*République Algérienne Démocratique et Populaire*
*Ministère De L'enseignement Supérieur*
*Et De La Recherche Scientifique*

**UNIVERSITE DE BATNA**

**FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR**
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE

**Option : Micro-ondes pour télécommunication**

**Mémoire de Magister présenté par :**

**BOULILA MOHAMED**

Thème

# MODELISATION D'UNE MICRO-ANTENNE A BASE DE STRUCTURE PIEZOELECTRIQUE

**Jury composé de** :

| | | | |
|---|---|---|---|
| Pr. Malek BENSLAMA | Prof. | U. Constantine | Président |
| Pr. Djamel BENATIA | Prof. | U. Batna | Rapporteur |
| Dr. Nabil BENOUDJIT | M.C | U. Batna | Examinateur |
| Dr. Tarek FORTAKI | M.C | U. Batna | Examinateur |

*Année Universitaire 2006/2007*

# *Remerciement*

J'exprime toute ma gratitude au Professeur Benatia Djamel qui ma fait l'honneur d'être rapporteur de ma thèse. Et j'adresse tous mes remerciements pour sa confiance, son aide *et ses conseils.*

Je tiens également à remercier chaleureusement le Professeur Benslama Malek d'avoir présidé le jury ainsi que Dr. Fortaki Tarek et Dr. Benoudjit Nabil pour leur participation à ce jury.

A tous ceux qui, directement ou indirectement ont contribue a ce travail, j'adresse mes plus sincères remerciements.

Je vais prendre également un peu de place pour remercier mon ami Ali Benchenine qui bien évidemment m'a soutenue du début à la fin.

Je garde le meilleur pour la fin a mes parents, qui m'ont entouré de leur affection, fait grandir dans l'envie de comprendre et de découvrir, et qui m'ont toujours fait confiance et m'ont toujours laissé faire ce que je voulais faire; sans leur amour et leur soutien indéfectible tout au long de mon cursus universitaire je n'en serais pas là.

# *DEDICACES*

*Cette thèse, je la dédie particulièrement à :*

*Mes très chères parents qui représentent pour moi l exemple de sacrifie, du fidélité et de l'honnêteté.*

*Mes frères et sœurs.*

*Toute ma grande famille.*

*Mes amis : Ali, T arek, Imad, Samir, Mohamed et Farouk.*

*A ma fiancée : B. H*

*Tous ceux qui travaillent pour un avenir mieux.*

# *RESUME*

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 au 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 particulier les ondes de fuite, 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 ondes de fuite dans un cristal piézoélectrique suivi par une comparaison entre les résultats obtenus au niveau des deux cristaux.

Cette détection fera l'objet d'une modélisation des structures rayonnantes piézoélectrique ; on vise plus particulièrement le rayonnement des surfaces comprises entre les électrodes du transducteur interdigité.

***Mots clés :***

Dispositif piézoélectrique, Microondes acoustiques, Ondes de fuites, micro-antenne piézoélectrique.

# *Sommaire*

**Introduction générale**……...…..1

**CHAPITRE I :** ***Généralités sur la piézoélectricité***

**I.1** Introduction……...……..……..3

**I.2** Historique……...……..…….……4

**I.3** L'effet piézoélectrique …….…….....5

**I.4** Symétrie et piézoélectricité……...……...……...……6

**I.5** La piézoélectricité naturelle…….…….…….……8

**I.6** La piézoélectricité artificielle……...……...…9

**I.7** Polarisations …….……11

**I.8** Les matériaux piézoélectriques……...……...……..…12

**I.9** Les principaux matériaux piézoélectriques……..……...…12

**I.** ***9.1*** *Les cristaux*……...……...……13

**I .*9.2*** *Les polymères*…….…….……...13

**I .*9.3*** *Les céramiques piézoélectriques*……...……13

**I.** ***9.4*** *Les composites*…….……...14

**I.10** Choix des matériaux piézoélectrique……..……..……..…15

**I.11** Modes de vibrations des matériaux piézoélectriques….……..……..……16

**I.12** Dispositifs piézoélectriques et leurs applications…….……..……...…….17

**I.13** Les équations de la piézoélectricité…….…….……...……...….19

**I.14** Constantes élastiques des solides …….…….....…….....…..……22

**I.15** Définition des coefficients piézoélectriques….…….……...……..…23

**I.16** Les avantages des éléments piézoélectriques….…….……...…..……..24

**I.17** Conclusion …….…….……...…..…….25

**CHAPITRE II :** ***Détection des ondes de fuite***

**II.1** Introduction……..……...……26

**II.2** Relations fondamentales……...…….……...…27

**II.3** Ondes élastiques et électriques……...……...……...…28

**II.4** Equations de mouvement d'une particule et du potentiel électrique..…....…28

**II.5** forme générale de la solution…….……...…30

**II.6** Comportement des racines de l'équation séculaire……...31

**II.7** Application sur le LiNbO3 (Niobate de Lithium) coupe Y-X …….…...…33

**II.7** Application sur le $LiTaO_3$ (Tantalate de Lithium) coupe Y-X ….……....…39

**II.8** Comparaison entre les deux matériaux……...……...…….…42

**II.9** Conclusion ……..…42

**CHAPITRE III :** ***Modélisation d'une antenne piézoélectrique à ondes de fuite***

**III.1** Problématique …….…….……43

**III.2** Rayonnement d'une structure piézoélectrique ……...……....43

**III.3** Cas d'une seule surface……...……....44

**III.4** Cas de plusieurs surfaces……..……...…49

**III.5** Diagramme de rayonnement…….……...…50

**III.6** Conclusion……...…….……53

**Conclusion générale** ……...……...54

# *Légendes des figures*

**CHAPITRE I :**


**Figure I.1**: Illustration des effets piézoélectriques ……..…… ..4

**Figure I.2** : Effet de la piézoélectricité (effet direct et inverse)…….....5

**Figure I.3** : Représentation schématique de l'apparition de la piézoélectricité…….…….6

**Figure I.4** : Organisation des 32 classes cristallines……...……7

**Figure I.5**: Hiérarchie des matériaux cristallins ayant des propriétés piézoélectriques.……8

**Figure I.6.a** : piézoélectricité du quartz naturel à l'équilibre……..……...9

**Figure I.6.b** : Piézoélectricité du quartz naturel avec une force appliquée……...……..9

**Figure I.7**: La déformation est positive …….……...10

**Figure I.8** : la piézoélectricité artificielle ……...…….…10

**Figure I.9** : Dipôles électriques dans une céramique piézoélectrique ……..…11

**Figure I.10**: Polarisation des céramiques piézoélectriques…….……..…....12

**Figure I.11** : Structure d'un composite : pilier de céramique noyé dans un polymère…...……..14

**Figure I.12** : Modes de vibration typiques associés à la forme d'un matériau piézoélectrique....16

**Figure I.13** : Relation typique entre contraintes et déformations dans un solide…….....22

**Figure I.14 :** Notations tensorielles……...…….23


**CHAPITRE II :**


**Figure II.1** Excitation du matériau piézoélectrique par un transducteur interdigité…….…..28

**Figure II.2** : Ondes de surface……..…….……32

**Figure II.3** : Ondes de fuite……...……32

**Figure II.4** : Ondes de volume……...……...……32

**Figure II.5** : Ondes SSBW…….……...……32

**Figure II.6** : Partie réelle de $\alpha_3$ *($LiNbO_3$)*…….…….34

**Figure II.7**: Partie imaginaire de $\alpha_3$ *($LiNbO_3$)*…….……..35

**Figure II.8** : Partie réelle de $\alpha_4$*($LiNbO_3$)*…….……..……35

**Figure II.9**: Partie imaginaire de $\alpha_4$ *($LiNbO_3$)*……...…….. 36

**Figure II.10**: Partie réelle de $\alpha_1$ *($LiNbO_3$)*…….……... 37

**Figure II.11**: Partie imaginaire de $\alpha_1$*($LiNbO_3$)*…….……...37

**Figure II.12**: Partie réelle de $\alpha_2$ *($LiNbO_3$)*……..…….…….38
**Figure II.13**: Partie imaginaire de $\alpha_2$ *($LiNbO_3$)*…….……38
**Figure II.14**: Partie réelle de $\alpha_3$ *($LiTaO_3$)*……..…….…… .40
**Figure II.15**: Partie imaginaire de $\alpha_3$ *($LiTaO_3$)*……..…….……. 40
**Figure II.16**: Partie réelle de $\alpha_4$ *($LiTaO_3$)*…….……41
**Figure II.17**: Partie imaginaire de $\alpha_4$ *($LiTaO_3$)*…… …….…...41

**CHAPITRE III :**

**Figure III.1** : Matériau piézoélectrique associé aux électrodes ……..…..……...……44
**Figure III.2** : Surface comprise en deux électrodes …….……..……..45
**Figure III.3** : Association des surfaces rayonnantes en série……...…….……...…….49
**Figure III.4** : Diagramme de rayonnement pour n = 2 plan E……...……..……51
**Figure III.5** : Diagramme de rayonnement pour n = 2 plan H ……....……...…51
**Figure III.6** : Diagramme de rayonnement pour n = 10 plan E …….……..52
**Figure III.7** : Diagramme de rayonnement pour n = 10 plan H……...52

# *Listes des tableaux*

**Tableau I.1** : Caractéristiques piézoélectriques des matériaux piézoélectriques……...….15

**Tableau I.2** : Facteurs de couplages pour les différents modes de vibration ……..……17

**Tableau I.3** : Applications des matériaux piézoélectriques  en fonction de l'effet utilisé..…18

**Tableau I.4** : Equations piézoélectriques…….……20

**Tableau I.5** : Grandeurs électriques, mécaniques et piézoélectriques…….……21

# *Introduction générale*

# 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 un 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 [1-5], 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 [6-10].

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 [11-15].

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 fuite (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 avons étudié et

modélisé une structure rayonnante à ouverture rayonnante  d'une micro-antenne piézoélectrique à ondes de fuite.

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.

Dans le troisième chapitre, nous reprenons la solution d'onde du chapitre précédent pour laquelle nous modélisons des structures rayonnantes à base d'ouvertures rayonnantes.

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

# *Chapitre I*

# Généralités sur la piézoélectricité

**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.

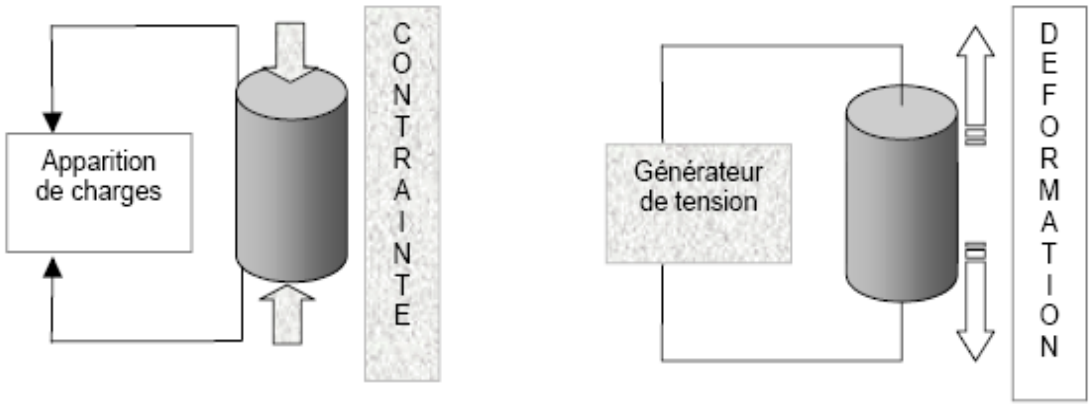
Cette déformation est fonction de l'effort qui la produit est connue sous le nom de la théorie de l'élasticité, cette dernière n'est qu'un modèle simplifié établi à partir d'un certain nombre d'hypothèses, telles que : réversibilité et linéarité des déformations afin d'obéir à la loi de Hooke et homogénéité 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. [16]

L'équation suivante résume les effets piézoélectriques:

$$\begin{Bmatrix} \text{Déplacements électriques} \\ \text{Déformations mécaniques} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Constantes électriques} & \text{Couplage électro-mécanique} \\ \text{Couplage mécano-électrique} & \text{Constantes mécaniques} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \text{Tensions électriques} \\ \text{Contraintes mécaniques} \end{Bmatrix}$$




**Effet direct** : Sous l'effet d'une contrainte, il apparaît des charges

**Effet indirect** : L'application d'une tension engendre une déformation

**Fig. I. 1** : Illustration des effets piézoélectriques[16].

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 en1880. 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 [16,17].

## I.2 Historique

La première démonstration expérimentale de l'existence d'un lien entre les phénomènes piézoélectriques macroscopiques et la structure cristallographique a été publiée en 1880 par Pierre et Jacques Curie. L'expérience consistait en la mesure des charges électriques accumulées à la surface des cristaux, comme par exemple le quartz, lorsqu'ils étaient soumis à un effort mécanique. Ces résultats furent un crédit à l'imagination des frères Curie et à leur persévérance en considérant les moyens rudimentaires avec lesquels ils étaient obligés de travailler.

Dans les milieux scientifiques de l'époque, cet effet fut considéré presque comme une découverte, et rapidement nommé « piézoélectricité », afin de le distinguer d'autres phénomènes tels que l'électricité de contact (électricité statique due au frottement) et la pyroélectricité (électricité générée par les cristaux, due à leur échauffement).

Toutefois, les frères Curie n'ont pas prédit que les cristaux qui exhibaient l'effet piézoélectrique direct (électricité en réponse à l'application d'u effort mécanique) auraient aussi exhibé l'effet piézoélectrique inverse (déformation en réponse à l'application d'un champ

électrique). Cette propriété fut déduite mathématiquement à partir des principes fondamentaux de la thermodynamique par Lippmann en 1881.

Les Curie confirmèrent immédiatement l'existence de l'effet inverse et continuèrent les travaux dans le but d'obtenir une preuve quantitative de la réversibilité complète des déformations dans les cristaux piézoélectriques. A ce moment, après seulement deux années de travail interactif au sein de la communauté scientifique européenne, le noyau scientifique des applications piézoélectriques fut créé. Le but était l'identification des cristaux piézoélectriques basée sur la structure asymétrique du cristal.

Pendant les 25 années suivantes (jusqu'en 1910), le groupe de travail arriva à établir définitivement les 20 catégories de cristaux naturels dans lesquels les phénomènes piézoélectriques sont présents à défini les 18 coefficients piézoélectriques au niveau macroscopique [16].

## I.3 L'effet piézoélectrique

On appelle piézoélectricité, la propriété qui possèdent certains matériaux (cristaux, céramiques, polymères ou composites) à pouvoir transformer une énergie électrique en une énergie mécanique. La charge électrique est proportionnelle à la contrainte mécanique imposée : c'est l'effet piézoélectrique directe. L'effet réciproque, encore appelé effet inverse, fait que l'application d'un champ électrique externe provoque une déformation mécanique du matériau figure I.2 [19].

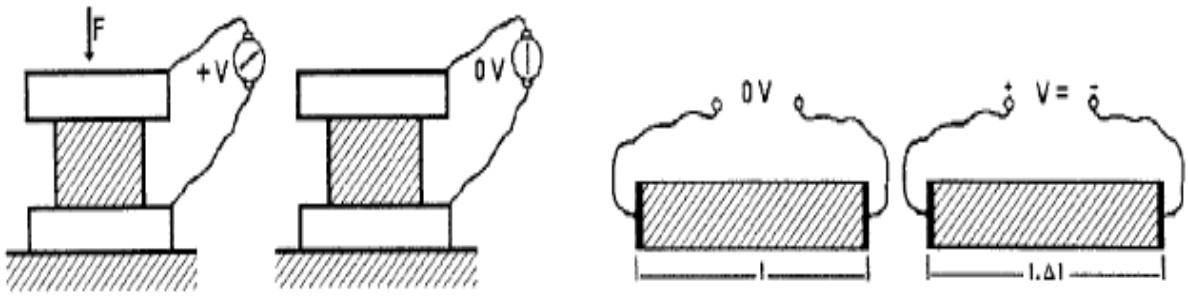



**Fig.a : Effet direct**
On applique une force, on recueille une tension

**Fig.b : Effet inverse**
On applique une tension, on recueille une déformation

**Fig. I.2** : Effet de la piézoélectricité (effet direct et inverse)

## I.4 **Symétrie et piézoélectricité**

A l'échelle cristalline, la piézoélectricité se manifeste par une polarisation de la maille.

A l'échelle de la maille, elle résulte de la création de dipôles internes par séparation du centre de gravité des charges positives et de celui des charges négatives suite aux déformations sous l'action de contraintes.

Les propriétés de symétrie des cristaux ont une importance fondamentale pour l'existence ou non de la piézoélectricité. Tout corps présentant un centre de symétrie ne peut pas être piézoélectrique alors que les cristaux ne possédant pas de centre de symétrie peuvent l'être (Figure I.3 [16]).

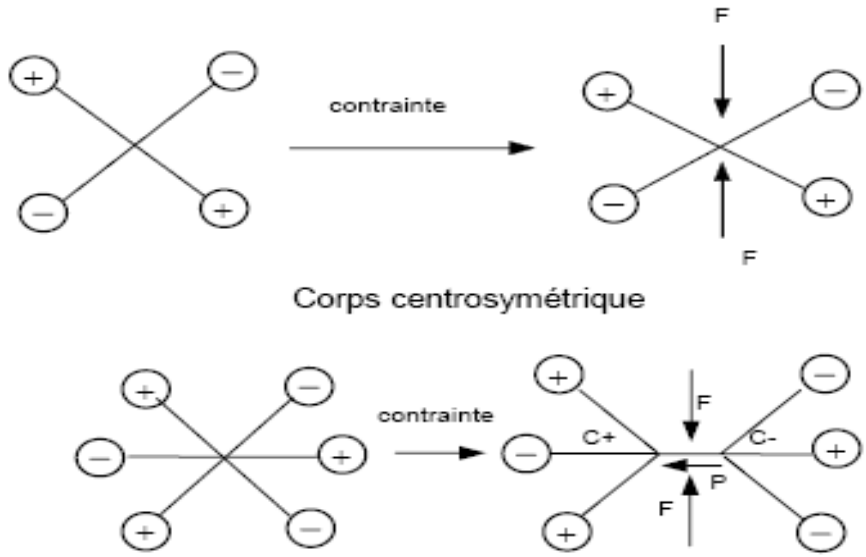



**Fig. I.3** : Représentation schématique de l'apparition de la piézoélectricité

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.4 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 [16].

