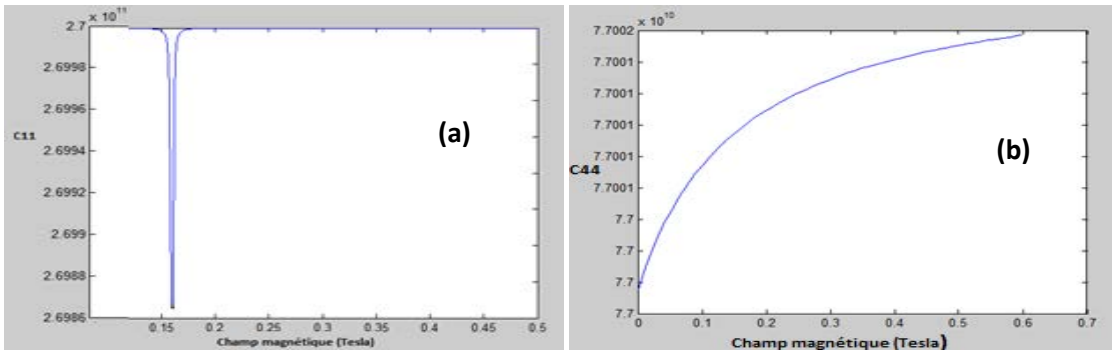


Figure II.11 : Variation de ΔC11 et de ΔC44 du nickel en fonction du champ magnétique appliqué dans le même sens de propagation de l'onde élastique de surface

II.2.4.6.2 Implémentation physique sous COMSOL Multiphysics

L'implémentation du couplage magnéto élastique sous COMSOL a été effectuée en deux étapes. Dans un premier temps et dans le module « structural mechanics », les constantes élastiques, de perméabilité magnétique et de couplage piézomagnétique, dépendantes du champ magnétique sont implémentées dans l'interface « variables » correspondant du « domaine » du matériau magnétostrictif à savoir le nickel.
Ensuite, un couplage entre les deux modules, piézoélectrique « Structural mechanics » intégrant les propriétés élastiques variables en fonction du champ magnétique, et magnétique « AC/DC » intégrant les paramètres magnétiques dépendants de la déformation du matériau magnétostrictif, est implémenté.

<u>Le nickel : Variables</u>

Etant donné que le couplage magnéto élastique est dans le nickel, on sélectionne le matériau nickel où tous les paramètres piézoélectriques sont définis, et on implémente les équations de couplage en suivant les étapes suivantes :

- Les constantes élastiques du nickel sont dépendantes du champ magnétique. Les nouvelles valeurs de ces constantes sont alors de la forme C'ij= Cij+ΔCij. ΔCij définissent les constantes élastiques effectives dont le calcul est détaillé dans le paragraphe II.2.4.6.1. Les expressions des constantes élastiques non nulles dépendantes du champ magnétique sont :

$$C'_{11} = C_{11} - \frac{4B^2}{U_1 * Ms^2}\cos^2\varphi_0 \sin^2\theta_0 \quad (1)$$

$$C'_{12} = C_{12} + \frac{B^2 \sin 2\varphi 0}{U1} \quad (2)$$

$$C'_{13} = C_{13} + \frac{B^2 \sin 2\varphi 0}{U1} \quad (3)$$

$$C'_{33} = C_{33} - \frac{B^2}{U_1 * Ms^2}\cos^2 \theta_0 \sin^2 \varphi_0 \quad (4)$$

$$C'_{44} = C_{44} - \frac{B}{U_2 * Ms^2} \sin^2 \varphi_0 \quad (5)$$

$$C'_{23} = C_{23} - \frac{B^2 \sin\varphi 0 \cos\varphi 0}{U_2} \quad (6)$$

Avec: $U_1 = \mu_0 M_s (H_a (1 - \sin^2\varphi_0) + H\cos(\varphi_0) + D)$, (7)

$U_2 = \mu_0 M_s (H_a (1 - 2\sin^2\varphi_0) + H\cos(\varphi_0) + D$, (8)

D étant le champ magnéto élastique défini par $D = \frac{B^2}{\mu_0 \, MsC_{44}}$ (9)

Le tenseur de perméabilité μ_{ij} dépendant aussi du champ magnétique est implémenté dans le tableau « variable » de COMSOL correspondant à nickel. Les expressions de perméabilités dépendantes du champ magnétique sont :

$$\mu_{11} = \mu_0 - \frac{\mu_0 \, Ms^2 \sin^2 \varphi 0}{U_1} \quad (10)$$

$$\mu_{22} = \mu_0 \quad (11)$$

$$\mu_{11} = \mu_0 + \frac{\mu_0 \, Ms^2}{U_2} \quad (12)$$

Les expressions des composantes des constantes piézomagnétiques sont :

$$q_{11} = \frac{-2B^2 \mu_0 \, M_s \cos\varphi_0 \sin^2 \varphi 0}{U_2} \quad (13)$$

$$q_{12} = \frac{2B^2 \mu_0 \, M_s \, \cos^2 \varphi 0 \sin\varphi_0}{U_2} \quad (14)$$

$$q_{13} = \frac{2B^2 \mu_0 \, M_s \, \sin\varphi_0}{U_1} \quad (15)$$

$$q_{16} = \frac{B^2 \mu_0 \, M_s \, (1 - \sin^2 \varphi 0) \, \sin\varphi_0}{U_2} \quad (16)$$

$$q_{21} = \frac{2B^2 \mu_0 \, M_s \, \cos^2 \varphi 0 \sin\varphi_0}{U_2} \quad (17)$$

$$q_{22} = \frac{2B^2 \mu_0 \, M_s \, \sin^2 \varphi 0 \sin\varphi_0}{U_2} \quad (18)$$

$$q_{34} = \frac{2B^2 \mu_0 \, M_s \, \sin\varphi_0}{U_1} \quad (19)$$

$$q_{36} = \frac{-B^2 \mu_0 \, M_s \, \cos\varphi_0}{U_2} \quad (20)$$

$$q_{26} = -\frac{B^2 \mu_0 \, M_s \, (1 - \sin^2 \varphi 0) \, \cos\varphi_0}{U_2} \quad (21)$$

Afin d'envisager un champ magnétique statique externe, nous avons appliqué la méthode des coordonnées sphériques utilisée par O. Boumatar *et al.*[78] . Dans ce cas, on se considère dans le cas d'une onde magnéto-élastique dans un film ferromagnétique déposé sur un substrat aimanté jusqu'à la saturation. Dans ce cas, l'amplitude de l'aimantation M est une constante M_s et les deux variables θ et φ sont considérées comme le montre la figure II.12[73]. Nous notons les angles θ et φ par θ_0 et φ_0 .

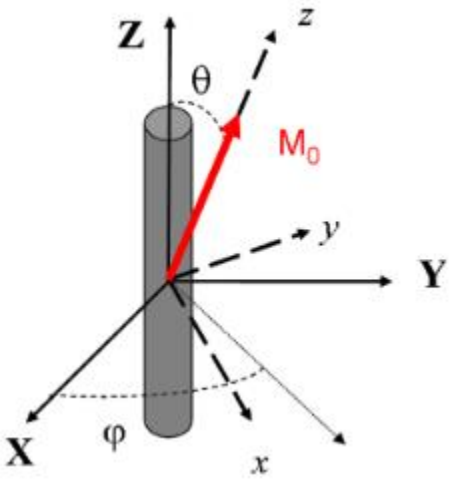


Figure II.12 : Illustration schématique montrant les coordonnées sphériques utilisées[73]

Dans le cas d'une première configuration, quand le champ magnétique externe est appliqué dans une direction parallèle à la direction de propagation de l'onde élastique de surface, $\theta_0 = \frac{\pi}{2}$ et $\varphi_0 = 0$

Dans la seconde configuration, quand le champ magnétique externe est appliqué dans une direction perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde élastique de surface : $\theta_0 = 0$ et $\varphi_0 = \frac{\pi}{2}$

H étant la variable désignant le champ magnétique, Ms est l'aimantation à la saturation du nickel[91] et b est le coefficient de couplage magnéto élastique et il est égal à b=0.8 $\times 10^8$ [92].

[91] L.Li "Stress effects on ferromagnetic materials: investigation of stainless steel and nickel" *Iowa State University"2004*
[92] E.du TREMOLET et al. « The magnetoelastic coupling in Nickel », Journal of Magnetism and Magnetic materials, 28 (1982) 77-87

Couplage entre Les modules « Strcutural mechanics » et « AC/DC »

Dans cette étape, le couplage entre les deux modules piézoélectrique et magnétique dans Comsol est implémenté. On considère alors un modèle qui définit une structure piézomagnétique SAW périodique infinie Ni-IDT/ Quartz ST-90°**.** Dans notre étude, nous avons utilisé les deux modules suivants : (*piézoélectrique devices* du module *Structural Mechanics)* et magnétique (*AC/DC*).

Le principe du couplage magnéto élastique est basé sur les deux équations (1) et (2) du paragraphe II.1.4

- Le champ magnétique est défini comme une variable nommé H_x quand il est parallèle à la direction de propagation de l'onde élastique, et H_y quand il est perpendiculaire à cette direction ;
- Les deux paramètres u et v désignent respectivement les vecteurs de déplacement suivants les orientations parallèle et perpendiculaire ;
- C_{ij} sont les constantes élastiques du nickel ;
- q_{ij} sont les constantes piézomagnétiques ;
- mu_{ij} est le tenseur de perméabilité magnétique μ_{ij} ;

Ainsi, et en se basant sur les équations (1) et (2), les variables relatives aux contraintes mécaniques S sont implémentées dans le tableau « variable » du module piézoélectrique.

- **Sx** = $(C_{11}\times u+C_{12}\times v) + (q_{111}\times Hx+q_{21}\times Hy)$
- **Sy**= $(C_{12}\times u+C_{12}\times v) + (q_{211}\times H_x+q_{22}\times H_y)$

Ensuite dans le module magnétique « AC/DC », dans le tableau relatif à la densité de flux magnétique B, ce paramètre est implémenté comme étant :

- $B_x = (mu_{11}\times H_{x+} q_{11}\times u+q_{12}\times v)$
- $B_y = (mu_{21}\times H_{y+} q_{21}\times u+q_{22}\times v)$

II.2.4.6.3 Effet du taux de métallisation

Pour valider le modèle théorique implémenté, nous avons étudié dans une première étape la sensibilité de la structure Ni-IdT/Quartz ST 90° en fonction du champ magnétique appliqué parallèlement et perpendiculairement à la direction de propagation de l'onde acoustique de surface pour différent taux de métallisation de l'électrode.

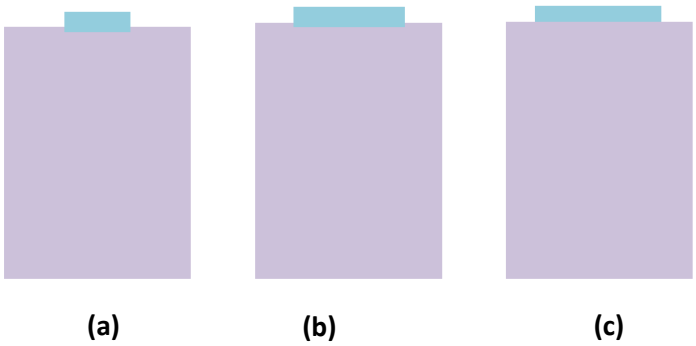


Figure II.13 : Variation du taux de métallisation de l'électrode en Nikel (TM :(a) = 0.2 ; (b)=0.5 et (c)=0.8))

- Bien que l'étude de la sensibilité magnétique du résonateur Ni/Quartz quand le champ magnétique est dans le même sens que la propagation de l'onde, n'a pas été développée par Kadota et al. dans leurs publications, nous avons néanmoins pris en considération cette étude théoriquement. Comme on peut le constater dans la figure II.14, l'effet du taux de métallisation sur la variation relative de la fréquence ($\frac{\Delta f}{f}$ (ppm)) est faible. Néanmoins, nous constatons que plus le taux de métallisation est élevé plus la sensibilité de la structure au champ magnétique est importante.

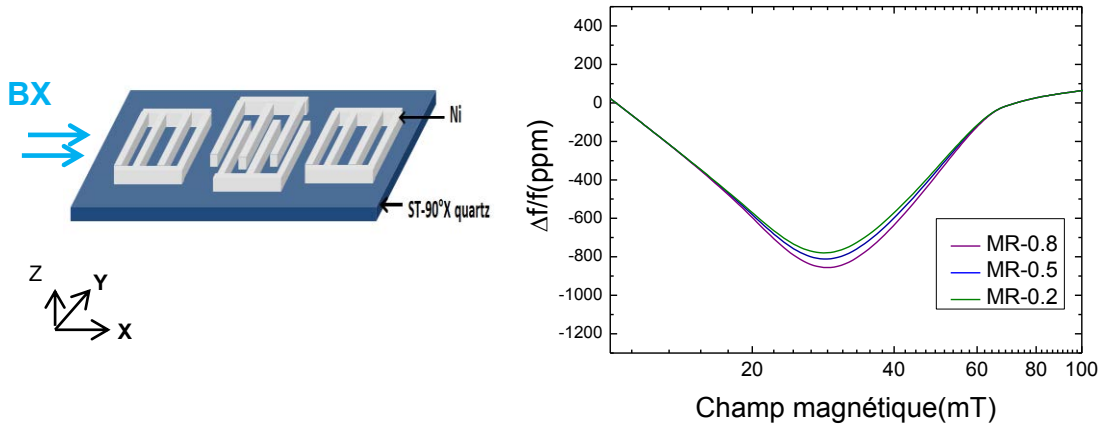


Figure II.14 : Effet du taux de métallisation sur la variation de la sensibilité de la structure SAW Ni/Quartz à l'intensité du champ magnétique.

- Dans une seconde étape nous avons étudié la variation de $\frac{\Delta f}{f}$ (ppm) en fonction du champ magnétique quand celui-ci est appliqué perpendiculairement au sens de propagation de l'onde élastique de surface. La figure II.15 montre que quand le taux de métallisation augmente, la variation relative de la fréquence de résonance $\frac{\Delta f}{f}$ (ppm) augmente. Les résultats de cette étude sont en parfaite cohérence avec les travaux de Kadota *et al.*

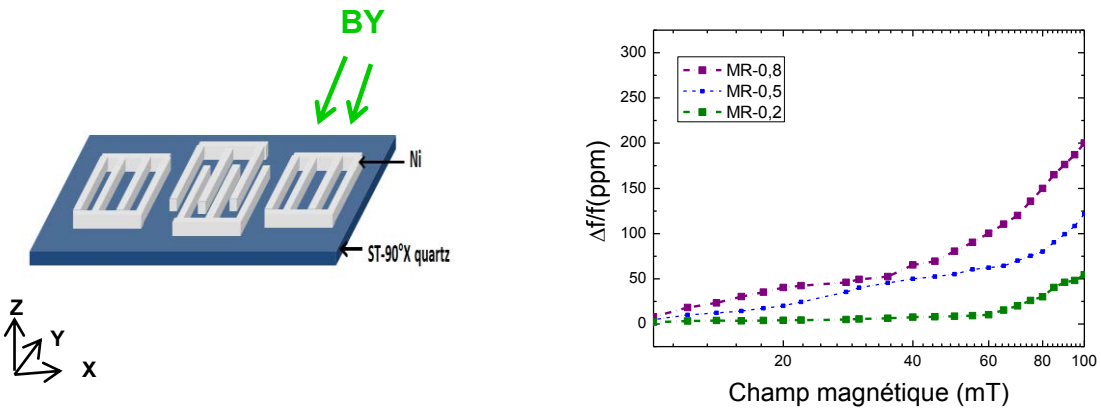


Figure II.15 : Effet du taux de métallisation sur $\frac{\Delta f}{f}$ de la structure SAW Qtz-IDT en fonction du champ magnétique

- Par la suite, nous avons effectué une étude théorique afin de fixer l'épaisseur des électrodes de nickel. Cette étude consiste à optimiser l'épaisseur du nickel pour obtenir un coefficient de couplage électromécanique le plus élevé. Comme on peut

l'observer sur la figure II.16, l'épaisseur optimale est obtenue pour une épaisseur de l'ordre de 290 nm. Kadota et al. ont obtenu cet optimum pour une épaisseur égale à0.02λ (soit 292 nm).

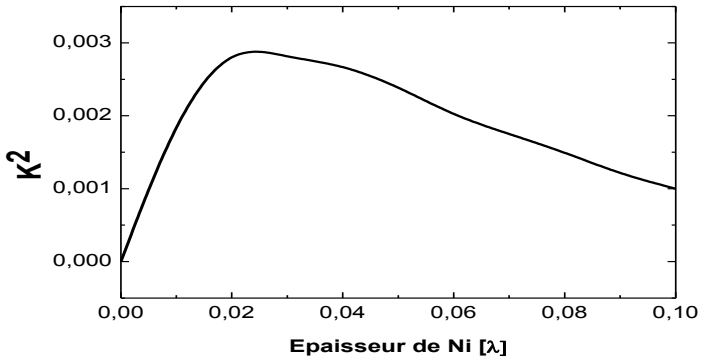


Figure II.16 : Variation du facteur de couplage électromécanique en fonction de l'épaisseur de Ni

Les résultats théoriques obtenus sont conformes aux résultats expérimentaux obtenus par Kadota *et al.* Le taux de métallisation qui sera fixé pour la suite de l'étude à 80% et l'épaisseur des électrodes magnétique de Ni sera 292nm. Dans la prochaine étape, nous étudierons la sensibilité du résonateur SAW à l'intensité du champ magnétique appliqué dans les deux directions : parallèle et perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde élastique de surface.

II.2.5 Sensibilité magnétique $\frac{\Delta f}{f}$ et facteur de qualité Q

Nous avons étudié dans un premier cas une structure SAW périodique infinie Ni/Quartz où les électrodes de Ni présentent un taux de métallisation = 80%. La réponse fréquentielle large bande en réflexion (S_{11}) est présenté sur la figure II.17. La gamme fréquentielle a été choisie pour observer le pic qui correspond à la fréquence fondamentale du résonateur ainsi que la 3ème et 5ème harmonique

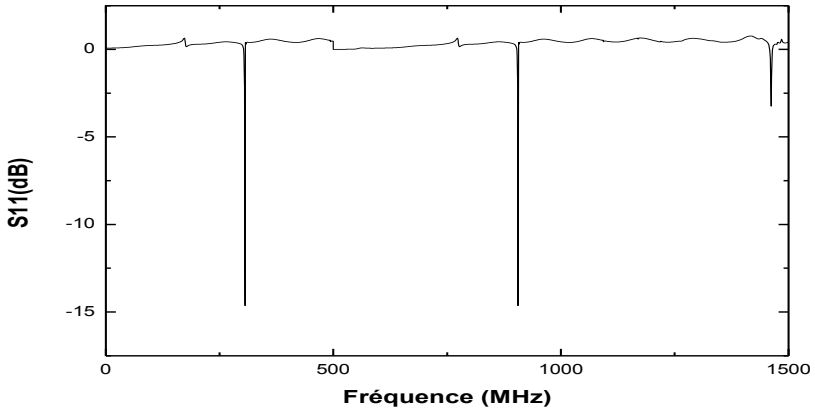


Figure II.17 : Réponse fréquentielle S11 de la structure SAW Quartz/Ni(IDT)

La figure II.18 montre l'évolution de la variation de la fréquence de résonance en fonction des champs magnétiques appliqués selon les 3 directions x, y et z. B_X, B_Y sont les champs appliqués dans le plan de l'échantillon respectivement parallèles et perpendiculaires à la direction de propagation du SAW. Bz est le champ appliqué perpendiculairement au plan du substrat. On constate que le capteur est peu, voir pas sensible au champ magnétique Bz. Dans la suite de l'étude, on ne s'intéressera plus à cette direction. La fréquence du capteur SAW présente alors une grande dépendance des caractéristiques magnétiques du champ (direction et intensité) et en particulier quand le champ magnétique est appliqué suivant l'axe parallèle à la direction de propagation de l'onde élastique de surface (SAW).

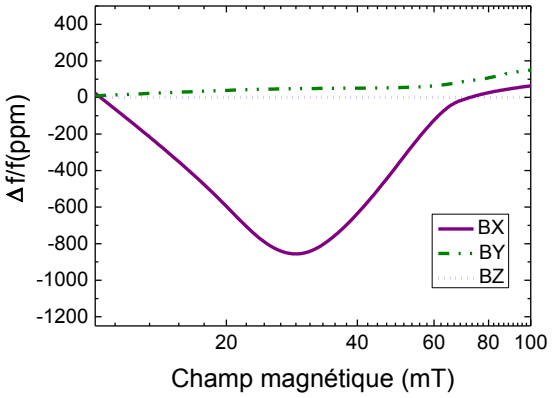


Figure II.18 : Variation de la fréquence en fonction du champ magnétique B_X, B_Y et B_Z[93]

[93] M. Elhosni, O. Elmazria, A. Talbi, K. Ait Aissa, L. Bouvot, F. Sarry "FEM modeling of Multilayer Piezo-magnetic Structure Based Surface Acoustic Wave Devices for Magnetic Sensor"Procedia Engineering 87 408 – 411 (2014)

La variation du facteur de qualité (Q) en fonction des champs magnétiques parallèles et perpendiculaires a été également étudiée. Comme le montre la figure II.19, la valeur du facteur Q est améliorée et atteint sa valeur maximale de 13000 pour des valeurs du champ magnétiques supérieures à 100mT. Cependant, quand le champ magnétique est appliqué dans le même sens que la propagation de l'onde élastique de surface, la valeur du facteur Q se détériore considérablement dans l'intervalle entre 0 e 35mT et atteint un minimum de 3000.

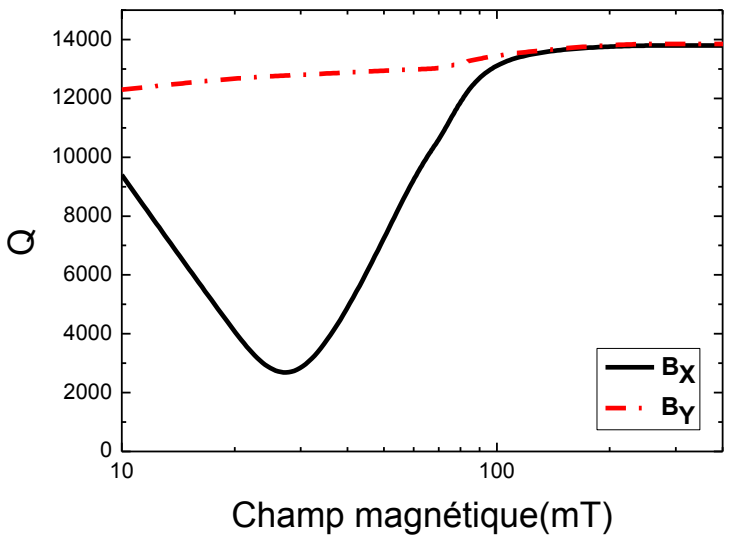


Figure II.19 : Variation du facteur de qualité en fonction du champ magnétique B_X et B_Y

En tenant compte de l'évolution du facteur de qualité et vu que le but ultime de cette étude consiste à réaliser des capteurs magnétiques SAW passifs et interrogeables à distance, le capteur à base de Ni/Quartz ne sera considéré que pour détecter des champs appliqués perpendiculairement à l'axe de propagation de l'onde élastique.

Les interprétations physiques de ces variations des propriétés magnétiques qui dépendent de la direction du champ magnétique externe appliqué ont été reportées dans d'autres études précédentes[94, 95] . En effet ces variations présentées dans les figures 18 et 19 semblent être dues à l'effet de la variation du module de Young ΔE qui consiste à un changement de module d'Young E sous des champs magnétiques, et à un couplage

[94] M. Yamaguchi, K. Y. Hoshimoto, H. Kogo, and M. Naoe: IEEE Trans. Magn. 16, 916. (1980).
[95] P. Smole, W. Ruile, C. Korden, A. Ludwig, E. Quandt, S. Krassnitzer, and P. Pongratz: Proc. IEEE Int. Frequency Control Symp , p. 903, (2003).

magnétodynamique, qui est l'interaction entre les ondes élastiques et les moments magnétiques.

Ces effets provoquent un changement sur les propriétés élastiques du film de Ni et donc sur la vitesse SAW de la structure (donc la fréquence de résonance du dispositif). Particulièrement le comportement du couplage magnéto élastique dynamique qui dépend de son processus de magnétisation, c'est-à-dire de la corrélation entre la direction d'un champ magnétique appliqué et la direction de l'aimantation spontanée connu par « axe facile » ou « axe difficile » pour les matériaux magnétostrictifs.

II.2.6 Conclusion

Dans cette dernière partie de ce chapitre nous avons implémenté un modèle d'une structure SAW périodique infinie Ni(IDT)/Quartz dans le logiciel de simulations numériques Comsol Multiphysics, et confronté ces résultats à des résultats expérimentaux d'une structure identique publiés récemment. La concordance des résultats obtenus valide notre modèle et nous ouvre la voie pour proposer et concevoir une structure originale pour réaliser un capteur de champ magnétique à SAW. L'objectif est d'améliorer les performances et la sensibilité du capteur en jouant sur plusieurs paramètres définissant la nouvelle structure.

Chapitre III : Conception et réalisation d'un capteur magnétique SAW à base de structure originale multicouche LiNbO3/IDT/ZnO/Ni

Introduction

Dans le chapitre précédent nous avons mis en équations le couplage magnéto élastique et nous l'avons validé en confrontant ses résultats à ceux d'une étude expérimentale publiée par Kadota *et al.* concernant un capteur magnétique SAW à base de la structure Ni/Quartz. Cette structure a l'avantage de présenter, quand le champ magnétique est appliqué perpendiculairement à la direction de propagation de l'onde élastique de surface, un facteur de qualité important (>10 000) la rendant compatible avec les applications de mesures sans fil. Cependant, la sensibilité reste modeste malgré l'utilisation d'IDTs avec un taux de métallisation de 80%. Notons que ce taux de métallisation élevé complique l'étape de photolithographie et limite la fréquence maximale envisageable. La sensibilité à un champ parallèle à la surface est quant à elle est plus importante, mais le facteur de qualité qui y est associé se dégrade avec l'intensité du champ magnétique. On peut donc conclure que les paramètres permettant d'améliorer la sensibilité de cette structure sont limités et ont déjà été investigués par les auteurs de la publication.

Dans le présent chapitre nous allons étudier une structure SAW multicouches originale dont le principal intérêt et d'offrir plusieurs degrés de liberté qui permettront de contrôler la sensibilité du capteur, la gamme de mesure et les performances du dispositif SAW en vue d'une utilisation sans fil. La structure sera constituée d'un cristal piézoélectrique (substrat) sur lequel seront déposés des IDTs métalliques puis un film isolant et enfin un film magnétostrictif comme couche sensible aux variations du champ magnétique. Le rôle de la couche isolante est d'éviter tout contact électrique entre les IDT et la couche sensible qui est généralement conductrice. Il est alors possible par le choix de la couche sensible de contrôler la sensibilité du capteur et sa gamme de mesure. Comme on le verra par la suite, le choix de la couche isolante pourra également agir et de manière non négligeable sur la sensibilité du capteur. La nature des IDTs et leur périodicité combinée avec le type du substrat et sa coupe

définiront les performances du dispositif SAW et ses caractéristiques (fréquence de fonctionnement, facteur de qualité, coefficient de couplage électromécanique) qui toutes permettent de contrôler la sensibilité du capteur.

