

Sommaire

Introduction générale.....	1
Introduction :.....	4
1.1 / La technologie SAW pour le filtrage RF en téléphonie mobile	5
1.2 / Le filtre RF dans un téléphone mobile : à quoi ça sert ?.....	5
1.2.1 / Architecture d'un système de réception et d'émission radio	5
1.3 / Histoire des dispositifs SAW.....	7
1.4 / Généralités sur les ondes élastiques et la piézoélectricité	9
1.4.1 / Contraintes	9
1.4.2 / Déformation	9
1.4.3 / Relation Contraintes Déformation : Loi de Hooke	10
1.4.4 / Pour les matériaux isotropes	10
1.4.5 / Pour les cristaux.....	11
1.4.6 / Couplage électrique mécanique : Milieu piézoélectrique	12
1.5 / Différents types d'ondes	12
1.5.1 / Ondes de volume	13
1.5.2 / Ondes de surface de type Rayleigh ou R	14
1.5.3 / Ondes de Lamb.....	14
1.6 / Propagation des ondes dans les milieux périodiques.....	14
1.6.1 / Loi de Bragg	15
1.6.2 / Zone irréductible de Brillouin.....	15
1.7 / Les Cristaux phononiques :.....	17
1.7.1 / Applications des cristaux phononiques à bandes interdites de Bragg :.....	17
1.7.2 / Bandes interdites à résonance locale:	21
Conclusion	22
Introduction.....	24
2.1/ Modélisation par la méthode des éléments finis (FEM)	25
2.2/ Calcul de la structure de bandes :	25
2.3/ Choix des matériaux.....	29
2.4/ Structures de bandes et de bandes interdites	30
2.5/ Influence de la symétrie du réseau	33

2.6/	Influence des paramètres géométriques	34
2.6.1/	Effet de l'épaisseur du pilier sur la bande interdite	34
2.6.2/	Effet du rayon du pilier sur la bande interdite	35
2.7/	Méthode de modélisation en transmission :	36
2.8/	Résultats	40
2.9/	Design, fabrication et caractérisation des réseaux de piliers sur la surface de tantalate de lithium	44
2.9.1/	Réalisation des transducteurs à peignes interdigités	44
2.9.2/	Réalisation des piliers de nickel:	50
2.10/	Caractérisation électrique :	53
	Conclusion	55
	Conclusion générale et perspectives	57
	Références.....	59

Table des figures

Figure 1.1: Schéma bloc simplifié d'un émetteur radiofréquence (RF)	5
Figure 1.2: Schéma bloc simplifié d'un récepteur radiofréquence (RF).....	6
Figure 1.3: Arbre généalogique des SAW.....	8
Figure 1.4: Représentation schématique des déplacements au cours de la propagation d'une onde élastique de polarisation longitudinale.....	13
Figure 1.5: Représentation schématique des déplacements au cours de la propagation d'une onde élastique de polarisation transverse.....	13
Figure 1.6: Représentation des déplacements au cours de la propagation d'une onde élastique de surface de type Rayleigh (polarisation elliptique).....	14
Figure 1.7: schéma expliquant la loi de Bragg.....	15
Figure 1.8: Passage de l'espace réel à l'espace réciproque.....	16
Figure 1.9: Première zone de Brillouin dans le domaine réciproque pour une organisation 2D.....	16
Figure 1.10: Sculpture de Eusebio Sempere (1923-1958) située à Madrid. [Sigalas 1995]	18
Figure 1.11: Schéma du dispositif phononique à ondes de surface. [Wu 2005].....	18
Figure 1.12: transmission relative d'un CP constitué de trous percés à la surface d'un substrat de LiNbO ₃ . [Benchabane 2006].....	19
Figure 1.13: Réponse électrique en transmission des dispositifs SAW [Gorisse 2011]	20
Figure 1.14: Transmission normalisée moyenne en fonction de la fréquence à travers un CP constitué d'un agencement en nid d'abeille de trous dans du silicium. [Mouhammadi 2008]	20
Figure 1.15: (A) Résonateur sphérique constitué d'un cœur en plomb enrobé par élastomère très mou. (B) Cristal tridimensionnel à résonance locale.....	21
Figure 1.16: image prise au microscope optique ainsi qu'un agrandissement des piliers obtenue avec un microscope électronique à balayage. [Achaoui 2011].....	22
Figure 2.1: cellule élémentaire utilisée pour le calcul des structures de bandes	26
Figure 2.2: Conditions périodiques appliquées sur la maille élémentaire	26
Figure 2.3: maillage de type triangulaire.....	27
Figure 2.4: Comparaison entre les deux diagrammes de bandes composées de piliers cylindriques en niobate de lithium sur un substrat en niobate de lithium, (a) par [Achaoui 2011], (b) par éléments finis.	28
Figure 2.5: structure cristalline du tantalate de lithium.....	29
Figure 2.6: photo prise avec le microscope électronique à balayage	31

Figure 2.7: Structures de bandes d'un CP composé de piliers cylindriques en nickel sur un substrat en tantalate de lithium, calculées le long des directions de haute symétrie de la zone de Brillouin. (a) $a = 10\mu\text{m}$, $h_{pa} = 0,5\mu\text{m}$, $r_{pa} = 0,35\mu\text{m}$, (b) $a = 7\mu\text{m}$, $h_{pa} = 0,71\mu\text{m}$, $r_{pa} = 0,45\mu\text{m}$, (c) $a = 7\mu\text{m}$, $h_{pa} = 0,71\mu\text{m}$, $r_{pa} = 0,35\mu\text{m}$	32
Figure 2.8: Diagrammes de bandes [Yu 2016] obtenus pour différentes symétries : carrée (a), triangulaire (b) avec les paramètres géométriques suivants : $a = 9\mu\text{m}$, $h_p = 4\mu\text{m}$, $r_p = 3\mu\text{m}$	33
Figure 2.9: Structures de bandes pour les différentes valeurs de $h_{pa} = 0,5, 0,7$	34
Figure 2.10: Structures de bandes pour les différentes valeurs de $r_{pa} = 0,35, 0,45$	35
Figure 2.11: dessin complet d'un cristal phononique modélisé en transmission	37
Figure 2.12: Le maillage de la structure.	37
Figure 2.13: Surface d'entrée et de sortie du dispositif.	38
Figure 2.14: Résultats de simulation en transmission à deux fréquences, (a) transmission, (b) atténuation.....	39
Figure 2.15 : Courbe de transmission des ondes de surface à travers 11 rangées d'un réseau carré d'un cristal phononique composé de piliers en nickel sur un substrat en tantalate de lithium. Le rayon des piliers pour le premier échantillon est $r_{pa} = 0.35$ et la hauteur $h_{pa} = 0.5$	41
Figure 2.16 : Courbe de transmission des ondes de surface à travers 11 rangées d'un réseau carré d'un cristal phononique composé de piliers en nickel sur un substrat en tantalate de lithium. Le rayon des piliers pour le deuxième échantillon est $r_{pa} = 0.35$ et la hauteur $h_{pa} = 0.5$	42
Figure 2.17 : Courbe de transmission des ondes de surface à travers 11 rangées d'un réseau carré d'un cristal phononique composé de piliers en nickel sur un substrat en tantalate de lithium. Le rayon des piliers pour le troisième échantillon est $r_{pa} = 0.35$ et la hauteur $h_{pa} = 0.5$	43
Figure 2.18: image de la tournette RC8.....	45
Figure 2.19: aligneur EVG 620 DUV	46
Figure 2.20: pulvé plassys (MP500).....	47
Figure 2.21: Image du wafer ainsi que des images au microscope optique	48
Figure 2.22: Les différentes étapes du procédé de fabrication des peignes interdigités.	49
Figure 2.23: L'électroformage	50
Figure 2.24: Images du wafer ainsi que des images au microscope électronique à balayage.....	51
Figure 2.25: Les différentes étapes du procédé de fabrication des piliers.	52
Figure 2.26: Banc de mesure sous pointes radiofréquence utilisé pour les mesures des paramètres S.	54
Figure 2.27: Mesure à l'aide du test sous pointes	55

Introduction générale

L'institut FEMTO-ST (**F**ranche- Comté **E**lectronique **M**écanique **A**coustique **T**hermique et **O**ptique- **S**ciences et **T**echnologies ; WWW-femto-st.fr) est un laboratoire associé au CNRS et rattaché à l'Université de Franche-Comté (UFC) à l'Ecole Nationale de Mécanique et des Microtechniques (ENSMM) et à l'Université technologique de Belfort – Montbéliard (UTBM).

La Centrale de Technologie de l'Institut FEMTO-ST, appelée MIMENTO pour **M**icrofabrication pour la **M**écanique, les **N**anosciences, la **T**hermique et l'**O**ptique, fait partie depuis 2004 du réseau **RENATEC** des grandes centrales technologiques, dont le but est de soutenir l'ensemble de la recherche institutionnelle française. Elle est dotée d'un parc d'équipement de Haute Technologie ouvert à la fois à des partenaires académiques et industriels.

Les travaux présentés dans ce projet de stage de Master 2 ont été réalisés au sein du département MN2S (**M**icro **N**ano **S**ciences & **S**ystèmes) de l'institut FEMTO-ST, dans le groupe de recherches « Phononique & Microscopies » dirigé par Pr. Abdelkrim Khelif.

Ce projet est centré sur l'étude des matériaux micro- et nanostructurés qui est l'une des activités dominantes du groupe.

Mon travail porte sur l'ingénierie des structures de bandes pour les ondes élastiques en surface SAW (*Surface Acoustic Wave*) des métamatériaux acoustiques. On s'intéressera particulièrement à l'interaction des ondes élastiques de surface avec des structures périodiques constitués de micro-plots ou piliers de forme cylindrique arrangés suivant différentes symétries cristallographiques.

La propagation des ondes élastiques dans les matériaux structurés comme les cristaux phononiques (CP) est différente de celle des cristaux homogènes. Dans ces derniers, les ondes de surface sont en général non dispersives. En revanche dans un CP, la propagation des ondes peut présenter des propriétés singulières comme la forte dispersion, une vitesse de groupe négative, et un digramme de bandes comportant des branches plates, ainsi que des bandes interdites basse fréquence.

Les trente dernières années ont vu l'émergence des CP, structures périodiques basées sur les travaux réalisés sur les semi-conducteurs. Ces CP ont permis d'envisager le contrôle de la propagation des ondes acoustiques. En structurant périodiquement la matière, il est possible d'empêcher les ondes acoustiques de se propager, mais aussi de les confiner ou de leur faire suivre les chemins les plus détournés à l'échelle de la longueur d'onde. Ces objets artificiels imitant la structure des cristaux naturels pourraient mener à la conception de véritables circuits phononiques. Les CP sont donc des structures périodiques avec aux moins deux matériaux de masses volumiques différentes. Ils possèdent en particulier un domaine de

fréquences interdites (*bandgap*) pour la propagation des ondes. Les CP sont difficilement miniaturisables. En effet, les phénomènes mis en jeu sont principalement voisins de la bande interdite, domaine de longueur d'onde de l'ordre de la périodicité spatiale du CP. Les recherches se sont orientées vers d'autres concepts faisant intervenir les résonances locales. Et c'est ainsi que les métamatériaux acoustiques ont vu le jour vers les années 2000 dans le but d'améliorer les CP, voire les dépasser pour obtenir de nouvelles propriétés originales. Les métamatériaux sont des structures composites formés de résonateurs locaux qui ont fait leur apparition avec les travaux de J. Pendry pour les ondes électromagnétiques, et des travaux de Ping Sheng pour les ondes élastiques.

Contexte et motivations

Les CP et métamatériaux acoustiques sont des matériaux artificiels qui présentent des bandes de fréquences fréquentielles interdites pour toute propagation d'ondes élastiques ou acoustiques. L'apparition des bandes interdites peut s'expliquer généralement par deux mécanismes qui sont la diffraction de Bragg (due à la périodicité), et les résonances locales de chaque élément. La diffraction de Bragg donne naissance à des interférences destructives lorsque la longueur d'onde λ_0 est du même ordre de grandeur que la période a des inclusions introduites dans le matériau, c'est-à-dire lorsque $a \simeq \lambda_0$. En revanche, le mécanisme de résonances locales est basé sur la possibilité d'obtenir des bandes interdites inférieures au seuil de la diffraction de Bragg sans pour autant augmenter la taille élémentaire du cristal. Les phénomènes mis en jeu sont pour la plus part du temps dépendants, et proches de la bande interdites lorsque $a \simeq \lambda_0$. Nous intéressons aux structures à résonances locales de type piliers opérant dans le régime hypersonique pour la conception et l'obtention de métamatériaux acoustiques. Dans le domaine des hautes fréquences, ces dispositifs phononiques sont de bons candidats pour des applications RF comme le filtrage très sélectif, et le démultiplexage utilisés principalement dans le domaine des télécommunications, ainsi que dans le domaine des capteurs. Dans le domaine basses fréquences, des applications pour l'isolation sonore, et des systèmes anti-sismiques, invisibilité acoustique sont possibles.

C'est dans le contexte des applications en hautes fréquences, qui nécessitent des CP à résonance locale, ou des métamatériaux acoustiques que se situe mon travail.

Le projet se décompose en deux axes :

- J'ai cherché tout d'abord à calculer, et localiser les bandes interdites pour une structure composée de piliers cylindriques en nickel (Ni) sur un substrat piézoélectrique à base de tantalate de lithium ($LiTaO_3$). Les différentes simulations ont été réalisées sous environnement Comsol Multiphysics 3.4. En effet, ce dernier permet la modélisation de systèmes complexes mettant en jeu différents phénomènes physiques (électrique, mécanique, acoustique), ainsi que le couplage entre eux. La vitesse des ondes dans le substrat piézoélectrique dépend de la direction de propagation considérée par rapport à l'orientation de la coupe cristallographique

du matériau. Les coupes $36^\circ Y$, et $42^\circ Y$ ont été retenues pour le ($LiTaO_3$) en raison de leurs coefficients de couplage élevés. Les champs de déplacement, ainsi que les spectres de transmission seront également présentés.

- Les ondes de surface SAW sont générées et détectées directement à la surface du matériau piézoélectrique qui dans notre cas est le tantalate de lithium. Sur ce dernier sont gravés des transducteurs interdigités qui sont des peignes métalliques obtenus par des procédés microtechniques standards comme la gravure, et la lithographie. L'objectif de cette seconde étape a été de caractériser électriquement les résonateurs SAW à l'aide de l'analyseur de spectre vectoriel. Enfin, la conception, ainsi que le process d'élaboration des différentes structures obtenus en salle blanche de la centrale technologique seront présentés.

Le manuscrit se décline en deux chapitres. Le premier présente plusieurs éléments de l'état sur les ondes acoustiques, élastiques, ainsi que sur les CP. En effet, les ondes acoustiques sont utilisées dans des domaines aussi variés que l'imagerie échographique du corps humain, la détection et la localisation d'objets sous-marins (le sonar), l'étude des séismes et des mouvements de l'écorce terrestre. Les quartz de nos montres utilisent des résonances particulières des cristaux, qui sont liées aux ondes acoustiques qui s'y propagent.

Nos téléphones portables et nos télévisions comportent des filtres électroniques exploitant des ondes acoustiques à haute fréquence dans des cristaux synthétiques exotiques, tels le tantalate de lithium.

Le chapitre deux est consacré aux différentes simulations obtenus sous environnement Comsol Multiphysics pour le calcul des bandes interdites. Les différentes étapes de modélisation comprenant le choix du modèle physique, l'implémentation des équations, ainsi que la prise en compte des conditions aux limites, seront décrites et discutées. Enfin, quelques résultats expérimentaux portant sur la caractérisation électrique des résonateurs SAW seront présentés.

Etat de l'art sur les filtres SAW

Introduction :

Les composants acoustiques forment l'une des technologies habilitantes pour les télécommunications sans fils. De par leur compacité, leurs faibles pertes et leur comportement passif électrique, les résonateurs acoustiques font à présent partie intégrante des terminaux de téléphonie mobile : les dernières générations de smart phones comportent pas moins de 40 filtres SAW réalisés à partir de ces composants. Ce nombre est en constante augmentation depuis une dizaine d'années et les discussions de la 5e génération de protocole de téléphonie mobile (5G) font d'ores et déjà apparaître de nouvelles bandes de fréquences qui nécessiteront un nombre accru de filtres pour les couvrir. Plus généralement, l'imminence de l'ère de l'internet des objets et l'augmentation associée des besoins de transfert d'information haut débit ou d'objets connectés, contribuent à l'émergence de nouvelles applications dans lesquelles les composants acoustiques radiofréquence tiennent un rôle majeur.

Dans ce contexte en plein essor, les cristaux phononiques sont vus comme une brique technologique permettant l'amélioration des performances et du degré de compacité des composants acoustiques RF.

Dans ce chapitre, une première partie sera consacrée à un état de l'art, ainsi qu'un historique qui nous permettra d'introduire les filtres SAW en général, puis les filtres SAW phononiques en particulier. Une deuxième partie sera consacrée à la physique des ondes élastiques, ainsi qu'à la piézoélectricité.

1.1 / La technologie SAW pour le filtrage RF en téléphonie mobile

La fonction du filtrage RF a tout d'abord été confiée à des composants diélectriques utilisant des résonances électromagnétiques. Ces composants étaient très performants mais bientôt trop encombrants pour l'application de téléphonie mobile dans laquelle la taille des composants est l'un des critères les plus importants. Des composants utilisant des ondes acoustiques ont alors apporté une solution à ce problème [Caruyer 2005]. En effet, les ondes acoustiques se propagent à des vitesses de l'ordre de 10^5 fois moins importantes que les ondes électromagnétiques, ce qui permet une réduction de la taille majeure des composants.

1.2 / Le filtre RF dans un téléphone mobile : à quoi ça sert ?

Le XX^{ième} siècle a connu un formidable développement des communications sans-fil, et donc une occupation croissante du réseau hertzien [Caruyer 2005]. Aujourd'hui, rares sont les bandes de fréquence non-utilisées, et leur accès est réglementé par des licences qui peuvent coûter extrêmement cher. Dans ce trafic surchargé, il faut être capable d'isoler l'information utile à la réception, et de s'assurer qu'on ne perturbe pas les autres utilisateurs à l'émission. Ce sont là les deux fonctions principales des filtres RF utilisés dans le téléphone mobile. Voyons plus en détail comment fonctionnent une chaîne d'émission ainsi qu'une chaîne de réception radio.

1.2.1 / Architecture d'un système de réception et d'émission radio

Il existe de nombreuses architectures d'émetteur-récepteur radiofréquence (RF), mais le principe de base reste le même : le rôle de l'émetteur est de translater le signal à émettre des basses fréquences vers les radiofréquences, tandis que le récepteur réalise l'opération inverse [Caruyer 2005].

Ces opérations se font grâce à un signal RF de référence appelé porteuse, dont on va moduler l'une des caractéristiques (amplitude, fréquence ou phase) à l'aide du signal à émettre. Le signal à émettre est ainsi porté par cette porteuse, et peut être récupéré par le récepteur en utilisant cette même porteuse.

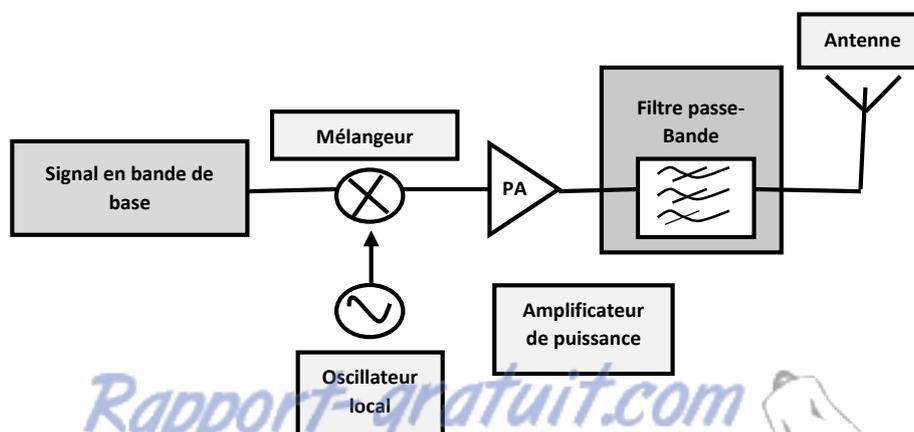


Figure 1.1: Schéma bloc simplifié d'un émetteur radiofréquence (RF)

Comme le montre la figure 1.1, l'émetteur RF utilise une fonction électronique de mélangeur pour réaliser une multiplication du signal à émettre (en basse fréquence, appelée bande de base) par la porteuse synthétisée à l'aide d'un oscillateur local. Le signal RF obtenu par cette opération a un spectre fréquentiel centré sur la fréquence de l'oscillateur local (la fréquence porteuse). Ce signal est ensuite amplifié grâce à un amplificateur de puissance, puis envoyé dans l'antenne après avoir été filtré par le filtre passe bande.

A priori, l'intérêt d'utiliser un filtre passe bande entre l'amplificateur de puissance et l'antenne ne paraît pas évident. En effet on ne voit pas bien quel signal serait à filtrer à ce niveau. En fait, il faut préciser que certaines des fonctions qui viennent d'être présentées et en particulier celle de mélangeur et d'amplificateur sont réalisées à partir de circuits actifs et transistor. Or le transistor a un composant intrinsèquement non linéaire, et cette caractérisation se retrouve au niveau du mélangeur et de l'amplificateur. Ces non-linéarités entraînent alors une distorsion du signal et surtout la génération de signaux parasites à d'autres fréquences que la fréquence d'émission. La législation réglemente très strictement les niveaux de ces signaux ainsi émis, de façon à ne pas parasiter les autres communications sans fils ; le filtre RF passe bande utilisé à l'émission a donc pour fonction d'assurer cette spécification.

