



République Algérienne Démocratique et
Populaire



Ministère de l'enseignement Supérieur
et de la Recherche scientifique
Université Echahid Hamma Lakhdar El-Oued

Faculté de Technologie

Mémoire de Fin d'Étude
En vue de l'obtention du diplôme de
MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Technologie

Filière : Télécommunication

Spécialité : Systèmes de Télécommunication

Thème

*Détection des ondes élastiques dans les matériaux
piézoélectriques*

Réalisé par :

Abid Manel et Ammari Hana

Soutenu en Septembre 2020 devant le jury compos de:

Dr. MEDJOURI Abdelkader	MCA	Président
M. TOUHAMI Redha	MAA	Examineur
M. BOULILA Mohamed	MAA	Directeur du mémoire

Année Universitaire : 2019/2020



DEDICACES

*Nous rendons un grand hommage à travers Cette
thèse ,*

en signe de respect et de reconnaissance envers :

Nos pères ,Nos mères

*Pour tous les sacrifices et leur soutien moral et matériel dont
ils ont fait preuve pour que nous réussissions.*

Nous le dédions également à

Mes frères et mes sœurs

Et mon fiancé Khaled .B

Et mon fiancé Ahmed .B

En un mot, à toute nos familles,

nos amis et tous ceux qui ont

contribué de près ou de loin.

Remerciement

Nous exprimons notre profonde gratitude en particulier aux correspondants de notre thèse,

Mr. Mohamed Boulila, qui ont mis leur confiance dans la réalisation de cette thèse.

Tout en suivant de près notre démarche scientifique, ils nous ont partagé leur riche expérience dans le domaine des micro-ondes acoustiques qui se propagent dans les dispositifs piézoélectriques, et nous ont fourni de précieux conseils et encouragements à toutes les étapes de notre étude pour réaliser cette thèse.

Nous remercions également tous les professeurs de l'Université de Hama Lakhder à El-Oued

Nous tenons à remercier sincèrement tous ceux qui étaient disponibles pour répondre à nos questions et clarifier nos doutes, à ceux qui ont soutenu nos efforts tout au long de ces années.

à la fin. Nous remercions tout particulièrement nos parents pour leur gentillesse et leur soutien.

Si ce n'était le plus important, nous ne serions pas là où nous sommes aujourd'hui

*Merci à nos frères et amis,
et à tous ceux qui nous ont soutenus*



Résumé

Ce travail portant sur le domaine des microondes acoustiques qui se propagent dans les dispositifs piézoélectriques.

Dans ce cas l'information circule sous un aspect élastique, cet aspect, qui n'est pas sensible aux bruits, permet d'améliorer les performances de ces dispositifs surtout au niveau des parasites et la stabilité des systèmes pour les hautes fréquences.

L'objectif de notre travail est de détecter les ondes élastiques dans les solides, en expliquant leur génération et leur propagation dans les matériaux piézoélectrique ainsi que leur excitation par les transducteurs interdigités.

L'étude s'est accentuée sur deux matériaux piézoélectriques qui sont le Niobate de Lithium et le Tantalate de Lithium. Nous avons expliqué brièvement le phénomène de détection des élastique dans un cristal piézoélectrique suivi par une comparaison entre les résultats obtenus au niveau des deux cristaux.

Mots clés :

Matériaux piézoélectrique, Ondes de surface, Ondes de volume, Ondes de fuites, Micro-ondes acoustiques.



This work focuses on the field of acoustic microwaves that propagate in piezoelectric devices.

In this case the information circulates in an elastic aspect, that aspect, which is not Sensitive to noise, allows to improve the performance of these devices especially at the level of parasites and the stability of the systems for high frequencies.

The objective of our work is to detect elastic waves in solids, explaining their generation and propagation in piezoelectric materials as well as their excitation by interdigitated transducers.

The study focused on two piezoelectric materials which are the Niobate Lithium and Lithium Tantalate. We briefly explained the phenomenon of elastic detection in a piezoelectric crystal followed by a comparison of the results obtained at the level of the two crystals.

Key Words:

Piezoelectric Materials, Surface Waves, Volume Waves, Leakage Waves, Acoustic microwaves.



ملخص

يركز هذا العمل على مجال الموجات متناهية الصغر الصوتية التي تنتشر في الأجهزة الكهربائية التي تعمل بالكهرباء.

وفي هذه الحالة، يتم تداول المعلومات في جانب مرن، وهذا الجانب، الذي لا يتأثر بالضوضاء، يسمح بتحسين أداء هذه الأجهزة، خاصة عند مستوى الطفيليات واستقرار أنظمة الترددات العالية.

الهدف من عملنا هو اكتشاف الموجات المرنة في المواد الصلبة، عن طريق شرح توليدهم وانتشارهم في المواد الكهرو ضغطية وكذلك إثارتهم بواسطة محولات الطاقة بين الأصابع ركزت الدراسة على مادتين تعملان بالكهرباء الانضغاطية وهما نيوباتي الليثيوم والليثيوم تننالييت. شرحنا بإيجاز ظاهرة الكشف عن المرونة في بلورة كهرو ضغطية متنوعة بمقارنة بين النتائج المتحصل عليها على مستوى البلوريتين

الكلمات المفتاحية :

الموجات الدقيقة الصوتية ، موجات السطح ، موجات الحجم ، موجات التسرب ، مواد كهرو ضغطية



Légendes des figures

CHAPITRE I : Généralités sur la piézoélectricité

<i>Figure I.1: Illustration des effets piézoélectriques.....</i>	<i>4</i>
<i>Figure I.2: Illustration des effets Piézoélectriques d'un matériau en céramique.....</i>	<i>7</i>
<i>Figure I.3: Matériau sans centre de symétrie.....</i>	<i>8</i>
<i>Figure I.4: Matériau ayant un centre de symétrie</i>	<i>8</i>
<i>Figure I.5: Organisation des 32 classes cristallines.</i>	<i>9</i>
<i>Figure I.6: La piézoélectricité naturelle</i>	<i>10</i>
<i>Figure I.7: Orientation des domaines avant et après polarisation.....</i>	<i>11</i>
<i>Figure I.8: Orientation des domaines ferroélectriques.....</i>	<i>12</i>
<i>Figure I.9: Structure d'un composite : pilier de céramique noyé dans un polymère.....</i>	<i>14</i>
<i>Figure I.10: Relation typique entre contraintes et déformations dans un solide.....</i>	<i>25</i>
<i>Figure I.11: Mode radial de vibration d'un échantillon sous forme de disque</i>	<i>27</i>

CHAPITRE II : Détection des ondes élastique dans les matériaux piézoélectrique

<i>Figure II. 1: Positions des particules d'un cristal</i>	<i>31</i>
<i>Figure II.2: Excitation du matériau piézoélectrique par un transducteur interdigité ...</i>	<i>32</i>
<i>Figure II.3: Ondes de surface.....</i>	<i>36</i>
<i>Figure II.4: Ondes de fuite.....</i>	<i>37</i>
<i>Figure II.5: Ondes de volume</i>	<i>37</i>
<i>Figure II.6: Ondes SSBW.....</i>	<i>38</i>
<i>Figure II.7: Partie réelle de $\alpha_3(\text{LiNbO}_3)$.....</i>	<i>40</i>

Figure II.8: Partie imaginaire $de\alpha_3(\text{LiNbO}_3)$	40
Figure II.9: Partie réelle de $\alpha_4(\text{LiNbO}_3)$	41
Figure II.10: Partie imaginaire $de\alpha_4(\text{LiNbO}_3)$	41
Figure II.11: Partie réelle $de\alpha_1(\text{LiNbO}_3)$	42
Figure II.12: Partie imaginaire de $\alpha_1(\text{LiNbO}_3)$	42
Figure II.13: Partie réelle $de\alpha_2(\text{LiNbO}_3)$	43
Figure II.14: Partie imaginaire $de\alpha_2(\text{LiNbO}_3)$	43
Figure II.15: Partie réelle $de\alpha_3(\text{LiTaO}_3)$	44
Figure II.16: Partie imaginaire $de\alpha_3(\text{LiTaO}_3)$	45
Figure II.17: Partie réelle $de\alpha_4(\text{LiTaO}_3)$	45
Figure II.18: Partie imaginaire $de\alpha_4(\text{LiTaO}_3)$	46
Figure II.19: échographe.....	47
Figure II.20: Schéma Synoptique d'un Dispositif d'Echographie.....	49



Listes des tableaux

Tableau I.1: Caractéristiques piézoélectriques des matériaux piézoélectrique.....	16
Tableau I.2 : Modes de résonance fondamentaux pour matériaux piézoélectriques	17
Tableau I.3 : Applications des matériaux piézoélectriques en fonction de l'effet utilisé.....	20
Tableau I.4 : Domaines d'applications des céramiques piézoélectriques.....	22
Tableau I.5 : Equations de la piézoélectricité.....	23
Tableau I.6 : Définition des termes et dimension des matrices utilisées en équations.....	24



Liste des acronymes et symboles.

Abréviations

Acronyme	Description
PZT	plomb, zirconate, titanate
PVDF	PolyVynilDiFluorure
LiNbO₃	Le Niobate de Lithium
LiTaO₃	Le tantalate de lithium
SAW	Surface Acoustic Wave
STW	Surface Transverse Wave
LSAW	Leaky Surface Acoustic Wave
FBAR	Film Bulk Acoustic Resonator
LCD	Liquid Crystal Display
SSBW	Surface Skimming Bulk Wave

SYMBOLES:

Symbole	Description
P	Le coefficient pyroélectrique
T_c	Température de Curie (°C)
ϵ_r	Constante diélectrique
d_{33}	Constante de charge $10^{-12}(\text{C/N})$
k₃₃	Coefficient de couplage(%)
g_{33}	Constante de tension (Vm/N)

U_E	L'énergie élastique.
U_D	L'énergie diélectrique.
U_m	L'énergie d'interaction, ou mutuelle, élasto-diélectrique.
D	Constante piézoélectrique qui traduit la proportionnalité entre la charge et la contrainte.
s	Compliance ou susceptibilité élastique.
e	Constante piézoélectrique.
C	Constante élastique.
K	Coefficient de couplage électro mécanique.
$d_{mn}(C/N)$	La constante piézoélectrique de charge.
$g_{mn}(V \cdot m/N)$	La constante piézoélectrique de tension.
Q_m	Coefficient desurtensionmécanique
\vec{l}	Le vecteur position de la particule avant déformation
$l(L, t)$	Le vecteur position de la particule après déformation
D	L'induction électrique .
\vec{E}	Le champ électrique.
E	La permittivité du milieu (F/m).
e	Tenseur de piézoélectricité (c/ m).
S	Tenseur de déformation.
C	Tenseur d'élasticité (N/ m ²).
$[A]$	Une matrice symétrique 4x4.
$[U]$	Composantes à déterminer.
C_n	Constante à déterminer par les conditions aux limites.
α_j	Les coefficients d'atténuation



Sommaire

Introduction générale	1
 <i>Chapitre I : Généralités sur la piézoélectricité.....</i>	 3
I.1 Introduction	4
I.2 Historique.....	5
I.3 L'effet piézoélectrique.....	6
I.4 Symétrie et piézoélectrité	7
I.5 La piézoélectrité naturelle	10
I.6 La piézoélectrité artificielle	11
I.7 Polarisations.....	11
I.8 Les matériaux piézoélectriques	12
I.9 Les principaux matériaux piézoélectriques.....	13
<i>I.9.1 Les cristaux</i>	<i>13</i>
<i>I.9.2 Les céramiques</i>	<i>13</i>
<i>I.9.3 Les polymères</i>	<i>14</i>
<i>I.9.4 Les composites.....</i>	<i>14</i>
I.10 Choix des matériaux piézoélectriques	15
I.11 Modes de vibrations des matériaux piézoélectriques	17
I.12 Dispositifs piézoélectriques et leurs applications.....	19
I.13 Les équations de la piézoélectrité	22
I.14 Constants élastiques des solides	24
I.15 Définition des coefficients piézoélectriques	25
<i>I.15.1 La constante piézoélectrique de charge d_{mn} :.....</i>	<i>26</i>
<i>I.15.2 La constante piézoélectrique de tension g_{mn} :</i>	<i>26</i>
<i>I.15.3 Coefficient de couplage électromécanique K :</i>	<i>26</i>
<i>I.15.4 Coefficient de surtension mécanique Q_m :</i>	<i>27</i>
I.16 Les avantages des éléments piézoélectriques	28
I.17 Conclusion.....	29

Chapitre II: Détection des ondes élastique dans les matériaux piézoélectrique..... 30

II.1	Introduction	31
II.2	Ondes élastiques et électriques.....	32
II.3	Equations de mouvement d'une particule et du potentiel électrique	32
II.4	Forme générale de la solution.....	34
II.5	Comportement des racines de l'équation séculaire	35
II.6	Application sur le LiNbO ₃ (Niobate de Lithium) coupe Y-X.....	38
II.6.1	Description du matériau LiNbO ₃	38
II.6.2	Principales applications du LiNbO ₃	38
II.7	Application sur le LiTaO ₃ (Tantalate de Lithium) coupe Y-X.....	44
II.8	Comparaison entre les deux matériaux.....	46
II.9	Fonctionnement de l'échographie	47
II.9.1	Matériel nécessaire.....	47
II.9.2	Déroulement de l'examen.....	48
II.9.3	Schéma Synoptique d'un Dispositif d'Echographie	49
II.10	Conclusion.....	50
	 Conclusion général.....	 51

Introduction générale

La recherche scientifique n'a cessé de s'améliorer d'un jour à un autre, plutôt, d'une heure à une autre. Par exemple dans le domaine de l'électronique, au début des années soixante et même cinquante, tous les dispositifs électroniques ont été conçus grâce à une matière dite semi-conductrice, vu sa capacité de conduire du courant électrique. Ce courant était considéré comme élément ou grandeur porteuse d'une information qui se manifeste par le déplacement des électrons, disant que l'aspect électrique est prédominant.

Après la découverte de la piézoélectricité au niveau de certains matériaux dits cristaux piézoélectriques, une nouvelle voie vient de s'ouvrir. Elle permet d'améliorer les performances des dispositifs électroniques surtout au niveau des parasites et la stabilité des systèmes pour les hautes fréquences.

Le matériau piézoélectrique, est tout simplement un cristal qui se déforme lorsqu'il est excité par un courant électrique, sa déformation est proportionnelle à son excitation. On dit alors, qu'on a transformé un signal électrique en un signal élastique ou acoustique, puisque sa propagation se fera avec des vitesses similaires à ceux des ondes supersoniques. Si ces ondes se propagent au niveau de la surface du matériau considéré, on les appelle ondes de surface.

Ces ondes de surface ne sont détectables que pour une seule vitesse acoustique et pour un matériau donné, cependant pour différentes vitesses acoustiques, on peut trouver des ondes de surface dites ondes secondaires de surface ou pseudo-ondes de surface. Ces dernières sont accompagnées par d'autres types d'ondes, dites ondes de volume et ondes de fuite.

Les chercheurs dans ce domaine ont envisagé plusieurs possibilités d'application pour le genre dites ondes de volume dans le domaine médical (échographie) et pour les ondes de surface (structures rayonnantes).

Dans l'espace, les dispositifs électroniques sont noyés dans un milieu qui est différent par rapport à celui qui est sur terre. Les radiations cosmiques ainsi que les rayons solaires modifient les performances de ces dispositifs, surtout que cette influence touche généralement les instruments à caractère électrique qui sont très sensibles aux bruits dont l'origine cosmique. Tout cela peut être évité si on utilise les dispositifs piézoélectriques (à caractère élastique). Dans ce cas l'information circule sous un aspect élastique. Cet aspect, qui n'est pas

sensible aux bruits, permet d'améliorer les performances de ces dispositifs surtout au niveau des parasites et la stabilité des systèmes pour les hautes fréquences.

Dans ce mémoire, nous étudions la détection des différents types d'ondes dans un matériau piézoélectrique. Pour cela, Un premier chapitre explique de manière simplifiée quelques aspects de la piézoélectricité et retrace l'origine du phénomène de la piézoélectricité, ainsi que son évolution, son développement et la découverte du matériau piézoélectrique.

Dans le deuxième chapitre, nous analysons les ondes acoustiques dans un cristal à surface libre. Nous déterminons pour cela les caractéristiques de propagation des ondes de surface, des ondes de fuite et de volume..

Enfin, nous terminerons notre mémoire par une conclusion générale au niveau de la quelle, nous proposons certaines perspectives; ceci entre dans le cadre des travaux futurs.



Chapitre I
Généralités sur la piézoélectricité

I.1 Introduction

Le mouvement des particules d'un corps est composé d'une partie correspondant au corps indéformable (translation et rotation) et d'une partie liée à la déformation de ce corps.

Cette déformation est fonction de l'effort qui la produit est connue sous le nom de la théorie de l'élasticité, cette dernière n'est qu'un modèle simplifié établi à partir d'un certain nombre d'hypothèses, telles que : réversibilité et linéarité des déformations afin d'obéir à la loi de Hooke et homogénéité des corps étudiés. Cependant, les matériaux utilisés dans ce domaine présentent souvent d'autres propriétés telle que : piézoélectricité, anisotropie....

L'origine du mot piézoélectricité dérive du grec "Piézo" qui signifie pression. La piézoélectricité est une propriété basée sur la capacité de certains cristaux de générer un champ électrique lorsqu'ils sont soumis à une pression mécanique externe ; on parle alors d'effet piézoélectrique direct schématisé sur la figure I.1. Par contre, ces mêmes cristaux subissent une déformation sous l'action d'un champ électrique ; c'est l'effet piézoélectrique inverse.

Ce phénomène s'observe uniquement dans des matériaux non conducteurs. Le déplacement des charges se fait dans une direction privilégiée sous les efforts de traction ou de compression dans la structure cristalline de la céramique.[1]

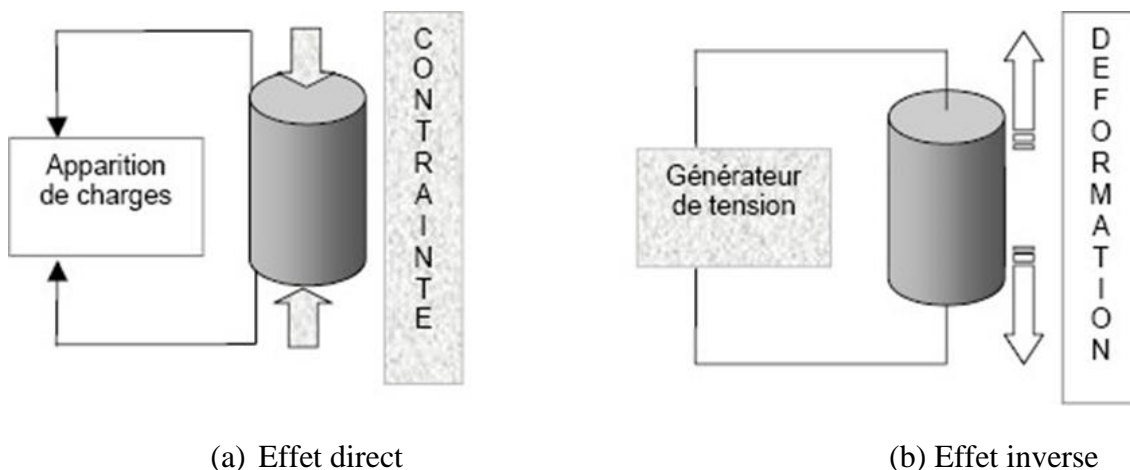


Figure I.1. Illustration des effets piézoélectriques [1].