Nous allons commencer par étudier une première structure, Ni/ZnO/Al(IdT)/$LiNbO_3$, pour valider un certain nombre d'hypothèses. Une structure optimisée et plus sensible sera étudiée dans le prochain chapitre.

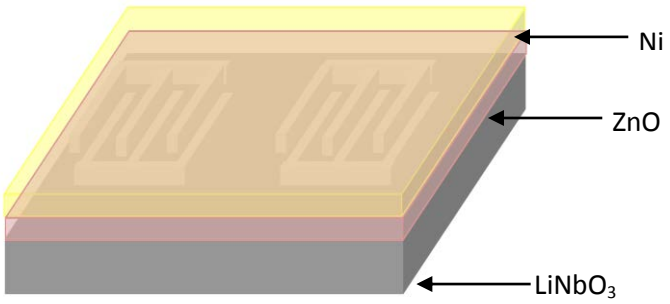


Figure III.1: Configuration géométrique de la structure multicouche $LiNbO_3$/IDT/ZnO/Ni

Choix de la structure Ni/ZnO/Al(IdT)/$LiNbO_3$:

- Pour le substrat nous avons opté pour le niobate de lithium coupe 128-Y, qui présente un fort coefficient de couplage électromécanique (K^2=5,5%) et des pertes de propagation élastiques très faibles.
- Pour réaliser les IDT, nous utiliserons l'aluminium ou parfois l'or pour leur bonne conductivité électrique. Le taux de métallisation sera fixé à 50 %, et la période à **24µm ce qui permet d'exciter une fréquence centrale à environ 160 MHz et une pseudo-harmonique 3 à 460 MHz et une pseudo-harmonique 5 à 810MHz**. Il sera alors possible de comparer les performances de cette structure avec celle publiée par Kadota *et al.* et qui considère une harmonique 3 à 910 MHz.
- Comme couche isolante, nous avons opté pour le ZnO, pour des raisons pratiques. En effet, le dépôt de cette couche est bien optimisé dans notre laboratoire. Son épaisseur et autres propriétés sont bien maitrisées.

Le nickel comme couche sensible a été choisi pour la simplicité de son dépôt mais aussi pour permettre une comparaison objective avec la structure réalisée par Kadota *et al.*

Le présent chapitre sera divisé en trois parties :

- Une première partie consacrée à l'étude théorique de la structure Ni/ZnO/Al(IDT)/LN. On optimisera les épaisseurs des différentes couches et on étudiera la sensibilité de cette structure au champ magnétique (direction et intensité).
- Une seconde partie décrivant le protocole expérimental utilisé pour la réalisation de cette structure.
- Une dernière partie présentant les résultats de caractérisations et leur confrontation aux prédictions théoriques. Une discussion conclura le chapitre.

Partie 1 : Modélisation d'un capteur magnétique SAW à base d'une structure multicouche Ni/ZnO/$LiNbO_3$

III.1.1 Matériaux mis en œuvre dans la structure multicouche Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$

III.1.1.1 Le Niobate de Lithium $LiNbO_3$

Le Niobate de lithium ($LiNbO_3$ ou LN) est un matériau ferroélectrique très utilisé dans les diverses applications grâce à ses propriétés piézoélectriques, optique, élastique et photo réfractive[96]. Ce matériau, constitue l'un des matériaux les plus importants pour la réalisation des guides d'onde optiques[97]. Le grand coefficient de couplage électromécanique que présentent certaines de ses coupes cristallographiques combinées avec des pertes de propagations élastiques très faibles en font un substrat de choix pour la réalisation de dispositifs à ondes élastiques de surface. Il est largement utilisé dans les applications télécom notamment comme filtre, dans les applications d'identifications (RFID) et dans les capteurs notamment capteur de température grâce à son grand coefficient de température élevé (TCF = 60 – 90 ppm/°C).

Le $LiNbO_3$ présente une structure cristallographique trigonale (Figure III.2).

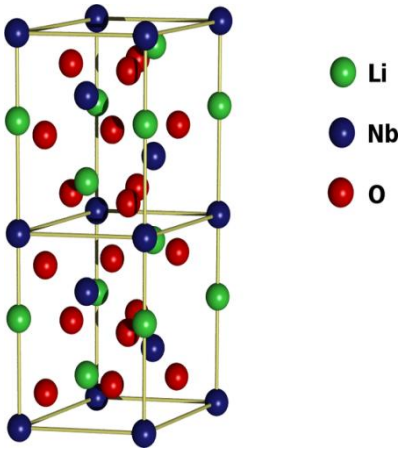


Figure III.2 : Structure cristallographique du $LiNbO_3$

[96] K.K Wong *et al.,* Properties of lithium niobate2002: IET.
[97] M. Lawrence *et al.*, LITHIUM-NIOBATE INTEGRATED-OPTICS. Reports in Physics, 1993. 56(3) : p. 363 429.

Il présente aussi la caractéristique d'être dopé par certains oxydes comme par exemple l'oxyde de magnésium qui lui permet d'augmenter sa capacité de résister aux différents dommages optiques. Le niobate de lithium peut être dopé aussi par d'autres dopants comme le fer, le zinc , le manganèse, le cuivre, et le bore qui créent des sources optiques modulables par des tubes à ondes progressives.

Notre choix a été fixé sur le niobate de lithium (coupe Y-128°, direction X) comme substrat piézoélectrique grâce à son fort facteur de couplage électromécanique (5%) et pour ses pertes de propagation élastiques assez faibles.

III.1.1.2 L'Oxyde de Zinc : ZnO

L'oxyde de zinc (ZnO) est connu sous le nom de Zincite et on le trouve dans la nature. Le ZnO se cristallise d'une manière générale selon la phase hexagonale compacte B4 (Würtzite). Néanmoins il peut être synthétisé selon la phase cubique B3 (Blende) lorsqu'il est déposé sur certains substrats de symétrie cubique.

Le ZnO de structure hexagonale compacte est décrit par l'alternance de deux réseaux : chacun est de type hexagonal compact, l'un de Zn^{2+} et l'autre de O^{2-}, et qui sont décalés d'un vecteur u = 0,379 c (Figure III.3). Les paramètres de la maille primitive de ZnO dans les conditions normales de température et de pression sont a = 0,32498 nm et c = 0,52066 nm[98]

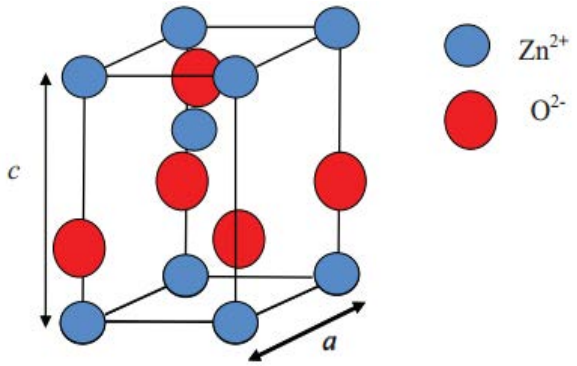


Figure III.3 : Maille primitive du ZnO

Les dopants généralement utilisés pour le ZnO sont des éléments des groupes III et IV du tableau de Mendeleïev. Ils substituent les atomes de zinc dans leurs sites atomiques. Le dopage peut aussi se réaliser en utilisant des éléments du groupe VII du tableau. Dans ce cas, le ZnO est dopé par la substitution des atomes d'oxygène.

[98] International Centre of Diffraction Data, Powder Diffraction File, JCPDS File N° 00- 036-1451.

Concernant les propriétés électromécaniques du ZnO, il est à noter que ce matériau appartient à la famille des matériaux piézoélectriques. Les applications du ZnO sont nombreuses, parmi ces applications, on peut citer son utilisation dans les capteurs chimiques et mécaniques, dans les diodes électroluminescentes, les générateurs d'électricité ou aussi dans la fabrication des cellules solaires.

Dans notre première étude de réalisation d'un capteur magnétique SAW, nous avons opté pour le choix du ZnO grâce à ses propriétés piézoélectriques, électromécaniques importante et aussi grâce et ses propriétés isolantes.

III.1.1.3 Le nickel : Ni

Le nickel est un matériau ferromagnétique, de symbole Ni et de numéro atomique 28 et appartient au groupe des métaux ferreux. Il se range avec le cobalt et le fer dans le groupe VIII : métaux de transition[99]

Grâce à sa capacité de résistance à l'oxydation et à la corrosion, il trouve des applications dans différents domaines notamment le plaquage du fer ou du cuivre.

Nous avons fixé notre choix sur le nickel comme couche magnétique pour notre premier capteur magnétique SAW car ce matériau est facilement déposable en couche mince par pulvérisation cathodique et ses propriétés magnétiques sont intéressantes pour des applications RF (forte perméabilité microonde) et donc pour les applications sans fil.

III.1.2 Modélisation en éléments finis FEM

III.1.2.1 Etapes de modélisation

Avec Comsol Multiphysics, la géométrie à modéliser dans une première étape est en deux dimensions. La méthode utilisée pour la modélisation est la même que celle détaillée dans le chapitre II.

Afin de modéliser la structure multicouche Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$ complète, nous avons procédé par étape comme précisé dans la figure III.4 en commençant par la structure IDT/$LiNbO_3$ puis ZnO/IDT/liNbO_3et enfin Ni/ZnO//IDT/$LiNbO_3$.

[99] « Métallurgie du nickel », science de l'ingénieur, Réf M2250, 10 avril 1996

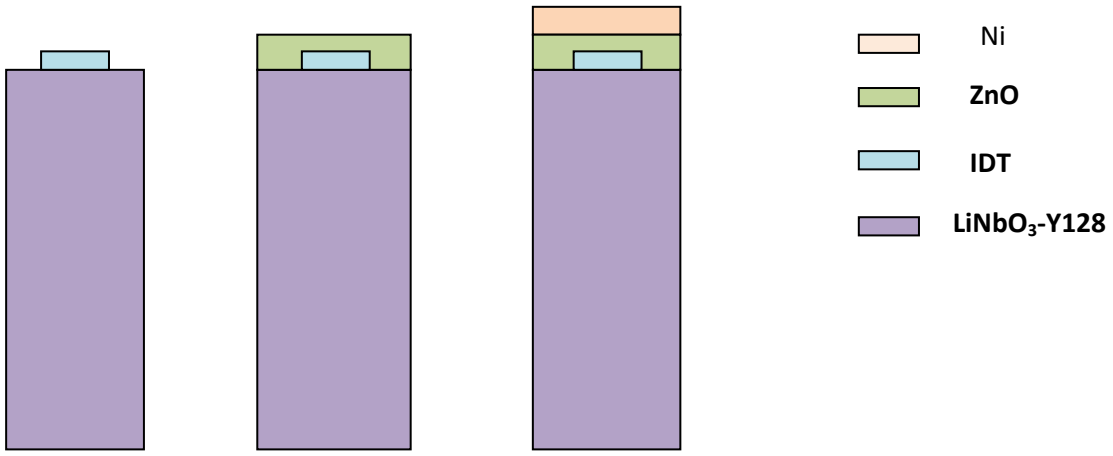


Figure III.4 : Vue schématiques des étapes de modélisation de la structure $LiNbO_3$/IDT/ZnO/Ni

III.1.2.2 Constantes élastiques

Après l'implémentation de la géométrie de la structure multicouche en 2D. A chaque domaine correspondant aux matériaux constituant la structure ($LiNbO_3$-Y128, ZnO, Ni), sont attribuées les constantes élastiques en fonction de la structure cristalline du matériau.

Le tableau III.1 résume les constantes élastiques utilisées pour chacun des matériaux constitutifs de la structure.

Les constants élastiques du nickel sont les mêmes que celles utilisées dans la modélisation de la structure Ni/Quartz.

Tableau III.1 : Constantes élastiques des matériaux utilisées dans l'implémentation de la structure $LiNbO_3$/IDT/ZnO/Ni

Constantes élastiques [Pa]	**$LiNbO_3$**	**ZnO**	**Ni**
C_{11}	$19.83e^{10}$	$2.1e^{11}$	$27e^{10}$
C_{12}	$6.6e^{10}$	$1.21e^{11}$	$116e^{9}$
C_{22}	$18.6e^{10}$	$2.1e^{11}$	$27e^{10}$
C_{13}	$5.3e^{10}$	$1.25e^{11}$	$116e^{9}$
C_{23}	$8e+0^{10}$	$1.25e^{11}$	$116e^{9}$
C_{33}	$20.8e^{10}$	$2.11e^{11}$	$27e^{10}$
C_{14}	$0.69e^{10}$	0	0
C_{24}	$0.63e^{10}$	0	0
C_{34}	$0.61e^{10}$	0	0
C_{44}	$7.5e^{10}$	$0.\ 425e^{11}$	$77e^{9}$
C15	0	0	0
C25	0	0	0
C35	0	0	0
C45	0	0	0
C55	$5.5e^{10}$	$0.425e^{11}$	$77e^{9}$
C16	0	0	0
C26	0	0	0
C36	0	0	0
C46	0	0	0
C56	$-0.37e^{10}$	0	0
C66	$7.5e^{10}$	$0.443e^{11}$	$77e^{9}$

III.1.2.3 Maillage

Le maillage est une étape primordiale, en particulier lorsque la structure considérée présente des échelles non homogènes. Dans notre cas où il s'agit d'une structure multicouche avec un substrat épais et des IDT et couches minces de faibles épaisseurs, l'optimisation du maillage est donc critique.

Nous avons opté pour un maillage rectangulaire comme décrit dans le chapitre précédent (Figure III.5) ce qui permet un contrôle manuel de toutes les parties de la structure. Une première optimisation a permis de trouver le bon compromis entre le temps de calcul et la précision des résultats de simulation.

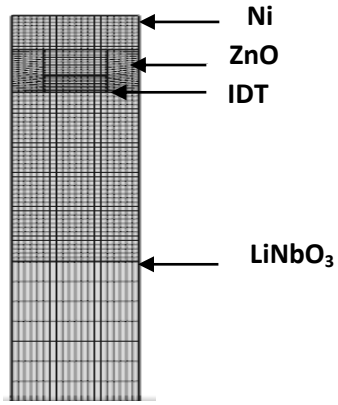


Figure III.5 : Maillage utilisé pour la modélisation de la structure multicouche Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$.

III.1.3 Résultats

III.1.3.1 Type de l'onde étudiée à la fréquence fondamentale

Dans cette étude, on s'intéresse particulièrement à la validation du type de l'onde élastique de surface qui se propage dans la structure multicouche Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$.

Pour valider le type de l'onde qui se propage dans la structure multicouche Ni/ZnO/IDT/ $LiNbO_3$, nous avons modélisé une structure périodique infinie IDT/$LiNbO_3$ de longueur d'onde λ=24µm en utilisant une structure en 3 dimensions (3D) afin de pouvoir tracer les amplitudes des composantes de déplacement suivant les trois axes de propagation de l'onde élastique (Figure III.6).

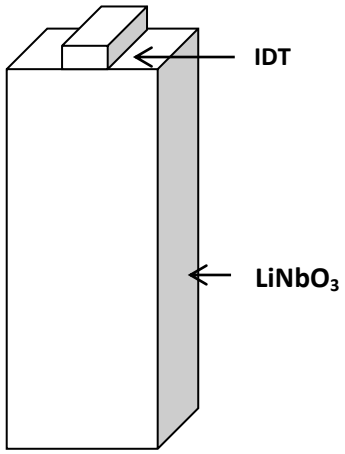


Figure III.6: Vue schématiques 3D d'une demie période de la structure périodique infinie IDT/$LiNbO_3$ (λ=24µm)

La figure III.7 montre l'amplitude de la composante du déplacement longitudinal suivant l'axe x qui présente les mêmes variations obtenues théoriquement à la surface d'un substrat piézoélectrique. Dans la figure III.7a, la coupe qui représente l'amplitude du déplacement est effectuée à la surface du substrat piézoélectrique. Dans la figure III.7b l'amplitude du déplacement de l'onde est maximale quand x=0, et minimale quand x est maximal de la surface du substrat.

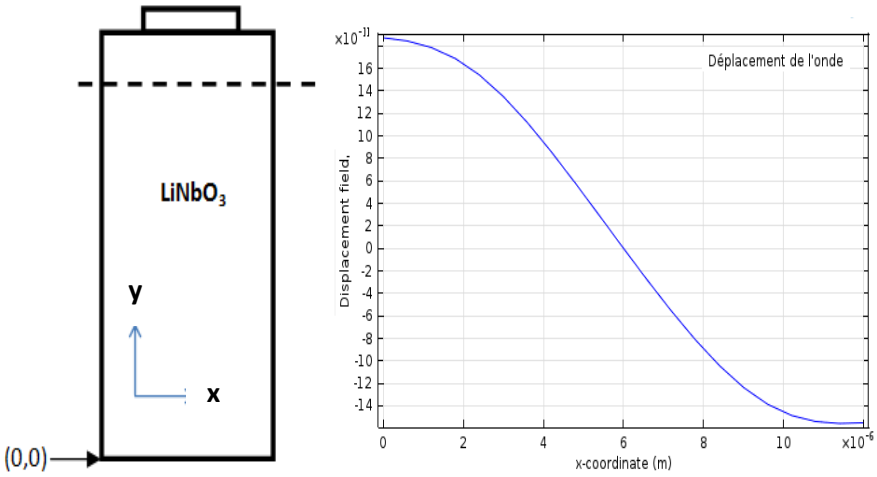


Figure III.7: (a) coordonnées de la présentation de l'amplitude du déplacement suivant l'axe x, (b) Amplitude de la composante longitudinale du déplacement en fonction de l'axe x (λ=24µm).

Dans la figure III.8(a), on présente la variation de l'amplitude de la composante du déplacement longitudinal en fonction de la profondeur de la structure à la surface d'un substrat piézoélectrique. Dans la figure III.8(b) on représente l'amplitude de déformation

de l'onde élastique de surface en fonction de l'épaisseur de la structure périodique infinie IDT/$LiNbO_3$ de longueur d'onde λ=24µm.

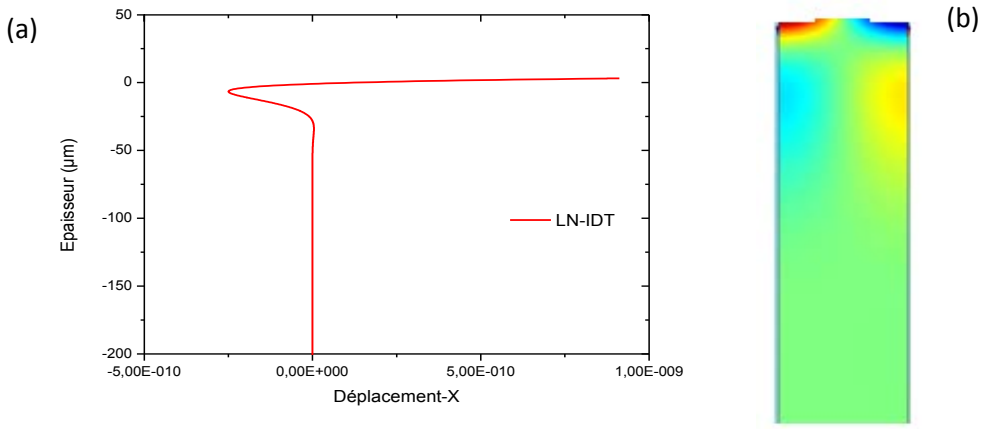


Figure III.8: Décroissance de la composante longitudinale u_L suivant l'axe x en fonction de la profondeur (épaisseur de la structure de base IDT/$LiNbO_3$ modélisée) pour une onde de Rayleigh (b) Amplitude de la déformation à la surface au passage de l'onde[100]

Dans la figure III.9(a), on présente la variation de l'amplitude de la composante de déplacement transversal en fonction de la profondeur de la structure SAW. Dans la figure III.9(b) on représente l'amplitude de déformation transversale de l'onde acoustique de surface en fonction de la profondeur de la structure SAW modélisée de base IDT/$LiNbO_3$.

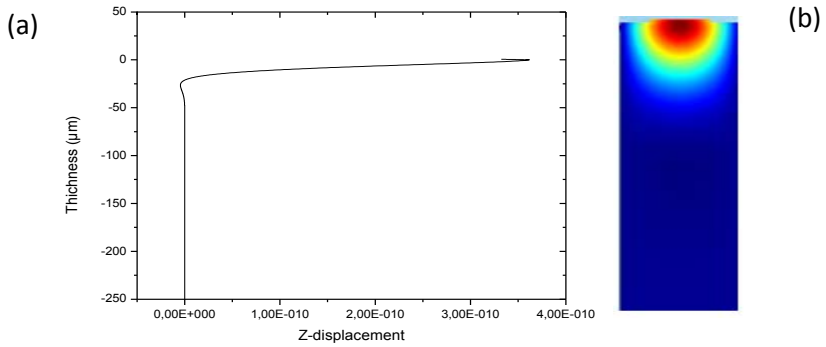


Figure III.9 : Décroissance de la composante longitudinale u_L suivant l'axe x en fonction de la profondeur (épaisseur de la structure de base LN/IDT modélisée) pour une onde de Rayleigh (b) Amplitude de la déformation à la surface au passage de l'onde

Les formes des déplacements obtenus pour cette structure confirment bien qu'il s'agit d'une onde de Rayleigh. Nous étudions dans la figure III.10 (a) et III.10 (b) l'effet de

[100] D. Royer et al. « Ondes élastiques dans les solides, Tome2 Génération, interaction acousto-optique, applications »

l'ajout des couches de ZnO et de Ni sur le déplacement de l'onde longitudinal et transversal.

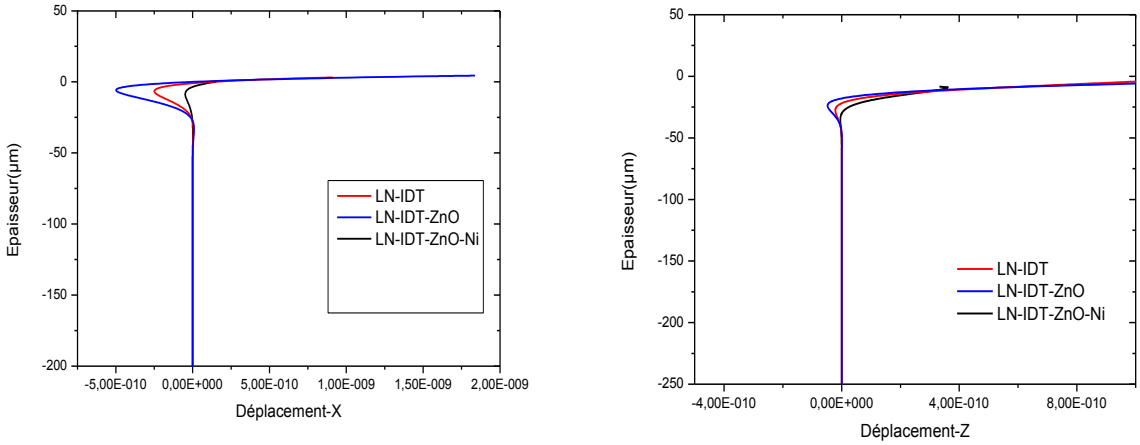


Figure III.10: composante longitudinale u_L (a) et transversale (b) suivant l'axe x en fonction de la profondeur des structures IDT/$LiNbO_3$, ZnO/IDT/$LiNbO_3$/ et Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$

Les couches de ZnO et de Ni n'affectent pas le type de l'onde étudiée à la fréquence fondamentale de 159 MHz. La figure III.10 confirme que le premier mode est similaire au comportement typique d'une onde de Rayleigh.

Dans la suite de ce manuscrit nous étudierons la variation fréquentielle correspondant à une onde élastique de surface en fonction du champ magnétique.

III.1.3.2 Optimisation des épaisseurs de nickel et de ZnO

On considère ici une structure multicouche composée d'un film mince de nickel déposé sur un film mince de ZnO qui constitue l'isolant entre les électrodes déposées sur un substrat piézoélectrique de $LiNbO_3$-Y128. (Figure III.11).

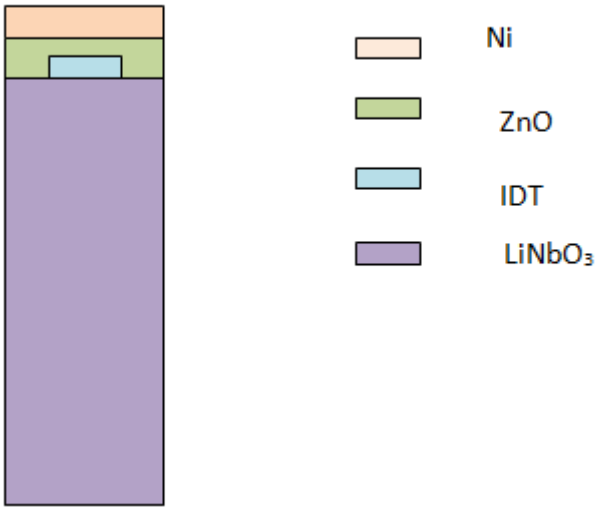


Figure III.11 : Vue schématiques de la structure Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$

Les épaisseurs de ZnO et de Ni sont optimisées respectivement pour obtenir le facteur de couplage électromécanique K^2 le plus élevé.

- Dans une première étape, une optimisation de l'épaisseur de la couche de ZnO a été étudiée. L'épaisseur de la couche de ZnO retenue (250 nm) est celle qui permet le plus grand facteur de couplage électromécanique.

- Ensuite, pour une épaisseur fixe de ZnO (250 nm), nous avons étudié la variation de K^2 en fonction de l'épaisseur de Ni. L'épaisseur du nickel optimale obtenue est égale à 200 nm. (Figure III.12).

Pour la suite de l'étude, théorique ou expérimentale, les épaisseurs de ZnO et Ni seront fixées respectivement à 250 et 200nm.

La figure III.12 représente la variation de K^2 en fonction de l'épaisseur. Vu que l'étude a été faite avec une longueur d'onde λ=24 µm, les épaisseurs optimales pour le ZnO et le Ni sont respectivement 200 et 250nm.

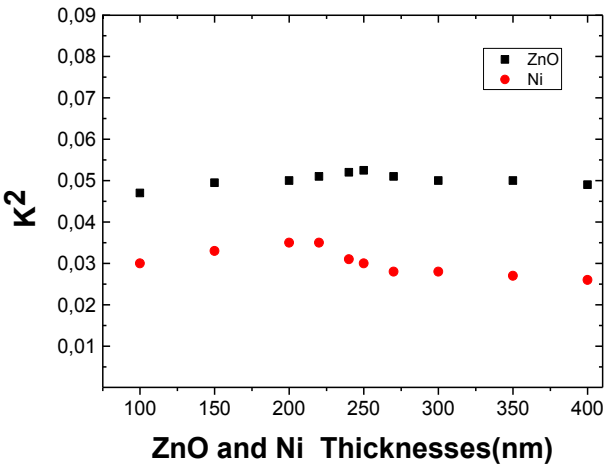


Figure III.12 : Variation de K^2 en fonction des épaisseurs de ZnO et de Ni

III.1.3.3 Réponses fréquentielles

Réponse fréquentielle en transmission (S_{21})

Vu que les dispositifs que nous allons étudier expérimentalement seront des lignes à retard, nous allons dans un premier temps modéliser une ligne à retard afin d'avoir une idée sur l'effet de l'ajout des différentes couches minces sur les pertes élastiques de la structure. Notons que la configuration de ligne à retard est très gourmande en mémoire de stockage et en temps de calcul. C'est pour cette raison que dans la suite de nos études et surtout quand nous étudierons la sensibilité au champ magnétique, nous avons opté pour une structure simplifiée qui modélise une structure infinie périodique.