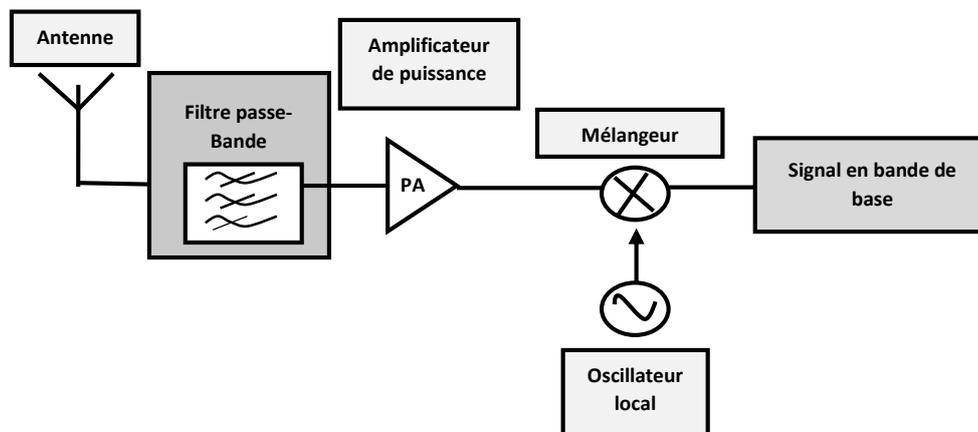


Figure 1.2: Schéma bloc simplifié d'un récepteur radiofréquence (RF)

La figure 1.2 présente le schéma simplifié du récepteur. L'objectif de ce dernier est d'extraire le signal utile du signal RF reçu. Cette opération s'effectue à nouveau à l'aide d'un mélangeur et d'un oscillateur local capable de synthétiser la même fréquence porteuse que celle utilisée à l'émission.

L'antenne est un composant passif qui permet de détecter des ondes électromagnétiques dans une certaine bande de fréquence. Ainsi, on reçoit au niveau de l'antenne le signal RF que l'on souhaite détecter ainsi qu'une multitude de signaux parasites provenant d'autres communications. En effet on peut montrer que ces non-linéarités génèrent des phénomènes d'intermodulation, et un signal qui se trouve à une fréquence différente de la fréquence de

réception peut être transposé en bande de base avec le signal utile. Si le signal parasite n'a pas été suffisamment atténué, il peut ainsi recouvrir totalement le signal utile et empêcher la réception. Ainsi il est absolument indispensable de filtrer le signal derrière l'antenne autour de la bande de réception.

Ainsi, à l'émission, le filtre RF a pour fonction essentielle d'éviter l'émission de tout parasite qui pourrait perturber les autres communications sans fil, tandis qu'à la réception un deuxième filtre est nécessaire pour assurer la détection du signal utile et pour se protéger des parasites. Mais que se passe-t-il lorsqu'un système émet et reçoit simultanément ?

Les filtres utilisés précédemment dans la chaîne d'émission et de réception sont remplacés par un composant unique appelé duplexeur qui est connecté directement et en permanence via l'antenne. En effet le duplexeur doit assurer une très forte isolation entre la chaîne d'émission et de réception.

1.3 / Histoire des dispositifs SAW

Les ondes acoustiques de surface n'ont été mises à profit pour l'électronique que depuis une cinquantaine d'années, mais elles étaient connues depuis plus d'un siècle.

Les premières études qui ont été faites sur ce type d'onde n'ont en fait rien à voir avec l'électronique, puisqu'on les doit au physicien Lord Rayleigh. Ce dernier essayait de comprendre pourquoi, lors d'un séisme, on observait toujours une première secousse suivie quelque temps après d'une seconde secousse d'amplitude parfois plus importante que la première. En 1885 Lord Rayleigh [Rayleigh 1885] démontra que, dans un milieu semi-infini, une onde acoustique peut se propager au voisinage de la surface libre.

En 1963, Mortely [Mortely 1963] et Rowen [Rowen 1963] déposent chacun de leur côté un brevet dans lequel ils suggèrent une nouvelle technique permettant la génération d'ondes acoustiques de surface sur des substrats piézoélectriques. White et Voltmer démontrent expérimentalement ce principe en 1965, en réalisant la structure dite peigne interdigité. Ces peignes interdigités sont les transducteurs qui permettent, grâce à un signal électrique alternatif de générer une onde acoustique de surface sur un substrat piézoélectrique.

En 1969, Tancrell [Tancrell 1969] et al ont réalisé un filtre électronique à ondes de surface sur un substrat piézoélectrique de niobate de lithium ($LiNbO_3$), ayant une fréquence centrale de 60 MHz, et une bande passante de 20 MHz.

La période 1970 - 1985 correspond au développement et à l'expansion rapide de la technologie SAW [Caruyer 2005]. Les premières applications grand public ont fait leur apparition (filtre TV IF). Les efforts ont porté sur les matériaux, type d'ondes, le design des IDT, l'analyse théorique de nouvelles applications.

1 Etat de l'art sur les filtres SAW

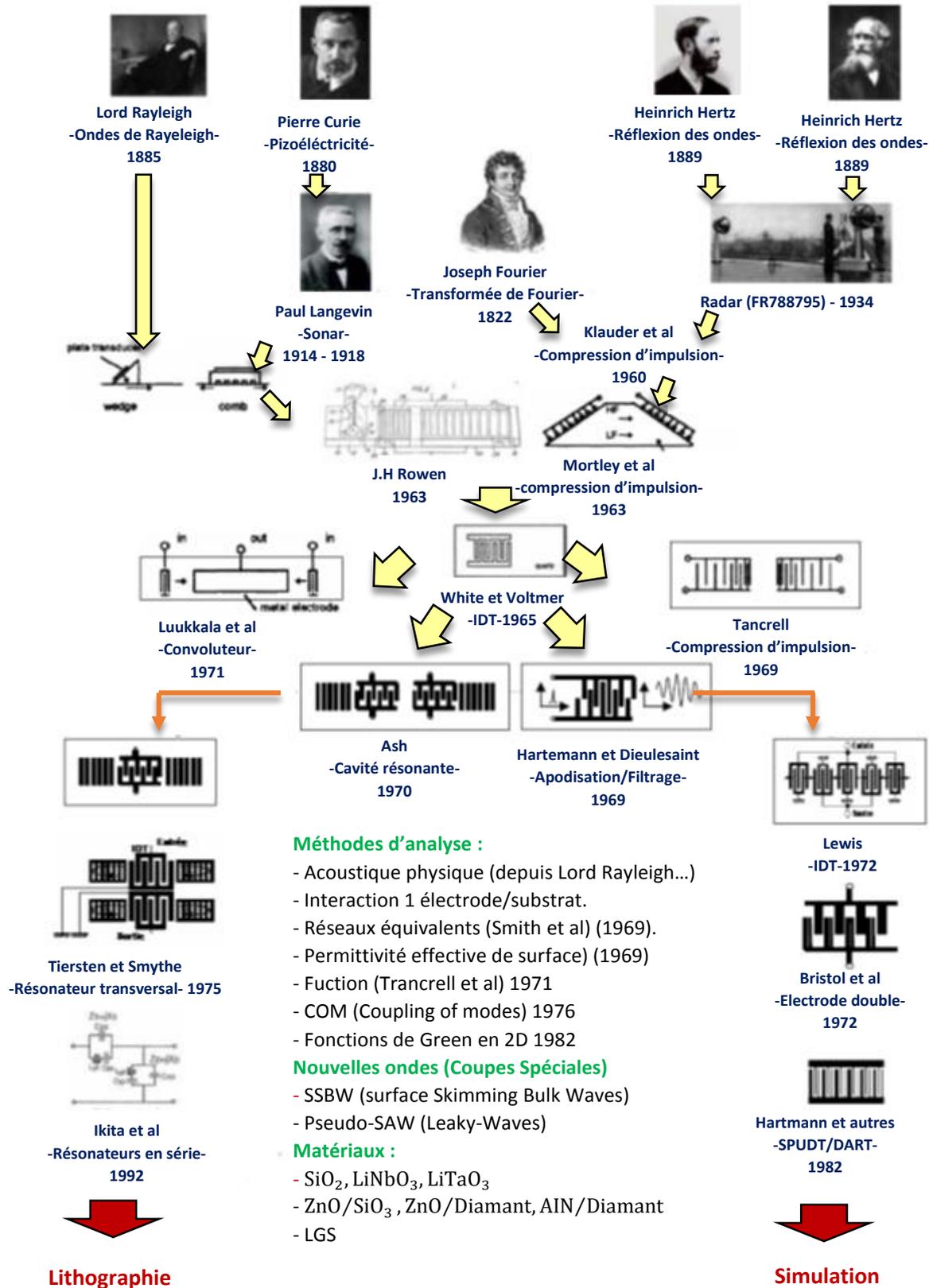


Figure 1.3: Arbre généalogique des SAW

La période de 1985 à nos jours, [Nicolay 2007] a été celle de la maturation et de l'explosion industrielle d'une technologie déjà bien installée, dynamisée par les besoins de l'industrie « Télécom » naissante. Afin de satisfaire aux exigences drastiques de cette industrie, téléphonie mobile en tête, les objectifs principaux ont été la réduction des prix, de la taille et des pertes d'insertion ainsi que l'augmentation de la fréquence de fonctionnement des dispositifs. L'histoire des dispositifs SAW est résumée sur la figure 1.3.

Dans ce contexte, les cristaux phononiques (CP) sont vus comme une brique technologique permettant l'amélioration des performances et du degré de compacité des composants acoustiques radio-fréquence. Ces objectifs ont été la source de beaucoup d'innovations qui seront détaillées dans le paragraphe 1.6.3.

1.4 / Généralités sur les ondes élastiques et la piézoélectricité

Un cristal est considéré comme un milieu ordonné d'atomes, d'ions ou de molécules. Le milieu cristallin se caractérise par la présence d'une infinité de points, appelés nœuds, ayant le même environnement atomique. L'ensemble de ces points constitue un réseau sur lequel sont disposés des motifs. L'agencement des atomes sur la maille élémentaire peut présenter des centres, ou bien des axes de symétrie qui permettent de classer les cristaux suivant leur degré de similitude. En effet, la symétrie de la maille élémentaire détermine le comportement élastique des solides.

1.4.1 / Contraintes

La contrainte est une pression qui s'exprime comme le rapport d'une force F_i sur une surface S_j , les termes T_{ij} correspondent à des contraintes tangentielles [Giraud 2007].

$$T_{ij} = \frac{F_i}{S_j} = T_{ji} \quad (1.1)$$

En dynamique, l'équation fondamentale s'écrit :

$$\frac{\partial T_{ij}}{\partial x_j} + f_i = \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} \quad (1.2)$$

Où f_i représentent les forces extérieures mises en jeu, u_i le déplacement mécanique et ρ la masse volumique.

1.4.2 / Déformation

Lorsqu'un solide est soumis à des forces extérieures, ses particules se déplacent les unes par rapport aux autres et créent une déformation macroscopique. Chaque point du solide subit donc un changement de position mesuré par un vecteur de déplacement \mathbf{u} . Le tenseur des déformations s'écrit comme suit:

$$S_{kl} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_k}{\partial x_l} + \frac{\partial u_l}{\partial x_k} \right) = S_{lk} \quad (1.3)$$

Où S représentent le tenseur de déformation et u le vecteur de déplacement.

1.4.3 / Relation Contraintes Déformation : Loi de Hooke

La loi de Hooke exprime le comportement des solides soumis à une déformation élastique de faible amplitude. Elle met en évidence la linéarité (contraintes et déformations) et l'élasticité des solides [Giraud 2007]. La loi de Hooke s'écrit comme suit:

$$T_{ij} = c_{ijkl} S_{kl} \quad (1.4)$$

Les tenseurs des contraintes, et des déformations étant symétriques ($T_{ij} = T_{ji}$) et ($S_{kl} = S_{lk}$), Les coefficients c_{ijkl} sont les composantes d'un tenseur de rang quatre appelé tenseur de rigidités élastiques. La loi de Hooke peut donc encore s'écrire :

$$T_{ij} = c_{ijkl} \frac{\partial u_k}{\partial x_l} \quad (1.5)$$

1.4.4 / Pour les matériaux isotropes

Un cristal soumis à une contrainte mécanique, suivant un axe donné, se déforme généralement de manière différente dans les autres directions. Ce comportement est dit anisotrope. Si sa maille élémentaire possède un axe de symétrie, toute direction obtenue par rotation autour de cet axe possédera le même comportement mécanique. Si le cristal répond de la même manière quelle que soit la direction de l'excitation, le matériau est dit isotrope [Royer 2000].

Les propriétés d'un matériau isotrope se caractérisent par deux grandeurs élastiques :

- Le module d'Young (E) ou module d'élasticité longitudinal qui représente la proportionnalité axiale et la déformation [Royer 2000].

$$E_x = \frac{T_1}{S_1} \text{ avec } T_2 \text{ à } T_6 \text{ nulles} \quad (1.6)$$

$$E_y = \frac{T_2}{S_2} \text{ avec } T_1 \text{ à } T_6 \text{ nulles} \quad (1.7)$$

$$E_z = \frac{T_3}{S_3} \text{ avec } T_1 \text{ à } T_6 \text{ nulles} \quad (1.8)$$

- Le coefficient de Poisson (ν) est défini comme étant le rapport entre la déformation longitudinale, et les déformations transversales.

$$v_{xy} = -\frac{S_1}{S_2} \text{ avec } T_2 \text{ à } T_6 \text{ nulles} \quad (1.9)$$

$$v_{yz} = -\frac{S_2}{S_3} \text{ avec } T_1 \text{ et } T_3 \text{ à } T_6 \text{ nulles} \quad (1.10)$$

$$v_{xz} = -\frac{S_1}{S_3} \text{ avec } T_1, T_2 \text{ et } T_4 \text{ à } T_6 \text{ nulles} \quad (1.11)$$

Ces deux paramètres représentent le comportement d'un matériau soumis à une contrainte axiale. Il est possible de le rendre plus complexe en considérant le tenseur des rigidités. Pour un matériau isotrope, seulement deux composantes sont indépendantes, et seuls les axes de traction /compression et les axes de la diagonale sont non nuls.

$$c_{\alpha\beta} = \begin{vmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{12} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{11} & c_{12} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{12} & c_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{c_{11}-c_{12}}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{c_{11}-c_{12}}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{c_{11}-c_{12}}{2} \end{vmatrix} \quad (1.12)$$

Avec : $c_{11} = E(1-\nu)/(1+\nu)(1-2\nu)$ et $c_{12} = E\nu/(1+\nu)(1-2\nu)$

1.4.5 / Pour les cristaux

La symétrie du tenseur des rigidités et le nombre de constantes élastiques indépendants sont directement conditionnées par la classe de symétrie du cristal.

Dans le cas d'une structure cristalline trigonale de classe $3m$, Le tenseur de rigidités $c_{\alpha\beta}$ s'écrit alors :

$$c_{\alpha\beta} = \begin{vmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{11} & c_{13} & -c_{14} & 0 & 0 \\ c_{13} & c_{13} & c_{33} & 0 & 0 & 0 \\ c_{14} & -c_{14} & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44} & c_{14} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{c_{11}-c_{12}}{2} \end{vmatrix} \quad (1.13)$$

1.4.6 / Couplage électrique mécanique : Milieu piézoélectrique

La déformation est liée à une contrainte qui déplace les ions de leur position initiale et crée donc un déséquilibre électrique qui se manifeste par l'apparition d'un champ électrique. Macroscopiquement, le cristal se polarise sous l'effet d'une contrainte mécanique. C'est l'effet piézoélectrique direct. A l'inverse, si on applique un champ électrique, le solide se déforme. C'est l'effet piézoélectrique inverse [Royer 2000].

La piézoélectricité est un phénomène qui dépend totalement de la symétrie du cristal employé. Certains cristaux possèdent des axes privilégiés utilisés en fonction de l'application visée. Du point de vue du formalisme mathématique, la piézoélectricité est décrite par le système d'équations suivant :

$$T_{ij} = c_{ijkl}^E S_{kl} - e_{lij} E_l \quad (1.14)$$

$$D_i = e_{ijkl} S_{kl} + \varepsilon_{jk}^S E_j \quad (1.15)$$

Les e_{ijkl} sont les composantes du tenseur piézoélectrique, ε_{jk}^S celles du tenseur diélectrique. Les E_j et D_i sont celles du champ de déplacement électrique, et du champ électrique respectivement.

Le tenseur piézoélectrique $e_{m\alpha}$ (C/m^2) pour un solide de classe est trigonale de classe $3m$ est égale à :

$$e_{m\alpha} = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & e_{14} & e_{15} \\ e_{15} & -e_{15} & 0 & e_{14} & 0 & 0 \\ e_{31} & e_{31} & e_{33} & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix} \quad (1.16)$$

Le tenseur diélectrique à déformation constante ε_{mp}^S ($10^{-11}F/m^2$) pour un solide de classe $3m$ est égal à :

$$\varepsilon_{mp}^S = \begin{vmatrix} \varepsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{11} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{33} \end{vmatrix} \quad (1.17)$$

1.5 / Différents types d'ondes

Nous avons vu précédemment que la propagation des ondes élastiques résultait des forces appliquées au solide, ainsi que des forces élastiques internes. On va donner quelques notions générales sur la propagation des ondes élastiques dans différentes configurations.

1.5.1 / Ondes de volume

Les ondes longitudinales ou P (de pression) qui se propagent dans un milieu homogène sont appelées ondes de volume. Elles existent dans tous les milieux (fluides et solides). Ce sont des ondes de compression, ou encore de polarisations longitudinales (la propagation se fait dans le même sens que l'onde elle-même) [Laude 2006].

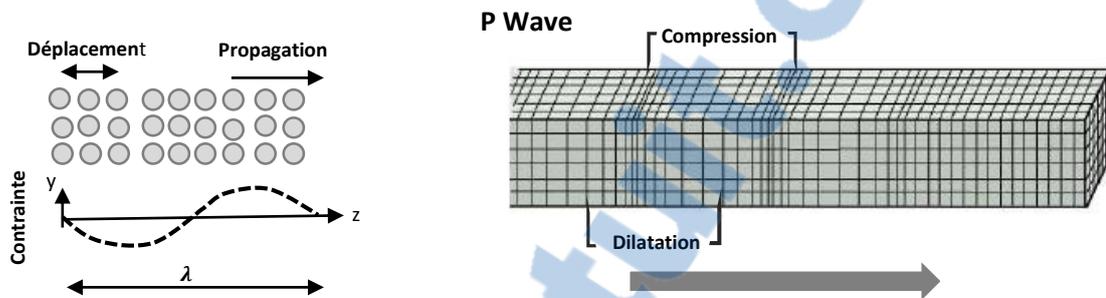


Figure 1.4: Représentation schématique des déplacements au cours de la propagation d'une onde élastique de polarisation longitudinale.

Les ondes transversales, ou ondes de cisaillement possèdent une polarisation perpendiculaire à la direction de propagation. Elles se propagent dans un milieu homogène : ce sont des ondes de volume.

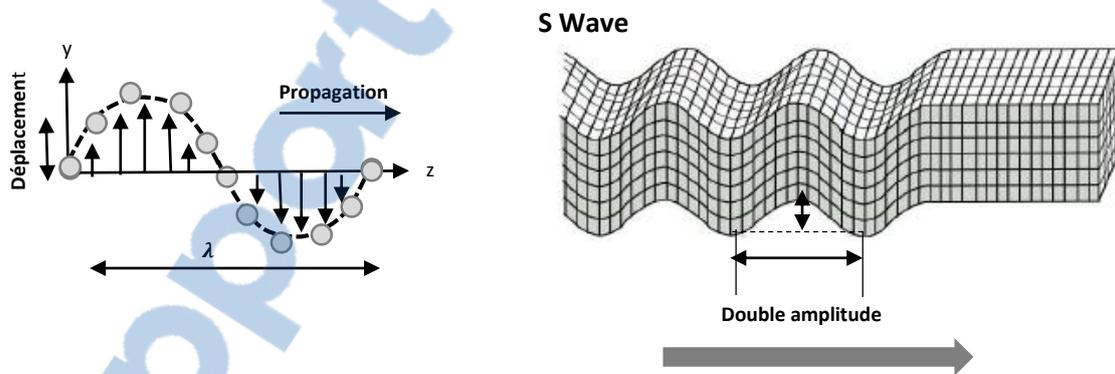


Figure 1.5: Représentation schématique des déplacements au cours de la propagation d'une onde élastique de polarisation transverse.

Ces ondes existent dans les matériaux isotropes, et suivant des directions particulières dans les matériaux anisotropes. En général, les ondes acoustiques sont des combinaisons linéaires de ces deux types d'ondes. Dans les matériaux piézoélectriques, une combinaison de trois ondes peut se propager : 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.

1.5.2 / Ondes de surface de type Rayleigh ou R

Les ondes de surface se propagent à la surface d'un milieu ou à l'interface entre deux milieux (onde d'interface). Elles existent dans les fluides, notamment dans l'eau (vague) et aussi dans les solides. La polarisation est elliptique. Le déplacement est lié à une variation de volume.

Il existe par ailleurs des pseudo-ondes de surface qui apparaissent dans certains cristaux. On peut concevoir ces ondes comme étant issues du couplage entre les ondes longitudinales et les ondes transverses. Une pseudo-onde de surface ne reste donc plus confinée proche du substrat. Elle présente de plus une atténuation non nulle lors de la propagation [Laude 2006].

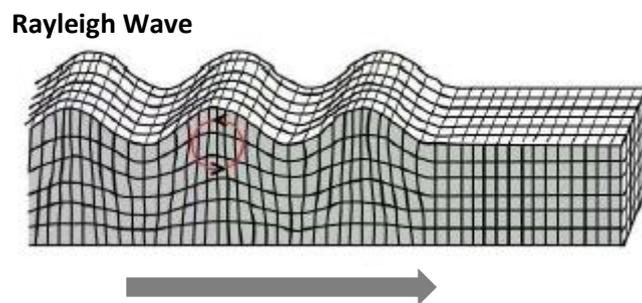


Figure 1.6: Représentation des déplacements au cours de la propagation d'une onde élastique de surface de type Rayleigh (polarisation elliptique)

1.5.3 / Ondes de Lamb

Lamb s'intéresse à la propagation d'ondes dans une plaque, correspondant à un milieu infini dans le plan, mais avec une épaisseur finie. En 1917, il publie une analyse théorique de ces ondes dites de Lamb [Lamb 1917].

On peut concevoir des modes de Lamb à partir de deux modes de Rayleigh qui se propagent chacun sur une des surfaces. La distance entre les deux surfaces étant de quelques longueurs d'ondes. On assiste à un couplage des ondes de surface donnant naissance à des ondes de Lamb [Gorisse 2011].

1.6 / Propagation des ondes dans les milieux périodiques

Avant de nous pencher plus en avant sur la notion de CP, nous introduisons ici quelques notions très générales sur la propagation des ondes dans les milieux périodiques. À ce titre, nous opérons un bref retour sur quelques principes de base de la physique de la matière condensée, mais aussi sur l'idée fondatrice de la diffraction de Bragg.

1.6.1 / Loi de Bragg

A l'origine, la loi de Bragg concernait la diffraction des rayons X par les atomes d'un cristal, et plus généralement à la diffraction d'ondes planes dans un milieu périodique. Lorsque les rayons X frappent chaque atome avec une phase différente : il y a rémission d'ondes de même fréquence [Benchabane 2006]. La loi de Bragg s'énonce ainsi :

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad (1.18)$$

Où n est un entier naturel, λ la longueur d'onde, d la distance entre 2 plans, θ l'angle entre le faisceau incident et la surface du cristal.

