

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Abou bekr Belkaid - Tlemcen



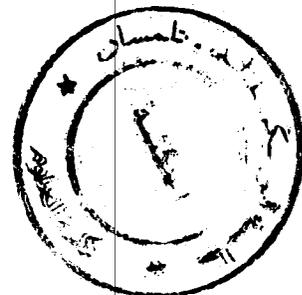
MS/ 631.6 - 18/09

Faculté des sciences

Département de physique

MEMOIRE DE MASTER

Spécialité : Energétique et matériaux



Présenté par:

M. ABID Choayb

Thème

*Etude de propagation des ondes acoustiques dans les milieux piézoélectriques*

Devant le jury d'examen :

Pr. A. Bensaoula, Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen

Président

Dr A. Mammeri, Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen

Rapporteur

Dr Merad Laarej, Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen

Examineur

Pr Bibi Triki, Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen

Examineur

Soutenu le 26 / 06 / 2012

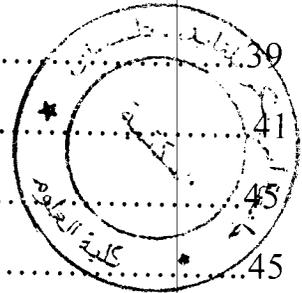


## Sommaire:

Chapitre I : Généralités sur la piézoélectricité et les ondes acoustiques.....	4
I. La piézoélectricité.....	5
I.1 Historique et définition.....	5
I.2 Théorie de la piézoélectricité .....	7
I.3 Les matériaux piézo-électriques.....	9
I.3.1 Grandes familles de matériaux.....	11
a/ Les oxydes ferroélectriques.....	11
b/ Le quartz et les composés analogues.....	12
c / Les semi-conducteurs.....	14
d / Les polymères.....	14
e / Les sels .....	15
I.3.2 Mise en forme .....	16
I.3.2.1 Monocristaux.....	16
I.3.2.2 Céramiques.....	17
I.3.2.3 Composites.....	<b>17</b>
I.3.2.4 Couches minces.....	18
II. Les ondes acoustiques .....	18
II.1- Définition.....	18
II.2- Vitesse des ondes sonores.....	20
II.3-La fréquence des ondes sonores.....	21
II.4- La longueur d'onde.....	21
II.5- Réflexion de sons, ondes stationnaires.....	23
II.6- Résonance acoustique.....	24



II.7- Les interférences acoustiques.....	25
II.8- Intensité et puissance acoustique.....	26
II.9. Les ultrasons.....	27
Conclusion .....	28
Bibliographie.....	29
Chapitre II : Les dispositifs à ondes acoustiques.....	30
I. Introduction .....	31
II. Structures à ondes acoustiques de surface (SAW) .....	33
II.1 Types de transducteurs .....	39
a / Transducteurs bidirectionnels.....	39
b / Transducteurs unidirectionnels (SPUDT).....	39
III. Structures à ondes acoustiques de volume (BAW).....	41
IV. Tenseurs des déformations et des contraintes.....	45
IV.1. Tenseur des déformations .....	45
IV.2. Tenseur des contraintes.....	47
IV.3 Relation entre contraintes et déformations élastiques.....	49
IV.4 Propagation des ondes élastiques.....	51
Conclusion .....	54
Bibliographie.....	55
Chapitre III : Technologie de fabrication des dispositifs à ondes acoustiques.....	56
I. Introduction .....	57
II. Couches minces.....	57
II.1. Définition d'une couche mince.....	57
II.2 caractéristiques des couches minces.....	58
II.3 Méthodes générales de dépôt de couches minces.....	59



II.3.1 Etapes à suivre pour déposer une couche mince.....	59
a / La source.....	59
b/ Le transport .....	60
c/ Le dépôt.....	60
d/ L'analyse.....	61
II.3.2 Techniques de dépôts de couches minces.....	61
II.3.2.1 Dépôts physiques en phase vapeur (PVD).....	62
a / Dépôt par évaporation sous vide.....	63
a /1. Description d'un système d'évaporation sous vide .....	64
a /2. Procédure de chauffage du matériau à évaporer.....	65
b / La pulvérisation cathodique .....	69
b/1.L'installation de pulvérisation cathodique .....	71
II.3.2.2 Les techniques Dépôts chimiques (CVD).....	75
II.3.2.2.1 Réactions de la CVD .....	79
II.3.2.2.2 Les différentes techniques CVD .....	79
a. La CVD à pression atmosphérique ou APCVD.....	80
b. La CVD à basse pression ou LPCVD .....	80
c. La CVD assisté par plasma PECVD (Plasma Enhanced CVD) .....	80
d. La MOCVD (Organo-Metallic CVD) .....	81
III. Méthodologie de la photolithographie pour la réalisation de dispositifs SAW.....	83
III.1. Dépôt de la résine.....	83
III.2. L'insolation .....	85
III.3. L'exposition .....	85



III.4. Pré-recuit .....	86
III.5. Développement.....	87
Conclusion .....	87
Bibliographie.....	88
Chapitre IV : Applications des ondes acoustiques et de la piézoélectricité.....	89
1. Cas de la cellule solaire .....	90
2. Transducteurs piézoélectriques et acoustiques.....	93
3. Résonateurs piézoélectriques.....	96
a/ (high overtone bulk acoustic resonators) .....	97
b/ (film bulk acoustic resonators ).....	98
4. Capteurs de pression ou d'accélération.....	103
5. Moteurs et actionneurs piézoélectriques.....	104
5.1 Principe de fonctionnement .....	104
5.2 Caractéristiques .....	106
a/ Avantages.....	106
b/ Inconvénients.....	106
5.3 Quelques Applications .....	107
6. Générateurs et transformateurs.....	109
Bibliographie.....	113



## Introduction générale

Grâce aux progrès de la microélectronique et à la réduction des coûts de fabrication des circuits intégrés, la téléphonie mobile, au cours des vingt dernières années, s'est développée de façon fulgurante, du point de vue technologique aussi bien qu'économique. Ces progrès ont contribué de manière décisive à l'évolution d'un produit de consommation grand public. Ils ont permis le développement rapide d'appareils plus fonctionnels, plus performants et plus compacts. Ils ont également ouvert la voie à une multiplication des standards, à l'accroissement de la largeur des bandes de fréquence utilisées, et au tout-numérique.

L'accroissement de la complexité et de la quantité des fonctions intégrées dans les téléphones cellulaires ne s'est pas traduit par un relâchement des contraintes relatives à la taille, au coût et à la consommation énergétique des appareils, bien au contraire : la sévérité de ces exigences a crû en proportion de la large diffusion des produits au sein du grand public. Parmi les fonctions les plus concernées par ces contraintes figurent les fonctions « filtrage » et « base de temps ». En effet, ces deux fonctions qui comptent parmi les plus importantes de la téléphonie, doivent relever un difficile et double défi consistant à traiter simultanément un nombre toujours plus grand de signaux, tout en limitant la consommation énergétique et la surface de silicium employée.

L'évolution des cahiers des charges des applications Radiofréquence (RF) a naturellement et progressivement conduit à une occupation toujours plus large du spectre RF. Les technologies disponibles, telles que les composants à ondes de surface (SAW : Surface Acoustic Waves) pour les applications « filtrage RF » et le quartz pour les applications « base de temps » se sont rapidement heurtées à des problèmes d'encombrement, de consommation et de flexibilité quant à leur fréquence de fonctionnement. Les oscillateurs à quartz sont par exemple volumineux, leur fabrication est coûteuse et se révèle incompatible avec les procédés classiques utilisés



## Introduction générale

en microélectronique tandis que les filtres SAW, qui dominent actuellement le marché RF de la téléphonie mobile, ont une tenue médiocre à la puissance et seront limités au delà de 2,5 GHz (limites de résolution des peignes interdigités).

Il a fallu imaginer et développer de nouvelles solutions technologiques capables de conserver les avantages des solutions précédentes tout en surmontant leurs handicaps. Parmi ces nouvelles solutions, l'une des plus prometteuses pour la téléphonie mobile semble être la technologie à ondes acoustiques de volume (BAW : Bulk Acoustic Waves), développée depuis une trentaine d'années. Son principe de fonctionnement exploite les propriétés de la propagation d'ondes acoustiques de volume au sein d'une couche mince de matériau piézoélectrique, afin de réaliser des résonateurs dont la fréquence de fonctionnement est définie au premier ordre par l'épaisseur de cette couche mince. Ces résonateurs peuvent être utilisés soit individuellement pour réaliser la fonction « base de temps », soit encore regroupés selon différentes architectures pour assurer la fonction « filtrage RF ». La maîtrise du dépôt des matériaux piézoélectriques en couches minces permet la réalisation de résonateurs BAW fonctionnant à des fréquences bien supérieures au GHz. Par ailleurs, les objectifs de compatibilité avec les technologies classiques utilisées en microélectronique, ainsi que ceux liés à la réduction du coût et à l'encombrement des dispositifs semblent être à portée de la technologie BAW.

Après une introduction sur les systèmes électro-acoustiques, on abordera dans le premier chapitre, d'une manière détaillée, la piézoélectricité, les matériaux piézoélectriques et les ondes acoustiques et ses propriétés électriques et mécaniques.

Dans le deuxième chapitre, nous traiterons les dispositifs à ondes acoustiques de surface et de volume, les tenseurs de contraintes et de déformations piézoélectriques, ainsi que les équations de propagation des ondes élastiques dans les milieux piézoélectriques.

**Chapitre I : Généralités sur la piézoélectricité et les ondes acoustiques.**



## I. La piézoélectricité

### I.1 Historique et définition :

Au milieu du XVIII<sup>e</sup> siècle, Carl von Linné et Franz Aepinus avaient étudié l'effet pyroélectrique, par lequel un changement de température entraîne une variation de la polarisation électrique d'un cristal. Le cristal type présentant cet effet est alors la tourmaline : en chauffant un cristal de tourmaline, on fait apparaître sur ses deux faces de l'électricité. La nature de l'électricité est différente sur une face et sur l'autre, *vitreuse* et *résineuse* selon les termes de l'époque (on parlerait aujourd'hui de charges positives et négatives).[1]

Les qualités piézo-électriques du quartz furent pressenties au milieu du XIX<sup>e</sup> siècle à la suite des travaux précurseurs de l'abbé René Just Haüy. Ce fondateur de la cristallographie a en effet par ses observations de la matière (étude systématique de la morphologie générale des cristaux) apporté de grandes connaissances au niveau de la géométrie atomique des cristaux et participé à en déterminer des lois structurales.

" L'effet direct " de la piézo-électricité sera mis en évidence par Pierre Curie et son frère Paul Jacques Curie à Paris en 1880 ; le mot piézo-électrique tiré du grec " piézo " veut dire pression.

À cette époque, les deux frères, âgés respectivement de 21 et 25 ans, sont tous deux préparateurs à la faculté des sciences de Paris. Combinant leurs connaissances de la pyroélectricité et de la structure cristalline, ils prédirent et vérifièrent l'existence de la piézoélectricité sur des cristaux de quartz, de tourmaline, de topaze, de sucre et de sel de Rochelle.

Cette découverte attira immédiatement l'attention des scientifiques : le français Gabriel Lippmann (1845-1921), Prix Nobel de physique en 1908 et inventeur de la photographie couleur, démontra de son côté quelques années plus tard que le phénomène était réversible ; ainsi si des signaux électriques sont appliqués sur le cristal, celui-ci se dilate et se contracte dans une certaine direction, sa résonance mécanique favorisant les vibrations à une fréquence donnée.

C'est grâce à cette dernière propriété que le quartz a atteint une telle notoriété.

Wilhelm Gottlieb Hankel, William Thomson (lord Kelvin) et surtout Woldemar Voigt participèrent à ces recherches et la théorie du phénomène était, à la fin du XIXe siècle, presque complètement établie. [2]

D'un point de vue pratique, la piézoélectricité ne fut utilisée que pour réaliser quelques instruments de laboratoire.

La première application de la piézoélectricité fut le sonar développé par Paul Langevin et ses collaborateurs pendant la Première Guerre mondiale. Ce sonar était composé de lames de quartz collées entre deux plaques d'acier et d'un hydrophone et permettait, par la mesure du temps écoulé entre l'émission d'une onde acoustique et la réception de son écho, de calculer la distance à l'objet. Peu de temps après, au début des années 1920, le premier oscillateur à quartz est mis au point par Walter Cady, ouvrant ainsi la voie au contrôle de fréquence.

Le succès de ces projets suscita un grand intérêt pour la piézoélectricité, relança les recherches et conduisit à travers les années qui suivirent au développement de nouveaux dispositifs pour une large palette d'applications dans la vie quotidienne, l'industrie et la recherche. L'amélioration du phonographe ou le développement du réflectomètre et du transducteur acoustique, largement utilisé pour les mesures de dureté ou de viscosité, en sont des exemples.

Pendant cette période, les principaux matériaux utilisés sont le quartz, le sel de Seignette et le dihydrogène phosphate de potassium  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ . Or, s'ils peuvent être utilisés, ces matériaux présentent toutefois des inconvénients qui limitent à la fois les applications possibles et l'élaboration de théories de la piézoélectricité.

La recherche de matériaux piézoélectriques nouveaux, sous formes céramique ou de monocristal, est toujours très active et a pour but l'amélioration des caractéristiques des matériaux actuels et le développement de matériaux nouveaux dont les propriétés sont adaptées à une application particulière [5].

## I.2 Théorie de la piézoélectricité :

Un cristal possédant un centre de symétrie (dans sa structure cristalline) ne peut pas être déséquilibré électriquement et par conséquent il ne peut pas avoir de propriété piézoélectrique (Figure I.1).

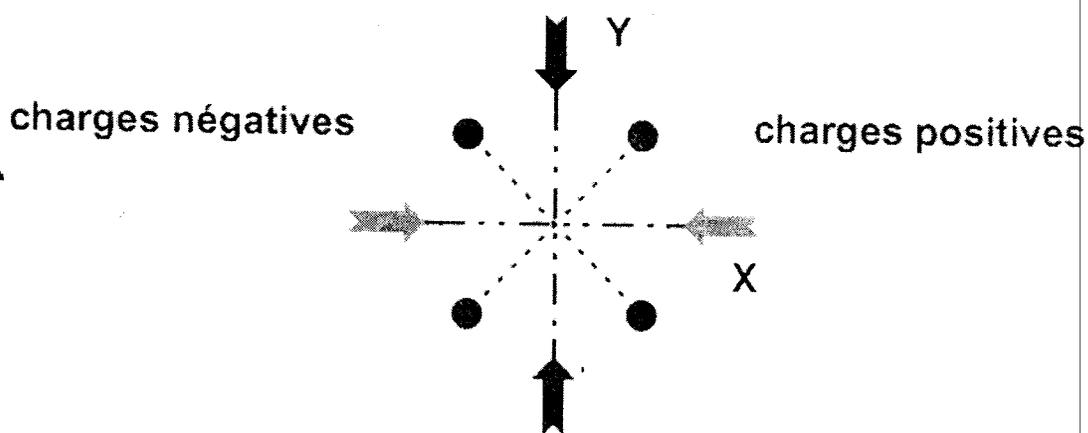


Fig. I.1: Cristal symétrique

En effet, lorsqu'il est soumis à une pression (flèches jaunes ou vertes), le déplacement des charges positives et négatives est identique dans toutes les directions et par conséquent la structure reste équilibrée (on observe toujours le même centre de symétrie).



Maintenant, si ce cristal ne possède pas de centre de symétrie les phénomènes présentés Figure I.2 peuvent être observés.