L'observation du phénomène piézoélectrique a été faite par un minéralogiste français R. HAUY en 1817. L'effet piézoélectrique direct est attribué à Pierre et Jacques CURIE en 1880. L'effet piézoélectrique indirect a été mis en évidence, mathématiquement, en 1881 par LIPPMAN et confirmé par les frères CURIE.

La première application industrielle de ce phénomène a vu le jour en France en 1917 avec le détecteur ultrasonore sous-marin mis au point par P. LANGEVIN [1,2].

I.2 Historique

L'observation qualitative du phénomène piézoélectrique a été faite au milieu du XIXe siècle (1817) par un minéralogiste français l'abbé René Just Haüy (d'après ses théories cristallographiques) [3,4].

Ce fondateur de la cristallographie a en effet par ses observations de la matière (étude systématique de la morphologie générale des cristaux) apporté de grandes connaissances au niveau de la géométrie atomique des cristaux et participé à en déterminer des lois structurales.

La piézoélectricité a été mise en évidence à Paris en 1880 par les frères Pierre et Jacques Curie. Ces derniers montrèrent que les cristaux de quartz, topaze, tourmaline, niobate de lithium, cane à sucre et sel de Rochelle génèrent une polarisation électrique sous contraintes mécaniques c'est à dire la production d'une charge électrique sous contraintes mécaniques [5,6].

Cette découverte attira immédiatement l'attention des scientifiques : le français Gabriel Lippmann (1845-1921), Prix Nobel de physique en 1908 et inventeur de la photographie couleur, démontra de son côté l'année suivante que le phénomène était réversible et déduira mathématiquement du principe fondamental de la thermodynamique la théorie des cristaux piézoélectriques ; ainsi si des signaux électriques sont appliqués sur le cristal, celui-ci se dilate et se comprime dans une certaine direction, sa résonance mécanique favorisant les vibrations à une fréquence donnée. C'est grâce à cette dernière propriété que le quartz a atteint une telle notoriété [3,7]. Immédiatement les frères Curies confirmèrent l'existence de l'effet piézoélectrique inverse. Ils apportèrent une preuve quantitative de la réversibilité complète de la déformation électro-élasto-mécanique dans les cristaux piézoélectriques.

La piézoélectricité n'était qu'une curiosité de laboratoire mais la première guerre mondiale (1914-1918) la fit entrer dans la voie des applications pratiques. En 1917, Paul

Langevin eut l'idée d'exciter des lames de quartz par un signal électrique alternatif pour créer des ultrasons ; ceux-ci, réfléchis sur la coque des sous-marins ennemis, retournent vers d'autres cristaux piézoélectriques et y font naître des tensions électriques alternatives aisées à détecter. Ce générateur d'ondes ultrasonores « Sonar » est la première utilisation conjuguée des effets piézoélectriques direct et inverse. Cependant, cette invention ne s'est pas perfectionnée jusqu'à la fin de la guerre [8,9].

Le succès du sonar a stimulé l'activité intense de développement sur toutes sortes de dispositifs piézoélectriques, résonnant et non-résonnant. Walter G. Cady, en 1918, réalisa le premier oscillateur électronique stabilisé par un cristal de quartz [3]. Il établit le schéma électrique équivalent du résonateur piézoélectrique. Dès lors, la piézoélectricité devint l'associée de l'électronique naissante. Elle permit la génération de fréquences électriques, donc d'échelles de temps, extrêmement stables.

La Seconde Guerre mondiale vit naître l'industrie moderne de la piézoélectricité. Cinquante millions de résonateurs à quartz piézoélectriques furent alors fabriqués aux États-Unis. A la même époque furent étudiés : des cristaux synthétiques, parfois décevants à l'usage ; mais surtout certaines céramiques, dites ferroélectriques, rendues anisotropes par un champ électrique au cours de leur élaboration et présentant ensuite un effet piézoélectrique intense [9].

En 1954, les zircono titanates de plomb (PZT) ont été élaborés, et se sont répandus très rapidement, car leurs propriétés supplantent de loin celles de toutes les autres familles de composés [4].

I.3 L'effet piézoélectrique

Cady a défini la piézoélectricité de la façon suivante: «polarisation électrique produite par des contraintes mécaniques dans les cristaux se rapportant à certaines classes, la polarisation étant proportionnelle à la contrainte et changeant». Deux effets existent: l'effet piézoélectrique direct défini comme étant l'apparition de charges électriques par l'application d'une pression et l'effet piézoélectrique inverse caractérisé par l'apparition d'une déformation à l'application d'un champ électrique, dont la nature (expansion ou contraction) dépendant de la polarité. L'effet direct peut être utilisé dans les capteurs, tandis que l'effet indirect est à la base des actionneurs.

L'épaisseur de la céramique augmente si le champ électrique appliqué est dans le même sens que le champ électrique de polarisation (P). Si l'on inverse le sens du champ électrique, l'allongement change de signe, c'est-à-dire que l'on passe d'une dilatation à une compression.[10]

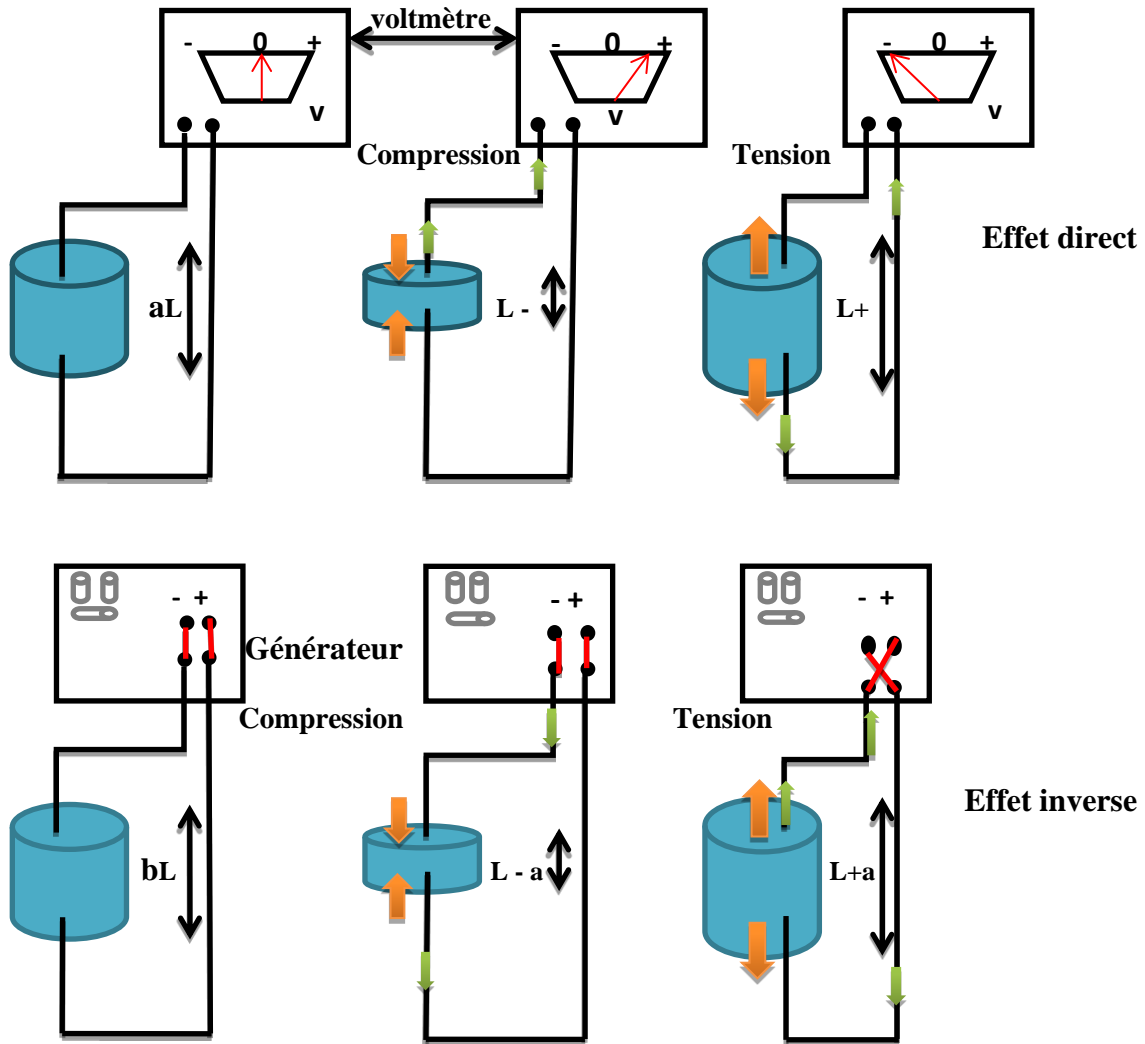


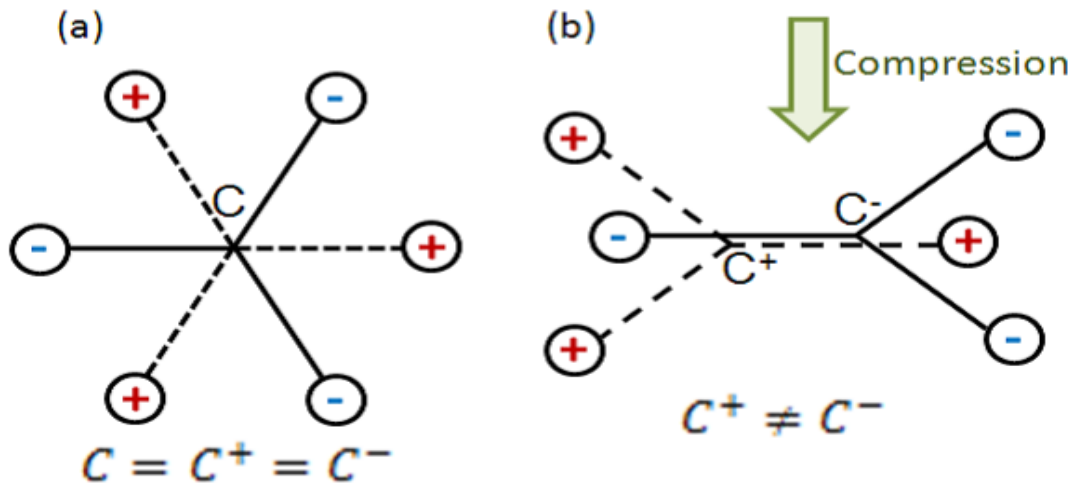
Figure I.2: Illustration des effets Piézoélectriques d'un matériau en céramique:

a) Effet direct b) effet inverse[21].

I.4 Symétrie et piézoélectricité

La piézoélectricité n'apparaît que pour des cristaux et des céramiques anisotropes ne possédant pas de centre de symétrie au niveau de l'arrangement atomique élémentaire (Figure I.3). S'il y a un centre de symétrie, si on soumet le matériau à une compression, le centre de symétrie des charges positives et des charges négatives restera le

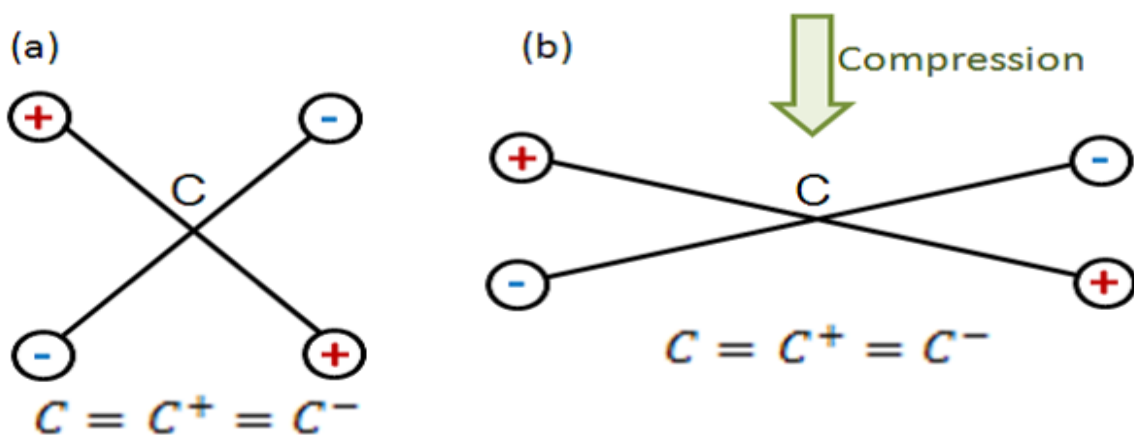
même ce qui empêche l'apparition d'un dipôle élémentaire (Figure I.4). En effet, les propriétés physiques représentées par des tenseurs de rang impair ne se manifestent pas dans les cristaux appartenant aux classes centro-symétriques ; c'est le cas de la piézoélectricité [11].



Cristal sans centre de symétrie :

Pas de centre de symétrie au repos (a). Soumis à une compression (b), les centres des charges + et - initialement confondus se séparent créant un dipôle électrique : l'effet piézoélectrique apparaît.

Figure I.3 : Matériau sans centre de symétrie [11]



Matériau ayant un centre de symétrie :

Aucun effet piézoélectrique n'apparaît après compression

Figure I.4 : Matériau ayant un centre de symétrie [11].

Sur les 32 classes cristallines, 21 sont dépourvues de centre de symétrie. Parmi celles-ci, 20 sont piézoélectriques. L'organisation décrite dans la Figure I.5 montre qu'il existe 10 classes pyroélectriques et polaires, c'est à dire qu'elles possèdent une polarisation électrique en l'absence du champ électrique externe appliqué. La direction privilégiée de la polarisation est appelée axe polaire du cristal [1].

La variation de la polarisation spontanée DP de ces corps est une fonction linéaire de la température θ , $\Delta P = \rho \Delta \theta$ où ρ est le coefficient pyroélectrique.

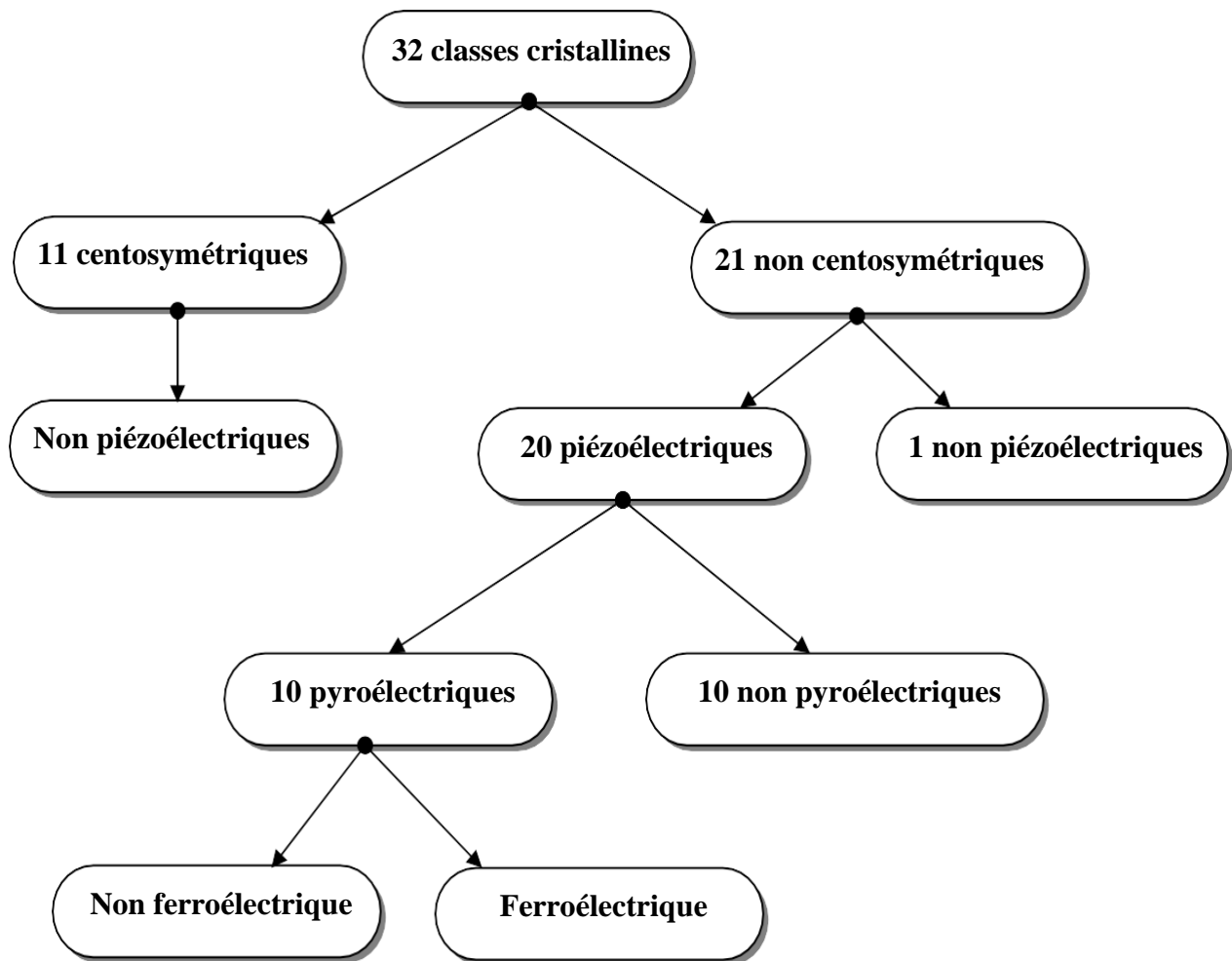


Figure I.5 : Organisation des 32 classes cristallines.[1]

Parmi les 32 classes cristallines qui existent (Figure I.5), 20 présentent l'effet piézoélectrique dont 10 classes qui présentent un moment dipolaire permanent en l'absence d'un champ électrique[2].