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

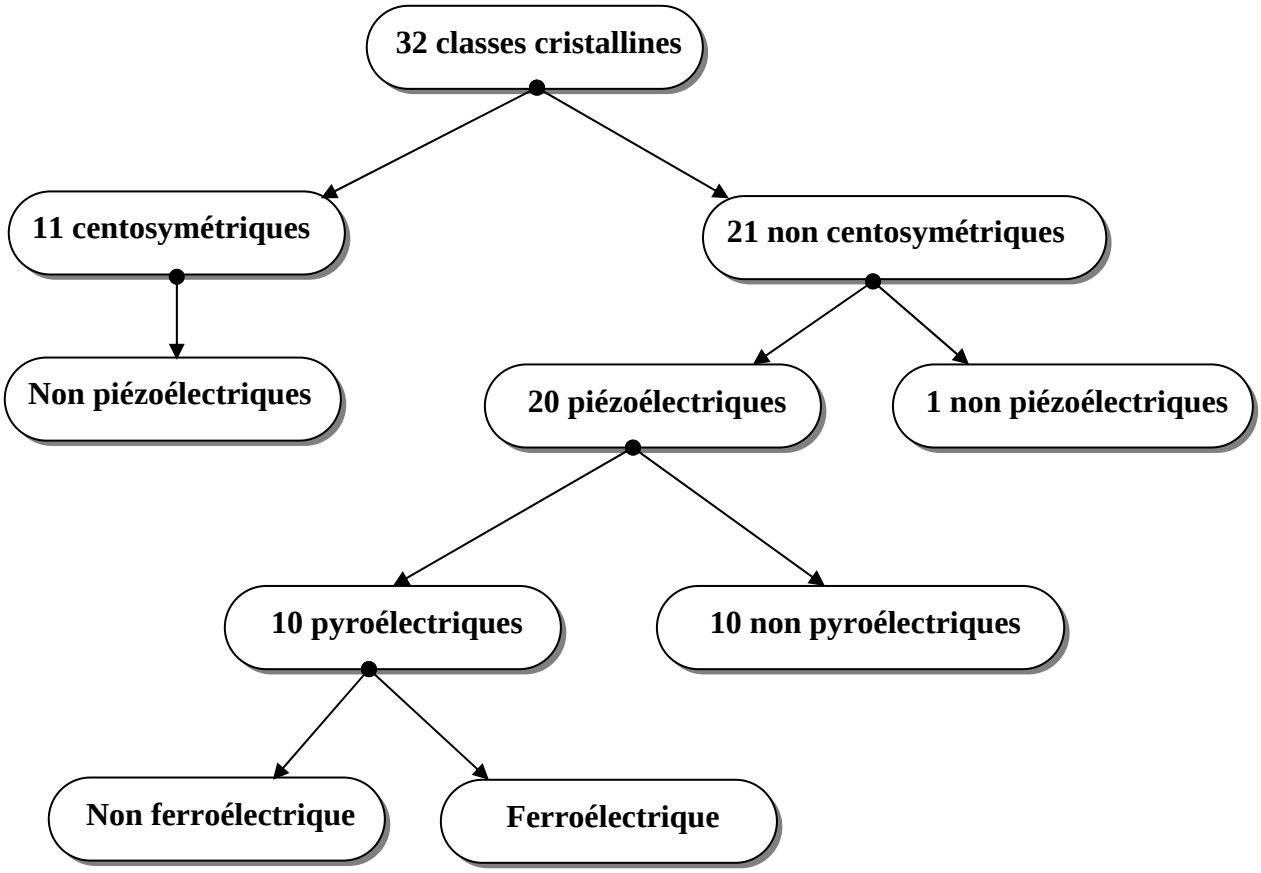



**Fig. I.4** : Organisation des 32 classes cristallines

Parmi les 32 classes cristallines qui existent (Figure I.4), 20 présentent l'effet piézoélectrique dont 10 classes qui présentent un moment dipolaire permanent en l'absence d'un champ électrique.

La Figure I.5 résume la hiérarchie des matériaux cristallins ayant des propriétés piézoélectriques. Parmi ces matériaux on trouve une sous-classe formée par les matériaux pyroélectriques qui, à la différence des précédents, possèdent une polarisation naturelle selon au moins une direction, appelée aussi polarisation spontanée. L'importance de cette polarisation dépend fortement de la température, d'où leur dénomination. Les matériaux ferroélectriques forment un sous-groupe des matériaux pyroélectriques et ont la particularité de pouvoir se polariser selon deux axes ou plus, chaque direction étant équiprobable. Par application d'un champ électrique, on peut faire basculer la polarisation d'un axe à un autre.

C'est en fait ce phénomène qui est grande partie responsable de leurs propriétés piézoélectriques : le basculement modifie localement la structure cristalline, et rend l'effet beaucoup plus important que chez les autres matériaux. Ceci explique que seuls les ferroélectriques soient utilisés comme actionneurs [17,19].

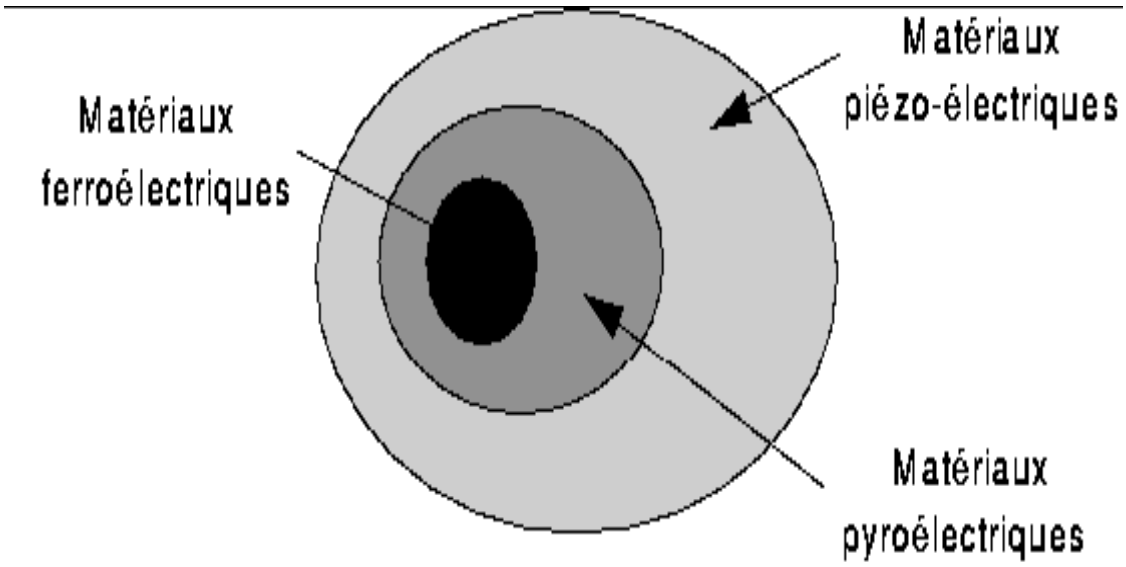



**Fig. I.5**: Hiérarchie des matériaux cristallins ayant des propriétés piézoélectriques[16].

## I.5 La piézoélectricité naturelle

Certains cristaux naturels tels que le quartz sont 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 (représenté par le point noir). Si on applique une force de compression, la maille cristalline se déforme de telle sorte que les barycentres des charges positives et négatives s'écartent.

On crée ainsi un dipôle électrique qui par réaction, va faire apparaître des charges de signes opposés sur les deux électrodes, c'est l'effet piézoélectrique direct. Si au contraire, on apporte 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 [21].

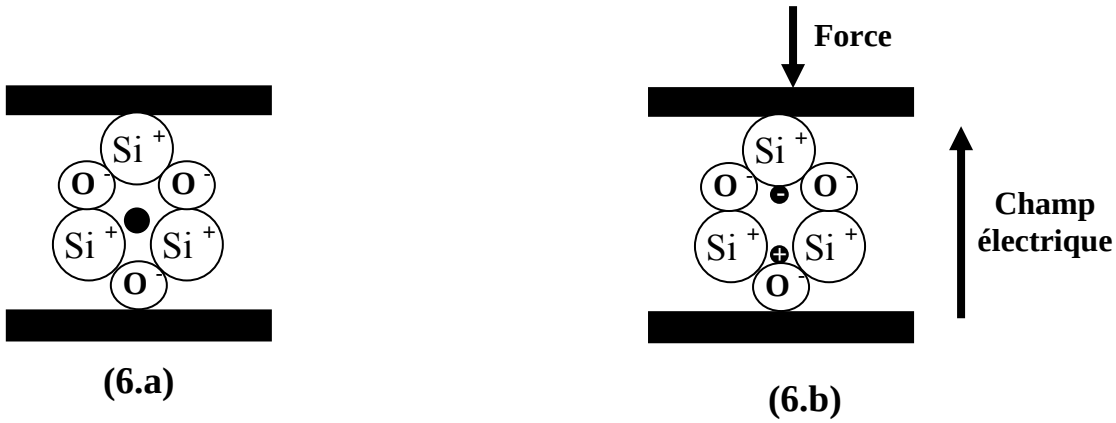



**Fig.I.6.a**
Piézoélectricité du quartz naturel à l'équilibre.

**Fig.I.6.b**
Piézoélectricité du quartz naturel avec une force appliquée.

**Fig.6** : La piézoélectrique naturelle

Si au contraire on apporte des charges électriques, sous l'effet de forces électrostatiques, la maille va se déformer : c'est l'effet inverse.

Dans ces deux formes, l'effet piézo-électrique est linéaire: champ électrique et déformation sont proportionnels.

Si on place des électrodes métalliques sur la surface d'une plage de matériau piézo-électrique et qu'on applique une tension oscillante dans le temps, à la fréquence de 5 MHz par exemple, à ces deux électrodes, la plaque se déformera à la fréquence de 5 MHz. Son mouvement se communiquera au milieu adjacent engendrant ainsi des ultrasons. La piézo-électricité est un phénomène extrêmement commode pour coupler énergie électrique et énergie mécanique [20].

## I.6 La piézoélectricité artificielle

La majorité des matériaux piézo-électriques utilisés dans la fabrication des transducteurs sont au départ des matériaux ferroélectriques, c'est à dire que la courbe liant le champ électrique et la déformation n'est plus une droite. On voit sur la figure I.7 ci dessous que la déformation est toujours positive, quel que soit le signe du champ électrique.

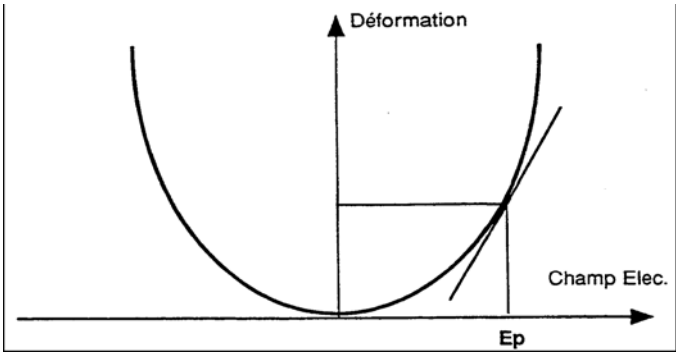



**Fig. I.7**: La déformation est positive

On remarque cependant sur la figure I.7 [20], que si on observe une partie de la courbe autour d'une valeur élevée du champ électrique Ep on retrouve une relation linéaire (la tangente à la courbe).

Il nous faut maintenant considérer la structure des matériaux ferroélectriques. En effet, ils sont composés d'une multitude de grains dont chacun est un cristal : ce sont des matériaux poly-cristallins. 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 (figure I.8). Il garde en quelque sorte la mémoire du champ électrique intense qui lui a été appliqué sous forme d'un champ électrique permanent Ep.

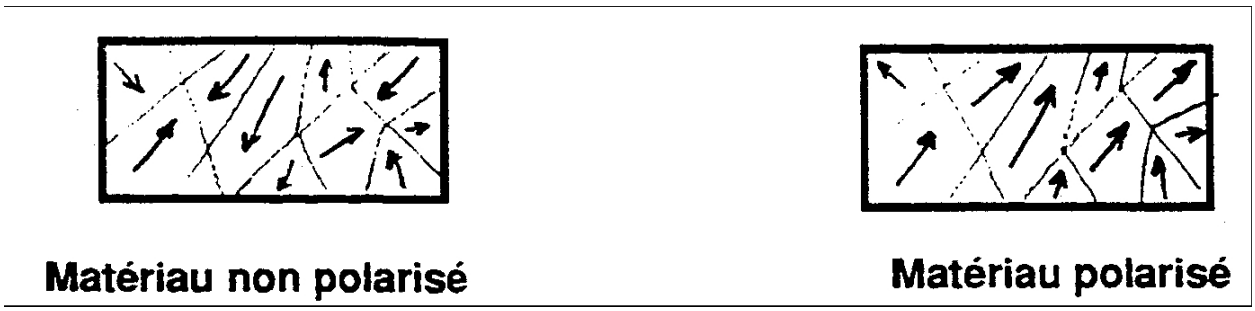



**Fig. I.8** : Piézoélectricité artificielle[20].

Il est à noter que si le matériau est chauffé au delà d'une valeur appelée température de Curie Tc, il perd sa piézoélectricité. Tc étant typiquement comprise entre 80 et 400 °C, ce phénomène ne peut se produire lors d'une utilisation clinique normale [20].

## I.7. Polarisations

A l'échelle cristalline, la plus petite particule ayant les propriétés piézoélectriques est appelée maille. La piézoélectricité se manifeste par une polarisation de cette maille.

A l'échelle de celle-ci, la polarisation résulte de la création de dipôles internes des charges électriques générées par les déformations de la maille sous l'action de contraintes (figureI.9).

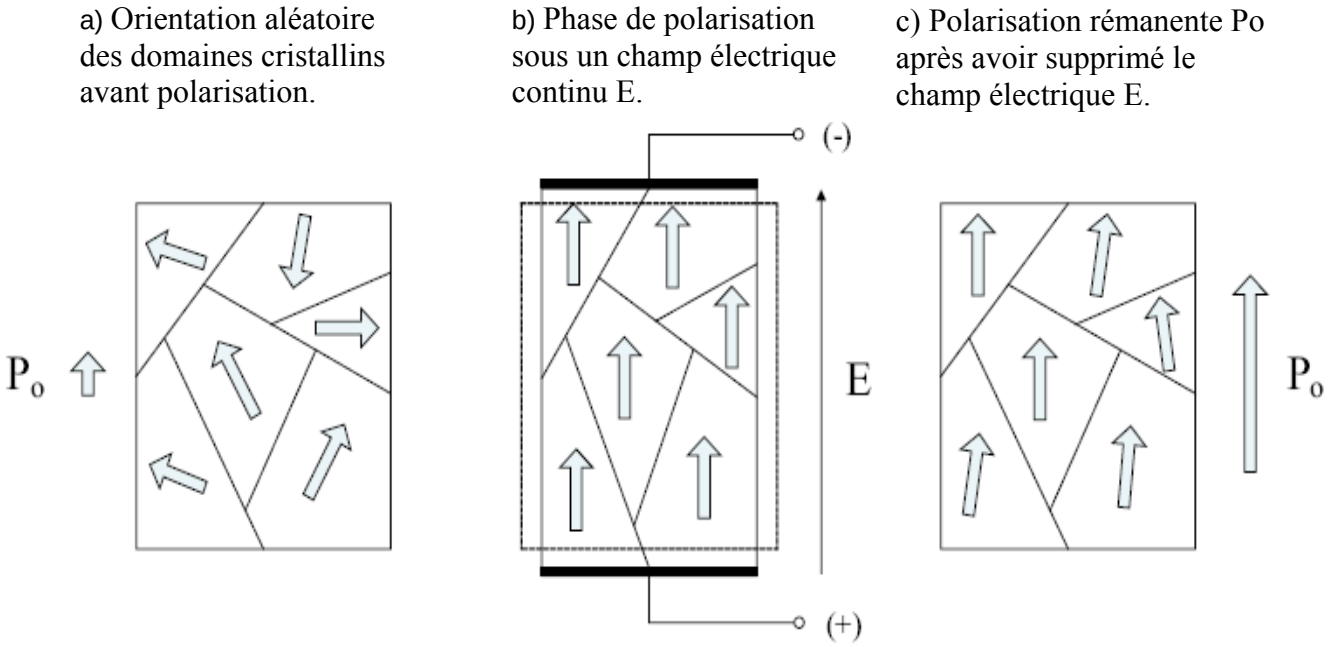



**Fig. I.9**: Dipôles électriques dans une céramique piézoélectrique : a) avant polarisation b) durant la phase de polarisation c) après polarisation [18].

Les propriétés de symétrie des cristaux ont une importance fondamentale dans l'existence ou non de la piézoélectricité. Ainsi tout corps présentant un centre de symétrie ne peut pas être piézoélectrique.

Les céramiques polycristallines sont formées de grains et de joints de liaison. Chaque grain est divisé en domaines dont les dipôles sont orientés aléatoirement en l'absence de champ électrique. En appliquant un champ électrique intense dit de polarisation les domaines s'orientent parallèlement à ce champ et conservent cette direction par la suite même en l'absence

de champ (Figure I.10 [18]). Le cristal est alors polarisé. Cette classe de cristaux est dite ferroélectrique [18].

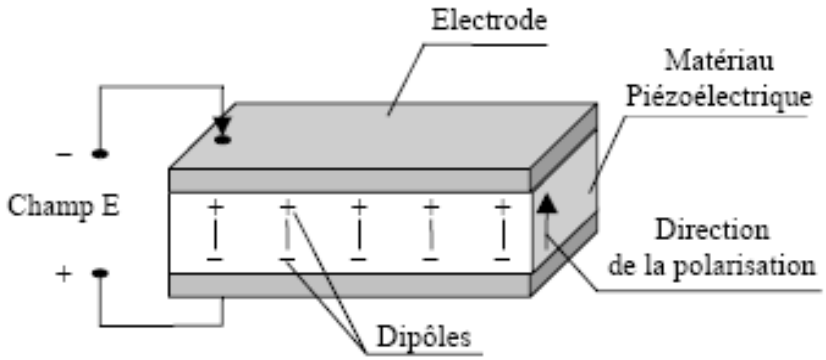



**Fig. I.10** : Polarisation des céramiques piézoélectriques

La polarisation n'est stable que dans un domaine de température donné. Au delà de la température de CURIE, il se produit une transition de phase et le matériau passe de l'état ferroélectrique à l'état paraélectrique. Il perd alors ses propriétés piézoélectriques.

## I.8 Les matériaux piézoélectriques

Tous les matériaux ne sont pas piézoélectriques, en effet, il faut déjà que la maille cristalline ne possède pas de centre de symétrie, autrement dit, tous les matériaux piézoélectriques sont anisotropes. Ceci signifie qu'ils possèdent des propriétés physiques variant selon la direction considérée. Parmi les 32 classes cristallines existantes, 20 sont dépourvues de centre de symétrie et peuvent donc présenter l'effet piézoélectrique.

Dix des vingt classes cristallines piézoélectriques présentent une polarisation électrique spontanée (aussi appelée moment dipolaire permanent) en l'absence de contrainte ou champ extérieur.