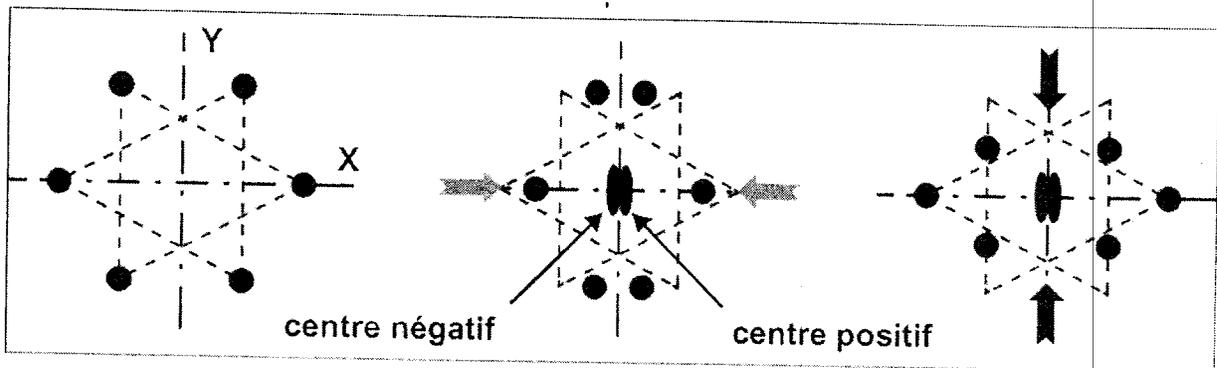


Figure. I.2: Cristal non symétrique

Notons que cette structure de cristal est formée par deux triangles équilatéraux dont les sommets disposent de charges positives pour l'un et négatives pour l'autre.

Tant que le cristal n'est soumis à aucune contrainte, les deux centres des triangles équilatéraux sont identiques et on ne dispose d'aucun effet piézoélectrique.

Dès lors qu'une pression est appliquée, soit suivant X, soit suivant Y, les centres des deux triangles équilatéraux se déplacent en sens inverse et déséquilibrent la structure du cristal. L'effet piézoélectrique est lié à cette possibilité de déséquilibrer la structure et par conséquent, seuls les cristaux dont la structure ne possède pas de centre de symétrie sont piézoélectriques.

De plus, comme on peut le constater les deux centres se déplacent suivant l'axe des X quelque soit la pression appliquée (suivant Y ou suivant X). Par conséquent l'axe des X est appelé axe électrique et l'axe des Y est appelé axe mécanique. Perpendiculairement à ces deux axes se trouve l'axe des Z qui lui sera appelé l'axe optique car des techniques optiques sont utilisées pour le

localiser. De plus il n'y a aucun effet piézoélectrique qui soit associé à l'axe optique. [3]

### I.3 Les matériaux piézo-électriques :

L'effet piézo-électrique direct traduit l'aptitude de quelques matériaux à se polariser sous l'application d'un effort mécanique, la charge électrique apparaissant à leur surface étant proportionnelle à la contrainte exercée.

Ce phénomène est réversible, c'est à dire qu'il est possible d'obtenir pour ces même matériaux des déformations lorsqu'on les soumet à un champ électrique : c'est l'effet inverse.

De tels solides sont peu nombreux à l'état brut, le plus connu étant le Quartz. Mais on élabore depuis les années quarante des matériaux piézo électriques de synthèse, sous forme de céramique.

En réalité, qu'ils soient d'origine synthétique ou naturelle, ces matériaux ne présentent que peu ou pas de polarisation naturelle à l'échelle macroscopique. En effet, le matériau ne peut pas être homogène, mais est constitué de grains ; et si on étudie une vue en coupe d'une céramique par exemple, on voit apparaître des domaines dont la polarisation occupe une direction propre, mais différente des domaines voisins. A l'état naturel, les polarisations sont orientées de manière aléatoire, et leur somme est nulle. C'est pourquoi, le processus de fabrication de ces matériaux doit faire apparaître une phase de polarisation.

Pour cela, on soumet l'échantillon à un champ électrique intense ( de l'ordre de  $40$  à  $100\text{Vmm}^{-1}$  ), forçant les domaines à orienter leur polarisation selon une direction privilégiée. Les grains aux polarisations aléatoires donnent un caractère fortement anisotropique à la matière, si bien que les caractéristiques dépendent de la direction d'application des champs ou des efforts extérieurs.

Si des lamelles de Quartz sont encore utilisées pour la fabrication de résonateur en électronique, les matériaux utilisés pour les actionneurs sont eux à base d'alliage de titanozirconate de plomb. D'un point de vue quantitatif, les déformations sont de l'ordre de 400pm sous une tension de 1V.

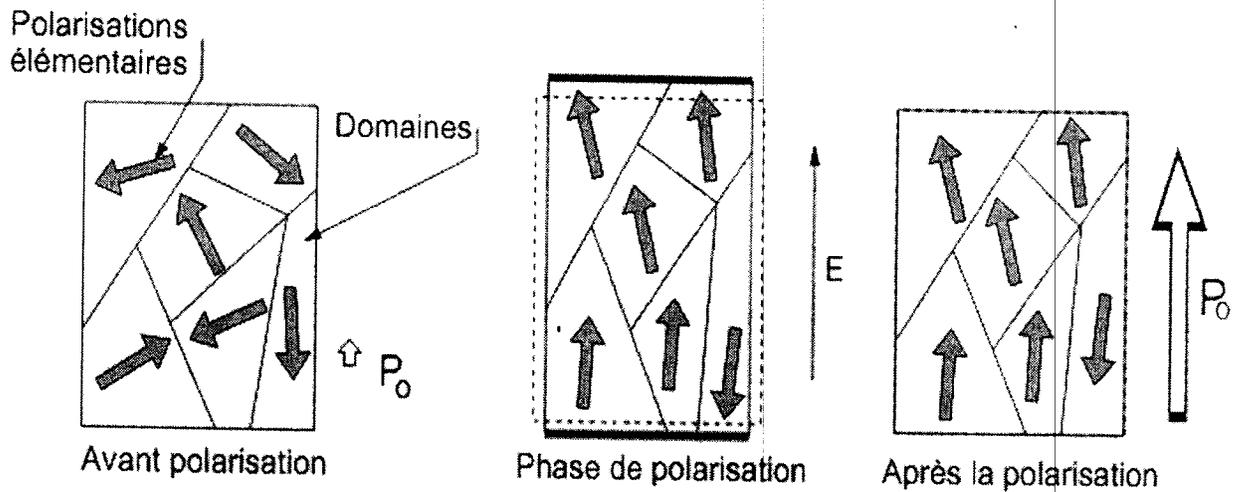


Figure. 1.3 – Polarisation d'un morceau de céramique. Le champ  $E$  intense force les domaines à s'orienter selon une direction privilégiée.

La fabrication de matériaux piézo-électriques est réalisée à partir de poudres ( si elle est réalisée en phase solide ). Outre la phase de polarisation déjà décrite, une phase de frittage, visant à souder entre eux les grains, se fait sous contraintes axiales afin d'améliorer la tenue mécanique et de diminuer la porosité.

Les matériaux se conditionnent sous forme de film, de disque, de bâtonnet de section carrée ou circulaire.[2]

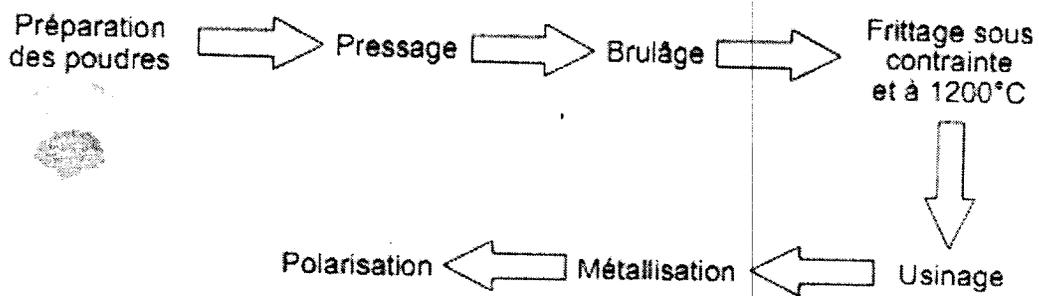
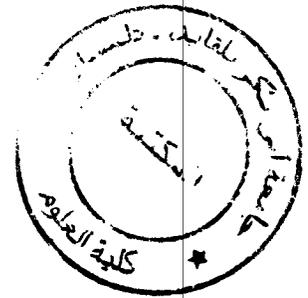
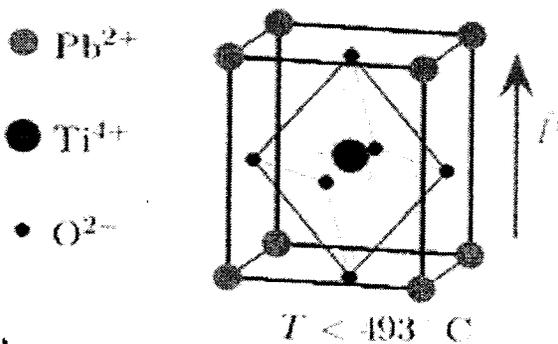


Figure 1.4 – Fabrication des céramiques

### I.3.1 Grandes familles de matériaux

#### a/ Les oxydes ferroélectriques

Figure I.5 : Maille cristalline d'un cristal de structure pérovskite :  $PbTiO_3$ 

Les matériaux ferroélectriques de structure pérovskite occupent une large place dans la palette des oxydes piézoélectriques. Ils ont pour formule générale  $ABO_3$ . On les représente par un empilement d'octaèdres liés par leurs sommets. Les anions oxygène forment les sommets des octaèdres tandis que les cations B et A occupent respectivement leur centre et les sites entre les octaèdres. De nombreux ferroélectriques modèles appartiennent à cette famille : le titanate de plomb  $PbTiO_3$ , le titanate de baryum  $BaTiO_3$ , le niobate de potassium  $KNbO_3$ .



En substituant des cations différents sur les sites A ou B, on peut obtenir des solutions solides. C'est à cette catégorie qu'appartient en particulier le plus couramment utilisé des piézoélectriques, le titano-zirconate de plomb ( $\text{Pb}(\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3$  abrégé en PZT), dans lequel les sites B sont occupés par des ions titane et zirconium. On peut également citer des solutions solides entre un relaxeur et le titanate de plomb comme les  $\text{Pb}(\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})_{1-x}\text{Ti}_x\text{O}_3$ ,  $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})_{1-x}\text{Ti}_x\text{O}_3$ ,  $\text{Pb}(\text{Sc}_{1/2}\text{Nb}_{1/2})_{1-x}\text{Ti}_x\text{O}_3$  (abrégés en PZN-xPT, PMN-xPT et PSN-xPT respectivement).

C'est dans des cristaux de ce type, pour certaines compositions particulières, que les coefficients piézoélectriques les plus élevés connus sont mesurés.

Le niobate de lithium  $\text{LiNbO}_3$  et le tantalate de lithium  $\text{LiTaO}_3$  forment une famille à part. Ils sont tous deux ferroélectriques avec des températures de Curie de  $1210^\circ\text{C}$  et  $660^\circ\text{C}$  respectivement. Ils ont une structure proche de la maille ilménite de symétrie  $3m$  ; ils n'en diffèrent que par la suite des cations selon leur axe de polarisation ( $\text{Li-Nb-*}-\text{Li-Nb-*}$  contre  $\text{Fe-Ti-*}-\text{Ti-Fe-*}$  pour l'ilménite, où \* désigne un site vacant). Ils sont particulièrement utilisés sous forme de monocristaux dans les dispositifs à ondes acoustiques de surface.

Certains matériaux de structure cristalline tungstène-bronze sont également utilisés ( $\text{Ba}_2\text{NaNb}_5\text{O}_{15}$ ,  $\text{Pb}_2\text{KNb}_5\text{O}_{15}$ ). Parmi les autres matériaux piézoélectriques de synthèse, on peut citer les cristaux langasites (dont le langasite de composition  $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ ).[1]

### **b/ Le quartz et les composés analogues**

Le quartz est le cristal piézoélectrique le plus communément utilisé. Dans sa forme originale un cristal de quartz n'est pas utilisable en électronique. Il doit être transformé en différentes tailles et formes pour lui donner ses propriétés piézoélectriques particulières. En découpant ce quartz avec des angles variés et

en respectant les axes X, Y, Z, il est possible d'obtenir un cristal aux caractéristiques différentes (température, fréquence, etc).

Ainsi, suivant l'épaisseur et la forme obtenues ces cristaux sont classifiés en plusieurs groupes. La fréquence de résonance du cristal est généralement déterminée par la taille de ce dernier et combinée au mode dans lequel il vibre. La limite inférieure en fréquence est déterminée par la dimension la plus large et plus le cristal est petit plus la limite en fréquence augmente.

Le facteur de qualité élevé obtenu grâce à ces quartz (10000 @ 38.4MHz) garantit une grande stabilité et de bonnes performances. A la fréquence de résonance du circuit les réactances capacitives et inductives sont égales et opposées. Seule la résistance du circuit s'oppose au passage du courant. Cette résistance est très faible ce qui permet d'obtenir des coefficients de qualité très importants.

La plupart des pertes dans les circuits résonants électriques sont causées par les fortes résistances des bobinages. Les pertes des cristaux sont quant à elles dues à la dissipation interne, au montage mécanique et à la passivation. Toutefois les pertes cumulées liées au quartz ( $Q=10000$ ) sont beaucoup plus faibles que les pertes rencontrées dans les circuits résonants classiques LC ( $Q=20$  lié essentiellement aux pertes de l'inductance). C'est pourquoi l'utilisation de quartz est privilégiée lors de la conception de tels circuits.

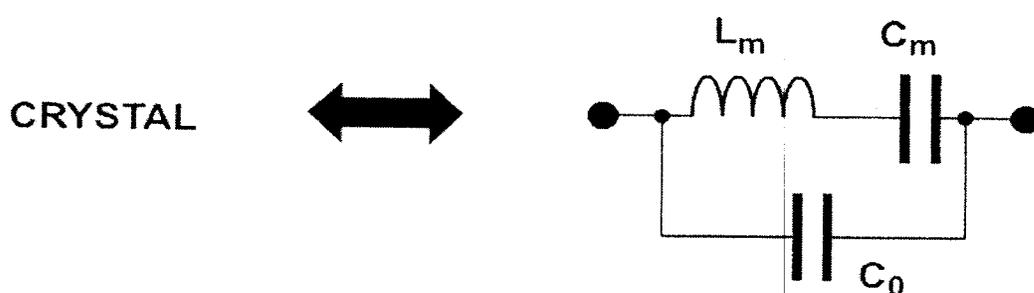


Figure. I.6 : Schéma électrique équivalent d'un cristal quartz

Ces cristaux possèdent deux fréquences de résonance  $f_s$  et  $f_p$ . Selon la modélisation présentée sur la Figure,  $f_s$  est déterminée par l'inductance  $L_m$  et la capacité  $C_m$  alors que  $f_p$  est déterminée par l'association  $L_m$ ,  $C_m$ ,  $C_0$ . Sous certaines conditions, il peut être nécessaire d'ajuster les fréquences de résonance du cristal. Cet ajustement peut être effectué par l'ajout d'une capacité ou d'une inductance variable en série ou en parallèle avec le cristal. Cet ajustement ne peut être que très faible mais suffisant pour contrer les dérives liées à la technologie utilisée. [3]

### c / Les semi-conducteurs

Les semi-conducteurs des groupes III-V de structure zinc-blende et II-VI de structure wurtzite sont également piézoélectriques. Parmi les matériaux modèles, on peut citer :

- le nitrure d'aluminium (AlN)
- l'oxyde de zinc (ZnO)

### d / Les polymères

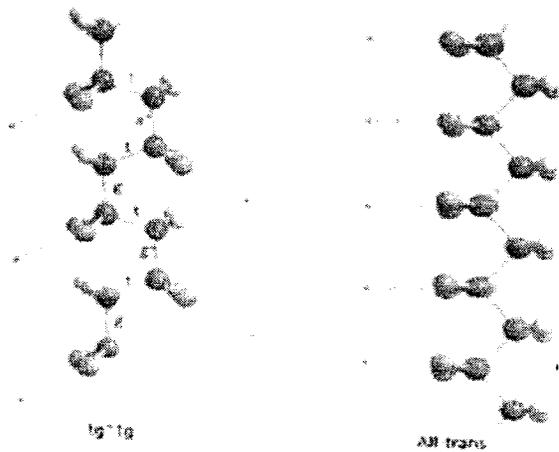


Figure I.7 : Structure du PVDF dans deux conformations différentes. Les sphères jaunes représentent les atomes de fluor.