I.5 La piézoélectricité naturelle

Certains cristaux tels que le quartz sont naturellement piézoélectriques. Une maille de cristal de quartz est composée d'atomes de silicium portant une charge électrique positive et d'atomes d'oxygène portant une charge électrique négative. Sur la figure I.6, on voit qu'en l'absence de déformation, le barycentre des charges positives est confondu avec celui des charges négatives.

Si maintenant on applique une force de compression, la maille cristalline va se déformer, de sorte que le barycentre des charges positives et celui des charges négatives vont s'écarter. On a ainsi créé un dipôle électrique qui par réaction, va faire apparaître des charges de signes opposés sur les deux électrodes ; c'est l'effet direct. Si au contraire, on applique des charges électriques (c'est-à-dire que l'on crée une différence de potentiel entre les électrodes), alors, pour rétablir l'équilibre des forces électrostatiques, c'est la maille cristalline qui se déforme, c'est l'effet inverse ou réciproque [12].

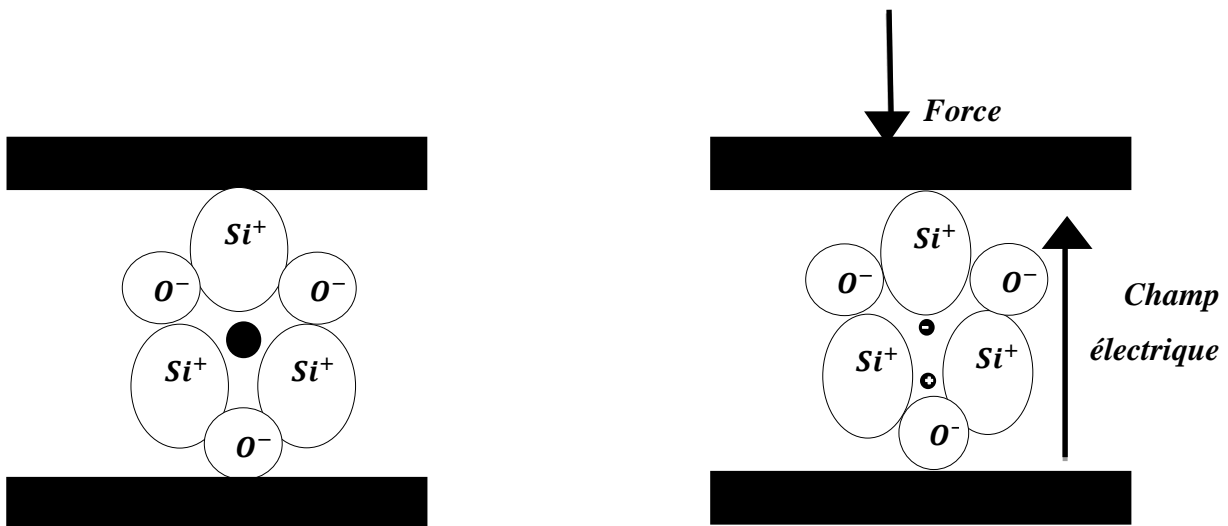
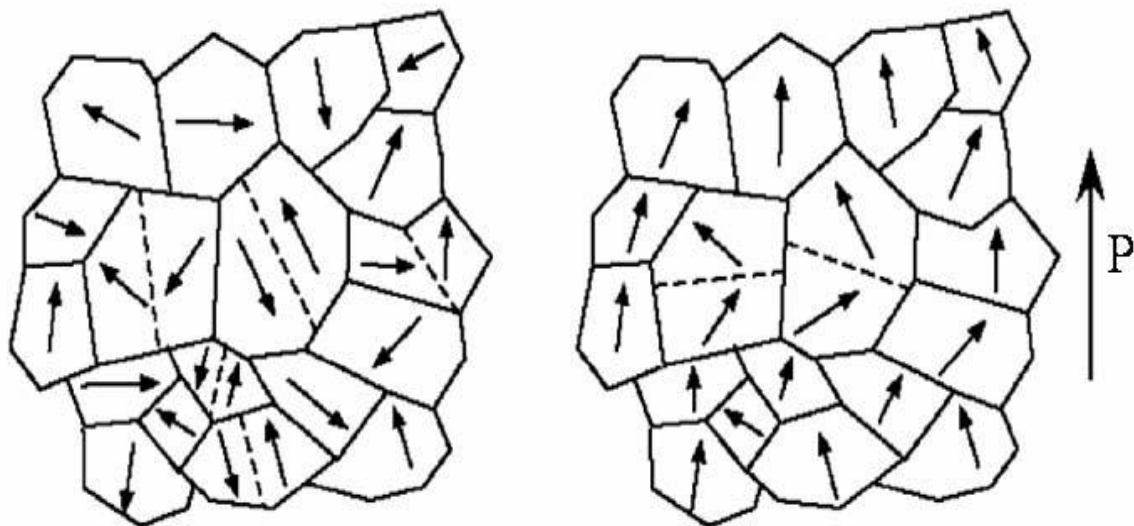


Figure I.6 : La piézoélectricité naturelle : a) piézoélectricité du quartz naturel à l'équilibre.

b) avec une force appliquée [12].

I.6 La piézoélectricité artificielle

Les matériaux ferroélectriques sont composés d'une multitude de grains dont chacun est un cristal : ce sont des matériaux polycristallins. Chaque petit cristal possède un axe privilégié, ici représenté par une flèche, mais ces axes sont orientés de façon aléatoire, de sorte que l'effet piézoélectrique résultant est nul. On peut cependant réorienter dans le même sens les axes des grains par l'application d'un champ électrique intense, d'abord à haute température, puis pendant une phase de retour à la température ambiante : cette procédure est appelée POLARISATION et il en résulte que le matériau ferroélectrique a acquis une piézoélectricité. Il garde en quelque sorte la mémoire du champ électrique qui lui a été appliqué sous forme d'un champ électrique permanent E [12].



Matériau non Polarisé

Matériau Polarisé

Figure I.7 : Orientation des domaines avant et après polarisation [13].

Il est à noter que si le matériau est chauffé au delà d'une valeur appelée température de Curie T_c , il perd sa piézoélectricité. T_c étant typiquement comprise entre 80 et 400 °C, ce phénomène ne peut se produire lors d'une utilisation clinique normale [13].

I.7 Polarisation

Un matériau ferroélectrique est divisé en régions dans lesquelles les dipôles électriques sont orientés de façon aléatoire. Chaque région, appelée domaine, présente une polarisation spontanée, homogène et uniforme. Les céramiques fabriquées à base de

matériaux ferroélectriques n'ont aucun moment dipolaire électrique global à l'échelle macroscopique. Un tel milieu ne peut acquérir la propriété de piézoélectricité qu'après avoir subi un traitement particulier, dit de «polarisation» (figure I.8). Il s'agit de l'application d'un champ électrique externe, continu et intense (de l'ordre de 20 kV/cm) pendant quelques minutes à une température inférieure à celle de Curie T_c ($200\text{ °C} < T_c < 400\text{ °C}$), d'environ 100 °C . Par définition, T_c est la température au dessus de laquelle le matériau perd sa polarisation spontanée [14].

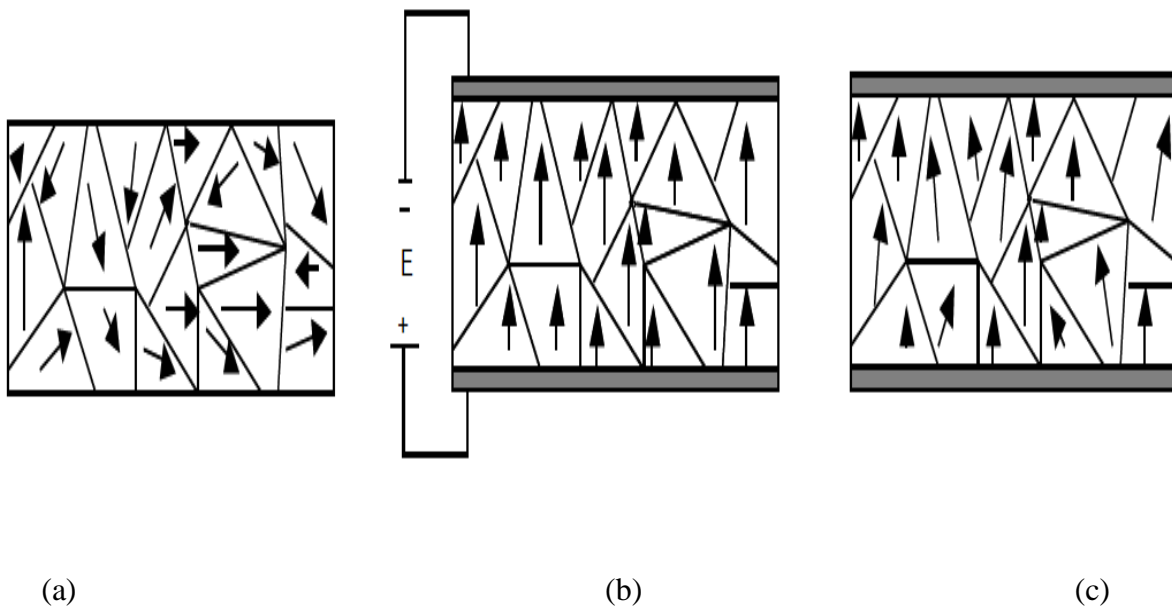


Figure I.8 :Orientation des domaines ferroélectriques avant (a), pendant (b) et après polarisation (c)[14].

I.8 Les matériaux piézoélectriques

L'effet piézoélectrique dans un cristal résulte essentiellement de l'existence de dipôles électriques internes. Ces dipôles sont créés par la séparation à l'échelle de la maille du centre de gravité des charges positives de celui des charges négatives sous l'effet d'une contrainte externe. Parmi les 32 classes cristallines existantes, 20 présentent l'effet piézoélectrique. Elles sont toutes dépourvues de centre de symétrie. Dix des vingt classes cristallines piézoélectriques présentent une polarisation électrique spontanée – ou moment dipolaire permanent – en l'absence de contrainte ou champ extérieur: elles sont dites polaires. Les cristaux appartenant à ces 10 classes sont appelés pyroélectriques en raison de la variation de la polarisation spontanée avec la température[4].

I.9 Les principaux matériaux piézoélectriques

Pendant la deuxième guerre mondiale, des recherches sont menées sur le phénomène piézoélectrique. Elles montrent que certains matériaux piézoélectriques ont des constants diélectriques importants. Parmi ces différents matériaux, trois types sont distingués : les polymères, les céramiques et les cristaux[31].

I.9.1 Les cristaux

Le cristal piézo-électrique le plus connu est le quartz mais ses propriétés sont peu attrayantes pour les applications de transducteurs médicaux : son impédance acoustique est relativement élevée et son coefficient de couplage très faible.

D'autres cristaux, tel que le niobate de lithium (LiNbO_3) ou le tantalate de lithium (LiTaO_3) affichent des valeurs de k_t plus élevées. Le coût élevé et la fragilité de ces cristaux expliquent que l'on ne les retrouve que très peu dans les produits actuels.

Ils sont cependant utilisés en laboratoire dans des dispositifs à très haute résolution pour des raisons essentiellement technologiques [2].

I.9.2 Les céramiques

Les céramiques piézo-électriques sont incontestablement les matériaux les mieux adaptés à l'heure actuelle pour une utilisation échographique. Ils sont souvent utilisés tels quels mais entrent également dans la fabrication des composites que nous décrivons plus loin. Ce succès peut sembler paradoxal car, bien que les valeurs de k_t soient élevées, leur impédance acoustique est bien plus élevée que celle des tissus biologiques. Il est dû au fait que ces matériaux sont d'un coût relativement faible, qu'ils sont usinables et faciles à transformer et surtout qu'ils offrent un éventail très large de performances. En effet, il existe de très nombreuses compositions différentes dont les propriétés diélectriques et mécaniques varient considérablement, de sorte que l'on trouve toujours une céramique adaptée à une application particulière.

Citons entre autres, les titanates de baryum qui sont les ancêtres des céramiques actuelles, la famille des PZT (plomb, zirconate, titanate) qui compte à elle seule cinq à six compositions différentes et qui est la plus utilisée ; les titanates de plomb qui tendent de plus en plus à concurrencer les PZT et enfin les métaniobates de plomb utilisés pour l'imagerie haute résolution. Notons que les céramiques sont des polycristaux qui sont fabriqués par

frittage d'un mélange d'oxydes et que leur procédé de fabrication peut être modulé comme leur composition, afin d'ajuster leurs performances diélectriques, mécaniques et piézoélectriques [15].

I.9.3 Les polymères

Certains polymères tel que le PVDF (PolyVynilDiFluorure) et des copolymères tel que le P(VDF-TrFE) peuvent acquérir des propriétés piézo-électriques. Ils se caractérisent par une faible impédance acoustique et sont donc supérieurs à ce point de vue. Ce pendant jusqu'à une période récente, leurs coefficients de couplage étaient bien plus faibles que ceux des céramiques. L'amélioration des procédés de fabrication et plus particulièrement ceux des copolymères a abouti à des valeurs de kt de l'ordre de la moitié de ceux obtenus avec des céramiques. Les transducteurs à base de copolymères ont aujourd'hui des performances qui s'approchent de celles des capteurs à céramiques. Ils sont essentiellement utilisés dans les dispositifs haute fréquence à cause d'avantages technologiques. Quelques barrettes expérimentales fonctionnant au dessus de 7MHz ont été réalisées, on peut les trouver dans des transducteurs pour l'échographie ophtalmologique, cutanée ou intravasculaire. Ils se prêtent bien, en outre, à une miniaturisation des sondes [17].

I.9.4 Les composites

Ces matériaux, d'abord développés pour des applications sonar, ont fait leur apparition au début des années 80 et représentent l'avancée majeure dans le domaine des matériaux piézo-électriques, depuis l'apparition des PZT dans les années 60. Leur origine provient du constat selon lequel aucun matériau existant n'avait à la fois une impédance acoustique assez faible pour bien transmettre son énergie aux tissus biologiques et une valeur de kt élevée. En effet, les céramiques souffrent d'une impédance acoustique, trop élevée et les polymères d'une valeur de kt trop faible. L'idée est donc née qu'il fallait utiliser à la fois une céramique à kt élevée, associée à un matériau passif de faible impédance acoustique de sorte que le matériau résultant ait une impédance acoustique plus faible tout en gardant un kt comparable avec celui d'une céramique [15].

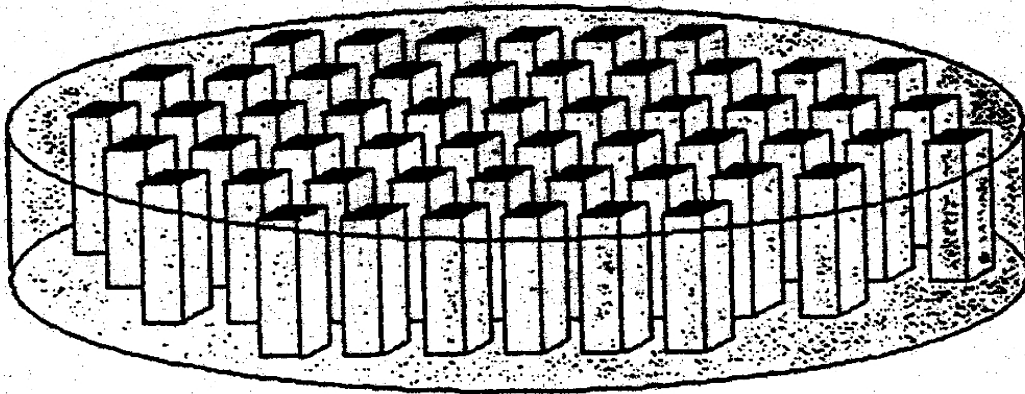


Figure I.9 : Structure d'un composite : pilier de céramique noyé dans un polymère [15].

De nombreux types de composites ont été développés, ils se classent en termes de connectivité (nombre de directions de l'espace (0 à 3) selon lesquelles un matériau est en continuité avec lui-même). Le premier chiffre est relatif au matériau actif (céramique piézo-électrique), le second au matériau passif (résine polymère).

Pour les applications médicales, le composite de connectivité 1-3 représenté sur la figure s'est imposé rapidement comme le matériau le plus performant : il est constitué de barreaux de céramiques noyés dans une matrice en résine.

Des études théoriques confirmées par des mesures ont montré que la valeur du k_t pouvant être égale, voire supérieure à celle de la céramique seule, avec une impédance acoustique deux à trois fois plus faible.

Les composites arrivent aujourd'hui au stade de l'industrialisation et de nombreux fabricants les utilisent dans leurs transducteurs à réseaux annulaires et barrettes. Ils permettent une amélioration substantielle de la qualité des images échographiques dans les fréquences habituelles, à savoir entre 1 et 10 MHz, mais leur utilisation à plus haute fréquence est actuellement limitée par la présence de modes de résonance indésirables liés à la structure interne de ces matériaux [15].

I.10 Choix des matériaux piézoélectriques

Le choix du matériau repose avant tout sur ses performances physiques (électriques et mécaniques), mais aussi sur le procédé de dépôt utilisé. Nous allons dans ce qui suit définir les propriétés physiques importantes de ces matériaux et établir des comparaisons entre eux afin de déterminer quel est le meilleur candidat en fonction des applications visées.

- La densité est aussi un paramètre déterminant. Elle est liée à la masse volumique du matériau ainsi que l' environnement fonctionnel.
- La constante diélectrique : le niveau de l' impédance du résonateur est déterminé par la taille des électrodes, par l' épaisseur de la couche piézoélectrique et par la constante diélectrique. Plus cette dernière sera grande, et plus la taille des résonateurs sera réduite.
- Une forte constante de charge d_{33} permet une bonne tenue en puissance du matériau piézoélectrique.
- Le carré du coefficient de couplage électromécanique : il détermine le degré D'échange d'énergie entre le domaine mécanique et le domaine électrique. Une couche Piézoélectrique avec un coefficient de couplage trop faible ne permettra pas de faire des filtres avec la bande passante requise pour les applications de téléphonie mobile [29].
- La température de Curie T_c (°C) d'un matériau ferromagnétique ou ferrimagnétique est la température TC à laquelle le matériau perd son aimantation permanente. Le matériau devient alors paramagnétique.
- Constante de tension piézoélectrique (g) : La constante de tension piézoélectrique est mesurée en Vm / N (volts par mètre / Newton) et nous donne des informations sur la relation entre le champ électrique créé dans une céramique de 1 mètre de long et la contrainte mécanique appliquée.