Pour tracer S_{21}, une ligne à retard en 2D dont la structure de base est IDT/$LiNbO_3$-Y128 a été modélisée (Figure III. 13).

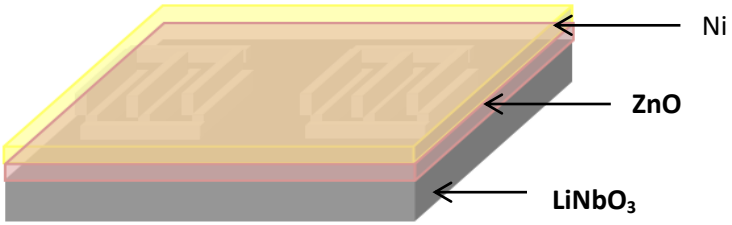


Figure III.13 : Ligne à retard modélisée pour tracer la réponse fréquentielle en transmission

Cette ligne à retard est constituée de 50 paires de doigts pour l'IDT d'entrée et de sortie. Le taux de métallisation est de 50%. Pour pouvoir comparer l'effet de l'ajout de chaque couche sur la fréquence et sur les pertes d'insertions, nous avons calculé ces deux paramètres à chaque étape de modélisation comme représentées dans la figure III.14.

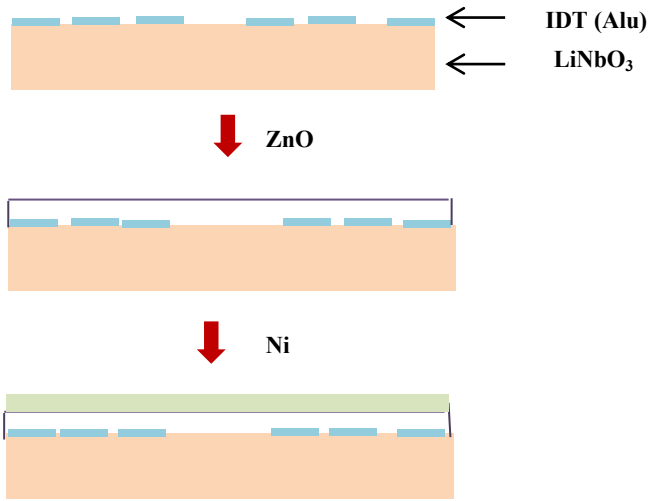


Figure III.14 : Etapes de modélisation des lignes a retard IDT/$LiNbO_3$, ZnO/IDT/$LiNbO_3$ et Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$

Pour chaque ligne à retard modélisée, la réponse fréquentielle S_{21} a été étudiée. Dans la figure III.15, nous superposons les réponses fréquentielles pour chacune des structures IDT/$LiNbO_3$, ZnO/IDT/$LiNbO_3$ et Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$.

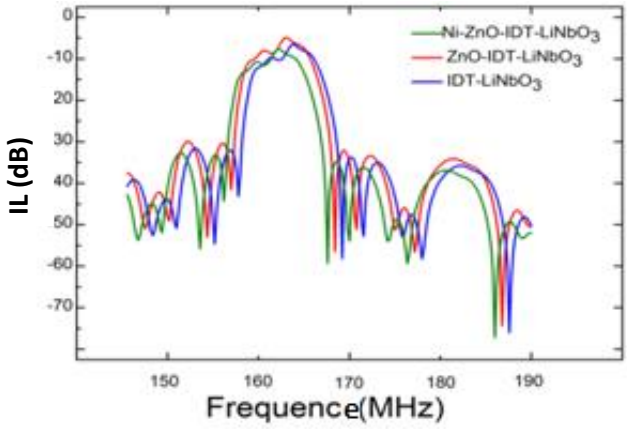


Figure III.15: Réponse fréquentielle S_{21} des structures IDT/$LiNbO_3$, ZnO/IDT/$LiNbO_3$ et Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$

Quand la couche de ZnO est rajoutée à la structure IDT/$LiNbO_3$, la fréquence de résonance diminue de 2MHz, en revanche les pertes d'insertions diminuent de 2 dB. La couche de Ni induit quant à elle une diminution de la fréquence de résonance et une augmentation des pertes d'insertions de 8dB par rapport à la structure originale IDT/LN.

La diminution de la fréquence après le rajout de la couche de ZnO et surtout celle de Ni est expliquée par la diminution de la vitesse de propagation de l'onde élastiques de surface vu que les deux couches ajoutées présentent une vitesse plus faible que celle du substrat $LiNbO_3$.

Les pertes d'insertions quant à elles sont le résultat de plusieurs paramètres dont les pertes de propagations élastiques, le facteur de couplage électromécanique (K^2). Vu que nous n'avons pas introduit de pertes de propagation dans notre modèle, la variation des pertes d'insertions est principalement influencée par le facteur de couplage électromécanique. Ce facteur a été calculé, respectivement, pour chacune des 3 structures afin de tenter d'expliquer l'évolution des pertes d'insertion en fonction de l'ajout des différentes couches. Le tableau III.2 synthétise les valeurs des grandeurs calculées pour chaque étape de la modélisation.

Tableau III.2 : Valeurs calculées du coefficient de couplage électromécanique, des pertes d'insertions, de la fréquence centrale, et du facteur de qualité pour chacune des trois structures étudiées.

Structure	**K^2 (%)**	**Pertes d'insertion IL (dB)**	**Q**	**Fréquence centrale**
IDT/ $LiNbO_3$	0.049	-9,8	1850	165MHz
ZnO/IDT/ $LiNbO_3$	0.052	-8,9	1487	164MHz
NI/ZnO/IDT/ $LiNbO_3$	0.035	-11,4	1180	162MHz

Quand la couche de ZnO est rajoutée à la structure IDT/$LiNbO_3$, K^2 augmente et passe de 4.9% à 5.2%, ce qui explique la diminution des pertes d'insertions quand la couche de ZnO a été rajoutée à la structure monocouche. Quand la couche de Ni est rajoutée, le facteur de couplage électromécanique diminue et passe de 5% (pour ZnO/IDT/ $LiNbO_3$) à 3.5% (pour Ni/ZnO/IDT/ $LiNbO_3$). Ceci justifie en partie l'augmentation des pertes d'insertions dans la structure avec Ni.

Réponse fréquentielle en réflexion (S_{11})

Pour tracer S_{11} nous nous sommes basés sur la structure du résonateur SAW décrite précédemment. La figure III.16 montre l'effet de l'ajout de chacune des couches minces sur la fréquence fondamentale du résonateur. Les variations de fréquences de résonance enregistrées sur la réponse S_{11} confirment celles obtenues à partir de la ligne à retard (S_{21}).

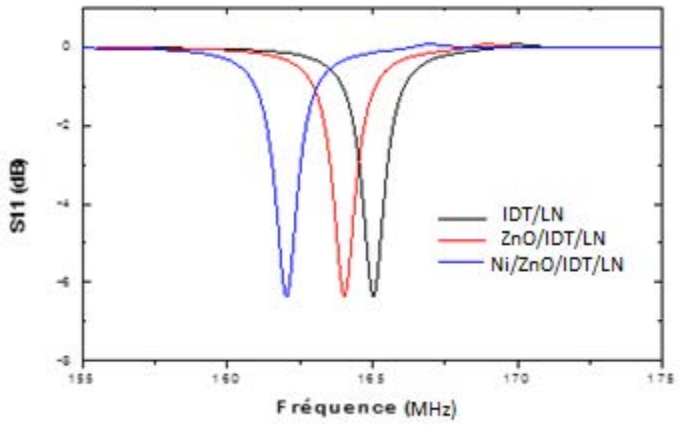


Figure III.16 : Effet de dépôt de ZnO et de Nickel sur la fréquence

En ajoutant 250 nm de ZnO à la structure IDT/LN, la fréquence fondamentale varie de 165 MHz à 164 MHz et de 164MHz à 162MHz quand le nickel a été rajouté à la structure.

La figure III.17 montre la réponse fréquentielle S_{11} large bande de la structure Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$ finale. La structure présente une fréquence fondamentale à 162MHz, une pseudo-harmonique 3 à 460MHz et une pseudo-harmonique 5 à 810 MHz. Pour éviter toute confusion avec d'éventuels modes supérieurs, ces pseudo-harmoniques ont été validées en traçant le déplacement total de l'onde acoustique de surface aux trois fréquences 162MHz, 460MHz et 810MHz respectivement.

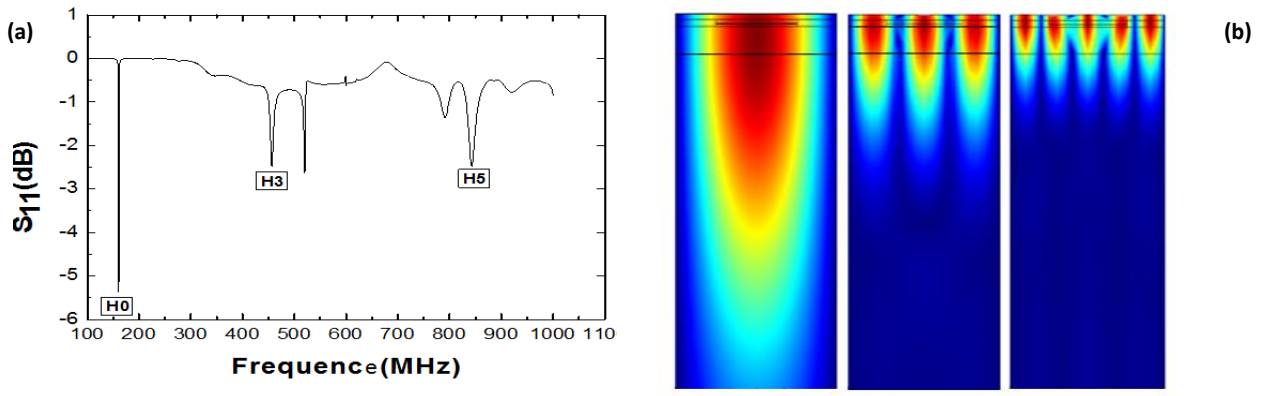


Figure III.17 : Réponse fréquentielle large bande (S_{11}), de la structure multicouche Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$(a), et représentations en 2D du déplacement total des particules calculées aux fréquences : fondamentale, H3 et H5[101]

III.1.4 Sensibilité au champ magnétique

Dans une première étape, un champ magnétique est appliqué suivant l'axe X, de propagation de l'onde élastique de surface comme le montre la figure III.18.

Les étapes de modélisation et d'implémentation du couplage magnéto élastique dans le nickel sont le même que celles détaillées dans le chapitre précédent. Les constantes élastiques, de couplage piézo-magnétique, de perméabilité magnétique sont dépendantes du champ magnétique. Le champ d'anisotropie implémenté = 0.16 Tesla[92]

La variation de la fréquence en fonction du champ magnétique est étudiée pour chacune des pseudo-harmoniques comme présentée dans la figure III.19.

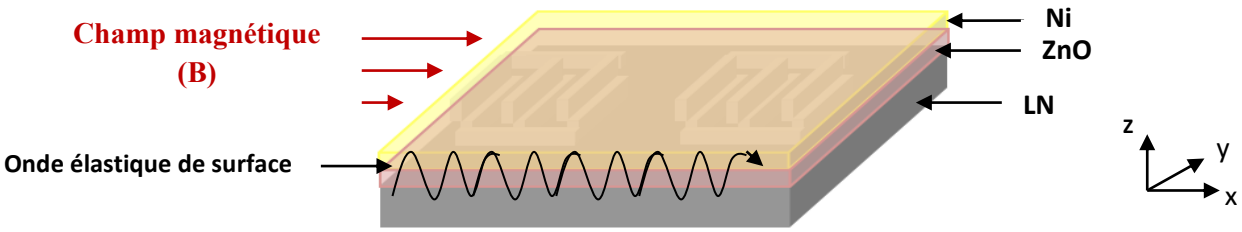


Figure III.18 : Application du champ magnétique suivant la direction de propagation de l'onde élastique

[101] M.Elhosni, O.Elmazria, S. Petit-Watelot, L.Bouvot, S.Zhgoon, A.Talbi, M.Hehn, K. Ait Aissa, S.Hage-Ali, D. Lacour, F.Sarry, O. Boumatar "Magnetic field SAW sensors based on magnetostrictive-piezoelectric layered structures: "FEM modeling and experimental validation", Sensors and Actuators 240 (2016) 41–49.

La structure multicouche montre une variation de fréquence de 69ppm à 180mT à la fréquence fondamentale de 162MHz. Cette variation est multipliée par un facteur 3 si on considère la troisième harmonique 221 ppm et par un facteur 5 (360ppm) si on considère l'harmonique 5 pour la même valeur du champ magnétique 180 mT.

Dans l'intervalle [0,0.185 Tesla], la pente de variation de fréquence est égale à 0.52 ppm/mT si on considère la fréquence fondamentale. Elle est égale à 1.68 ppm/mT et 2.25ppm/mT, si on considère la troisième et la cinquième pseudo harmoniques respectivement.

Le champ magnétique a été ensuite appliqué suivant la direction Y perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde élastique de surface. Contrairement à la variation fréquentielle suivant l'axe X, la variation de fréquence suivant l'axe Y présente une meilleure linéarité. Comme on peut le voir sur la figure III.20, pour les trois fréquences étudiées (fondamentale, H3 et H5), la variation Δf/f est moins importante que quand le champ magnétique est appliqué suivant l'axe X. Cependant, la plage de sensibilité qui pourrait être envisagée pour des applications de capteurs SAW est plus large dans la direction Y (0 à 500 mT) et dans cette plage il n'y a aucune ambiguïté en ce qui concerne la lecture de l'intensité du champ magnétique. En effet, contrairement à la réponse de la figure III.19, chaque fréquence correspond à une seule valeur du champ.

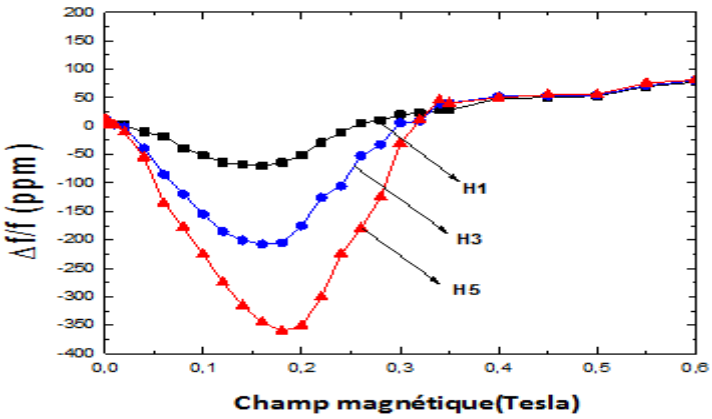


Figure III.19: Sensibilité au champ magnétique de la structure multicouche modélisée Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$ pour un champ magnétique appliqué suivant la direction de propagation de l'onde acoustique de surface (x) à la fréquence fondamentale (162MHz), pseudo-harmonique 3(460MHz), et pseudo-harmonique 5 (810MHz)[101].

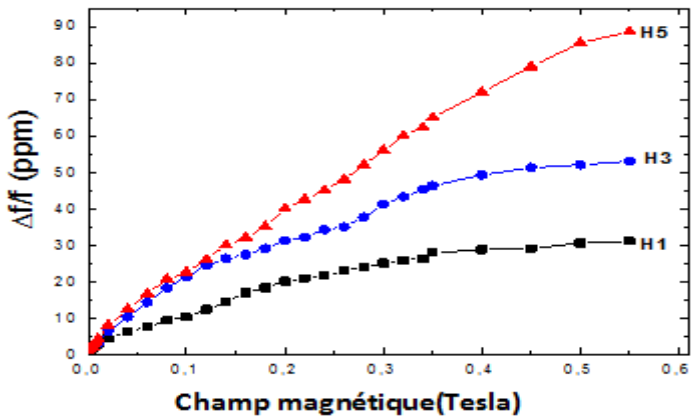


Figure III.20: Sensibilité au champ magnétique de la structure multicouche modélisée Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$ pour un champ magnétique appliqué suivant la direction Y perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde élastique de surface à la fréquence fondamentale, et au pseudo harmoniques H3 et H5.

Comme mentionné précédemment, la variation de fréquence de la structure SAW Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$ a été améliorée d'un facteur cinq lorsque la fréquence de fonctionnement augmente. Mais, comme on peut l'observer sur les figures III.21(a) et (b), la structure IDT-Ni/ Quartz étudiée par Kadota reste toujours plus sensible quelle que soit la direction du champ considérée.

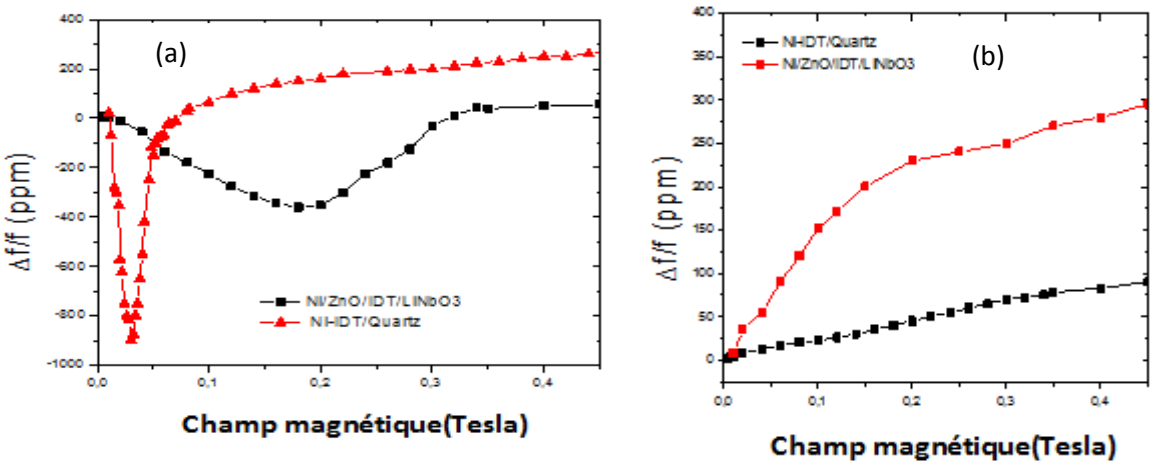


Figure III.21 : Comparaison entre les sensibilités au champ magnétique des structures Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$ et IDT-Ni/ Quartz/ à un champ magnétique appliqué dans des orientations parallèles (a) et perpendiculaires (b) à la propagation de l'onde élastique de surface.

La figure III.21 présente une comparaison entre les sensibilités au champ magnétique appliqués suivants les axes parallèles et perpendiculaires à la propagation de l'onde élastique

de surface pour notre structure Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$ et celle étudiée par Kadota *et al*[102]. Les deux structures présentent le même comportement vis-à-vis des champs magnétiques parallèles et perpendiculaires à la direction de propagation de l'onde acoustique de surface cependant la structure modélisée Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$ présente une sensibilité insuffisante aux champs magnétiques faibles.

La différence de sensibilité des deux structures peut être expliquée par la fait que dans la structure Ni(IDT)/Quartz, les électrodes sont directement déposées sur le substrat piézoélectrique. La variation de la vitesse de propagation de l'onde dans le substrat piézoélectrique est donc plus importante induisant une plus forte variation de la fréquence de fonctionnement. Des études ont attribué le comportement de la variation de la fréquence en fonction de l'intensité du champ magnétique présentée dans la figure III.21 à la contribution du module de Young ΔE et du couplage magnéto élastique dynamique[102]. En effet le module d'Young subit un changement en fonction du champ magnétique et le couplage magnéto élastique dynamique, qui correspond à l'interaction entre les ondes élastiques et les moments magnétiques du matériau magnétostrictif également. Ces effets qui introduisent des contraintes sur la couche magnétostrictive du Ni et donc sur ses propriétés élastiques, induisent une variation au niveau de la vitesse élastique de surface et par conséquent une variation de la fréquence de résonance.

III.1.5 Conclusion

Dans cette partie du chapitre 3 nous avons développé un modèle magnéto-élastique multicouche Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$ qui nous permet de prédire les résultats expérimentaux ainsi de calculer les courbes de déplacement de l'onde et les formes des modes de propagation dans cette structure SAW magnéto-élastiques.

Dans la partie suivante de ce chapitre, nous aborderons les différents aspects liés à l'élaboration et la caractérisation piézoélectrique et magnétique des dispositifs à ondes élastiques de surface combinées avec des couches minces magnéto-élastiques : on détaillera en particulier les différentes étapes de micro-fabrication ainsi que le montage permettant la caractérisation sous champ magnétique des dispositifs piézomagnétiques modélisés précédemment. Les résultats de caractérisations expérimentales seront alors confrontés aux prédictions théoriques.

[102] M. Kadota, I. Shigeo, I. Yoshihiro , H. Takuo , and O. Kenjiro "Magnetic Sensor Based on Surface Acoustic Wave Resonators" Japanese Journal of Applied Physics 50 (2011) 07HD07

Partie 2 : Protocole expérimentale utilisé pour la fabrication et la caractérisation des capteurs magnéto-élastique SAW à base des hétéro structures

III.2.1 Réalisation des dispositifs SAW multicouche Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$: procédé de fabrication

Les électrodes intérdigitées (IDTs) seront réalisées par lithographie et gravure. La figure III.22 détaille les différentes étapes du procédé de fabrication utiles pour la réalisation de ces électrodes. Dans ce travail, nous avons utilisé des électrodes de type ligne à retard avec des longueurs d'ondes de 24 µm. Le choix du matériau et de la structure cristalline permet de déterminer les différents modes de propagation de l'onde pour les ondes élastiques une fois couplées avec le champ électrique à l'intérieur d'un matériau piézoélectrique. Par ailleurs, selon la nature des matériaux, il est possible de générer différents types d'ondes dans le substrat piézoélectrique en particulier dans des structures SAW multicouches.

Il est alors possible de générer dans ce type de structure magnéto-élastique, différents types d'ondes à savoir :

- Ondes de surfaces ;
- Onde de volumes ;
- Ondes de plaques ;
- Ondes guidées.

Comme nous l'avons démontré dans la partie précédente de ce chapitre, le type de l'onde qui se propage dans les structures magnéto-élastiques que nous élaborerons est une onde élastique de surface pour la fréquence fondamentale ainsi pour ses pseudo-harmoniques. Notre étude de sensibilité au champ magnétique va se focaliser sur ces fréquences. La génération des harmoniques ou pseudo-harmoniques et leurs intensités sont dépendante du taux de métallisation (ratio entre la largeur d'un doigt des électrodes et de la demi-période d'un IDT).

Afin de valider le modèle magnéto-élastique en utilisant la structure modélisée dans la partie précédente, nous avons donc réalisé une ligne à retard en utilisant un substrat de Niobate de Lithium de coupe cristalline Y-128. L'orientation des IDT permet la propagation de l'onde selon l'axe X. Une couche d'isolant (ZnO) sera alors déposée sur les IDT et le substrat de LN avant de rajouter la couche sensible de Ni. Comme précisé précédemment, la couche d'isolant

empêchera de court-circuiter les IDT par le film de nickel. D'autres couches seront étudiées par la suite pour améliorer la sensibilité du capteur.

III.2.2 Procédé de fabrication des IDTs - lithographie UV et gravure

Pour la réalisation de notre premier capteur magnétique SAW, ce capteur qui possède la particularité d'intégrer deux physiques (piézoélectricité et magnétisme), et deux types de matériaux (piézoélectriques et magnétostrictifs) nous avons suivi un protocole expérimental de fabrication que nous développerons en détails dans cette partie du chapitre.
Ce protocole de fabrication s'appliquera à tous les capteurs magnétiques que nous avons réalisés et que nous étudierons dans le présent chapitre ainsi que dans le prochain chapitre de ce manuscrit.

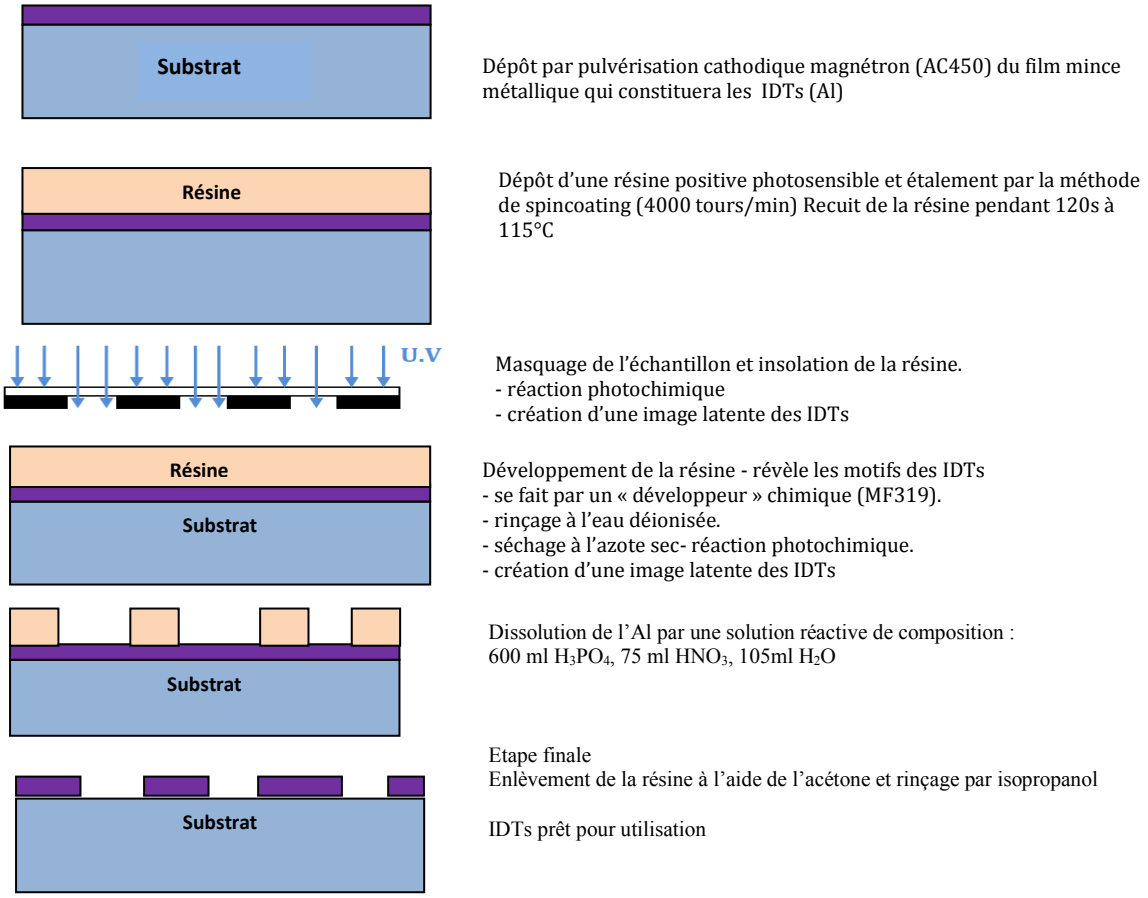


Figure III.22: illustration de différentes étapes de réalisation d'une ligne à retard SAW

Pour la réalisation des lignes à retard nous avons suivi un procédé de lithographie UV pour la fabrication des électrodes sur le substrat piézoélectrique. Le principe de fabrication des électrodes est décrit dans la figure III. 22.