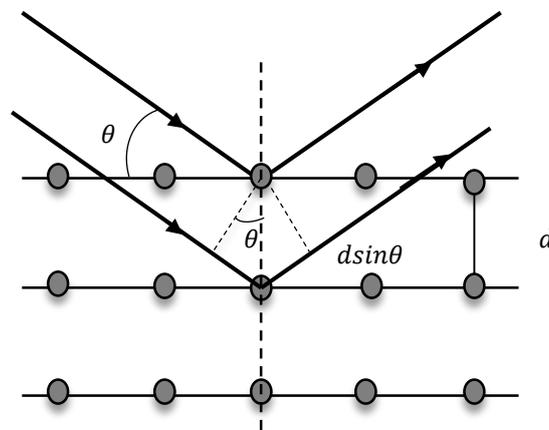


Figure 1.7: schéma expliquant la loi de Bragg.

Géométriquement la loi de Bragg considère la différence de chemin optique entre deux rayons incidents successifs. Lorsque cette différence est égale à un nombre entier de la longueur d'onde, alors les rayons peuvent se combiner pour donner des interférences constructives.

1.6.2 / Zone irréductible de Brillouin

En 1928 Bloch établit la théorie quantique de l'état solide en utilisant les ondes dites de Bloch pour décrire les états quantiques des électrons dans un milieu périodique. Ces ondes sont les solutions de l'équation de Schrödinger données sous la forme suivante :

$$\psi(x) = e^{ikx} \cdot u_{k\rightarrow}(x) \quad (1.19)$$

Où $\psi(x)$ est la fonction d'onde, k le nombre d'onde, et $u_{k\rightarrow}(x)$ une fonction de même période que le potentiel. Cette expression fait intervenir le nombre d'onde par la formule :

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (1.20)$$

Où λ désigne la longueur d'onde.



1 Etat de l'art sur les filtres SAW

Pour travailler avec le nombre d'onde, on passe dans une nouvelle base appelée base réciproque. Celle-ci est définie à partir des vecteurs de base du réseau direct qui correspondent au réseau du cristal phononique dans l'espace physique, grâce à la transformation suivante :

$$\vec{e}_j \cdot \vec{e}_j^* = 2\pi\delta_{ij} \quad (1.21)$$

Où les \vec{e}_j sont les vecteurs de la base du réseau direct, et les \vec{e}_j^* sont les vecteurs de la base réciproque, et δ_{ij} est le symbole de Kronecker.

Dans le réseau réciproque, appelé aussi zone de Brillouin, la variable n'est plus x mais le nombre d'onde. La période du cristal se trouve ainsi modifiée. Par exemple pour une maille carrée, a devient $\frac{2\pi}{a}$. Cette transformation est représentée sur la figure 1.8.

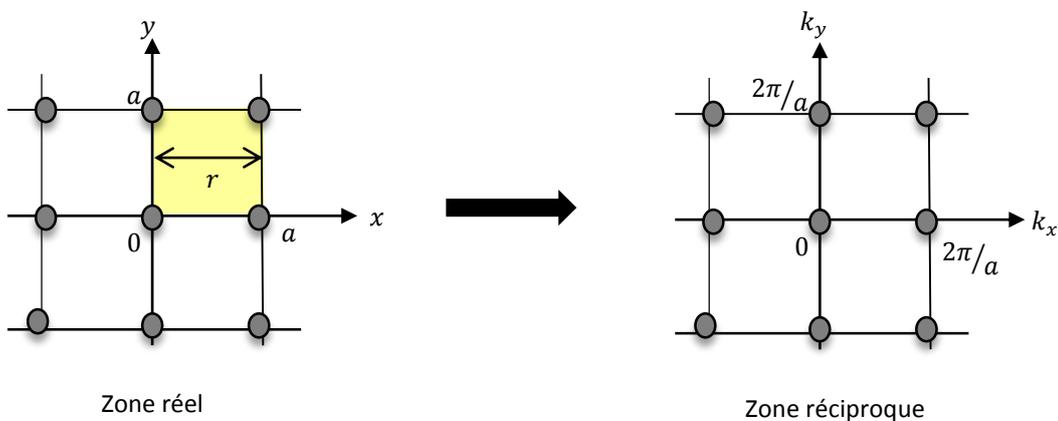


Figure 1.8: Passage de l'espace réel à l'espace réciproque.

Toutes les solutions recherchées se trouvent dans la première zone de Brillouin. Il est possible de diminuer encore la zone à étudier en utilisant les symétries des structures. Dans un premier temps les symétries de la structure permettent de se limiter à l'étude au quadrant k_x et k_y positifs. Mais si on utilise un matériau isotrope dans le plan, on peut réduire cette zone appelée zone irréductible de Brillouin qui est représentée sur la figure 1.9.

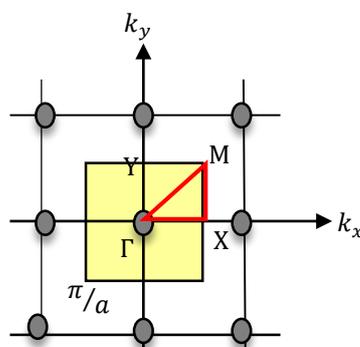


Figure 1.9: Première zone de Brillouin dans le domaine réciproque pour une organisation 2D.

En appliquant les conditions aux limites périodiques permettant le parcours du pourtour de la zone de Brillouin la partie encadrée en rouge sur la figure 1.9. Nous présentons ici le lien entre ces conditions périodiques et la zone de Brillouin pour une maille carrée.

Le tableau suivant regroupe les coordonnées des différents points de symétrie, dans le repère k et dans le repère γ .

	k	$(\gamma_x; \gamma_y)$
Γ	$(0; 0)$	$(0; 0)$
X	$(\frac{\pi}{a}; 0)$	$(0.5; 0)$
M	$(\frac{\pi}{a}; \frac{\pi}{a})$	$(0.5; 0.5)$
Y	$(0; \frac{\pi}{a})$	$(0; 0.5)$

Pour parcourir le pourtour de la zone de Brillouin réduite dans un matériau isotrope de maille carré, on fera donc varier γ_x entre 0 et 0.5 pendant que γ_y reste constant à 0, puis on laissera γ_y à 0.5 pendant que γ_x variera entre 0 et 0.5. Enfin, on fera varier γ_x et γ_y entre 0.5 et 0.

1.7 / Les Cristaux phononiques :

Les cristaux phononiques forment une branche nouvelle et dynamique du domaine des ondes acoustiques et élastiques qui présente un grand intérêt depuis 20 ans [Kushwaha, 1993]. Ce sont par définition des structures périodiques artificielles constituées d'au moins deux matériaux différents. Ils sont capables de prohiber la propagation des ondes acoustiques dans certaines directions et gammes de fréquences, par le biais de la réflexion de Bragg ou par le phénomène de la résonance locale.

1.7.1 / Applications des cristaux phononiques à bandes interdites de Bragg :

La première étude expérimentale du filtrage sonore par une structure périodique artificielle ou un cristal phononique a été réalisée en 1995 par Francisco Meseguer et ses collaborateurs [Sigalas 1995] sur une sculpture minimaliste d'Eusebio Sempere (1923-1958) qui se trouve dans un jardin de Madrid.

Cette sculpture est constituée d'un agencement périodique carré de tiges cylindriques en acier, ayant des hauteurs différentes, et déposées sur un support rotatif. Elle donne lieu à un beau effet visuel lorsque la lumière du soleil se réfléchit sur les barres métalliques voir figure 1.10.



Figure 1.10: Sculpture de Eusebio Sempere (1923-1958) située à Madrid. [Sigalas 1995]

En plaçant des haut-parleurs et microphones autour de la sculpture, et donc perpendiculairement aux axes des tiges métalliques, Martinez-Sala et al ont pu mesurer la transmission acoustique de la sculpture suivant la direction de propagation de l'onde acoustique par rapport à l'arrangement carré des tiges. Une forte atténuation de l'onde acoustique a été alors observée pour une fréquence de 1670 Hz suivant une direction de propagation bien déterminée. Une première mise en évidence expérimentale d'une bande interdite phononique a ainsi vu le jour.

En 2005, l'équipe de Wu [Wu 2005] a pu étudier la propagation élastique de surface dans un CP bidimensionnel, conçu à une échelle micrométrique (périodicité de $10\mu\text{m}$) et constitué d'un arrangement carré de trous d'air dans un substrat de silicium. La fabrication de cette structure a été réalisée grâce à la technologie MEMS, et l'excitation ainsi que la détection de l'onde de surface ont été faites au moyen des transducteurs interdigités sur une couche mince pizoélectrique en ZnO (figure 1.11). Avec des paramètres géométriques bien choisis. La bande interdite est prédite théoriquement entre $194,64\text{ MHz}$ et $223,53\text{ MHz}$. Ce dispositif est le premier filtre à base de CP, ce qui constitue une première voie pour des applications radio fréquence à base d'ondes acoustiques de surface.

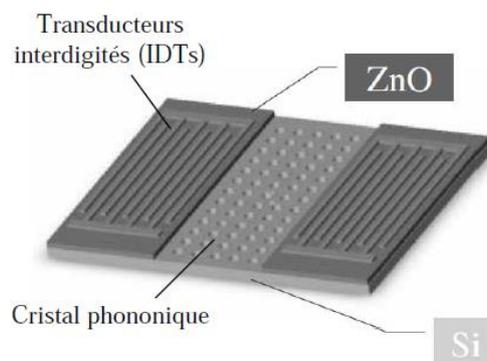


Figure 1.11: Schéma du dispositif phononique à ondes de surface. [Wu 2005].

En 2006, Sarrah Benchabane [Benchabane 2006] présente dans sa thèse des travaux sur les CP à l'échelle microscopique en utilisant les SAW. Afin de simplifier la structure elle réalise un CP directement dans un matériau piézoélectrique. Elle utilise un substrat de niobate de lithium ($LiNbO_3$) de coupe Y pour obtenir le meilleur couplage électromécanique, avec les pertes les plus faibles possibles. Elle perce des trous d'un diamètre de $9\ \mu m$, et ayant une profondeur d'environ de $10\ \mu m$ pour une gamme de fréquence entre située entre 203 et 226 MHz. Toutefois, aux plus hautes fréquences une retransmission n'est pas observée.

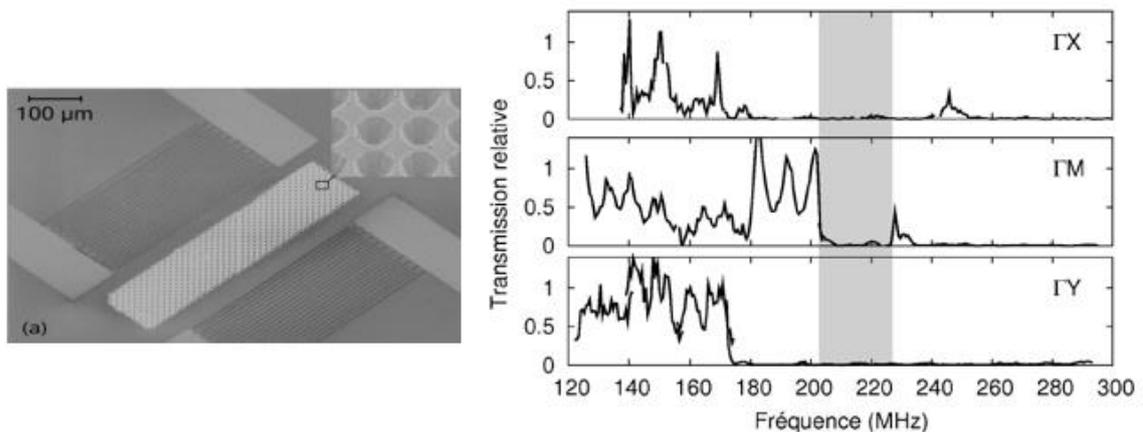


Figure 1.12: transmission relative d'un CP constitué de trous percés à la surface d'un substrat de LiNbO₃. [Benchabane 2006]

L'explication qui peut être donnée est la suivante : la gravure des trous dans le $LiNbO_3$ est difficile et ne peut se faire que de manière conique. Cette conicité, alliée au fait que les trous ne soient profonds que d'une dizaine de micromètres, favorise le couplage entre les ondes de surface et des modes de volume. Cela provoque des pertes par rayonnement dans le substrat et, par conséquent, diminue la puissance transmise d'un transducteur à l'autre. La détection optique a par ailleurs montré qu'au-dessus de la bande interdite, les ondes acoustiques de surface peuvent être diffractées.

Afin de remédier aux problèmes de rayonnement des ondes de surfaces dans le volume, les plaques phononiques ont été introduites.

On peut citer les travaux de Marie Gorisse [Gorisse 2011]. En 2011 elle présente ses réalisations sur une membrane, en utilisant les ondes de Lamb. La membrane est constituée d'une matrice de trous percés dans le nitrure d'aluminium (AlN). L'objectif étant d'obtenir des fréquences allant jusqu'à environ 1GHz. Elle montre que les principaux avantages par rapport aux SAW sont que l'énergie ne peut pas fuir dans le substrat, grâce à la lame d'air, et que les structures réalisées sont de taille réduite.

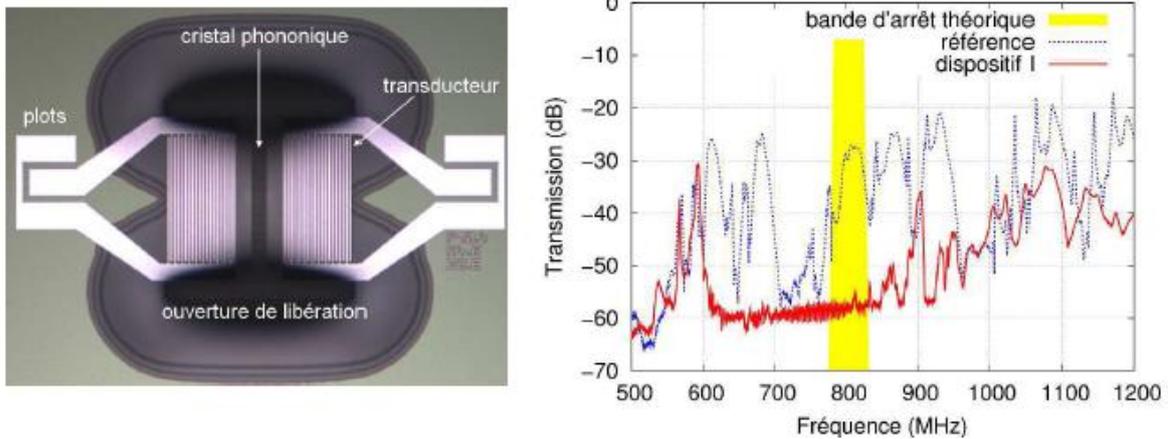


Figure 13: Réponse électrique en transmission des dispositifs SAW [Gorisse 2011]

D'autres équipes présentent des études théoriques sur les SAW à base de CP sur membrane, notamment l'équipe de Georgia Tech représentée par Mohammadi [Mouhammadi 2008]. Il a présenté en 2008 une structure constituée de trous d'air réalisés dans une matrice de silicium, utilisant une excitation par l'oxyde de zinc (ZnO). Avec un paramètre de maille de $15 \mu m$ il a obtenu une bande d'arrêt autour de $150 MHz$. La Figure (1.14) montre cette bande d'arrêt. On a ici la transmission mesurée électriquement à travers le CP en utilisant des peignes interdigités. On peut alors observer une bonne transmission en dehors de la bande d'arrêt, avec des pertes d'insertion faibles en-dessous de la bande d'arrêt (de quelques dB). On a ensuite une atténuation d'environ 35 dB dans la bande d'arrêt. Au-dessus de la bande d'arrêt on retrouve un signal plus brouillé, mais avec dans tous les cas une atténuation moins importante que dans la bande d'arrêt.

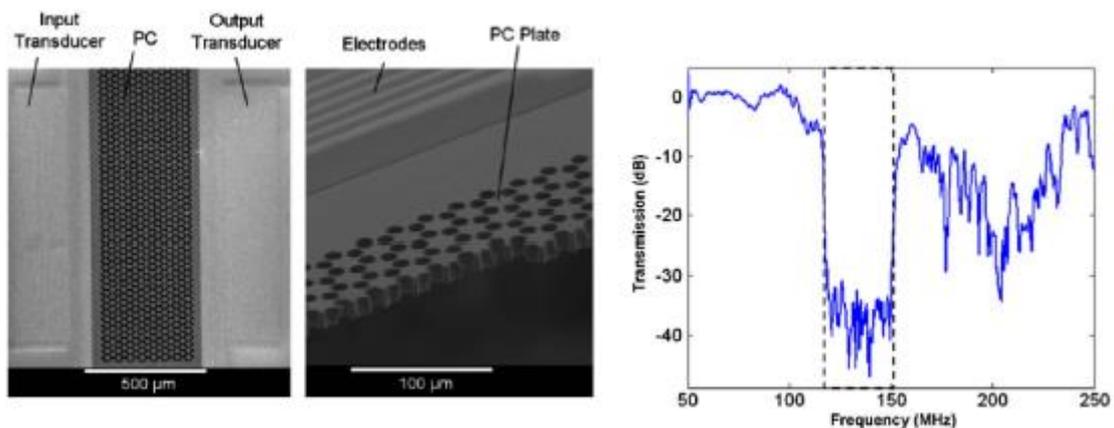


Figure 1.14: Transmission normalisée moyenne en fonction de la fréquence à travers un CP constitué d'un agencement en nid d'abeille de trous dans du silicium. [Mouhammadi 2008]

1.7.2 / Bandes interdites à résonance locale :

Nous avons vu jusqu'ici montré que les CP permettaient l'apparition de bandes d'arrêt. Mais avec l'avancée des recherches concernant les limitations des SAW à base de CP, les diagrammes de bandes sont modifiés de telle façon qu'il est possible, à certaines fréquences, d'obtenir des modes dont le facteur $v_g \cdot k$ est négatif, avec v_g la vitesse de groupe de l'onde et k son vecteur d'onde. Il est alors possible de réaliser un métamatériau présentant une réfraction négative pour les ondes acoustiques.

Contrairement au mécanisme de Bragg, la création d'une telle bande interdite phononique par le mécanisme de la résonance locale ne dépend que très peu de la périodicité et de la symétrie de la structure du CP [Du 2016]. Dans ce cas, la bande interdite peut être ouverte à une fréquence deux ordres de grandeur inférieure à celle permise par la diffusion de Bragg.

En 2000, Liu *et al* [Liu 2000] ont mis en œuvre la première structure phononique aux propriétés dispersives qui sortent de l'ordinaire. En effet, grâce à leur structure périodique, ils ont montré qu'une bande interdite peut exister pour des ondes ayant une longueur d'onde largement supérieure à la périodicité du cristal, lequel comportement est dû au phénomène de résonance locale.

Dans le CP conçu par Liu *et al*, les éléments de périodicité sont constitués de résonateurs ayant des modes de résonance propres qui se situent à de très basses fréquences en raison de l'utilisation d'un matériau très mou. Chaque résonateur est constitué d'un cœur massif en plomb enrobé par un élastomère élastiquement très mou, comparé aux autres matériaux constituant le CP. Ces résonateurs sont arrangés périodiquement suivant une structure cubique simple dans une matrice en époxy (figure 1.15).

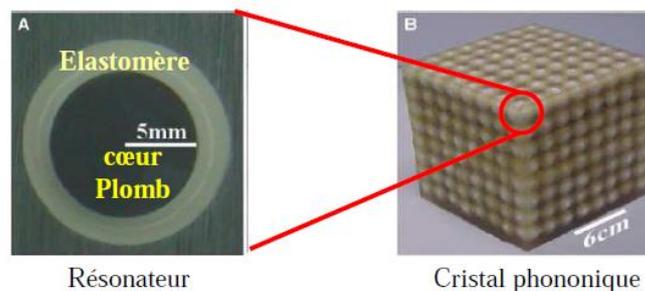


Figure 1.15: (A gauche) Résonateur sphérique constitué d'un cœur en plomb enrobé par élastomère très mou. (A droite) Cristal tridimensionnel à résonance locale.

L'ensemble élastomère-plomb se comporte comme un système de ressort lié à une masse, formant ainsi un résonateur ayant des modes de résonance propres à de très basses fréquences. Le principe d'ouverture des bandes interdites dans ce type de structures repose sur Résonateur Cristal phononique avec le couplage entre les modes de résonance des résonateurs (modes localisés) et les modes de volume qui se propagent dans le CP. Lorsqu'une onde élastique se propage dans le milieu phononique avec une fréquence qui correspond à la fréquence de résonateurs, ces derniers entrent en interaction avec elle. Sous certaines conditions, ce couplage entraîne l'atténuation de l'onde. Ce mécanisme de résonance permet ainsi la création de bandes interdites localisées aux très basses fréquences, là où les longueurs d'ondes dans l'époxy (la matrice) dépassent de loin la périodicité du CP.

Oudich et al [Oudich 2010] ont mis en évidence l'existence d'une bande interdite pour les ondes de surface dans le régime hypersonique grâce au mécanisme de résonance locale. La structure est composée d'un substrat semi infini en diamant sur lequel est déposé un arrangement périodique carré de cylindres d'aluminium. Ils ont démontré que les bandes plates ne prennent naissance qu'à partir d'une certaine hauteur de piliers, pour un rayon des piliers ainsi qu'une épaisseur des plaques maintenus fixes.

On 2011, Achaoui [Achaoui 2011] et al, ont étudié l'influence d'une répartition de piliers en nickel sur un substrat en niobate de lithium, dont la hauteur et le rayon relatif sont respectivement $h/a = 0,47$ et $r/a = 0,32$. La figure 1.16 est une image prise au microscope optique ainsi qu'un agrandissement des piliers obtenue avec un microscope électronique à balayage.