Le tableau I.1 donne quelques valeurs des caractéristiques pour certains matériaux piézoélectriques.

Les matériaux piézoélectriques	$LiNbO_3$	$LiTaO_3$
Température de Curie T_c (°C)	1210	< 350
Constante diélectrique ϵ_r	29	200 – 4000
Constante de charge $d_{33} 10^{-12} (C/N)$	6	40 – 750
Coefficient de couplage k_{33} (%)	23	40 – 70
Constante de tension $g_{33} 10^{-3} (Vm/N)$	20	15-40
Densité g/cm^3	4,64	7,5

Tableau I.1 : Caractéristiques piézoélectriques des matériaux piézoélectriques[20].

I.11 Modes de vibrations des matériaux piézoélectriques

Un matériau piézoélectrique, excité par un champ électrique alternatif de faible intensité (quelques volts /cm) et de pulsation ω , se déforme en générant une onde acoustique de même pulsation: plus explicitement, lorsque ω est égale à un mode propre de résonance du matériau, une résonance est induite. Cette résonance électromécanique dépend de la géométrie de l'échantillon, de la direction du champ d'excitation E et de la polarisation. La caractérisation d'un résonateur piézoélectrique nécessite différentes géométries avec des dimensions bien définies, afin de contraindre la vibration dans une direction spécifiée et d'assurer la séparation des modes de résonances (tableau. I-1) [9].

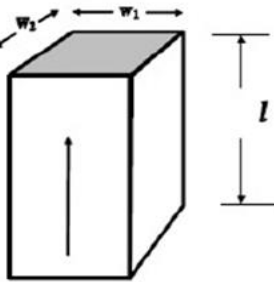
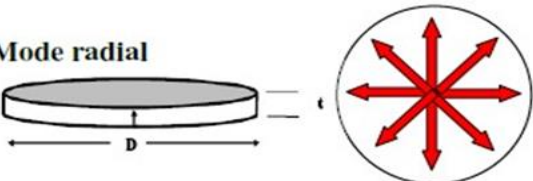

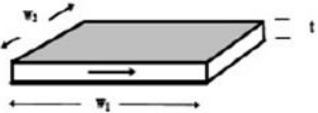
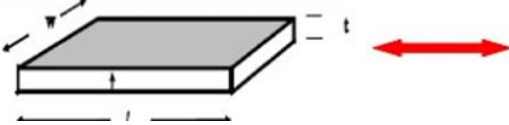
Mode de vibration	Dimensions	Constantes mesurées
Mode longitudinal 	$l > 5w_1, l > 5w_2$	$k_{33}, d_{33}, g_{33}, \epsilon_{33}^T, \epsilon_{33}^S$ $s_{33}^D, s_{33}^E, Q_{33}$
Mode radial 	$20t < D$	$k_p, d_{31}, \epsilon_{33}^T$ s_{11}^E, s_{12}^E
Mode en épaisseur 	$10t < w_1, 10t < w_2$ pour un disque ($20t < D$)	$k_t, e_{33}, h_{33}, \epsilon_{33}^S$ c_{33}^D, c_{33}^E, Q_t
Mode de cisaillement 	$w_1 \text{ et } w_2 > 10t$	$k_{15}, d_{15}, g_{15}, \epsilon_{11}^T, \epsilon_{11}^S$ $s_{55}^D, s_{55}^E, c_{55}^D, c_{55}^E, Q_{15}$
Mode transverse ou latéral 	$l > 10t, w > 3t \text{ et } l > 3w$ pour un disque ($20t < D$)	$k_{31}, d_{31}, g_{31}, \epsilon_{33}^T$ $s_{11}^D, s_{11}^E, Q_{31}$

Tableau. I.2: Modes de résonance fondamentaux pour matériaux piézoélectriques[9].

La caractérisation des matériaux piézoélectrique dépend : la géométrie, les dimensions de l'échantillon et la direction de polarisation (axe 3 toujours perpendiculaire aux électrodes grisées), sont des éléments déterminants pour sélectionner les modes de vibration.

Le couplage électromécanique définit la capacité d'un matériau piézoélectrique à transformer l'énergie électrique en énergie mécanique et réciproquement. Il n'est pas relié aux pertes ni au rendement mais traduit plutôt une adaptation entre ces deux formes d'énergie du matériau. Le coefficient de couplage est obtenu à partir d'une étude thermodynamique du système considéré comme linéaire en négligeant les effets thermiques. Il peut s'écrire sous la forme suivante :

$$K = \frac{U_m}{\sqrt{U_E \times U_D}} \quad (\text{I.1})$$

avec : U_E : l'énergie élastique

U_D : l'énergie diélectrique

U_m : l'énergie d'interaction, ou mutuelle, élasto-diélectrique

Ce coefficient est appelé coefficient de couplage statique, il est obtenu à partir d'une étude thermodynamique du système considéré comme linéaire en négligeant les effets thermiques. Aussi peut-on quantitativement écrire :

$$K_{ij}^2 = \frac{\text{Energie mécanique transformée (Set } T) \text{ dans la direction } i}{\text{Energie électrique fournie (E et D) dans direction } j}$$

K_{ij}^2 varie suivant la forme de l'échantillon et le mode de vibration provoqué (tableau. I.2) et dépend des coefficients élastiques, diélectriques et piézoélectriques. Les expressions du facteur de couplage pour les cinq modes de résonance piézoélectrique sont :

$$\text{➤ mode longitudinal } K_{33} = \frac{d_{33}}{\sqrt{S_{33}^E + \varepsilon_{33}^T}} \quad (\text{I.2})$$

$$\text{➤ mode radial } K_p = K_{31} \sqrt{\frac{2S_{11}^E}{S_{11}^E + S_{12}^E}} \quad (\text{I.3})$$

$$\text{➤ mode en épaisseur } K_t = \frac{e_{33}}{\sqrt{C_{33}^P \times \varepsilon_{33}^S}} \quad (\text{I.4})$$

$$\text{➤ mode de cisaillement } K_{15} = \frac{d_{15}}{\sqrt{\varepsilon_{11}^T \times S_{55}^E}} \quad (\text{I.5})$$

$$\text{➤ mode transverse } K_{31} = \frac{d_{31}}{\sqrt{S_{11}^E + \varepsilon_{33}^T}} \quad (\text{I.6})$$

- d : Constante piézoélectrique qui traduit la proportionnalité entre la charge et la contrainte
- s : Compliance ou susceptibilité élastique.
- e: Constante piézoélectrique.
- c: constante élastique.

Il existe beaucoup de modes d'ondes acoustiques ou élastiques qui se propagent dans les matériaux piézoélectriques tels que : les ondes de surface, de volume et de fuite.

Les ondes acoustiques de surface appelées (SAW : Surface Acoustic Wave) sont des ondes qui se propagent en parallèle de la surface d'un matériau (le vecteur d'onde et le vecteur de flux d'énergie sont parallèle à la surface) avec une amplitude, en terme de longueur d'onde, qui décroît avec la profondeur du matériau piézoélectrique. Plusieurs modes de propagation des ondes acoustiques de surface existent, ces modes se divisent principalement en trois parties : ondes de Rayleigh, les ondes STW (Surface Transverse Wave) et les ondes LSAW (Leaky Surface Acoustic Wave) [16].

I.12 Dispositifs piézoélectriques et leurs applications

Le domaine d'application des matériaux piézoélectriques est très vaste car il est possible d'exploiter soit l'effet direct, soit l'effet inverse, soit les deux alternativement. Quelques applications des matériaux piézoélectriques sont données dans le Tableau I.3 en fonction de l'effet utilisé [33].

<i>Applications basées sur l'effet direct</i>	<i>Applications basées sur l'effet inverse</i>	<i>Applications basées sur les deux effets</i>
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Microphone ➤ Hydrophone ➤ Capteur de choc ➤ Accéléromètres ➤ Bouton poussoir ➤ Allumage ➤ Capteur de pression ou de contraintes 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Haut-parleur ➤ Transducteur sonar ➤ Nébuliseur ➤ Nettoyage par ultrasons ➤ Moteurs ultrasonores ➤ Relais ➤ Micro-positionnement ➤ Ajustement laser ➤ Imprimante à jet d'encre ➤ Dispositifs acousto-optiques ➤ Pompe piézoélectrique 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Transducteur d'ultrasons ➤ Diagnostic médical (échographie) ➤ Détecteur de proximité ou de présence ➤ Mesure de distances ou de débits ➤ Gyroscope ➤ Filtres fréquentiels (ondes volumiques SAW) ➤ Lignes à retard ➤ Transformateur piézoélectrique

Tableau I.3 : Applications des matériaux piézoélectriques en fonction de l'effet utilisé[33].

Dans les applications sous-marines les « sonar » varient des petits émetteurs pour bateaux aux systèmes professionnels utilisés dans les grandes traversées transatlantiques pour détecter la profondeur de l'eau.

Dans les moteurs aéronautiques, les capteurs à ultrasons installés dans les turbines et dans les générateurs de puissance sont utilisés pour le contrôle dynamique.

Dans les systèmes à ultrasons, les dispositifs piézoélectriques peuvent générer des

ondes ultrasoniques très puissantes utilisées pour nettoyer, percer, souder et aussi pour stimuler des processus chimiques. De plus, ils fonctionnent aussi comme émetteurs et récepteurs d'ondes ultrasoniques dans des appareils de diagnostics médicaux et de contrôle non destructif des matériaux.

L'effet piézoélectrique inverse est utilisé dans le positionnement de précision : un champ électrique est alors appliqué à la céramique pour produire le déplacement désiré. Les exemples d'applications sont nombreux ; on y retrouve notamment l'alignement des fibres optiques, l'alignement des machines-outils, l'amortissement actif des vibrations dans des structures mécaniques, l'amélioration de l'image par correction de l'inclinaison de miroirs.

Les actionneurs piézoélectriques sont aussi utilisés dans les soupapes hydrauliques et pneumatiques et dans des dispositifs médicaux tels les couteaux chirurgicaux et les inhalateurs avec nébuliseurs à ultrasons.

Pour ce qui concerne le transformateur piézoélectrique, de nos jours il n'est pas souvent utilisé ; la seule application pour laquelle il est commercialisé est dans le domaine du système « backlighting » des affichages LCD. Mais il y a plusieurs domaines qui requièrent des transformateurs de tension aux propriétés de plus en plus extrêmes, ce qui ouvre des nouvelles perspectives pour l'utilisation du transformateur piézoélectrique.

En effet, c'est surtout la miniaturisation des produits qui fait que les transformateurs électromagnétiques atteignent leurs limites. Des nouvelles solutions sont demandées : le transformateur piézoélectrique, qui a une densité de puissance élevée, s'impose pour de telles applications grâce à sa structure très compacte.

De plus, si l'on travaille dans un domaine de fréquence de quelques MHz (par exemple en télécommunication), les pertes fer dans les transformateurs électromagnétiques deviennent très importantes. Par contre, le transformateur piézoélectrique est adapté à ces domaines, car sa fréquence de résonance peut se trouver dans le domaine des MHz.

Selon le principe de fonctionnement utilisé, nous pouvons distinguer substantiellement trois différents types de dispositifs piézoélectriques :

- ❖ Capteurs ;
- ❖ Actionneurs ;
- ❖ Transformateurs ;

Les capteurs utilisent l'effet piézoélectrique direct, les actionneurs l'effet inverse. Pour ce qui concerne le transformateur, on a affaire à un dispositif particulier qu'utilise l'effet directe et inverse [1,18].

Le tableau I.4 énumère et illustre les domaines d'applications les plus communes des dispositifs piézoélectriques.

Militaire	Commercial	Médical
<ul style="list-style-type: none"> • Capteur de profondeur. • Système de sécurité. • Hydrophones. 	<ul style="list-style-type: none"> • Soudeuse ultrasonique. • Perceuse ultrasonique. • Indicateur de niveau. • Détecteur de défaut. • Décapants ultrasoniques. • Capteurs sismiques. • Microphones. • Géophone. • Systèmes d'alarmes. • Résonateurs pour radio/TV. 	<ul style="list-style-type: none"> • Traitement ultrasonique de la cataracte. • Thérapie ultrasonique. • Capteurs ultrasoniques. • Pompe d'insuline. • Acquisition d'image Ultrasonique. • Débitmètres. • Nébuliseurs. • Détection du battement cardiaque du fœtus.
Automobile		
<ul style="list-style-type: none"> • Capteurs d'objets. • Capteurs pour Airbag. • Contrôle de vibrations. • Injecteurs. 		
Ordinateur	Aviation	Consommateur
<ul style="list-style-type: none"> • Micro-actionneur pour disque dur. • Transformateur pour notebook. 	<ul style="list-style-type: none"> • Actionneurs pour flapis 	<ul style="list-style-type: none"> • Briquet. • Instruments musicaux. • Détecteurs de fumée.

Tableau I.4 : Domaines d'applications des céramiques piézoélectriques [1].

I.13 Les équations de la piézoélectricité

Le phénomène piézoélectrique se manifeste par la conversion de l'énergie

électrique en énergie mécanique et réciproquement. Les huit équations d'état présentées dans le Tableau I.5 relient des variables électriques (induction électrique D ou champ électrique E) à des variables mécaniques (déformation S ou contrainte T) [12]. Elles illustrent le phénomène de couplage entre l'énergie élastique et l'énergie électrique du matériau piézoélectrique. Trois types de coefficients interviennent :

- Des coefficients purement électriques.
- Des coefficients purement mécaniques.
- Des coefficients mixtes qui traduisent le couplage entre les grandeurs électriques et les grandeurs mécaniques.

Grandeurs électriques	Grandeurs mécaniques
$D = \varepsilon^T . E + d . T$	$S = s^E . T + d^t . E$
$E = \beta^T . D - g . T$	$S = s^D . T + g^t . D$
$D = \varepsilon^S . E + e . S$	$S = c^E . S - e^t . E$
$E = \beta^S . D - h . S$	$S = c^D . S - h^t . D$

Tableau I.5 : Equations de la piézoélectricité [10].

Dans un solide élastique soumis à une contrainte T , la déformation S vaut :

$$S = s T \quad (\text{I.7})$$

Où s est la souplesse (inverse du module de Young), exprimée en $[m^2/N]$. D'autre part, dans un diélectrique soumis à un champ électrique, on a l'équation :

$$D = e E \quad (\text{I.8})$$

Où e est la constante diélectrique du milieu en $[F/m]$. Dans un milieu piézoélectrique les effets mécaniques et électriques s'influencent mutuellement. Cette situation est résumée grâce aux équations, Il s'agit respectivement de l'effet piézoélectrique direct et inverse.

$$\frac{dD}{dT} = 0 \quad (\text{I.9})$$

$$\frac{dS}{dE} = 0 \quad (\text{I.10})$$

Avec une bonne approximation, cette interaction peut être décrite par des relations linéaires entre les quatre variables D , E , S et T , dont deux seulement sont indépendantes. Le choix des variables indépendantes, l'une mécanique et l'autre électrique, est arbitraire. Ainsi, en choisissant par exemple les variables intensives (T et E) comme couple de variables indépendantes, les propriétés piézoélectriques de la matière se traduisent, à température constante, par les équations.

$$S = s^E T + d^t E \quad (\text{I.11})$$

$$D = d T + e^T E \quad (\text{I.12})$$

Type	Signification	Unités	Dimension
Electrique	D Déplacement électrique ou induction	Cm^{-2}	3x1 3x1
	E Champ électrique	$V.m^{-1}$	3x3
	ε Permittivité électrique	$F.m^{-1}$	3x3
	β Imperméabilité diélectrique	$m.F^{-1}$	
Mécaniques	S Déformation relative	m^2N^{-1}	6x1
	T Contrainte	$N.m^{-2}$	6x1
	s Souplesse	m^2N^{-1}	6x6
	C Raideur	$N.m^{-2}$	6x6
Piézoélectrique	d Constante reliant la contrainte T et l'induction D à E constant	$C.N^{-1}$ ou $m.V^{-1}$	3x6
	e Constante reliant la déformation S et l'induction D à E constant	Cm^{-2} ou $N.V^{-1}$	3x6
	g Constante reliant la contrainte T et le champ E à D constant	$V.m.N^{-1}$ ou $m.C^{-1}$	3x6
	h Constante reliant la déformation S et le champ E à D constant	$V.m^{-1}$ ou $N.C^{-1}$	3x6

Tableau I.6 : Définition des termes et dimension des matrices utilisées en équations [13].

I.14 Constants élastiques des solides

Un solide est dit élastique s'il retrouve son état initial lorsque les forces extérieures

qui l'ont déformé sont supprimées. Ce retour à l'état de départ est dû aux contraintes internes. Pour les faibles déformations, il a été observé expérimentalement que les déformations d'un solide sont linéairement proportionnelles aux contraintes qui lui sont appliquées. Quand les déformations sont plus importantes, cette relation devient non linéaire mais le solide revient à son état initial quand les contraintes sont supprimées. Par contre, quand les déformations augmentent et dépassent une certaine limite, ces déformations ne sont plus élastiques.

Après cette limite élastique, le solide se déforme d'une façon permanente (déformation plastique) et finalement il se brise. La figure I.10 représente l'interdépendance entre contraintes et déformations en fonction de l'intensité des contraintes.

Dans l'hypothèse des petites déformations, il existe une relation biunivoque entre contrainte et déformation [20].