Une ligne à retard obtenue suite au procédé de lithographie optique et gravure est montrée en figure III.23.

Figure III.23: Illustration d'une ligne à retard en transmission ayant une longueur d'onde de 24µm.

III.2.3. Technique de Dépôt de ZnO

III.2.3.1 Principe général de formation de couches minces.

Il existe différentes techniques de dépôt qui assurent la réalisation de couches de ZnO, les techniques les plus connues sont : la pulvérisation cathodique[103] [104], le dépôt chimique en phase vapeur (ou CVD pour *chemical vapor deposition*)[105] , l'évaporation [106] [107], l'épitaxie par jets moléculaires (MBE pour Molecular Beam Epitaxy)[108] ou encore l'ablation laser[109]

Cette liste n'est pas exhaustive car il existe d'autres techniques de dépôt plus ou moins répandues qui sont également utilisées. La méthode doit être choisie en fonction de l'application ou de l'objectif visés. Dans notre cas, nous avons opté pour la pulvérisation cathodique magnétron et cela pour différentes raisons :

- Cette technique permet d'obtenir des couches homogènes, denses et présentant de bonnes qualités cristallines.

[103] M.B. Assouar, M. El Hakiki, O. Elmazria, P. Alnot et C. Tiusan, Diamond and Related Materials, vol. 13, p. 1111, 2004.
[104] J. B. Webb, D. F. Williams et M. Buchanan, Appl. Phys. Lett., vol. 39, p. 670, 1981.
[105] P. Kung, A. Saxler, X. Zhang, et al., Appl. Phys. Lett. , vol. 66, p. 2958, 1995.
[106] Ma. Jina, Ji Feng, Zhang De-heng, Ma Hong-lei et Li Shu-ying, Thin Solid Films, vol. 357, p. 98, 1999.
[107] G.A. Nyberg et R.A. Buhrman, J. Vac. Sci. Technol., vol. A2, p. 301, 1984.
[108] J. Ohta, H. Fujioka, M. Sumiya, H. Koinuma et M. Oshima, J. Cryst. Growth, vol. 225, p. 73, 2001.
[109] H. Zeng, W. Cai, Yue Li, J. Hu et P. Liu, J. Phys. Chem., vol. 109, p. 18260, 2005.

- La vitesse de dépôt est raisonnable,
- Les autres films constituant notre capteur, métallique pour les IDTs et magnétiques pour la couche sensible, sont également déposés par pulvérisation magnétron.
- Le procédé de dépôt de ZnO est déjà optimisé dans notre laboratoire.

Il est à noter que la technique de dépôt de couches mince par pulvérisation cathodique magnétron est largement répandue dans les laboratoires de recherches mais aussi dans l'industrie grâce à sa facilité d'utilisation et de mise en œuvre et aussi de la possibilité de réaliser des dépôts très denses avec des épaisseurs relativement uniformes.

III.2.3.2 Définition du principe général

Nous allons décrire dans ce paragraphe la méthode de dépôt par pulvérisation cathodique que nous avons utilisée pour réaliser nos couches minces de ZnO à savoir : la pulvérisation cathodique réactive magnétron (Figure III.24). Son principe repose sur le bombardement d'ions du matériau à déposer (cible) par l'intermédiaire d'un plasma froid dont la création se fait par l'application d'une différence de potentiel entre une cathode (cible) et une anode (les parois du réacteur, le substrat…) dans un gaz réactif (O_2, N_2…), à faible pression de valeur (10^{-4} mbar). Ensuite, sous l'effet d'un champ électrique E, les électrons se déplacent tout en ionisant certains atomes de leur environnement. Les ions qui sont créés dans la décharge sont accélérés dans la gaine cathodique et acquièrent ainsi une énergie qu'ils libèrent lors de leur impact à la surface de la cible.

Il est à noter aussi que les dépôts que nous réalisons se font par la considération de plusieurs paramètres fondamentaux qui caractérisent la technique utilisée tels que les paramètres physiques suivants (pression, température, puissance …). Ces paramètres dépendent de la nature du substrat, de sa position, de son orientation ainsi que nécessairement du matériau à déposer. Donc par conséquent, chaque paramètre influe nécessairement sur les caractéristiques et les propriétés des couches. Par ailleurs et afin de maîtriser et réussir le dépôt et parvenir à l'obtention de couches de bonne qualité, il est nécessaire de comprendre les processus fondamentaux intervenants lors de la croissance des couches minces.

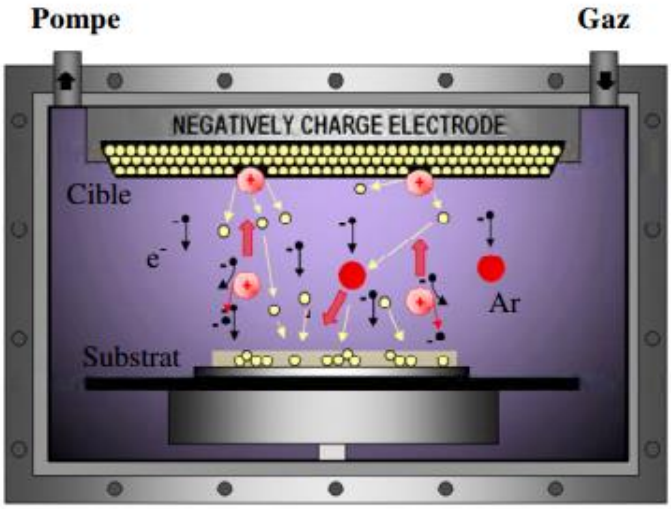


Figure III.24: Illustration du principe général de la pulvérisation cathodique par magnétron[110]

III.2.3.3 Bâtis de dépôts de couches minces utilisés pour la réalisation des capteurs magnétiques SAW

Pratiquement, pour les dépôts de ZnO, nous avons utilisé un bâti de pulvérisation cathodique réactive magnétron de type industriel de chez Alliance Concept (DP650 : appellation industrielle) à pilotage automatique (AC 3000), disponible dans les locaux de l'équipe 405 de l'IJL présenté dans la figure III.25.

Ce bâtit est constitué d'un sas à commande manuelle pour le chargement et le déchargement du porte-substrat et aussi d'une chambre de réaction (Figure III.25).

Figure III.25 : Bâti de pulvérisation de l'équipe 405 utilisé pour le dépôt de ZnO

[110] A.Chapelle « Elaboration et caractérisation de films minces nanocomposites obtenus par pulvérisation cathodique radiofréquence en vue de leur application dans le domaine des capteurs de CO2 » Thèse de doctorat de l'université de Toulouse, soutenue le 26 Mars 2012.

Il est à noter que le réacteur utilisé par l'équipe 405 de l'Institut Jean Lamour présente l'avantage, en le comparant à une machine industrielle, d'avoir une flexibilité considérable nous permettant de modifier le dispositif expérimental en fonction de nos besoins.

III.2.4 Dépôt de couches magnétique

La technique de dépôt utilisée pour le dépôt des couches magnétiques et notamment le nickel est également la pulvérisation cathodique. Ces dépôts ont été réalisés par des membres de l'équipe nano magnétisme et électronique de spin de l'Institut Jean Lamour et notamment du Professeur Michel HEHN. Cette équipe bénéficie d'une expertise mondiale dans le domaine du magnétisme.

On décrira dans les paragraphes suivants le principe de dépôt des couches magnétiques et les équipements utilisés pour ces dépôts.

III.2.4.1 Le banc de pulvérisation du laboratoire IJL

Le banc de pulvérisation ultravide du laboratoire de l'équipe nano-magnétisme et électronique de spin est un banc Alliance Concept DP 850 disposant de 8 cibles 2 pouces et qui se compose d'une enceinte principale et d'un sas d'introduction (Figure III.26). La pression à l'intérieur de l'enceinte est inférieure à 10^{-9} mbar.

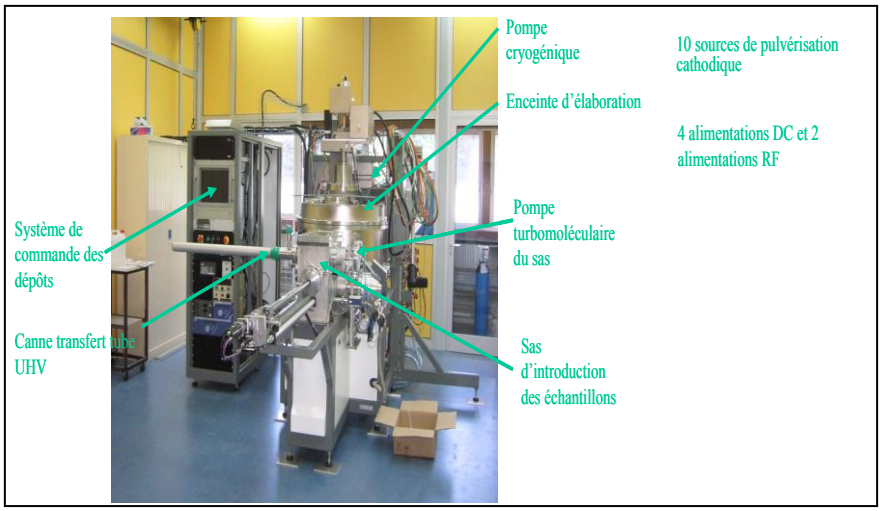


Figure III.26 : Banc de pulvérisation ultravide IJL – Nancy (équipe de nano-magnétisme et électronique de spin)

Les substrats sont introduits dans l'enceinte par le sas d'introduction, dans lequel un vide est réalisé au moment de l'introduction de l'échantillon dans la chambre de dépôt. Cela permet la diminution du temps de pompage de l'enceinte et évitent sa contamination.

Pendant le temps de dépôt, la température du porte substrat est maintenue à la température ambiante par un dispositif de refroidissement.

La gestion du bâti est assurée à travers une interface de haut niveau permettant de réaliser aisément des programmes pour enchaîner toutes les étapes de réalisation d'un échantillon décrites ci-dessous :

- Chargement du substrat ;
- Décapage du substrat à l'aide d'un plasma Ar ;
- Allumage, décapage des différentes cibles avant le dépôt ;
- Dépôt de la, ou des, couche(s) voulue(s) sur le substrat ;
- Arrêt des plasmas ;
- Déchargement de l'échantillon ;
- Echange de l'échantillon ;
- Chargement de l'échantillon

Le passage d'une étape à la suivante est indiqué automatiquement sur une interface utilisateur intégrée à la machine de dépôt. Dans la figure III.27, on présente un exemple de capture d'écran de l'interface utilisateur de la machine durant le dépôt de couches magnétiques.

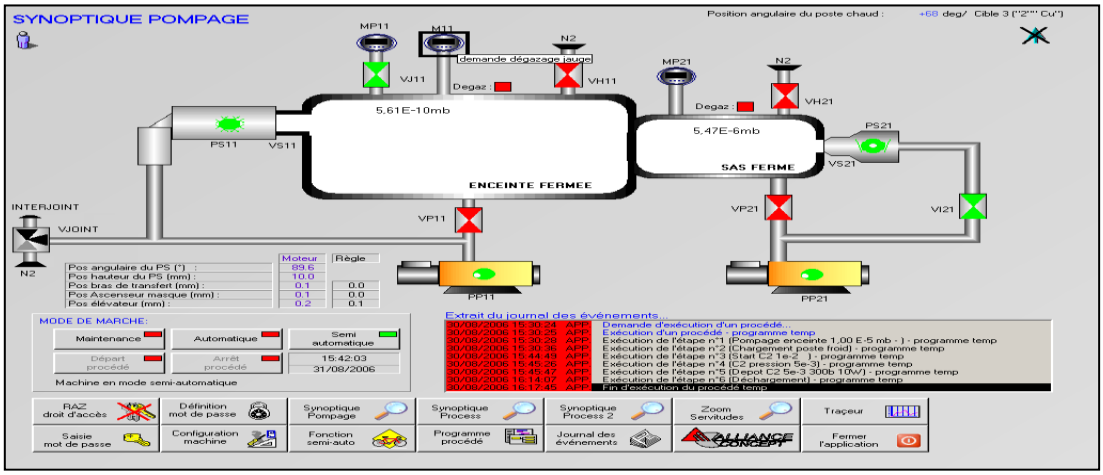


Figure III.27 : Interface utilisateur du bâti de pulvérisation cathodique

III.2.5 Caractérisation du capteur magnétique à base d'une hétéro structure Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$: caractérisations magnétiques et électriques des dispositifs magnéto élastiques SAW

Dans cette partie de ce chapitre, nous élaborons les différentes techniques de micro-fabrication et de caractérisation électriques et magnétiques que nous avons utilisées pour déterminer les caractéristiques des différents capteurs magnétiques réalisés. Nous présenterons les caractérisations des dispositifs qui ont servi pour la validation du modèle théorique développé dans la première partie de ce chapitre et plus particulièrement celui de la structure magnéto-élastique multicouche Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$

III.2.5.1 Caractérisation Electrique

Les dépôts de la couche isolante de ZnO et de la couche magnétique de Ni ont été effectués sur toute la ligne a retard SAW y compris les plots (masqués par la résine). Afin de pouvoir re-caractériser la structure et regarder l'effet de dépôt des deux couches (isolante + magnétique) il a été nécessaire de suivre le protocole expérimental décrit dans la figure III.28.

Afin de caractériser électriquement les dispositifs magnéto élastiques SAW multicouches réalisés à savoir : Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$ comme premier capteur magnétique, nous avons utilisé les bancs de mesure existant dans notre laboratoire à la fois pour la caractérisation fréquentielle sous pointe ou pour la caractérisation sous champs magnétique. Nous décrirons brièvement ces bans de caractérisation dans ce qui suit

- Masquage des plots par la résine

- Dépôt de ZnO par pulvérisation cathodique

- Dépôt de Ni par pulvérisation cathodique

- Enlèvement de la résine protégeant les plots

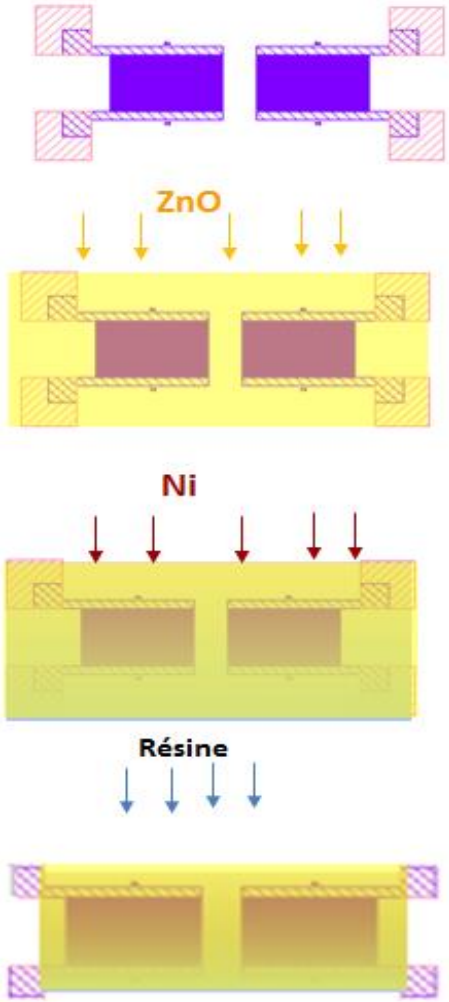


Figure III.28 : Protocole expérimentale suivi avant la caractérisation sous pointe

III.2.5.2 Caractérisation sous pointes

Nous testons les réponses fréquentielles du dispositif à l'aide d'un banc de mesure sous pointes relié à un analyseur de réseau de type Agilent N5230A (Figure III.29). Cette technique nous permet de tester directement les micro-dispositifs après leur micro-fabrication en salle blanche avant de passer aux étapes ultérieures de connexions par micro-câblage (wire-bonding). Il est également possible de caractériser l'échantillon avant et après l'ajout des couches mince ce qui permet d'apprécier leur apport. Notre système de caractérisation présente également l'avantage d'être équipé d'un chuck chauffant contrôlé grâce à un élément Peltier. La plage de température va de 20 à 100°C. Il est alors possible de caractériser le dispositif SAW en température permettant ainsi de déterminer sa valeur de TCF (Temperature Coefficient of Frequency) si l'effet de température est étudié en plus de l'effet de variation du champ magnétique. Dans notre cas, les dispositifs magnétiques SAW constituants une nouveauté dans l'équipe micro et nano systèmes, ont été caractérisés sous

pointe électriquement sans étudier l'effet de la température. Uniquement l'effet du champ magnétique sur les dispositifs magnétiques SAW a été considéré.

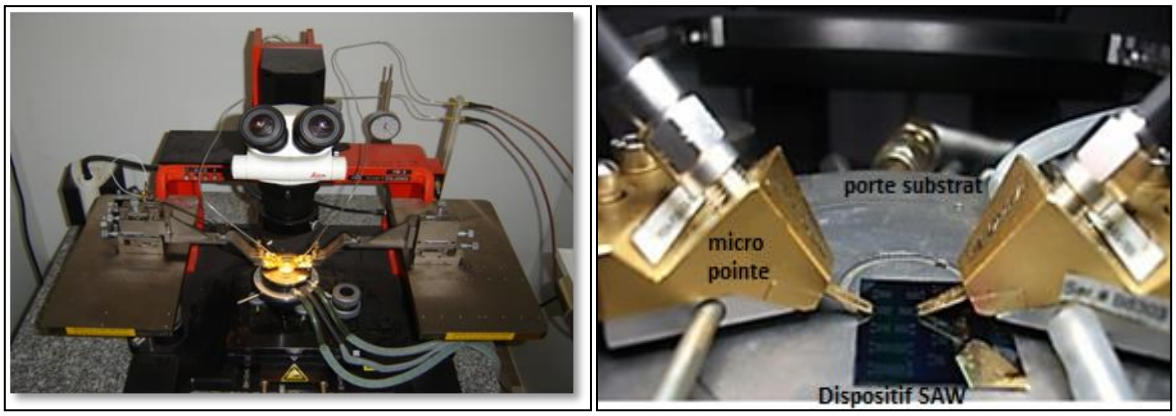


Figure III.29: Vue du banc de mesure utilisé pour la caractérisation sous pointes du dispositif SAW

III.2.5.3 Etape de wire bonding

Après l'étape de caractérisation électrique et afin de s'assurer du bon fonctionnement des dispositifs SAW, on identifie les dispositifs présentant les meilleures propriétés électriques (pertes d'insertions) et qui seront câblés après l'étape de découpe qui se fait en utilisant une scie à disque diamant. Les dispositifs opérationnels sont alors montés sur un PCB adapté et équipé de connecteurs SMA. Une vue schématique d'un capteur SAW packagé est représentée dans la figure III.30. Une fois packagé, nous procédons à une nouvelle caractérisation pour apprécier les dégradations apportées par l'étape de mise sous boitier.

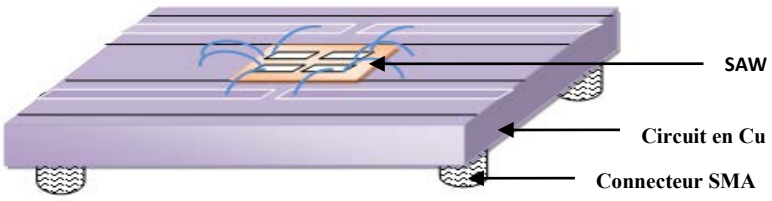


Figure III.30 : Connexions nécessaires pour l'intégration du dispositif SAW avant caractérisation sous champ magnétique

III.2.5.4 Caractérisation sous champ magnétique

La caractérisation sous champ magnétique s'effectue dans les locaux de l'équipe de nano magnétisme et électronique de spin de l'Institut Jean Lamour. Le banc de caractérisation est représenté sur la figure III.31. Il s'agit d'un système de caractérisation sous pointes et sous

champ. Actuellement, le système est équipé uniquement de 2 pointes DC et d'une pointe RF. Il nous n'est donc pas possible de caractériser nos échantillons (quadripôles) directement sous pointes et sous champs. D'où la nécessité de l'étape de mise sous boitier. Notons que le laboratoire vient de s'équiper d'un second bras qui permet d'avoir une seconde pointe RF, malheureusement elle n'était pas opérationnelle durant la période où nous avons réalisé nos expérimentations.

Figure III.31: Bâti de caractérisation sous champ magnétique

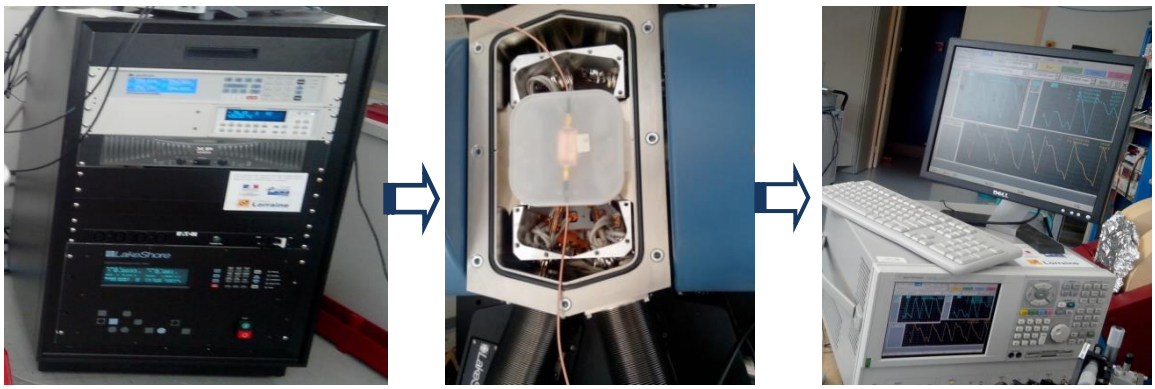


Figure III.32**:** Etapes de caractérisation des dispositifs SAW sous champ magnétique

Le dispositif magnéto-élastique SAW est placé dans la chambre à champ magnétique suivant l'orientation du champ magnétique désirée (parallèle ou perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde élastique de surface). Le dispositif SAW est ensuite soumis à différentes intensités du champ magnétique généré par le générateur du champ. Le champ magnétique peut varier entre -0.6 Tesla et 0.6 Tesla.

Partie 3 : Etude expérimentale de la structure Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$

En suivant le protocole expérimental détaillé dans la partie précédente, nous avons réalisé et caractérisé la structure périodique infinie multicouche étudiée théoriquement Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$. Dans cette partie de ce chapitre nous détaillerons les résultats obtenus expérimentalement en les comparants aux résultats théoriques détaillés dans la première partie de ce chapitre.

III.3.1 Résultats et discussion

III.3.1.1 Caractérisation fréquentielle à champ magnétique nul

Nous avons réalisé la caractérisation électrique du capteur magnétique à base d'une structure multicouche Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$ à l'aide de l'analyseur de réseau Agilent N5230A. Dans un premier temps nous avons effectué des caractérisations sous pointes de la structure dans ses différentes étapes de fabrication, à savoir :

- La caractérisation de la structure IDT/$LiNbO_3$
- La caractérisation de la structure Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$

La figure III.33 représente la réponse fréquentielle du dispositif avec et sans les couches minces de Ni et ZnO. On observe que les pertes d'insertion augmentent de 5 dB si on considère le pic de la fréquence fondamentale. Néanmoins, ces pertes supplémentaires n'affectent que légèrement le fonctionnement du capteur.

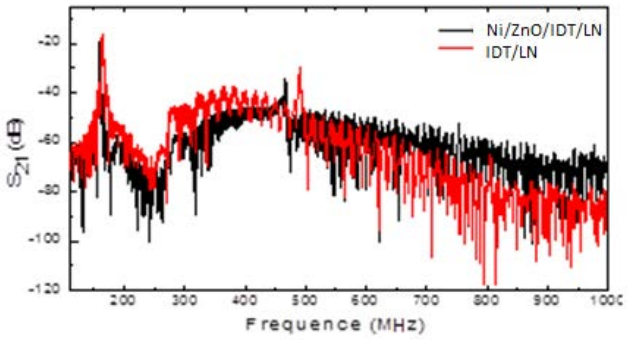


Figure III.33 : Réponse fréquentielle des deux structures IDT/$LiNbO_3$ et Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$[101]

Ce résultat est important dans la mesure où il nous permet de valider le bon fonctionnement de la structure multicouche magnéto-élastique, et aussi de valider les résultats théoriques obtenus.

Par la suite, nous avons développé le packaging présenté dans la figure III.34 afin de permettre la caractérisation sous champ magnétique.

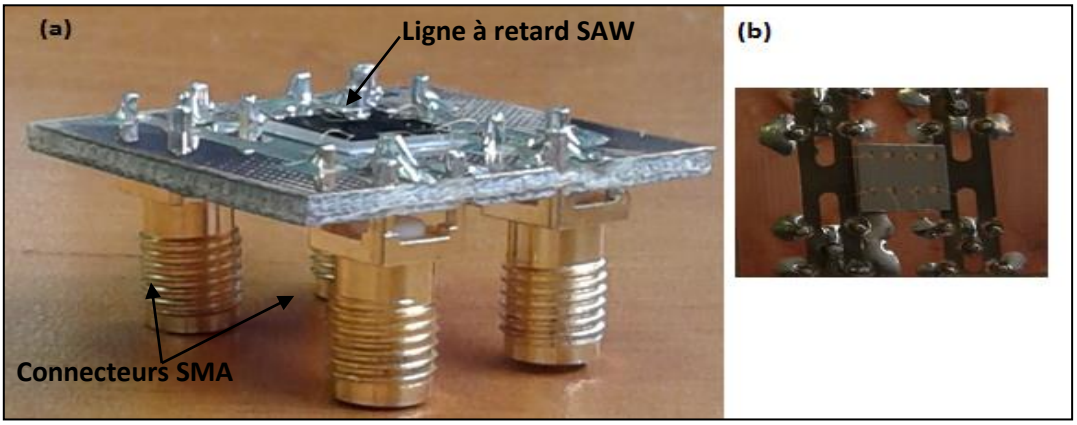


Figure III.34 : Capteur magnéto élastique à base de la structure multicouche $LiNbO_3$/IDT/ZnO/Ni Packagé[101]

Avant de caractériser le capteur packagé sous champ magnétique, nous l'avons caractérisé électriquement afin de s'assurer toujours du bon fonctionnement du dispositif. La figure III.35 permet de comparer les réponses fréquentielles du dispositif mesurées avant et après l'étape de packaging.