Ces classes sont dites polaires et sont appelées pyroélectriques en raison de l'effet de la température sur leur polarisation spontanée [21].

## 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 les différents matériaux piézoélectriques, trois types sont distingués : les cristaux, les polymères et les céramiques [18].

### *I.9.1 Les cristaux* :

Nous citerons seulement le quartz et certains cristaux à base de Bismuth et de Lithium (comme le Niobate « $LiNbO_3$ » de Lithium et le Tantalale de Lithium « $LiTaO_3$) découverts respectivement par MATTHIAS et AURIVILLUS en 1949. Ces matériaux sont très stables mais ont de faibles coefficients piézoélectriques. Il est actuellement possible de fabriquer de nombreux monocristaux de même composition que les céramiques citées précédemment mais les techniques mises en jeu sont délicates et coûteuses.

Ils sont cependant utilisés en laboratoire dans des dispositifs à très haute résolution pour des raisons essentiellement technologiques [17].

### *I.9.2 Les polymères*

Découverts par KAWAI en1969, les films polymères semicristalins de type polyfluorure de vinilydène PVF2 présentent des propriétés piézoélectriques lorsqu'ils sont étirés sous un champ électrique. Les premières applications comme filtres à ondes de surface sont apparues au début des années 80.

Ils se caractérisent par une faible impédance acoustique et sont donc supérieurs à ce point de vue. Cependant 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 qui 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.9.3 Les céramiques piézoélectriques*

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 kt 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 facile 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 piézo-électriques [20].

### *I.9.4 Les composites*

Ces matériaux, d'abord développés pour des applications sonar, ont fait leur apparition au début des années quatre-vingt et représentent l'avancée majeure dans le domaine des matériaux piézo-électriques, depuis l'apparition des PZT dans les années soixante.

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 (figure II.11 [20]).

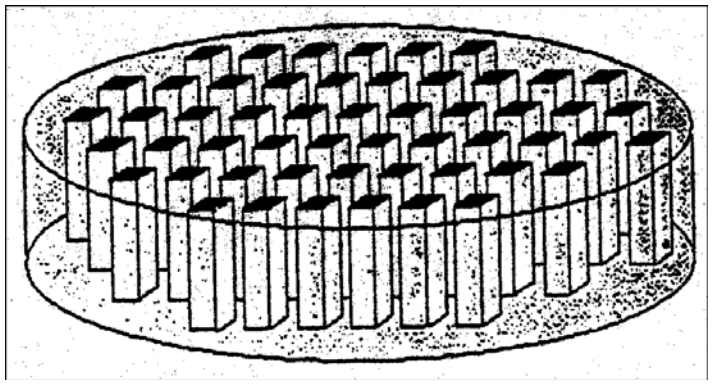


**Fig. I.11** : Structure d'un composite : pilier de céramique noyé dans un polymère

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 kt 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 [20].

## I.10. Choix des matériaux piézoélectriques

La comparaison des valeurs caractéristiques de matériaux piézoélectriques permet de choisir le matériau le plus adapté à l'action qui sera utilisé. Le *P.Z.T.* apprécié pour ses excellentes propriétés piézoélectriques (surtout un bon coefficient de couplage) par rapport aux autres composants est utilisé dans l'élaboration de la majorité des céramiques piézoélectriques (Tableau I.1) [18].

| | ***Quartz $SiO_2$*** | ***$LiNbO_3$*** | ***PVDF*** | ***PZT*** |
|---|---|---|---|---|
| ***Densité ($g.cm^{-3}$)*** | 2.65 | 4.64 | 1.76 | 7.5 |
| ***Constante diélectrique $\varepsilon_r$*** | 4.5 | 40 | 12 | 200-4000 |
| ***Température de Curie en °C*** | 573 | 1210 | 180 | < 350 |
| ***Coefficient de couplage K(%)*** | 10 | 10 | 14 | 40-70 |

**Tableau I.1 :** Caractéristiques piézoélectriques des matériaux piézoélectriques

## I.11 Modes de vibrations des matériaux piézoélectriques

Chaque matériau piézoélectrique possède une fréquence élastique de vibration spécifique, en fonction du matériau et de sa forme. Lorsqu'une tension alternative est appliquée à un matériau piézoélectrique avec une fréquence égale à sa propre fréquence de vibration élastique, la céramique résonne.

Les matériaux piézoélectriques peuvent exhiber plusieurs modes de vibrations, qui dépendent de leur forme, de la direction de polarisation et de la direction du champ électrique. La figure I.12 montre les modes de vibration typiques relatifs à la géométrie des matériaux piézoélectriques. Barreaux, disques et cylindres sont les formes plus utilisées dans la construction des transducteurs électromécaniques.

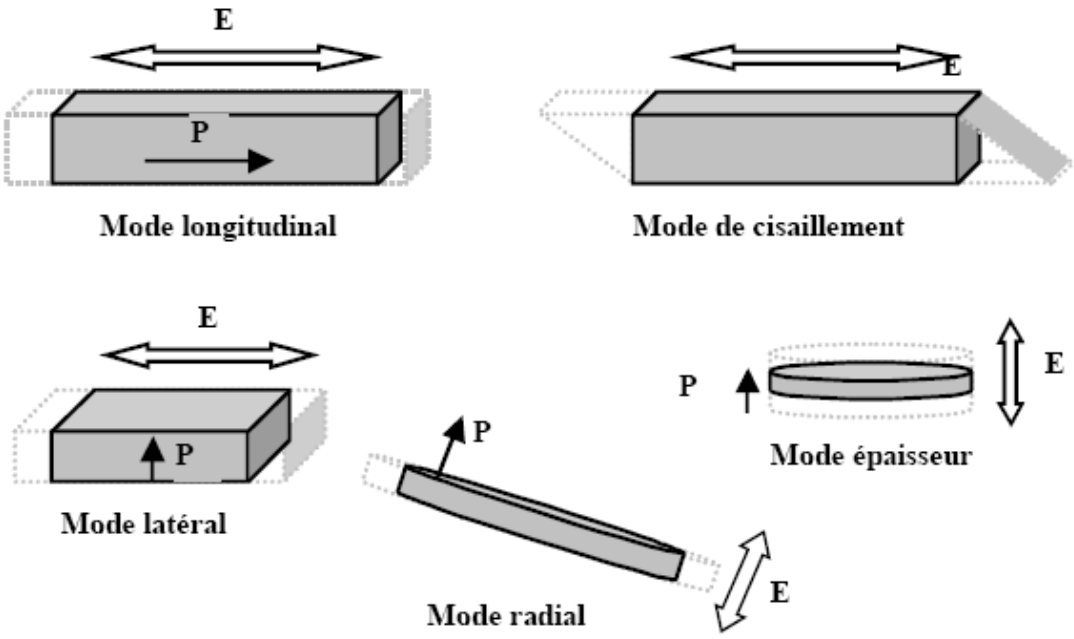



**Fig. I.12** : Modes de vibration typiques associés à la forme d'un matériau piézoélectrique

Le couplage électromécanique est caractérisé par un coefficient de couplage k ; Ce coefficient mesure la capacité d'un matériau piézoélectrique de transformer l'énergie électrique en énergie mécanique et réciproquement.

$$K = \frac{Energie\ \ transormée}{Energie\ \ fournie}$$

Ce coefficient varie en fonction de la géométrie des matériaux et de leur mode de vibration. Les différentes expressions du facteur de couplage sont regroupées dans le tableau I.2 [18].

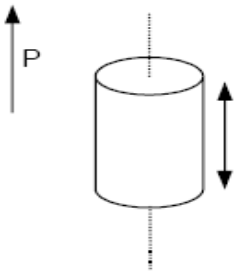
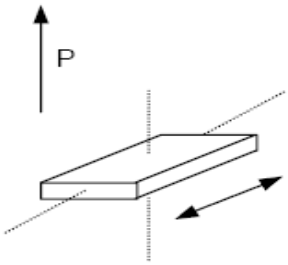
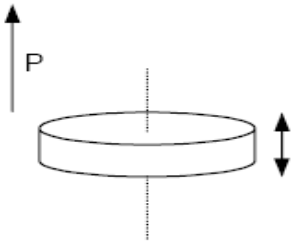
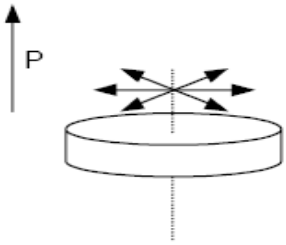
| Longitudinal | Transversal | Epaisseur | Planaire |
|---|---|---|---|
|   |   |   |   |
| $k_{33} = \frac{d_{33}}{\sqrt{s_{33}^{E}\varepsilon_{33}^{T}}}$ | $k_{31} = \frac{d_{31}}{\sqrt{s_{11}^{E}\varepsilon_{33}^{T}}}$ | $k_t = \frac{e_{33}}{\sqrt{c_{33}^{D}\varepsilon_{33}^{s}}}$ | $k_p = k_{31}\sqrt{\frac{2}{1+\frac{s_{12}}{s_{11}}}}$ |

**Tableau I.2 :** Facteurs de couplages pour les différents modes de vibration

- 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.

| ***Applications basées sur l'effet direct*** | ***Applications basées sur l'effet inverse*** | ***Applications basées sur les deux effets*** |
|---|---|---|
| ✓ Microphone<br>✓ Hydrophone<br>✓ Capteur de choc<br>✓ Accéléromètres<br>✓ Bouton poussoir<br>✓ Allumage<br>✓ Capteur de pression<br>✓ ou de contraintes | ✓ Haut-parleur<br>✓ Buzzer<br>✓ Transducteur sonar<br>✓ Nébuliseur<br>✓ Nettoyage par ultrasons<br>✓ Moteurs ultrasonores<br>✓ Relais<br>✓ Micropositionnement<br>✓ Ajustement laser<br>✓ Imprimante à jet d'encre<br>✓ Dispositifs acousto-optiques<br>✓ Pompe piézoélectrique<br>✓ Bistouri piézoélectrique | ✓ Transducteur d'ultrasons<br>✓ diagnostic médical (échographie)<br>✓ Détecteur de proximité ou de présence<br>✓ Mesure de distances ou de débits<br>✓ Gyroscope<br>✓ Filtres fréquentiels (ondes volumiques SAW)<br>✓Lignes à retard<br>✓Transformateur piézoélectrique |

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

Dans les applications sous-marines les « sonar » varient des petits émetteurs pour bateaux aux systèmes professionnels utilisés dans les grandes traversées transatlantiques pour détecter le 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 diagnostiques 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'inclination 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 quatre 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 [16,19].

## I.13. Les équations de la piézoélectricité

La piézoélectricité peut se définir comme un phénomène de couplage entre énergie élastique et énergie électrique (relation entre deux variables : électrique et mécanique) et vice-versa (Tableau I.4).

Pour décrire le couplage entre les deux formes d'énergie dans un matériau piézoélectrique (mécanique et électrique), on néglige l'énergie thermique. Des équations piézoélectriques sont démontrées en reliant toutes les variables.

Trois types de variables interviennent :

• Coefficients purement électriques
• Coefficients purement mécaniques
• Coefficients mixtes traduisant le couplage entre les deux premières catégories.

Soient S et T, respectivement la déformation et la contrainte et soient D et E, respectivement l'induction électrique et le champ électrique. On peut alors dire que pour un matériau piézoélectrique on a : S ou T qui peut être fonction de D ou E.

Le phénomène de couplage peut être décrit de manière adiabatique s'il s'agit d'une vibration rapide ou isotherme pour une transformation statique ou lentement variable. Comme les matériaux piézoélectriques sont anisotropes, leurs propriétés sont représentées par des tenseurs.

Les matériaux étant anisotropes pour la plupart, chaque symbole possède un indice, soit unique comme $D_i$, soit double ($\varepsilon_{ij}$) ou encore triple.

Comme dit précédemment, les grandeurs envisagées étant tensorielles, d'ordre 1 pour le champ et l'indiction électrique ou d'ordre 2 pour le contrainte et la déformation, les facteurs les reliant sont donc aussi tensoriels, d'ordre 3 pour les constantes piézoélectriques ou d'ordre 2 pour la permittivité électrique [22].

| ***Variables indépendantes*** | ***Grandeurs électriques*** | ***Grandeurs mécaniques*** |
|---|---|---|
| E ,T | $D = d\,T + \varepsilon^T E$ | $S = s^E T + d^t E$ |
| D ,T | $E = \beta^T D - gT$ | $S = s^D T + g^t D$ |
| E ,S | $D = e^S E + eS$ | $T = c^E S - e^t E$ |
| D ,S | $E = \beta^S D - hS$ | $T = c^D S - h^t D$ |

**Tableau I.4** : Equations piézoélectriques

t en exposant représente la transposée au sens matriciel.

Le Tableau I.5 précise les grandeurs électriques, mécaniques et piézoélectriques utilisées dans les équations d'états [23].

| *Abréviations* | *Dénominations* | *Types de grandeur* | *Matrice* |
|---|---|---|---|
| **D** | Déplacement électrique ou induction $C/m^2$ | ELECTRIQUE | **(3,1)** |
| **E** | Champ électrique V/m | | **(3,1)** |
| **E** | Permittivité électrique F/m | | **(3,3)** |
| **β** | Constante d'imperméabilité diélectrique m/F | | **(3,3)** |
| **S** | Déformation relative | MECANIQUE | **(6,1)** |
| **T** | Contrainte $N/m^2$ | | **(6,1)** |
| **S** | Compliance ou susceptibilité élastique $m^2/N$ | | **(6,6)** |
| **C** | Raideur ou constante élastique $N/m^2$ | | **(6,6)** |
| **d** | Constante piézoélectrique qui traduit la proportionnalité entre la charge et la contrainte à champ nul ou constant C/N ou m/V | PIEZOELECTRIQUE | **(3,6)** |
| **e** | Constante piézoélectrique qui traduit la proportionnalité entre la charge et la déformation à champ nul ou constant $C/m^2$ ou N/V.m | | **(3,6)** |
| **g** | Constante piézoélectrique qui traduit la proportionnalité entre la contrainte et le champ à induction constante ou nulle V.m/N ou $m^2/C$ | | **(3,6)** |
| **h** | Constante piézoélectrique qui traduit la proportionnalité entre la déformation et le champ résultant à induction constante ou nulle m/V ou N/C | | **(3,6)** |

**Tableau I.5** : Grandeurs électriques, mécaniques et piézoélectriques

## I.14 Constantes 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.13 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 [24].

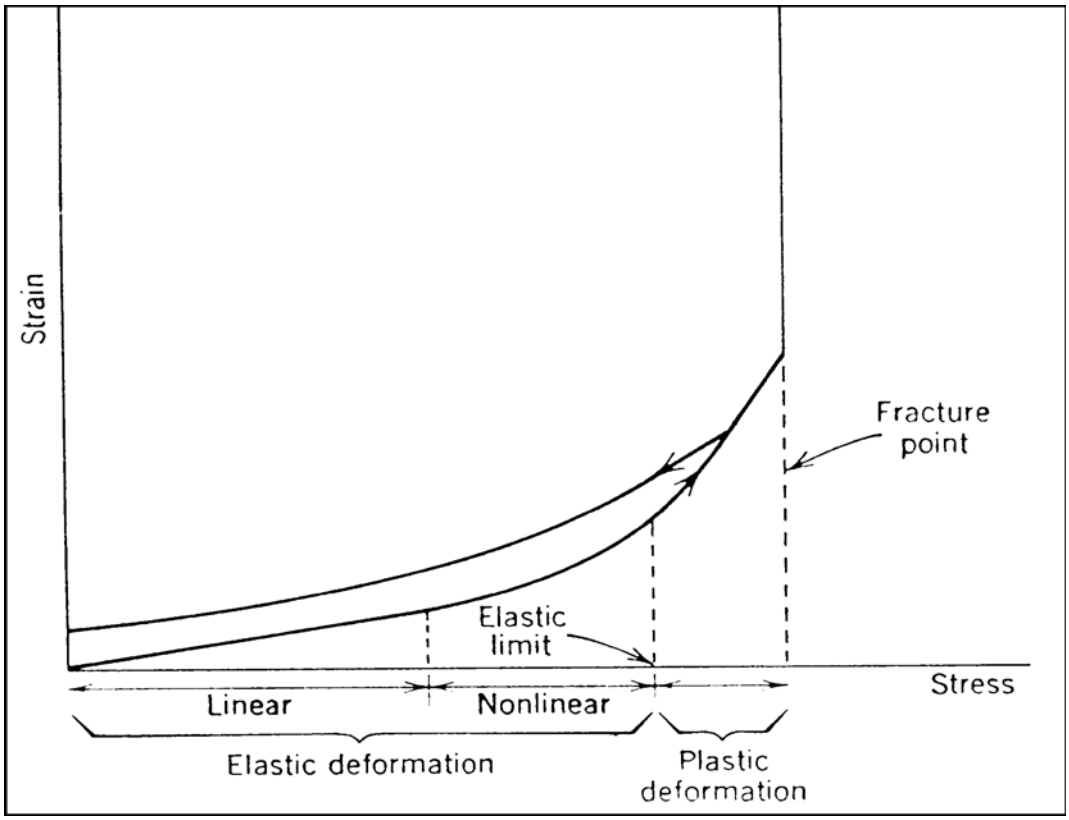



**Fig. I.13** : Relation typique entre contraintes et déformations dans un solide [24].

## I.15 Définition des coefficients piézoélectriques

On compte quatre modules piézoélectriques différents formant un tenseur d'ordre 3 et traduisant le couplage entre les grandeurs électriques et mécaniques :

$$\left.\begin{aligned} d_{mi} &= \varepsilon^{T}_{n\,m} \,.\, g_{ni} = e_{mi} \,.\, s^{E}_{ji} \\ g_{mi} &= \beta^{T}_{n\,m} \,.\, d_{mi} = h_{mj} \,.\, s^{D}_{ji} \\ e_{mi} &= \varepsilon^{S}_{n\,m} \,.\, h_{ni} = d_{mj} \,.\, c^{E}_{ji} \\ h_{mi} &= \beta^{T}_{n\,m} \,.\, e_{ni} = g_{mj} \,.\, s^{D}_{ji} \end{aligned}\right\} \quad m, n = 1 \text{ à } 3 \text{ et } i, j = 1 \text{ à } 6$$

Les notations tensorielles sont représentées dans la figure I.14 [19].