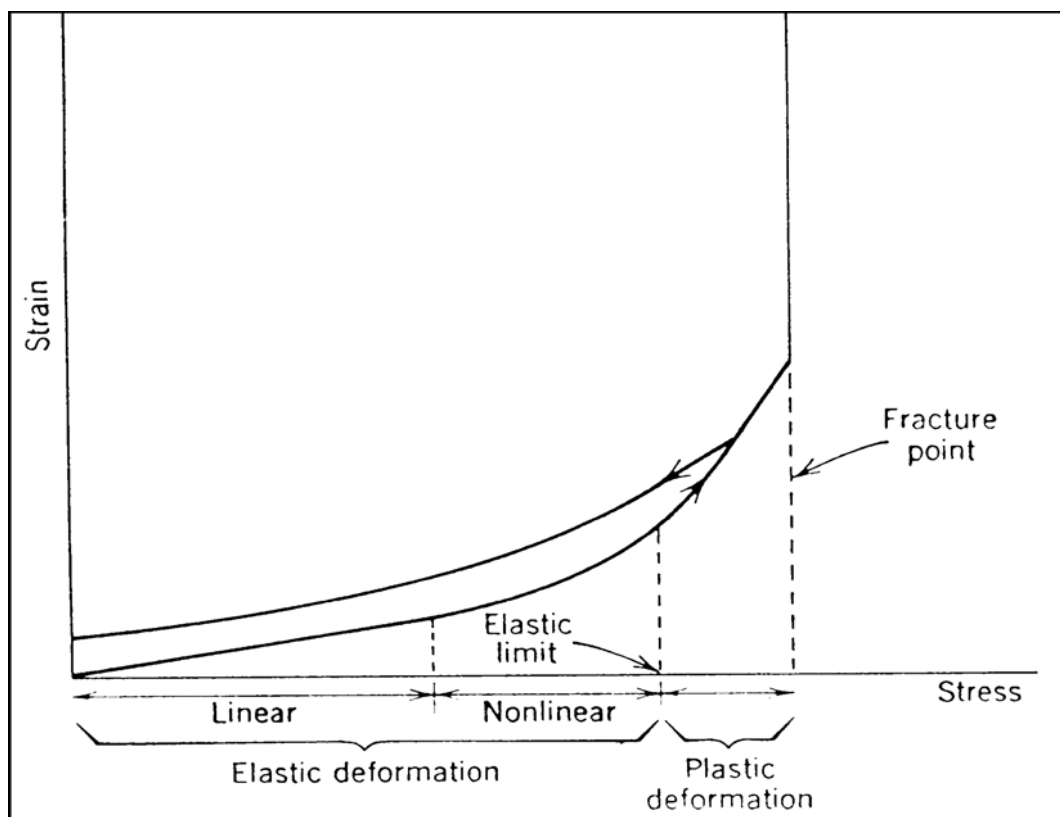


Figure : I.10 : Relation typique entre contraintes et déformations dans un solide [20].

I.15 Définition des coefficients piézoélectriques

Le phénomène piézoélectrique se manifeste par la conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique et réciproquement trois types de coefficients interviennent :

- Des coefficients purement électriques.
- Des coefficients purement mécaniques.
- Des coefficients mixtes qui traduisent le couplage entre les grandeurs électriques et les grandeurs mécaniques.

I.15.1 La constante piézoélectrique de charge d_{mn} :

Elle indique la charge produite par une force d'unité ou la déformation produite par un potentiel donné.

- Effet direct (à champ constant)

$$d_{mn} = \frac{\text{densité de charge sur l'électrode normale à l'axe } m}{\text{contra int e suivant l'axe } n} \text{ (C/N)}$$

- Effet inverse (à effort constant)

Déformation relative suivant l'axe n

$$d_{mn} = \frac{\text{déformation relative suivant l'axe } n}{\text{champ électrique suivant l'axe } m} \text{ (m/V)}$$

I.15.2 La constante piézoélectrique de tension g_{mn} :

Elle indique le gradient de potentiel causé par effort donné, ou réciproquement la contrainte produite par une densité de charge donnée.

- Effet direct (à induction constante)

$$g_{mn} = \frac{\text{champ électrique suivant l'axe } m}{\text{contra int e suivant l'axe } n} \text{ (V.m/N)}$$

- Effet inverse (à effort constant)

$$g_{mn} = \frac{\text{déformation relative suivant l'axe } n}{\text{densité de charge sur l'électrode normale l'axe } m} \text{ (m}^2\text{/C)}$$

Les deux indices des coefficients piézoélectriques (m, n) désignent respectivement la direction de l'axe de polarisation et celui de l'échantillon.[7]

I.15.3 Coefficient de couplage électromécanique K :

Les céramiques piézoélectriques sont également caractérisées par un coefficient de couplage électromécanique K . Il caractérise la qualité de la conversion électromécanique dans le matériau piézoélectrique et donc l'aptitude de l'oscillateur à transformer l'énergie électrique en énergie mécanique.

$$K^2 = \frac{\text{énergie transformée}}{\text{énergie fournie}}$$

Ce coefficient varie en fonction de la géométrie des matériaux et de leur mode de vibration. Les coefficients \mathbf{K} sont calculés à partir des courbes d'admittances en fonction de la fréquence.

Dans notre cas le mode de vibration est radial (Fig I.11) et la céramique est sous forme d'un disque, alors les coefficients utiles sont : \mathbf{Kp} , $\mathbf{d31}$, $\mathbf{g31}$.

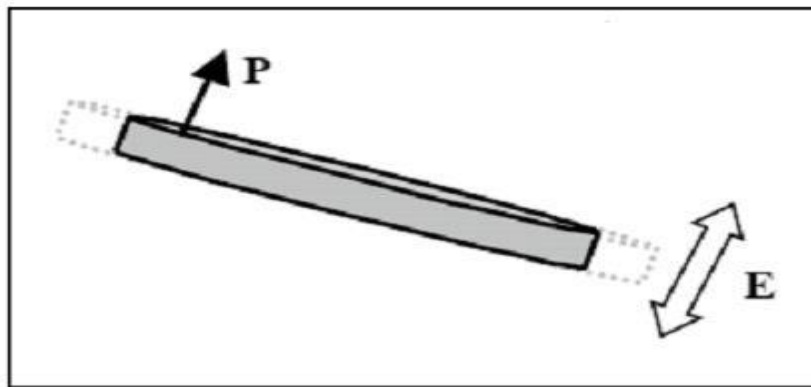


Figure I.11 : Mode radial de vibration d'un échantillon sous forme de disque [7]

I.15.4 Coefficient de surtension mécanique Q_m :

Le coefficient de surtension mécanique (Q_m), appelé aussi facteur de qualité mécanique traduit les pertes mécaniques dans la céramique. Ce facteur est défini comme le rapport de l'énergie emmagasinée pendant une période sur l'énergie dissipée pendant une période.[3]

$$Q_m = 2\pi \frac{\text{énergie maximale emmagasinée pendant une période}}{\text{énergie dissipée pendant une période}}$$

I.16 Les avantages des éléments piézoélectriques

L'utilisation des matériaux piézoélectriques dans les différents domaines procure divers avantages :

Ils sont capables d'assurer une conversion d'énergie électromécanique réversible par effet piézoélectrique (direct « matériaux ont la propriété de se polariser sous l'influence d'une contrainte mécanique » ou inverse « cristaux se déforment lorsqu'ils sont soumis à un champ électrique »).

Ils peuvent donc être indifféremment utilisés comme capteurs ou actionneurs, ou même cumuler ces deux fonctions.

Cette réversibilité permet surtout de gérer les transferts d'énergie au sein d'une structure sur laquelle est intégré ce type de matériau et permet d'obtenir des systèmes « avancés ». Il est donc envisageable d'optimiser l'extraction d'une part de l'énergie mécanique de la structure par des techniques appropriées et de contrôler ainsi son état vibratoire.

Ces matériaux possèdent également de forts avantages en termes d'intégration. Ils sont de types monolithiques et possèdent généralement une densité de puissance élevée.

Généralement issus de processus de synthèse, les matériaux piézoélectriques proposent un large panel de caractéristiques électromécaniques dépendant directement de leur constitution chimique.

On trouve ainsi par exemple des matériaux plus particulièrement adaptés aux applications « capteurs » garantissant une large bande passante alors que certains autres matériaux possèdent au contraire un fort coefficient de surtension et sont plus particulièrement destinés à la génération de fortes puissances vibratoires. Clairement, tous ces aspects contribuent à faire des matériaux piézoélectriques un choix judicieux pour les systèmes de contrôle où faible masse, faible encombrement et efficacité sont escomptés [23].

I.17 Conclusion

Ce premier chapitre, nous a permis de retracer l'origine du phénomène de la piézoélectricité, ainsi que son évolution et son développement. La découverte des matériaux piézoélectriques, qui sont facilement réalisables avec des caractéristiques intéressantes, a eu comme conséquence le développement des dispositifs piézoélectriques.

Le prochain chapitre fera l'objet de la modélisation des micro-ondes acoustiques afin de bien comprendre le phénomène des micro-ondes acoustique en particulier les ondes de volume.



Chapitre II

Détection des ondes élastique dans les matériaux piézoélectrique



II.1 Introduction

Dans ce chapitre le milieu de propagation considéré est un matériau piézoélectrique. Ce milieu fait l'objet de propagation de certains type d'ondes que la communauté scientifique cherche toujours à découvrir et d'expliquer les phénomènes de leurs origines [26], [29], [30].

Ce sont les ondes de fuite, de volume et les SSBW. Dans notre cas, nous allons voir que ces ondes sont à l'origine des singularités qui apparaissent au niveau de certains paramètres traduisant la propagation de ces ondes dans les milieux piézoélectriques.

Certains matériaux, lorsqu'ils sont déformés, deviennent polarisés électriquement. Cet effet est connu sous le nom de piézoélectricité (figure II.1).

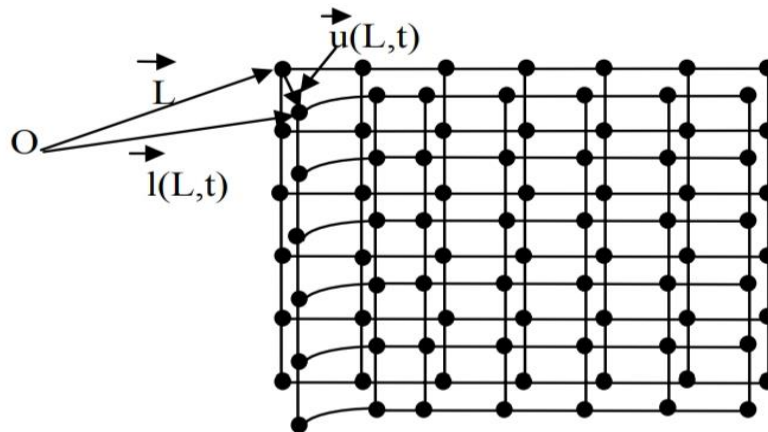


Figure II.1 : Positions des particules d'un cristal[19].

Où \vec{L} : Le vecteur position de la particule avant déformation.

$\vec{l}(L, t)$: Le vecteur position de la particule après déformation.

Alors le déplacement de la particule matérielle est décrit par le champ élastique tel que :

$$\vec{U}(L, t) = \vec{l}(L, t) - \vec{L} \quad (\text{II.1})$$

L'induction électrique D et le champ électrique E dans le matériau piézoélectrique sont liées par :

$$D = \varepsilon \cdot E + e^T \cdot S \quad (\text{II.2})$$

Où ε : est la permittivité du milieu (F/m).

e : tenseur de piézoélectricité (c/ m).

S : tenseur de déformation.

La polarisation électrique du milieu sous l'effet de déformation, implique également la création de contraintes sous l'effet d'un champ électrique extérieur.

Cette contrainte est alors :

$$T = C.S - e.E \quad (\text{II.3})$$

Où C : tenseur d'élasticité (N/m^2) [27].

II.2 Ondes élastiques et électriques

Le signal à traité est appliqué aux électrodes du transducteur qui engendre à son tour des déformations (compression et dilatation), ainsi une onde piézoélectrique prend naissance et se propage dans la direction X_1 .

Cette onde est sous la forme de deux aspects (élastique et électrique), d'où le nom électroélastique ou acoustoélectrique (figure II.2) [27].

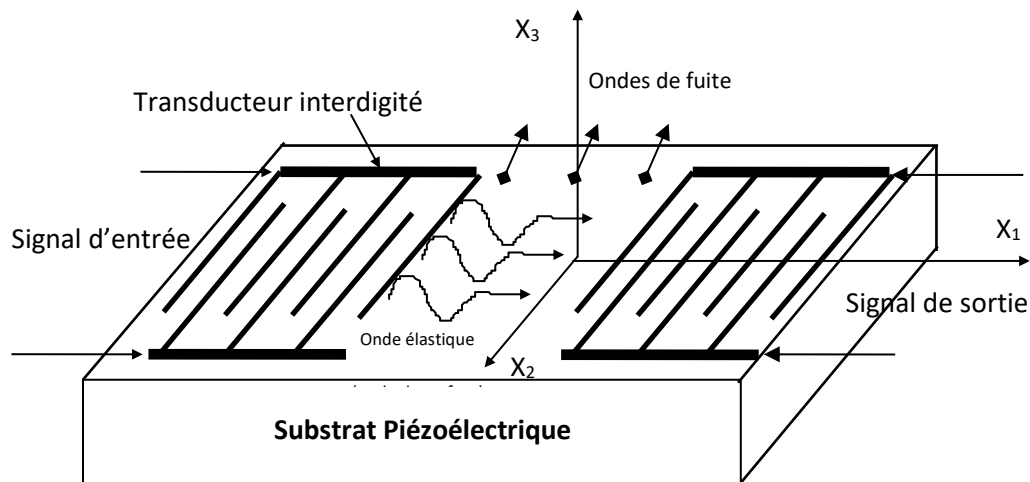


Figure II.2 : Excitation du matériau piézoélectrique (de Coupe X_3 - X_1) par un transducteur interdigité

II.3 Equations de mouvement d'une particule et du potentiel électrique

Les coordonnées d'espace sont X_1 , X_2 , X_3 .

- L'état mécanique du milieu est défini par deux grandeurs de type tensoriel, les contraintes et les déformations mécaniques de composantes T_{ij} et S_{ij} ($i, j = 1, 2, 3$).

- Les déformations sont liées aux déplacements relatifs des particules du milieu matériel. Elles s'expriment en fonction des composantes du vecteur déplacement \vec{U} par [27]:

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial U_i}{\partial X_j} + \frac{\partial U_j}{\partial X_i} \right] \quad (\text{II.4})$$

- L'état électrique du milieu est défini par deux vecteurs, le champ électrique \vec{E} et le déplacement électrique \vec{D} .
- Notons que dans l'approximation quasi-statique du champ électromagnétique, on peut définir un potentiel électrique de composantes [27]:

$$E_i = - \frac{\partial U_4}{\partial X_i} \quad (\text{II.5})$$

Où U_4 est le potentiel électrique.

- Les tenseurs de contrainte et d'induction électrique sont définis comme suit :

$$\mathbf{T}_{ij} = \mathbf{C}_{ijkl} \cdot \mathbf{S}_{kl} - \mathbf{e}_{kij} \cdot \mathbf{E}_k \quad (\text{II.6})$$

$$\mathbf{D}_i = \mathbf{e}_{jkl} \cdot \mathbf{S}_{kl} + \epsilon_{ik} \cdot \mathbf{E}_k \quad (\text{II.7})$$

Avec $i, j, k = 1, 2, 3$.

- D'autre part, dans l'approximation quasi-statique, les équations de Maxwell se réduisent à l'équation de Poisson :

$$\text{div} \vec{D} = \frac{\partial D_i}{\partial X_i} = 0 \quad (\text{II.8})$$

- Le mouvement des particules sous l'action des contraintes, est décrit par l'équation différentielle suivante (relation de Newton) [27] :

$$\nabla \mathbf{T} = \rho \cdot \frac{\partial \mathbf{U}^2}{\partial t^2} \quad (\text{II.9})$$

Par substitution des équations (II.4) et (II.5) dans l'équation (II.6) et (II.7), nous obtenons [27]:

$$T_{ij} = C_{ijkl} \cdot \frac{1}{2} \left[\frac{\partial U_j}{\partial X_k} + \frac{\partial U_k}{\partial X_j} \right] + e_{kij} \cdot \frac{\partial U_4}{\partial X_k} \quad (\text{II.10})$$

$$D_{ij} = e_{ikl} \cdot \frac{1}{2} \left[\frac{\partial U_j}{\partial X_k} + \frac{\partial U_k}{\partial X_j} \right] + \varepsilon_{ik} \cdot \frac{\partial U_4}{\partial X_k} \quad (\text{II.11})$$

En substituant les équations (II.10) et (II.11) dans les équations (II.8) et (II.9), nous aurons les équations phénoménologiques tensorielles piézoélectriques [27] :

$$C_{ijkl} \frac{\partial^2 U_k}{\partial X_i \partial X_l} + e_{lij} \frac{\partial^2 U_4}{\partial X_k \partial X_i} = \rho \frac{\partial^2 U_j}{\partial t^2} \quad (\text{II.12})$$

$$e_{ikl} \frac{\partial^2 U_k}{\partial X_i \partial X_l} - \varepsilon_{ik} \frac{\partial^2 U_4}{\partial X_k \partial X_i} = 0 \quad (\text{II.13})$$

II.4 Forme générale de la solution

Les équations (II.12) et (II.13) constituent les équations différentielles de base pour la propagation des ondes élastiques dans l'espace piézoélectrique.

Les déplacements élastiques de l'onde U_i sont nuls hors de cet espace.

La solution générale pour le déplacement et le potentiel électrique dans ce milieu est supposée être de la forme suivante :

$$U_i = u_i \exp(j\beta \alpha_i X_3) \cdot \exp - j(\omega t - \beta(1 + j\gamma) X_1) \quad i=1,2,3,4 \quad (\text{II.14})$$

Où u_i ($i=1,2,3$) sont les amplitudes de déplacement, u_i ($i=4$) représente l'amplitude du potentiel électrique, β est la constante de propagation, α_i sont les coefficients d'atténuation de l'onde à l'intérieur du cristal piézoélectrique (axe des X_3 (Figure II.2)), γ est le coefficient d'atténuation longitudinale (axe des X_1) et ω est la pulsation angulaire.

Les solutions de ce type d'ondes correspondent à des ondes qui se propagent avec ou sans atténuation suivant la direction X_1 .

Les déplacements élastiques U_i et le potentiel électrique U_4 peuvent varier suivant la direction normale à la surface plane (X_3), mais sont invariant suivant X_2 (Figure II.2).

En substituant l'équation (II.14) dans l'équation (II.12) et (II.13), nous obtenons quatre équations homogènes simultanées en u_i ($i=1,2,3,4$) :

$$[A].[U] = [O] \quad (II.15)$$

Où $[A]$ est une matrice symétrique 4×4 .

$[U] = [u_1, u_2, u_3, u_4]^T$ Composantes à déterminer

Le développement du déterminant de $[A]$ donne en générale, un polynôme du 8^{ème} ordre :

$$Det(A) = \sum_{i=0}^8 B_i \cdot \alpha^i = 0 \quad (II.16)$$

Ce polynôme est appelé équation de dispersion ou équation séculaire.

La solution de l'équation (II.8) donne pour chaque β ($\beta = \frac{2\pi f}{V_s}$: constante de propagation) huit racines. Ces racines sont en fonction de V_s (vitesse acoustique) et γ (constante d'atténuation longitudinale).

Chaque racine engendre trois composantes déplacements de la particule et un potentiel électrique. Donc, la solution générale est une combinaison de huit racines (8 ondes secondaires) donnée par cette expression [27] :

$$U_i = \sum_{n=1}^8 C_n \cdot D_i^n \cdot \exp \left\{ j\beta \cdot \alpha^n \cdot X_3 + j\beta \cdot X_1 (1 + j\gamma) - j \cdot \omega \cdot t \right\} \quad i=1,4 \quad (II.17)$$

Où D_i^n sont les composantes du vecteur propre du système (15) associées à la valeur propre α^n .