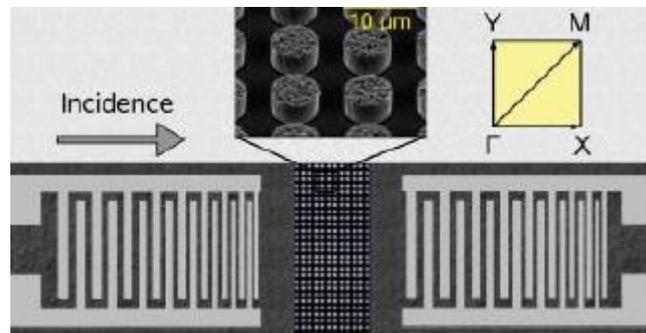


Figure 1.16: image prise au microscope optique ainsi qu'un agrandissement des piliers obtenue avec un microscope électronique à balayage. [Achaoui 2011]

La génération et la détection des ondes de surface ont été réalisées grâce à des transducteurs à peignes interdigités en utilisant la piézoélectricité du substrat. Ils ont optés lors de cette étude pour des peignes à pas variable afin de caractériser les échantillons sur une large bande de fréquence allant de 70 MHz jusqu'à 150 MHz.

Conclusion

Les CP et métamatériaux acoustiques sont des matériaux artificiels qui présentent des bandes de fréquences fréquentielles interdites pour toute propagation d'ondes élastiques ou acoustiques. L'apparition des bandes interdites peut s'expliquer généralement par deux mécanismes qui sont la diffraction de Bragg (due à la périodicité), et les résonances locales de chaque élément. La diffraction de Bragg donne naissance à des interférences destructives lorsque la longueur d'onde λ_0 est du même ordre de grandeur que la période a des inclusions introduites dans le matériau, c'est-à-dire lorsque $a \simeq \lambda_0$. En revanche, le mécanisme de résonances locales est basé sur la possibilité d'obtenir des bandes interdites inférieures au seuil de la diffraction de Bragg sans pour autant augmenter la taille élémentaire du cristal.

Dans ce premier chapitre nous avons donné les fondements théoriques, avec la mise en évidence expérimentale des différents comportements remarquables de ces cristaux. Certaines propriétés sur la propagation des ondes élastiques de surface dans les structures périodiques dues à la résonance locale ont été introduites.

Rapport-Gratuit.com

Modélisation, Fabrication, Caractérisation

Introduction

Rappelons que les cristaux phononiques (CP) sont des structures périodiques avec au moins deux matériaux de masses volumiques différentes. Ils possèdent un domaine de fréquences interdites pour la propagation des ondes. Les phénomènes mis en jeu sont en général dépendants, et proches de la bande interdite lorsque la longueur d'onde est proche de la périodicité. Face à cette limite, les chercheurs se sont orientés pendant cette dernière décennie vers d'autres concepts qui font intervenir les résonances locales, et ceci lorsque la période du CP est inférieure à la longueur d'onde.

L'apparition des bandes interdites dans un matériau peut s'expliquer en général par deux mécanismes qui sont la diffraction de Bragg, et les résonances locales. La diffraction de Bragg donne naissance à des interférences destructives lorsque la longueur d'onde d'excitation λ_0 est du même ordre de grandeur que la période a des inclusions introduites dans le matériau c'est-à-dire lorsque $\lambda_0 \cong a$. Il est possible d'obtenir des bandes interdites à des fréquences inférieures au seuil de la diffraction de Bragg sans faire varier la taille de la maille élémentaire : c'est le mécanisme de résonances locales.

C'est dans ce contexte que se situe la problématique de mon stage. En effet, mes travaux portent sur l'interaction des ondes élastiques de surface (SAW) avec des structures de type piliers, et qui sont arrangés suivant différentes symétries cristallographiques. Les piliers constitueront les résonateurs de la structure étudiée.

2.1/ Modélisation par la méthode des éléments finis (FEM)

Nous cherchons tout d'abord à localiser les bandes d'arrêt pour un CP composé de piliers cylindriques en nickel sur un substrat semi-infini en tantalate de lithium. Pour cela le plus simple est de tracer les diagrammes de bandes, partant de la méthode de calcul choisie. Nous décrivons la démarche à suivre pour obtenir ces diagrammes de bandes.

Il existe plusieurs méthodes de modélisation des CP, notamment la méthode des différences finies (FDTD, pour *Finite Difference Time Domain*), la méthode de développement par ondes planes (PWE, pour *Plane Wave Expansion*) et la méthode d'éléments finis (FEM, pour *Finite Element Method*).

Le logiciel de simulation adaptable à mon étude est celui par élément finis. Nous avons donc choisi de nous tourner vers ce type de modélisation. Toutes les simulations que nous montrerons par la suite sont réalisées avec Matlab sous environnement Comsol Multiphysics® 3.4.

La méthode par éléments finis utilise une interpolation polynômiale des champs acoustiques entre les différents nœuds du maillage. Elle permet d'obtenir aussi bien la structure de bandes que la transmission à travers un CP. Son principal défaut réside dans la durée des calculs, surtout quand il s'agit d'une structure complexe en transmission, pour laquelle les maillages peuvent rapidement atteindre plusieurs centaines de milliers de nœuds.

2.2/ Calcul de la structure de bandes :

Le logiciel de simulation par éléments finis que nous venons d'introduire permet la modélisation de systèmes complexes mettant en jeu différents phénomènes physiques. Dans notre cas, il nous faut pouvoir prendre en compte l'effet piézoélectrique, donc un couplage entre phénomènes électrique et mécaniques, ce qui est possible avec le module piézoélectrique du module acoustique du logiciel.

La structure que je souhaite modéliser est un substrat semi-infini en tantalate de lithium ($LiTaO_3$) sur lequel est déposé un arrangement périodique carré de cylindres de nickel (Ni). La figure 2.1 présente la structure dans l'espace tridimensionnel où la direction Z est parallèle aux axes des cylindres. Le pas du réseau étant a , le rayon des cylindres est r , la hauteur des cylindres est h_p , et h l'épaisseur du substrat.

Pour obtenir la structure de bandes d'un CP, je vais chercher à obtenir les fréquences propres de la structure en fonction du vecteur d'onde. Pour cela, je conçois ma structure, ensuite j'applique des conditions aux limites fixes afin d'éliminer les modes de surface de la surface inférieure du substrat. Il est bien entendu qu'on s'intéresse uniquement aux modes se propageant à la surface supérieure contenant les résonateurs. Par ailleurs, puisqu'un système semi-infini présente un milieu de propagation à la fois pour les modes de surface et les modes de volume, j'ai utilisé le « Cône du son ».

2 Modélisation, Fabrication, Caractérisation

Le cône du son permet d'isoler les modes qui se propagent dans le volume d'un milieu, qui sera dans notre cas le tantalate de lithium. Les limites de ce cône, suivant les différentes directions de propagation, sont déterminées en calculant les plus faibles vitesses des modes de volume. Ainsi, tous les modes de volume ayant une vitesse dépassant ces limites tombent dans le cône. Ce dernier constitue ainsi une zone radiative associée aux ondes de volume qui se propagent dans le substrat.

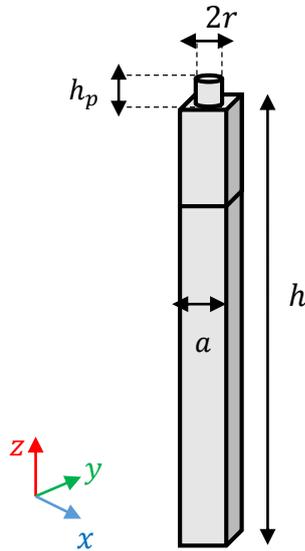


Figure 2.17: cellule élémentaire utilisée pour le calcul des structures de bandes dans les trois directions de l'espace.

Compte tenu de la périodicité de la structure dans les directions X et Y de l'espace, nous avons limité notre domaine de calcul à la cellule unitaire en tenant compte des conditions de périodicité, appelées conditions de Bloch, qui portent sur les déplacements dans chaque direction et sont appliquées comme indiqué sur la figure 2.2.

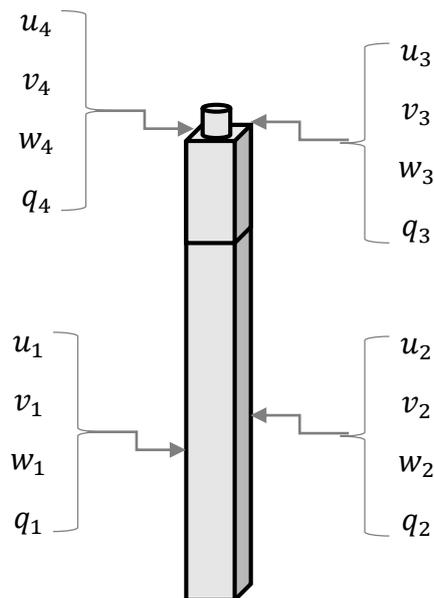


Figure 2.2 : Conditions périodiques appliquées sur la maille élémentaire

2 Modélisation, Fabrication, Caractérisation

On impose donc comme conditions aux limites des relations de phase entre les champs électromécaniques présents sur deux points face-à-face appartenant à deux faces opposées de la maille élémentaires :

$$u_3 = u_1 e^{jk_x} \quad (2.1)$$

$$v_3 = v_1 e^{jk_x} \quad (2.2)$$

$$w_3 = w_1 e^{jk_x} \quad (2.3)$$

$$q_3 = q_1 e^{jk_x} \quad (2.4)$$

$$u_4 = u_2 e^{jk_y} \quad (2.5)$$

$$v_4 = v_2 e^{jk_y} \quad (2.6)$$

$$w_4 = w_2 e^{jk_y} \quad (2.7)$$

$$q_4 = q_2 e^{jk_y} \quad (2.8)$$

Avec u et v les déplacements dans le plan horizontal, w le déplacement vertical, q le potentiel électrique et k le nombre d'onde.

Ces conditions de périodicité permettant en particulier de faire varier le vecteur d'onde, que l'on cherche à faire parcourir le pourtour de la première zone de Brillouin.

On cherche ensuite à mailler la structure comme indiqué sur la figure 2.3, c'est-à-dire à la décomposer en éléments. Plusieurs critères sont à respecter ici : il faut une discrétisation suffisamment fine pour que le résultat approche avec le plus de précision possible à la solution physique, tout en conservant un nombre limité pour que les calculs ne soient pas trop longs. Un maillage tridimensionnel a été utilisé.

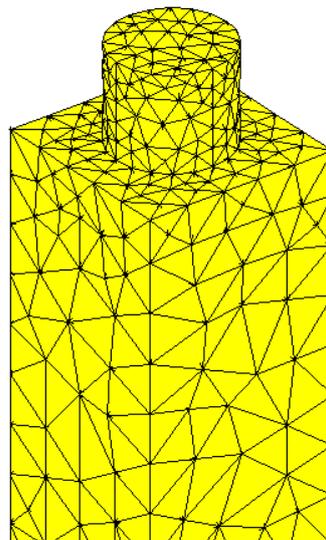


Figure 2.3 : maillage de type triangulaire.

2 Modélisation, Fabrication, Caractérisation

Afin d'obtenir un diagramme de bandes il nous suffit de déterminer les fréquences propres pour chaque vecteur d'onde. Pour les faire varier j'ai utilisé un programme Matlab développé par Abdelkrim Khelif et Mahmoud Addouche. Ce programme réalise une boucle qui incrémente les valeurs des paramètres et qui permet de sauvegarder dans un fichier les fréquences propres obtenues avant de relancer la simulation avec les paramètres suivants. Ce programme permet de décrire le pourtour de la première zone de Brillouin.

Afin de valider cette technique, j'ai comparé mes résultats avec ceux obtenus par Younes Achaoui [Achaoui 2011] par la méthode des ondes planes.

Pour cela j'ai modélisé un CP composé de piliers en niobate de lithium sur un substrat de niobate coupe Y+128. Le pas est $a = 10\mu m$, la hauteur des piliers est $h_p = 4,7\mu m$. La figure 2.4 présente une comparaison entre les diagrammes de bandes.

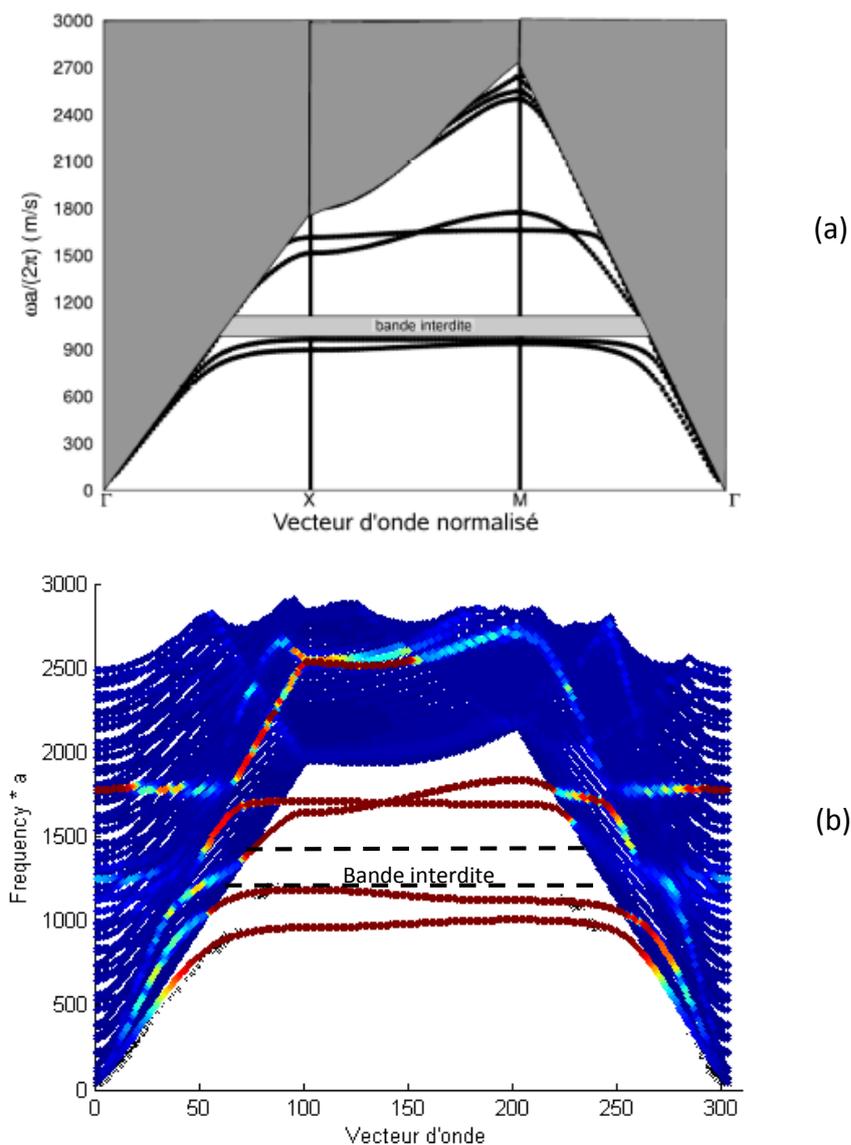


Figure 2.4 : Comparaison entre les deux diagrammes de bandes composées de piliers cylindriques en niobate de lithium sur un substrat en niobate de lithium, (a) par [Achaoui 2011], (b) par éléments finis.

Sur cette figure, on peut remarquer que les deux simulations se superposent correctement même si on peut noter quelques différences ($f.a = 1040 m/s$ à $1246 m/s$ au lieu de $f.a = 950 m/s$ à $1350 m/s$) qui sont dues probablement à des valeurs légèrement différentes prises pour les constantes élastiques non indiquée par l'auteur.

2.3/ Choix des matériaux

Le choix d'un matériau par rapport à un autre dépend de l'application visée (La vitesse de propagation, la type d'onde, le coefficient de couplage électromécanique). Dans notre cas on a choisi le tantalate de lithium.

La structure cristalline du tantalate de lithium (figure 2.5) est décrite comme un empilement de plans composés de trois atomes d'oxygène, deux plans formant un octaèdre. L'arrangement des cations au sein des octaèdres se présente sous la forme d'une séquence de tantalate libre.

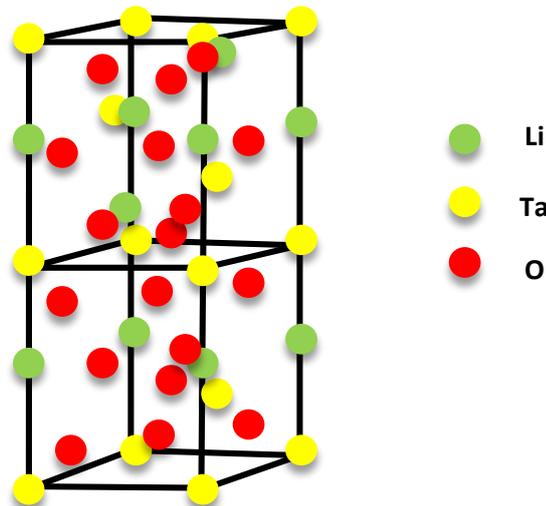


Figure 2.5 : structure cristalline du tantalate de lithium.

Le tantalate de lithium est un matériau fortement anisotrope sur le plan de la propagation d'ondes acoustiques, présentant de ce fait des variations de vitesses de propagation conséquentes suivant les axes considérés. Il bénéficie néanmoins des propriétés de symétrie des matériaux de la classe cristallographique trigonale $3m$ à laquelle il appartient. Il est transparent à des longueurs d'onde comprise entre $400 nm$ et $4500nm$, son point de fusion se situe à $1650^{\circ}C$ et il a une densité de $7,465 \times 10^3 kg/m^3$.

Le tantalate de lithium est un cristal biréfringent uniaxe. Il possède des propriétés non linéaires, ferroélectrique, pyroélectrique, photo-élastique, piézoélectrique uniques, combinées avec une bonne stabilité mécanique et chimique.

Une fois le matériau choisi, ces paramètres varient d'une coupe cristallographique à une autre. Notre objectif est la démonstration des bandes interdites pour les ondes de surface

dans un CP composé de piliers en nickel disposés avec un arrangement carré sur une plaque de tantalate de lithium. Par ailleurs, étant donné que la génération des ondes acoustiques de surface se fait avec des sources à base de peignes interdigités, et afin de réduire au maximum le nombre de doigts utilisés dans le dispositif, il est préférable d'utiliser un matériau à fort coefficient de couplage électromécanique.

Notre choix s'est ainsi porté sur la coupe $36^\circ Y$ du tantalate de lithium. Cette coupe répond en effet à notre attente.

- La coupe $36^\circ Y$ $LiTaO_3$ possède un couplage électromécanique élevé ($k^2 = 7,25\%$)

2.4/ Structures de bandes et de bandes interdites

Les dispositifs SAW offrent une plus grande facilité de fabrication et sont largement utilisées pour le filtrage en télécommunications. De plus, les ondes de surface ont l'avantage d'être facilement générées et détectées en utilisant des matériaux piézoélectriques. Ainsi la création d'un CPRL à ondes de surface permettra d'élargir encore plus le champ de notre application, mais aussi d'appréhender la physique relative à la propagation dans les structures phononiques. Dans ce qui suit, je vais présenter les résultats qui se rapportent à la propagation des ondes acoustiques de surface pour un domaine fréquentiel allant typiquement de 50MHz à 260MHz.

Le calcul de la structure de bandes des ondes de surface pour le CP composé de piliers tantalate de lithium/nickel a été réalisé pour différentes valeurs des paramètres géométriques. La figure 2.7 illustre les résultats obtenus pour trois échantillons :

- $a = 10\mu m$, $h_p/a = 0,5\mu m$, $r_p/a = 0,35\mu m$.
- $a = 7\mu m$, $h_p/a = 0,71\mu m$, $r_p/a = 0,45\mu m$.
- $a = 7\mu m$, $h_p/a = 0,71\mu m$, $r_p/a = 0,35\mu m$.

La figure 2.6 est une photo prise avec le microscope électronique (MEB) à balayage illustrant la forme réelle des piliers.

Les bandes interdites illustrées sur la figure 2.7 sont complètes pour les ondes guidées à la surface du substrat :

- Pour le premier échantillon : $fa = 790 m/s$ à $1232 m/s$.
- Pour le deuxième échantillon : $fa = 570 m/s$ à $920 m/s$.
- Pour le premier échantillon : $fa = 509 m/s$ à $781 m/s$.

De tels modes guidés existent seulement sous le cône du son comme par exemple dans le cas des ondes de Rayleigh sur une surface homogène. Cela veut dire que lorsque l'onde de Rayleigh est incidente sur le réseau des piliers, elle est soit convertie vers les modes surface-piliers à la même fréquence soit réfléchi par le réseau si la fréquence est une fréquence de la bande interdite aux modes guidés de surface.

2 Modélisation, Fabrication, Caractérisation

La première observation faite sur les structures de bandes de cette figure concerne la présence de bandes plates aux modes de résonance locale. Ces bandes sont créées par le mécanisme de résonance locale qui est dû au contraste élastique très important entre le tantalate de lithium et le nickel. Nous pouvons aussi remarquer que les largeurs des bandes interdites repérées dans ces structures sont faibles comparées à celles obtenues dans le cas des structures basées sur le mécanisme de Bragg. Ceci est l'une des caractéristiques d'une bande interdite créée par le mécanisme de résonance locale.