Ces cristaux possèdent deux fréquences de résonance  $f_s$  et  $f_p$ . Selon la modélisation présentée sur la Figure,  $f_s$  est déterminée par l'inductance  $L_m$  et la capacité  $C_m$  alors que  $f_p$  est déterminée par l'association  $L_m$ ,  $C_m$ ,  $C_0$ . Sous certaines conditions, il peut être nécessaire d'ajuster les fréquences de résonance du cristal. Cet ajustement peut être effectué par l'ajout d'une capacité ou d'une inductance variable en série ou en parallèle avec le cristal. Cet ajustement ne peut être que très faible mais suffisant pour contrer les dérives liées à la technologie utilisée. [3]

### c / Les semi-conducteurs

Les semi-conducteurs des groupes III-V de structure zinc-blende et II-VI de structure wurtzite sont également piézoélectriques. Parmi les matériaux modèles, on peut citer :

- le nitrure d'aluminium (AlN)
- l'oxyde de zinc (ZnO)

### d / Les polymères

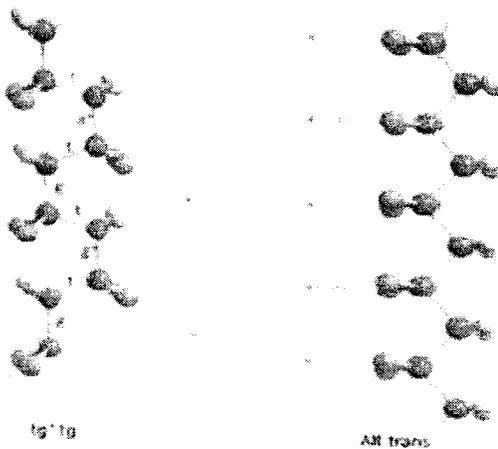


Figure I.7 : Structure du PVDF dans deux conformations différentes. Les sphères jaunes représentent les atomes de fluor.



Ces cristaux possèdent deux fréquences de résonance  $f_s$  et  $f_p$ . Selon la modélisation présentée sur la Figure,  $f_s$  est déterminée par l'inductance  $L_m$  et la capacité  $C_m$  alors que  $f_p$  est déterminée par l'association  $L_m$ ,  $C_m$ ,  $C_0$ . Sous certaines conditions, il peut être nécessaire d'ajuster les fréquences de résonance du cristal. Cet ajustement peut être effectué par l'ajout d'une capacité ou d'une inductance variable en série ou en parallèle avec le cristal. Cet ajustement ne peut être que très faible mais suffisant pour contrer les dérives liées à la technologie utilisée. [3]

### c / Les semi-conducteurs

Les semi-conducteurs des groupes III-V de structure zinc-blende et II-VI de structure wurtzite sont également piézoélectriques. Parmi les matériaux modèles, on peut citer :

- le nitrure d'aluminium (AlN)
- l'oxyde de zinc (ZnO)

### d / Les polymères

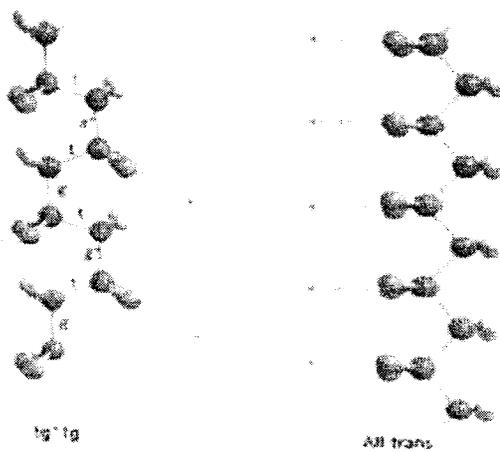


Figure I.7 : Structure du PVDF dans deux conformations différentes. Les sphères jaunes représentent les atomes de fluor.

Dans les deux cas, le polymère possède une polarisation électrique ; elle est alignée avec l'axe de la molécule dans la conformation dite  $tg^+tg^-$  (gauche), et perpendiculaire à l'axe dans la conformation all-trans (droite).

L'étude des effets piézoélectriques dans des polymères naturels d'origine biologique (cellulose, collagène etc.) remonte aux années 1950. La mise en évidence de l'effet piézoélectrique dans un polymère de synthèse, le polyvinylidène difluorure (PVDF)  $(-CH_2-CF_2-)_n$  polarisé, a été publiée en 1969 et a suscité un engouement pour ce thème de recherche. Dans l'industrie, ce sont essentiellement le PVDF et ses dérivés qui sont couramment utilisés.

Les propriétés piézoélectriques de ces polymères dépendent étroitement de leur conformation. Pour stabiliser le polymère sous une forme désirée, il est nécessaire de le soumettre à un procédé de polarisation, comme dans les céramiques. Comparés aux oxydes, les coefficients piézoélectriques et les couplages électromécaniques de ces polymères restent modestes : 12 à 15 % pour le PVDF et jusqu'à 30 % pour le co-polymère P(VDF-TrFE). Ils présentent de plus des pertes diélectriques élevées. En revanche, ils présentent d'autres propriétés qui les rendent très utiles : impédance acoustique plus faible, faible permittivité diélectrique, faible conductivité thermique. De plus, ils sont flexibles et on peut les fabriquer sur de grandes surfaces à des coûts modérés. Ils sont utilisés en couche mince de 6 à 25 microns pour la réalisation de transducteurs, d'hydrophones, de détecteurs etc.

### **e / Les sels :**

La famille des sels piézoélectriques comprend sel de Rochelle, ainsi que les composés de la famille de  $KH_2PO_4$ .

### I.3.2 Mise en forme :

Indépendamment de sa composition chimique, un matériau piézoélectrique peut être étudié et utilisé sous différentes formes. Chacune a des spécificités qui peuvent être mises à profit dans une situation donnée.

#### I.3.2.1 Monocristaux

Un monocristal est un arrangement régulier et périodique d'atomes. C'est sous cette forme que se présentent les matériaux piézoélectriques naturels comme le quartz ou la tourmaline, et c'est également sous cette forme qu'ils ont été utilisés dans les applications de première génération avant la mise au point des céramiques.

Les cristaux ferroélectriques peuvent posséder une structure en domaines. On distinguera alors les monocristaux *monodomains* et *polydomains* selon qu'une ou plusieurs directions de polarisation coexistent dans le cristal. Dans une description cristallographique, les cristaux polydomains ne sont pas rigoureusement des monocristaux mais des cristaux maclés ; l'usage est cependant de continuer à parler de monocristal.

Les coefficients piézoélectriques les plus élevés connus à ce jour sont obtenus pour des monocristaux polydomains. Dans la pratique, ils présentent des inconvénients qui limitent leur utilisation dans beaucoup de dispositifs : coût, disponibilité, etc.

### I.3.2.2 Céramiques

Une céramique est composée de grains soudés entre eux par frittage. Les grains sont orientés statistiquement dans toutes les directions ; leur taille peut être contrôlée par les conditions de fabrication.

C'est la forme la plus utilisée, principalement en raison de leur facilité de fabrication et des nombreuses propriétés qu'on peut obtenir en faisant varier la composition chimique, les paramètres de la fabrication, etc.

Si l'on parvient à donner aux grains de la céramique une orientation préférentielle, on obtient alors une *céramique texturée* dont les propriétés sont en général intermédiaires entre celles d'une céramique et celles d'un monocristal de même composition.

Parmi les céramiques piézoélectriques, on distingue les céramiques dites « dures » et « douces ». Ces deux types de céramiques se distinguent par différentes caractéristiques (champ coercitif, constante diélectrique, coefficient de couplage électromécanique plus ou moins fort... etc.).

### I.3.2.3 Composites

Dans un composite, le matériau piézoélectrique est divisé et plongé dans une matrice non piézoélectrique (une résine). Les composites ont montré leur intérêt par rapport aux céramiques conventionnelles dans le domaine des transducteurs acoustiques hautes fréquences pour l'imagerie : leur meilleur coefficient de couplage électromécanique et leur impédance acoustique plus adaptée permettent d'améliorer la résolution des images.



### I.3.2.4 Couches minces

La piézoélectricité est une propriété à la base des microsystemes électromécaniques (MEMS) comme les micromoteurs, les microvalves, les accéléromètres ou les membranes. Les avantages des couches minces piézoélectriques sont notamment leur faible puissance de fonctionnement, l'importance des forces générées et les larges gammes de fréquences d'utilisation. Les couches sont en général fabriquées par un procédé sol-gel et ont une épaisseur comprise typiquement entre 0,5 et 5 microns. Le matériau le plus utilisé est là aussi le PZT. Les coefficients piézoélectriques mesurés sur les couches minces sont plus faibles que ceux du matériau massif à cause de l'effet du substrat.

## II. Les ondes acoustiques

### II.1- Définition :

On sait depuis l'antiquité que le son est produit par la mise en vibration rapide d'un corps matériel (corde, plaque, pierre, membrane d'un haut-parleur), mais la notion de propagation de cette vibration dans l'air jusqu'à atteindre notre tympan n'est mise en évidence qu'avec les premières expériences réalisées avec la machine pneumatique d'Otto Von Guericke (1650). Cette vibration se propage dans l'air, de molécules à molécules, d'une manière un peu analogue à ce qui se passe dans un ressort dont on frappe brutalement une extrémité. La zone frappée se comprime puis se détend, transmettant aux spires voisines cette compression qui se propage ainsi d'un bout à l'autre du ressort.

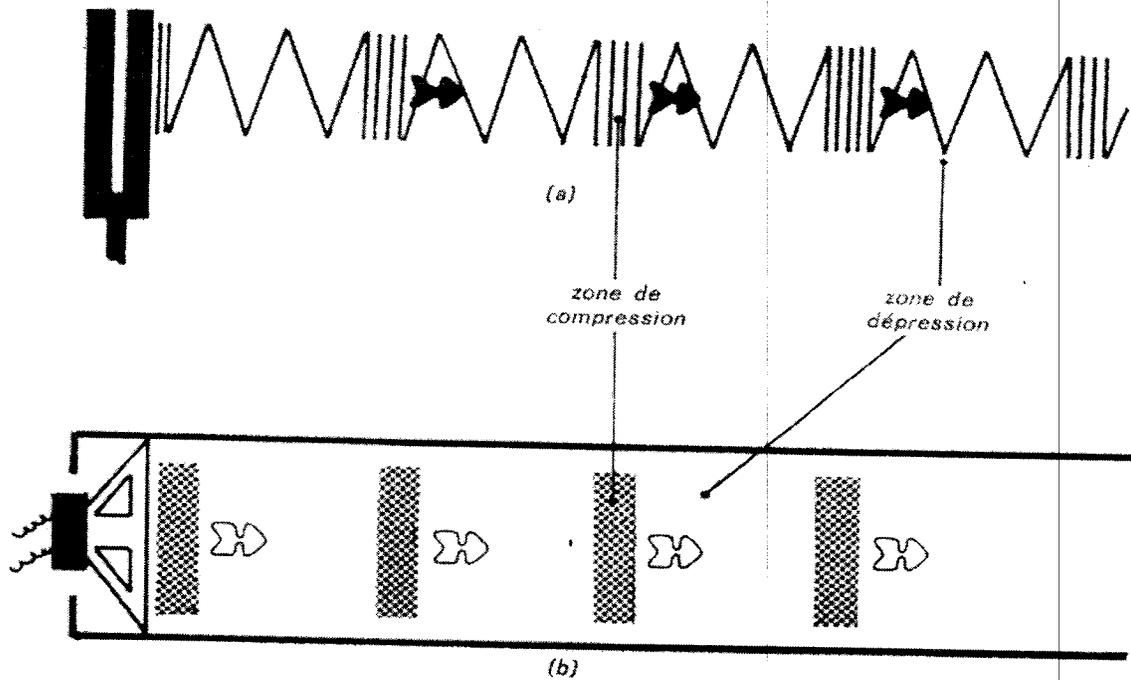


Figure I.8: ondes élastiques longitudinales en propagation dans un ressort (a) et un tuyau acoustique (b).

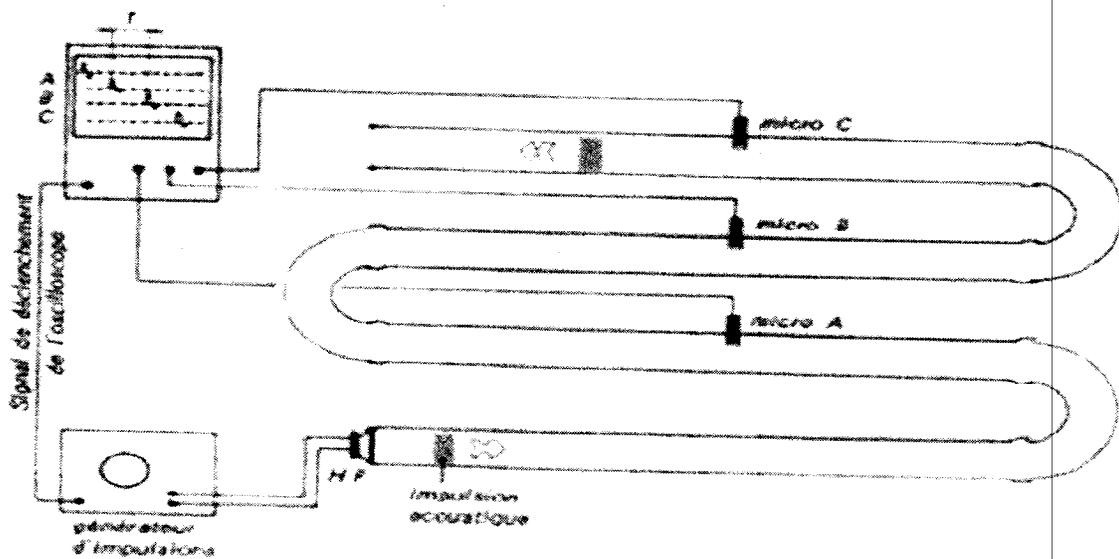
Une telle onde est dite onde élastique longitudinale car la propagation des ondes se fait dans le même sens que l'onde elle-même. Par comparaison, les ondes concentriques produites par un caillou jeté dans l'eau, sont dites transversales car le déplacement des ondes est perpendiculaire à l'onde elle-même qui agite l'eau sur un plan vertical.

Toute matière, liquide, solide ou gazeuse peut ainsi transmettre ces ondes élastiques longitudinales, que l'on appelle aussi des ondes acoustiques ou ondes sonores. Seul le vide rend toute transmission des ondes acoustiques impossible. Il faut donc toujours penser que le milieu de transmission détermine notre perception des sons. Ainsi donc, il est impossible d'entendre quoique ce soit à la surface de la lune.[4]

## II.2- Vitesse des ondes sonores

La vitesse des ondes sonores dépend des propriétés élastiques du milieu dans lequel elles se déplacent. Elle est en général d'autant plus grande que le milieu est rigide. Quelques valeurs à titre d'exemple : Acier 5200 m/s, Eau 1430 m/s, Hydrogène 1300 m/s, et Air 331,4 m/s (Valeurs données à 0°C avec une pression  $P=1$  atmosphère)

Les premières expériences sur le sujet ont eu lieu entre l'observatoire de Paris et Montlhéry en mesurant le temps s'écoulant entre la lueur d'un coup de canon tiré et le son lui correspondant. Une autre technique pour mesurer ces valeurs consiste à envoyer une impulsion sonore dans un tuyau de longue dimension comme le montre la figure



**Figure I.9:** mesure de la célérité  $c$  du son par méthode directe. Une impulsion acoustique émise par le haut-parleur HP atteint successivement les microphones A, B, C espacés de 10 m : l'intervalle du temps  $t$  apparaît sur l'écran de l'oscilloscope par la distance entre les pics correspondants ( $t = 30$  ms)



### II.3-La fréquence des ondes sonores

Outre la vitesse avec laquelle se propage l'onde sonore dans la matière, une de ses caractéristiques fondamentale est sa fréquence, qui est en fait la fréquence de vibration de la source. La fréquence d'un son est le nombre de vibrations effectué par seconde : 1 Hertz= 1 vibration par seconde

C'est aussi cette fréquence de vibration qu'impose le son aux matériaux qu'il parcourt.