C_n : constante à déterminer par les conditions aux limites.

II.5 Comportement des racines de l'équation séculaire

Le comportement des racines dépend de la vitesse acoustique V_s . La solution pour α de l'équation (II.16) sera examinée avec $\gamma = 0$.

A une vitesse inférieure à la vitesse basse transverse de volume dans le milieu, toutes les racines sont complexes et conjuguées deux à deux :

$$\alpha^{(1)} = \alpha_{re}^{(1)} + j\alpha_{im}^{(1)} \quad \text{et} \quad \alpha^{(2)} = \alpha_{re}^{(2)} - j\alpha_{im}^{(2)}$$

$$\text{Où } \alpha_{re}^{(j)} = \alpha_{re}^{(j+1)} \quad \text{et} \quad \alpha_{im}^{(j)} = \alpha_{im}^{(j+1)} \quad \text{avec } j=1,3,5,7.$$

Cela correspond à l'onde partielle :

$$U_i^{(1)} \approx \exp[j.\beta.\alpha_{re}^{(1)}.X_3 - \beta.\alpha_{im}^{(1)}.X_3].\exp(j\beta.X_1) \quad (\text{II.18})$$

$$U_i^{(2)} \approx \exp[j.\beta.\alpha_{re}^{(2)}.X_3 + \beta.\alpha_{im}^{(2)}.X_3].\exp(j\beta.X_1) \quad (\text{II.19})$$

Après développement on aura :

$$U_i^{(1)} \approx \exp[-\beta.\alpha_{im}^{(1)}.X_3].\exp j.\beta[\alpha_{re}^{(1)}.X_3 + X_1] \quad (\text{II.20})$$

$$U_i^{(2)} \approx \exp[+\beta.\alpha_{im}^{(2)}.X_3].\exp j.\beta[\alpha_{re}^{(2)}.X_3 + X_1] \quad (\text{II.21})$$

Les ondes partielles $U_i^{(1)}$ et $U_i^{(2)}$, ce sont des ondes qui se propagent suivant la direction donnée par le plan X_1 et X_3 et s'atténuent suivant X_3 .

Dans le cas de $U_i^{(1)}$, la direction de propagation est dans le plan (X_1, X_3) et quand X_3 tend vers $-\infty$ (espace piézoélectrique) alors $U_i^{(1)}$ tend vers $+\infty$ (divergence). Dans le cas de $U_i^{(2)}$ qui se propage dans le plan (X_1, X_3) , celle-ci tend vers zéro quand X_3 tend vers $-\infty$.

Donc seules les racines à partie imaginaire négative sont acceptables. Ce mode correspond au mode de surface ou mode de Rayleigh (figure II.3) [31].

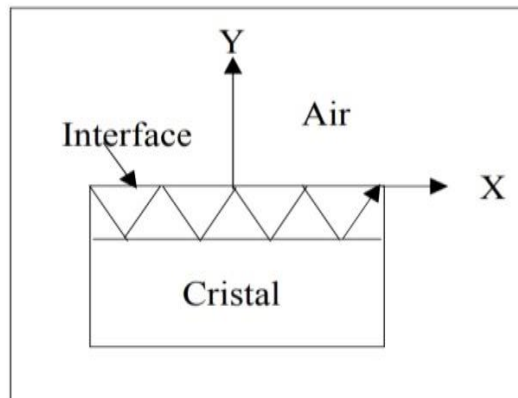


Figure II.3 : Ondes de surface (O.S).

Pour des vitesses supérieures, certaines racines sont réelles c.-à-d. :

$$U_i^{(1)} \approx \exp j.\beta[\alpha_{re}^{(1)}.X_3 + X_1] \quad (II.22)$$

$$U_i^{(2)} \approx \exp j.\beta[\alpha_{re}^{(2)}.X_3 + X_1] \quad (II.23)$$

Si $\alpha_{re}^{(1)} > 0$, on aura les ondes de fuite (rayonnements électromagnétiques hors du cristal (figure II.4).

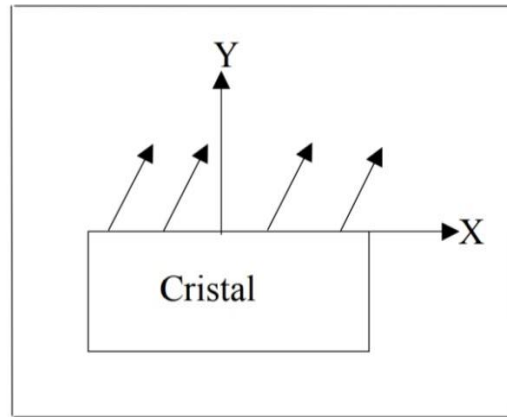


Figure II.4 : Ondes de fuite (O.F).

Si $\alpha_{re}^{(1)} < 0$, on obtiendra les ondes de volume (figure II.5) et si $|\alpha_{re}^{(1)}|$ est très petite.

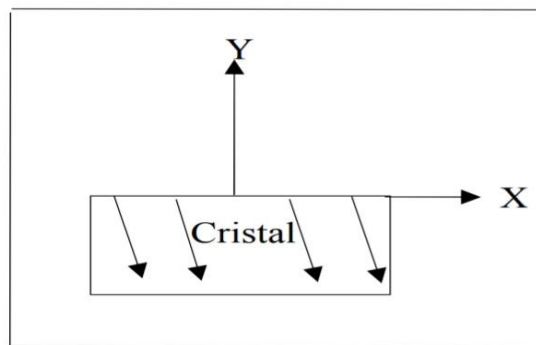


Figure II.5 : Ondes de volume (O.V).

On aura les ondes SSBW (figure II.6). Ce ci est valable pour tout $\alpha_{re}^{(i)}$ ($i = 1..8$) tant que $\alpha_{im}^{(i)} = 0$.

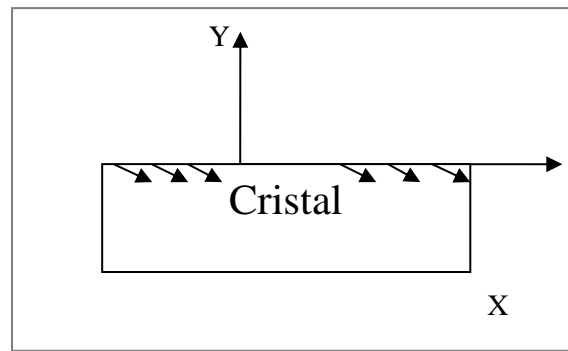


Figure II.6 : Ondes de SSBW.

II.6 Application sur le LiNbO₃ (Niobate de Lithium) coupe Y-X (Y=X3ET X=X1)

II.6.1 Description du matériau LiNbO₃

Depuis une vingtaine d'années le Niobate de Lithium s'est imposé comme le substrat de choix pour la réalisation de dispositifs optiques de haute technologie comme les modulateurs acousto-optiques et électro-optiques (télécommunications optiques), les cellules de Pockels (la sers déclenchés) ou les filtres acoustiques de surfaces (radiocommunications).

Le Niobate de Lithium (LiNbO₃) est un composé chimique de niobium, de lithium et d'oxygène. C'est un matériau solide incolore de structure cristalline trigonale.

Il est transparent pour des longueurs d'ondes entre 350 et 5500 nanomètres, et sa bande interdite est de 4 eV. Son point de fusion est à 1257°C et sa densité est 4.65 g/cm³.

Il est des propriétés électro-optiques, piézoélectriques, photoélastiques et de non linéarité optique étonnantes. Ils est utilisé dans le doublage de fréquence, les oscillateurs paramétriques optiques, les instruments acousto-optiques,...etc. C'est aussi d'excellent matériau pour la fabrication de guides d'onde optiques [28].

II.6.2 Principales applications du LiNbO₃

Le Niobate de Lithium c'est un matériau utilisé dans une large gamme d'applications tels que :

- Génération de Fréquence.
- Les générateurs et les Capteurs piézoélectriques.

- Les Capteurs pyroélectriques.
- Les Téléphones cellulaires.
- Les modulateurs opto-électroniques.
- Médecine (chirurgie, traitement actif, l'acupuncture, etc...).
- Laser de modulation (électroluminescente optique écluses).
- Appareils électroménagers (télévision, les cassettes audio et vidéo etc. ...).
- Technologie (découpage des métaux, des trous brocher, façonnage, décrivant, de l'image de dessin, etc...).
- SAW filtres, résonateurs, lignes à retard, oscillateurs.
- Les guides d'onde optiques.

Dans cet exemple, on montre les variations des parties réelles et imaginaires des coefficients d'atténuation α_3 et α_4 en fonction de la vitesse acoustique V_s (Figure II.7,8,9 et 10).

Sur ces figures, nous allons indiquer la présence :

- ☞ Des ondes de fuite « O.F » (parties réelles positives),
- ☞ Des ondes de volume « O.V » (partie réelle négatives),
- ☞ Ainsi que les ondes SSBW (petites valeurs des parties réelles négatives).

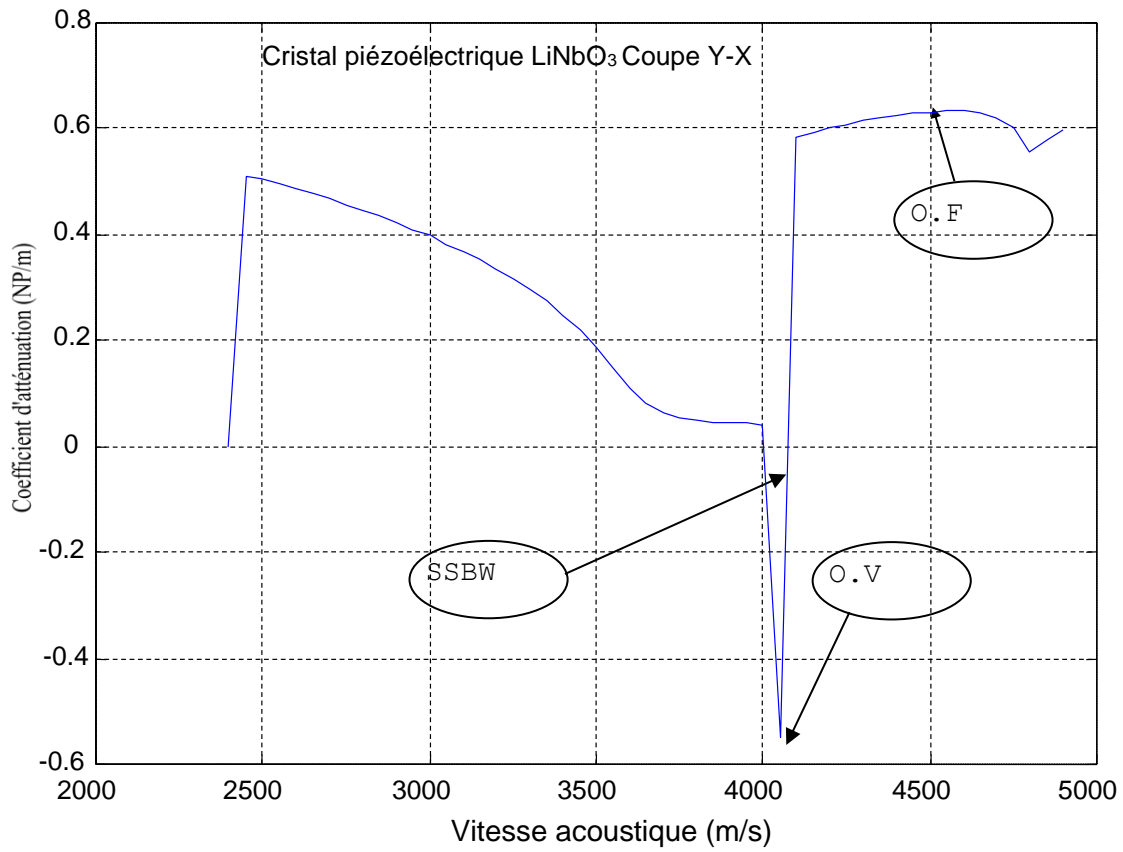


Fig.II.7 Partie réelle de α_3

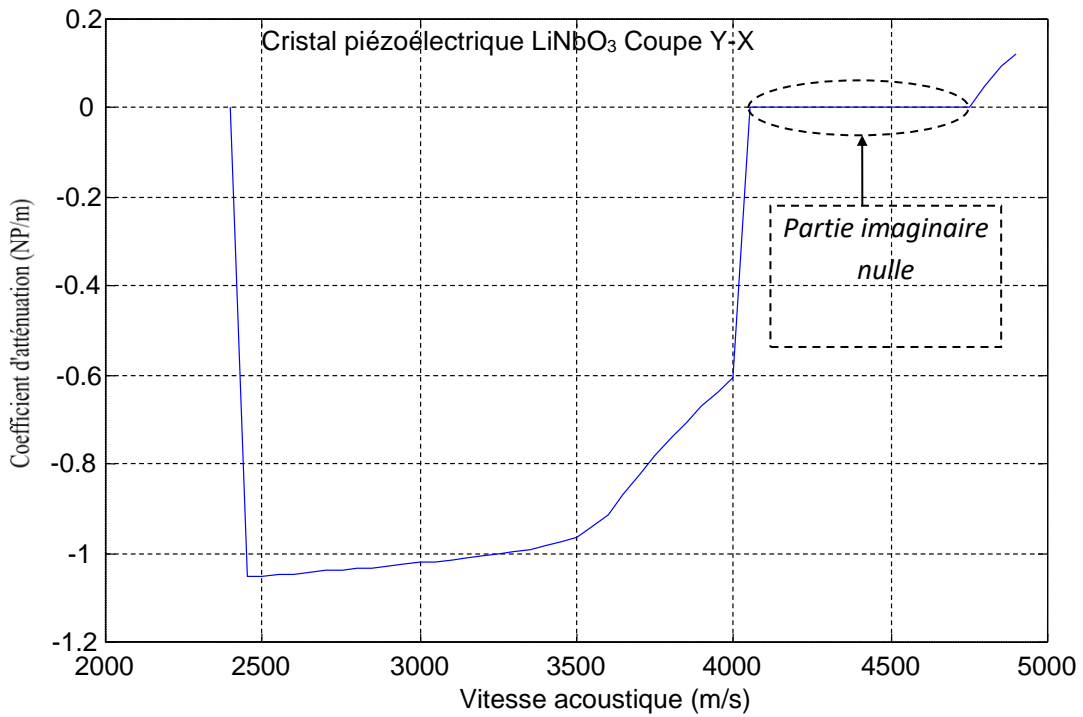


Fig.II.8: Partie imaginaire de α_3

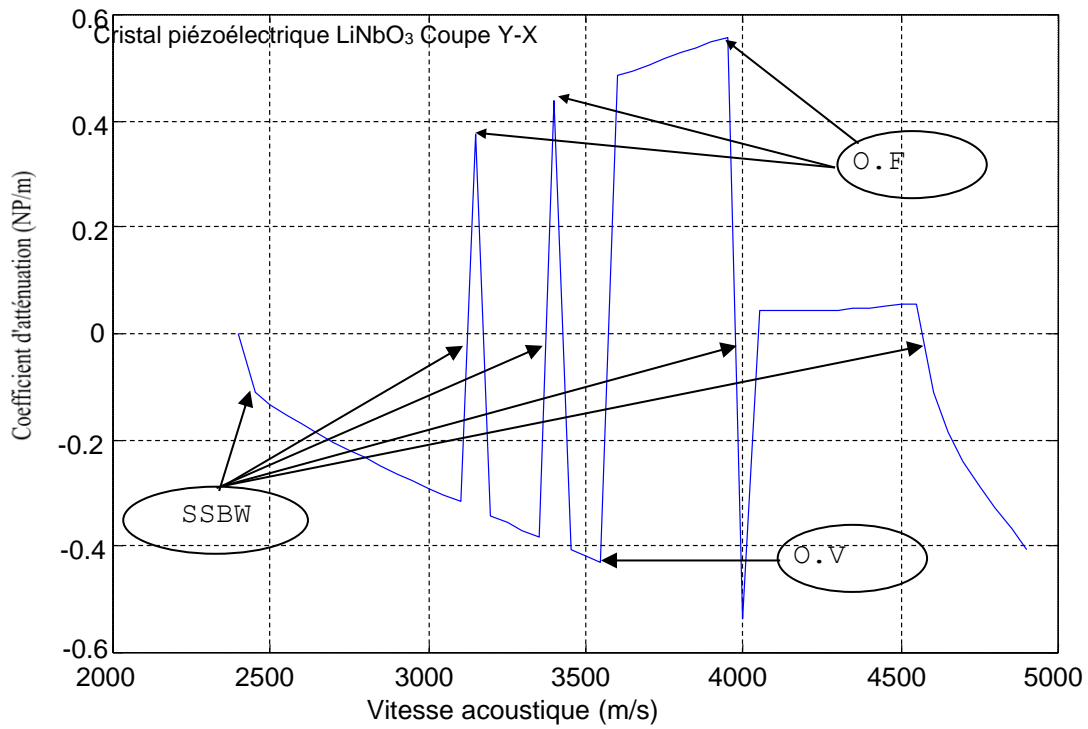


Fig.II.9 : Partie réelle de α_4

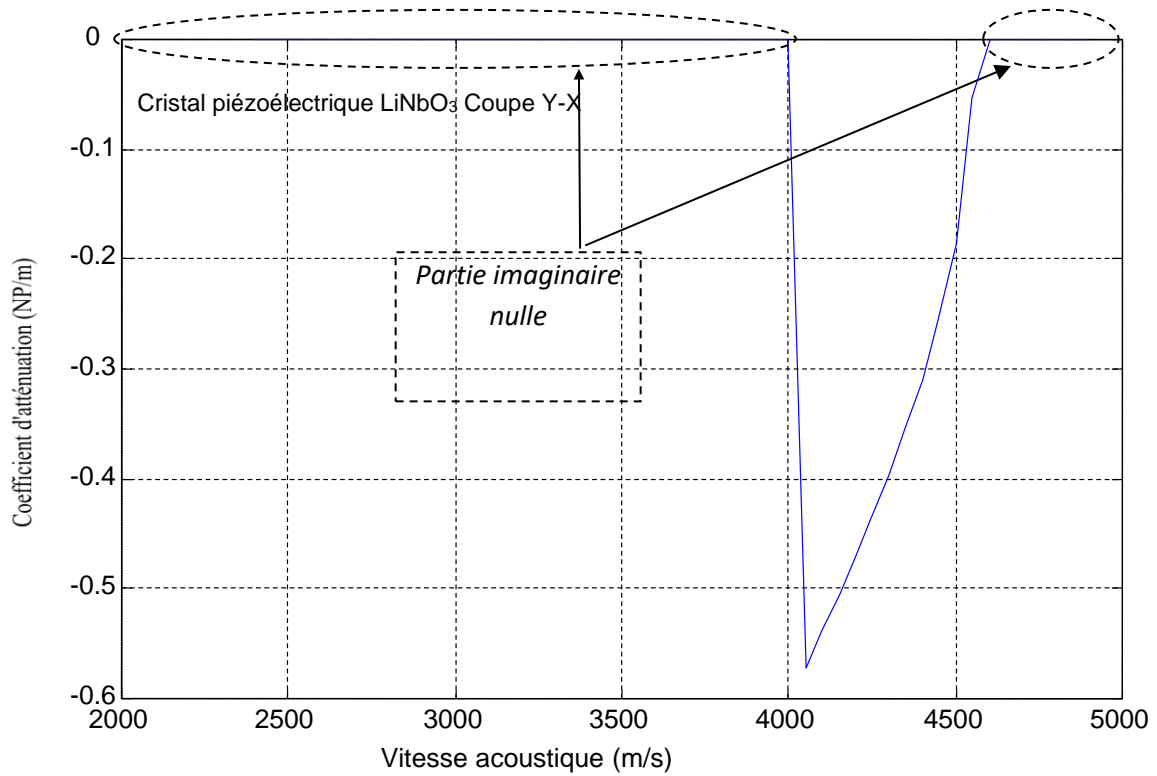


Fig.II.10: Partie imaginaire de α_4

Physiquement, les ondes de fuite seront interprétées au niveau du champ électrique et non pas au niveau du champ de déplacement, car le champ de déplacement n'existe que dans le cristal[22].