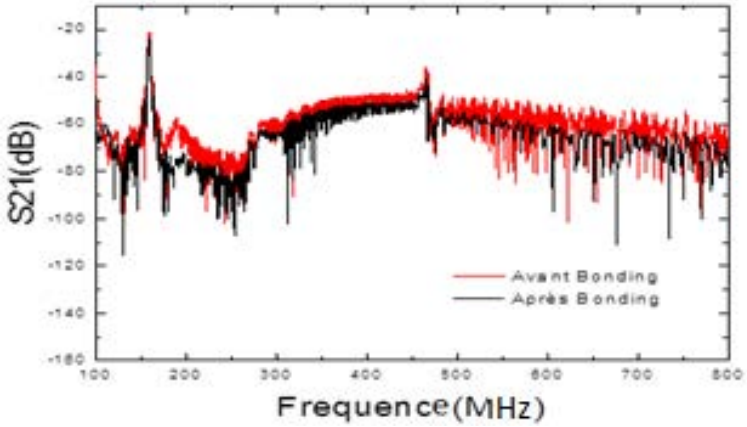


Figure III.35 : Réponse fréquentielle de la structure Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$ mesurée avant et après l'étape de packaging.

Après l'étape de packaging, les pertes d'insertion augmentent de 2 dB supplémentaires si on considère toujours le pic correspondant à la fréquence fondamentale à 159 MHz. La pseudo-harmonique 3 a été également peu affectée et sera également caractérisée sous champs magnétique. Cependant, la pseudo-harmonique 5 qui était à l'origine très faible est maintenant

noyée dans le bruit et ne pourra donc pas être caractérisée sous champ. La figure III.36 permet de mieux apprécier l'évolution des différents pics en ce qui concerne leurs fréquences et amplitudes.

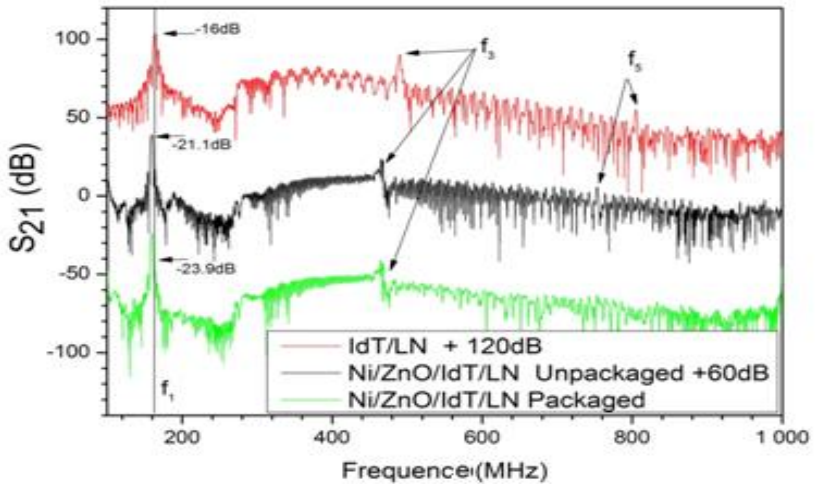


Figure III.36: Réponse fréquentielle de la structure IDT/$LiNbO_3$, de la structure Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$ avant packaging et après packaging. Pour une bonne lisibilité, la première courbe a été translatée de +120 dB et la seconde de +60dB[101].

Ce résultat obtenu nous permet de s'assurer du bon fonctionnement du capteur électriquement et ainsi passer à l'étape suivante de caractérisation sous champ magnétique afin de pouvoir déterminer les propriétés magnétiques du capteur réalisé. L'étude de la sensibilité au champ magnétique du capteur réalisé sera alors autours des deux fréquences clairement identifiables 159 MHz et 460 MHz.

III.3.1.2 Mesure de couche magnétique (courbe d'aimantation)

Avant d'étudier les sensibilités du capteur à base de structure multicouche, sous champ magnétique, nous avons déterminé les propriétés magnétiques de la couche Ni déposée respectivement sur le silicium et sur le dispositif SAW ($LiNbO_3$/IDT/ZnO).

L'utilisation du magnétomètre à échantillon vibrant (VSM : Vibrating sample magnetometer) permet de déterminer en fonction du champ appliqué et de la température, les propriétés magnétiques de couches minces et de matériaux magnétiques. Les résultats des caractérisations faites à température ambiante sont représentés dans la figure III.37

On peut remarquer que le type du substrat utilisé influe peu sur les résultats de caractérisation. Le cycle d'hystérésis présente le même comportement suivant les deux axes X et Y ce qui confirme que le matériau magnétique est isotrope.

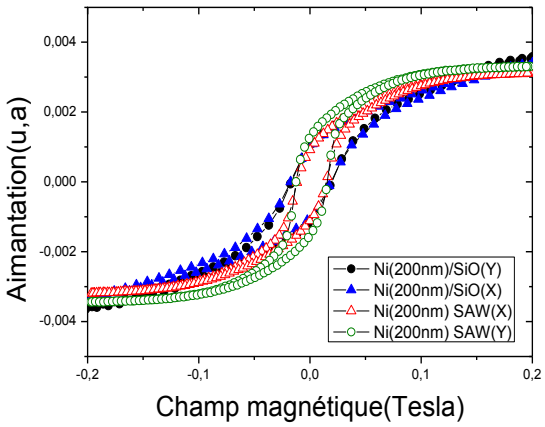


Figure III.37 : Courbes d'aimantation suivant l'axe parallèle et perpendiculaire à l'axe de propagation de l'onde élastique de définit pour la structure SAW (LiNbO3/IDT/ZnO). A titre de comparaison, les courbes d'aimantation obtenues pour la même couche de nickel déposé sur un substrat de silicium.

III.3.1.3 Caractérisation fréquentielle sous champs magnétique

Champ magnétique appliqué dans la direction de propagation de l'onde élastique de surface

Nous présentons les résultats de caractérisation sous champ magnétique quand il est appliqué dans le même sens de propagation de l'onde élastique de surface (Figure III.38).

Figure III.38 : Orientation du champ magnétique par rapport à la structure magnéto élastique Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$

Les résultats de mesures sont représentés sur la figure III.39 et comparés aux résultats théoriques. Comme précisé précédemment, les caractérisations expérimentales ne concernent que la fréquence fondamentale à 159 MHz et la pseudo-harmonique 3 autour de 460 MHz.

On constate une concordance entre les résultats théoriques et expérimentaux ce qui nous permet de valider le modèle théorique pour le calcul de la sensibilité d'un dispositif magnéto-élastique SAW multicouche.

La sensibilité au champ magnétique augmente par l'augmentation de la fréquence de la structure Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$. Cette variation, qui est proportionnelle à la fréquence peut

s'expliquer par le confinement de l'onde à la surface de la structure et par conséquent dans la couche magnétique sensible. En effet quand nous considérons la pseudo-harmonique 3, la longueur d'onde est 3 fois plus petite.

Quand le champ magnétique est appliqué parallèlement à la direction de propagation de l'onde élastique de surface SAW, notre premier capteur packagé réalisé à base de structure multicouche Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$ atteint une sensibilité de 65 ppm à 160mT pour une fréquence fondamentale 159MHz et 210ppm à 160mT ppm pour la même fréquence à la troisième harmonique 460MHz (Figure III.39)[101].

La pente de variation expérimentale dans la zone [0-160mT] est de l'ordre de 0.43ppm/mT autour de la fréquence de 159MHz, et de 1.49ppm/mT autour de 460MHz. Notons que si on considère la variation de fréquence Δf et non pas et non pas la variation relative Δf/f, l'augmentation de la fréquence d'un facteur 3 se traduit par l'augmentation de Δf d'un facteur 9,7. Les capteurs magnétiques SAW étudiés par Kadota et al[111] à base de résonateurs SAW Quartz/IDT(Ni) présentent quant à eux une sensibilité maximale au champ magnétique de 50ppm/mT à une fréquence de 910 MHz quand le champ magnétique est appliqué parallèlement à l'onde élastique de surface SAW. Une explication réside dans le fait que quand le nickel (matériau magnétostrictif) est directement déposé sur le substrat piézoélectrique la déformation générée par le champ magnétique et aussi directement transmise au substrat.

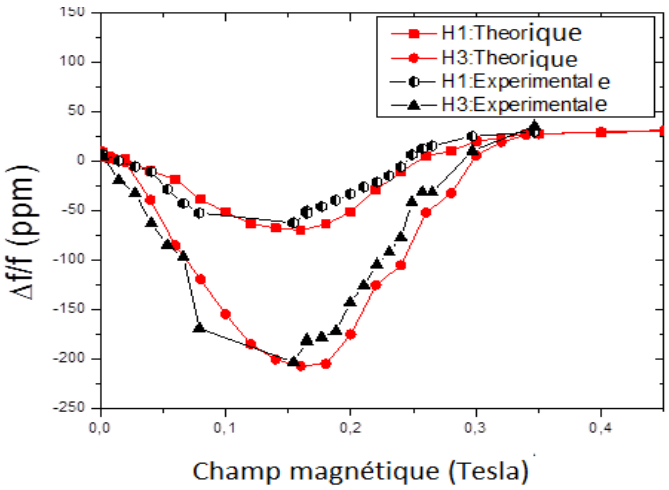


Figure III.39 : Sensibilité de la structure Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$ au champ magnétique appliqué dans la direction parallèle à la propagation de l'onde élastique de surface pour la fréquence fondamentale et la pseudo-harmonique 3[101]

[111] M. Kadota and I. Shigeo "sensitivity of surface acoustic wave magnetic sensors composed of various Ni electrode structures" Japanese journal of applied physics 51 07GC21 (2012).

Champ magnétique appliqué dans la direction perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde acoustique de surface

L'orientation du dispositif par rapport à la direction des lignes de champ magnétique est modifiée de façon à ce que le champ magnétique soit appliqué perpendiculairement à la direction de propagation de l'onde élastique de surface comme montré schématiquement sur la figure III.40.

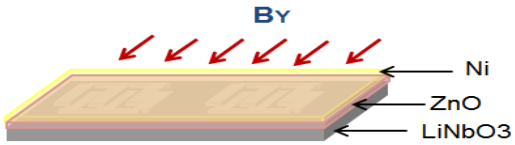


Figure III.40: Orientation du champ magnétique par rapport à la structure magnéto-élastique Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$

Les résultats de mesures obtenus sont représentés dans la figure III.41 et comparés aux résultats théoriques obtenus précédemment. On constate une cohérence entre les résultats expérimentaux et les résultats calculés.

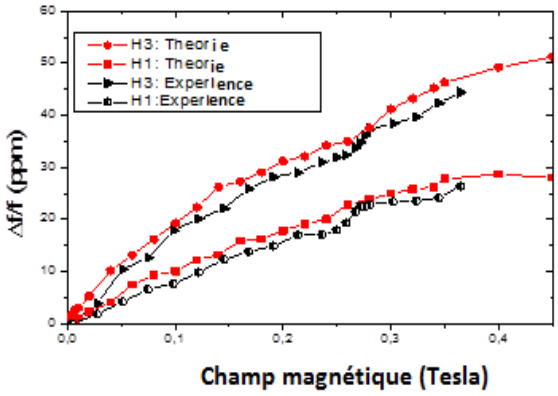


Figure III.41 : Sensibilité de la structure Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$ au champ magnétique appliqué dans la direction perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde élastique de surface pour la fréquence fondamentale et la pseudo-harmonique3[101]

Comme nous pouvons le voir dans la figure III.41, la variation de Δf quand le champ magnétique est appliqué suivant la direction Y est moins importante que celle de la direction de X. Cependant, la plage de sensibilité qui pourrait être envisagée pour des applications de capteurs est plus large dans la direction Y (0 à 500 mT) [101].

III.3.2 Conclusion

Le but de ce chapitre est de valider les résultats théoriques par une étude piézoélectrique et magnétique du capteur magnétique SAW à base d'une multicouche Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$ originale

Dans la seconde partie, nous avons détaillé les différentes techniques expérimentales de microfabrication que nous avons abordées ainsi que les méthodes de dépôts de couches piézo-électriques ZnO et magnétique Ni en collaboration avec l'équipe de nano magnétisme et électronique de spin de l'IJL.

Nous avons aussi détaillé les résultats de mesures électriques et magnétiques que nous avons abordées depuis la caractérisation électrique d'une série d'échantillons de lignes à retard SAW $LiNbO_3$/Ni/ZnO/Ni jusqu'à la réalisation d'un dispositif magnéto élastique SAW fonctionnel et sensible à un champ magnétique.

Les résultats obtenus ont été comparés à ceux calculés théoriquement. Les résultats obtenus sont en concordance avec les résultats calculés. On atteint expérimentalement une sensibilité de 1.49 ppm/mT pour une fréquence de 460MHz, quand le champ magnétique est appliqué parallèlement à la direction de propagation de l'onde élastique de surface et on améliore la linéarité de $\Delta f/f$ quand le champ magnétique est perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde acoustique de surface avec une sensibilité de 0.13ppm/mT toujours à 460 MHz.

Les résultats obtenus sont intéressants dans la mesure où on a réussi à concevoir et réaliser un premier capteur magnétique SAW dont les résultats calculés sont conformes à ceux mesurés. Cependant, la sensibilité au champ magnétique est limitée.

Le but de cette thèse est de concevoir un capteur magnéto-élastique ultrasensible au champ magnétique.

Dans le prochain chapitre nous allons étudier les différents paramètres qui permettent d'optimiser la sensibilité du capteur à base de structure multicouche au champ magnétique. Les différents degrés de liberté à étudier seront étudiés en fonction de différents paramètres qui peuvent constituer le capteur magnétique SAW ultrasensible.

Chapitre IV : Etude des paramètres influant sur la sensibilité du capteur de champ magnétique à structure SAW piézo-magnétique

Introduction

Dans le chapitre précédent nous avons décrit l'étude théorique et expérimentale d'un capteur de champ magnétique à base d'une structure multicouche piézo-magnétique SAW (Ni/ZnO/IDT/ $LiNbO_3$). Nous avons montré que ce capteur est sensible au champ magnétique appliqué dans les deux directions parallèle et perpendiculaire à la direction à la propagation de l'onde élastique de surface. Cette étude a montré également le potentiel de cette structure à être utilisée soit comme capteur magnétique ou comme filtre ou résonateur SAW accordable. Cependant, la sensibilité de cette structure au champ magnétique reste limitée : 1.49 ppm/mT obtenue expérimentalement pour une fréquence de 460MHz ou 2,25ppm/mT obtenue théoriquement pour la pseudo-harmonique 5 à 810 MHz. Comme décrit dans l'objectif de la thèse, le but ultime est de réaliser des capteurs magnétiques SAW à base de structures multicouches ultrasensibles aux champs magnétiques.

Dans ce chapitre nous étudierons les différents paramètres permettant d'améliorer la sensibilité d'un tel capteur et préciserons leurs effets sur les performances et sensibilité du dispositif.

L'avantage de l'utilisation de la structure SAW multicouche proposée précédemment réside dans la possibilité d'optimiser plusieurs paramètres de la structure de manière séparée ou combinée, offrant ainsi plusieurs degrés de liberté pour améliorer la sensibilité du capteur tout en conservant un niveau de performance (facteur de qualité, coefficient de couplage électromécanique, …) de ces autres paramètres corrects.

Ainsi, la sensibilité du capteur à l'intensité du champ magnétique peut être améliorée par :

- L'utilisation d'une couche magnétique plus sensible au champ magnétique telle que des couches minces composites de CoFeB ou encore des matériaux à base de terres rares.
- La réalisation d'un capteur fonctionnant à une fréquence plus élevées soit en étudiant les harmoniques supérieures ou en réduisant la période spatiale des IDTs du dispositif

SAW ou les deux. Cette augmentation de fréquence conduit à l'augmentation de la sensibilité par deux mécanismes. Le premier consiste en une augmentation de Δf proportionnelle à f si $\Delta f/f$ est constant. Il est à noter que l'augmentation de f va également s'accompagner d'une augmentation du bruit ce qui limitera les limites de détection du capteur. Les second est dû à un meilleur confinement de l'onde élastique (longueur d'onde plus faible) près de la surface donc à l'intérieur de la couche sensible.

- Utilisation de couches isolantes avec des propriétés élastiques (dureté, vitesse élastique de l'onde) permettant un meilleur confinement de l'onde élastique en surface.

Dans ce chapitre, nous envisagerons toutes ces approches. Par ailleurs, dans une première approche, nous étudierons l'effet de la couche isolante sur la sensibilité du capteur. Nous avons fixé notre choix sur l'alumine (Al_2O_3) présentant une densité plus faible et une vitesse acoustique qui est supérieure à celle de ZnO.

Dans un second temps nous nous intéresserons à l'effet de la fréquence de fonctionnement du dispositif SAW sur la sensibilité du capteur. Un dispositif à base de la structure Ni/ZnO/IDT/ $LiNbO_3$ mais avec une période spatiale de l'IDT égale à 4,8 µm au lieu 24 µm sera considéré.

Dans une troisième approche nous étudions théoriquement et expérimentalement la sensibilité d'un dispositif SAW magnéto élastique en substituant la couche magnétique de Ni par le CoFeB.

Partie 1 : Effet de la couche isolante sur la sensibilité du capteur

IV.1.1 Introduction

Les dispositifs piézomagnétiques SAW étudiés dans ce chapitre sont des hétéro structures multicouches dont la configuration géométrique est formée par :

- Un substrat piézoélectrique.
- Des électrodes interdigitées dont la longueur d'onde fixée est égale à 24µm.
- Un film isolant permettant d'éviter les court-circuits entre le film magnéto élastique et les électrodes métalliques.
- Un film magnétoélastique.

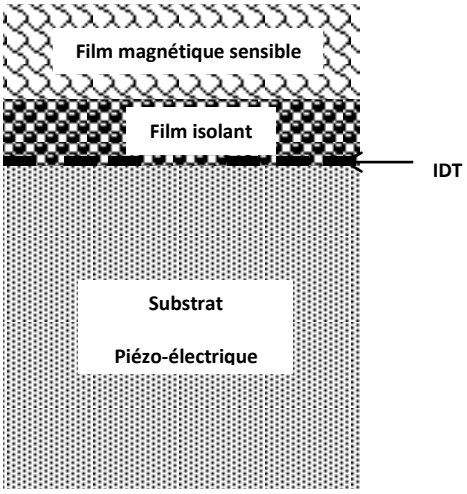


Figure IV.1 : Configuration géométrique des structures multicouches étudiées et réalisés dans le cadre de ce chapitre.

IV.1.2 Effet de la couche d'alumine sur la fréquence de résonance du capteur

Afin de se mettre directement dans des conditions optimales, nous avons choisi d'étudier la pseudo-harmonique 5 et de comparer la sensibilité du capteur à cette fréquence avec celle obtenue pour la structure Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$ quand la même harmonique est considérée. Comme on peut le voir dans la figure IV.2, l'utilisation de la couche d'alumine permet d'augmenter légèrement la fréquence de résonance du résonateur. Cela s'explique par la vitesse élevée de l'alumine comparé à celle du ZnO. En l'absence de champ magnétique, la

fréquence de résonance du capteur passe donc de 813.3 MHz pour la structure Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$ à 817.2 MHz pour la structure Ni/Al_2O_3/IDT/$LiNbO_3$.

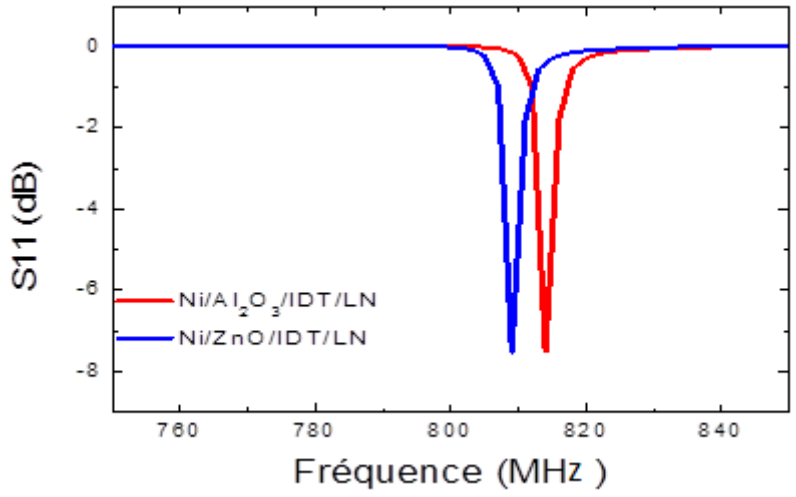


Figure IV.2: Réponse fréquentielle des structures Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$ et Ni/Al_2O_3/IDT/$LiNbO_3$

IV.1.3 Effet de la couche isolante d'alumine sur la propagation de l'onde élastique

Dans le modèle réalisé précédemment, la couche de ZnO est remplacée par une couche d'alumine ayant la même épaisseur de 250nm. Dans la figure IV.3 on représente une comparaison entre l'amplitude de déplacement de l'onde de surface se propageant dans les deux structures multicouches Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$ et Ni/Al_2O_3/IDT/LiNbO3.

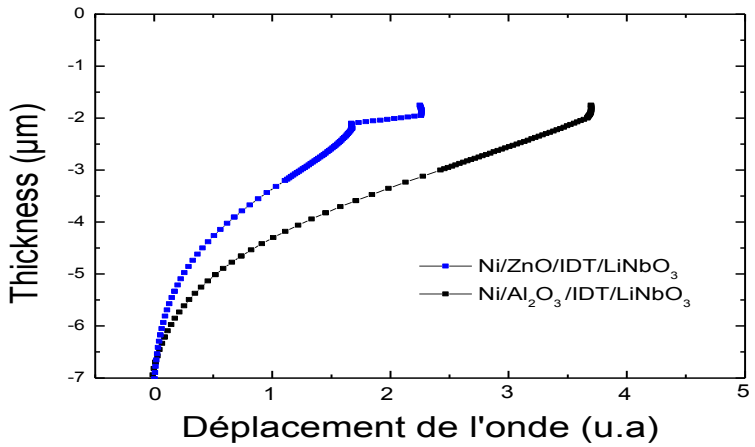


Figure IV.3 : Déplacement transversale de l'onde calculé pour les structures Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$ et Ni/Al_2O_3/IDT/LiNbO3

Nous pouvons conclure qu'à épaisseur égale, le déplacement des particules est plus important dans la structure à alumine. Notons que la fréquence de résonance considérée l'était afin de comparer à fréquence presque égales les sensibilités des structures étudiées dans les précédents chapitres à savoir : la structure Ni/quartz (harmonique 3) et la structure Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$ (pseudo-harmonique 5).

IV.1.4 Effet de la couche d'alumine sur la sensibilité au champ magnétique

IV.1.4.1 Champ magnétique appliqué dans une direction parallèle de la direction de propagation de l'onde élastique de surface.

Dans cette partie, on considère que le champ magnétique est appliqué suivant l'axe X parallèlement à la direction de propagation de l'onde élastique de surface comme indiqué sur la figure IV.4.

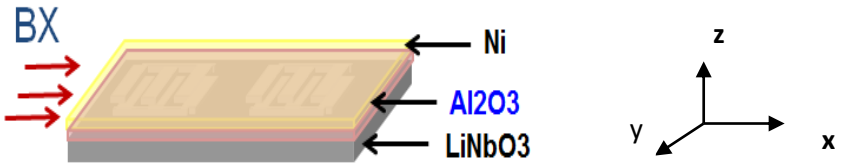


Figure IV.4 : Champ magnétique appliqué parallèlement à la direction de propagation de l'onde SAW

Dans la figure IV.5, on présente une comparaison des variations relatives des fréquences de résonances en fonction de l'intensité du champ magnétique calculé pour les deux structures multicouches : Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$ et Ni/Al_2O_3/IDT/$LiNbO_3$.

On déduit que la sensibilité du capteur suivant la direction X a été améliorée d'un facteur 8.6 en considérant des fréquences de résonance comparables et de l'ordre de 813 MHz. Ce résultat très intéressent n'a encore pas été validé expérimentalement pour des raisons techniques. Dans le cas d'une confirmation expérimentale, une étude théorique plus poussée sera menée afin de mieux comprendre l'origine de cette amélioration et donc proposer d'autres structures encore plus sensibles.

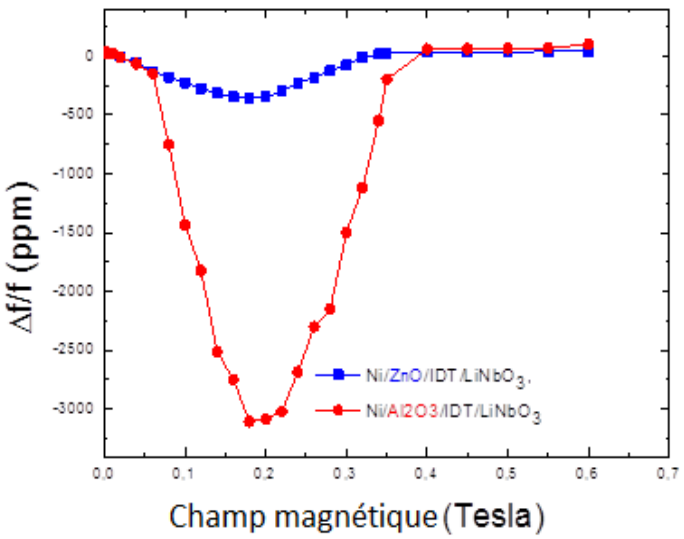


Figure IV.5 : Variation de la fréquence calculée pour les capteurs à base de structures multicouches Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$ et Ni/Al_2O_3/IDT/$LiNbO_3$

La sensibilité de la structure augmente d'un facteur 8.6 quand on remplace le ZnO par l'Al_2O_3 et 4 fois plus sensible que la structure Quartz-Ni développée par Kadoa et al[112].

IV.1.4.2 Champ magnétique appliqué perpendiculairement à la direction de propagation de l'onde élastique de surface.

Dans cette partie, on considère que le champ magnétique est appliqué suivant l'axe Y perpendiculairement à la direction de propagation de l'onde élastique de surface comme indiqué sur la courbe IV.6.

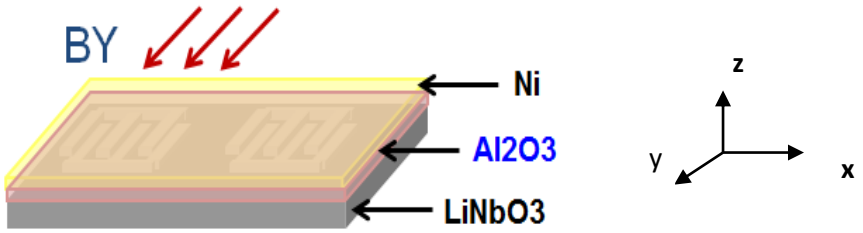


Figure IV.6 : Champ magnétique appliqué perpendiculairement à la direction de propagation de l'onde SAW

[112] M. Kadota *et al*. Magnetic Sensor Based on Surface Acoustic Wave Resonators. Jpn. J. Appl. Phys. 50: 07HD07 (2011).