Un diapason vibrant 440 fois par seconde émet donc des ondes dont la fréquence est 440 Hz et l'air qui l'entoure subit donc en chaque point 440 compressions et dépressions successives par seconde.

Les ondes sonore que peut percevoir l'oreille se situent entre les fréquences suivantes :

$16 \text{ Hz} < N < 16000 \text{ Hz}$  sons très graves sons très aigus

Ces valeurs sont une moyenne sachant que l'oreille de l'enfant perçoit des fréquences au delà des 20000 Hz alors qu'un adulte peut ne plus déceler des fréquences au dessus de 12000 Hz. Certains animaux peuvent percevoir des fréquences plus élevées que les nôtres. Le chiens perçoit jusqu'à des fréquences de 35000 HZ (ultrasons) et la chauve-souris se dirige en émettant des fréquences de 60000 Hz.

### II.4- La longueur d'onde

Si l'on reprend l'exemple du diapason 440 Hz, les ondes qu'il émet se propagent dans l'espace qui l'entoure à la même vitesse. Tous les points de sphères centrées sur le diapason sont atteints en même temps par le même mouvement

vibratoire qui suit une courbe sinusoïdale au cours du temps (on parle d'onde sinusoïdale). L'onde est dite "sphérique"

Les points de ces sphères vibrent simultanément mais  $1/440$  de sec plus tard l'onde a progressé de

$$1/440 \text{ s} \times 330 \text{ m/s} = 0,75 \text{ m}$$

On peut alors dire que tous les points des sphères se situant à  $0,75 \text{ m}$  les unes des autres vibreront toujours en phase pour une fréquence de  $440 \text{ Hz}$

La formule de calcul est :  $\lambda = c \times 1/F$  ( $\lambda$  est la longueur d'onde,  $c$  la célérité,  $F$  la fréquence de l'onde)

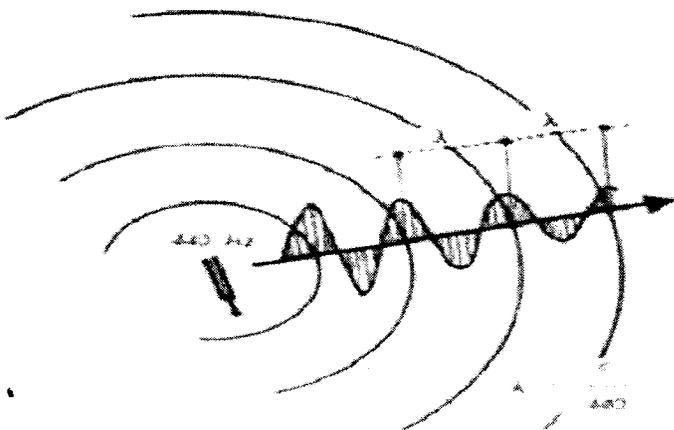


Figure I.10: les ondes sphériques rayonnées par le diapason dans l'espace ont une longueur d'onde  $\lambda = c/N$ , leur amplitude décroît en raison inverse de la distance (et leur intensité en raison inverse du carré de cette distance).

Alors que la fréquence  $F$  est une caractéristique de l'onde émise, la longueur d'onde  $\lambda$  dépend du milieu où le son se propage et peut changer si l'onde passe dans un autre milieu. Dans l'air les longueurs d'ondes pour les sons audibles sont de l'ordre du décimètre.

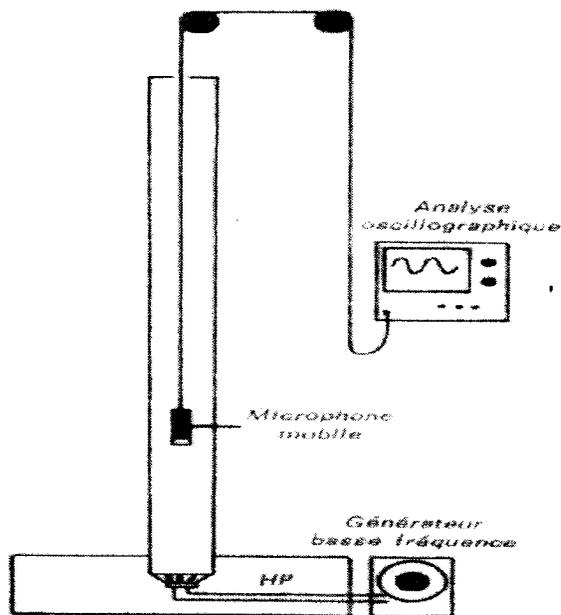


## II.5- Réflexion de sons, ondes stationnaires

Il suffit de mettre la tête sous l'eau pour se rendre compte que l'on entend plus les sons provenant du rivage. Les bruits produits sous l'eau au contraire sont parfaitement nets et d'une intensité supérieure. La surface de l'eau joue dans ce cas le rôle d'un obstacle infranchissable aux ondes sonores. Ceci s'explique par le fait qu'une onde qui se propage dans un milieu est en grande partie réfléchié lorsqu'elle tombe sur la surface d'un milieu aux caractéristiques différentes. Cette réflexion est d'autant plus grande que les caractéristiques de transmission des deux milieux sont éloignées.

Si l'on envoie une onde supposée plane dans un tube vertical fermé grâce à un haut-parleur situé à l'entrée de celui-ci. Arrivé au bout du tuyau, cette onde est réfléchié et revient en sens inverse. La colonne d'air contenue dans le tuyau est donc parcourue en permanence par des ondes de même longueur dans les deux sens. Ces ondes sont tantôt en phase et s'additionnent, tantôt en opposition de phase et s'annulent. Ce phénomène crée des zones où l'air vibre à son maximum, appelées ventres, et des zones où l'air ne vibre pas, appelées nœud, mais ces zones ne se déplacent pas dans le tuyau. C'est le principe des ondes stationnaires. La distance entre deux nœuds ou ventres consécutifs est d'une demi-longueur d'onde.

En déplaçant un micro dans un tube où l'on émet un 1000 Hz, il faudra déplacer le micro de 17 cm pour passer d'un nœud à l'autre.



**Figure I.11** : analyse du système d'ondes stationnaires pour la pression dans un tuyau sonore (tube de Kundt).

## II.6- Résonance acoustique

Si l'on donne des impulsions à un pendule en phase avec son cycle d'oscillation, sa fréquence de résonance, l'amplitude des impulsions va s'ajouter à son énergie propre. C'est le phénomène de résonance : La résonance est donc l'état d'un système vibratoire quelconque auquel une source extérieure fournit un apport d'énergie périodique en phase avec lui, et que le système donc indéfiniment. L'augmentation indéfinie de l'énergie d'oscillation est compensée par les pertes dues aux frottements qui dégradent l'énergie mécanique en chaleur ou au delà de ça par la destruction du système vibratoire.

Ce principe peut s'appliquer de manière simple à l'amplification du diapason 440 Hz. Ce diapason frappé a une intensité quasiment imperceptible à l'oreille, mais il reste une source vibrante qui peut exciter une boîte ouverte à une extrémité lorsqu'on le pose sur celle-ci. La longueur de la boîte devra être égale à  $l/4$ , soit approximativement 20 cm,  $l$  étant la longueur d'onde

correspondant à 440 Hz. La fréquence de résonance de la boîte est donc égale à celle du diapason. La masse d'air contenue dans la caisse entre en oscillations et pompe l'énergie du diapason. Les dimensions de la boîte étant importantes, le son devient audible par tous. Il n'y a pas eu d'utilisation d'énergie, mais simplement amplification de l'amplitude de l'onde émise par le diapason par la mise en résonance de la boîte. Ce système est celui utilisé pour les caisses de résonances des instruments acoustiques (guitare, piano, violon).

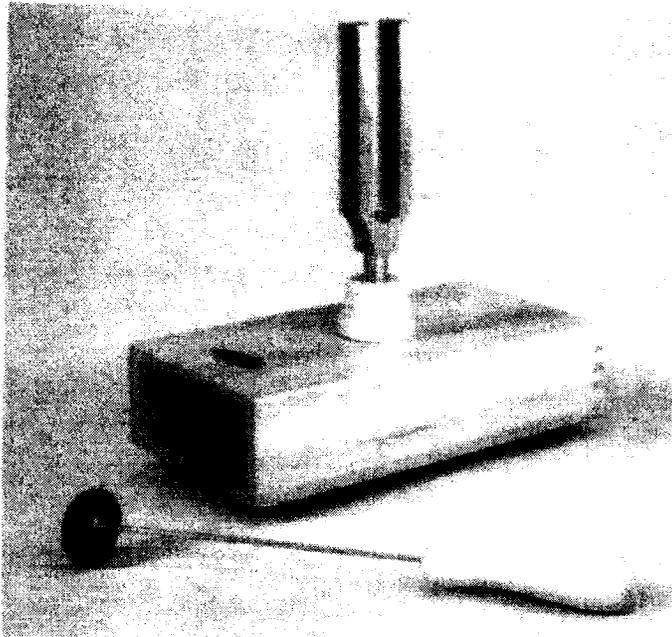


Figure I.12: diapason normal (La 440) monté sur sa caisse de résonance accordée.

## II.7- Les interférences acoustiques

Les ondes sonores de mêmes fréquences issues de deux sources différentes (deux haut-parleurs) donnent lieu à un phénomène d'interférence. Les ondes vont se rencontrer en certains points tantôt en phase tantôt déphasées. Ce phénomène est difficile à entendre lorsqu'on se déplace entre les deux haut-



parleurs, mais il y a un cas où il se manifeste de manière flagrante. Sur une chaîne stéréo, on envoie les deux mêmes signaux à gauche et à droite, en inversant le branchement des câbles reliant l'amplificateur et les haut-parleurs. Le mouvement des deux membranes sera synchrone mais en opposition de phase. Si l'on se met exactement au milieu des deux hauts parleurs les deux signaux arriveront à notre oreille déphasés, et on entendra une baisse de la puissance acoustique du signal. Inverser le sens du branchement sur un des haut-parleurs corrige instantanément ce problème. Ce principe d'inversion de phase donne aussi lieu à des recherches de système de protection antibruit tels que casques mur dynamique, ...etc.

## II.8- Intensité et puissance acoustique

Une onde acoustique transmet de l'énergie à travers le milieu où elle se propage. L'intensité acoustique est définie par la quantité d'énergie qui traverse à chaque seconde une unité de surface parallèle au front d'onde. Cette intensité acoustique s'exprime en watts par  $m^2$ . Elle est proportionnelle :

- ▶ à la densité des matériaux traversés par cette onde.
- ▶ à la vitesse de propagation dans ce matériau et proportionnelle au carré :
- ▶ de l'amplitude et de la fréquence de cette onde.

Dans l'air, la densité moléculaire étant peu élevée, il est difficile d'obtenir des intensités acoustiques importantes. Dans un liquide ou un solide, de très petites amplitudes (1/10 000 mm) suffisent en haute fréquence pour obtenir des intensités très importantes.

A titre d'exemple, un haut-parleur dont la membrane a une amplitude de 1/10 mm à 1000 Hz émet une intensité acoustique de  $100W/m^2$  dans l'air. Dans l'eau, un ultrason de 1 MHz, dont l'amplitude à la source est de  $10^{-5}$  mm correspond à une intensité acoustique de  $4000 W/m^2$ .

## II.9. Les ultrasons

On peut produire ceux-ci avec des sifflets, similaires à ceux audibles, mais avec des cavités de résonance beaucoup plus petites (environ  $1 \text{ mm}^2$ ). Ces systèmes acoustiques ne peuvent pas produire des fréquences très élevées. On utilise alors d'autres dispositifs d'émission :

-L'émission piézo-électrique : Soumise à une tension électrique de 3000 Volts, une lame de cristal se contracte de  $70 \text{ A}^\circ$ . Si l'on applique à cette lame un courant alternatif de la même puissance, cette lame va se mettre à se contracter, dilater selon la fréquence du courant. Immersée dans l'eau, cette lame va propager ces vibrations et créer une onde élastique dans ce milieu.

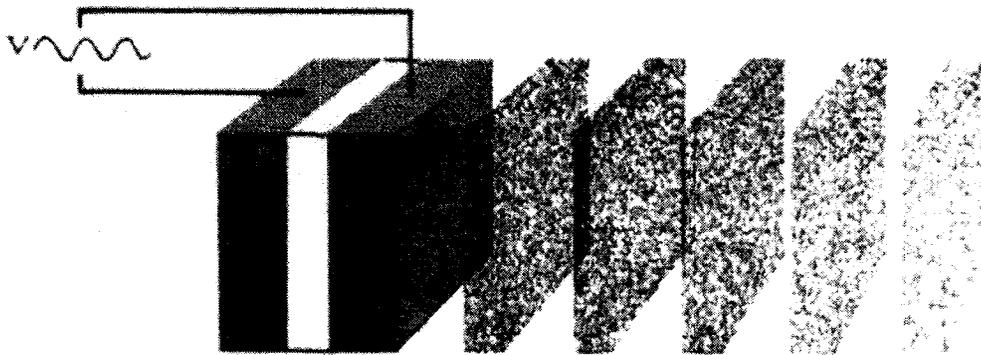


Figure I.13: émission d'ultrasons par oscillation piézoélectrique de la lame de quartz.

Une telle lame possède des fréquences de résonance définies par la formule suivante :  $v = k \times c / 2e$  ( $c$  = célérité du son dans le quartz,  $e$  = épaisseur de la lame,  $k$  = nombre entier)

Si l'on excite cette lame à sa fréquence fondamentale, l'amplitude des ondes sera plus importante, et l'intensité du signal plus élevée (phénomène de résonance). Compte tenu de la vitesse du son dans le quartz, une lame de  $1 \text{ mm}$

aura une fréquence de résonance de 2,5 Mhz. Pour obtenir des fréquences de résonance plus élevées (50 000 Hz), il faudrait donc des lames tellement épaisses, qu'on ne trouverait pas de cristal assez gros pour les tailler dedans. On a réglé ce problème en encadrant la feuille de cristal par deux lames de métal, dont la fréquence de résonance est voisine. Dans ce cas là, la lame de cristal transmet ses vibration aux lames de métal, faciles à produire à une épaisseur élevée, et l'ensemble peu produire des vibrations à des fréquences plus hautes (ondes radio ou télévision par exemple). Actuellement, la lame de cristal est souvent remplacée par une lame de céramique.

## Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons parlé de façon générale sur le phénomène de la piézoélectricité et les matériaux piézoélectriques. Après ça nous avons parlé sur les ondes acoustiques et ses propriétés physiques, tout ceci nous permettra d'aborder l'étude et la réalisation de dispositifs basés sur la propagation de ces ondes dans les solides, et d'analyser et comprendre tous les phénomènes physiques qui peuvent s'y produire. Nous reviendrons sur l'étude des dispositifs à ondes acoustiques de surface et de volume au chapitre II.

**Bibliographie**

[1]: [http: www.wikipédia/piézoélectricité.com](http://www.wikipédia/piézoélectricité.com).

[2]: Frédéric Giraud, " Modélisation Causale et Commande d'un Actionneur piézo-électrique à Onde Progressive", thèse de Doctorat de l'Université Lille I (Spécialité Génie Electrique),2002.

[3]: Andreia CATHELIN (STMicroelectronics) et Valérie MADRANGEAS (XLIM), "Développement d'architectures de filtres à base de résonateurs à ondes acoustiques de volume et contribution à l'intégration dans une technologie avancée silicium industrielle pour des applications radio-fréquences", Thèse pour obtenir le grade de docteur de l'université de limoges, 2007.

[4]: Par François Parra "Ondes acoustiques, caractéristiques, unités de mesure, applications "([http/www.ecole-art-aix.fr/article1861.html](http://www.ecole-art-aix.fr/article1861.html))

[5]: Michel Brissaud " Matériaux piézoélectriques, caractérisation, modélisation et vibration" p.52.

## Chapitre II : Les dispositifs à ondes acoustiques



## I. Introduction:

La question de la propagation des ondes élastiques dans les milieux piézoélectriques est particulièrement importante dans la mesure où un très grand nombre d'applications de la piézoélectricité en tirent parti.