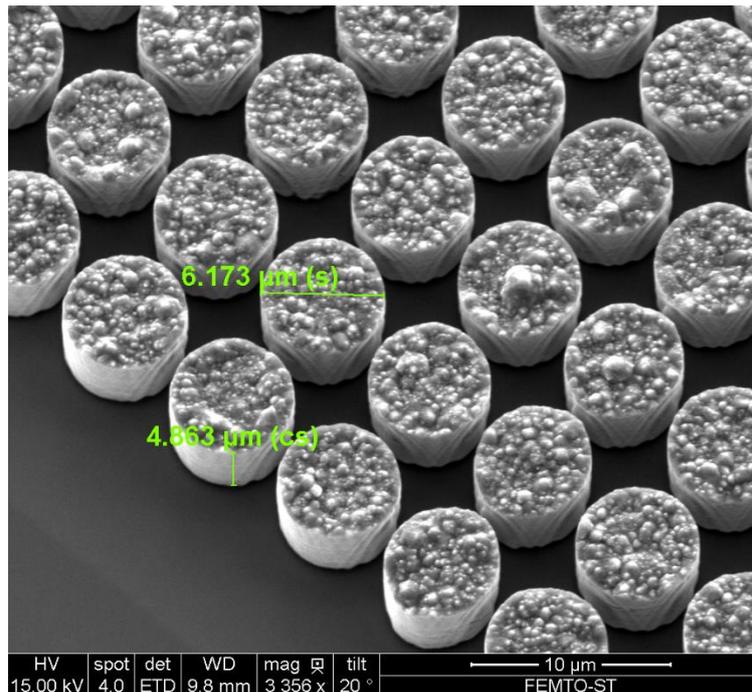


Figure 2.6 : photo prise avec le microscope électronique à balayage illustrant la forme réelle des piliers

2 Modélisation, Fabrication, Caractérisation

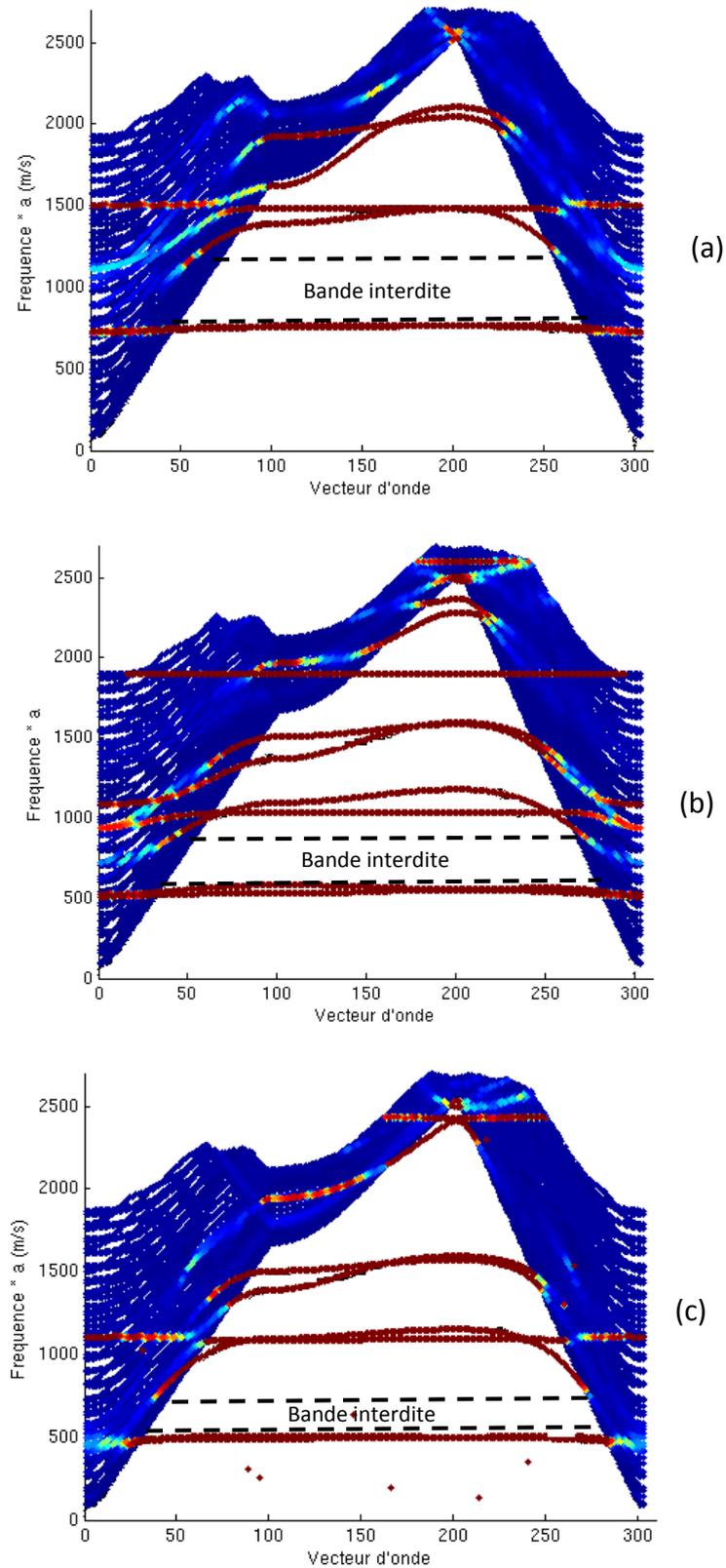


Figure 2.7 : Structures de bandes d'un CP composé de piliers cylindriques en nickel sur un substrat en tantalate de lithium, calculées le long des directions de haute symétrie de la zone de Brillouin. (a) $a = 10\mu\text{m}$, $h_p/a = 0,5\mu\text{m}$, $r_p/a = 0,35\mu\text{m}$, (b) $a = 7\mu\text{m}$, $h_p/a = 0,71\mu\text{m}$, $r_p/a = 0,45\mu\text{m}$, (c) $a = 7\mu\text{m}$, $h_p/a = 0,71\mu\text{m}$, $r_p/a = 0,35\mu\text{m}$.

2.5/ Influence de la symétrie du réseau

La propagation des ondes élastiques dans les matériaux structurés est différente de celle dans les matériaux homogènes. Dans les matériaux homogènes les ondes de surface sont généralement non dispersives. En revanche dans un matériau structuré qu'on qualifiera d'inhomogène, la propagation des ondes peut présenter des singularités : forte dispersion, vitesse de groupe négative, branche plate dans le diagramme de bandes et la présence de bandes interdites.

Par ailleurs, ce type de bandes interdites ne dépend ni de la périodicité ni de la symétrie du CP. En effet, et à titre d'exemple, nous pouvons citer les travaux de Yu Du [Yu 2016]. Ce dernier a démontré cet effet pour les ondes acoustiques de surface, différentes symétries du réseau ont été considérées, à savoir un réseau carré, et un réseau triangulaire. Lors de cette étude il a relevé le comportement des bandes interdites en fonction de ces différentes symétries.

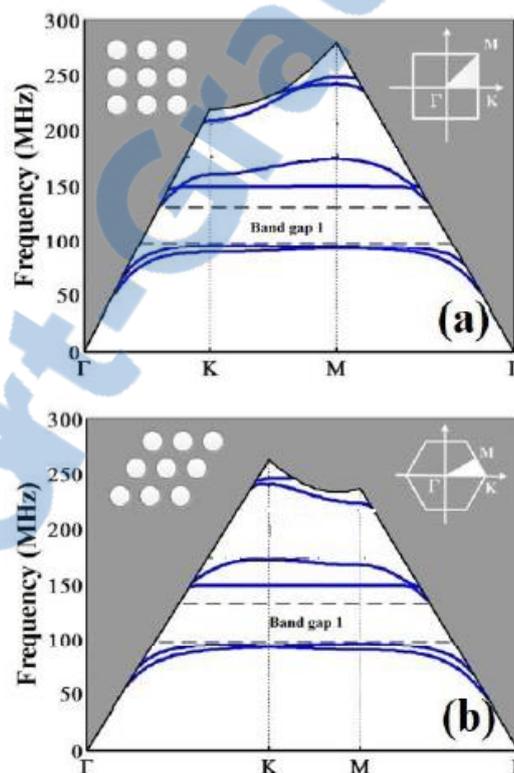


Figure 2.8 : Diagrammes de bandes [Yu 2016] obtenus pour différentes symétries : carrée (a), triangulaire (b) avec les paramètres géométriques suivants : $a = 9\mu m$, $h_p = 4\mu m$, $r_p = 3\mu m$.

La figure 2.8 présente les structures de bandes d'un CP composé de piliers cylindriques en niobate de lithium sur un substrat en niobate de lithium, calculées le long des directions de haute symétrie de la zone de Brillouin. Le pas est $a = 9\mu m$ et la hauteur des piliers est $h_p = 4\mu m$ et de rayon $r = 3\mu m$. Sur cette figure on peut observer que dans le cas de de la symétrie triangulaire, carrée et nid d'abeille une seule bande interdite basse fréquence apparaît au voisinage de 100MHz.

Cette indépendance de la bande interdite de la symétrie est valable sous condition que les résonateurs soient suffisamment espacés entre eux pour que leurs modes de la résonance n'entrent pas en interaction et éviter ainsi tout le couplage en eux.

2.6/ Influence des paramètres géométriques

2.6.1/ Effet de l'épaisseur du pilier sur la bande interdite

Dans cette première étude, le rayon des piliers est fixé à $r_p/a = 0,3$, et le calcul des structures de bandes a été réalisé pour les valeurs d'épaisseur h_p/a suivantes : $h_p/a = 0,5 - 0,7$. Ces choix particuliers de hauteurs montrent l'existence de plusieurs bandes interdites complètes pour les ondes guidés. La figure 8 ci-dessous illustre les résultats obtenus.

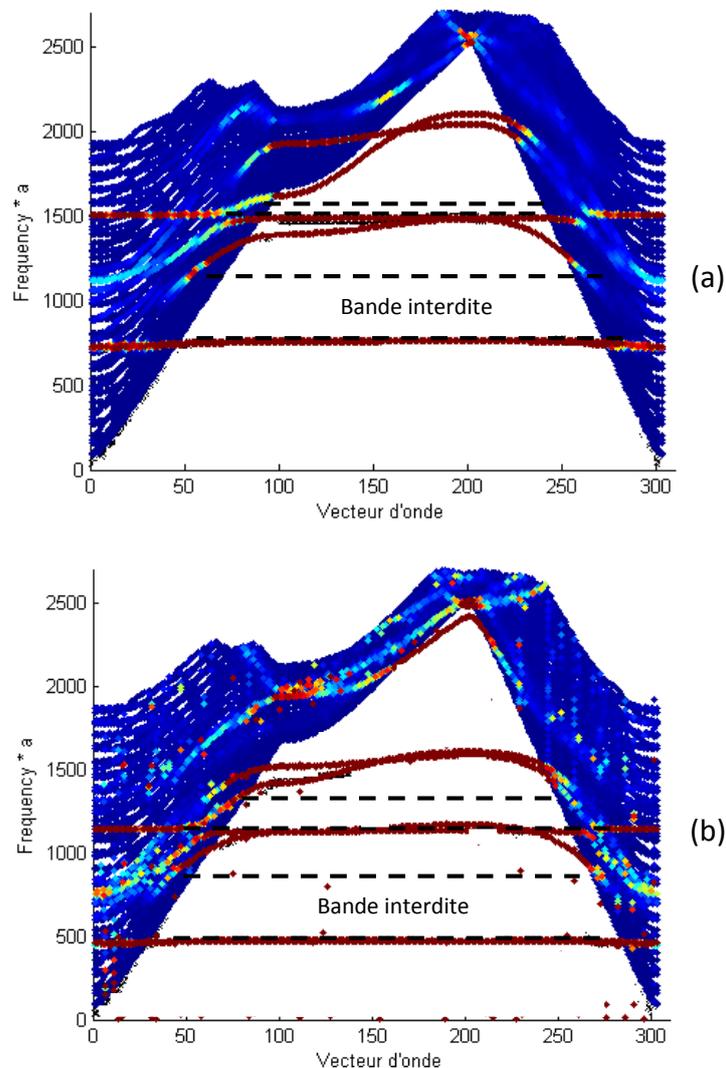


Figure 2.9 : Structures de bandes pour les différentes valeurs de $h_p/a = 0,5 - 0,7$.
Le rayon des piliers étant fixé à $r_p/a = 0,3$

Nous pouvons remarquer que des ouvertures de bandes interdites apparaissent avec l'augmentation de la hauteur des piliers. En effet, les deux premières bandes apparaissent pour $h_p/a = 0,5$ et s'étalent respectivement sur $[780 - 1230] m/s$ et $[1485 - 1620] m/s$. Ces deux bandes descendent et se localisent à des fréquences moins élevées au fur et à mesure que l'on augmente la hauteur, jusqu'à atteindre finalement les intervalles de $[466 - 920] m/s$ et $[1123 - 1379] m/s$ respectivement pour $h_p/a = 0,7$.

2.6.2/ Effet du rayon du pilier sur la bande interdite

Dans cette deuxième étude, l'épaisseur des piliers a été fixée à $h_p/a = 0,5$, et le calcul de la structure de bandes a été réalisée pour différentes valeurs du rayon $r_p/a = 0,35, 0,45$. La figure 2.10 ci-dessous présente les résultats obtenus.

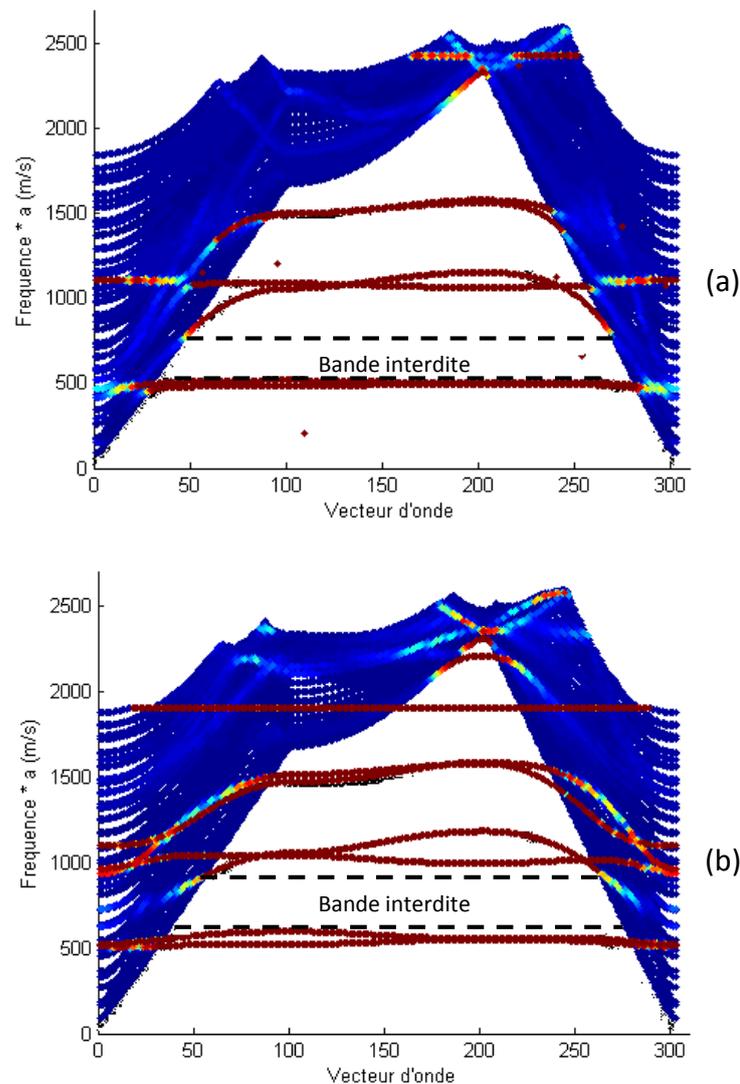


Figure 2.10 : Structures de bandes pour les différentes valeurs de $r_p/a = 0,35, 0,45$. La hauteur des piliers étant fixée à $h_p/a = 0,5$.

2 Modélisation, Fabrication, Caractérisation

Nous pouvons remarquer que l'augmentation du rayon r_p des piliers induit un élargissement de la bande interdite, pour $r_p/a = 0,35$ et $r_p/a = 0,45$. Les bandes de fréquences s'étalent respectivement sur $[517 - 798] m/s$ et $[596 - 994] m/s$.

L'élargissement de la bande interdite en fonction du rayon peut s'expliquer par l'augmentation de l'interaction entre les modes de résonance et de surface. Ainsi le couplage devient plus accentué à cause de la surface de contact qui devient plus grande.

2.7/ Méthode de modélisation en transmission :

On va chercher maintenant à modéliser la transmission d'ondes acoustiques à travers un CP fini : il faut donc réaliser non plus une analyse des fréquences propres mais une analyse harmonique. Comme on modélise un CP fini il n'est plus possible d'utiliser les mailles élémentaires définies dans le paragraphe 2.2 avec leurs conditions de périodicité. J'ai utilisé donc ici une cellule élémentaire plus grande regroupant plusieurs mailles élémentaires.

Dans mon cas, je souhaite réaliser un CP fini dans la direction de propagation dans la direction orthogonale à la propagation (dans le plan). La cellule est constituée d'une ligne de mailles élémentaires comportant autant de mailles que nous le souhaitons dans la direction de propagation.

J'ai procédé de la même façon que précédemment : en commençant tout d'abord par dessiner la structure. Cette structure se compose d'une cellule élémentaire représentant le CP à laquelle j'ai appliqué une source linéaire vibrante à la surface. En effet, les conditions aux limites qu'on impose rendent la source infiniment longue. La source génère ainsi des ondes se propagent dans le plan avec des phases suivant la direction y . On ajoute aussi de chaque côté des PML (*Perfectly Matched Layers*), des zones qui n'ont pas d'existence physique, mais qui servent à éviter les réflexions parasites pouvant être causées par le maillage. Ces couches absorbantes ont été appliquées de part et d'autre ainsi qu'au-dessous de la structure. La structure finale correspond à la Figure 2.11.

On ajoute les conditions périodiques dans la direction perpendiculaire à la propagation, comme indiqué sur la Figure 2.11 pour une maille carrée :

$$u_2 = u_1 e^{jk_x} \quad (2.9)$$

$$v_2 = v_1 e^{jk_x} \quad (2.10)$$

$$w_2 = w_1 e^{jk_x} \quad (2.11)$$

2 Modélisation, Fabrication, Caractérisation

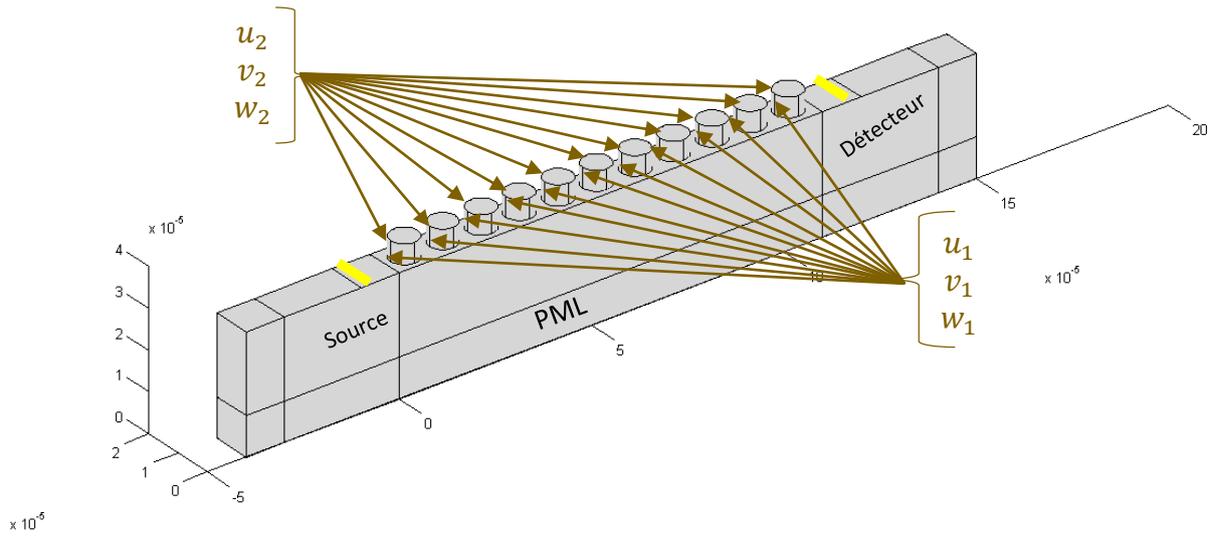


Figure 2.11 : Dessin complet d'un cristal phononique modélisé en transmission

On cherche ensuite à mailler la structure comme indiqué sur la figure 2.12, c'est-à-dire à la décomposer en éléments. A cet effet, Un maillage triangulaire a été utilisé.

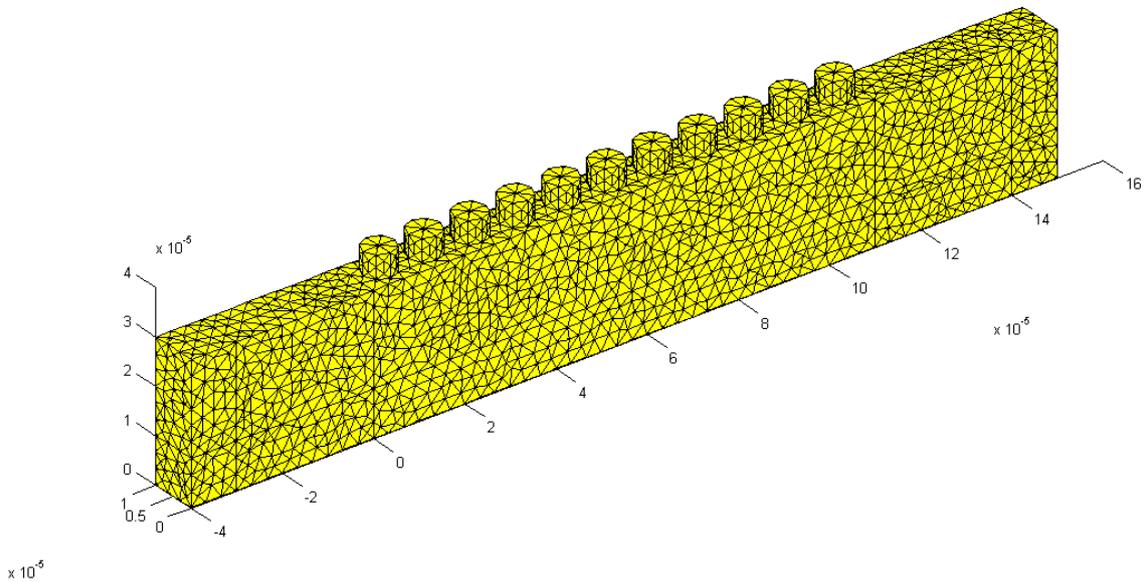


Figure 2.12 : Le maillage de la structure.

2 Modélisation, Fabrication, Caractérisation

Nous définissons une transmission à travers le cristal par l'équation suivante :

$$T = \frac{\int_{s_s} \|u(x, y, z)\| dydz}{\int_{s_e} \|u(x, y, z)\| dydz} \quad (2.12)$$

Avec $\|u(x, y, z)\|$ la norme du vecteur de déplacement (soit le déplacement total) :

$$\sum_{i=1}^N |u_i| + |v_i| + |w_i| \quad (2.13)$$

s_s la surface de sortie du dispositif et s_e la surface d'entrée. Dans ma simulation j'ai utilisé un programme matlab qui permet de calculer la transmission de chaque fréquence sur les différentes surfaces comme cela est illustré sur la figure 2.13.