Au niveau des coefficients d'atténuation α_1 et α_2 , il n'y a pas d'ondes de fuite comme le montre les figures (II.11,12,13 et 14).

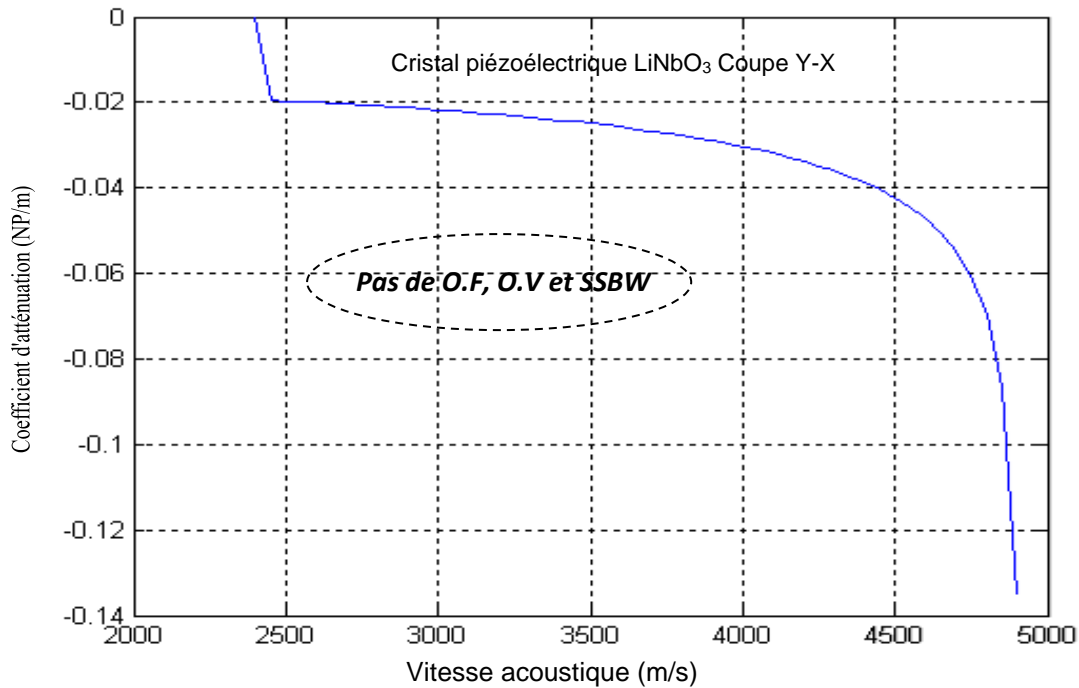


Fig.II.11: Partie réelle de α_1

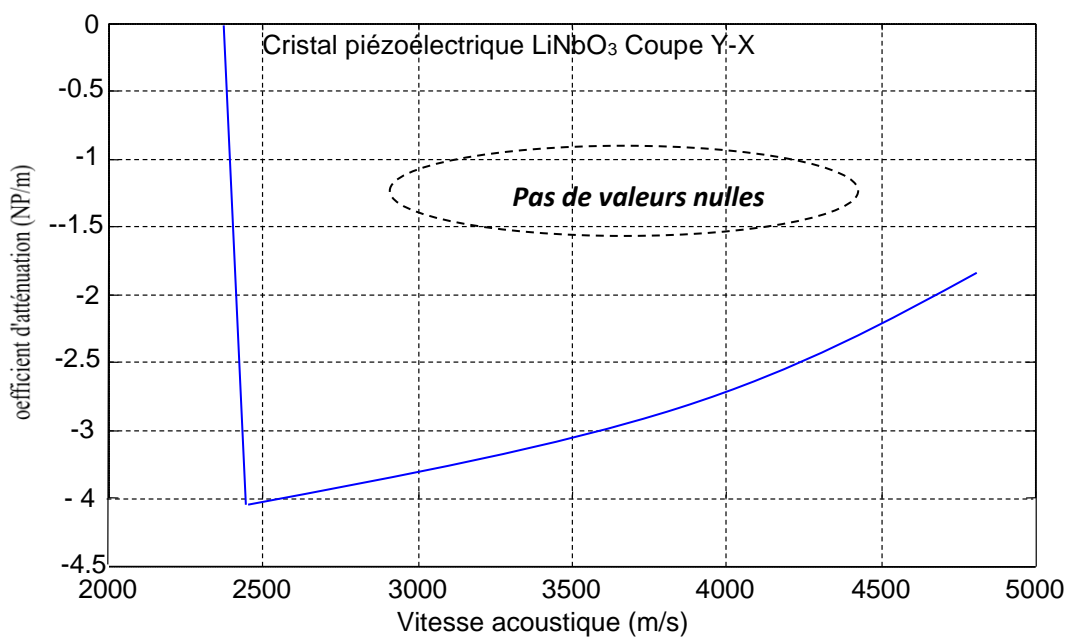


Fig.II.12: Partie imaginaire de α_1

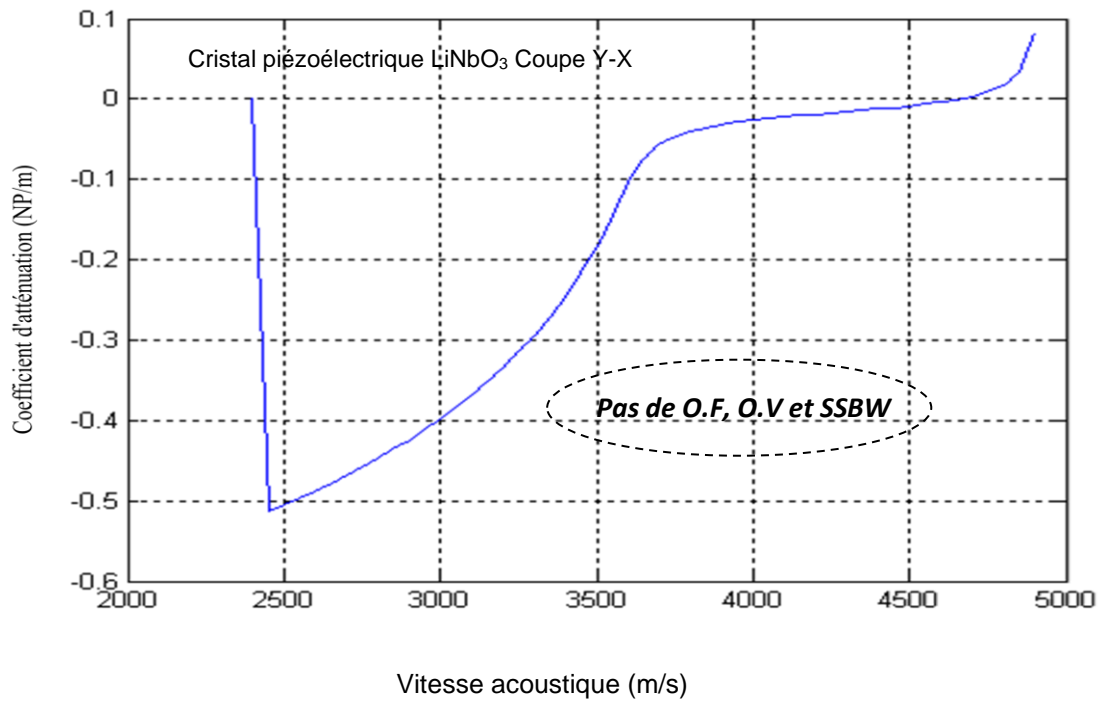


Fig.II.13: Partie réelle de α_2

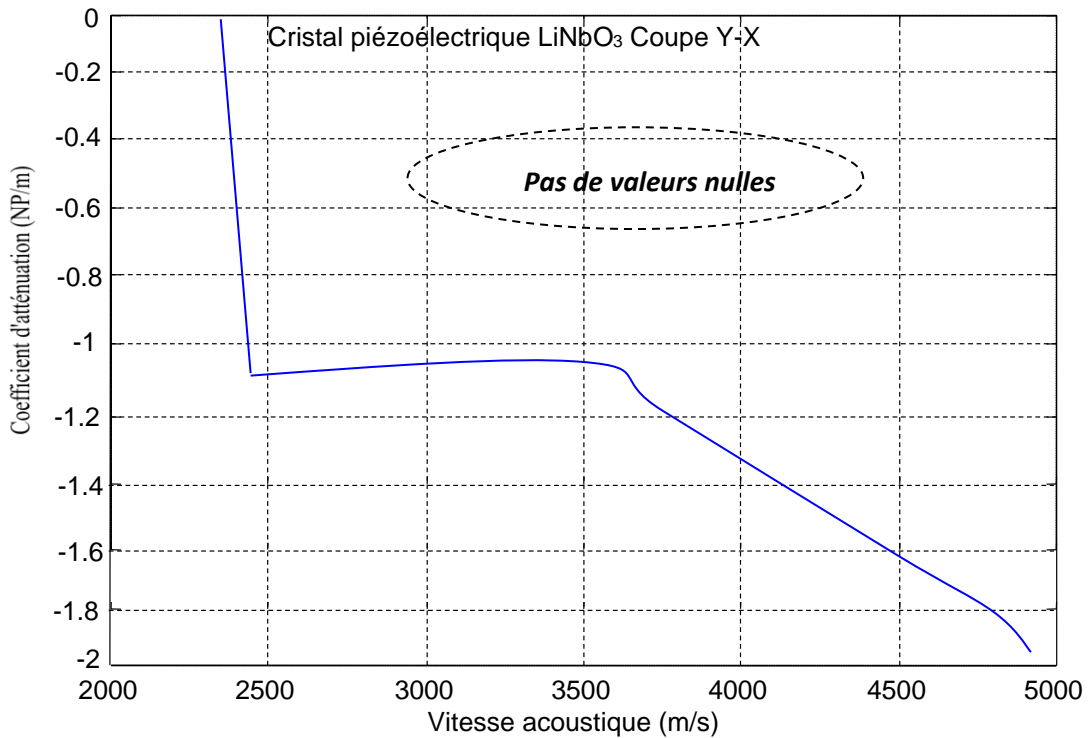


Fig.II.14: Partie imaginaire de α_2

- ❖ A partir des résultats obtenus pour un matériau Niobate de lithium nous avons obtenu les ondes de fuite et le volume et SSBW dans la partie réelle de α_3 et α_4 .

II.7 Application sur le LiTaO₃ (Tantalate de Lithium) coupe Y-X

Le Tantalate de Lithium, C'est un matériau piézoélectrique il est donc utilise pour réaliser des composant piézoélectrique comme par exemple les SAW (surface acoustic wave) filtre.

Le Tantalate de Lithium a des propriétés exceptionnelles utilisé en électrotechnique, optique et Acousto-optique. Ceux-ci peuvent être: les dispositifs à ondes acoustiques de surface et les capteurs piézoélectriques .

Dans cet exemple, on montre les variations des parties réelles et imaginaires des coefficients d'atténuation α_3 et α_4 en fonction de la vitesse acoustique V_s (Figures II.15,16,17,18).

Sur ces figures, nous allons indiquer la présence :

- ☞ Des ondes de fuite « O.F » (parties réelles positives),
- ☞ Des ondes de volume « O.V » (partie réelle négatives),
- ☞ Ainsi que les ondes SSBW (petites valeurs des parties réelles négatives).