Dans un piézoélectrique, les propriétés électriques et élastiques étant couplées, il est en principe nécessaire de résoudre le problème en considérant conjointement les équations de l'élasticité et les équations de Maxwell. Le traitement de problème complet est parfois appelé « piézoélectromagnétisme ».

Dans la pratique, les ondes acoustiques que l'on considère ont des fréquences inférieures de plusieurs ordres de grandeurs à celles des ondes électromagnétiques. On se contente donc d'une approximation quasi-statique en complétant les équations classiques de l'élasticité par les équations de l'électrostatique. On néglige ainsi le rôle du champ magnétique [1]

Les ondes élastiques se propagent dans tout milieu matériel : fluide, solide homogène ou inhomogène, isotrope ou anisotrope. Cependant, leur amplitude décroît au cours de la propagation car les liaisons entre atomes, ou entre molécules ne sont pas purement élastiques.

L'atténuation des ondes est d'autant plus faible que le milieu est ordonné. Ainsi, un solide amorphe ou polycristallin donne lieu à des pertes plus importantes qu'un monocristal. D'autre part, en raison de l'anisotropie des cristaux, certaines directions sont plus favorables que d'autres à la propagation d'un type d'onde.

La génération de l'onde se fait à l'aide de deux électrodes (transducteurs interdigités IDTs) déposés à la surface de la couche piézoélectrique. La tension appliquée à l'IDT émetteur est convertit en onde élastique se propageant à la surface, cette onde est reconvertis en tension électrique par l'IDT récepteur.

Les ondes élastiques qui se propagent dans les solides sont généralement appelées ondes acoustiques. Si ces ondes se propagent dans un milieu, continu et infini, elles sont appelées ondes de volume.

La compréhension de la piézoélectricité repose sur la compréhension du couplage entre les équations décrivant les contraintes mécaniques et électriques dans les matériaux piézoélectriques. Les composants du vecteur de polarisation et du tenseur de contraintes peuvent être reliés par la piézoélectricité, propriété non simple, décrite par un nombre important de constantes.

Les ondes acoustiques peuvent se propager parallèlement (figure 1.a.) ou perpendiculairement à la direction de polarisation (figure 1.b.) appelées ondes de Rayleigh, ondes de Love, ondes de Lamb, Ondes de Bleustein- Gulyaev, les pseudos ondes de surface, etc [2].

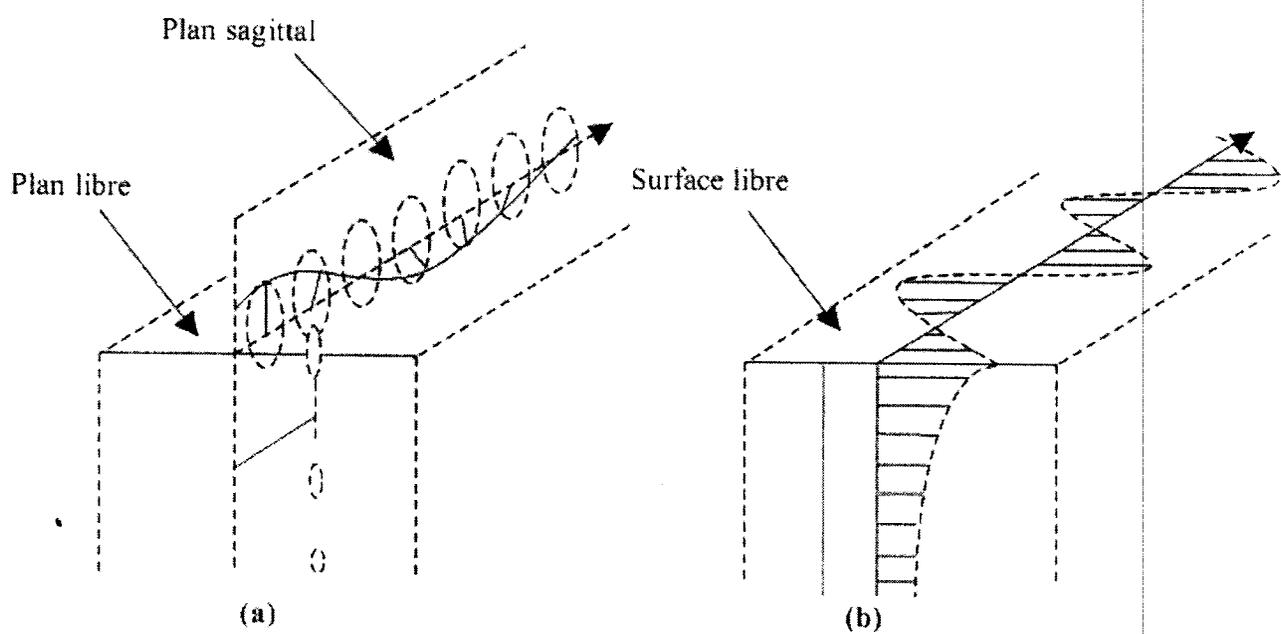


Figure II.1 (a) : Onde de Rayleigh (longitudinale) se propageant à la surface d'un matériau isotrope

Figure II.1 (b) : Onde de Bleustein-Gulyaev (transversale) se propageant à la surface d'un matériau piézoélectrique.

## II. Structures à ondes acoustiques de surface (SAW) :

La technique de croissance, les conditions de croissance (pression, température, ...) et la géométrie du bâti utilisé conditionnent la qualité du film piézoélectrique par le nombre de défauts et d'impuretés et par conséquent la texture et l'état de surface de celui-ci. Ces paramètres ont une influence sur le coefficient de couplage électromécanique ( $K^2$ ), lié à la faculté du film à transformer l'énergie mécanique en énergie électrique, sur le facteur de qualité (Q) qui permet d'évaluer les performances électriques donc lié à la compatibilité technologique entre les techniques de croissance du film piézoélectrique et du métal utilisé pour fabriquer les électrodes et sur le coefficient de stabilité de la fréquence en fonction de la température (TCF : Temperature coefficient of frequency).

Les structures à ondes élastiques de surface sont des composants qui transforment via des transducteurs inter-digités (IDT) déposés sur un matériau piézoélectrique un signal électrique en onde acoustique de surface (figure II.2). Lorsqu'on applique une tension électrique alternative à une des électrodes, un champ de déformation est généré dans le cristal piézoélectrique et les ondes sont émises de chaque côté du transducteur. La transformation inverse se produit également : acoustique en électrique.

Les dispositifs à ondes acoustiques de surface sont constitués d'un substrat piézoélectrique ou d'une structure multicouches composée au moins d'un film mince piézoélectrique déposé sur un substrat piézoélectrique ou non piézoélectrique. Des électrodes métalliques, généralement en Or ou en Aluminium, sont ensuite structurées en IDT, par la technique de lithographie optique et de gravure sur le substrat ou la structure choisie. Le transducteur à électrodes inter-digitées comprend, comme l'indique la figure II.2, deux électrodes métalliques en forme de peignes déposées sur un substrat piézoélectrique. La tension électrique appliquée entre les deux électrodes crée un champ électrique qui engendre des déformations au voisinage de la surface donnant naissance à la propagation d'ondes élastiques (figure II.3)

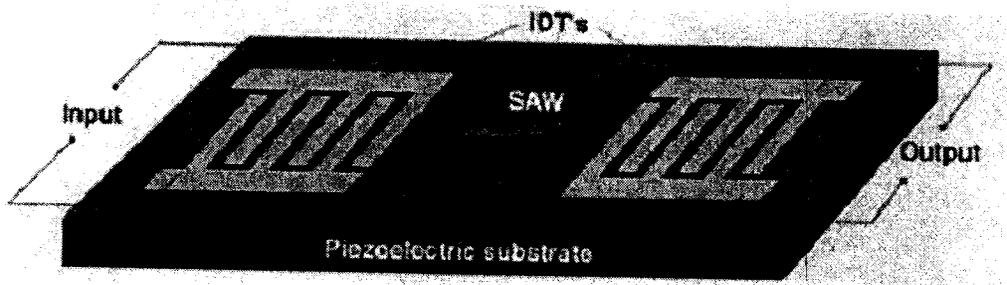


Figure II.2 : Dispositif à ondes acoustiques de surface (SAW) [3]

La géométrie des IDT (figure II.3.) et les caractéristiques du matériau piézoélectrique conditionnent les performances du dispositif à savoir la fréquence centrale, la bande passante, la réjection, le temps de retard, etc.

Les dispositifs SAW peuvent être réalisés soit en structures monocouches ou en multicouches. Les structures multicouches (figure II.4) permettent de combiner plusieurs caractéristiques intéressantes pour les SAW : une grande vitesse élastique, un fort couplage, une grande stabilité en température. Les transducteurs d'entrée et de sortie sont constitués d'électrodes métalliques en forme de peigne de doigts interdigités dont l'écartement est de l'ordre de  $\lambda/4$ .

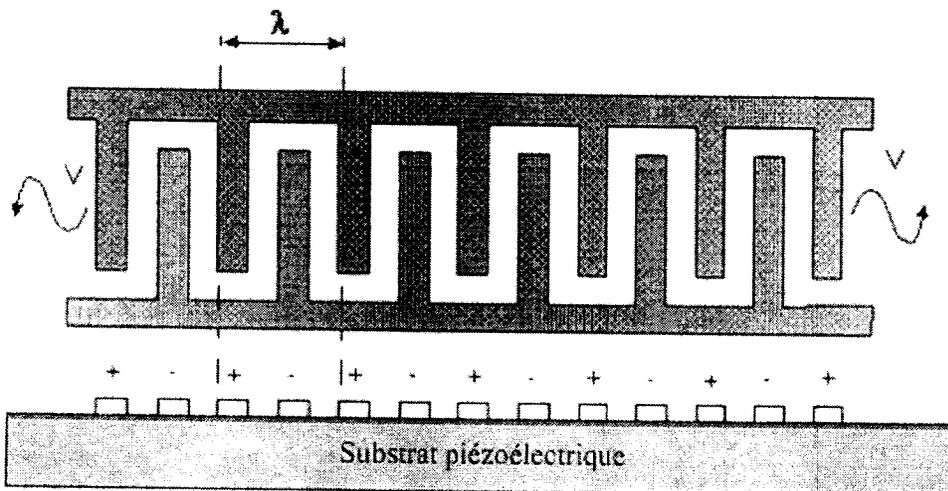


Figure II.3. : Configuration des électrodes inter-digitées dans les SAW

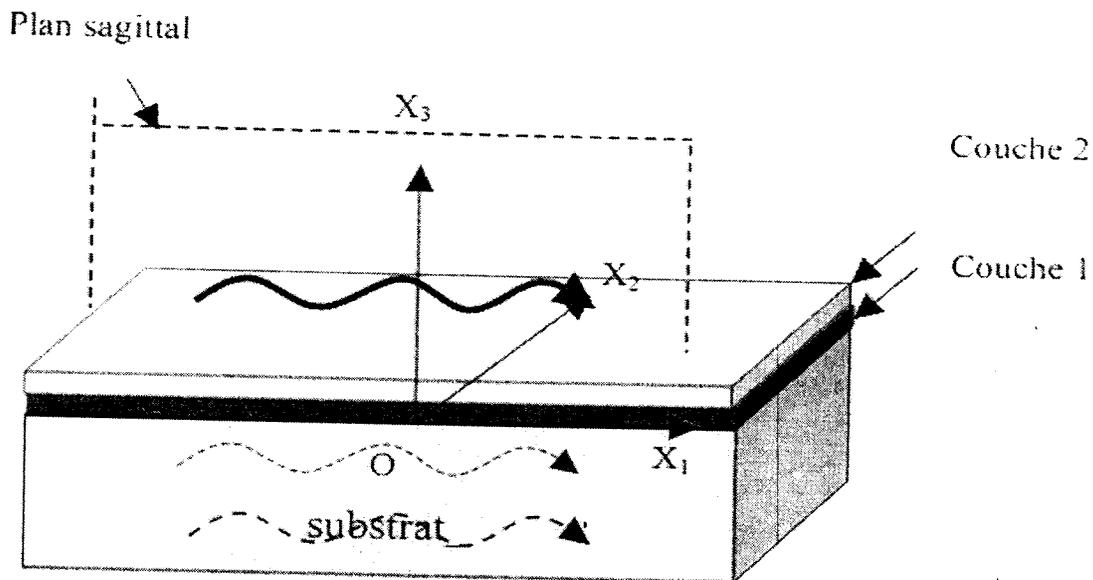


Figure II.4 : Propagation d'onde acoustique dans une structure bicouche, (Le champ électrique étant parallèle à l'axe X3)

Lorsque la tension appliquée est sinusoïdale, les vibrations émises par chaque paire de doigts s'ajoutent de façon constructive seulement si la longueur d'onde du signal est égale à la période du transducteur, il y a alors un effet cumulatif à la fréquence de résonance dite aussi fréquence de synchronisme :

$$f_0 = \frac{V}{\lambda} \quad (\text{II.1})$$

$V$  : vitesse de propagation de l'onde élastique

$\lambda$  : Période du transducteur.

La fonction de transfert d'un transducteur à  $N$  doigts peut se déduire de sa réponse impulsionnelle. Si on applique au transducteur une impulsion dont la durée est inférieure au temps de transit de la vibration entre deux doigts alors les différentes paires de doigts sont polarisées simultanément. Comme le champ électrique s'inverse à chaque intervalle entre doigts, le signal élastique émis est périodique de période spatiale  $\lambda$ . La durée  $\Delta t$  du signal émis est alors donnée par :



$$\Delta t = \frac{L}{V} \quad (\text{II.2})$$

L : la longueur active du transducteur.

Si on considère que le transducteur est composé de N doigts alors :

$$\Delta t = \frac{(N-1)}{2f_0} \quad (\text{II.3})$$

En assimilant la réponse impulsionnelle à une sinusoïde de fréquence f et de durée  $\Delta t$ , la fonction de transfert correspondant à la transformée de Fourier de la réponse impulsionnelle est de la forme :

$$H_{IDT}(f) = \frac{\sin(\pi\Delta t(f - f_0))}{\pi\Delta t(f - f_0)} \quad (\text{II.4})$$

La bande passante à -3dB est inversement proportionnelle au nombre de doigts :

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{1.77}{N-1} \quad (\text{II.5})$$

Pour relever la réponse impulsionnelle d'un transducteur, il faut transformer le signal élastique émis en un signal électrique à l'aide d'un transducteur récepteur. La forme de ce signal dépend du nombre de doigts du récepteur.

Les figures II.5.a et II.5.b. montrent la réponse impulsionnelle d'une ligne à retard munie de deux transducteurs. L'émetteur est constitué de 10 doigts et le récepteur de 4 doigts.



La fréquence centrale est de l'ordre de 43MHz (figure II.6.). Cette ligne a été réalisée sur un substrat de niobate de lithium.