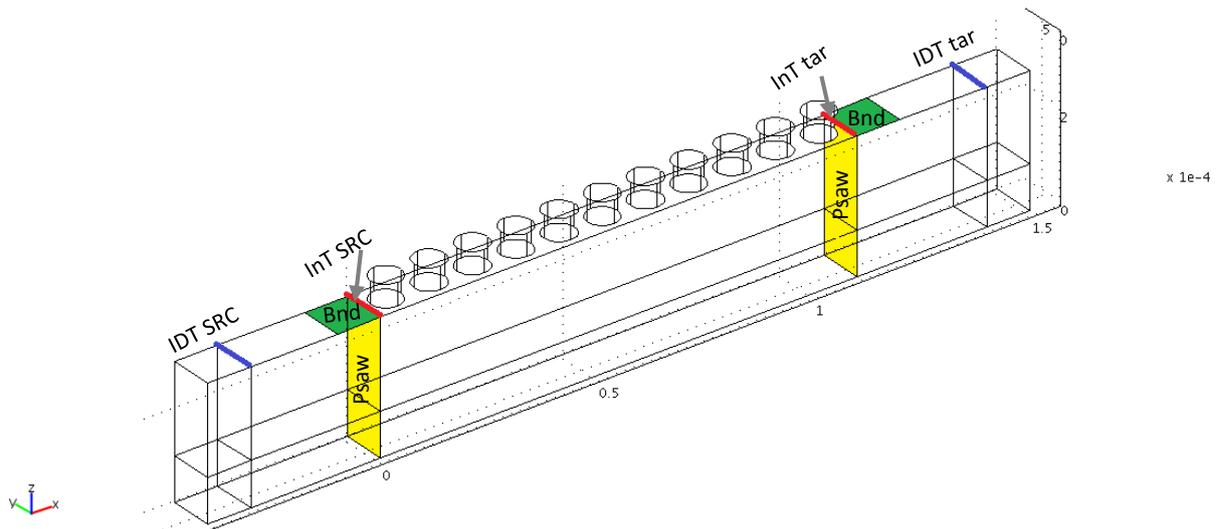


Figure 2.13 : Surface d'entrée et de sortie du dispositif.

A titre d'exemple, la figure 2.14 représente le déplacement total de chaque point à 2 fréquences : l'une hors de la bande d'arrêt (a), où l'on voit l'onde se propager à travers tout le cristal, et l'autre à l'intérieur (b), où l'on observe l'évanescence de l'onde dans les premières mailles du cristal.

2 Modélisation, Fabrication, Caractérisation

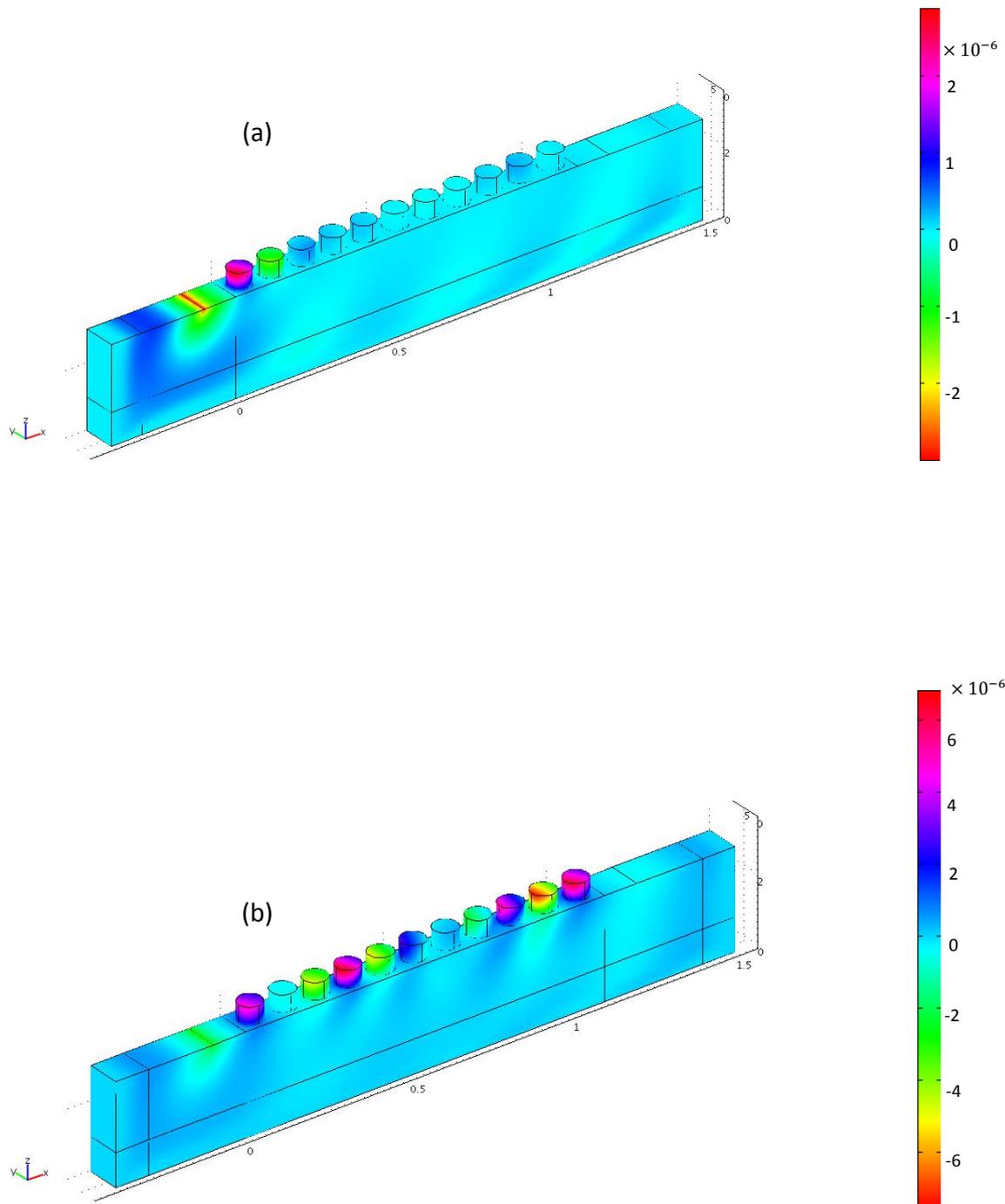


Figure 2.14 : Résultats de simulation en transmission à deux fréquences :
(a) transmission, (b) atténuation.

2.8/ Résultats

Dans cette partie je vais présenter les différents résultats de simulation numérique pour les trois échantillons ainsi que leurs coefficients de transmission, et leurs champs de déplacements. En effet le calcul des courbes de dispersion permet de déterminer les conditions d'existence ou non des bandes interdites. Il permet aussi de préciser leur position et leur largeur ainsi que l'existence de toutes les branches de dispersion, quelle que soit leur symétrie ou leur polarisation. Il est intéressant alors de pouvoir estimer la transmission des ondes acoustiques à travers une structure finie composée d'un nombre limité dans une direction donnée.

A partir des figures ci-dessous, j'ai pu conclure que les trois structures étudiées présentent deux bandes interdites. De plus, au niveau du coefficient de transmission, j'ai pu remarquer une atténuation complète de l'onde dans l'intervalle correspondant exactement aux ouvertures des bandes interdites. Ceci est donc une mise en évidence de l'existence des bandes interdites pour les modes ayant des longueurs d'ondes inférieures à la périodicité.

- Pour la structure 1 : les paramètres géométriques sont $a = 10\mu m$, $h_p/a = 0,5\mu m$, $r_p/a = 0,35\mu m$. Les centres des bandes interdites se situent respectivement à $840 m/s$ et $1445 m/s$, avec des largeurs de bandes de $500 m/s$ et $85 m/s$.
- La structure 2 : les paramètres géométriques sont $a = 7\mu m$, $h_p/a = 0,71\mu m$, $r_p/a = 0,45\mu m$. Présence de deux bandes interdites, situées respectivement autour de $640 m/s$ et $1085 m/s$ avec des largeurs de bandes de $225 m/s$ et $155 m/s$.
- La structure 3 : les paramètres géométriques sont $a = 7\mu m$, $h_p/a = 0,71\mu m$, $r_p/a = 0,35\mu m$. Les centres des bandes interdites se situent respectivement autour de $550 m/s$ et $1110 m/s$, avec des largeurs de bandes de $280 m/s$ et $235 m/s$.

Afin de mettre en évidence ces observations, nous présentons dans les figures ci-dessous, les distributions du champ de déplacement des différents modes de résonance. Ces derniers sont directement responsables de la création des bandes interdites observés.

J'ai représenté la propagation de l'onde sur une rangée de piliers avec une excitation horizontale de l'onde pour les deux fréquences particulières de résonance et d'antirésonance. Les figures (2.15) (2.16) (2.17) montrent que l'énergie des ondes se propageant dans la matrice peut être efficacement stockée et retardée à la fréquence de résonance. L'énergie se transfère de pilier en pilier quasiment sans pertes. En revanche, dans le cas de l'antirésonance correspondant à la chute de la transmission, la propagation devient interdite et les piliers représentent un obstacle pour l'onde guidée. Naturellement, une fraction de l'énergie de l'onde de surface peut être convertie en modes radiatifs du substrat dans les bords dans les deux cas mais cela n'exclut pas la présence d'une onde de surface.

2 Modélisation, Fabrication, Caractérisation

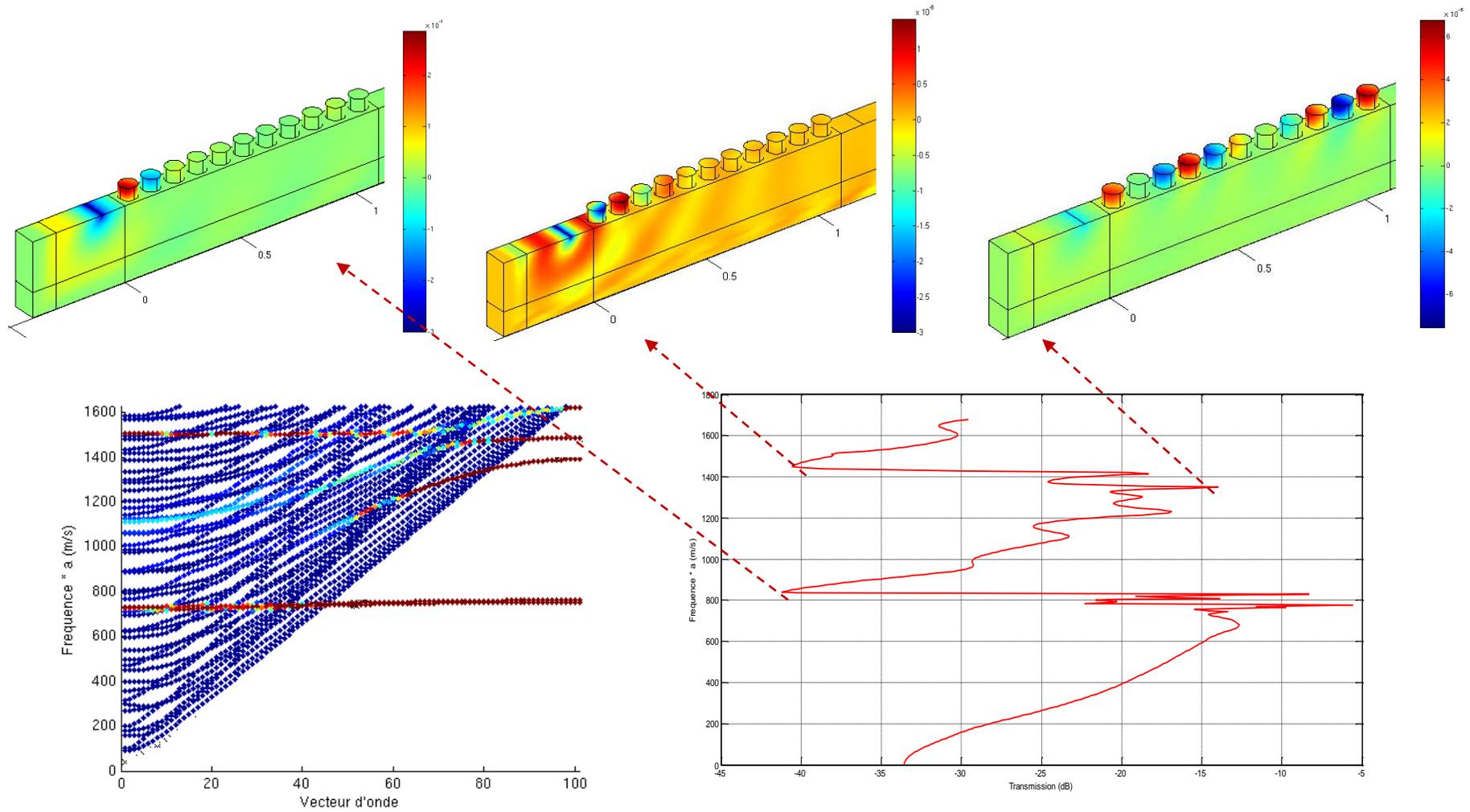


Figure 2.15 : Courbe de transmission des ondes de surface à travers 11 rangées d'un réseau carré d'un cristal phononique composé de piliers en nickel sur un substrat en tantalate de lithium. Le rayon des piliers pour le premier échantillon est $r_p/a = 0.35$ et la hauteur $h_p/a = 0.5$

2 Modélisation, Fabrication, Caractérisation

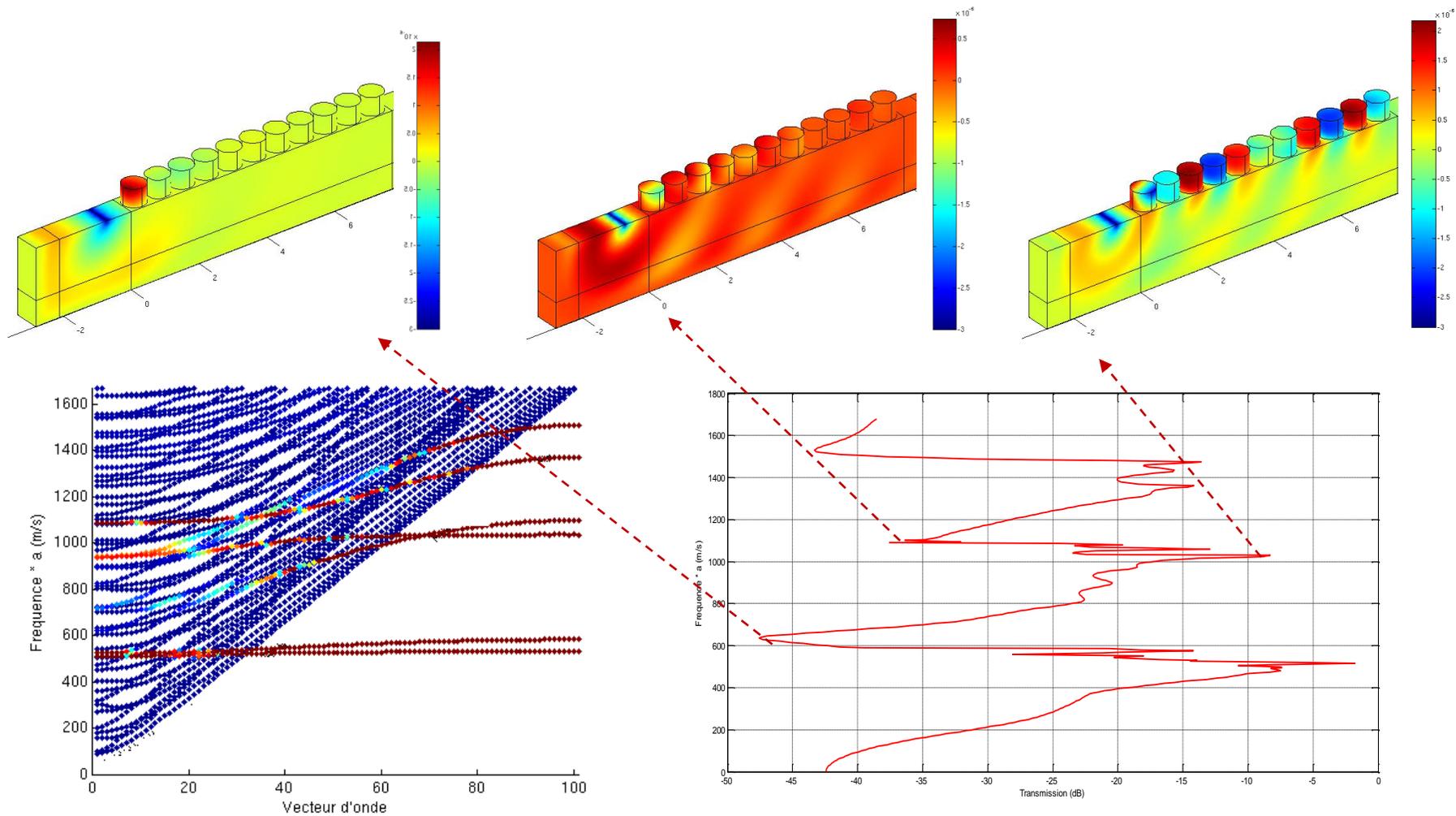


Figure 2.16 : Courbe de transmission des ondes de surface à travers 11 rangées d'un réseau carré d'un cristal phononique composé de piliers en nickel sur un substrat en tantalate de lithium. Le rayon des piliers pour le deuxième échantillon est $r_p/a = 0.35$ et la hauteur $h_p/a = 0.5$

2 Modélisation, Fabrication, Caractérisation

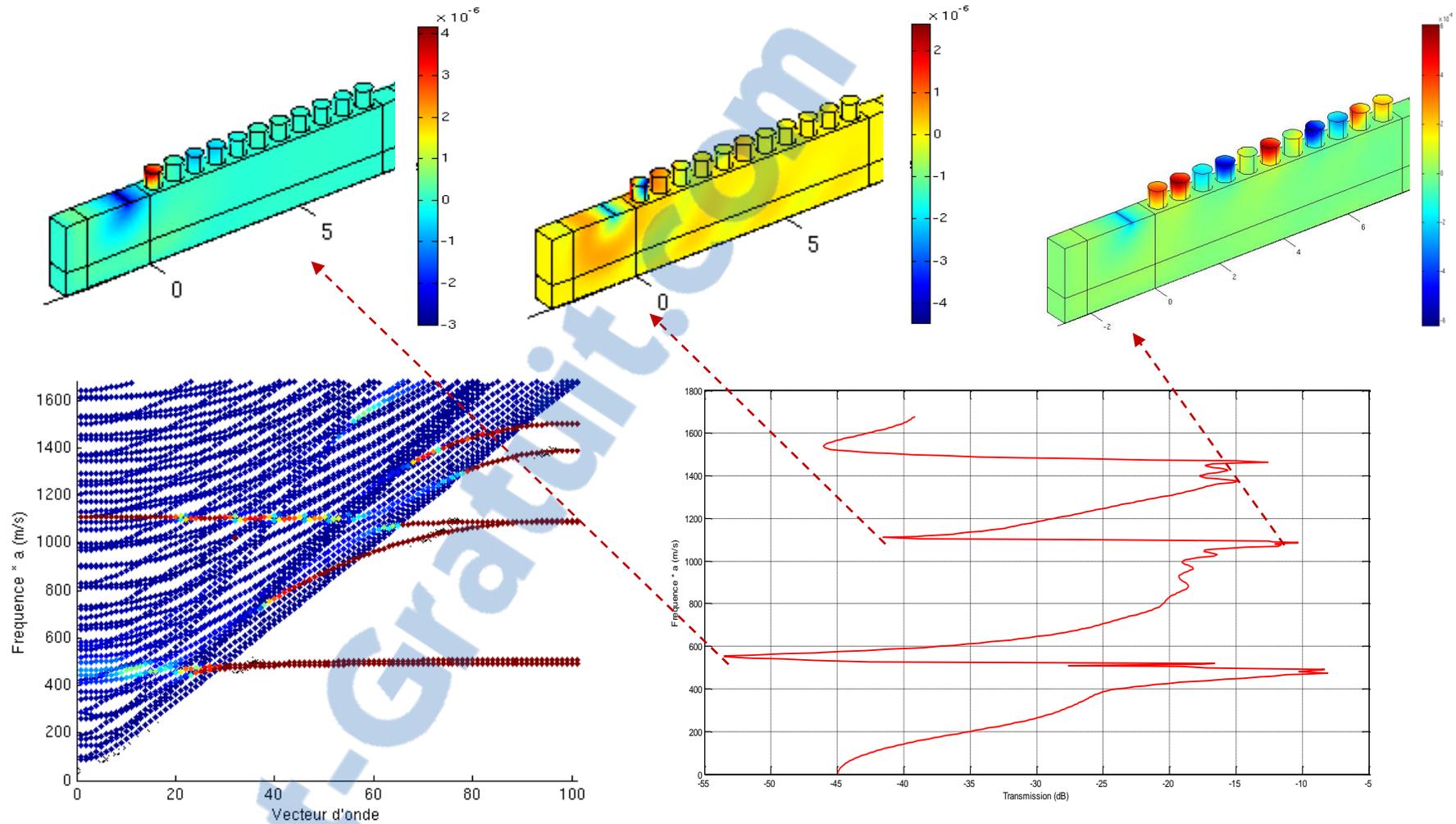


Figure 2.17 : Courbe de transmission des ondes de surface à travers 11 rangées d'un réseau carré d'un cristal phononique composé de piliers en nickel sur un substrat en tantalate de lithium. Le rayon des piliers pour le troisième échantillon est $r_p/a = 0.35$ et la hauteur $h_p/a = 0.5$

2.9/ Design, fabrication et caractérisation des réseaux de piliers sur la surface de tantalate de lithium

Le substrat choisi est le tantalate de lithium ($LiTaO_3$) coupe 36Y avec une propagation suivant x. Les piliers sont constitués de nickel (Ni) arrangés suivant un réseau carré. Deux transducteurs à électrodes interdigités sont déposés à la surface du substrat permettant l'excitation et la détection large bande des ondes de surface. Les mesures électriques ont été réalisées à l'aide d'un test sous pointes. Les transducteurs sont conçus pour couvrir toute la plage des fréquences [50 – 260]MHz.

2.9.1/ Réalisation des transducteurs à peignes interdigités

Les transducteurs interdigités ont montré leurs capacités à générer des ondes guidées sur un substrat piézoélectrique, sous différentes configurations. Dans notre cas Farhan Moh Razip a choisi des peignes à pas variables (larges bandes spectrales) afin d'obtenir une largeur de bande assez grande avec une dynamique acceptable.

. Les peignes interdigités ont les propriétés suivantes :

- ✓ Bandes de fréquences : [50 – 260]MHz.
- ✓ 50 paires de doigts par transducteur.
- ✓ Ouverture acoustique : $1,4\mu m$.
- ✓ Métal : cuivre

Le procédé de fabrication est le suivant :

Etape 1 : Préparation

Il s'agit d'une phase de nettoyage pour éliminer d'une part les poussières et les impuretés qui peuvent être présents à la surface du wafer et du masque.