Dans la figure IV.7, on présente une comparaison des variations relatives des fréquences de résonances en fonction de l'intensité du champ magnétique appliqué suivant l'axe Y et calculées pour les deux structures multicouches : Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$ et Ni/Al_2O_3/IDT/$LiNbO_3$. La sensibilité du capteur Ni/Al_2O_3/IDT/$LiNbO_3$ a été améliorée cette fois ci d'un facteur 5 dans la direction Y.

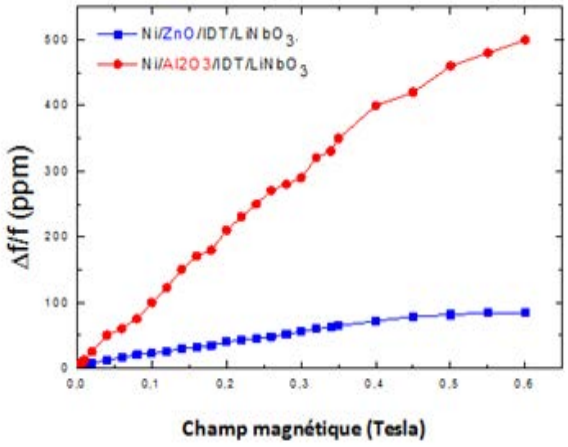


Figure IV.7 : Variation de la fréquence calculée pour les capteurs à base de structures multicouches Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$ et Ni/Al_2O_3/IDT/$LiNbO_3$.

A titre comparatif, les figures IV.8-a et b reprennent les résultats présentés précédemment pour les structures Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$ et Ni/Al_2O_3/IDT/$LiNbO_3$ et les comparent à ceux que nous avons calculés et également obtenus expérimentalement par Kadota et al. Pour la structure Ni/Quartz. On peut remarquer que la structure Ni/Al_2O_3/IDT/$LiNbO_3$ présente une meilleure sensibilité et une plus grande plage de linéarité comparée à celle proposée par Kadota quand le champ est appliqué suivant l'axe Y (Fig. IV.8-a).

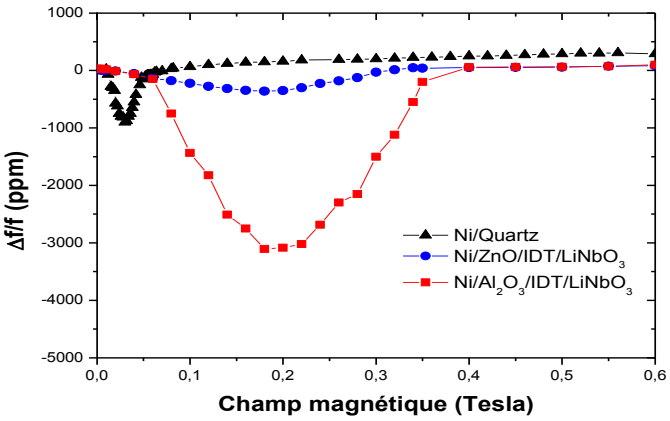


Figure IV.8-a : Comparaison de la variation de la fréquence calculée pour les capteurs à base de structures multicouches Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$ et Ni/Al_2O_3/IDT/$LiNbO_3$ et de la structure Quartz-Ni. Champ magnétique appliqué suivant l'axe X.

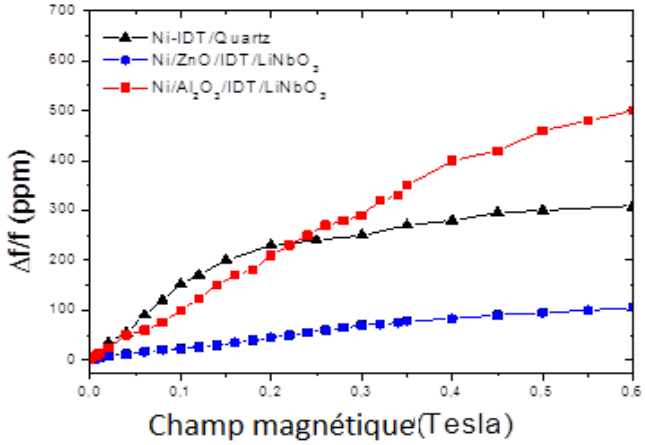


Figure IV.8-b : Variation de la fréquence calculée pour les capteurs à base de structures multicouches, Ni/ Quartz, Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$ et Ni/Al_2O_3/IDT/$LiNbO_3$. Champ magnétique appliqué suivant l'axe Y.

IV.1.5 Facteur de qualité

On étudie la variation du facteur de qualité de la structure Ni/Al_2O_3/IDT/$LiNbO_3$ en fonction du champ magnétique dans les deux directions parallèles et perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde élastique de surface. Les résultats obtenus sont comparés aux résultats obtenus pour la structure Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$ (Fig. IV.9)

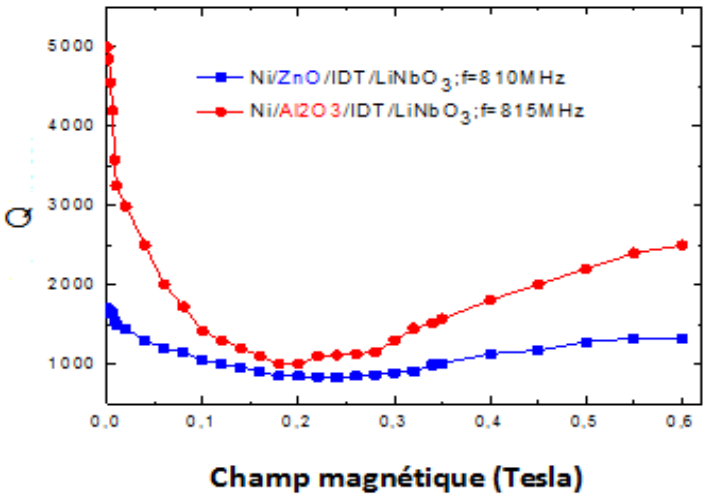
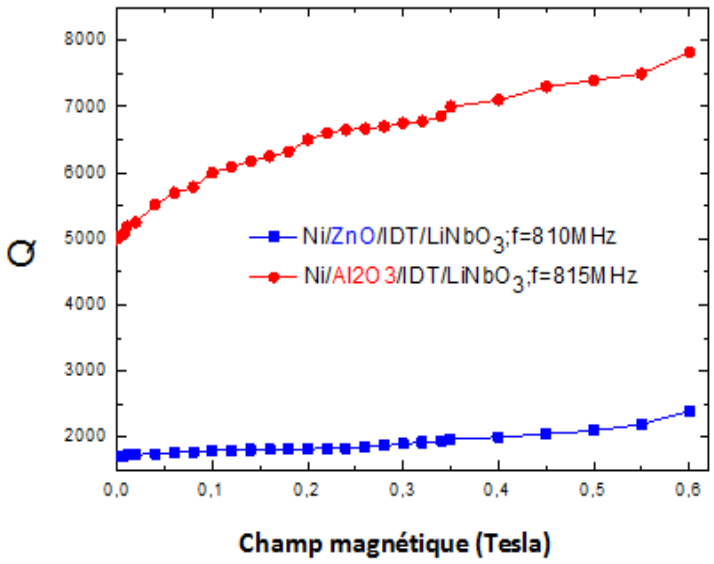


Figure IV.9 : Variation du facteur de qualité en fonction du champ magnétique appliqué suivant l'axe X pour les deux structures Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$ et Ni/Al_2O_3/IDT/$LiNbO_3$

Comme on peut le constater sur la figure IV.9, cette nouvelle structure présente également un facteur de qualité plus élevé (Q=5000 en absence du champ magnétique) comparé à celui

obtenu pour la structure avec la couche de ZnO comme isolant (Q=1700 en absence du champ magnétique). L'évolution du facteur de qualité avec l'intensité du champ magnétique est similaire pour les deux structures mais reste toujours supérieure pour la structure avec alumine. Lorsque le champ magnétique est appliqué dans la direction Y (Fig. IV.10), le facteur de qualité augmente avec l'augmentation de l'intensité du champ magnétique et atteint une valeur supérieure de 8000 pour une intensité du champ magnétique de 0.6 Tesla. On peut donc conclure que si les résultats théoriques sont confirmés expérimentalement, par la réalisation d'un résonateur SAW, dont l'architecture est plus adaptée pour des applications SAW sans fil, alors la structure $Ni/Al_2O_3/IDT/LiNbO_3$ est très prometteuse pour les applications de capteur de champs magnétiques passifs et sans fil.

Une Etude expérimentale plus poussée serait alors intéressante afin de confirmer cette hypothèse.



FigureIV.10 : Variation du facteur de qualité en fonction du champ magnétique appliqué suivant l'axe Y pour les deux structures $Ni/ZnO/IDT/LiNbO_3$ et $Ni/Al_2O_3/IDT/LiNbO_3$

IV.1.6 Conclusion

En substituant la couche du ZnO par une couche d'alumine (Al_2O_3) et en considérant des fréquences de fonctionnement comparables, la sensibilité du capteur est améliorée par un facteur 9 dans la direction X (même direction que la direction de propagation de l'onde élastique de surface). Ce facteur est de 6,25 quand on considère la sensibilité suivant la

direction Y. Cette nouvelle structure présente également un facteur de qualité plus élevé par rapport à la structure Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$, quelle que soit la direction du champ magnétique appliqué par rapport à la direction de propagation de l'onde élastique de surface.

Ces résultats rendent cette structure Ni/Al_2O_3/IDT/$LiNbO_3$ très intéressante pour les applications de détection magnétique sans fil. Dans les prochaines parties de ce chapitre nous allons étudier les autres possibilités permettant l'amélioration de la sensibilité du capteur à savoir : l'utilisation d'IDT avec une faible période spatiale et l'utilisation d'une couche magnétique composite Cobalt-Fer-Bore (CoFeB) censée être beaucoup plus sensible que le nickel.

Partie 2 : Effet de la période spatiale de l'IDT sur la sensibilité du capteur SAW

IV.2.1 Introduction

Nous avons vu dans le chapitre précédent que la sensibilité augmente quand la fréquence de fonctionnement du capteur augmente. Pour la structure Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$ nous avons vu que la sensibilité en ppm/Tesla est augmentée par un facteur d'environ 3 quand nous considèrerons la pseudo-harmonique 3 en lieu et place de la fréquence fondamentale. Ce facteur d'amélioration est d'environ 5 quand il s'agit de la pseudo-harmonique 5. En effet, plus la fréquence augmente (i.e. la longueur d'onde diminue), plus l'onde élastique est confinée à la surface de la structure multicouche et par conséquent dans le matériau magnétostrictif sensible au champ magnétique. Ici nous ne voulons pas uniquement étudier l'effet de la longueur d'onde sur la sensibilité de la structure (déjà étudié avec les pseudo-harmoniques) mais l'effet de la période spatiale de l'IDT qui définit la longueur d'onde de la fréquence fondamentale. On comparera alors la sensibilité de deux dispositifs présentant la même longueur d'onde, l'une obtenue directement avec la fréquence fondamentale et la seconde avec une pseudo-harmonique 5.

Nous allons donc comparer les performances d'une structure déjà étudiée en considérant sa pseudo-harmonique 5 avec celle d'une nouvelle structure dont la période spatiale a été fixée à 4,8 µm au lieu de 24 µm. Pour cette dernière structure on considérera la fréquence fondamentale.

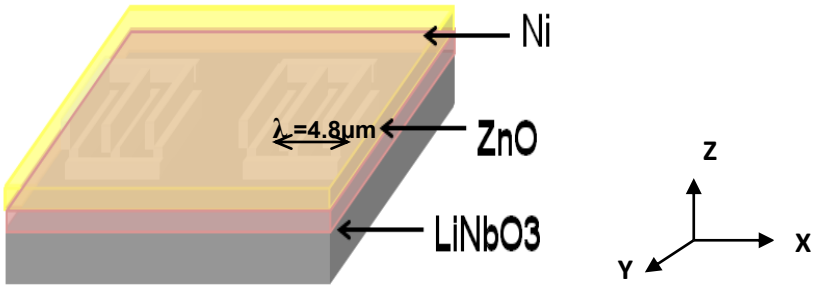


Figure IV.11 : Vue schématique de la structure LiNbO3/IDT/ZnO/Ni avec une longueur d'onde λ=4.8µm

IV.2.2 Réponse fréquentielle S_{11}

Nous présentons dans la figure IV.12, la fréquence fondamentale de la structure Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$ obtenue à 830 MHz ainsi que le déplacement de l'onde acoustique de surface correspondant à cette fréquence de résonnance.

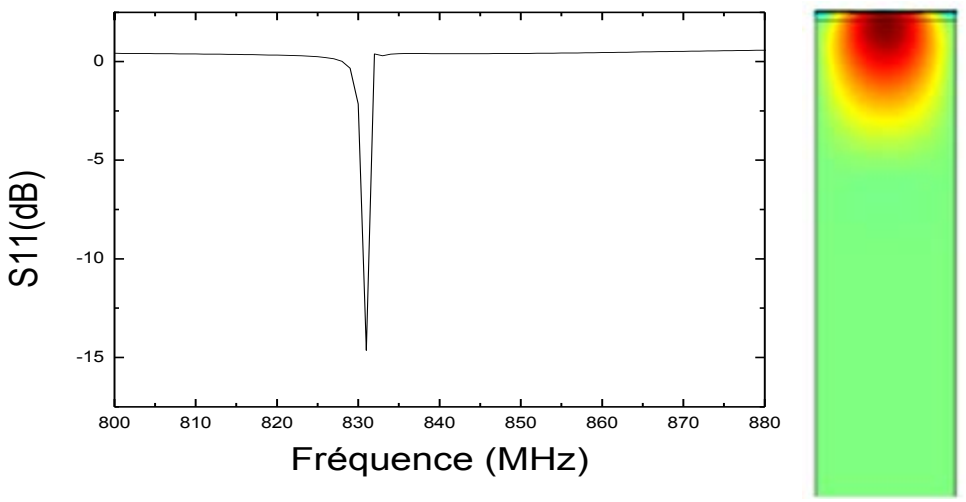


Figure IV.12 : Réponse fréquentielle S11 à la fréquence fondamentale de la structure Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$ de longueur d'onde λ=4.8µm

IV.2.3 Sensibilité au champ magnétique

Nous avons alors étudié la sensibilité de la structure Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$ (λ=4.8µm) à la présence d'un champ magnétique. La figure VI.13 présente la variation de la fréquence en fonction du champ magnétique appliqué suivant la direction parallèle à celle de l'onde élastique de surface pour la même structure Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$ à deux longueur d'ondes différentes (λ=4.8µm et λ=24µm). La sensibilité de la première structure est étudiée à la fréquence fondamentale et celle de la deuxième structure est étudiée au cinquième pseudo harmonique afin de pouvoir comparer les sensibilités à des fréquences de fonctionnement comparables. On peut observer que, à des fréquences de fonctionnement comparables, la sensibilité a été améliorée à la fondamentale.

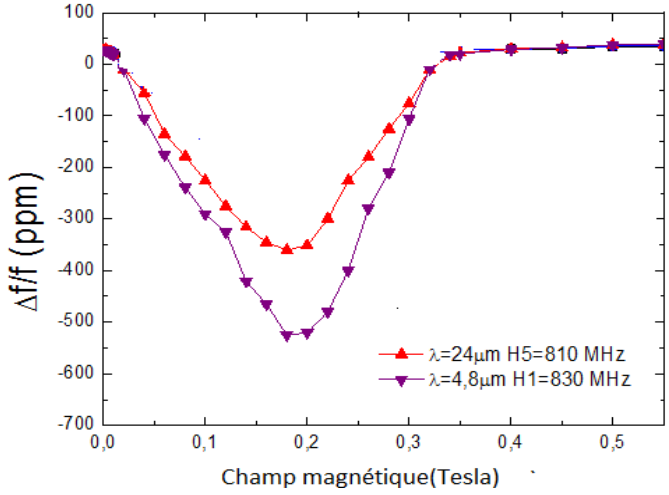


Figure VI.13 : Variation relative de la fréquence en fonction du champ magnétique appliqué suivant l'axe X pour un capteur SAW Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$

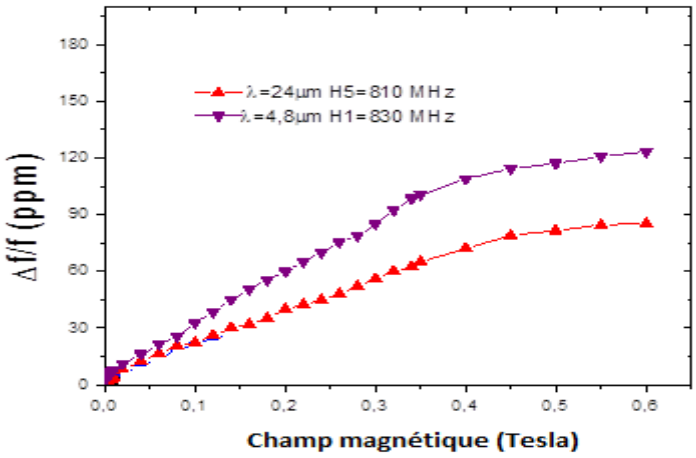


Figure IV.14 : Variation relative de la fréquence en fonction du champ magnétique appliqué suivant l'axe Y pour un capteur SAW Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$

Quand le champ magnétique est appliqué suivant l'axe Y, axe perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde SAW, nous remarquons encore une fois que la sensibilité du capteur est améliorée (figure VI.14). Cependant cette amélioration reste limitée comparée aux contraintes technologiques que pourra nécessiter la réalisation d'IDT avec de faibles longueurs d'ondes surtout quand des fréquences de quelques GHz sont visées.

IV.2.4 Facteur de qualité

Le facteur de qualité est calculé quand le champ magnétique est appliqué dans une direction parallèle à la propagation de l'onde élastique de surface. La figure IV.15 permet de

comparer la variation du facteur de qualité en fonction de l'intensité du champ magnétique pour la structure Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$ avec deux longueur d'ondes différentes, respectivement λ =24µm et λ =4.8µm fonctionnant respectivement à 810 MHz (pseudo harmonique 5) et 830 MHz. Les deux structures présentent des évolutions du facteur de qualité comparables quand le champ magnétique est appliqué dans la direction parallèle à la direction de propagation de l'onde élastique de surface. Les valeurs du facteur de qualité obtenues pour cette configuration restent tout de même limitées pour permettre l'utilisation du capteur en configuration sans fil.

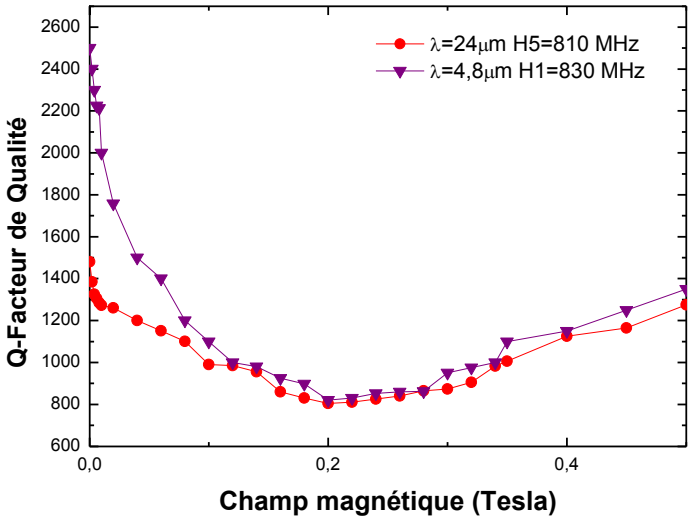


Figure IV.15 : Variation relative de la fréquence en fonction du champ magnétique appliqué suivant l'axe X pour un capteur SAW Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$

Le facteur de qualité a été également calculé en fonction du champ magnétique lorsqu'il est appliqué dans une direction perpendiculaire au champ magnétique (figure VI.16). Les résultats montrent que le facteur de qualité a été considérablement amélioré et sa valeur reste toujours supérieure à 2500. Cette configuration est donc très intéressante pour réaliser un capteur de champs magnétiques, même en configuration sans fil, quand le champ est appliqué perpendiculairement à la direction de propagation de l'onde SAW. En effet comme le montre la figure VI.14, la sensibilité du capteur présente une bonne linéarité sur une large gamme de l'intensité du champ magnétique (0 à 350 mT) et le facteur Q varie de 2500 à 3000 dans la gamme du champ investiguée.

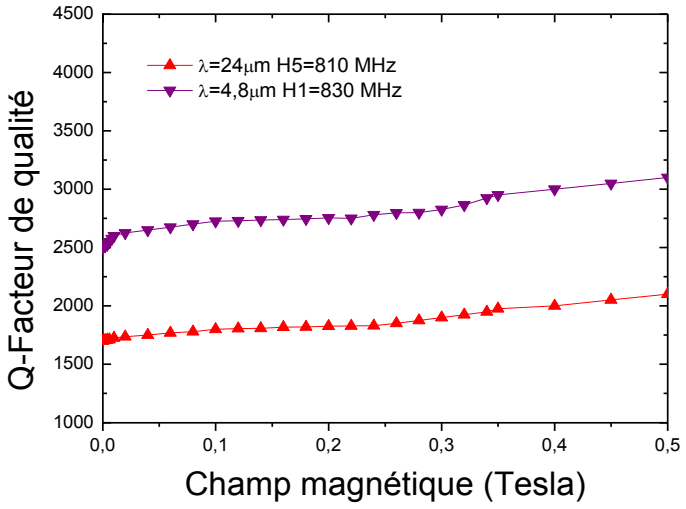


Figure IV.16 : Variation relative de la fréquence en fonction du champ magnétique appliqué suivant l'axe Y pour un capteur SAW Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$

IV.2.5 Conclusion

En diminuant la longueur d'onde de la structure Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$, la sensibilité de la structure au champ magnétique est multipliée par un facteur 1.5 pour une fréquence comparable lorsque le champ magnétique est appliqué parallèlement ou perpendiculairement à la direction de propagation de l'onde de surface. Le facteur de qualité reste limité quand le champ est appliqué suivant l'axe X surtout quand l'intensité du champ avoisine les 800mTesla. Quand le champ magnétique est appliqué suivant l'axe Y, le facteur de qualité s'améliore avec l'intensité du champ magnétique et sa valeur reste toujours supérieure à 2500 permettant d'envisager une utilisation en configuration sans fil.

Partie3 : Capteur magnétique à base de structure multicouche CoFeB/ZnO/IDT/$LiNbO_3$ (λ=24µm)

IV.3.1 Introduction

Cette partie sera consacrée à l'étude de l'effet de la couche magnétique sur la sensibilité au champ magnétique appliqué dans les deux directions, parallèle et perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde élastique de surface dans une structure piézomagnétique multicouche.

Une étude récente[113] a montré que les matériaux composites tels que le $TbCo_2$/FeCo présentent une meilleure sensibilité au champ magnétique. Il a été démontré qu'un dispositif SAW de type ligne à retard constitué d'une couche mince de $TbCo_2$/FeCo déposée dans le gap entre les IDTs sur un substrat piézoélectrique de $LiNbO_3$, fonctionnant à une fréquence de 232 MHz permet d'atteindre des sensibilités de 279 ppm/5mT quand l'onde de Rayleigh est considérée, quand le champ magnétique est appliqué parallèlement à la propagation de l'onde élastique.

En collaborant avec l'équipe nano magnétisme et électronique de spin, nous avons fixé notre choix sur le CoFeB comme matériau composite à utiliser comme couche sensible pour notre capteur à SAW.

Dans cette partie nous étudierons théoriquement et expérimentalement, la sensibilité au champ magnétique d'un dispositif SAW à base de structure multicouche CoFeB/ZnO/IDT/$LiNbO_3$

[113] H.Zhou « Etude théorique et expérimentale de systèmes à ondes de surface dans des structures multicouches piézomagnéiques pour des applications en contrôle santé intégré de MEMS par imagerie acoustique non linéaire » Thèse de doctorat, Ecole centrale de Lille, (2014).

IV.3.2 Modélisation de la structure CoFeB/ZnO/IDT/$LiNbO_3$

Les étapes de modélisation de la structure CoFeB/ZnO/IDT/$LiNbO_3$ sont les mêmes que celles décrites dans le chapitre II. Nous avons ainsi suivi la même méthode d'implémentation de couplage magnéto élastique dans le matériau magnétostrictif CoFeB. Les constantes élastiques du CoFeB sont [114]. :

- C_{11} = 257 GPa,
- C_{12} = 162 GPa,
- C_{13} = 162 GPa,
- C_{55} = C_{44} = 105GPa.

Nous développons dans le paragraphe suivant la dépendance des propriétés piézoélectriques en fonction du champ magnétique appliqué dans les deux directions parallèles et perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde élastique.

IV.3.3 Effet de la couche magnétique sur la sensibilité du capteur SAW

Le CoFeB est un matériau magnétostrictif non isotrope, il présente ainsi un axe facile et un axe difficile ayant des orientations perpendiculaires l'un par rapport à l'autre. Dans la figure IV.17, on représente les orientations des deux axes dans un film de CoFeB.

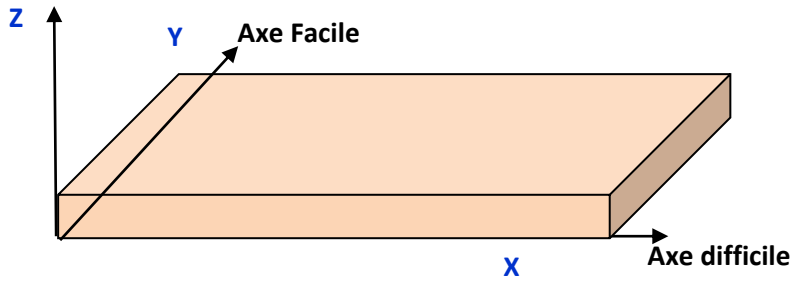


Figure IV.17 : Orientation des axes facile et difficile dans le film de CoFeB

[114] H. B. Huang, J. M. Hu, T. N. Yang,X. Q. Ma, and L. Q. Chen « Strain-assisted current-induced magnetization reversal in magnetic tunnel junctions: A micromagnetic study with phase-field microelasticity » APPLIED PHYSICS LETTERS105, 122407 (2014)

IV.3.3.1 Etude théorique

Les constantes élastiques sont proportionnelles au champ magnétique externe appliqué sur le film CoFeB. On représente dans la figure IV.18 le film magnéto élastique et le système de coordonnés associé. $\vec{H}$ est le champ magnétique externe et $\vec{M}$ est l'aimantation du CoFeB.