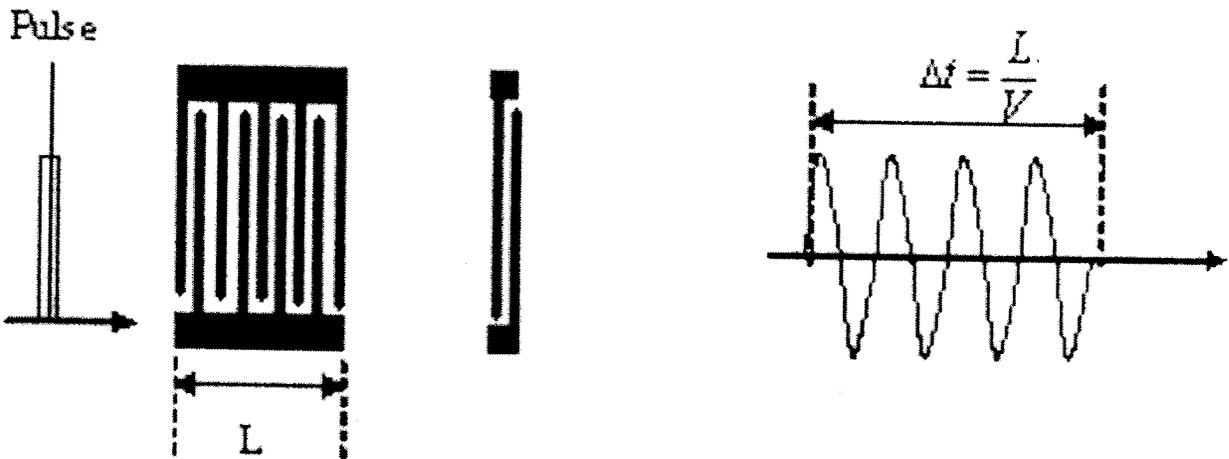


Figure II.5.a : Réponse impulsionnelle dans le cas d'un récepteur a une seule paire de doigts

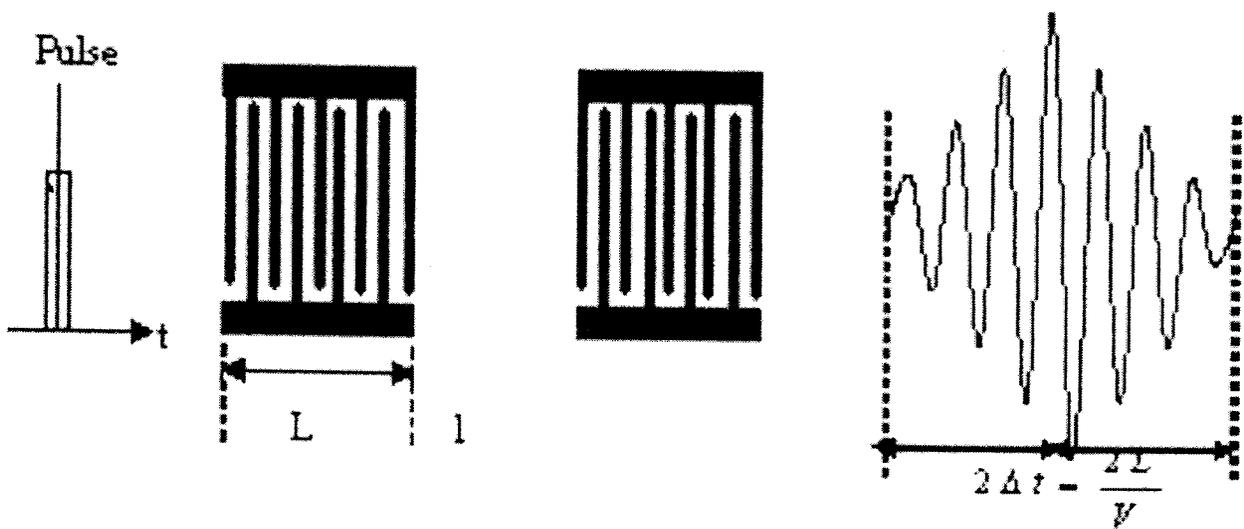


Figure II.5.b : Réponse impulsionnelle dans le cas d'un récepteur identique a l'émetteur

La fréquence centrale est de l'ordre de 43MHz. Cette ligne a été réalisée sur un substrat de niobate de lithium.



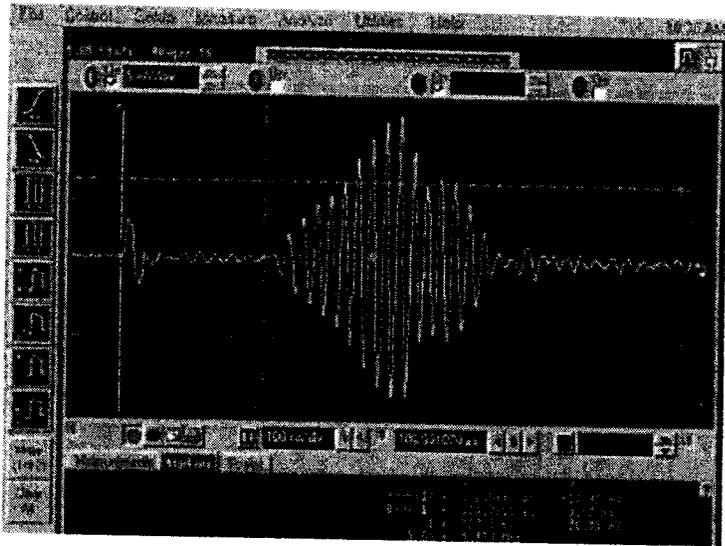


Figure II.6 : Réponse impulsionnelle d'une ligne à deux transducteurs et de fréquence centrale de 43MHz

Les transducteurs dans les SAW peuvent être de différents types, ils peuvent être bidirectionnels ou unidirectionnels (SPUDT)

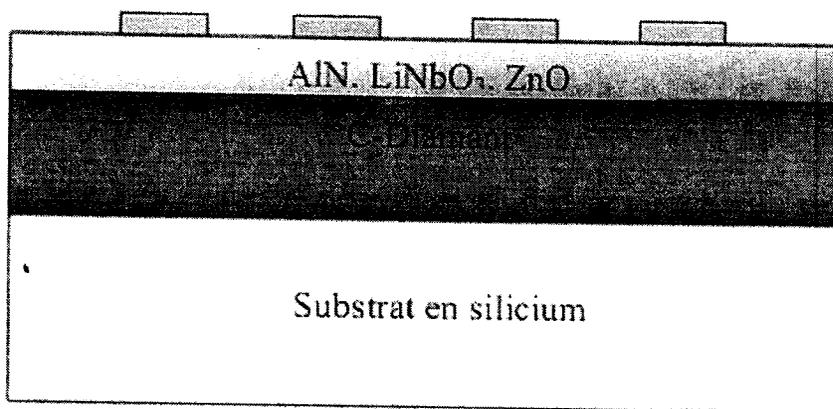


Figure II.7 : Les différentes couches d'un dispositif à onde acoustique de surface en multicouches



## II.1 Types de transducteurs

### a / Transducteurs bidirectionnels :

Les doigts formant les transducteurs interdigités sont généralement espacés de la moitié ou du quart de la longueur d'onde qui correspond à la fréquence centrale de fonctionnement. Les transducteurs basiques qui génèrent les ondes acoustiques de surface sont généralement appelés transducteurs bidirectionnels. En effet, la moitié de la puissance émise par le transducteur d'entrée est dirigée vers le transducteur de sortie et l'autre moitié, perdue, est émise dans la direction opposée, ce qui introduit une perte de 6dB pour les deux transducteurs qui est due à cette bidirectionnalité. Afin de s'affranchir de ces problèmes de pertes, un autre type de transducteur a été développé. Dans le sous-paragraphe qui suit, on traitera le mode de fonctionnement de ces transducteurs [4].

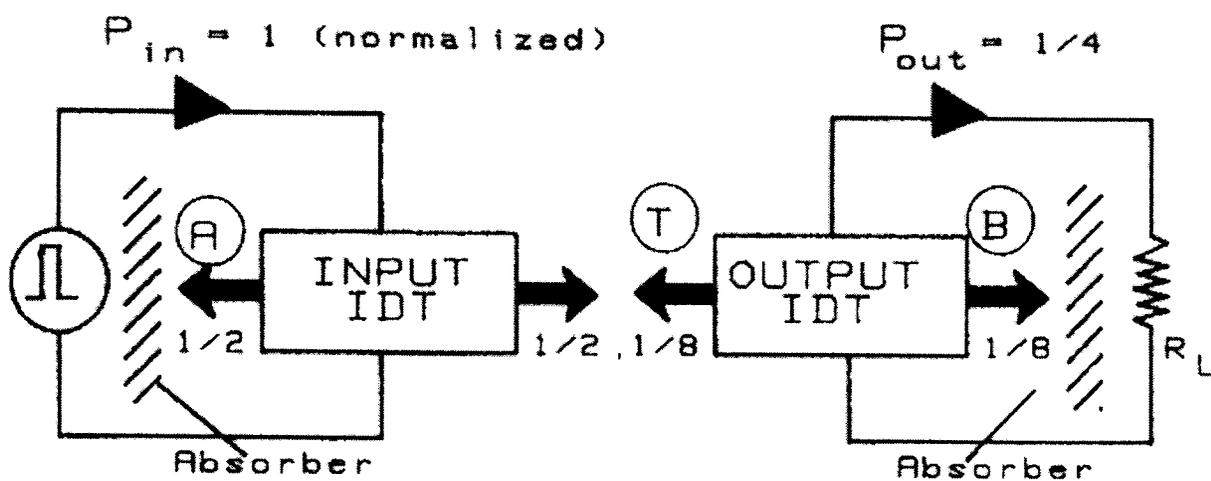


Figure II.8: Puissances émises et récupérées par les IDTs bidirectionnels

### b / Transducteurs unidirectionnels (SPUDT):

Ces transducteurs appelés: transducteurs unidirectionnels ont été développés dans la dernière décennie dans le but de réduire les pertes inhérentes dues à la bidirectionnalité.

Le principe de fonctionnement consiste à faire introduire des électrodes passives entre les parties du transducteur ou à créer des dissymétries dans la structure qui privilégie l'émission dans le sens désiré. Les dissymétries introduites sont sous forme de réflecteurs, électrode passive ou scission d'électrodes (transducteurs à doigts doubles).

Un autre type de transducteur unidirectionnel a été proposé par Kadota et al. L'arrangement basique de ce transducteur est schématisé sur la figure II.9. Ce type de transducteur est appelé DART (Distributed Acoustic Reflection Transducer), puisqu'il est constitué de plusieurs éléments réflecteurs distribués dans ces régions entières. Dans cette configuration, il existe deux sources qui induisent la réflexion d'une onde incidente. La première est l'effet de la perturbation des doigts et le deuxième est l'effet de la régénération piézoélectrique du transducteur; son effet dépend de la charge du transducteur.

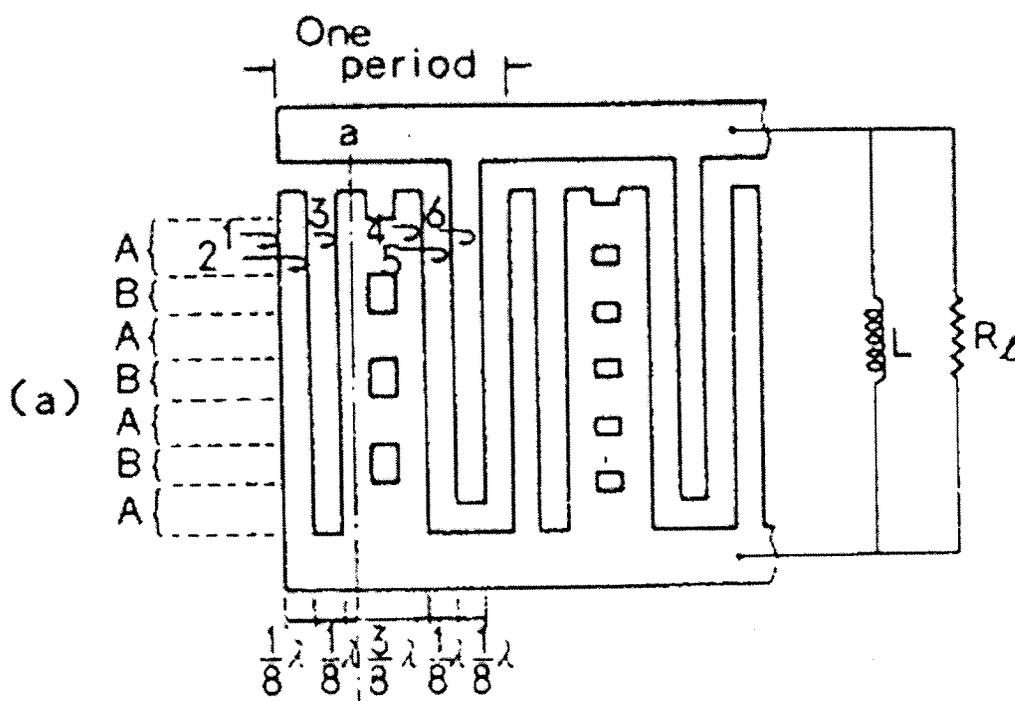


Figure II.9: Configuration basique d'un transducteur DART

### III. Structures à ondes acoustiques de volume (BAW):

La construction des filtres passe-bande à partir des résonateurs BAW telle qu'on la connaît aujourd'hui est relativement récente avec une histoire qui débute dans les années 80. Mais son ancêtre n'est autre que le résonateur à quartz développé au début du XXème siècle pour les applications base de temps et filtrage [5].

Les dispositifs à ondes acoustiques de volume sont constitués d'un monocristal ou d'un film mince piézoélectrique pris en sandwich entre deux électrodes. Le matériau piézoélectrique, le plus célèbre est le quartz. La fabrication d'un résonateur à quartz consiste à tailler un morceau de cristal de quartz massif en fonction de la résonance voulue. Dans le cas d'une excitation longitudinale, le résonateur est pris en sandwich entre deux électrodes métalliques, c'est la configuration du dispositif à onde acoustique de volume.

La fréquence de résonance dans les dispositifs à ondes acoustiques de volume dépend de la vitesse de propagation des ondes acoustiques dans la couche piézoélectrique et de l'épaisseur de la couche piézoélectrique ( $e$ ) ou de l'épaisseur du quartz :

$$f_0 = \frac{V_{AIN}}{2e} \quad (II.6)$$

La fréquence de fonctionnement étant inversement proportionnelle à l'épaisseur du film. Pour augmenter la fréquence de résonance du dispositif à ondes acoustiques de volume, il faut que la couche piézoélectrique soit de faible épaisseur. La fréquence de résonance des résonateurs à ondes de volume dépend de la vitesse de propagation d'un mode donné généré dans la couche piézoélectrique, de l'épaisseur de celle-ci, des électrodes et du design du support.

L'AlN est préféré au ZnO dans la fabrication des dispositifs à ondes acoustiques de volume car il présente une meilleure compatibilité avec le silicium, une vitesse



acoustique supérieure dans le volume, une meilleure résistivité électrique, une masse volumique plus grande et une bande interdite plus large.

Dans des travaux récents, il a été possible de générer des ondes à des fréquences de l'ordre du GHz dans des dispositifs BAW, mais ces ondes sont atténuées par le support du dispositif. Il est alors nécessaire de trouver le moyen d'isoler acoustiquement un tel dispositif en utilisant une membrane de silicium par exemple. Pour limiter les pertes d'énergie dans le substrat, trois configurations de résonateurs ont été proposées, Les dispositifs à ondes acoustiques de volume ayant été développés faisant appel aux techniques de la micro-technologie: les résonateurs à ondes de volume à membrane FBAR (Film Bulk Acoustic Resonator), les résonateurs à gap d'air AGR (Air Gap Resonator) et résonateurs supportés par un miroir de Bragg SMR (Solidely Mounted Resonator).

La première configuration est celle du FBAR à membrane (back-etched). Cette structure repose sur une membrane micro-usinée dans un substrat massif. Elle est constituée de transducteurs gravés sur un substrat non piézoélectrique de faible épaisseur. Les principales étapes de la fabrication sont le dépôt de la couche piézoélectrique sur un substrat puis la gravure sélective du substrat.

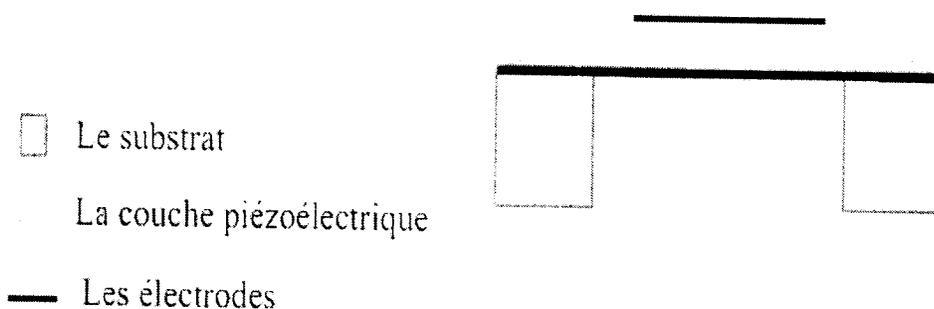


Figure II.10.a : Dispositif à ondes acoustiques de volume de type FBAR (Film Bulk Acoustic Resonator)

On utilise la technique de gravure pour amincir au maximum le substrat au centre et à laisser le dispositif supporté uniquement sur les côtés (voir la figure II.10.a.). Pour

cela, on dépose une fine couche protectrice sur le silicium qu'on ne désire pas graver puis on immerge le dispositif dans une solution de gravure sélective pour graver uniquement le silicium non protégé.