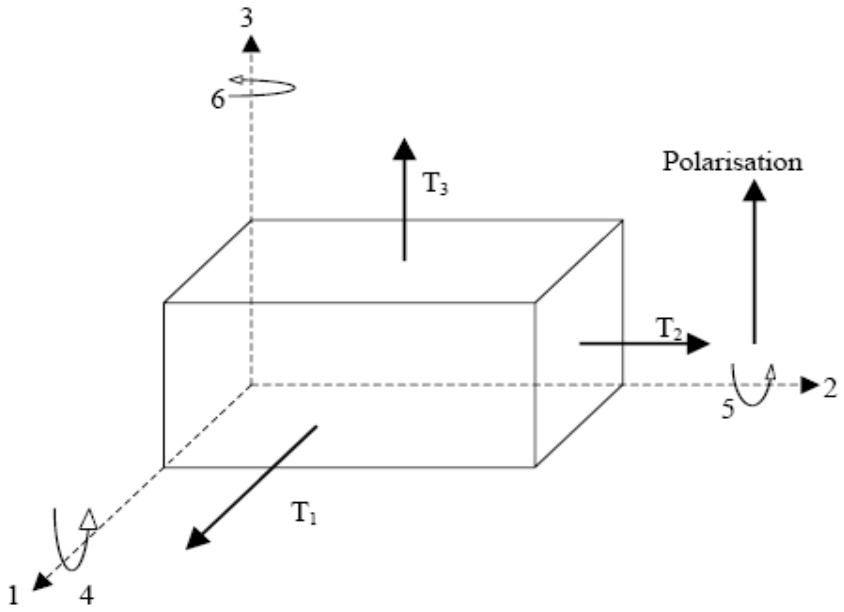



**Fig. I.14** : Notations tensorielles

- ***Constante de charge « d » :*** traduit la liaison entre la contrainte et l'induction électrique à champ nul ou constant (en C/N ou m/V).

- ***Constante de tension « g »* :** indique la relation entre la contrainte mécanique et le champ électrique à induction nul ou constante (en Vm/N ou $m^2/C$)

- ***Constante piézoélectrique « e »* :** indique la relation entre la déformation et l'induction électrique à champ nulle ou constant (en $C/m^2$ ou N /Vm).

- ***Constante piézoélectrique « h »* :** traduit la proportionnalité entre la déformation et le champ électrique à induction nulle ou constante (en V/m ou N/C).

## 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 contrôle 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 [25].

## 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 est facilement réalisable avec des caractéristiques stupéfiantes, a eu comme conséquence la renaissance de la recherche et du développement des dispositifs piézoélectriques jusqu'à nos jours.

Le prochain chapitre fera l'objet de concept général de la modélisation des micro-ondes acoustiques afin de bien comprendre le phénomène des ondes de fuite et de volume.

*Chapitre II*

# Détection des ondes de fuite

**Chapitre II:**

# *Détection des ondes de fuite*

## II.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous donnerons le concept général de la modélisation des micro-ondes acoustiques, cela permettra de bien comprendre le phénomène des ondes de fuite, de volume et des *SSBW (Surface Skimming Bulk waves « Ondes de volume rempantes sous la surface »)*.

Certains matériaux, lorsqu'ils sont déformés, deviennent polarisés électriquement. Cet effet est connu sous le nom de piézoélectricité, et réciproquement lorsqu'ils sont excités par un courant électrique ils se déforment.

Alors le déplacement de la particule matérielle est décrit par le vecteur $\vec{U}(L,t)$ appelé champ élastique tel que :

$$\vec{U}(L,\ t) = \vec{l}(L,\ t) - \vec{L} \qquad \textbf{(1)}$$

Avec : l(L, t) :est le vecteur de position de la particule après déformation

L :est le vecteur de position de la particule avant déformation

Ainsi U est une variable continue qui décrit les mouvements vibrationnels de toutes les particules [26].

On définit dans ce cas, la déformation matérielle qui représente le gradient de déplacement de particule :

$$S = \frac{1}{2}.(\nabla U + \nabla U^T) \qquad \textbf{(2)}$$

$\nabla$ : Opérateur gradient.

Dans le cas d'un milieu anisotrope, la déformation S est un tenseur de rang 2.

En examinant un matériau piézoélectrique, sous l'effet d'une excitation électrique, il y aura un déplacement élastique (dû aux mouvements des particules matérielles).

Si la distance entre deux particules voisines est modifie, cela engendrera une déformation et par conséquent il apparaît des forces de traction appelées contraintes apparentes notées T (tenseur de rang 2).

Hook a montré de façon expérimentale que la contrainte T est liée à la déformation S par la relation suivante [26] :

$$T = C.\ S \qquad \textbf{(3)}$$

Où C : représente la constante élastique ($N / m^2$) (tenseur de rang 4).

## II.2 Relations fondamentales

Pour tenir compte des forces d'origine électriques, on doit définir une polarisation électrique du milieu liée aux déformations. On a en première approximation une relation linéaire :

$$P = e.\ S \qquad \textbf{(4)}$$

Où P est la contribution au vecteur polarisation d'origine piézoélectrique et S représente le tenseur déformation. La grandeur e ($c / m^2$) traduit la piézoélectricité appelée tenseur piézoélectrique de rang 3.

En fait, on préfère généralement utiliser comme variable, l'induction électrique D et le champ électrique E, de sorte qu'on aura :

$$D = \varepsilon.\ E + e^T .S \qquad \textbf{(5)}$$

Où $\varepsilon$ est la permittivité du milieu (F/m).

Le champ E est supposé dériver d'un potentiel (dans l'approximation quasi-statique).

$$E = -\ \text{gradient}.\Phi \qquad \textbf{(6)}$$

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 :

$$T = C.\ S - e\ .E \qquad \textbf{(7)}$$

Et c'est le même tenseur ″e″ de piézoélectricité qui intervient dans les deux lignes (5) et (7) [27].

## II.3 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 est 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.1) [27].

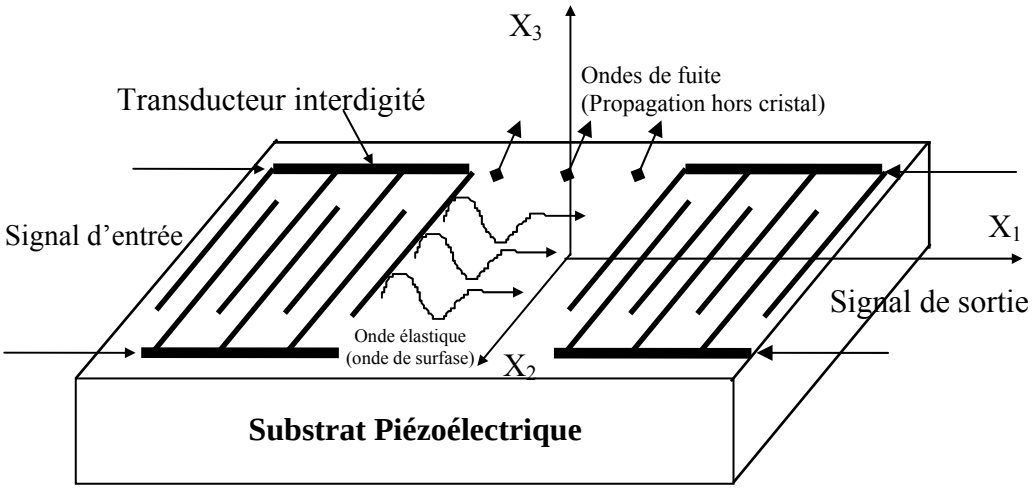



**Fig. II.1** : Excitation du matériau piézoélectrique (de Coupe $X_3$-$X_1$) par un transducteur interdigité

## II.4 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 :

$$S_{ij} = \frac{1}{2}\left[\frac{\partial U_i}{\partial X_j} + \frac{\partial U_j}{\partial X_i}\right] \qquad \textbf{(8)}$$

- 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 :

$$E_i = - \frac{\partial U_4}{\partial X_i} \quad \textbf{(9)}$$

Où $U_4$ est le potentiel électrique.

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

$$T_{ij} = C_{ijkl} . S_{kl} - e_{kij} . E_k \quad \textbf{(10)}$$

$$D_i = e_{jkl} . S_{kl} + \varepsilon_{ik} . E_k \quad \textbf{(11)}$$

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 :

$$\operatorname{div} \vec{D} = \frac{\partial D_i}{\partial X_i} = 0 \quad \textbf{(12)}$$

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

$$\nabla T = \rho . \frac{\partial U^2}{\partial t^2} \quad \textbf{(13)}$$

Par substitution des équations (8) et (9) dans l'équation (10) et (11), nous obtenons :

$$T_{ij} = C_{ijkl} . \frac{1}{2}\left[\frac{\partial U_j}{\partial X_k} + \frac{\partial U_k}{\partial X_j}\right] + e_{kij} . \frac{\partial U_4}{\partial X_k} \quad \textbf{(14)}$$

$$D_{ij} = e_{ikl} . \frac{1}{2}\left[\frac{\partial U_j}{\partial X_k} + \frac{\partial U_k}{\partial X_j}\right] + \varepsilon_{ik} . \frac{\partial U_4}{\partial X_k} \quad \textbf{(15)}$$

En substituant les équations (14) et (15) dans les équations (12) et (13), nous aurons les équations phénoménologiques tensorielles piézoélectriques [27] :

$$C_{ijkl} \frac{\partial^2 U_k}{\partial . X_i \partial . X_l} + e_{lij} \frac{\partial^2 U_4}{\partial . X_k \partial . X_i} = \rho \frac{\partial^2 U_j}{\partial . t^2} \quad \textbf{(16)}$$

$$e_{ikl} \frac{\partial^2 U_k}{\partial . X_i \partial . X_l} - \varepsilon_{ik} \frac{\partial^2 U_4}{\partial . X_k \partial . X_i} = 0 \quad \textbf{(17)}$$

## II.5 forme générale de la solution

Les équations (16) et (17) 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 :

$$U_i = u_i \exp(j\beta.\alpha_i X_3).\exp - j(\omega.t - \beta(1 + j\gamma).X_1) \quad i=1,2,3,4 \qquad \textbf{(18)}$$

Où $u_i$ (i =1,2,3) sont les amplitudes de déplacement, $u_i$ (i = 4) représente l'amplitude du potentiel électrique, $\beta$ est la constante de propagation, $\alpha_i$ sont les coefficients d'atténuation de l'onde à l'intérieur du cristal piézoélectrique (axe des $X_3$ (Figure 1)), $\gamma$ 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 1).

En substituant l'équation (18) dans l'équation (16) et (17), nous obtenons quatre équations homogènes simultanées en $u_i$ (i=1,2,3,4) :

$$[A].[U] = [0] \qquad \textbf{(19)}$$

Où [A] est une matrice symétrique 4x4.

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

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

$$Det\ (A) = \sum_{i=0}^{8} B_i.\alpha^i = 0 \qquad \textbf{(20)}$$

Ce polynôme est appelé équation de dispersion ou équation séculaire.

La solution de l'équation (12) donne pour chaque β ( $\beta = \frac{2\pi f}{V_S}$ : constante de propagation) huit racines. Ces racines sont en fonction de Vs (vitesse acoustique) et $\gamma$ (constante d'atténuation longitudinale).

Chaque racine engendre trois composantes de 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] :

$$U_i = \sum_{n=1}^{8} C_n . D_i^n . \exp\left\{ j\beta . \alpha^n . X_3 + j\beta . X_1 (1 + j\gamma) - j.\omega.t \right\} \quad i = 1,4 \qquad \textbf{(21)}$$

Où $D_i^n$ sont les composantes du vecteur propre du système (19) associées à la valeur propre $\alpha^n$.

$C_n$ : constante à déterminer par les conditions aux limites.

## II.6. Comportement des racines de l'équation séculaire

Le comportement des racines dépend de la vitesse acoustique Vs. La solution pour $\alpha$ de l'équation (20) 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 :

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

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

Cela correspond à l'onde partielle :

$$U_i^{(1)} \approx \exp\left[ j.\beta.\alpha_{re}^{(1)}.X_3 - \beta.\alpha_{im}^{(1)}.X_3 \right] . \exp\left( j\beta.X_1 \right) \qquad \textbf{(22)}$$

$$U_i^{(2)} \approx \exp\left[ j.\beta.\alpha_{re}^{(2)}.X_3 + \beta.\alpha_{im}^{(2)}.X_3 \right] . \exp\left( j\beta.X_1 \right) \qquad \textbf{(23)}$$

Après développement on aura :

$$U_i^{(1)} \approx \exp\left[ -\beta.\alpha_{im}^{(1)}.X_3 \right] . \exp j.\beta\left[ \alpha_{re}^{(1)}.X_3 + X_1 \right] \qquad \textbf{(24)}$$

$$U_i^{(2)} \approx \exp\left[ +\beta.\alpha_{im}^{(2)}.X_3 \right] . \exp j.\beta\left[ \alpha_{re}^{(2)}.X_3 + X_1 \right] \qquad \textbf{(25)}$$

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 -∞ (espace piézoélectrique) alors $U_i^{(1)}$ tend vers +∞ (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 -∞.

Donc seules les racines à partie imaginaire négative sont acceptables. Ce mode correspond au mode de surface ou mode de Rayleigh [18].

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

$$U_i^{(1)} \approx \exp\ j.\beta\left[\alpha_{re}^{(1)}.X_3 + X_1\right] \quad \textbf{(26)}$$

$$U_i^{(2)} \approx \exp\ j.\beta\left[\alpha_{re}^{(2)}.X_3 + X_1\right] \quad \textbf{(27)}$$

Si $\alpha_{re}^{(1)} \rangle 0$, on aura les ondes de fuite (rayonnements électromagnétiques hors du cristal (figure II.3).

Si $\alpha_{re}^{(1)} < 0$, on obtiendra les ondes de volume (figure II.4) et si $|\alpha_{re}^{(1)}|$ est très petite, on aura les ondes SSBW (figure II.5). Ce ci est valable pour tout $\alpha_{re}^{(i)}$ (i = 1..8) tant que $\alpha_{im}^{(i)} = 0$.

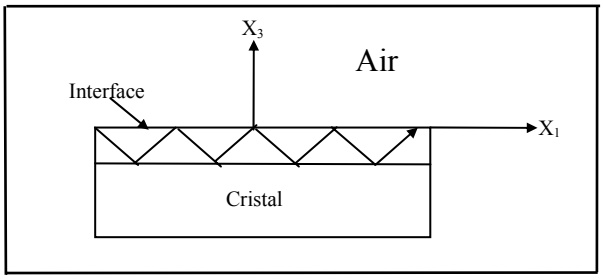



**Fig. II.2** : Ondes de surface

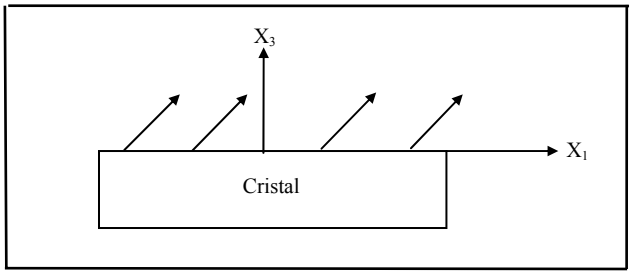



**Fig. II.3** : Ondes de fuite

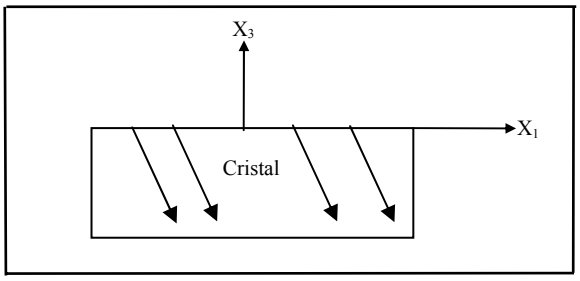



**Fig. II.4** : Ondes de volume

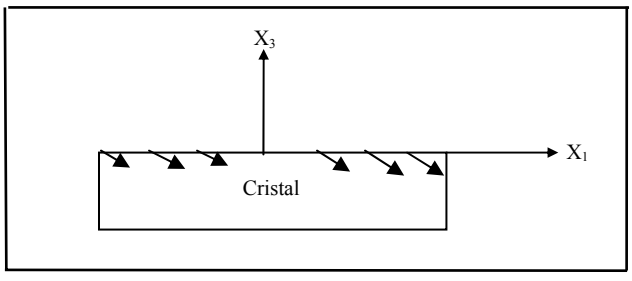



**Fig. II.5** : Ondes SSBW

## II.7 Application sur le $LiNbO_3$ (Niobate de Lithium) coupe Y-X ($Y=X_3$ ET $X=X_1$)

### *1. Description du matériau $LiNbO_3$*

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 filtres acoustiques de surfaces (radiocommunications).

Le Niobate de Lithium ($LiNbO_3$) 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. Il 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].

### *2. Principales applications du $LiNbO_3$*

Le Niobate de Lithium est un matériau utilisé dans une large gamme d'applications telles que [28]:

- 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 $\alpha_3$ et $\alpha_4$ en fonction de la vitesse acoustique Vs (Figure .II.6,II.7, II.8 et II.9).

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).