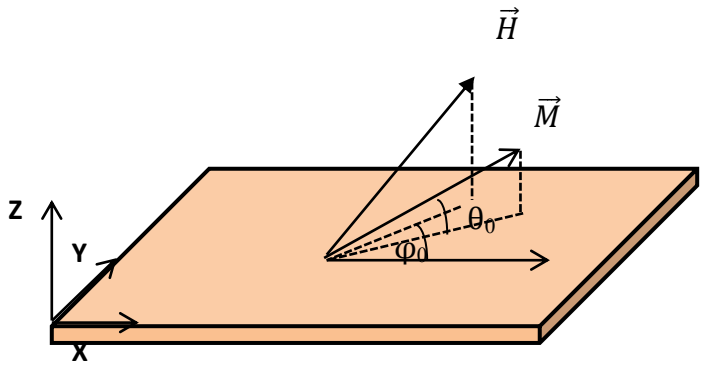


Figure IV.18 : Schéma du film magnéto élastique considéré et le système de coordonnées associé

Les constantes élastiques effectives peuvent s'exprimer sous la forme[115]

$$\Delta C_{11} = -\frac{4b^2}{Ms^2}\cos^2\varphi_0\, \chi_{11}\, \sin^2\theta_0 \quad (1)$$

$$\Delta C_{12} = -\frac{4b^2}{Ms^2}\sin\varphi_0 \cos\varphi_0 \chi_{12}\, \sin^2\theta_0 \quad (2)$$

$$\Delta C_{13} = -\frac{4b^2}{Ms^2}\cos\varphi_0 \cos\theta_0 \sin\theta_0\, \chi_{13} \quad (3)$$

$$\Delta C_{14} = -\frac{b^2}{Ms^2}\cos\varphi_0 \sin\theta_0 (\sin\theta_0 \sin\varphi_0\, \chi_{13} + \cos\theta_0\, \chi_{12}) \quad (4)$$

$$\Delta C_{15} = -\frac{b^2}{Ms^2}\cos\varphi_0 \sin\theta_0 (\sin\theta_0 \cos\varphi_0\, \chi_{13} + \cos\theta_0\, \chi_{11}) \quad (5)$$

$$\Delta C_{16} = -\frac{b^2}{Ms^2}\cos\varphi_0 \sin\theta_0 (\sin\theta_0 \cos\varphi_0\, \chi_{12} + \sin\theta_0 \sin\varphi_0\, \chi_{11}) \quad (6)$$

$$\Delta C_{22} = -\frac{4b^2}{Ms^2}\sin^2\varphi_0\, \chi_{22}\, \sin^2\theta_0 \quad (7)$$

$$\Delta C_{23} = -\frac{4b^2}{Ms^2}\sin\theta_0 \cos\theta_0 \sin\varphi_0 \chi_{23} \quad (8)$$

$$\Delta C_{24} = -\frac{b^2}{Ms^2}\sin\varphi_0 \sin\theta_0 (\sin\theta_0 \cos\varphi_0\, \chi_{23} + \cos\theta_0\, \chi_{22}) \quad (9)$$

$$\Delta C_{25} = -\frac{b^2}{Ms^2}\sin\varphi_0 \sin\theta_0 (\sin\theta_0 \cos\varphi_0\, \chi_{23} + \cos\theta_0\, \chi_{12}) \quad (10)$$

[115] O. Bou Matar, J. F. Robillard, J. O. Vasseur, A.-C. Hladky-Hennion, P. A. Deymier et al., "Band gap tunability of magneto-elastic phononic crystal", JOURNAL OF APPLIED PHYSICS 111, 054901 (2012)

$$\Delta C_{33}=-\frac{4b^2}{Ms^2}\cos^2\theta_0\,\chi_{33} \quad (11)$$

$$\Delta C_{34}=-\frac{b^2}{Ms^2}\cos\theta_0\,(\sin\theta_0\,\sin\varphi_0\,\chi_{33}+\cos\theta_0\,\chi_{23}) \quad (12)$$

$$\Delta C_{35}=-\frac{b^2}{Ms^2}\cos\theta_0\,(\sin\theta_0\,\cos\varphi_0\,\chi_{33}+\cos\theta_0\,\chi_{13}) \quad (13)$$

$$\Delta C_{36}=-\frac{b^2}{M_{2s}}\cos\theta_0\,(\sin\theta_0\,\cos\varphi_0\,\chi_{23}+\sin\theta_0\,\sin\varphi_0\,\chi_{13}) \quad (14)$$

$$\Delta C_{44}=-\frac{b^2}{4Ms^2}(\sin^2\theta_0\,\sin^2\varphi_0\,\chi_{33}+\cos^2\theta_0\,\chi_{22}+2\cos\theta_0\,\sin\theta_0\,\sin\varphi_0\chi_{23}) \quad (15)$$

$$\Delta C_{45}=-\frac{b^2}{4Ms^2}(\sin^2\theta_0\,\cos\varphi_0\,\sin\varphi_0\,\chi_{33}+\cos^2\theta_0\,\chi_{12}+\cos\theta_0\,\sin\theta_0\,\cos\varphi_0\chi_{22}+\cos\theta_0\,\sin\theta_0\,\cos\varphi_0\chi_{13}) \quad (16)$$

$$\Delta C_{46}=-\frac{b^2}{4Ms^2}(\sin^2\theta_0\,\cos\varphi_0\,\sin\varphi_0\,\chi_{23}+\sin^2\theta_0\,\sin^2\varphi_0\chi_{13}+\cos\theta_0\,\sin\theta_0\,\cos\varphi_0\chi_{22}+\cos\theta_0\,\sin\theta_0\,\sin\varphi_0\chi_{12}) \quad (17)$$

$$\Delta C_{55}=-\frac{b^2}{4Ms^2}(\sin^2\theta_0\,\cos^2\varphi_0\,\sin\varphi_0\,\chi_{33}+\cos^2\theta_0\,\chi_{11}+2\cos\theta_0\,\sin\theta_0\,\cos\varphi_0\chi_{13}) \quad (18)$$

$$\Delta C_{56}=-\frac{b^2}{4Ms^2}(\sin^2\theta_0\,\cos\varphi_0\,\sin\varphi_0\,\chi_{13}+\sin^2\theta_0\,\cos^2\theta_0\,\chi_{23}+\cos\theta_0\,\sin\theta_0\,\cos\varphi_0\chi_{12}+\sin\theta_0\,\cos\theta_0\,\sin\varphi_0\,\chi_{11}) \quad (19)$$

$$\Delta C_{66}=-\frac{b^2}{4Ms^2}(\sin2\theta0\,\cos^2\varphi_0\,\chi_{22}+\sin^2\theta_0\,\cos^2\varphi_0\,\chi_{11}+2\sin^2\theta_0\,\sin\varphi_0\,\cos\varphi_0\chi_{12}) \quad (20)$$

Dans le cas de notre configuration :

Quand le champ magnétique externe est appliqué dans une direction parallèle à l'axe facile (suivant la direction Y) du film magnéto élastique : $\theta_0 = \frac{\pi}{2}$ et $\varphi_0 = \frac{\pi}{2}$

Quand le champ magnétique externe est appliqué dans une direction perpendiculaire à l'axe facile (suivant la direction X) : $\theta_0 = \frac{\pi}{2}$ et $\varphi_0 = 0$

H étant la variable désignant le champ magnétique, Ha le champ d'anisotropie et b est le coefficient de couplage magnéto élastique à la saturation. Pour notre film de CoFeB, nous avons expérimentalement déterminé Ha=5mT et b=0.4 MPa (voir étude expérimentale).

Dans le cas du film magnéto élastique étudié et de sa configuration, et en tenant compte des expressions des susceptibilités dynamiques (χ_{ij}) publié par Zhou et al.[113], les composantes non nulles des variations de constantes élastiques s'écrivent alors :

$$\Delta C_{11}=-\frac{4b^2}{U_1*Ms^2}\cos^2\varphi_0\,\sin^2\theta_0 \quad (21)$$

Avec $U1=\mu_0 Ms (Ha (1- 2\sin^2\varphi_0) + H*\cos(\varphi_0) +D$, D étant le champ magnéto élastique défini par $D=\frac{b^2}{\mu 0\ MsC_{44}}$

$$\Delta C_{12}=\frac{b^2\sin 2\varphi 0}{U1} \quad (22)$$

$$\Delta C_{13}=\frac{b^2\sin 2\varphi 0}{U1} \quad (23)$$

$$\Delta C_{33}=-\frac{b^2}{U_1*Ms^2}\cos^2\varphi_0 \sin^2\theta 0 \quad (24)$$

$$\Delta C_{44}=-\frac{b^2}{U_2*Ms^2}\sin^2\theta_0 \quad (25)$$

Avec $U_2= \mu_0 Ms (Ha (1- \sin^2\varphi_0) + H \cos(\varphi_0) +D$ (26)

Le tenseur de perméabilité μ_{ij} dépendantes du champ magnétique est de la forme suivante :

$$\mu_{11}=\mu_0 - \frac{\mu_0 Ms^2 \sin^2 \varphi 0}{U_1} \quad (27)$$

$$\mu_{22}=\mu_0 \quad (28)$$

$$\mu_{11}=\mu_0 + \frac{\mu_0 Ms^2}{U_2} \quad (29)$$

Le tenseur de constante de couplage piézomagnétique est de la forme suivante

$$q_{11}=\frac{-2b^2\mu_0 M_S \cos\varphi_0 \sin^2 \varphi 0}{U_2} \quad (30)$$

$$q_{21}=\frac{2b^2\mu_0 M_S \cos^2 \varphi 0 \sin\varphi_0}{U_2} \quad (31)$$

$$q_{16}=\frac{B^2\mu_0 M_S (1-\sin^2 \varphi 0) \sin\varphi_0}{U_2} \quad (32)$$

$$q_{21}=\frac{2B^2\mu_0 M_S \cos^2 \varphi 0 \sin\varphi_0}{U_2} \quad (33)$$

$$q_{34}=\frac{-b^2\mu_0 M_S \sin\varphi_0}{U_1} \quad (34)$$

$$q_{35}=\frac{-b^2\mu_0 M_S \cos\varphi_0}{U_2} \quad (35)$$

$$q_{26}=-\frac{b^2\mu_0 M_S (1-\sin^2 \varphi 0) \cos\varphi_0}{U_2} \quad (36)$$

Couplage magnéto-élastique entre les modules magnétique (AC/DC) et piézoélectrique (Structural mechanics)

Afin d'établir le couplage magnéto élastique entre les deux modules de COMSOL Multiphysics (AC/DC et Structural Mechanics) dans le matériau magnétostrictif (CoFeB) : les termes qui sont proportionnels aux contraintes (S) sont introduits dans le module magnétique

permettant le calcul du champ H (équa. 38), et les termes relatifs au champ magnétique (B) sont introduits dans le module piézoélectrique permettant le calcul des déformations T (équa. 37).

Les équations définissant le couplage magnéto élastique sont définies telles que :

$$S=\eta\times T+ q\times H \qquad (37)$$

$$B=q\times T + \mu\times H \qquad (38)$$

Où T, η et q désignent respectivement les matrices de contraintes, de déformation et de couplage piézomagnétique. H étant le champ magnétique variable, B est la densité de flux magnétique et μ est l'inverse de la perméabilité.

Comme détaillé dans le chapitre II, partie 2, les termes relatifs au champ magnétiques sont implémentés dans le tableau « variable » du module « structural mechanics » comme suit :

- **Sx** = $(C_{11}\times u+C_{12}\times v) + (q_{11}\times Hx+q_{21}\times Hy)$ (39)
- **Sy** = $(C_{12}\times u+C_{12}\times v) + (q_{21}\times H_x+q_{22}\times H_y)$ (40)

Ensuite les termes relatifs aux contraintes mécaniques sont implémentés dans le tableau de densité de flux magnétique dans le module « AC/DC » comme suit :

- $B_x= (mu_{11}\times H_{x+} q_{11}\times u+q_{12}\times v)$ (41)
- $B_y = (mu_{22}\times H_{y+} q_{21}\times u+q_{22}\times v)$ (42)

IV.3.3.2.1 Etude Expérimentale

IV.3.3.2.1 Mesure de l'aimantation

La figure IV.19 présente les courbes d'aimantation mesurées pour un film de 200 nm de CoFeB déposé sur un substrat de silicium. Les conditions de dépôt de ce film sont celles citées dans la partie procédée technologiques. Le cycle d'hystérésis présente un comportement quasi carré pour un champ appliqué suivant l'axe facile (axe suivant lequel le champ magnétique est appliqué pendant le dépôt) et un comportement linéaire quand le champ magnétique est appliqué suivant l'axe difficile. Dans ce cas l'aimantation atteint la saturation quand on atteint le champ d'anisotropie qui est de l'ordre de 50 Oe (5mT) dans le cas de notre film.

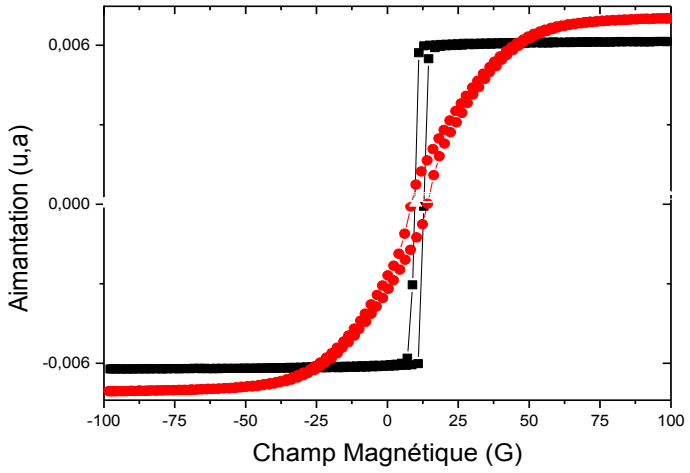


Figure IV.19: Courbes d'aimantation suivant l'axe facile (carré-noir) et l'axe difficile (rouge) d'un film magnéto-élastique CoFeB déposé sur un substrat de silicium[116]

Pour ce film, le coefficient magnéto-élastique **B** est mesuré à l'IEMN en fonction du champ magnétique suivant l'axe facile (transversal) et suivant l'axe difficile (longitudinal). La figure IV.20 présente l'évolution de ce coefficient en fonction du champ magnétique suivant les deux axes. D'après cette figure on détermine la valeur du coefficient magnétoelastique pour le film magnétoélastique CoFeB **b** qui est égale à 0.4 MPa.

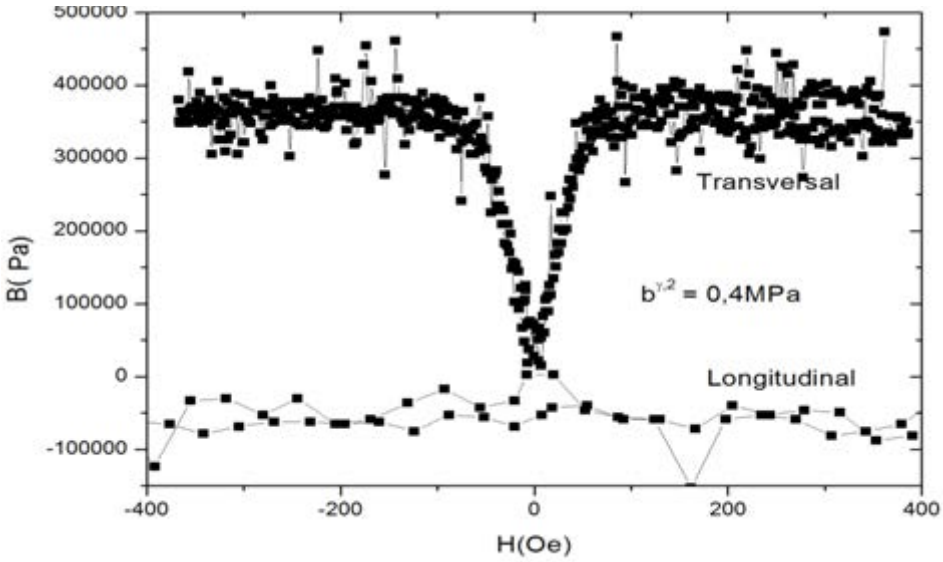


Figure IV.20 : Evolution du coefficient magnéto-élastique en fonction du champ magnétique pour un film CoFeB

[116] M. Elhosni, S. Petit-Watelot, M. Hehn, S. Hage-Ali, K. Ait Aissa, D. Lacour, A. Talbi, O. Elmazria "Experimental study of Multilayer Piezo-magnetic SAW delay line for Magnetic Sensor", Procedia Engineering 870 – 873 ,120 (2015)

IV.3.3.2.2 Caractérisation fréquentielle de la structure CoFeB/ZnO/IDT/$LiNBO_3$ à champ magnétique nul.

La caractérisation électrique de ce dispositif CoFeB/ZnO/IDT/$LiNbO_3$ a été réalisée en respectant le protocole de mesure décrit dans le chapitre 2. Dans une première étape nous avons réalisé la caractérisation sous pointes d'un ensemble de dispositifs afin de vérifier le bon fonctionnement et d'identifier ceux qui présentent les meilleures performances du point de vue des pertes d'insertions de la réponse fréquentielle. Une fois le bon dispositif identifié, nous l'avons monté sur un PCB avec des connectiques SMA pour une caractérisation sous champ magnétique (Figure IV.21).

Figure IV.21 : Structure CoFeB/ZnO/IDT/$LiNbO_3$ packagée

La figure IV.22 présente la réponse fréquentielle du dispositif obtenue avant et après le dépôt des couches minces ZnO et CoFeB. On peut observer que la vitesse de l'onde de surface décroît après l'ajout des deux couches (plus visible sur pseudo-harmonique 3 à 460 MHz). Les pertes d'insertion n'augmentent que légèrement pour la fréquence fondamentale, un peu plus pour la pseudo-harmonique 3. Quant à l'harmonique 5 à 810 MHz, elle disparaît complétement dans le bruit. Ceci s'explique par les pertes de propagation qui augmentent dans les couches minces avec la diminution de la longueur d'onde.

La figure IV.23 présente quant à elle la réponse fréquentielle S_{21} de la structure CoFeB/ZnO/IDT/$LiNbO_3$ mesurée avant et après l'étape de packaging. Comme on peut l'observer, l'étape de packaging entraîne une augmentation des pertes d'insertion d'environ 3 dB.

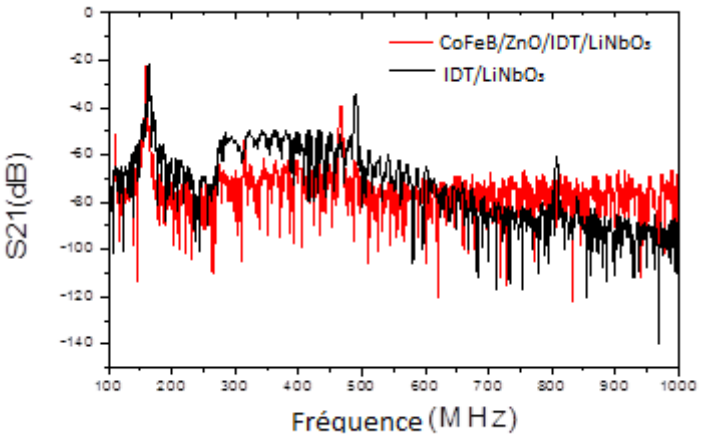


Figure IV .22 : Réponses fréquentielles des structures IDT/$LiNbO_3$ et CoFeB/ZnO/IDT/$LiNbO_3$[116]

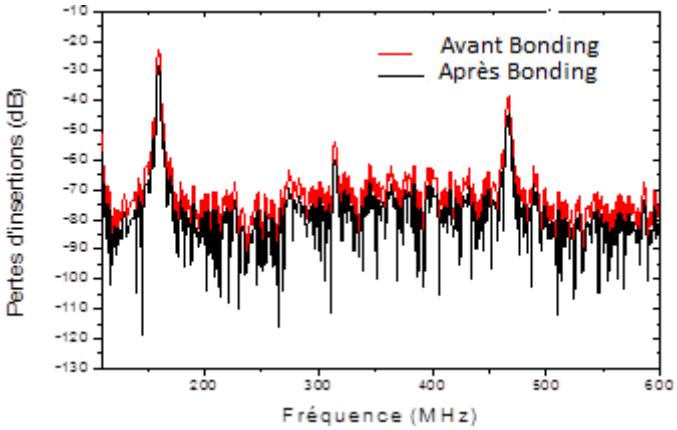


Figure IV.23 : Réponse fréquentielle de la structure CoFeB/ZnO/IDT/$LiNbO_3$ avant et après l'étape de packaging

IV.3.3.2.3Caractérisation de la structure CoFeB/ZnO/IDT/$LiNBO_3$ sous champ magnétique

Dans le chapitre précédent, nous avons montré théoriquement et expérimentalement que la structure Ni/ZnO/IDT/$LiNBO_3$ présente une bonne sensibilité aux variations du champ magnétique dans une plage donnée, mais cette sensibilité est limitée et ne permet pas d'envisager des applications où l'intensité du champ est très faible, notamment dans le biomédical.

Dans cette partie, en utilisant le même protocole expérimental décrit dans le chapitre3, nous allons étudier la sensibilité de la structure CoFeB/ZnO/IDT/$LiNBO_3$ au champ magnétique (intensité et direction) et comparerons les résultats à ceux obtenus pour la structure Ni/ZnO/IDT/$LiNBO_3$. Notons que les deux structures sont identiques exceptée la couche sensible. Le dispositif SAW est placé dans l'entrefer d'un électro-aimant et connecté à un analyseur de réseaux (Fig. III.32). La fréquence du dispositif correspondant à une phase constante (0° dans notre cas) est mesurée en fonction de l'intensité du champ magnétique. Cette intensité varie entre -0.6 Tesla jusqu'à 0.6 Tesla. Les deux directions du champ magnétique sont étudiées : parallèle et perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde SAW.

IV.3.3.2.3.1 Sensibilité du capteur quand le champ magnétique est appliqué parallèlement à la direction de propagation de l'onde SAW

Dans un premier temps, le champ magnétique est appliqué suivant une direction parallèle à la propagation de l'onde élastique de surface, suivant l'axe difficile de la couche CoFeB, la courbe de variation expérimentale de la fréquence (en ppm) est présentée sur la figure IV.25. (a). Dans la figure IV.25(b), on superpose les résultats théoriques avec les résultats expérimentaux tout en considérant les valeurs positives du champ magnétique appliqué. Dans cette configuration, la variation de la fréquence présente une symétrie par rapport à l'axe des Y. On remarque également que comme pour la structure CoFeB/ZnO/IDT/$LiNBO_3$, la sensibilité présente un minimum mais cette fois-ci à 5 mTesla au lieu de 160 mTesla pour la structure avec nickel. Le modèle théorique a été implémenté en utilisant des données issues de la littérature et des caractérisations que nous avons effectuées sur la couche de CoFeB. Les résultats de simulation sont confrontés aux mesures expérimentales comme on peut le voir sur la figure IV.25 (b). La comparaison montre que les résultats du modèle sont assez bons même si un ajustement de certains paramètres est encore nécessaire pour obtenir une qualité de prédiction comparable à celle obtenu pour la structure avec nickel. Notons que cela s'explique par la fiabilité des constantes physiques disponibles pour le nickel.

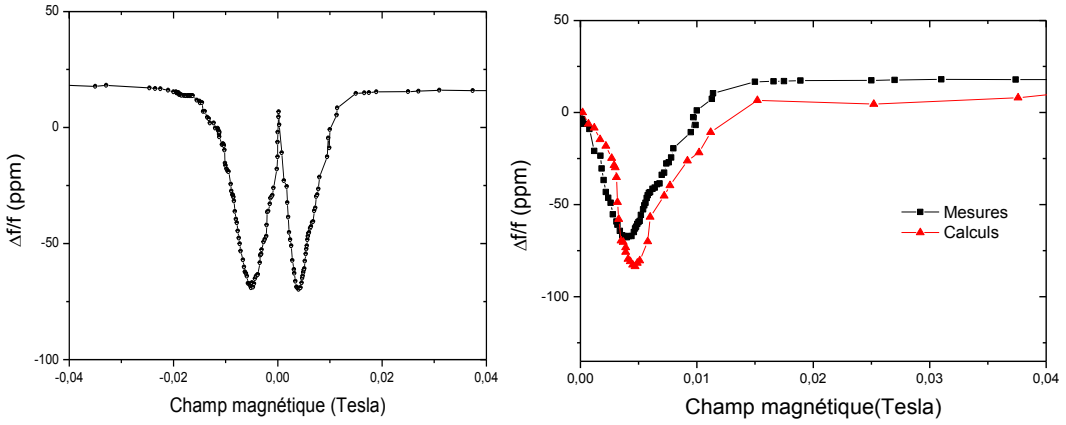


Figure IV. 25 : (a)Variation de la fréquence (en ppm) du capteur à base de la structure multicouche CoFeB/ZnO/IDT/$LiNbO_3$ en fonction de l'intensité du champ magnétique appliqué le long de l'axe difficile, (b) Comparaison de la variation de la fréquence théorique et expérimentale du capteur à base de la structure multicouches CoFeB/ZnO/IDT/$LiNbO_3$ pour des valeurs positives du champ magnétique le long de l'axe difficile

La figure IV.26 présente la variation de la fréquence avec l'intensité du champ magnétique pour les deux structures avec CoFeB et avec Ni. Seule la partie de la courbe où le champ magnétique est positif est présentée. On peut observer que l'utilisation du CoFeB comme couche sensible permet de nettement améliorer la sensibilité dans la gamme [0-5 mTesla] du champ magnétique (le facteur d'amélioration est d'environ 32).

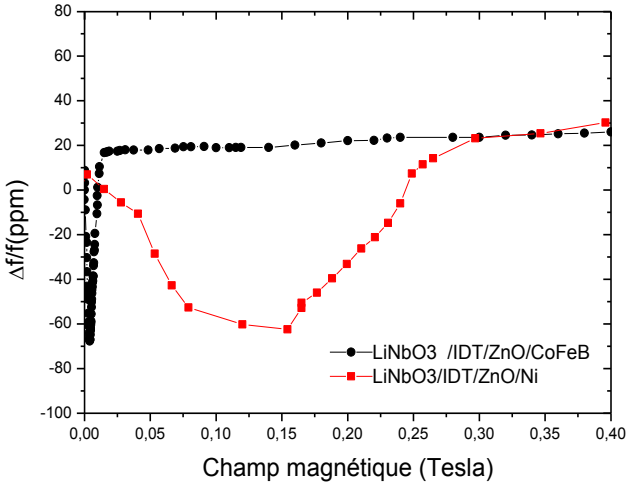


Figure IV.26 : Comparaison de la variation des sensibilités des deux capteurs à base de la structure multicouche Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$ et CoFeB/ZnO/IDT/$LiNbO_3$ pour des valeurs du champ magnétique positives[116]

IV.3.3.2.3.2 Sensibilité du capteur quand le champ magnétique est appliqué perpendiculairement à la direction de propagation de l'onde SAW

Dans le présent cas, nous appliquons le champ magnétique suivant la direction Y, perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde élastique de surface, soit suivant l'axe facile de la couche magnétique. La courbe de variation de la fréquence (en ppm) est présentée dans la figure IV.27(a) et comparée à la variation de fréquence théorique dans la figure IV.27(b). La divergence entre expérience et simulation est plus prononcée comparé aux résultats obtenus quand le champ magnétique est appliqué parallèlement à la direction de propagation de l'onde élastique. Un travail d'ajustement des constantes du CoFeB est donc nécessaire. Dans cette configuration expérimentale, où le champ magnétique est appliqué parallèlement à l'axe facile, le capteur présente une variation de sensibilité symétrique par rapport à l'axe des Y. La variation de fréquence présente cependant un minimum pour un champ magnétique nul.