L'inconvénient de ce type de structure provient des contraintes mécaniques exercées sur la membrane, qui a tendance à se déformer.

La seconde configuration est celle de l'AGR (figure II.10.b), elle nécessite la fabrication d'un gap d'air entre le résonateur et le substrat. En pratique, on dépose successivement sur le substrat une couche sacrificielle puis la couche active. A l'aide d'une solution sélective, on élimine ensuite la couche sacrificielle, on obtient alors une cavité d'air sous la couche active.



Figure II.10.b : Dispositif à ondes acoustiques de volume de type AGR (Air Gap Resonator)

Un résonateur à base d'AlN a été réalisé par Jae Y park et al suspendu sur membrane Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> fonctionnant à 2GHz. Le facteur de qualité avoisine 1530. Il a été également possible de réaliser des résonateurs à gap d'air sans membrane.

Le SMR est caractérisé par une plus grande résistance aux contraintes mécaniques mais sa fabrication nécessite un temps plus long il est en effet composé de plusieurs couches (réflecteur de Bragg). Il est important de noter que les propriétés du résonateur soient aussi stables que possible en particulier lorsque la température varie. En choisissant l'oxyde de silicium comme couche mince à faible impédance pour le miroir de Bragg il est possible de compenser partiellement le coefficient de



température (TCF) négatif du résonateur. Un tel dispositif a été également fabriqué. De très bonnes performances ont pu être obtenues à base de ZnO sur un substrat de 2" dans lequel le réflecteur de Bragg est composé de 7 couches alternées de SiO<sub>2</sub> (350nm) et de tungstène (600nm). Une fréquence de résonance de 2GHz a été obtenue avec un facteur de qualité de 4000 et des pertes d'insertion de 1dB.

K.M. Lakin et son équipe ont fabriqué deux résonateurs SMR à base d'AlN avec une isolation à 9 niveaux AlN/SiO<sub>2</sub> en utilisant un matériau piézoélectrique pour fabriquer le réflecteur de bragg. La fréquence de résonance du premier résonateur est de 5GHz avec un facteur de qualité de 670 et le second résonne à 20GHz avec un facteur de qualité de 300.

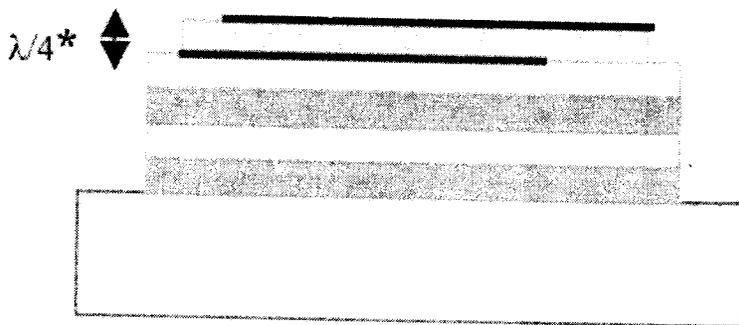


Figure II.10.c : Dispositif à ondes acoustiques de volume de type SMR (Solidly Mounted Resonator)



#### IV. Tenseurs des déformations et des contraintes:

L'effet direct du phénomène de la piézoélectricité a été découvert par Pierre et Jaques Curie en 1880. Ils ont remarqué qu'une déformation mécanique peut générer une polarisation électrique. L'effet inverse, la possibilité de produire une déformation mécanique par l'application d'un champ électrique fut suggéré théoriquement par Lippman l'année suivante et confirmée expérimentalement par les frères Curie. Voight fut le premier à introduire la notation tensorielle pour décrire le comportement électrique et élastique des cristaux.

Un cristal piézoélectrique subit une oscillation suite à une stimulation électrique appliquée par des électrodes.

Les solutions sont des ondes élastiques de vitesse  $v$  accompagnées d'un champ électrique, et des ondes électromagnétiques de vitesse  $c \sim 10^5 v$  accompagnées d'une déformation mécanique.

Physiquement, les vibrations élastiques nécessitent un déplacement de matière, ce qui leur confère une vitesse de déplacement bien inférieure à celle d'un champ électrique.

Les ondes élastiques se propagent dans les milieux solides isotropes, illimités, ceci revient à supposer que les dimensions du milieu sont grandes devant les dimensions du faisceau d'ondes et que les effets de bord sont négligeables.

##### IV.1. Tenseur des déformations :

Lorsqu'un solide est soumis à l'action d'une contrainte, il se déforme c'est-à-dire qu'il change de forme et de volume. Un corps est parfaitement élastique si cette déformation disparaît lorsque les contraintes sont supprimées. Si une déformation permanente subsiste, le corps est appelé plastique. Pratiquement, les solides usuels peuvent être considérés comme parfaitement élastique à condition de ne pas dépasser une valeur limite maximale des contraintes extérieures. Au delà de cette limite le



matériau passe du domaine élastique au domaine plastique. Si cette limite n'est jamais atteinte en aucun point du milieu, le solide présente un comportement linéaire.[6]

Soit un point M d'un solide non déformé, de coordonnées  $x_1, x_2, x_3$  définies dans un repère orthonormé  $(O, x_1, x_2, x_3)$  par le vecteur position suivant :

$$\mathbf{OM} = x_1 \cdot \mathbf{x}_1 + x_2 \cdot \mathbf{x}_2 + x_3 \cdot \mathbf{x}_3. \quad (\text{II.7})$$

Lorsque le solide est soumis à des contraintes extérieures, il se déforme et le point M se déplace en M' de coordonnées  $x'_1, x'_2, x'_3$ . Le déplacement du point M sera défini par le vecteur  $\mathbf{u}$  reliant OM et OM', soit :

$$\mathbf{u} = \mathbf{OM}' - \mathbf{OM} \quad (\text{II.8})$$

ou encore en projection

$$u_i = x'_i - x_i, \quad (\text{II.9})$$

avec  $i = 1, 2, 3$ . Les déformations, à l'intérieur du corps, sont définies par le tenseur de rang deux, symétrique, appelé tenseur des déformations :

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \right) \quad (\text{II.10})$$

avec  $i, j, l = 1, 2, 3$ . Les déplacements étant supposés infiniment petits, les termes produits d'un ordre supérieur à un sont négligés. Dans ces conditions, le tenseur des déformations devient :

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (\text{II.11})$$

En l'absence de déformation initiale, ce tenseur de rang deux est symétrique ( $S_{ij} = S_{ji}$ ).

La paire d'indice  $(ij)$  où  $i$  et  $j$  varient de 1 à 3 peut être remplacée par un seul indice  $\alpha$  variant de 1 à 6 en utilisant la règle de contraction des indices due à Voigt :



$$\begin{aligned}
 & (ij) \rightarrow \alpha \\
 & (11) \rightarrow (1) \quad (22) \rightarrow (2) \quad (33) \rightarrow (3) \\
 & (23) = (32) \rightarrow (4) \quad (31) = (31) \rightarrow (5) \quad (12) = (12) \rightarrow (6)
 \end{aligned} \tag{II.12}$$

Le passage d'une représentation tensorielle ( $3 \times 3$ ) à une représentation vectorielle dans l'espace à 6 dimensions est donc possible sous ces notations :

$$\begin{aligned}
 S_\alpha &= S_{ij} \quad \text{si } i=j \quad \text{où } \alpha \in \{1, 2, 3\}, \\
 S_\alpha &= 2S_{ij} \quad \text{si } i \neq j \quad \text{où } \alpha \in \{4, 5, 6\}.
 \end{aligned} \tag{II.13}$$

$$\begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{32} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{pmatrix} \tag{II.14}$$

est noté conventionnellement :

$$\begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{pmatrix} \tag{II.15}$$

#### IV.2: Tenseur des contraintes

Les contraintes qui agissent sur la surface extérieure d'un solide entraînent des déformations qui créent des tensions mécaniques (contraintes). La tension mécanique  $T$  est définie comme la densité surfacique de force sur une facette d'orientation  $n$  (figure ).

Elle évalue les efforts de contact des particules d'un côté de la surface sur les particules situées de l'autre côté de cette même surface :

$$T = \lim_{ds \rightarrow 0} \left( \frac{dF}{ds} \right) \tag{II.16}$$



Afin d'exprimer l'ensemble des contraintes engendrées par un champ de force sur un élément de volume, un tenseur d'ordre deux est utilisé :

$$T_{ij} = \lim_{ds_j \rightarrow 0} \left( \frac{dF_i}{ds_j} \right) \quad (\text{II.17})$$

avec  $i, j = 1, 2, 3$ , et  $ds_j$  représentant l'élément de surface élémentaire de normale  $x_j$ .  $T_{ij}$  correspond à la composante selon  $x_i$  de la force s'exerçant sur la surface de normale  $x_j$ .

Chacune des composantes  $T_{ij}$  du tenseur de contrainte  $T$  est la contrainte exercée parallèlement à l'axe  $x_i$  sur la surface normale à l'axe  $j$  (voir figure ).

Les neuf grandeurs  $T_{ij}$  qui définissent l'état de contrainte d'un milieu déformé constituent un tenseur de rang deux, appelé tenseur des contraintes. Ce tenseur est symétrique ( $T_{ij} = T_{ji}$ ), et ne comprend que six composantes indépendantes ( $T_{11}$ ,  $T_{22}$ ,  $T_{33}$ ,  $T_{12}$ ,  $T_{13}$  et  $T_{23}$ ).

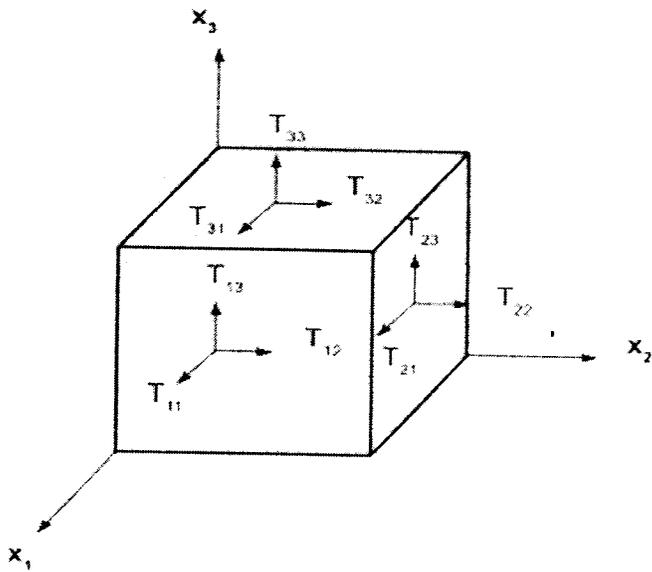


Figure II.11 : – Contraintes exercées sur élément de volume.

### IV.3 Relation entre contraintes et déformations élastiques

La déformation subie par un corps parfaitement élastique est proportionnelle à la force ou à la contrainte appliquée. La relation existant entre contraintes et déformations est connue sous le nom de loi de Hooke et s'écrit pour des petites déformations :

$$T_{ij} = c_{ijkl} S_{kl} \quad (\text{II.18})$$

Les coefficients  $c_{ijkl}$  qui traduisent la relation linéaire la plus générale entre deux tenseurs de rang deux  $T_{ij}$  et  $S_{kl}$  sont les composantes d'un tenseur de rang quatre appelé tenseur de rigidités élastiques. Ce tenseur possède  $3^4 = 81$  composantes. Cependant du fait des symétries des tenseurs  $T_{ij}$  et  $S_{kl}$ , le tenseur  $c_{ijkl}$  est aussi symétrique par rapport à  $i$  et  $j$ ,  $k$  et  $l$  respectivement :

$$c_{ijkl} = c_{jikl} = c_{ijlk} \quad (\text{II.19})$$

Cette relation de symétrie réduit de 81 à 36 le nombre des constantes élastiques indépendantes. La relation de contraction des indices peut alors être appliquée. Les modules élastiques indépendants, repérés seulement par deux indices  $\alpha$  et  $\beta$  variant de 1 à 6 se rangent de la manière suivante :

$$c_{\alpha\beta} = c_{ijkl} \quad (\text{II.20})$$

Avec  $\alpha \leftrightarrow (ij)$  et  $\beta \leftrightarrow (kl)$  conformes à (I.7). Cette notation, dite matricielle, s'étend aux contraintes et déformations. La loi de Hooke s'écrit ainsi :

$$T_{\alpha} = c_{\alpha\beta} S_{\beta} \quad (\text{II.21})$$

Avec  $\alpha, \beta = 1, 2, \dots, 6$ . Les notations tensorielles sont donc réduites à une notation matricielle pour  $c_{ijkl}$  qui est devenu  $c_{\alpha\beta}$  et vectorielle pour  $T_{ij}$  et  $S_{kl}$  qui sont devenus  $T_{\alpha}$  et  $S_{\beta}$ .



Il est possible d'inverser la relation de Hooke (I.13) :

$$S_{\alpha} = s_{\alpha\beta} T_{\beta} \quad (\text{II.22})$$

Avec  $s_{\alpha\beta}$  tenseur de rang quatre possédant les mêmes propriétés de symétrie que  $c_{\alpha\beta}$  et appelé tenseur de souplesse ou de flexibilité.

### ■ Analyse électroacoustique :

Si un matériau piézoélectrique est soumis simultanément à un champ électrique  $\epsilon$  et à des déformations ( $s$ ), la contrainte  $T_{ij}$  du matériau s'écrit :

$$T_{ij} = C_{ijkl} S_{kl} - e_{kij} E_k \quad i, j, k, l = 1, 2, 3. \quad (\text{II.23})$$

$[e]$  est le tenseur de piézoélectricité ( $\text{C.m}^{-2}$ ) et  $[E]$  est le vecteur champ électrique ( $\text{V.m}^{-1}$ ).

Le champ électrique  $E$  dérive d'un potentiel  $\varphi$  dans l'hypothèse quasi-statique adoptée pour cette étude :  $x_k$

$$E_k = -\frac{\partial \varphi}{\partial x_k} \quad k = 1, 2, 3 \quad (\text{II.24})$$

$\varphi$  est le potentiel électrique (V).

En tenant compte des symétries et on applique le règle de contraction on obtient:

$$T_{ij} = \frac{\partial (C_{ijkl} U_l + e_{kij} \varphi)}{\partial x_k} \quad i, j, k, l = 1, 2, 3 \quad (\text{II.25})$$

### Induction électrique

Le comportement diélectrique d'un matériau est caractérisé par la relation :

$$D_j = \epsilon_{jk} E_k + e_{jkl} S_{kl} \quad j, k, l = 1, 2, 3 \quad (\text{II.26})$$

C'est la définition du vecteur déplacement électrique. Le comportement diélectrique est donné par la loi de poisson et les conditions aux limites associées. [7]

#### IV.4 Propagation des ondes élastiques:

Les ondes élastiques résultent de déplacements de particules se propageant seulement dans des milieux matériels, alors que les ondes électromagnétiques se propagent aussi dans le vide. En ce qui concerne les ondes élastiques dans les solides, deux cas se présentent :

##### ■ Solide homogène illimité : ondes de volume

Les ondes qui s'y propagent sont les ondes planes. Au cours de leur propagation, ces ondes ne rencontrent aucune frontière car l'étendue du faisceau des ondes élastiques est plus petite que les dimensions latérales du solide dans lequel elles se propagent.

##### ■ Solide limité : ondes guidées

- par une surface libre d'un milieu : ondes de surface.
- par deux surfaces parallèles (plaque); les ondes se propagent en se réfléchissant alternativement sur une surface et sur l'autre
- dans une structure multicouche.

On s'intéressera dans cette étude uniquement aux ondes guidées par des surfaces libres ou par des structures multicouches [4].

L'établissement de l'équation de propagation dans les matériaux piézoélectriques s'effectue de la même manière que pour les matériaux anisotropes. La différence réside dans le fait que l'on a deux équations pour décrire le comportement des matériaux piézoélectriques au lieu d'une seule lorsque le matériau est seulement élastique. Il a aussi deux variables indépendantes [8].