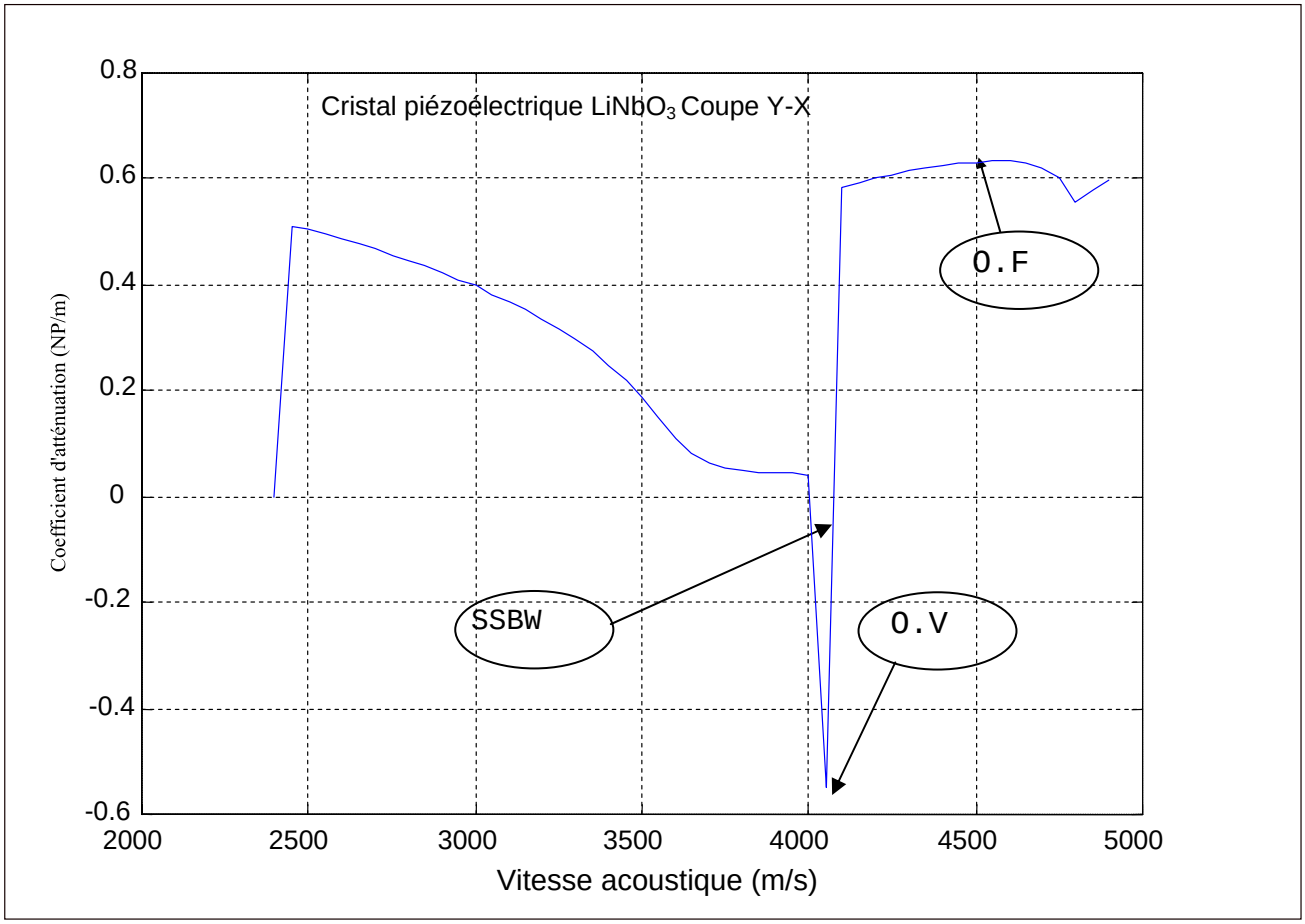



**Fig. II.6** : Partie réelle de $\alpha_4$

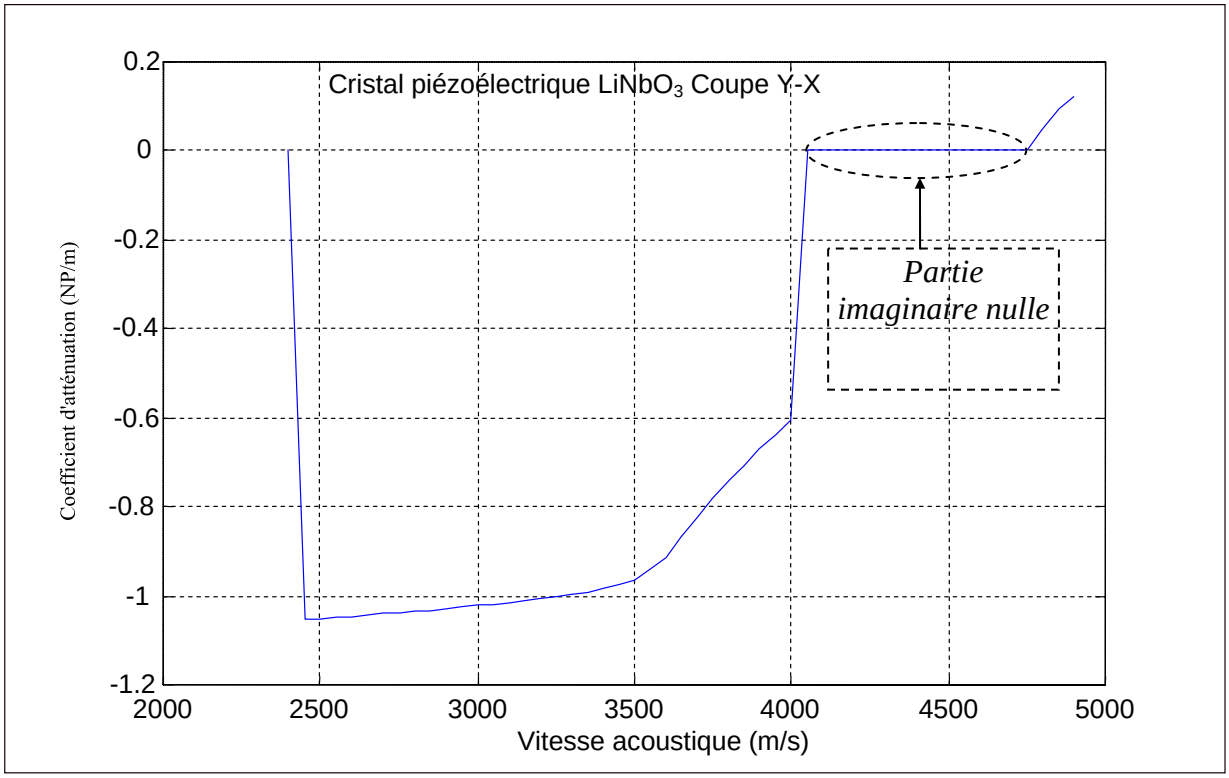



**Fig. II.7**: Partie imaginaire de $\alpha_3$

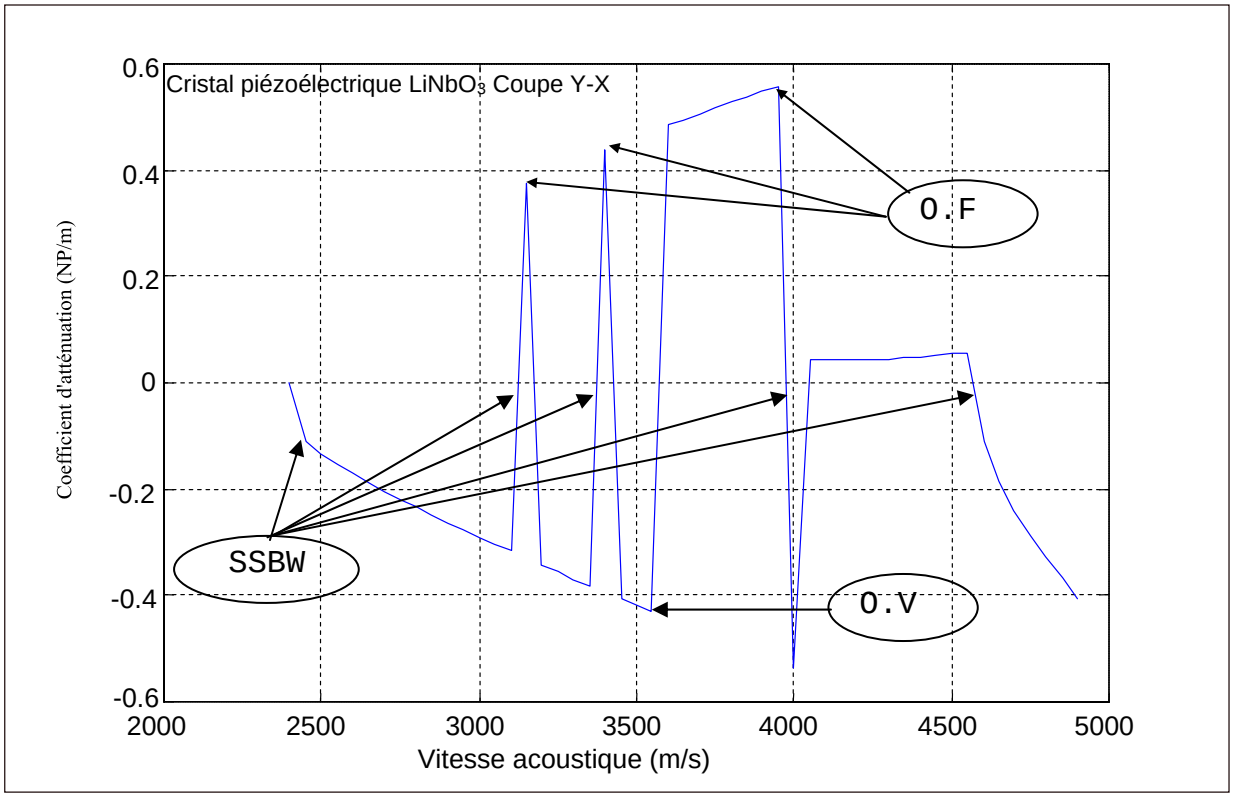



**Fig. II.8** : Partie réelle de $\alpha_4$

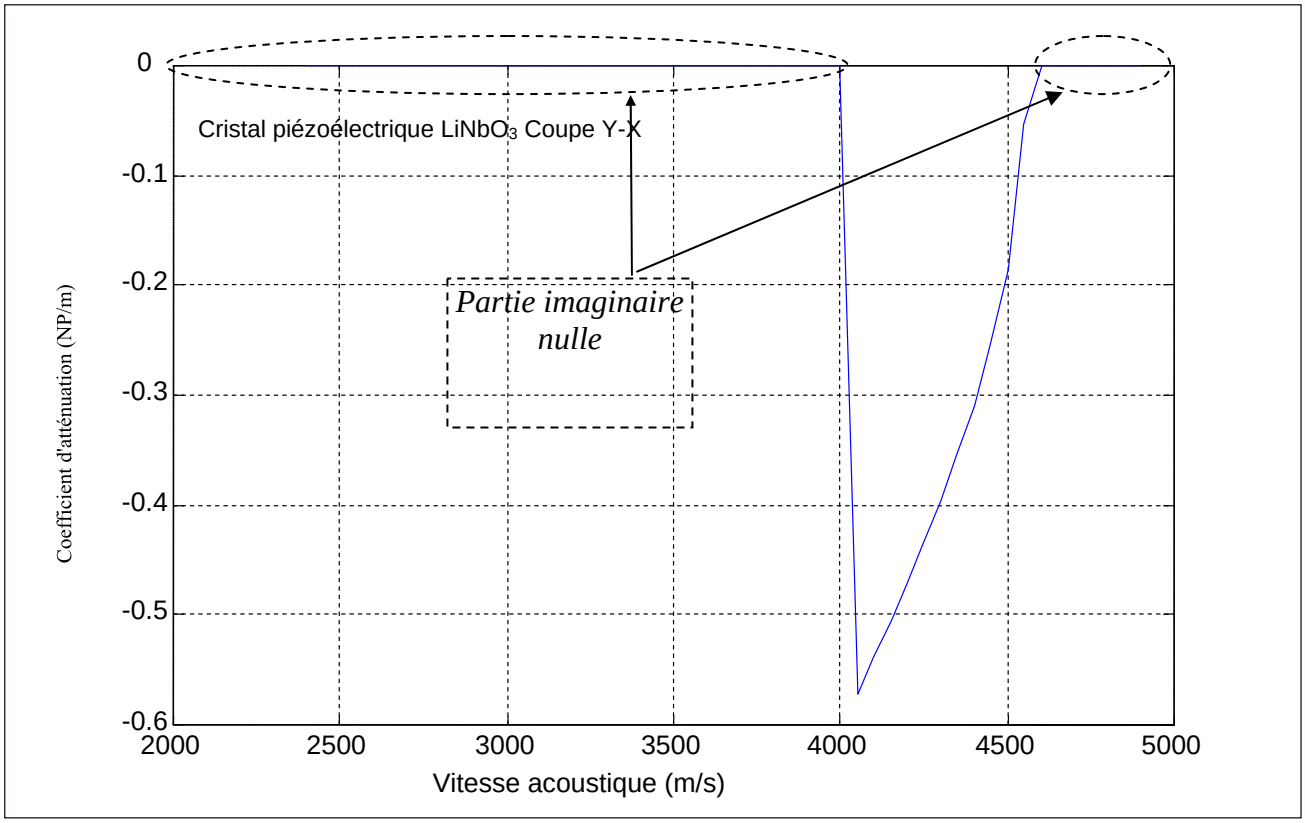



**Fig. II.9**: Partie imaginaire de $\alpha_4$

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.

Au niveau des coefficients d'atténuation $\alpha_1$ et $\alpha_2$, il n'y a pas d'ondes de fuite comme le montre les figures (II.10, II.11, II.12, II.13).