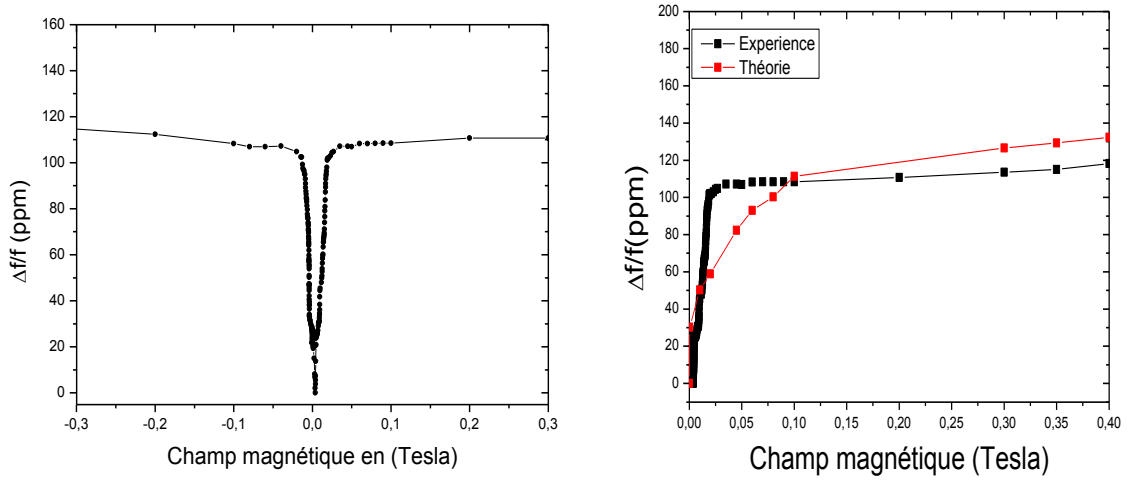


Figure IV.27 : (a)Variation de la fréquence (en ppm) du capteur à base de la structure multicouche CoFeB/ZnO/IDT/$LiNBO_3$en fonction du champ magnétique appliqué le long de l'axe facile. (b) Comparaison de la variation de fréquence théoriques et expérimentales des capteurs à base de la structure multicouches CoFeB/ZnO/IDT/$LiNbO_3$pour des valeurs positives du champ magnétique

La figure IV.28 présente la variation de la fréquence expérimentale avec l'intensité du champ magnétique pour les deux structures avec CoFeB et avec Ni. La pente de variation de la fréquence de la structure CoFeB/ZnO/IDT/$LiNbO_3$ est égale à 1.92ppm/mT La sensibilité est alors amélioré d'un facteur 14.76 en comparant celle de la structure Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$ (0.13ppm/mT)

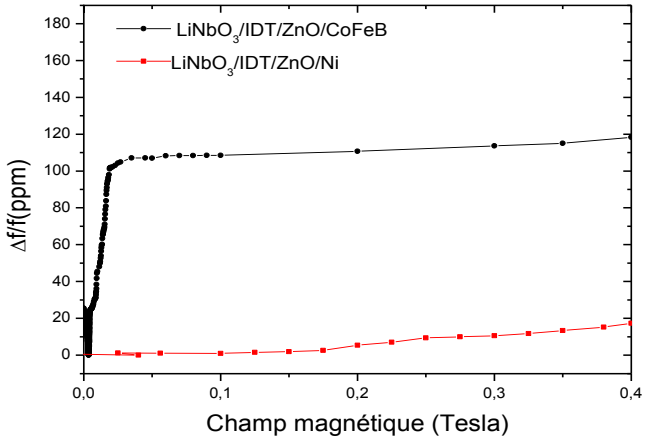


Figure IV.28: Comparaison de la variation des sensibilités des deux capteurs à base de la structure multicouche Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$ et CoFeB/ZnO/IDT/$LiNbO_3$ pour des valeurs positives du champ magnétique, quand le champ magnétique est appliqué parallèlement à l'axe facile[116]

IV.3.4 Combinaison de l'apport de la couche sensible et de la fréquence de fonctionnement sur la sensibilité du capteur

Nous venons de montrer que l'utilisation du CoFeB comme couche sensible à la place du Ni permet de gagner à fréquence égale un facteur 32 sur la sensibilité quand le champ magnétique est appliqué parallèlement à la direction de propagation de l'onde.

Si on combine les effets des différents paramètres en utilisant par exemple un capteur SAW à base de la structure CoFeB/Al_2O_3/IDT/$LiNbO_3$ fonctionnant à une fréquence fondamentale de 2.45 GHz. Nous pouvons estimer le gain en sensibilité par rapport à la structure Ni/ZnO/IDT/LN fonctionnant à 59MHz par :

- Le Remplacement du ZnO par Al_2O_3 améliore la sensibilité d'un facteur 10.
- Le Remplacement du Ni par CoFeB multiplie la sensibilité au champ magnétique d'un facteur 32.

Le gain total est donc d'au moins égale à 260 000. Sachant que le capteur à base de la structure Ni/ZnO/IDT/LN fonctionnant à 159 MHz présentait une sensibilité de 2500 ppm/Tesla, la sensibilité du capteur amélioré sera de 650 ppm/mTesla ou encore 1,6 kHz/nTesla en considérant le capteur fonctionnant à 2.45 GHz.

Un modèle COMSOL permettant de vérifier ces spéculations est en cours d'implémentation. Si cela s'avère juste, suivra alors une réalisation expérimentale.

IV.3.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons étudié les différents paramètres permettant d'améliorer la sensibilité du capteur à base de structures multicouches au champ magnétique appliqué dans les deux directions parallèles et perpendiculaire à la propagation de l'onde élastique de surface.

- L'utilisation d'Al_2O_3 comme isolant au lieu du ZnO permet d'améliorer les propriétés du capteur en termes de sensibilité au champ magnétique.
- L'augmentation de la fréquence fondamentale du capteur d'un facteur n augmente la sensibilité en ppm d'un facteur m qui dépend du confinement de l'onde dans la structure et de la sensibilité de la couche sensible. La sensibilité en hertz du capteur est donc augmentée de nxm. De même à fréquence égale, l'utilisation de la fréquence fondamentale présente une meilleure sensibilité qu'un harmonique d'où l'intérêt d'utiliser des IDT à très faibles périodes spatiales. Ceci permet également d'améliorer le facteur de qualité du capteur.
- L'utilisation d'une couche sensible de CoFeB a permis de gagner un facteur 32 par rapport au film de Nickel quand le champ magnétique est appliqué dans une direction parallèle à la propagation de l'onde SAW et d'un facteur 14.76 dans une direction perpendiculaire. La couche de CoFeB permet également une très bonne sensibilité à faibles champs (< 0.005 Tesla).

Conclusion générale

L'utilisation de capteurs magnétiques est très répandue dans un grand nombre d'applications et dans différents domaines tels que l'aéronautique, l'automobile, l'instrumentation, ou biomédicale. La technologie des capteurs magnétiques à SAW permet d'enrichir l'offre tout en apportant les valeurs ajoutées des capteurs SAW qui sont l'interrogation à distance (wireless) et sans batterie (batteryless).

Dans ce contexte, les études réalisées dans le cadre de cette thèse se sont focalisées sur la modélisation et la réalisation de ce type de dispositifs magnéto-élastique SAW à base de structures multicouches sensibles au champ magnétique, l'objectif étant entre autre d'aboutir à des capteurs avec de grandes sensibilités, mais également permettant d'adapter la sensibilité et la gamme de mesure à l'application visée. C'est pour cette raison que nous avons considéré une configuration géométrique qui offre plusieurs degrés de liberté qui permettent d'agir sur les performances du capteur. La configuration de cette structure est : substrat piézoélectrique/IDT/couche isolante/couche sensible magnéto-élastique.

Ce travail visait, d'une part, à mettre en œuvre une étude théorique permettant de prédire l'effet du champ magnétique (intensité et direction) sur les caractéristiques d'un capteur SAW à structure multicouches dans le but d'optimiser la conception de capteurs ultra-sensibles. Cette étude consistait à implémenter un modèle de simulation dans un logiciel multi-physique et utilisant la méthode des éléments finis (FEM).

A l'aide du modèle développé, nous avons ainsi étudié théoriquement les effets des paramètres géométriques de la structure et des propriétés des matériaux la constituant sur les performances du capteur : les matériaux utilisés formant la couche piézoélectrique isolante sont (ZnO, Al_2O_3) et sensible au champ magnétique (Ni, CoFeB,CoTb). Les différents paramètres de la structure, notamment les épaisseurs des différentes couches et leurs natures ont été optimisées au regard du facteur de qualité, du facteur de couplage électromécanique et de la sensibilité au champ magnétique.

Après la validation du modèle par comparaison de ces résultats avec des résultats expérimentaux récemment publiés, nous avons étudié une première structure originale (Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$) qui a été étudiée théoriquement et expérimentalement. Si cette

structure présente une bonne sensibilité au champ magnétique, cette sensibilité reste néanmoins limitée pour adresser des applications où les intensités des champs magnétiques sont très faibles tels que le biomédical (du nT au pT) ou la détection du champ magnétique terrestre (30 à 60 µT). Dans le but d'améliorer la sensibilité d'une telle structure, nous avons proposé et étudié plusieurs solutions :

- L'utilisation d'une couche isolante à grande vitesse élastique Al_2O_3 en lieu et place de la couche de ZnO,
- L'augmentation de la fréquence de fonctionnement en étudiant soit les harmoniques supérieures de la structure étudiée ou en changeant la structure par l'utilisation d'IDT avec une période spatiale plus faible.
- L'utilisation de couches magnétostrictives plus sensibles au champ magnétique. Une couche de CoFeB a été utilisée en lieu et place du nickel.

L'utilisation de l'Al_2O_3 a ainsi permis une amélioration des propriétés du capteur à base de structure multicouche en terme de sensibilité au champ magnétique.

Quand la couche sensible de Ni a été remplacée par la couche CoFeB, la sensibilité de la structure a été améliorée d'un facteur 32 toujours pour une fréquence comparable.

Ainsi, nous avons pu montrer d'une façon concrète la possibilité de réaliser des capteurs magnéto-élastiques présentant une sensibilité améliorée aux champs magnétiques.

D'un point de vue expérimental, nous avons procédé à la réalisation et la caractérisation expérimentale sous champ magnétique des structures étudiées théoriquement. Les prédictions théoriques et les résultats des caractérisations expérimentales montrent globalement un bon accord surtout pour la structure à base de nickel où les constantes physiques de ce matériau sont maintenant correctement établies. Pour le CoFeB, la non disponibilité de constantes fiables, peu expliquer les divergences obtenues entre les résultats théoriques et pratiques.

En conclusion, les structures magnéto-élastiques multicouches semblent très prometteuses pour des applications comme des capteurs magnétiques ultrasensibles. Des tests sont à l'heure actuelle en cours de réalisation pour l'étude des paramètres permettant d'améliorer la sensibilité des capteurs magnétiques à base de structures multicouches.

Les perspectives qui seraient envisageable ici pour établir des structures multicouches ultrasensibles au champ magnétiques en combinant :

- L'utilisation des couches magnétiques les plus sensibles.
- L'utilisant de couches isolantes avec une grande vitesse élastique.
- L'utilisation d'IDT avec des périodes spatiales très faible pour un fonctionnement à très hautes fréquences.

Une extrapolation à partir de nos travaux théoriques et expérimentaux laisse envisager une sensibilité de l'ordre de 1,5 kHz/nT pour un SAW à structure multicouches CoFeB/Al_2O_3/IdT/LN-128 fonctionnant à 2,45 GHz.

En plus de cette combinaison, nous envisageons d'étudier des couches magnétostrictives encore plus sensibles telles que les couches à base de terres rares.

Enfin, vu que l'atout majeur des dispositifs SAW est leur faculté d'être interrogeables à distance, la réalisation de capteurs à base de résonateur SAW sans fil combinant une grande sensibilité au champ magnétique, un grand K^2 et un grand facteur de qualité est envisageable.

Table des figures

Figure I.1: Principe de base de la piézoélectricité : Un matériau piézoélectrique soumis à des contraintes ou des déformations fait apparaître des charges de signes opposés sur ses faces entraînant ainsi une différence de potentiel (ddp) à ses bornes

Figure I.2**:** Génération d'ondes élastiques dans un matériau piézoélectrique grâce à la piézoélectricité.

Figure I.3 : Réponse en fréquence d'un filtre à ondes élastiques de surface et sa bande passante
Figure I.4: Tenseurs pour les différentes classes de cristaux

Figure I.5: Modèle du tableau de la Figure I.4

Figure I.6: Onde longitudinale ou onde de compression

Figure I.7: Onde transversale ou onde de cisaillement

Figure I.8 : Onde élastique de surface

Figure I.9: Forme de papillon proposée par Siemens pour concentrer le courant dans la région du centre et obtenir une forte sensibilité aux flux magnétiques.

Figure I.10: Capteur magnéto résistif réalisé par Philips

Figure I.11: Résonateur magnétique SAW (a) et variation de la fréquence en fonction du champ magnétique (b).
Figure I.12 : Vu schématique du résonateur SAW mis en œuvre par Kadota *et al*

Figure I.13: Détecteur GMI développé par Aichi Steel Co., qui a une très grande sensibilité de valeur de 1V / pT et un niveau de de bruit 1 nT

Figure I.14: Courbes (a) de l'aimantation obtenus par magnétométrie à échantillon vibrant d'un film mince magnétique (100 nm de Ni80Fe20) en directions transversales et longitudinales. (b) domaine de la couche magnétique. (c) Schéma d'une structure multicouche typique GMI. Les flèches dans le matériau ferromagnétique indiquent l'aimantation des domaines individuels (simplifiées). Lors de

l'application d'un champ magnétique H_{ext} de l'extérieur, l'aimantation tourne dans le sens des flèches (H_{ext} pointillés)

Figure I.15: Représentation schématique d'un capteur de champ magnétique passif et à distance intégrée constitué d'une ligne à retar SAW et d'un capteur GMI à film mince.

Figure II.1: Représentation schématique de l'effet de magnétostriction avec une déformation élastique notée ε entre l'état désaimanté et un état d'aimantation imposée non nulle

Figure II.2: Dépendance de la variation de fréquence de résonance en fonction du champ magnétique appliqué suivant l'axe Y pour différentes valeurs du taux de métallisation.

Figure II.3: Variation de la fréquence en fonction des champs magnétiques appliqués le long des axes X, Y, et Z-axes (Bx, By et Bz, respectivement). D'après Kadota *et al.*

Figure II.4: Variation du facteur de qualité en fonction du champ mag
nétique appliqué suivant les trois directions respectivement X, Y et Z. D'après Kadota *et al.*

Figure II.5: Vue schématique du modèle 2D implémenté sous Comsol

Figure II.6: Vue schématique des conditions aux limites initiales (périodicité) (a) et potentiel électrique (b) introduites dans le modèle résonateur IDT/Quartz

Figure II.7: Vue schématique de différents maillages automatiques définis par défaut sur Comsol pour notre structure (a) maillage nomal (b) maillage fin et (c) maillage plus fin

Figure II.8: Effets du maillage sur le déplacement total de l'onde acoustique de surface en utilisant respectivement :(a) maillage normal, (b) maillage fin et (c) maillage très fin

Figure II.9: Effets du maillage sur la réponse fréquentielle en utilisant le maillage automatique de Comsol respectivement :(a) maillage normal, (b) maillage fin et (c) maillage le plus fin

Figure II.10: Vue schématique de différents maillages manuels implémentés sous Comsol,
(a) maillage normal (b) maille fin et (c) maillage plus fin

Figure II.11: Réponse fréquentielle S11 en utilisant différents maillages rectangulaires respectivement :(a) maillage normal, (b) maillage fin et (c) maillage le plus fin

Figure II.12: Variation de ΔC11 et de ΔC44 du Nickel en fonction du champ magnétique appliqué dans le même sens de propagation de l'onde acoustique de surface

Figure II.13: Variation du taux de métallisation de l'électrode en Nikel (TM :(a) = 0.2 ; (b)=0.5 et (c)=0.8))

Figure II.14: Effet du taux de métallisation sur la variation de la sensibilité du résonateur SAW Ni/Quartz à l'intensité du champ magnétique.

Figure II.15: Effet du taux de métallisation sur $\frac{\Delta f}{f}$du resonateur SAW Qtz-IDT en fonction du champ magnétique

Figure II.16: Variation du facteur de couplage électromécanique en fonction de l'épaisseur de Ni

Figure II.17: Réponse fréquentielle S11 du résonateur Quartz/Ni(IDT)

Figure II.18: Variation de la fréquence en fonction du champ magnétique B_X, B_Y et B_Z

Figure II.19: Variation de la fréquence en fonction du champ magnétique B_X, B_Y et B_Z

Figure III.1: Configuration géométrique de la structure multicouche LiNbO3/IDT/ZnO/Ni

Figure III.2: Structure cristallographique du $LiNbO_3$

Figure III.3 : Maille primitive du ZnO

Figure III.4 : Vue schématiques des étapes de modélisation de la structure $LiNbO_3$/IDT/ZnO/Ni

Figure III.5: Maillage utilisé pour la modélisation de la structure multicouche Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$.

Figure III.6: Vue schématiques 3D de la structure résonateur IDT/$LiNbO_3$

Figure III.7: (a) coordonnées de la présentation de l'amplitude du déplacement suivant l'axe x, (b) Amplitude de la composante longitudinale du déplacement en fonction de l'axe x.

Figure III.8: Décroissance de la composante longitudinale u_L suivant l'axe x en fonction de la profondeur (épaisseur de la structure de base IDT/$LiNbO_3$ modélisée) pour une onde de Rayleigh (b) Amplitude de la déformation à la surface au passage de l'onde

Figure III.9 : Décroissance de la composante longitudinale u_L suivant l'axe x en fonction de la profondeur (épaisseur de la structure de base LN/IDT modélisée) pour une onde de Rayleigh (b) Amplitude de la déformation à la surface au passage de l'onde

Figure III.10: composante longitudinale u_L (a) et transversale (b) suivant l'axe x en fonction de la profondeur des structures IDT/$LiNbO_3$, ZnO/IDT/$LiNbO_3$/Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$

Figure III.11: Vue schématiques des étapes de modélisation de la structure $LiNbO_3$/IDT/ZnO/Ni

Figure III.12: Variation de k^2 en fonction des épaisseurs de ZnO et de Ni

Figure III.13: Ligne à retard modélisée pour tracer la réponse fréquentielle en transmission

Figure III.14: Etapes de modélisation des lignes a retard IDT/$LiNbO_3$, ZnO/IDT/$LiNbO_3$ et Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$

Figure III.15: Réponse fréquentielle S_{21} des structures IDT/$LiNbO_3$, ZnO/IDT/$LiNbO_3$ et Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$

Figure III.16 : Effet de dépôt de ZnO et de Nickel sur la fréquence

Figure III.17: Réponse fréquentielle large bande (S_{11}), de la structure multicouche Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$(a), et représentations en 2D du déplacement total des particules calculées aux fréquences : fondamentale, H3 et H5

Figure III.18: Application du champ magnétique suivant la direction de propagation de l'onde élastique

Figure III.19: Sensibilité au champ magnétique de la structure multicouche modélisée Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$ pour un champ magnétique appliqué suivant la direction de propagation de l'onde acoustique de surface (x) à la fréquence fondamentale (160MHz), pseudo-harmonique 3(460MHz), et pseudo-harmonique 5 (810MHz).

Figure III.20: Sensibilité au champ magnétique de la structure multicouche modélisée Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$ pour un champ magnétique appliqué suivant la direction Y perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde élastique de surface à la fréquence fondamentale, et au pseudo harmoniques H3 et H5.

Figure III.21: Comparaison entre les sensibilités au champ magnétique des structures Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$ et IDT-Ni/ Quartz/à un champ magnétique appliqué dans des orientations parallèles (a) et perpendiculaires (b) à la propagation de l'onde élastique de surface.

Figure III.22: illustration de différentes étapes de réalisation d'une ligne à retard SAW

Figure III.23: Illustration d'une ligne à retard ayant une longueur d'onde de 24µm

Figure III.24: Illustration du principe général de la pulvérisation cathodique par magnétron

Figure III.25 : Bâtit de pulvérisation de l'équipe 405 utilisé pour le dépôt de ZnO

Figure III.26: Banc de pulvérisation ultravide IJL – Nancy (équipe de nano-magnétisme et électronique de spin

Figure III.27: Interface utilisateur du bâti de pulvérisation cathodique

Figure III.28 : Protocole expérimentale suivi avant la caractérisation sous pointe

Figure III.29: Vue du banc de mesure utilisé pour la caractérisation sous pointes du dispositif SAW

Figure III.30 : Connexions nécessaires pour l'intégration du dispositif SAW avant caractérisation sous champ magnétique

Figure III.31: Bâtit de caractérisation sous champ magnétique

Figure III.32**:** Etapes de caractérisation des dispositifs SAW sous champ magnétique

Figure III.33: Réponse fréquentielle des deux structures IDT/$LiNbO_3$ et Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$

Figure III.34: Capteur magnéto élastique à base de la structure multicouche $LiNbO_3$/IDT/ZnO/Ni Packagé

Figure III.35: Réponse fréquentielle de la structure Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$ mesurée avant et après l'étape de packaging.

Figure III.36: Réponse fréquentielle de la structure IDT/$LiNbO_3$, de la structure Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$ avant packaging et après packaging. Pour une bonne lisibilité, la première courbe a été translatée de +120 dB et la seconde de +60dB.

Figure III.37: Courbes d'aimantation suivant l'axe parallèle et perpendiculaire à l'axe de propagation de l'onde élastique de définit pour la structure SAW (LiNbO3/IDT/ZnO). A titre de comparaison, les courbe d'aimantation obtenue pour la même couche de nickel déposé sur un substrat de silicium.

Figure III.38: Orientation du champ magnétique par rapport à la structure magnéto élastique Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$

Figure III.39: Sensibilité de la structure Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$ au champ magnétique appliqué dans la direction parallèle à la propagation de l'onde élastique de surface pour la fréquence fondamentale et la pseudo-harmonique 3

Figure III.40: Orientation du champ magnétique par rapport à la structure magnéto-élastique Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$

Figure III.41: Sensibilité de la structure Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$ au champ magnétique appliqué dans la direction perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde élastique de surface pour la fréquence fondamentale et la pseudo-harmonique3

Figure IV.1: Configuration géométrique des structures multicouches étudiées et réalisés dans le cadre de ce chapitre.

Figure IV.2: Réponse fréquentielle des structures Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$ et Ni/Al_2O_3/IDT/LiNbO3

Figure IV.3: Déplacement transversale de l'onde calculé pour les structures Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$ et Ni/Al_2O_3/IDT/LiNbO3

Figure IV.4: Champ magnétique appliqué parallèlement à la direction de propagation de l'onde SAW

Figure IV.5 : Variation de la fréquence calculée pour les capteurs à base de structures multicouches Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$ et Ni/Al_2O_3/IDT/$LiNbO_3$

Figure IV.6 : Champ magnétique appliqué perpendiculairement à la direction de propagation de l'onde SAW

Figure IV.7: Variation de la fréquence calculée pour les capteurs à base de structures multicouches Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$ et Ni/Al_2O_3/IDT/$LiNbO_3$.

Figure IV.8-a: Comparaison de la variation de la fréquence calculée pour les capteurs à base de structures multicouches Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$ et Ni/Al_2O_3/IDT/$LiNbO_3$ et de la structure Quartz-Ni. Champ magnétique appliqué suivant l'axe X.

Figure IV.8-b: Variation de la fréquence calculée pour les capteurs à base de structures multicouches, Ni/Quartz, Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$ et Ni/Al_2O_3/IDT/$LiNbO_3$. Champ magnétique appliqué suivant l'axe X.

Figure IV.9: Variation du facteur de qualité en fonction du champ magnétique appliqué suivant l'axe X pour les deux structures Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$ et Ni/Al_2O_3/IDT/$LiNbO_3$

FigureIV.10: Variation du facteur de qualité en fonction du champ magnétique appliqué suivant l'axe Y pour les deux structures Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$ et Ni/Al_2O_3/IDT/$LiNbO_3$

Figure IV.11: Réponse fréquentielle S11 à la fréquence fondamentale de la structure Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$ de longueur d'onde λ=4.8µm

Figure VI.12: Variation relative de la fréquence en fonction du champ magnétique appliqué suivant l'axe X pour un capteur SAW Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$

Figure IV.13: Variation relative de la fréquence en fonction du champ magnétique appliqué suivant l'axe Y pour un capteur SAW Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$

Figure IV.14: Variation relative de la fréquence en fonction du champ magnétique appliqué suivant l'axe Y pour un capteur SAW Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$

Figure IV.15: Variation relative de la fréquence en fonction du champ magnétique appliqué suivant l'axe X pour un capteur SAW Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$

Figure IV.16: Variation relative de la fréquence en fonction du champ magnétique appliqué suivant l'axe Y pour un capteur SAW Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$

Figure IV.17: Orientation des axes facile et difficile dans le film de CoFeB

Figure IV.18: Courbes d'aimantation suivant l'axe facile (carré-noir) et l'axe difficile (rouge) d'un film magnéto-élastique CoFeB déposé sur un substrat de silicium

Figure IV.19: Evolution du coefficient magnéto-élastique en fonction du champ magnétique pour un film CoFeB

Figure IV.20: Structure CoFeB/ZnO/IDT/$LiNbO_3$ packagée

Figure IV.21: Réponses fréquentielles des structures IDT/$LiNbO_3$ et CoFeB/ZnO/IDT/$LiNbO_3$

Figure IV.22: Réponse fréquentielle de la structure CoFeB/ZnO/IDT/$LiNbO_3$ avant et après l'étape de packaging

Figure IV.23 : Schéma du dispositif expérimental mis en place pour la mesure de la variation de la fréquence en fonction du champ magnétique

Figure IV.24: Variation de la fréquence (en ppm) du capteur à base de la structure multicouche CoFeB/ZnO/IDT/$LiNbO_3$ en fonction de l'intensité du champ magnétique appliqué le long de l'axe difficile

Figure IV.25: (a)Variation de la fréquence (en ppm) du capteur à base de la structure multicouche CoFeB/ZnO/IDT/$LiNbO_3$ en fonction de l'intensité du champ magnétique appliqué le long de l'axe difficile , (b) Comparaison de la variation de la fréquence théorique et expérimentale du capteur à base de la structure multicouches CoFeB/ZnO/IDT/$LiNbO_3$ pour des valeurs positives du champ magnétique le long de l'axe difficile

Figure IV.26: Variation de la fréquence (en ppm) du capteur à base de la structure multicouche CoFeB/ZnO/IDT/$LiNBO_3$en fonction du champ magnétique appliqué le long de l'axe difficile

Figure IV.27: (a)Variation de la fréquence (en ppm) du capteur à base de la structure multicouche CoFeB/ZnO/IDT/$LiNBO_3$en fonction du champ magnétique appliqué le long de l'axe facile. (b) Comparaison de la variation de fréquence théoriques et expérimentales des capteurs à base de la structure multicouches CoFeB/ZnO/IDT/$LiNbO_3$pour des valeurs positives du champ magnétique

Figure IV.28: Comparaison de la variation des sensibilités des deux capteurs à base de la structure multicouche Ni/ZnO/IDT/$LiNbO_3$ et CoFeB/ZnO/IDT/$LiNbO_3$ pour des valeurs positives du champ magnétique, quand le champ magnétique est appliqué parallèlement à l'axe facile