- ❖ Pour le masque
 - 100 ml d'acide sulfurique.
 - 50ml d'eau d'oxygène.
 - Temps 2mn.
 - Faire le 1er rinçage avec de l'eau distillée.
 - Faire un 2ème rinçage.
 - Le sécher avec l'azote.

- ❖ Pour le wafer
 - 50 ml d'acide sulfurique.
 - 25 ml d'eau d'oxygène.
 - Temps 2mn
 - Faire le 1^{er} rinçage avec de l'eau distillée

- Faire un 2ème rinçage
- Le sécher avec l'azote

Etape 2 : Dépôt de résine

A l'aide d'une tournette, une mince couche homogène d'un film photosensible, appelé résine est étalée sur le wafer. On dépose une petite quantité de résine sur le wafer en utilisant la tournette, puis on y applique une forte accélération dans le but de former une couche uniforme de résine sur toute la surface. (figure 2.18)

- Réglage des paramètres dans la tournette (pour le Ti Prime) :
 - Durée de rotation 20 seconde
 - Vitesse de rotation 3000 tr/mn
- Réglage des paramètres dans la tournette (pour le Ti09XR) :
 - Durée de rotation 30 seconde
 - Vitesse de rotation 1500 tr/mn
- Mettre le wafer dans la tournette.
- Utilisation d'un promoteur d'adhérence Ti Prime (figure 2.22.b)



Figure 2.18 : image de la tournette RC8

Etape 3 : Cuisson après dépôt

Après le dépôt de la résine sur le wafer, une cuisson de cette dernière est nécessaire, afin d'éliminer les solvants présents. Après la cuisson, le substrat est refroidi pour être prêt à l'insolation.

- Recuit dans le four 2mn à 100°C
- Enduction de résine Ti09XR (figure 2.22.c)
- Recuit dans le four 2mn30 à 100°C

Etape 4 : insolation (figure 2.22.d)

L'insolation du substrat consiste à éclairer, par une lampe à rayons ultraviolets, certaines zones de la résine à travers un masque qui a été structuré pour reproduire les motifs. Par l'intermédiaire des croix d'alignement, ces motifs sont positionnés précisément par rapport au substrat. Après le positionnement du masque à la verticale de la région souhaitée, il est approché du substrat à une certaine distance, pour éviter toute dégradation du masque. Une fois le masque et le substrat sont bien alignés et mis en contact, une exposition aux rayonnements ultraviolets est réalisée. Elle consiste à projeter l'ombre du motif qui figure à la surface du masque sur la résine.

- Moyen : aligneur EVG 620 DUV (figure 2.19).
- Ajustement du microscope.
- On cherche deux croix à y constant.
- Avec la molette on aligne les deux croix sur l'écran.
- Faire le vide.
- Exposition aux UV à travers un masque pour rendre la résine exposée soluble au développeur grâce à un agent photo-actif présent dans la résine.
- Temps de repos : 2mn.
- Recuit d'inversion : 3mn30 à 130°C.
- On laisse reposer 15mn.
- Seconde insolation.

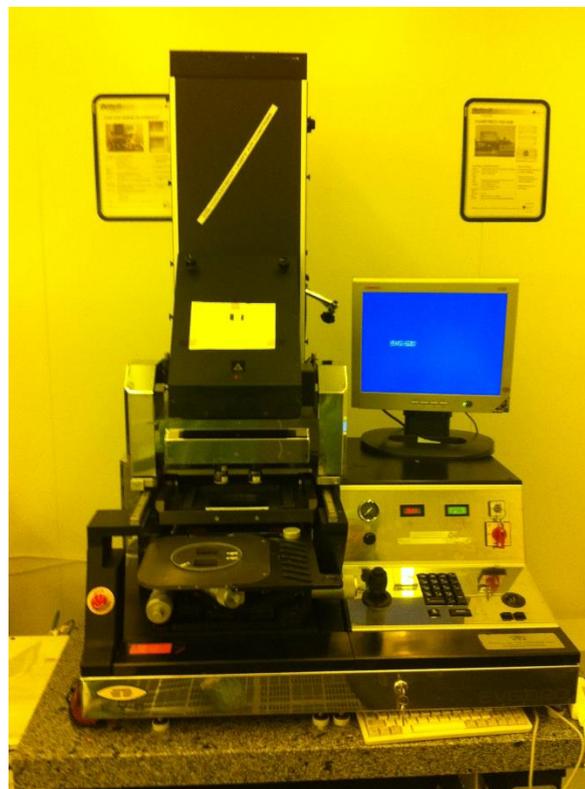


Figure 2.19: aligneur EVG 620 DUV

Etape 5 : Développement de la résine avec un solvant (figure 2.22.e)

Les spécifiques contenus dans un développeur vont dissoudre les zones soumises aux rayonnements ultraviolets.

- On utilise un développeur MF26A.
- mettre le wafer dans le développeur pendant 1mn30.
- Premier lavage à l'eau distillée pendant 10s.
- Deuxième lavage pendant 4mn.
- Le sécher avec l'azote.

Etape 6 : dépôt du cuivre (figure 2.22.f)

- Dépôt du cuivre par pulvérisation RF.
- Moyen : pulvé plassys (MP500) (figure 2.20).
- Vitesse de dépôt : 150nm/min.
- Epaisseur 200nm.
- Temps de dépôt : 1min20s.



Figure 2.20 : pulvé plassys (MP500)

Etape 7 : Nettoyage (figure 2.22.g)

- Faire un nettoyage à température ambiante pendant une nuit.

Etape 8 : amincissement

- Dépôt de résine sur la tournette RC8, (figure 2.22.h) pendant 30s / accélération 4000tr/min/s Recuit pendant 5mn à 120°C.
- Temps de repos 2mn.
- Immersion dans la solution de gravure (figure i) à l'aide d'un agitateur magnétique.

2 Modélisation, Fabrication, Caractérisation

- Rinçage et striping (acétone, éthanol) à température ambiante pour quelques minutes (figure 2.22. j).

Le diagramme du procédé correspondant à la structuration est présenté sur la figure 2.22.

Nous présentons dans la figure 2.21 le wafer ainsi que des images au microscope optique des peignes interdigités.

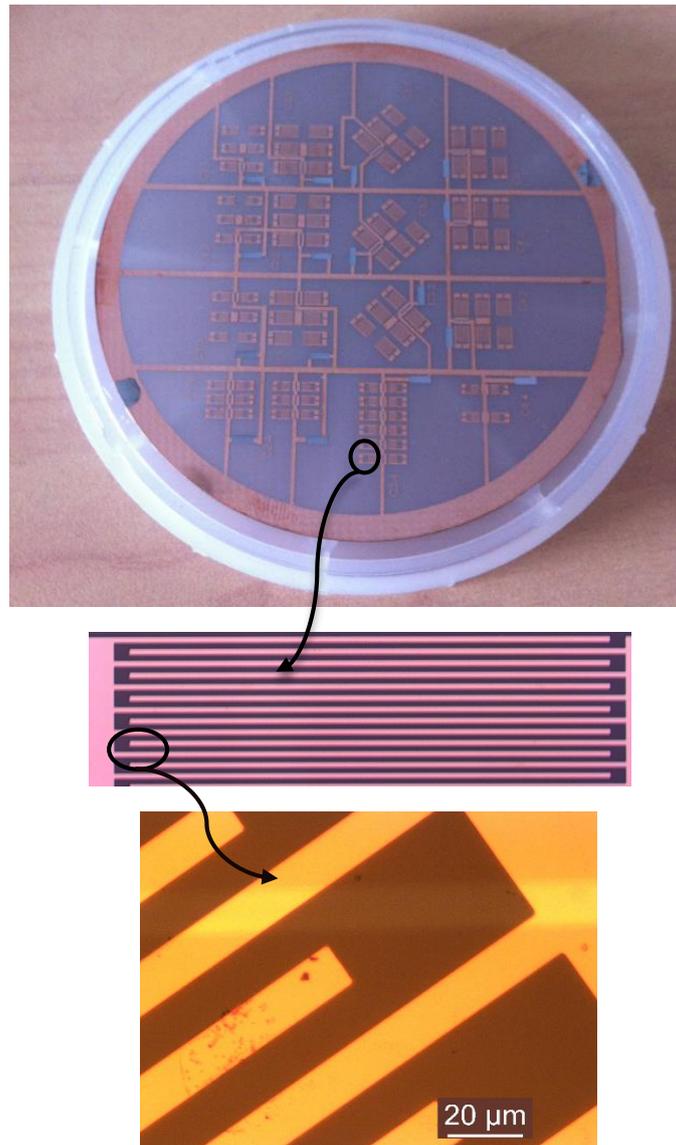


Figure 2.21 : Image du wafer ainsi que des images au microscope optique des peignes interdigités

2 Modélisation, Fabrication, Caractérisation

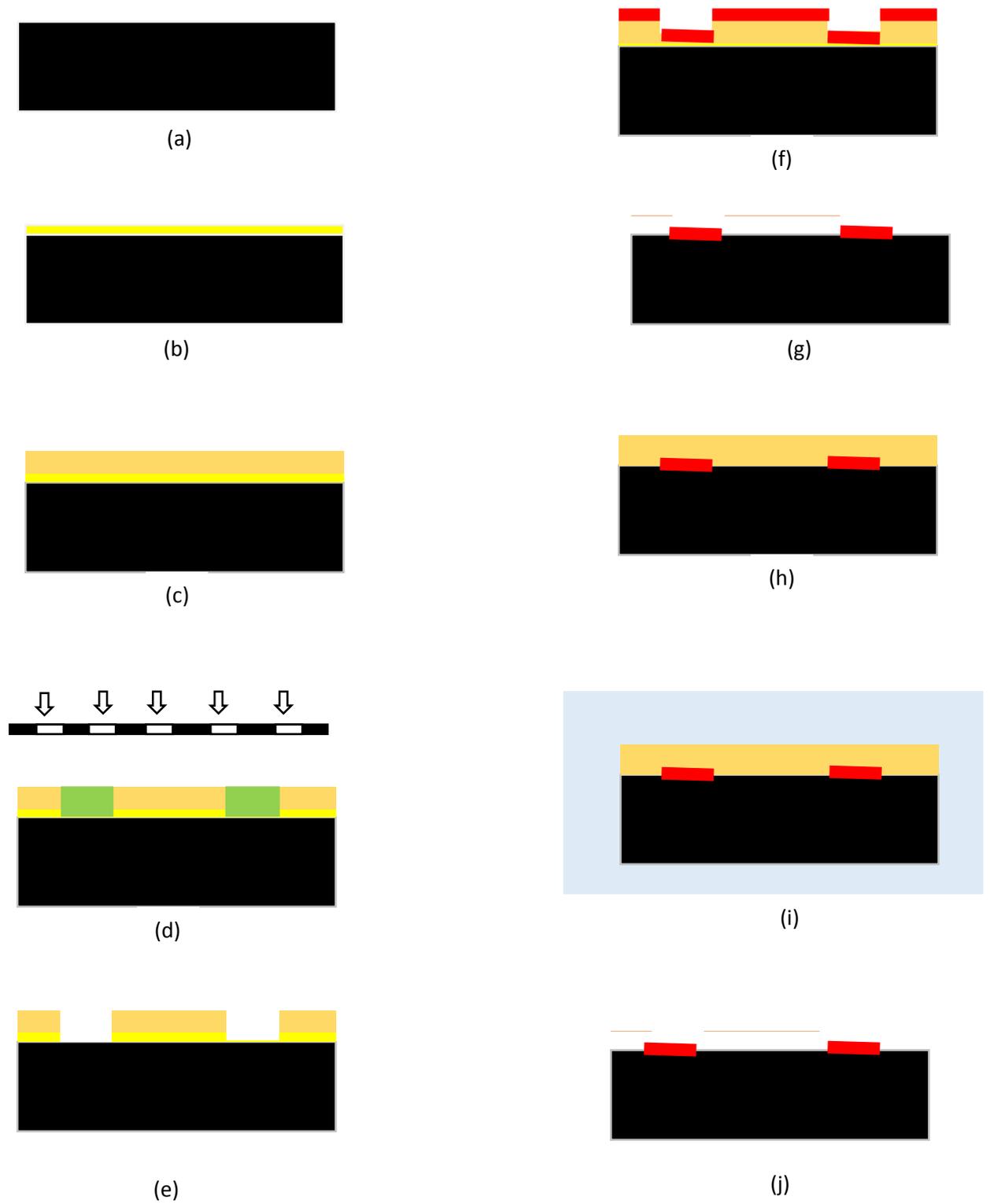


Figure 2. 22 : Les différentes étapes du procédé de fabrication des peignes interdigités.

2.9.2/ Réalisation des piliers de nickel:

- Dépôt de la couche de 20 nm de cuivre par pulvérisation RF (figure 2.25.b).
- Enduction d'une résine (figure 2.25.c).
- Après un recuit, exposition à travers un masque de piliers pour transformer la résine exposée en résine soluble au développeur (figure 2.25.d).
- Dissolution de la résine insolée dans un développeur pendant 2mn (figure 2.25.e).
- Désoxydation du cuivre dans l'acide cholohydrique (figure 2.25.f).
- Faire l'électroformage (figure 2.23) à 50°C pendant environ 10mn avec un courant de 60mA qui fait croître le nickel à une épaisseur d'environ $5\mu m$ (figure 2.25.g).
- Dissolution de la résine restante dans l'acétone.

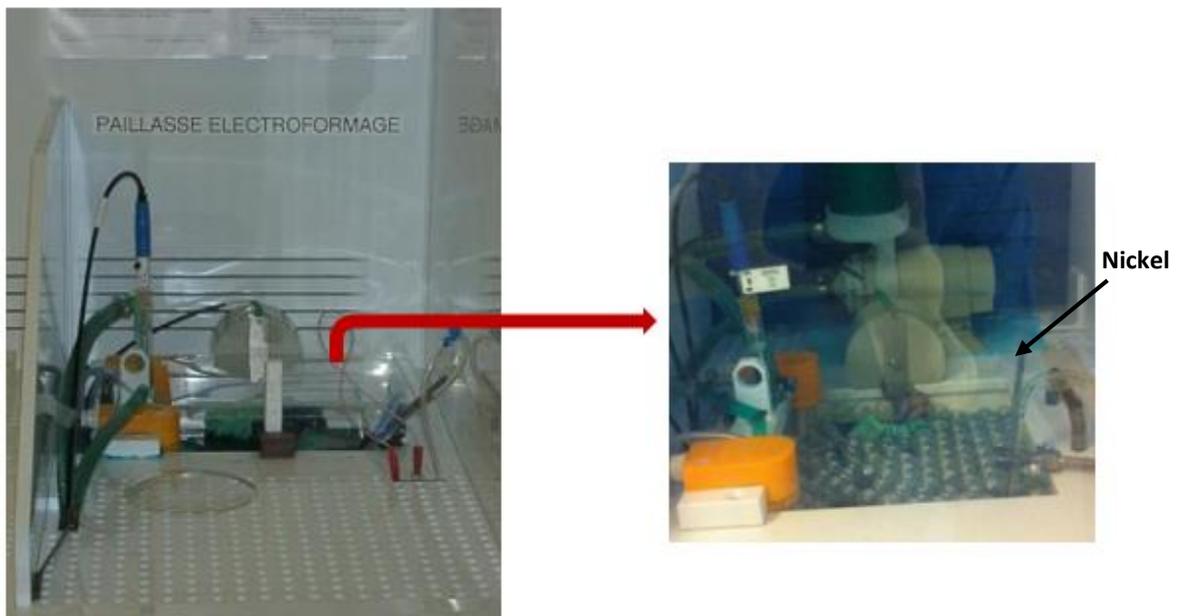


Figure 2.23 : L'électroformage

Le diagramme de procédé correspondant à la structuration est présenté sur la figure 2.25.

Nous présentons dans la figure 2.24 le wafer ainsi que des images des piliers au microscope électronique à balayage.

2 Modélisation, Fabrication, Caractérisation

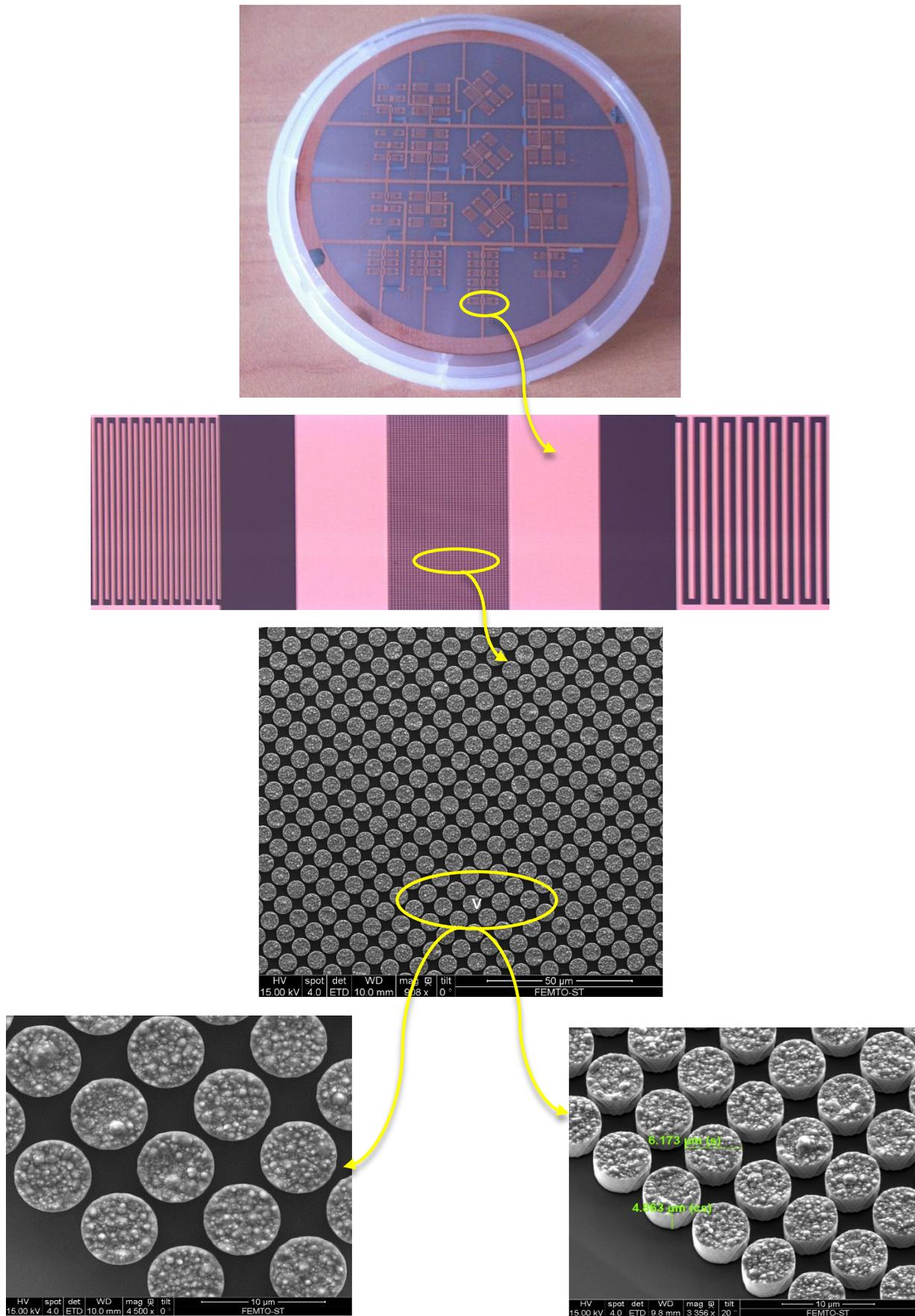


Figure 2.24 : Images du wafer ainsi que des images au microscope électronique à balayage des piliers.

2 Modélisation, Fabrication, Caractérisation

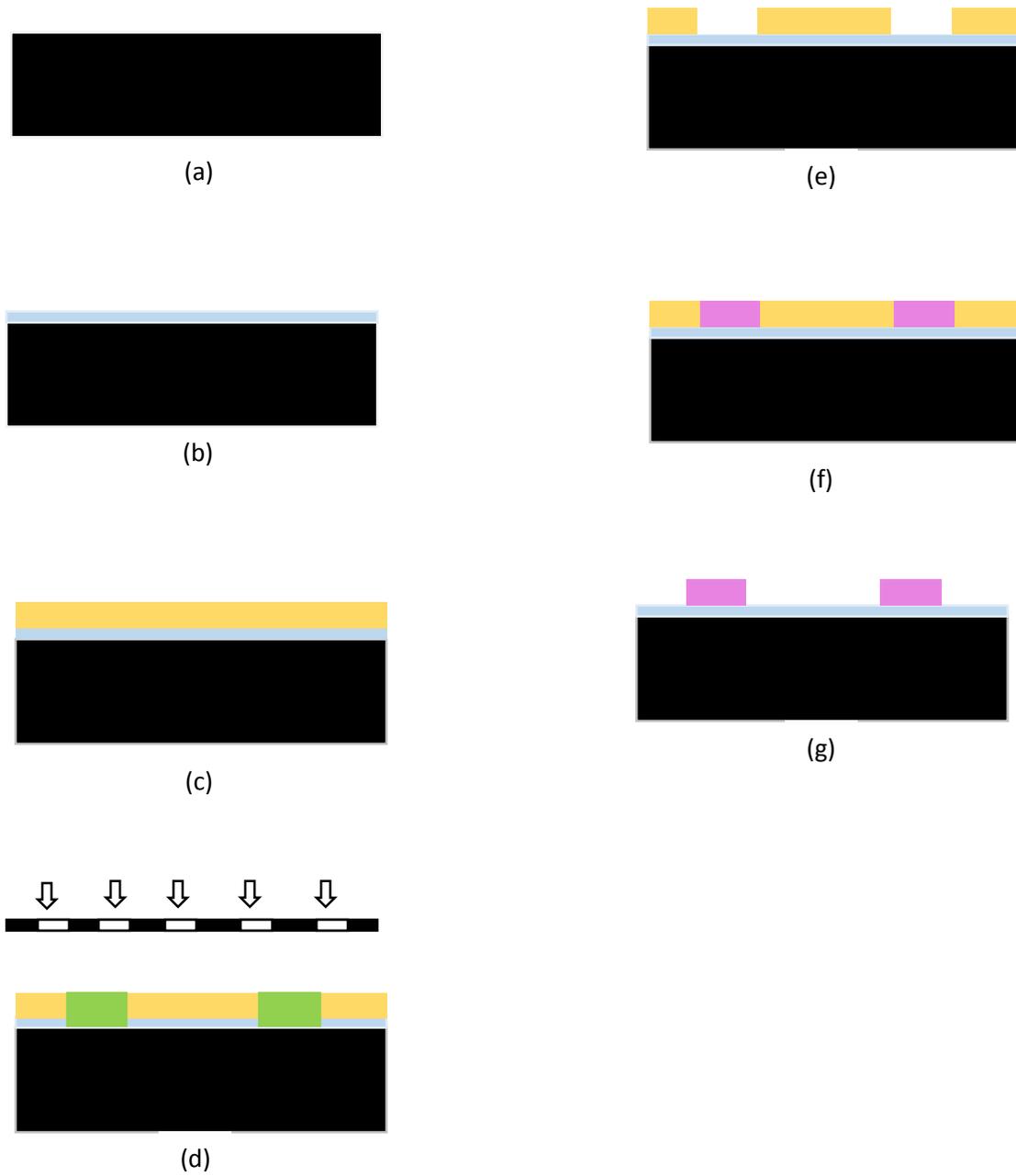


Figure 2.25 : Les différentes étapes du procédé de fabrication des piliers.