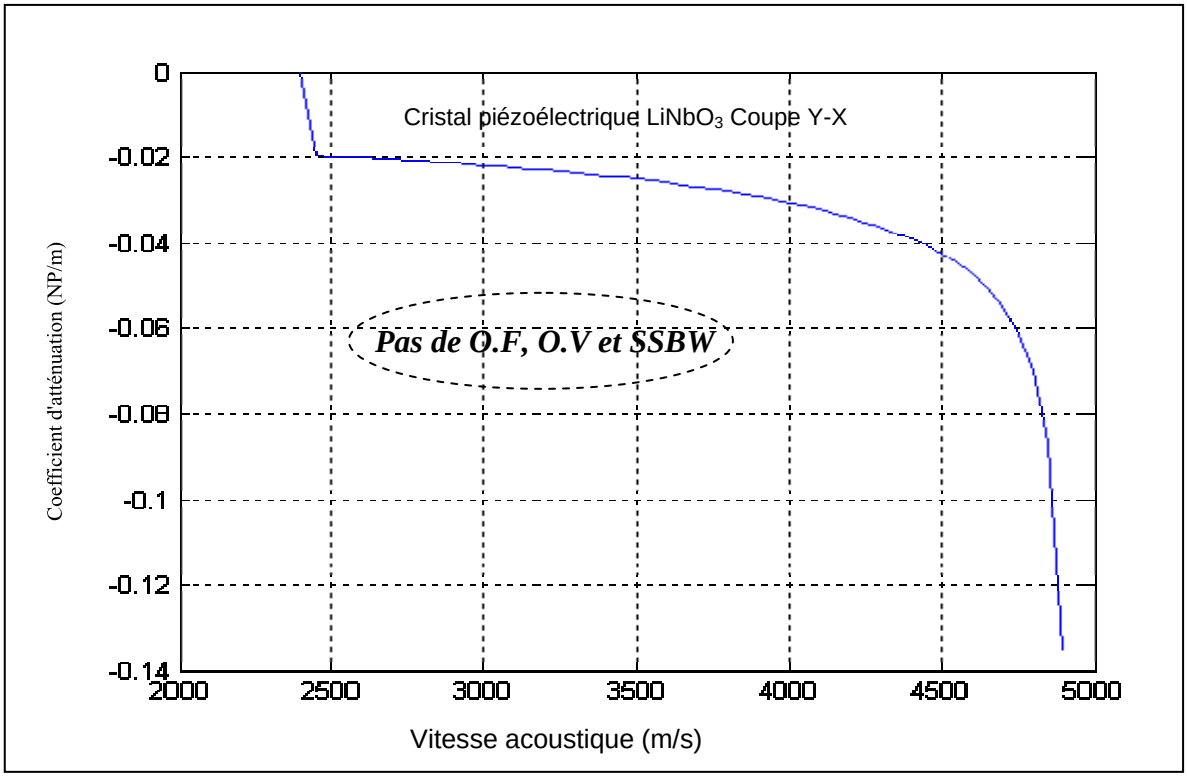



**Fig. II.10**: Partie réelle de $\alpha_1$

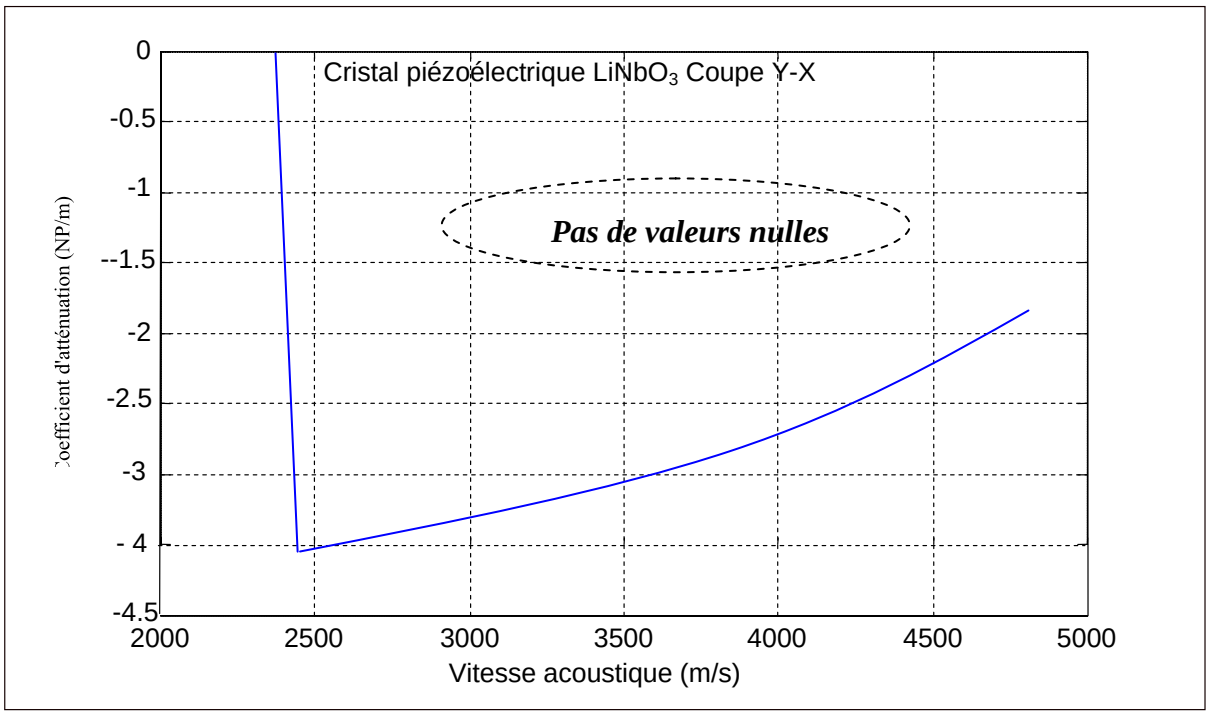



**Fig. II.11**: Partie imaginaire de $\alpha_1$

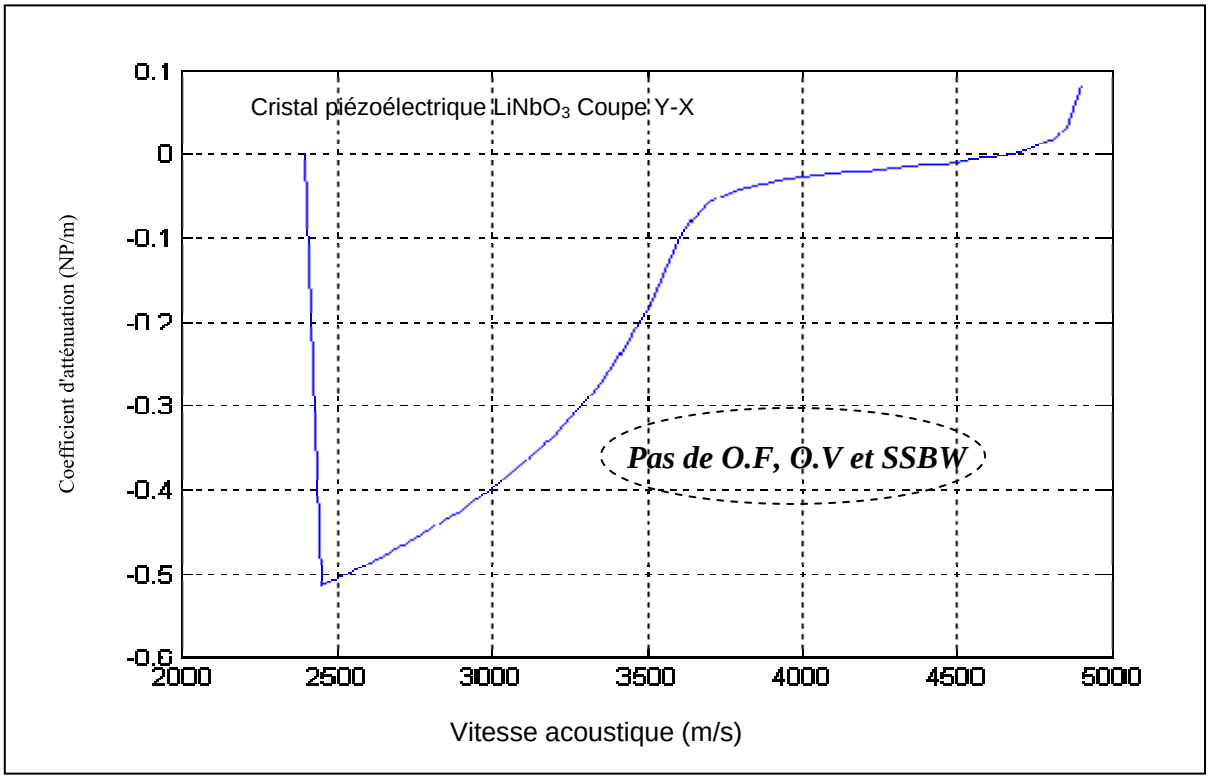



**Fig. II.12**: Partie réelle de $\alpha_2$

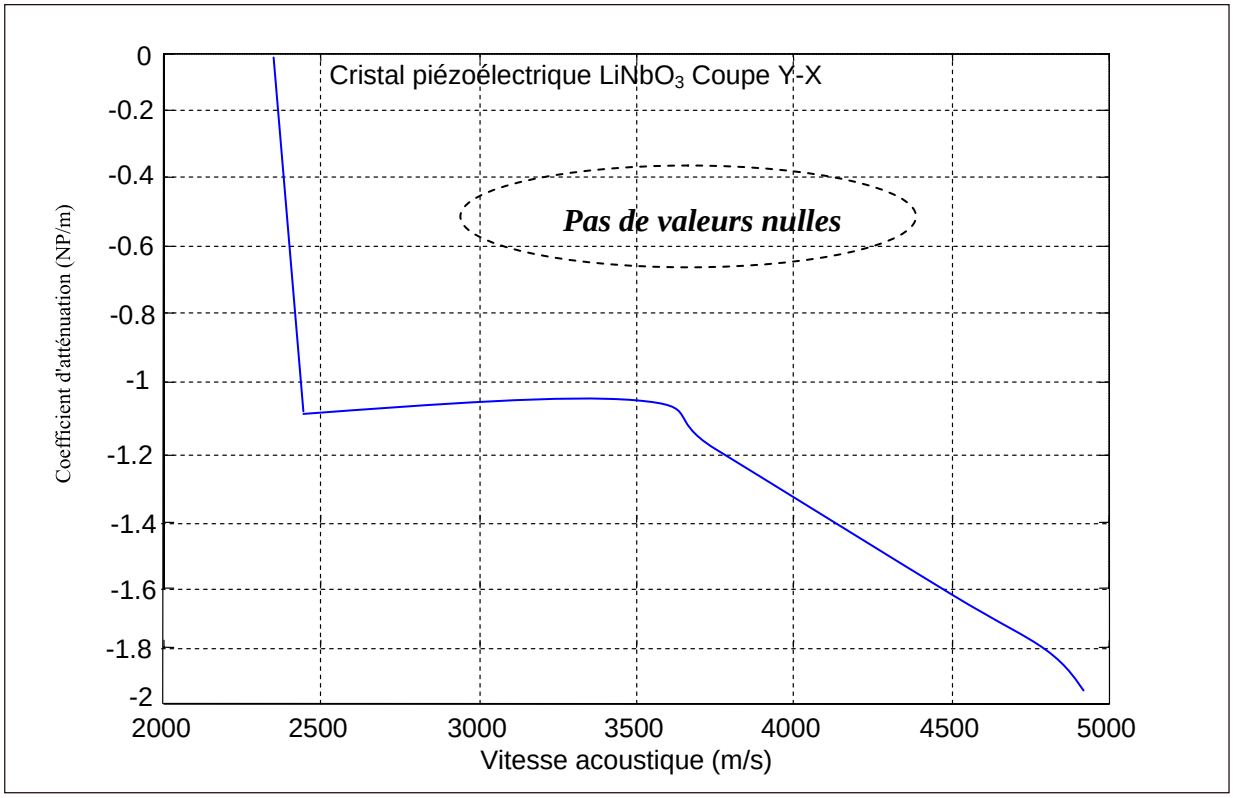



**Fig. II.13**: Partie imaginaire de $\alpha_2$

## II.8 Application sur le $LiTaO_3$ (Tantalate de Lithium) coupe Y-X

Le Tantalate de Lithium, est un matériau piézoélectrique utilisé 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 [28].

Dans cet exemple, on montre les variations des parties réelles et imaginaires des coefficients d'atténuation $\alpha_3$ et $\alpha_4$ en fonction de la vitesse acoustique Vs (Figures.II.14, II.15, II.16, II.17).

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).

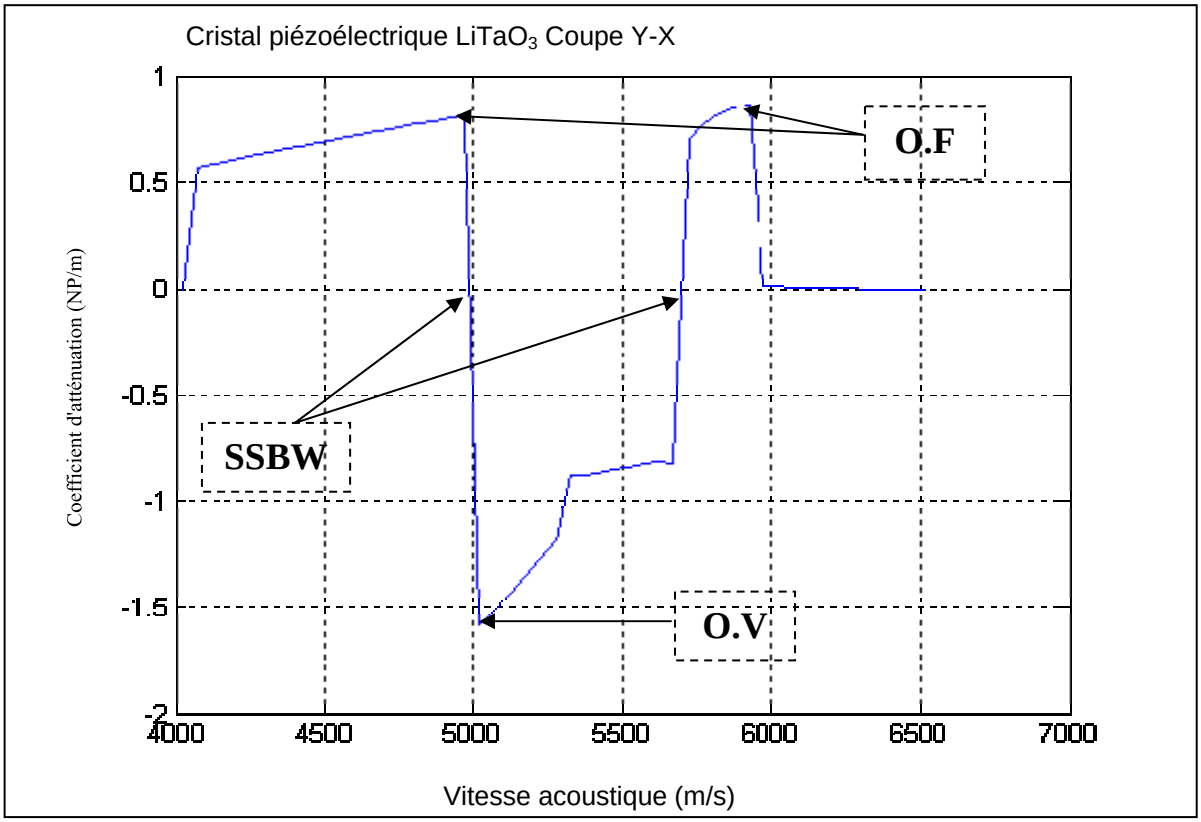



**Fig. II.14**: Partie réelle de $\alpha_3$

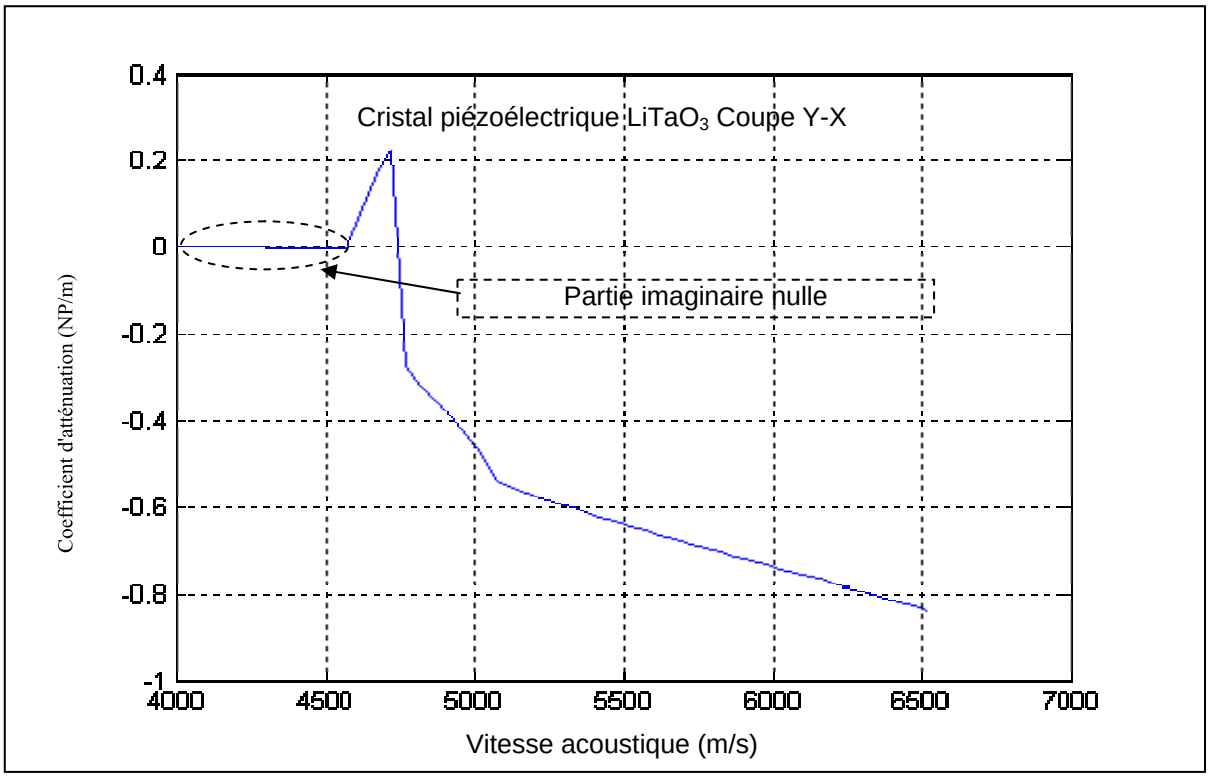



**Fig. II.15**: Partie imaginaire de $\alpha_3$

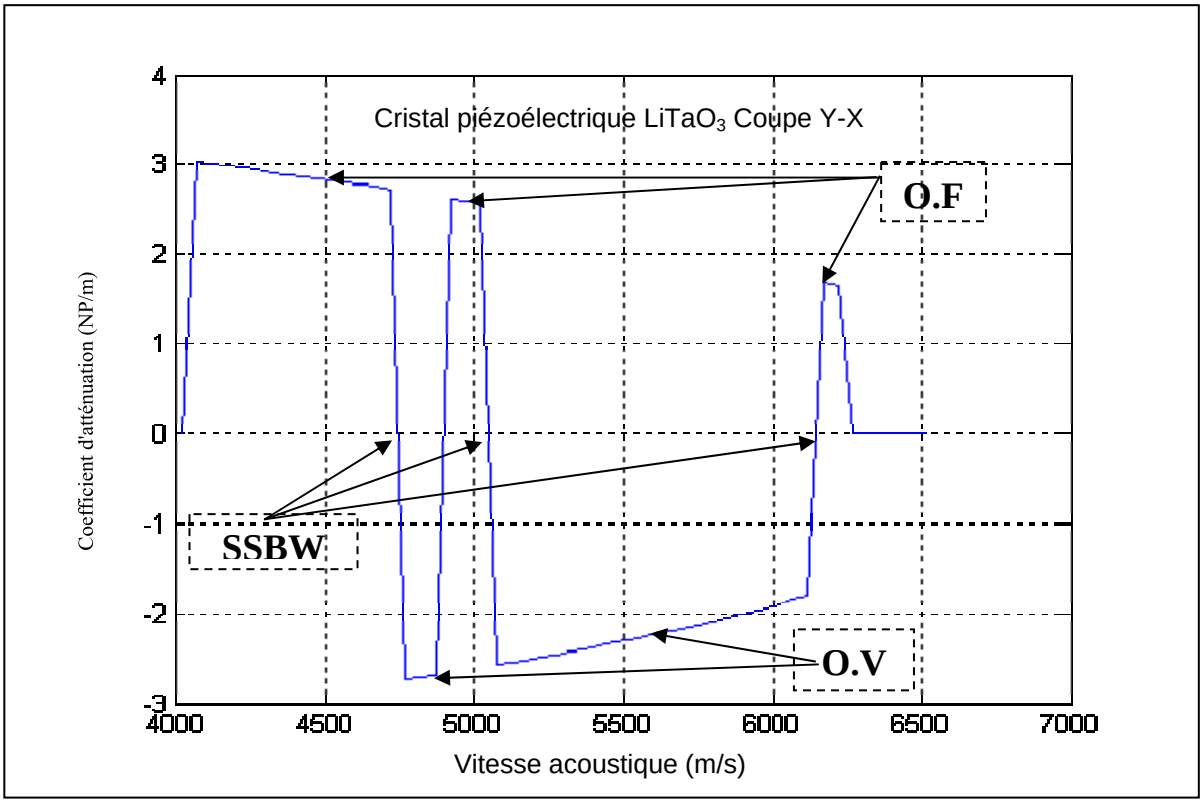



**Fig. II.16**: Partie réelle de $\alpha_4$

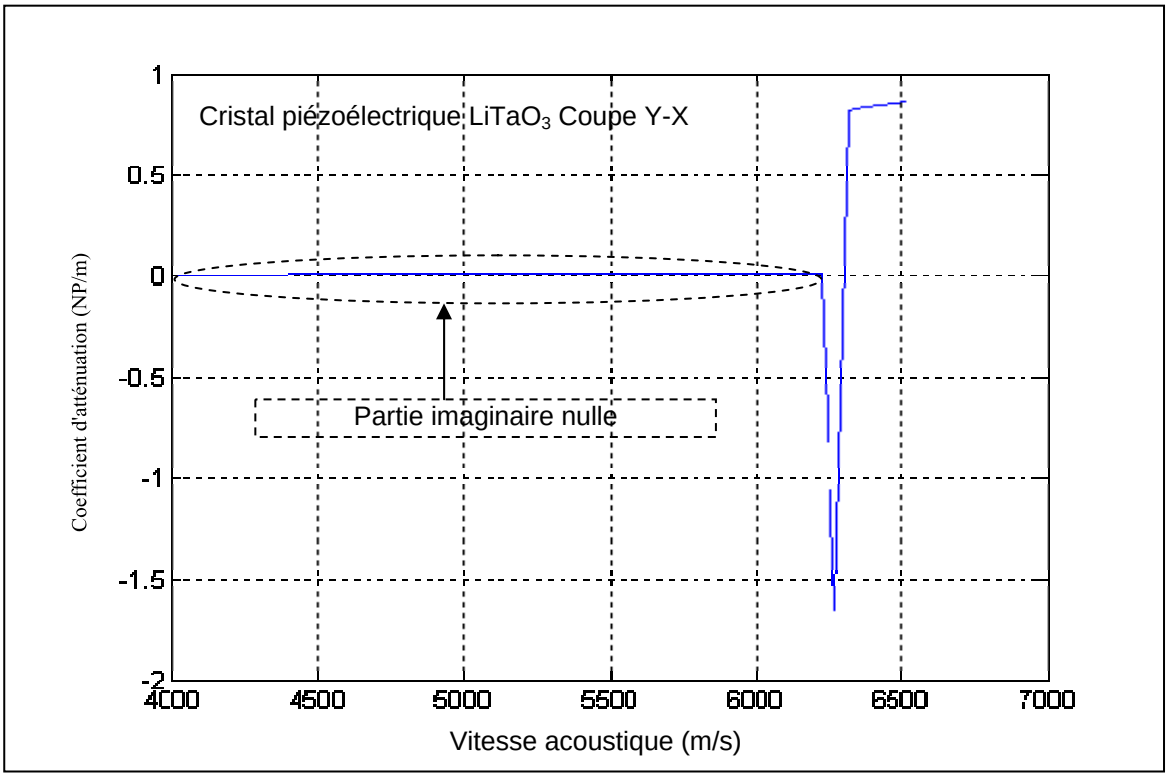



**Fig. II.17**: Partie imaginaire de $\alpha_4$

## 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 $\alpha_3$ que les ondes de fuite (parties réelles positives) dans le Tantalate de Lithium est un peu plus que le Niobate de Lithium, a l'inverse pour la partie réelle de $\alpha_4$ les ondes de fuite pour le Niobiate 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 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons expliqué brièvement le phénomène de détection des ondes de fuite 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 de fuites se basant 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. L'objectif de cette détection est la modélisation d'une microantenne piézoélectrique à ondes de fuite, qui fera l'objet du prochain chapitre.

*Chapitre III*

# Modélisation d'une antenne piézoélectrique à ondes de fuite

# Chapitre III :

# *Modélisation d'une antenne piézoélectrique à ondes de fuite*

## III.1 Problématique

Nous savons que 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 est au niveau cosmique.