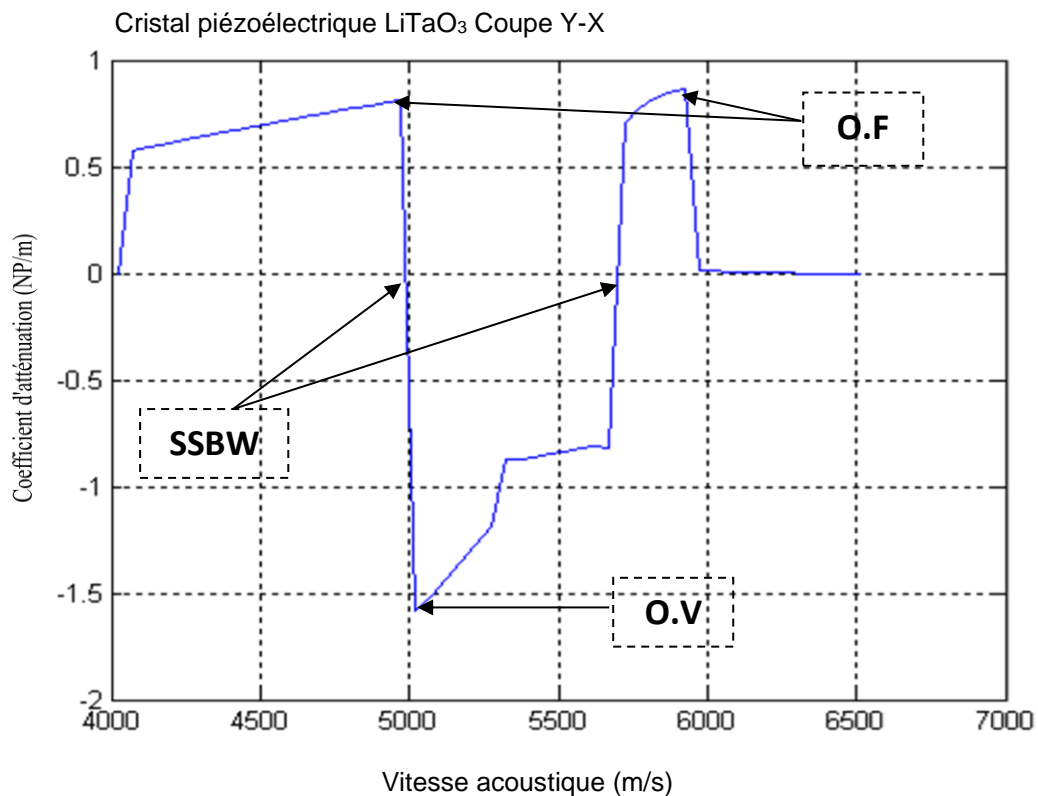


Fig.II.15: Partie réelle de α_3

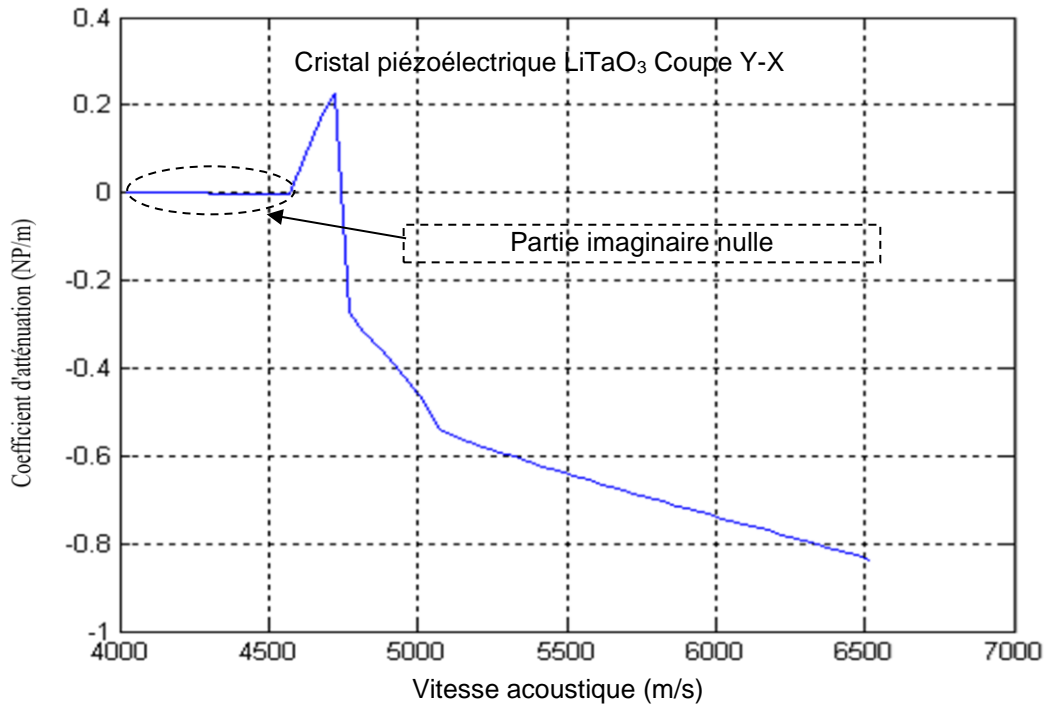


Fig.II.16: Partie imaginaire de α_3

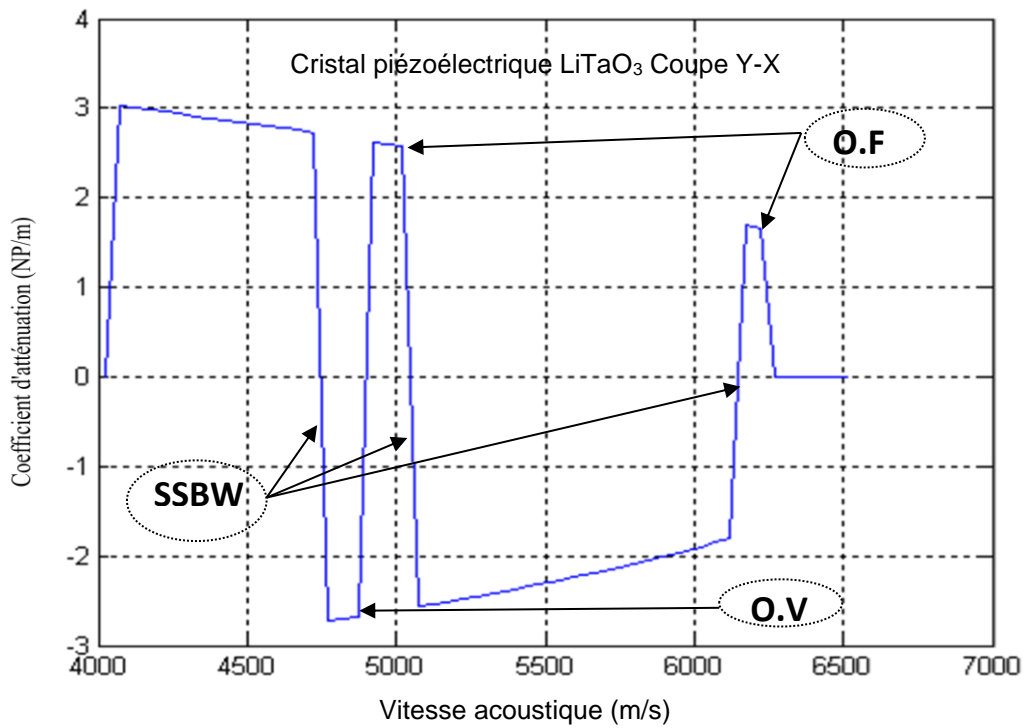


Fig.II.17: Partie réelle de α_4

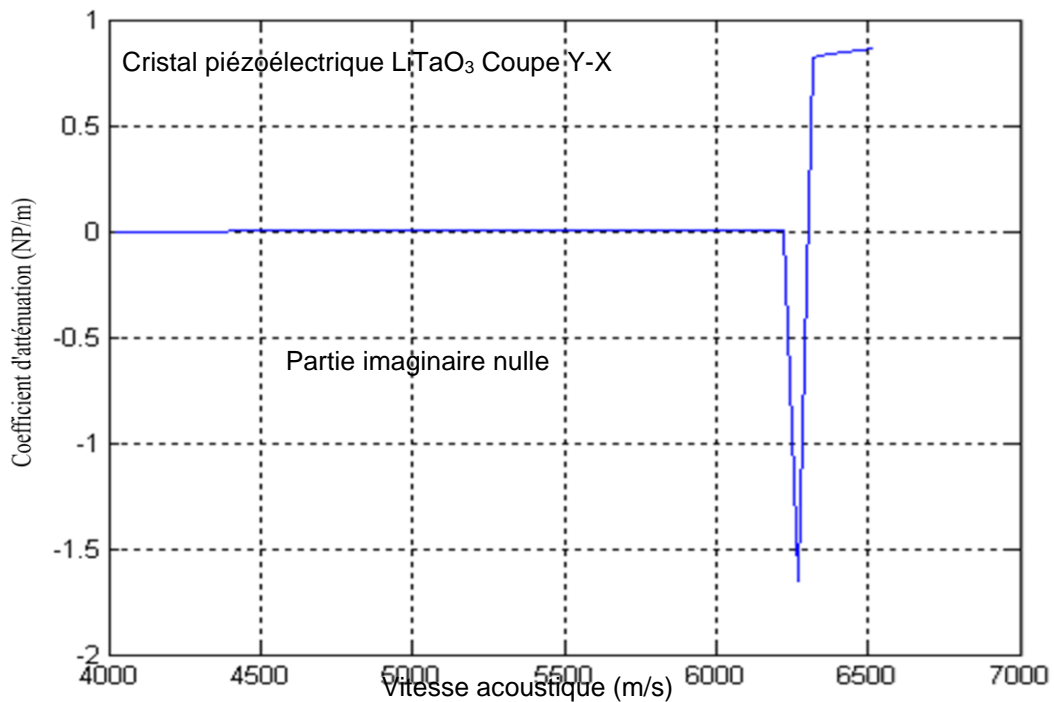


Fig.II.18: Partie imaginaire de α_4

- ❖ A partir des résultats obtenus pour un matériau Tantalate de lithium nous avons obtenu les ondes de fuite et le volume et SSBW dans la partie réelle de α_3 et α_4 . Cependant, à α_4 les valeurs étaient supérieures à α_3 .

II.8 Comparaison entre les deux matériaux

A partir des résultats obtenus pour les deux matériaux Niobate de Lithium et Tantalate de Lithium on remarque au niveau de la partie réelle de α_3 que les ondes de fuite (parties réelles positives) dans le Tantalate de Lithium est un peu plus que le Niobate de Lithium, à l'inverse pour la partie réelle de α_4 les ondes de fuite pour le Niobate de Lithium est beaucoup plus que le Tantalate de Lithium.

Le Niobate de Lithium est largement utilisé dans le marché des télécommunications comme les téléphones mobiles et les modulateurs optiques. Il peut parfois être remplacé par le Tantalate de Lithium.

II.9 Fonctionnement de l'échographie

II.9.1 Matériel nécessaire

L'appareil permettant d'effectuer une échographie est l'**échographe** (représentation dans la figure II.19).



Fig. II.19: échographe[32] .

Voici plus en détail les différents éléments composant l'échographe :

- **La sonde** : Elle permet l'émission et la réception des ultrasons.
- **Le moniteur** : C'est sur lui que l'image s'affiche.
- **Le gel** : Il est appliqué sur le ventre de la femme afin que l'atténuation des ultrasons, due à la fine couche d'air entre la sonde et le ventre, soit plus faible. En effet, son impédance acoustique avoisine celle de la peau.[32]

Les autres éléments de l'échographe servent à recevoir et à traiter les données, ce que nous allons détailler dans les parties qui suivent.

II.9.2 Déroulement de l'examen

Intéressons-nous désormais au le fonctionnement de la sonde :

La sonde sert à la fois à envoyer et à émettre des ultrasons. Elle effectue deux étapes : tout d'abord, elle transforme l'impulsion électrique, fournie par un générateur, en ultrason. Puis, elle convertit les informations ultrasonores, obtenues par réflexion, en signaux électriques qui sont envoyés à l'échographe.

Pour commencer, il faut savoir que la sonde utilise un effet appelé effet piézo-électrique. Cette propriété, comme vous pouvez le voir sur le schéma de (figure II.20), consiste en la polarisation d'un matériau dit piézo-électrique lorsque celui-ci est soumis à une contrainte mécanique, c'est-à-dire une force exercée sur ce matériau. Certains matériaux ont cette propriété (le plus connu et le plus utilisé, notamment en horlogerie, est le quartz). En l'occurrence, les sondes utilisées en échographies sont constituées en leur sein d'une couche de céramique, qui est un matériau piézo-électrique. [24]

- **L'émission** des ultrasons par la sonde

La céramique, qui reçoit les impulsions électriques du générateur, se déforme et se polarise grâce à sa propriété piézo-électrique. Cela engendre des vibrations mécaniques qui se transmettent de proche en proche, permettant alors la production d'ultrasons.

- La **réception** des ultrasons par la sonde

C'est l'effet inverse qui se produit : lorsque les ultrasons sont réfléchis dans l'organisme, la céramique se déforme d'une manière particulière à cause des différentes pressions exercées sur elle (dues à la rencontre de différents milieux et/ou organes par la salve d'ultrasons émise). Ces différences de pressions, dépendant de l'intensité de l'écho, sont interprétées. Puis, les informations sont envoyées au système informatique de l'échographe, qui s'occupe de les traiter. [24]

II.9.3 Schéma Synoptique d'un Dispositif d'Echographie

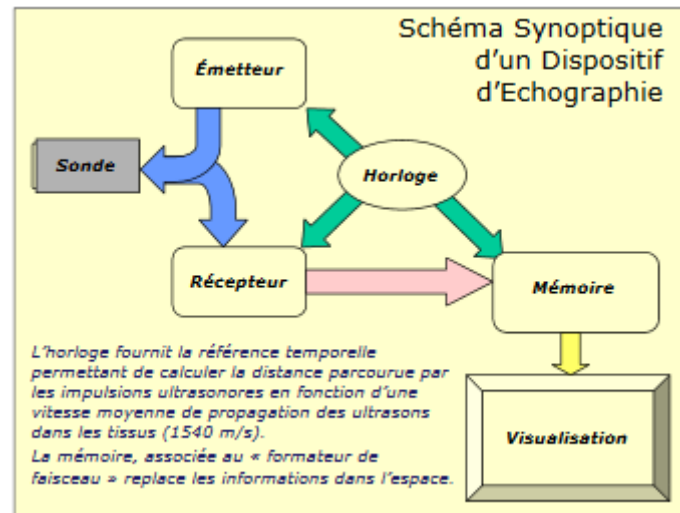


Fig. II. 20: Schéma Synoptique d'un Dispositif d'Echographie [32]

Le schéma de principe d'un appareil d'échographie est simple : une horloge fournit une référence temporelle, donnant le départ des impulsions ultrasonores générées par l'émetteur sous forme de signaux électriques, et transformées en vibrations mécaniques (ultrasons) par la sonde. Les échos de ces ondes acoustiques sont captés par la sonde et transformés en signaux électriques, amplifiés par le récepteur, et inscrits en mémoire en référence à l'instant de l'émission et à la position de la sonde dans l'espace lors de l'émission. L'écran de visualisation affiche les données mises en forme en fonction des positions successives de la sonde dans le plan de coup. [24]

II.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons expliqué brièvement le phénomène de détection des ondes dans un cristal piézoélectrique, pour cela on a donné deux exemples, le premier est le Niobate de Lithium, le deuxième est le Tantalate de Lithium, ensuite on a fait une comparaison entre les deux cristaux.

Nous avons expliqué le phénomène des ondes en nous appuyons sur des résultats numériques au niveau des coefficients d'atténuations, à savoir les variations de leurs parties réelles et imaginaires en fonction de la vitesse acoustique, suffisait pour les détecter.

Conclusion général

Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre de détection des ondes dans une structure piézoélectrique. Notre objectif est de comprendre le principe de propagation des ondes de volume et des ondes de surface qui se manifestent au niveau des matériaux piézoélectriques tels que le Niobate de Lithium (LiNbO_3) et le Tantalate de Lithium (LiTaO_3).

Pour atteindre cet objectif, notre travail s'est déroulé en deux étapes : la première étape inclut des généralités et des définitions sur le phénomène de la piézoélectricité, nous avons présenté les origines de ce phénomène puis les différents types, les principaux matériaux, les différents paramètres et équations qui définissent l'effet piézoélectrique, on a donné également les domaines d'application de ces matériaux.

Durant la deuxième étape, nous avons traité les ondes élastiques dans les solides. Nous nous sommes intéressés à la propagation des ondes acoustiques ainsi qu'à leur génération dans les matériaux piézoélectriques par les transducteurs interdigités.

Les équations piézoélectriques de départ, s'appuient sur l'hypothèse quasi-statique, c'est à dire que l'énergie magnétique qui accompagne la déformation élastique est négligeable devant l'énergie électrique.

Nous avons expliqué le phénomène de détection des ondes dans les matériaux piézoélectriques en appuyant sur des résultats numériques au niveau des coefficients d'atténuation, à savoir les variations de leurs parties réelles et imaginaires en fonction de la vitesse acoustique, permettant de distinguer facilement les différents modes de propagation.

L'étude s'est accentuée sur deux matériaux qui sont le Niobate de Lithium et le Tantalate de Lithium, en choisissant la coupe Y et l'axe Z comme direction de propagation, nous avons fait une comparaison entre les résultats obtenus.

Finalement, comme perspectives, on s'intéresse au développement et à la réalisation de nouvelles structures des transducteurs interdigités, notamment les transducteurs unidirectionnels, afin d'améliorer les performances des dispositifs SAW (Surface Acoustic Wave) réalisés, et de calculer le champ magnétique pour tenir compte de tous les paramètres essentiels de propagation pour une structure embarquée dans l'espace.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] **Matteo Bullo**: "Modélisation et commande du moteur piézoélectrique à onde progressive", MAGELEC 98, Avril 1998, pp.15-28.
- [2] **G.H. Haertling**: "Ceramic materials electronics", Journal of the American Ceramic Society, 1999, vol 82, n°4, pp. 797-818.
- [3] **F. Giraud**, «Modélisation causale et commande d'un actionneur piézoélectrique à onde progressive», Thèse de doctorat, Université Lille I, France, Juillet 2002.
- [4] **S. Le Dren**, «Elaboration de couches épaisses piézoélectriques déposées sur substrats pour des applications microtechniques», Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France, Septembre 2000.
- [5] **A. R. Streett**, «Preliminary finite element modeling of a piezoelectric actuated marine propulsion fin», Master of science thesis, Rochester Institute of Technology, New York, USA, September 2006.
- [6] **PIEZOCRYST** advanced sensors GMBH, www.piezocryst.com, «Introduction to piezoelectric sensors», Austria, August 2005.
- [7] **R. Periasamy**, «Shape control of composite structures with optimally placed piezoelectric patches», Master of science thesis, University of Waterloo, Ontario, Canada, 2008.
- [8] **Measurement Specialties**, www.msiusa.com, «Piezo film sensor-technical manual», April 1999.
- [9] **L. Delmas**, «Etude et réalisation de capteurs à sortie fréquentielle en orthophosphate de gallium (GaPO₄)», Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté, France, Septembre 2005.
- [10] **L. Hamza**, étude, élaboration et caractérisation des céramiques piézoélectriques, Thèse de doctorat, Constantine (2011).

- [11] **D. Royer** and **E. Dieulesaint**, Ondes élastiques dans les solides, Tome 1. Masson, 1996.
- [12] **Ghalmi Z.** « Contribution au développement d'un capteur ultrasonique pour mesurer l'épaisseur de la glace ». Thèse en doctorat présenté à l'université du Québec à Chicoutimi, Mars 2006.
- [13] **Frayssignes H.** « Etude des effets non-linéaires et des pertes dans les moteurs ultrasonores Introduction au problème de couplage mécanique entre les voies ». Thèse de Doctorat de l'INSA, Lyon, 2001.
- [14] **E. Dieulesaint, D. Royer.** Ondes Elastiques dans les Solides, Application au Traitement du Signal. Masson & Cie (1974).
- [15] **F. Pata** : "Phénomène de piézo-électricité", Habilitation à diriger des recherches, univ. de Savoie, 2000.
- [16] **JAFFE, B., ROTH, R.S., MAZULLO, S.** Piezoelectric properties of lead zirconate lead titanate solid solution ceramics. J. Appl. Phys., 1954, vol.25, pp.809-810.
- [17] **Abdelmjid Benayad** : "Matériaux monocristallins à forte activité piézoélectrique: élaboration, caractérisation et application", Laboratoire de Génie électrique et de ferroélectricité, INSA de Lyon, 2005.
- [18] **C. Peixeiro** and **A. M. Barbosa** : " Leaky and surface waves an anisotropic printed antenna structures", IEEE. Trans. On Antenna and Propagation, 1992, Vol. 40, pp. 566- 569.
- [19] **Mohamed Badreddine ASSOUAR** : " Etude de dispositifs a ondes acoustiques de surface (SAW) a structure multicouche nitrure d'aluminium / diamant : croissance de matériaux en couches minces et technologie de réalisation" thèse de doctorat, Nancy 2001.
- [20] **BENZEBEIRI, D.** Synthèse, étude structural et caractérisations des céramiques PZT de type pérovskite $Pb_{1-x}Ca_x [(Zr_{0.53}, Ti_{0.47})_{0.75}Sb_{0.25}]O_3$. (Me n t o u r i d e C o n s t a n t i n e, 2012) doctorat.
- [21] **KAHOUL, F.** Elaboration et caractérisation de céramiques PZT dopé et détermination de la frontière morphotropique (FMP). (Mohamed Khider – Biskra Faculté, 2013).doctorat

- [22] **B. Jafee, W.R. Cook et H. Jafee** : "Piezoelectric ceramic", London. Academic press, 1971.
- [23] **Eugenius Ang, Jr. et al.** « Prenatal exposure to ultrasound waves impacts neuronal migration in mice » *Proceedings of The National Academy of Sciences of the USA (PNAS)* 2006
- [24] **A. Arneodo, F. Argoul, E. Bacry, J. Elezgaray and J.F. Muzy** : "Ondelettes, multifractales et turbulences", (Diderot Editeur, Art et Sciences, Paris, 1995).
- [25] **I. D. Avramov** : "1 GHz voltage controlled oscillator using a SSBW/BGW combined mode resonator filter", Proc. of the 45 th Annual Symposium on frequency control, 1991, pp. 230-238.
- [26] **D. Benatia and M. Benslama** : " Analysis of Leaky and Bulk Acoustic Microwaves by Wavelet Technique", Journal of Communications in Numerical Methods in Engineering, 2000, Vol. 16, pp. 165-175.
- [27] **Marlton**: "Lithium Tantalate properties", Materials Research Bulletin, 1982, pp. 1245-1250.
- [28] **Y. Fusero, S. Ballandras, J. Desbois, J.M. Hodé and P. Ventura** : " SSBW to PSAW Conversion in SAW Devices Using Heavy Mechanical Loading", IEEE Trans. On ultason, Ferroelectrics, and frequency control, Vol. 49 N°6, June 2002, pp.805-814.
- [29] **F. Martin** : " Propagation characteristics of harmonic surface skimming bulk waves on ST ", Electron Lett. August 2002, 38, pp. 941-942.
- [30] **Jaffe, B., Cook, W-R. And Jaffe, H.**, "Piezoelectric ceramics", *London: Academic Press, 1971: pp. 317.*
- [31] **Ariel Cohen et Pascal Guéret**, "Manuel d'échocardiographie clinique", Librairie Lavoisier, 2012.
- [32] **BENZEBEIRI, D.** Synthèse, étude structural et caractérisations des céramiques PZT de type pérovskite $Pb_{1-x}Ca_x [(Zr_{0.53}, Ti_{0.47})_{0.75}Sb_{0.25}]O_3$. (Me n t o u r i d e Co n s t a n t i n e, 2012) doctorat.