2.10/ Caractérisation électrique :

Les mesures des paramètres S sont réalisées à l'aide de pointes radiofréquence. Une photo du système de mesure que nous avons utilisé est présentée Figure 2.26.

Les pointes sont reliées à un analyseur de réseau Agilent E5071C. Ce dernier émet un signal dans la gamme de fréquence désirée puis relève la partie du signal émis qui est réfléchi et transmise par le dispositif. Le montage complet est constitué de l'analyseur de réseau qui est relié par un câble coaxial aux pointes radiofréquence. Les pointes (Z probe, Z010-K3N-GS-250), peuvent mesurer des fréquences jusqu'à 10 GHz et ont un écartement de 250 μm . Elles sont fixées à un positionneur (Süss Microtec, PH110) qui permet un positionnement dans les 3 directions de l'espace. Le support permet un maintien par le vide pour éviter tout mouvement de l'échantillon lors de la mesure. Un microscope (Süss Microtec, PSM 1000) est présent au-dessus du support d'échantillon afin de positionner précisément les pointes sur le micro-système à mesurer. L'ensemble est fixé à un bâti (Süss Microtec, PM5) qui permet d'assembler tout ce matériel de façon optimale [Socié 2014].

- S_{11} est une mesure en réflexion sur l'un des ports du dispositif.
- S_{22} est une mesure en réflexion sur la seconde voie,
- S_{12} est une mesure en transmission de la voie 1 à la voie 2, c'est le paramètre que nous utilisons.
- S_{21} est une mesure de transmission de la voie 2 à la voie 1.

Pour les mesures en réflexion, une seule paire de pointes suffit mais pour une mesure en transmission il faut une paire de pointes sur la sortie et une sur l'entrée.

2 Modélisation, Fabrication, Caractérisation

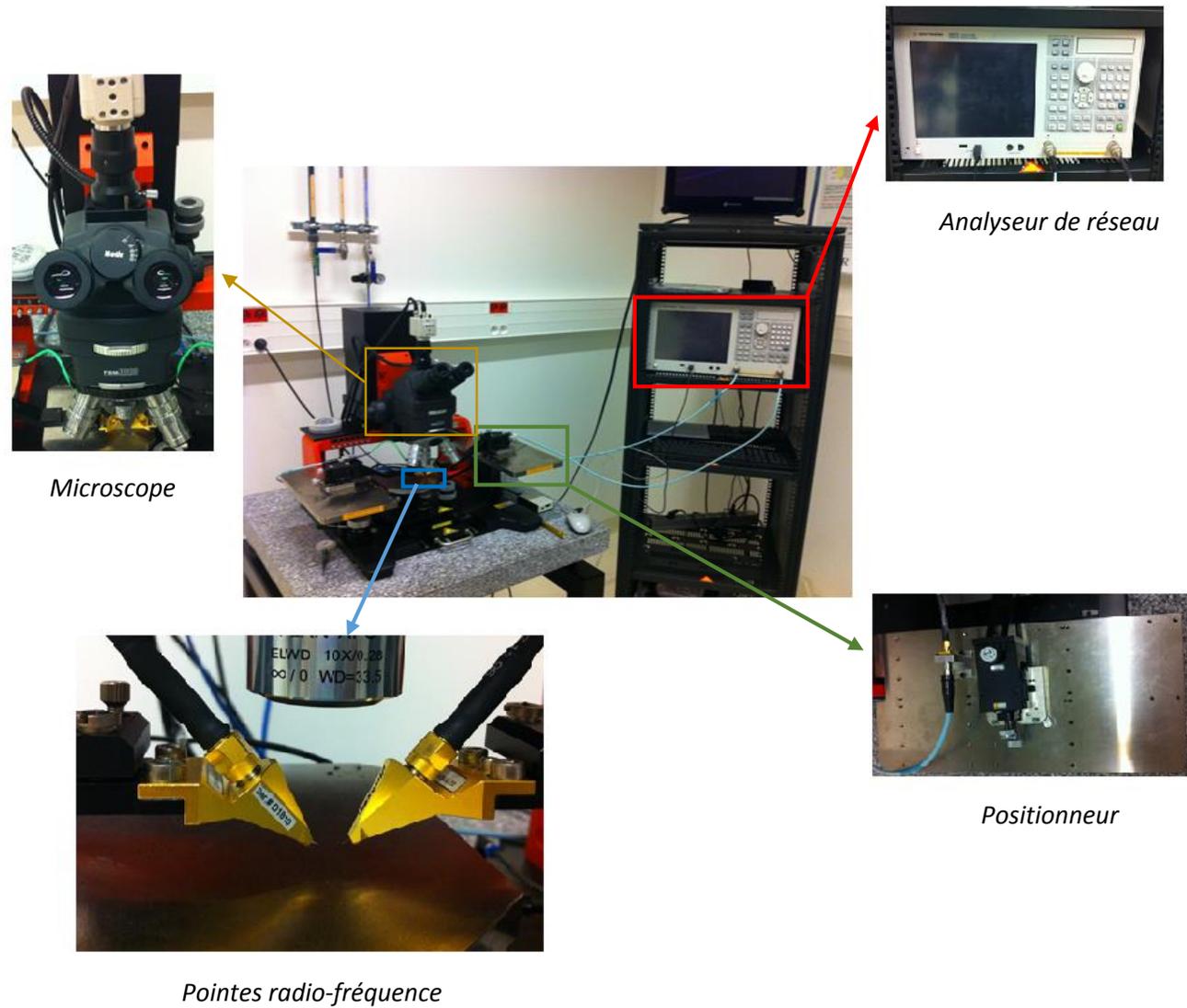


Figure 2.26 : Banc de mesure sous pointes radiofréquence utilisé pour les mesures des paramètres S.

2 Modélisation, Fabrication, Caractérisation

J'ai fait plusieurs mesures du test sous pointes, mais comme le montre la figure 2.27 les résultats n'étaient pas à la hauteur. Le procédé de caractérisation a été donc amélioré en ajoutant une plaque d'aluminium au-dessous du wafer, cette dernière offre ainsi une conductivité deux fois supérieure à celle du cuivre. Faute de temps, je n'ai pas pu refaire mes mesures.

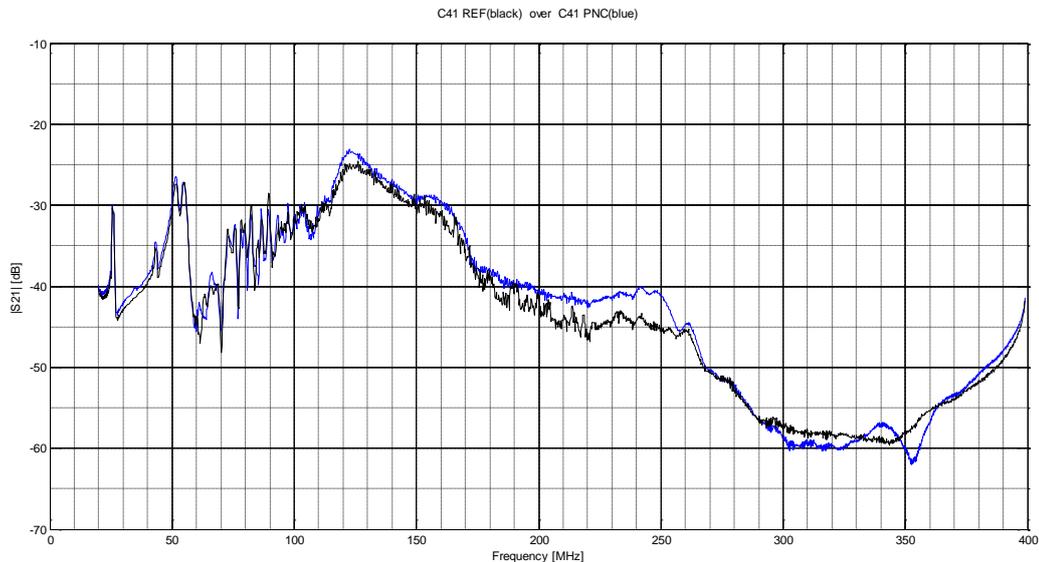


Figure 2.27 : Mesure à l'aide du test sous pointes

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons cherché à modéliser, fabriquer, et caractériser des dispositifs SAW pour des applications radiofréquences, en particulier pour des fonctions de filtrage ou traitement du signal. Les fréquences qu'on a pu obtenir se situent de 50 MHz, à 260 MHz correspondant des cristaux phononiques micrométriques

Le calcul, et la localisation des bandes interdites ont été réalisés pour une structure composée de piliers cylindriques en nickel (Ni) sur un substrat piézoélectrique à base de tantalate de lithium ($LiTaO_3$). Les résultats présentés ont été obtenus à l'aide de programmes Matlab implémentés sous environnement Comsol Multiphysics 3.4 et par la méthode des éléments finis (FEM). La coupe $36^\circ Y$ a été retenue pour le ($LiTaO_3$) en raison du coefficient de couplage élevé. Les champs de déplacement, ainsi que les spectres de transmission ont été également présentés. Les ondes de surface SAW sont générées et détectées directement à la surface du matériau piézoélectrique qui dans notre cas est le tantalate de lithium. Sur ce dernier sont gravés des transducteurs interdigités qui sont des peignes métalliques qui ont été obtenus par des procédés microtechniques standards comme la gravure, et la

2 Modélisation, Fabrication, Caractérisation

lithographie. La fabrication, ainsi que le process d'élaboration des différentes structures obtenues en salle blanche ont été présentés.

Enfin, des résultats concernant la caractérisation électrique des résonateurs SAW à l'aide d'un test sous pointes ont été présentés.

Conclusion générale et perspectives

La conception des cristaux phononiques par les scientifiques depuis plus de vingt ans a démontré leur énorme potentiel à interdire la propagation des ondes acoustiques et élastiques dans des gammes de fréquences dites bandes interdites phononiques. Les progrès technologiques en matière de micro et nano fabrication ont permis de faire de grandes avancées, et la mise en évidence expérimentale des propriétés annoncées théoriquement. Pour des périodicités de quelques microns ou moins, les bandes interdites apparaissent pour des fréquences de quelques centaines de MHz ou de quelques GHz, en plein dans le domaine des communications sans fil. De nouveaux composants mariant microélectronique et ondes acoustiques pourraient voir le jour et étendre les capacités des téléphones portables et des réseaux sans fil, par exemple. Il est possible de réaliser de réaliser des guides d'onde fortement coudés, mais également des systèmes de multiplexage et de distribution de canaux. Cette possibilité ouvre la voie vers la circuiterie phononique, c'est-à-dire la possibilité de distribuer et de diriger l'énergie acoustique en de multiples points de l'espace. Les applications potentielles concernent le traitement des signaux pour les télécommunications mais également l'acheminement des ondes acoustiques dans les systèmes d'imagerie échographique ou de thérapie par ultrasons.

Ce projet s'inscrit dans le vaste domaine des matériaux micro et nano structurés pour l'ingénierie acoustique des bandes interdites dans les dispositifs électro-acoustiques, et particulièrement pour l'étude des CP à base de piliers de nickel sur tantalate de lithium. Dans le premier chapitre nous avons donné les fondements théoriques, avec la mise en évidence expérimentale des différents comportements remarquables de ces cristaux. Certaines propriétés sur la propagation des ondes élastiques de surface dans les structures périodiques dues à la résonance locale ont été introduites.

Dans une première partie du deuxième chapitre j'ai pu modéliser, et simuler des dispositifs phononiques périodiques à base de piliers par la méthode des éléments finis sous environnement Comsol Multiphysics. Outre une meilleure compréhension du comportement physique des structures étudiées, j'ai montré également que ces dernières permettaient l'ouverture de bandes interdites dans le régime hypersonique par le mécanisme de résonance locale pour les ondes de surface. J'ai pu valider également mes résultats de simulation avec ceux obtenus par d'autres chercheurs ayant utilisé la méthode des ondes planes. Grâce à l'optimisation des paramètres géométriques des résonateurs, un meilleur contrôle de l'ouverture, et de la localisation des bandes interdites a pu ainsi être mis en évidence. Des spectres de transmission, ainsi que des diagrammes de champs de déplacement ont également été présentés.

Conclusion générale et perspectives

La deuxième partie a été consacrée à la présentation des différentes étapes de fabrication ainsi qu'à la caractérisation électrique des structures étudiées. Deux transducteurs à électrodes inter-digités sont déposés à la surface permettant ainsi l'excitation et la détection large bande des ondes de surface. Le procédé de fabrication fait intervenir des étapes de lithographie, de gravure, et d'électroformage.

Comme perspectives à ce travail, nous proposons :

- Faire des caractérisations électriques, et optiques plus poussées afin de mieux rendre compte des performances des filtres SAW étudiés notamment les problèmes liés aux pertes.
- Faire des études de faisabilité théorique, et expérimentale en changeant la nature des matériaux composant les piliers comme l'Aluminium (léger), ou le Tungstène (lourd), et voir leurs influences sur les diagrammes de bandes.
- Etudier les différentes solutions afin d'obtenir des structures accordables grâce à une commande électrique des CP piézoélectriques.

Références

A

[Achaoui 2011] Y. Achaoui, “Bandes interdites de Bragg et résonances locales dans les cristaux phononiques de piliers sur une surface” – Thèse de Doctorat – Université de Franche Comté – (2011).

[Achaoui 2011] Y. Achaoui, A. Khelif, S. Benchabane, L. Robert, and V. Laude, “Experimental observation of locally-resonant and Bragg band gaps for surface guided waves in a phononic crystal of pillars”, *Physical Review B* 83, 104201, (2011)

B

[Benchabane 2006] S. Benchabane, “Guidage et filtrage des ondes dans les cristaux phononiques”. Thèse de Doctorat – Université de Franche Comté – (2006).

[Benchabane 2006] S. Benchabane, A. Khelif, J-Y. Rauch, L. Robert, and V. Laude, “Evidence for complete surface wave band gap in a piezoelectric phononic crystal” *Phys. Rev. E* **73**, 065601(R) (2006).

C

[Comsol 3.4] <http://www.comsol.fr>.

[Caruyer 2005] G. Caruyer, “Modélisation et caractérisation de résonateurs et filtres à onde acoustique de volume pour le filtrage RF en téléphonie mobile”. Thèse de Doctorat – Université de Lille – (2005).

D

[Du 2016] Y. Du, “Etude et développement de matériaux micro/nano structurés pour l’ingénierie des bandes interdites dans les dispositifs électro-acoustiques à ondes de surface”. Thèse de Doctorat – Université de Lille – (2016).

G

[Giraud 2007] S. Giraud, “Etude, conception et réalisation de résonateurs piézoélectriques pour des applications hautes fréquences”. Thèse de Doctorat – Université de Limoges – (2007).

[Gorisse 2011] M. Gorisse, “Réalisation de filtres RF à base de cristaux phononiques”. Thèse de Doctorat – Université de Grenoble – (2011).

[Gorisse 2011] M. Gorisse, S. Benchabane, G. Teissier, C. Billard, A. Reinhardt, V. Laude, E. Defaÿ, and M. Aid “Observation of band gaps in the gigahertz range and deaf bands in a hypersonic aluminium nitride phononic crystal slab” *APPLIED PHYSICS LETTERS* **98**, 234103 (2011).

K

[Kushwaha 1993] M.S. Kushwaha, P. Halevi, L. Dobrzynski, and B. Djafari-Rouhani, “Acoustic Band-Structure of Periodic Elastic Composites”, *Physical Review Letters*, 71 (13), 2022-2025 (1993).

L

[Liu 2000] Z. Liu, X. Zhang, Y. Mao, C.T Chan, and P. Sheng, “ Locally resonant sonic materials”, *Physical Review Letters*, science, 289, 1734, (2000)

[Laude 2006] V. Laude, “ Physique des dispositifs à ondes élastiques”, cours master ELO, ENSMM , année scolaire (2005-2006).

[Lamb 1917] H. Lamb, “ On Waves in an Elastic Plate”, *Proceedings of the Royal Society of London, Series A*, 93, 114-128 (1917).

M

[Mortley 1963] W.S. Mortley, “ Improvements in or relating to wave-energy delay cells ”, *British patent* ,(1963).

[Sigalas 1995] M. Sigalas and E.N. Economou, “Band-Structure of Elastic-Waves in 2-Dimensional Systems ”, *Solid State Communications*, 86 (3), 141-143 (1995).

[Mohammadi 2008] S. Mohammadi, A.A. Eftekhar, A. Khelif, W. Hunt et A Adibi, “Evidence of large high frequency complete phononic band gaps in silicon phononic crystal plates”, *Appl.Phys. Lett.*, 92, 221905, (2008).

N

[Nicolay 2007] P. Nicolay, “ Les capteurs a ondes elastiques de surface applications pour la mesure des basses pressions des hautes temperatures” – Thèse de Doctorat – Université de Henri Poincaré, Nancy – (2007).

O

[Oudich 2011] M. Oudich, “ Contribution à l’étude des cristaux phononiques à résonance locale dans les régimes sonore et hypersonique : approche théorique et expérimentale ” – Thèse de Doctorat – Université de Henri Poincaré, Nancy – (2011).

R

[Rowen 1963] J.H. Rowen, “ Tapped ultrasonics delay line and uses therefor ”, US patent, (1963).

[Royer 2000] D. Royer et E.Dieulesaint, “ Propagation dans un solide ”, Techniques de l’ingénieur, (2000).

[Royer 2000] D. Royer et E.Dieulesaint, “ Propagation dans un solide ”, Techniques de l’ingénieur, (2000).

[Rayleigh 1885] L. Rayleigh, “ On waves propagating along the plane surface of an elastic solid ”, in proc. London math. Soc, vol 7, pages 11, (1885).

S

[Socié 2014] L. Achaoui, “ Interaction acousto-optique dans les matériaux périodiquement structurés ” – Thèse de Doctorat – Université de Franche Comté – (2014).

T

[Tancrell 1969] R.H. Tancrell, M.B. Barrett, L.Davies, and M.G. Holland. “ Dispersive delay lines using ultrasonic surface waves ”, Proc IEEE, (1969).

W

[Wu 2005] T.Wu, G.Hung, and S.Y.Kristallogr. 220, 840, (2005).

[Wu 2005] T.Wu, L.C.Wu, and Z.G.Hung, J.app. phys. 97, 094916, (2005).

Résumé :

Mon travail porte sur l'ingénierie des structures de bandes pour les ondes élastiques en surface SAW (*Surface Acoustic Wave*) des métamatériaux acoustiques. On s'intéressera particulièrement à l'interaction des ondes élastiques de surface avec des structures périodiques constitués de micro-plots ou piliers de forme cylindrique arrangés suivant différentes symétries cristallographiques.

Le calcul, et la localisation des bandes interdites ont été réalisés pour une structure composée de piliers cylindriques en nickel (*Ni*) sur un substrat piézoélectrique à base de tantalate de lithium (*LiTaO₃*). Les différentes simulations ont été obtenus à l'aide de programmes Matlab implémentés sous environnement Comsol Multiphysics 3.4 à l'aide de la méthode des éléments finis (FEM). La coupe 36° Y a été retenue pour le (*LiTaO₃*) en raison du coefficient de couplage élevé. Les champs de déplacement, ainsi que les spectres de transmission sont également

Mots clés : Cristaux phononiques, Métamatériaux acoustiques, Piézoélectricité, SAW, Résonance locale, Méthode des éléments finis (FEM), Peignes interdigités (IDT), Lithographie.

Abstract :

My project concerns engineering of bands structures for surface acoustic wave (SAW) of acoustic metamaterials. A particular attention will be paid to the interaction of surface acoustic waves with periodic structures constituted of micro-plots or pillars of cylindrical shape arranged according to different crystallographic symmetries.

The calculation and localization of the band gap were made for a structure composed of cylindrical pillars of nickel (Ni) on a piezoelectric substrate made of lithium tantalate (LiTaO₃). Different simulations were obtained using Matlab programs implemented under the Comsol Multiphysics 3.4 environment using the finite element method (FEM). We retain 36° Y and 42° Y sections for lithium tantalate (LiTaO₃) for their high coupling coefficients. We also present the displacement fields and the transmission spectra. The surface waves SAW are generated and detected directly on the surface of the piezoelectric material which in our case is lithium tantalate. On this latter,

présentés. Les ondes de surface SAW sont générées et détectées directement à la surface du matériau piézoélectrique qui dans notre cas est le tantalate de lithium. Sur ce dernier sont gravés des transducteurs interdigités qui sont des peignes métalliques obtenus par des procédés microtechniques standards comme la gravure, et la lithographie. L'objectif de cette seconde étape a été de caractériser électriquement les résonateurs SAW à l'aide de l'analyseur de spectre vectoriel. Enfin, la conception, ainsi que le process d'élaboration des différentes structures obtenues en salle blanche sont présentés.

Dans le domaine des hautes fréquences, ces dispositifs phononiques sont de bons candidats pour des applications RF comme le filtrage très sélectif, et le démultiplexage utilisés principalement dans le domaine des télécommunications, ainsi que dans le domaine des capteurs.

interdigital transducers which are metallic combs obtained by standard microtechnical processes such as engraving and lithography are engraved. The objective of this second step was to electrically characterize the SAW resonators using the vector spectrum analyzer. Finally, the design, as well as the process of elaboration of the different structures obtained in cleanroom of the technological center MIMENTO are presented.

In high frequencies domain, these phononic devices are good candidates for RF applications such as highly selective filtering and demultiplexing used mainly in the field of telecommunications, as well as in the field of sensors.

Key words: Phononic crystals, Metamaterials acoustic, piezoelectric, SAW, Local resonances, Finite Element Method (FEM), Interdigital transducers (IDT) – Lithography.