Tout cela peut être évité si on utilise les dispositifs piézoélectriques (a 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 projet, nous avons étudié et modélisé une structure rayonnante à ouverture rayonnante d'une micro-antenne piézoélectrique à ondes de fuite.

## III.2 Rayonnement d'une structure piézoélectrique

Nous considérons la surface du piézoélectrique comprise entre deux électrodes du transducteur comme une surface rayonnante, jouant le rôle d'une source, à partir de laquelle il y a un rayonnement électromagnétique, dûe aux ondes de fuite comme le montre dans la figure III.1.

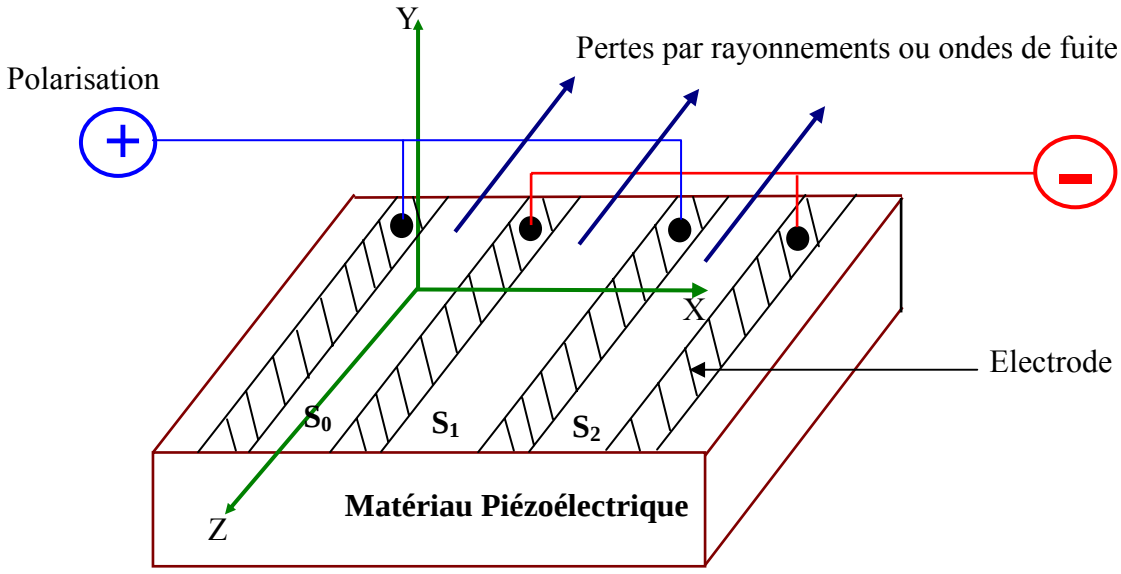



**Fig. III.1** : Matériau piézoélectrique associé aux électrodes

Pour cela, nous supposons que cette surface est analogue à une ouverture rayonnante $S_0$ (les antennes fonctionnant dans les bandes décimétriques et centimétriques sont constituées de géométries diverses).

## III.3 Cas d'une seule surface

Dans la figure III.2, nous donnerons le schéma explicatif d'une seule surface comprise entre deux électrodes d'un matériau piézoélectrique.

Nous allons étudier le champ à grande distance d'une ouverture rectangulaire de hauteur L et de largeur d (l-a) placée dans le plan XOZ.

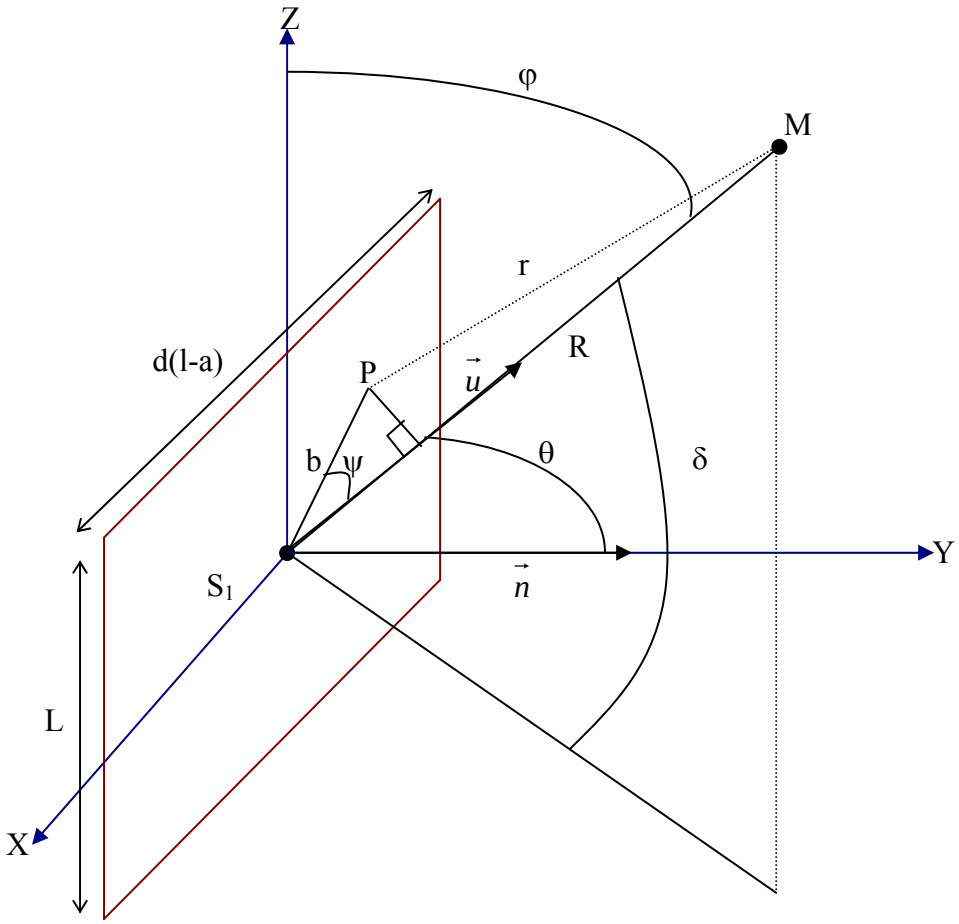



**Fig. III.2** : Surface comprise entre deux électrodes

Le calcul du rayonnement dans une ouverture consiste à exprimer les champs électriques et magnétiques, en n'importe quel point **M** de l'espace, créés par la distribution du champ électrique dans l'ouverture.

Le problème du rayonnement par les ouvertures est un sujet fondamental étudié depuis le XVIII$^{ème}$ siècle d'abord par FRESNEL puis par KIRCHOFF dans le domaine de l'optique.

En électromagnétisme le problème est très voisin de celui de la diffraction de la lumière à travers une ouverture; la différence fondamentale provient de la nature vectorielle du rayonnement électromagnétique comparée au caractère scalaire de la diffraction de la lumière en optique physique.

C'est *KOTTLER* qui donna le premier une solution à ce problème sous la forme de deux équations intégrales portant son nom.

Celles-ci expriment les champs électriques et magnétiques dans l'espace en fonction des champs dans l'ouverture [29].

Soit E(M) le champ électrique en un point M situé à une très grande distance R de l'origine $\overrightarrow{OP}$ fasse avec la normale $\vec{n}$ à la surface un angle θ.

Appliquons la formule de Goudet (cas particulier de la formule de Kottler) pour la zone de Fraunhofer (champ lointain) à cette configuration :

$$\overrightarrow{E}(M)=j.\frac{e^{-j\beta.R}}{2.\lambda.R}\iint_S \vec{u}.(\overrightarrow{E}\wedge\vec{n}).e^{j\beta.b\cos\Psi}\,dS + j.\frac{e^{-j\beta R}}{2.\lambda.R}\iint_S \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}\,(\overrightarrow{H}\wedge\vec{n}).e^{j\beta.b\cos\Psi}\,dS \quad \textbf{(1)}$$

Ou :

$$\overrightarrow{E}(M)=j.\frac{e^{-j\beta.R}}{2.\lambda.R}\iint_S \left[\vec{u}\wedge(\overrightarrow{E}\wedge\vec{n}).+\sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}\,(\overrightarrow{H}\wedge\vec{n})\right].e^{j.\beta.b\cos\psi}\,dS. \quad \textbf{(2)}$$

Où :

λ : est la longueur d'onde.

μ : est la perméabilité magnétique.

ε : est la permittivité diélectrique.

S : est la surface de $S_0$.

β : Constante de propagation.

E : Le champ électrique.

H : Le champ magnétique.

Connaissant les composantes des divers vecteurs,

$$\overrightarrow{E}\begin{cases}0\\-E\\0\end{cases}\qquad\overrightarrow{H}\begin{cases}H\\0\\0\end{cases}$$

$$\vec{n}\begin{cases}0\\0\\1\end{cases}\qquad \vec{u}\begin{cases}\sin\delta,\\ \cos\delta.\sin\gamma\\ \cos\delta.\cos\gamma\end{cases}$$

On calcule les composantes des deux expressions vectorielles placées sous le signe somme :

$$\vec{u}\wedge(\overrightarrow{E}\wedge\vec{n})=\begin{cases}0\\ -\,E\cos\delta.\cos\gamma\\ +\,E\cos\delta.\sin\gamma\end{cases}$$

$$\sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}\,(\overrightarrow{H}\wedge\vec{n})=\begin{cases}E\sin\delta\cos\delta.\sin\gamma\\ [(\cos\delta.\sin\gamma)^2-1]\,.E\\ E\cos\delta.\sin\gamma.\cos\delta.\cos\gamma\end{cases}$$

On aura alors :

$$|\vec{u}\wedge(\vec{E}\wedge\vec{n})+\sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}\,(\overrightarrow{H}\wedge\vec{n})\;|=E\left[\sin^2\delta.(\cos\delta.\sin\gamma)^2+[(\cos\delta.\sin\gamma)^2-(\cos\delta.\cos\gamma+1)]^2+(\cos\delta.\sin\gamma)^2\,(\cos\delta.\cos\gamma+1)^2\right]\textbf{(3)}$$

Expression qui se simplifie finalement en:

$$|\vec{u}\wedge(\vec{E}\wedge\vec{n})+\sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}\,(\overrightarrow{H}\wedge\vec{n})\;|=E\,(1+\cos\delta.\cos\gamma)\qquad\textbf{(4)}$$

On peut également montrer que l'expression de b cosψ s'exprime par :

$$b\cos\psi = x\sin\delta + y\sin\gamma\cos\delta.$$

Le champ rayonné dans la direction $\vec{u}$ est alors donné par :

$$\overrightarrow{E}(M)=j.\frac{e^{-j\beta.R}}{2.\lambda.R}\iint_S E_0\,(1+\cos\delta\cos\gamma)\,e^{j\beta(x.\sin\delta+y.\sin\gamma\cos\delta)}\,dxdy\,.\qquad\textbf{(5)}$$

$$\overrightarrow{E}(M) = j.\frac{e^{-j\beta.R}}{2.\lambda.R}\ E_0\ (1+\cos\delta\cos\gamma)\ \iint_S e^{j\beta(x.\sin\delta + y.\sin\gamma\cos\delta)}\ dxdy \quad \textbf{(6)}$$

$$\overrightarrow{E}(M) = j.\frac{e^{-j\beta.R}}{2.\lambda.R}\ E_0\ (1+\cos\delta\cos\gamma)\ \iint_S e^{j\beta(x.\sin\delta + y.\sin\gamma\cos\delta)}\ dxdy \quad \textbf{(7)}$$

$$\overrightarrow{E}(M) = j.\frac{e^{-j\beta.R}}{2.\lambda.R}\ E_0\ (1+\cos\delta\cos\gamma)\ \int_S e^{j.\beta.x.\sin\delta}\ dx\ .\int_S e^{j.\beta.y\sin\gamma\cos\delta} dy \quad \textbf{(8)}$$

Après l'intégration de l'équation ci-dessus, le champ rayonnant au point M aura comme expression :

$$E(M) = f(\delta,\gamma).\ \frac{\sin\left[\beta.L/2.(\sin\delta - 1)\right]}{\left[\beta.L/2.(\sin\delta - 1)\right]}\ x\ \frac{\sin\left[\beta.d/2.(l-a).(\sin\gamma.\cos\delta)\right]}{\left[\beta.d/2.(l-a).(\sin\gamma.\cos\delta)\right]} \quad \textbf{(9)}$$

Où :

$$f(\delta,\gamma) = j.\frac{e^{-j\beta.R}}{2.\lambda.R}\ E_0.S\ (1+\cos\delta\cos\gamma) \quad \textbf{(10)}$$

δ : est l'angle formé entre la projection de R sur le plan XOY et l'axe des Y (fig.III. 2).

γ : est l'angle formé entre R est la projection de R sur le plan XOY (figure.III. 2).

Avec : $d = \frac{\lambda}{2}$ , $L = 2.\lambda$ , $a = \frac{1}{2}$ et $\frac{\beta.d}{2(l-a)} = \pi$

## III.4 Cas de plusieurs surfaces

Il s'agit d'une association des ouvertures en série figure III.3 :

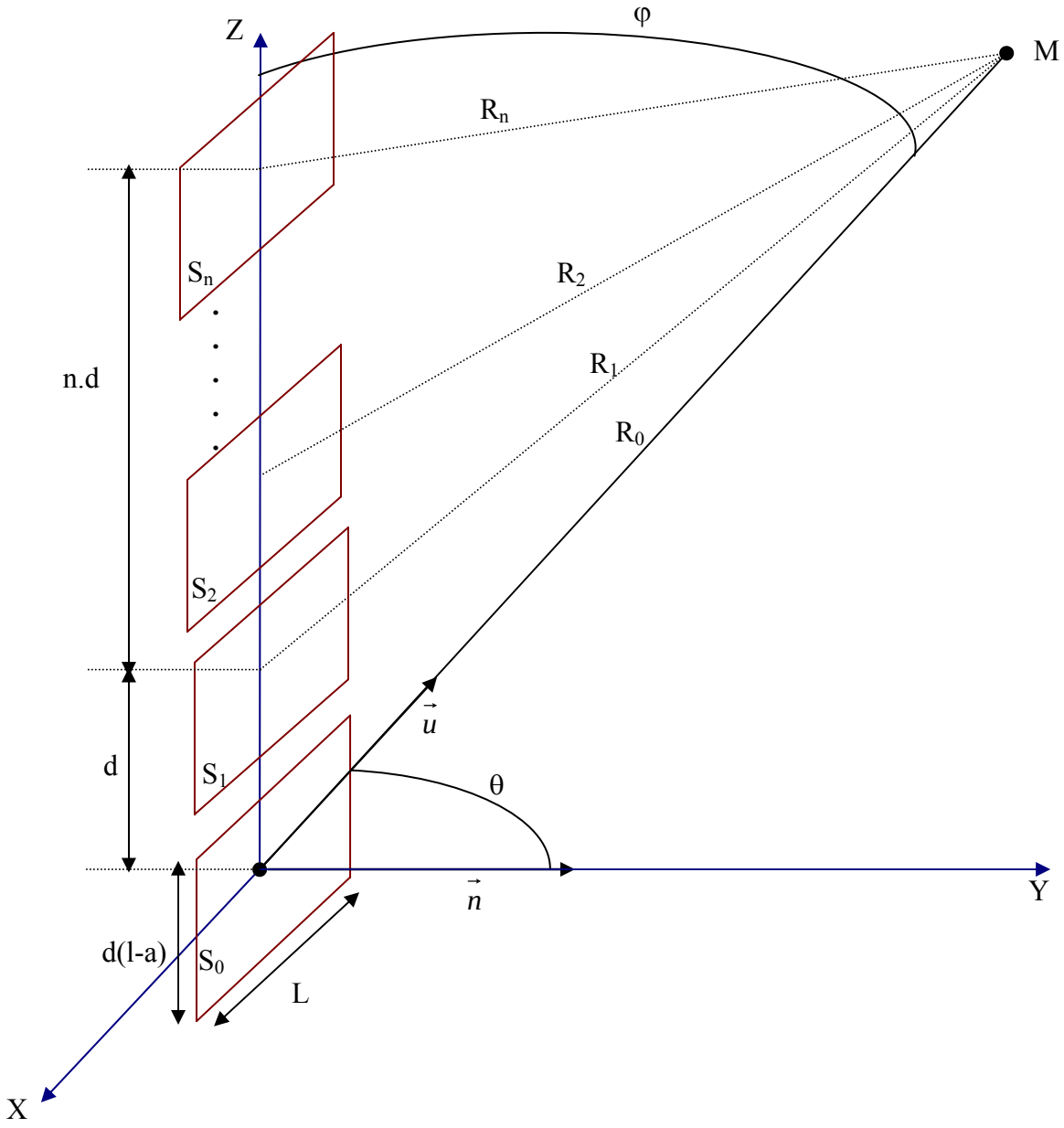



**Fig. III.3** : Association des surfaces rayonnantes en série

Alors la contribution totale, sera la somme de contribution de chaque surface rayonnante :

$$E_T(M) = \sum_{i=0}^{n} (-1)^i \; E_0(M)\, e^{j k . i d . \cos \varphi} \qquad \textbf{(11)}$$

$(-1)^i$ indique le sens du $i^{éme}$ champ électrique au niveau de la surface ( à cause de la polarisation des électrodes). « n » étant le nombre de surface.

Le champ électrique rayonné au point M par plusieurs ouvertures $S_1$, $S_2$ ,….., $S_n$ est donnée par cette expression :

$$E_T(M) = E(M).\left[1 + e^{j.A} + e^{2.jA} + ..... + e^{n.jA}\right] \quad \textbf{(12)}$$

Avec A=d.βcosφ

Comme $E_T$(M)est une suite géométrique de raison $e^{i\beta.d.\cos\varphi}$ peut être exprimée comme suit :

$$E_T(M) = K'E(M).e^{jk.n.d.\cos\varphi/2} \; x \frac{\sin\left[(k.d.\cos\varphi + \pi).((n+1)/2\right]}{\left[(k.d.\cos\varphi + \pi).((n+1)/2\right]} \quad \textbf{(13)}$$

K' est une constante qui dépend des caractéristiques du matériau considéré.

## III.5 Diagramme de rayonnement

Les caractéristiques directionnelles des antennes sont représentées par des diagrammes de rayonnement. Il indique la façon dont l'antenne répartit son rayonnement dans l'espace environnant. C'est le lieu géométrique où l'intensité du champ électrique est la même. Le diagramme de rayonnement est donc tridimensionnel.

En réalité, l'énergie rayonnée par une antenne est répartie inégalement dans l'espace, certaines directions étant privilégiées : ce sont les « lobes de rayonnement ».

Le diagramme de rayonnement d'une antenne permet de visualiser ces lobes dans les trois dimensions, dans le plan horizontal ou dans le plan vertical incluant le lobe le plus important.

La fonction caractéristique dans ce cas sera exprimée comme suit :

$$|F(\gamma,\delta)| = (1+\cos\gamma\cos\delta).\frac{\sin[\beta.L/2.(\sin\delta-1)]}{[\beta.L/2.(\sin\delta-1)]}.\frac{\sin[\beta.d/2.(l-a).(\sin\gamma.\cos\delta)]}{[\beta.d/2.(l-a).(\sin\gamma.\cos\delta)]}.\frac{\sin[(k.d.\cos\varphi+\pi).((n+1)/2]}{[(k.d.\cos\varphi+\pi).((n+1)/2]} \quad \textbf{(14)}$$

Le diagramme de rayonnement de l'antenne proposée qui est basé sur l'expression (14) est donné par les figures III.4 e III.6 dans le plan E (XOY) et pour n=2 et n = 10 respectivement et par les figures III.5 et III.7 dans le plan H (YOZ) n=2 et n = 10 respectivement en posant : $\beta = \frac{2.\pi}{\lambda}$ , $d = \frac{\lambda}{2}$ .

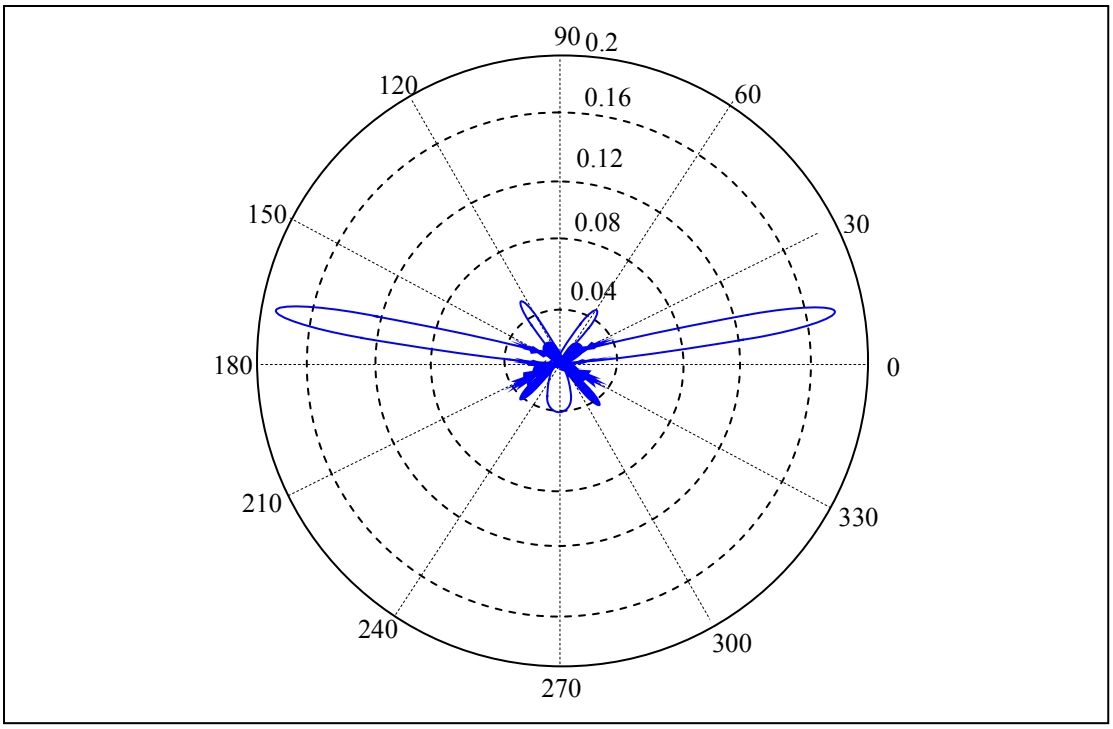



**Fig. III.4** : Diagramme de rayonnement pour n = 2 plan E

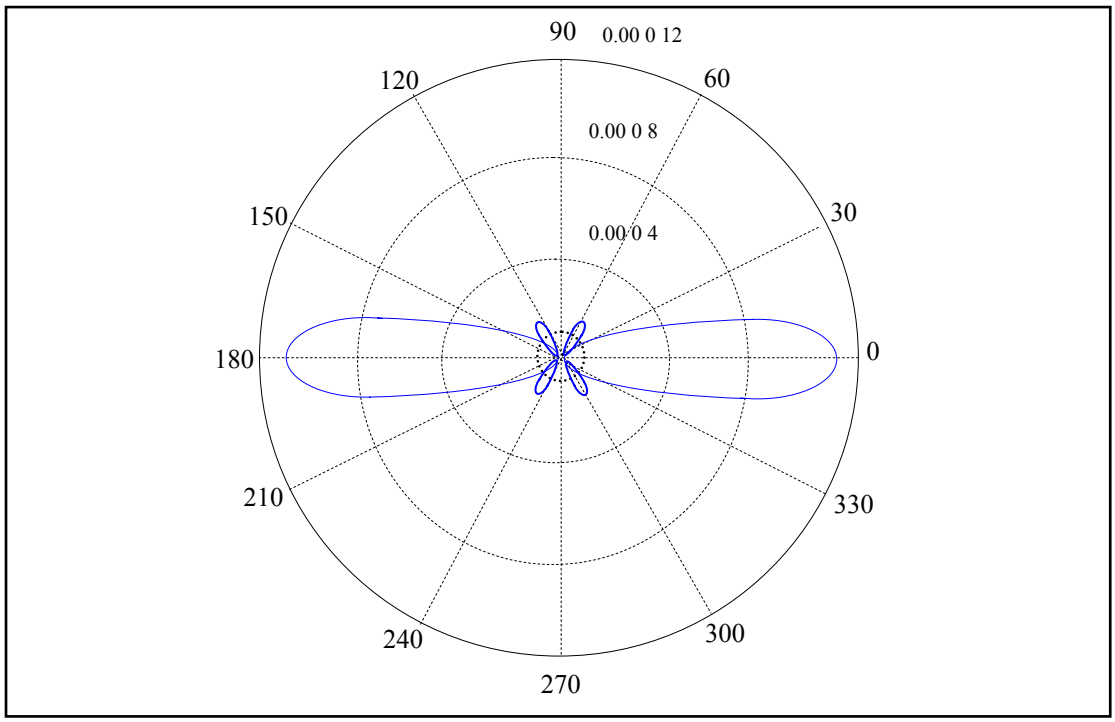



**Fig. III.5** : Diagramme de rayonnement pour n = 2 plan H

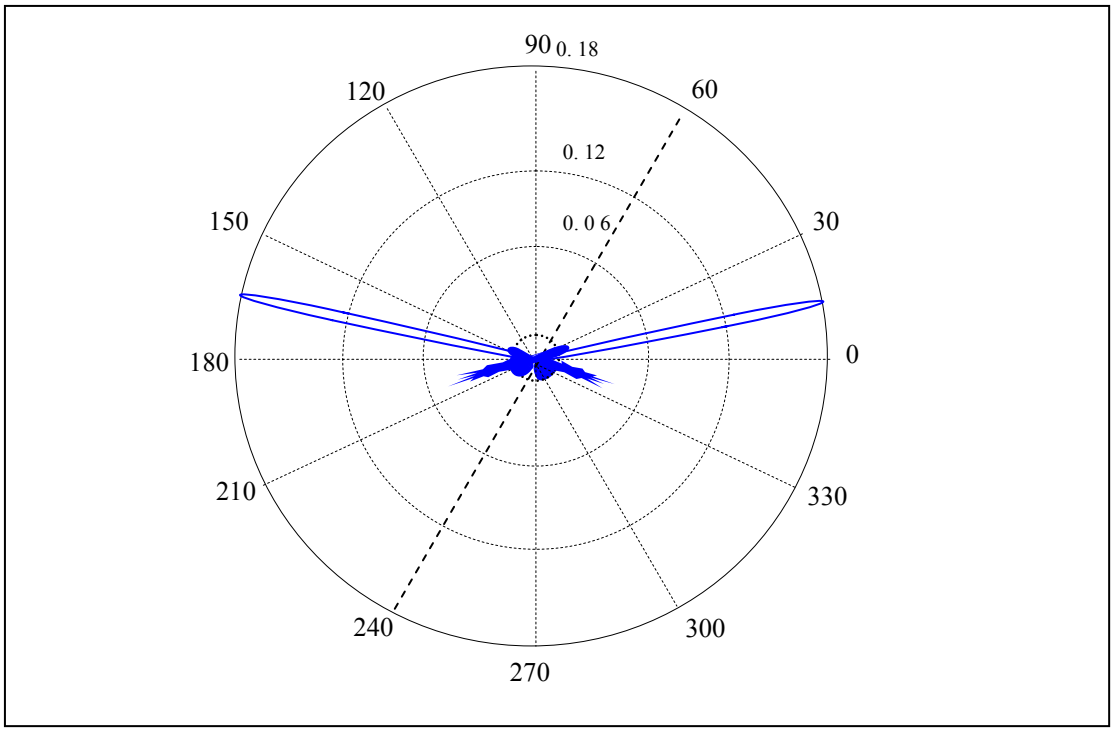



**Fig. III.6** : Diagramme de rayonnement pour n = 10 plan E

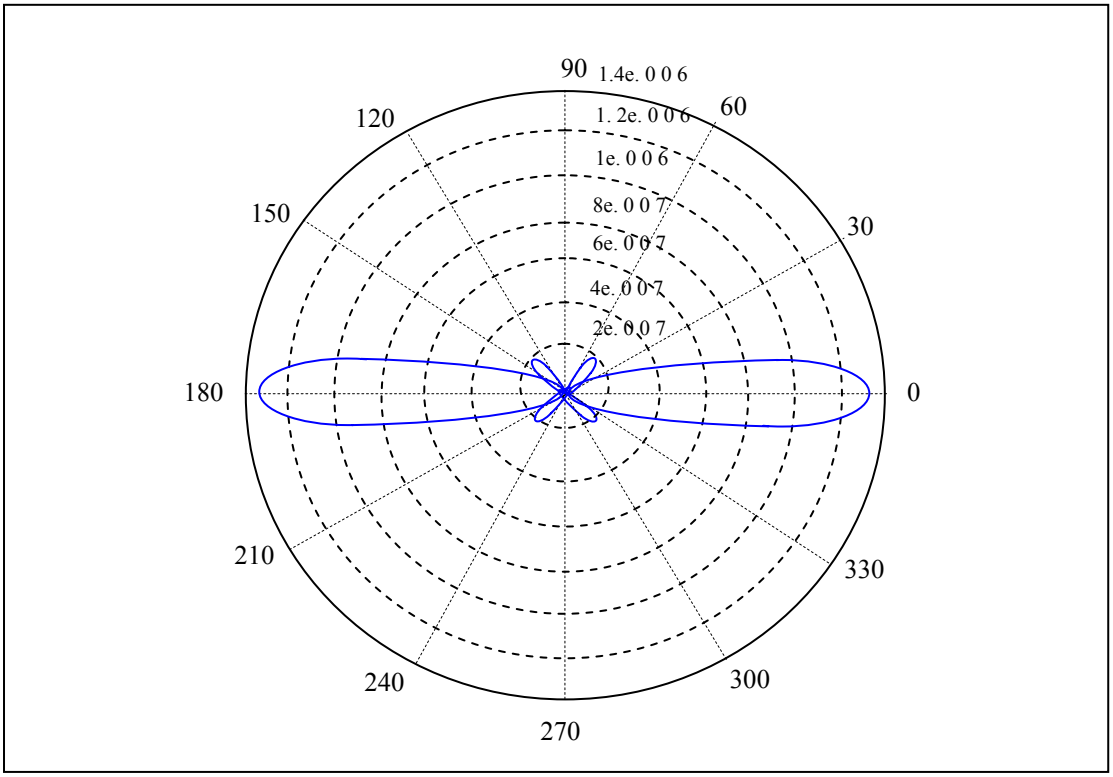



**Fig. III.7** : Diagramme de rayonnement pour n = 10 plan H.

## III.6 Conclusion

Dans ce dernier chapitre, nous avons étudié et modélisé une structure rayonnante à ouverture rayonnante, on vise plus particulièrement les surfaces comprises entre les électrodes des transducteurs interdigités du matériau piézoélectrique.

Nous avons montré qu'on peut exploiter les ondes de fuite délivrées par un matériau piézoélectrique quelconque, et utiliser ces ondes pour des radiations sous forme de diagrammes de rayonnement.

# *Conclusion générale*

# Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre de modélisation d'une micro-antenne à base de structure piézoélectrique. Notre objectif est de comprendre le principe de propagation des ondes de volume et des ondes de fuite qui se manifestent au niveau des matériaux piézoélectriques tels que Le Niobate de Lithium ($LiNbO_3$) et le Tantalate de Lithium ($LiTaO_3$), puis de modéliser une micro-antenne piézoélectrique à ondes de fuite.

Pour atteindre cet objectif, notre travail s'est déroulé en trois étapes : la première étape inclue 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 et en particulier les ondes de fuite. Nous nous sommes intéressés à la propagation des ondes acoustiques de fuite 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 des ondes de fuite en appuyant 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, permettant de distinguer facilement les différents modes de propagation en particulier les ondes de fuite.

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.

Dans la dernière étape, nous avons modélisé une structure rayonnante piézoélectrique à ondes de fuite à base d'ouvertures rayonnantes. Les résultats obtenus (diagramme de rayonnement) sont implantés dans un programme d'analyse du champ électrique au niveau du transducteur des matériaux piézoélectriques, ces résultats permettant une bonne réalisation des dispositifs au niveau de leurs performances et stabilité pour les hautes fréquences.

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*

# *BIBLIOGRAPHIE*


[1] **T. Ikea**: "Fundamentals of piezoelectricity", *(Oxford University press1990).*

[2] **M.F Lewis:** "On Rayleigh waves and related propagating acoustic waves", *Suprigier series on wave phenomena of Rayleigh wave theory and application, Editord E.A.A sh.E.G.S, 1985,pp. 37-57.*

[3] **M. Feldman et J. Henaff**: "Traitement du signal par ondes élastiques de surface", *(Edition Masson et compagnie, Paris, 1986).*

[4] **R.M. White**: "Surface elastic-wave propagation and amplification", *IEEE Trans. On Electron Devices, 1967, Vol. ED-14, No. 4, pp. 181-189.*

[5] **C. Maerfeld, F. Gires and P. Tournois**: "Bleustein-Gulyaev surface wave amplification in CDS ", *Appl. Phys. Let., 1971, Vol. 18, No. 7, pp. 269-272.*

[6] **V. I. Anisikim et al**: "Structure of surface acoustic wave accompanying bulk waves", *Sov. Phys. Acoust 30 (4), July-August 1984, pp. 251-254.*

[7] **Y. Togami and T. Chiba**: "Observation of bulk waves and surface waves through side planes of several cuts of LiNbO3 SAW devices", *J. Appl. Phys 49(6), June 1978, pp. 3587-3589.*

[8] **Y. Zang and M. Planat**: "Bulk waves radiated from interdigital metallic transducer deposited on an anisotropic substrate", *Elect. Lett. 15 th January 1987, Vol.23, No. 2, pp. 68-69.*

[9] **Y. Zang and M. Planat**: "Bulk waves excited into an anisotropic halfspace by metallic tranducers", *2 european frequency and time forum Neuchate March 1988,pp. 767-777.*

[10] **H. Engan et al**: "Elastic surface wave in a quartz: observation of leaky surface waves", *Appl. Phys. Lett. Vol. 10, No. 11, 1967, pp. 311-313.*

[11] **A. Takayanagi et al**: "Piezoelectric leaky surface waves in $LiNbO_3$", *Appl. Phys. Lett. Vol. 5, No. 17, 1970, pp. 225-227.*

[12] **D.E. Chimenti et al**: "Leaky Rayleigh waves on a layered halfspace", *J. App. Phys. Vol.53, No. 1, 1982, pp. 170-176.*

[13] **C. A. A. j. Greeb et al** : "Electrical coupling properties of acoustics and electric surface waves", *Physical Report, Vol. 1. C, n°5, 1971, pp. 235-268.*

[14] **K. M. Lakin**: "Perturbation theory for Electromagnetic coupling to Elastic surface waves on piezoelectric substrates", *J. Appl. Phys. Vol.42, n°3, 1971, pp. 899-906.*

[15] **R.F. Milson, N.H.C. Reilly and M. Redwood**: "Analysis of generation and detection of surface and bulk acoustic waves by inerdigital transducers", *IEEE Tans. Sonics Ultrason, 1977, pp. 147-166.*

[16] **Matteo Bullo**: "Modélisation et commande du moteur piézoélectrique à onde progressive", *MAGELEC 98, Avril 1998, pp.15-28.*

[17] **G.H. Haertling**: "Ceramic materials electronics", *Journal of the American Ceramic Society, 1999, vol 82, n°4, pp. 797-818.*

[18] **Jaffe, B., Cook, W-R. And Jaffe, H.**, "Piezoelectric ceramics", *London: Academic Press, 1971: pp. 317.*

[19] **Abdelmjid Benayad** : "Matériaux monocristallins à forte activité piézoélectrique: élaboration, caractérisation et application", *Laboratoire de Génie électrique et de ferroélectricité, INSA de Lyon, 2005.*

[20] **F. Pata** : "Phénomène de piézo-électricité", *Habilitation à diriger des recherches, univ. de Savoie, 2000.*

[21] **M. Brissaud, L. Eyaraud** : "Théorie et relation fondamentales de la piézoélectricité", *chapitre III en matériaux piézoélectriques, pyroélectriques, électrostrictifs et applications, Lyon. INSA de Lyon-CAST, 1996.*

[22] **Burtanoval, Sulcm et Prokopovam** : "Détermination of the piezoelectric coefficient $d_{ij}$ of PZT ceramic and composites by Laser interferometry", *Journal of European ceramic society, 2001, Vol. 1. pp. 1387-1390.*

[23] **LE_Dren Sarah**: "Elaboration de couches épaisses piézoélectriques déposées sur substrat pour des applications microtechnique", *Thèse doctorat institut national des sciences appliquées de Lyon, janvier 2000.*

[24] **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.*

[25] **B. Jafee, W.R. Cook et H. Jafee** : "Piezoelectric ceramic", *London. Acadimic pess, 1971.*

[26] **B.A. Auld:**" Acoustic field and waves in solids", *Vol. II Wiley Interscience 1973.*

[27] **D. Benatia et M. Benslama** : "Analysis of Leaky and Bulk Acoustic Microwaves by Wavelet Technique ", *Journal of Communications in Numerical Methods in Engineering, U.K, 2000, Vol. 16, pp. 165-175.*

[28] **Marlton**: "Lithium Tantalate properties", Materials Research Bulletin, 1982, pp. 1245-1250.

[29] **L. Eyraud, G. Grange, H. Ohanessian** : "*Théorie et technique des antennes", L'école nationale supérieure des télécommunications de paris, Edition, Ellipses 2002.*