##### ■ Equations de mouvement dans le cas d'un solide piézoélectrique:

Considérons un substrat piézoélectrique, la solution analytique traduisant la propagation des ondes dans ce substrat requiert la résolution des équations de Newton

et Maxwell simultanément. Les axes  $x_1$ ,  $x_2$  et  $x_3$  sont disposés comme indiqué sur la figure .

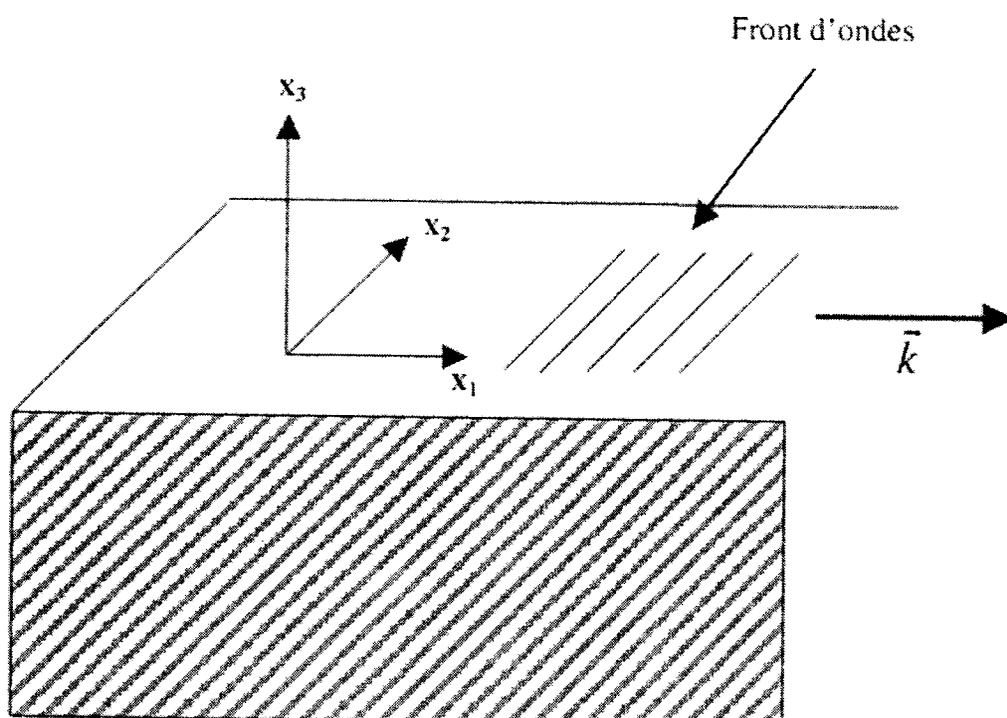


Figure II.12 : Repère ( $x_1, x_2, x_3$ )

Dans le cas quasi-statique, les équations de Maxwell sont données par :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = 0 \quad (\text{II.27})$$

$$\vec{E} = -\vec{\nabla} \phi \quad (\text{II.28})$$

En considérant que la densité de charge réelle en surface est égale à 0, l'équation de mouvement de Newton est :

$$\sum_j \frac{\partial T_{ij}}{\partial x_j} - \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = 0 \quad (\text{II.29})$$

Le tenseur contraint et le déplacement électrique s'écrivent :

$$T_{ij} = \sum_k \sum_l c_{ijkl}^E S_{kl} - \sum_k e_{kij} E_j \quad (\text{II.30})$$

$$D_i = \sum_j \sum_k e_{ijk} s_{jk} + \sum_k \epsilon_{ij}^S E_j \quad (\text{II.31})$$

Les déformations sont définies par :

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (\text{II.32})$$

Les équations (II.28) et (II.32) injectées dans (II.30) et (II.29) donnent :

$$T_{ij} = \frac{1}{2} \sum_k \sum_l c_{ijkl}^E \left( \frac{\partial u_k}{\partial x_l} + \frac{\partial u_l}{\partial x_k} \right) + \sum_k e_{kij} \frac{\partial \phi}{\partial x_k} \quad (\text{II.33})$$

$$D_i = \frac{1}{2} \sum_k \sum_l e_{ikl} \left( \frac{\partial u_k}{\partial x_l} + \frac{\partial u_l}{\partial x_k} \right) - \sum_k \epsilon_{ik}^S \frac{\partial \phi}{\partial x_k} \quad (\text{II.34})$$

L'équation (II.33) injectée dans l'équation (II.29) donne :

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = \sum_j \sum_k \left( e_{kij} \frac{\partial^2 \phi}{\partial x_j \partial x_k} + \sum_l c_{jilk}^E \frac{\partial^2 u_k}{\partial x_j \partial x_l} \right) \quad (\text{II.35-a})$$

De plus, dans le cas d'une surface libre, c'est à dire le cas où la densité de charge en surface est nulle, on a :

$$\text{div } \vec{D} = 0 \quad (\text{II.36})$$

L'équation (II.34) et l'équation (II.36) donnent :

$$\sum_i \sum_j \left( \epsilon_{ij}^S \frac{\partial^2 \phi}{\partial x_i \partial x_j} - \sum_k e_{ijk} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i \partial x_k} \right) = 0 \quad (\text{II.35-b})$$

Les équations (II.35-a) et (II.35-b) donnent 4 équations qui relient les quantités  $u_1$ ,  $u_2$ ,  $u_3$  et  $\phi$ . Le mouvement de l'onde est déterminé si les conditions aux limites appropriées sont spécifiées.



Dans le cas du solide piézoélectrique, les solutions de ces équations sont complexes, elles sont généralement résolues numériquement.

**Conclusion :**

Dans ce deuxième chapitre, on a traité les dispositifs à ondes acoustiques de surface SAW et du volume BAW avec quelques notions des tenseurs des contraintes et tenseurs de déformations et les relations entre les deux puis les équations de propagation des ondes élastiques dans les milieux piézoélectriques.



## Bibliographie

[1]: [http: www.wikipédia/piézoélectricité/](http://www.wikipédia/piézoélectricité/) Ondes acoustiques dans les milieux piézoélectriques.com.

[2] : Mme FARDEHEB- MAMMERI Amina-Zahia « depot par pulverisation magnetron de couches minces de nitrure d'aluminium a axe c incline en vue de la realisation des dispositifs a ondes acoustiques vibrant en mode de cisaillement», thèse de doctorat de l'université Abou Bekr belkaid, Tlemcen, 2009.

[3] : Mohamed Badreddine ASSOUAR «Propagation des ondes élastiques dans les matériaux : des dispositifs à ondes acoustiques de surface (SAW) aux cristaux phononiques», habilitation à diriger des recherches Spécialité : Plasma, Optique, Electronique et Microsystèmes, Laboratoire de Physique des Milieux Ionisés et Applications (LPMIA) Nancy Université – CNRS, 2007.

[4] : Mohamed Badreddine ASSOUAR « étude de dispositifs a ondes acoustiques de surface (saw) a structure multicouche nitrure d'aluminium / diamant : croissance de materiaux en couches minces et technologie de realisation», thèse de doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy I, 2001.

[5] : Nizar BEN HASSINE «Etude de la fiabilité des composants à ondes acoustiques de volume (BAW) pour des applications Radio Fréquence», thèse de Doctorat de l'Université Joseph Fourier (UJF) – Grenoble I, 2009.

[6]: Mountaga Lam " Formalisme d'octet appliqué à la propagation d'ondes dans des milieux piézoélectriques inhomogènes", thèse de doctorat de l'université de François Rabelais -Tours, 2008.

[7]: Lamia EL FISSI "Détection et mesure de nanoparticules pour les applications de capteurs en milieu liquide", thèse de doctorat de l'université de franche-comté, 2009.

[8]: Michel Brissaud " Matériaux piézoélectriques, caractérisation, modélisation et vibration" , p.72.

**Chapitre III :**  
**Technologie de fabrication des dispositifs à ondes**  
**acoustiques**



## I. Introduction

L'évolution considérable que les procédés technologiques ont connu ces dernières années, a permis de réaliser des composants électroniques, optoélectroniques et photoniques de plus en plus performants et miniatures, grâce notamment au grand développement des techniques de lithographie.

Les propriétés des dispositifs ou composants réalisés par ces procédés dépendent essentiellement des matériaux composant ces dispositifs. Une bonne connaissance des procédés mis en jeu est indispensable pour accéder à une compréhension complète de ces dispositifs et des techniques à utiliser pour améliorer leurs performances par des modifications éventuelles des techniques utilisées. [1]

Dans ce chapitre, nous allons expliquer les différentes techniques de fabrication et de dépôt des couches minces.

## II. Couches minces

### II.1. Définition d'une couche mince:

Par principe, une couche mince d'un matériau donné est un élément de ce matériau dont l'une des dimensions qu'on appelle l'épaisseur a été fortement réduite de telle sorte qu'elle s'exprime en Angstrom et que cette faible distance entre les deux surfaces limites (cette quasi bidimensionnelle) entraîne une perturbation de la majorité des propriétés physiques .

La différence essentielle entre le matériau à l'état massif et celui en couches minces est liée au fait que dans l'état massif on néglige généralement avec raison le rôle des limites dans les propriétés, tandis que dans une couche mince ce sont au contraire les effets liés aux surfaces limites qui sont prépondérants. Il est assez évident que plus l'épaisseur sera faible et plus cet effet de bidimensionnelle sera important, et



qu'inversement lorsque l'épaisseur d'une couche mince dépassera un certain seuil l'effet d'épaisseur deviendra minime et le matériau retrouvera les propriétés bien connues du matériau massif.

## II.2 caractéristiques des couches minces

L'intérêt des couches minces provient essentiellement de l'utilisation économique des matériaux en rapport avec les propriétés physiques et de la simplicité des technologies mise en œuvre pour leur réalisation. Une grande variété de matériaux est utilisée pour produire ces couches minces. Citons les métaux, alliages, composés réfractaires (oxydes, nitrures, carbures), les composés intermétalliques et les polymères.

La seconde caractéristique essentielle d'une couche mince est que, quelle que soit la procédure employée pour sa fabrication, une couche mince est toujours solidaire d'un support sur lequel elle est construite (même s'il arrive parfois que l'on sépare le film mince dudit support).

En conséquence, il sera impératif de tenir compte de ce fait majeur dans la conception, à savoir que le support influence très fortement les propriétés structurales de la couche qui y est déposée. Ainsi, une couche mince d'un même matériau, de même épaisseur, pourra avoir des propriétés physiques sensiblement différentes selon qu'elle sera déposée sur un substrat isolant amorphe tel le verre, ou un substrat monocristallin de silicium par exemple. Il résulte de ces deux caractéristiques essentielles d'une couche mince la conséquence suivante : une couche mince est *anisotrope* par construction. [2]



## II.3 Méthodes générales de dépôt de couches minces:

### II.3.1 Etapes à suivre pour déposer une couche mince :

Tous les procédés de déposition de couches minces contiennent quatre (parfois cinq) étapes successives [3], comme le montre la figure (III.1)

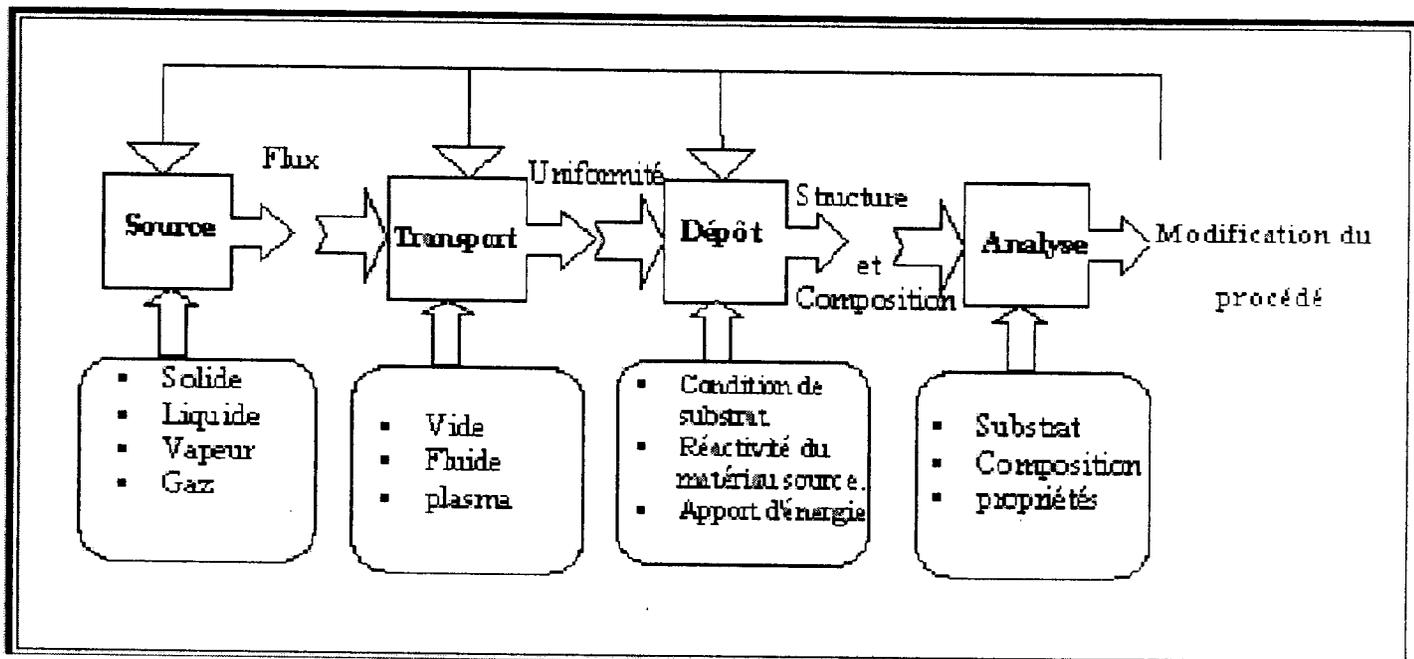


Figure III.1: Diagramme des étapes du procédé de fabrication de couches minces

a / **La source** : qui constitue le matériau de base du film mince à élaborer peut être un solide, un liquide, une vapeur ou un gaz. Lorsque le matériau est solide son transport vers le substrat s'effectue par vaporisation. Ce qui peut être réalisé par évaporation thermique, canon à électrons, ablation laser ou par des ions positifs "pulvérisation". L'ensemble de ces méthodes est classé sous le nom de dépôt physique en phase vapeur PVD (physical vapor deposition).

La source solide peut être occasionnellement transformée en vapeur par voie chimique. Dans d'autre cas, le matériau de base est sous forme d'un gaz ou d'un liquide ayant une pression de vapeur suffisante pour qu'il soit transporté à des températures modérées. Les procédés qui utilisent, comme matériau de base, les gaz, les liquides

évaporés ou solides évaporés par voie chimique sont connus sous le nom de dépôts chimiques en phase vapeur, i.e. CVD (Chemical vapor déposition).

**b/ Le transport :** Dans l'étape de transport, l'uniformité du flux des espèces qui arrivent sur la surface du substrat est un élément important, plusieurs facteurs peuvent affecter cette uniformité et dépendent du milieu dans lequel s'effectue le transport, un vide poussé ou un fluide "principalement des gaz ". Dans le cas d'un vide poussé, les molécules, provenant de la source et allant vers le substrat, traversent le milieu selon des lignes droites, tandis que dans un milieu fluide elles subissent plusieurs collisions au cours de leurs transports. Dans le vide, l'uniformité du flux qui arrive sur le substrat est déterminée par la géométrie, tandis que dans un fluide il est déterminé par le débit du gaz et par la diffusion des molécules de la source dans les autres gaz présents. Souvent, les procédés qui utilisent un vide poussé sont équivalents aux procédés PVD alors que ceux qui utilisent un débit fluide sont des procédés CVD. Cette définition n'est pas toujours confirmée. Il existe plusieurs procédés de dépôt physique en phase vapeur qui opèrent dans un vide poussé, d'autres, comme l'ablation laser et la pulvérisation opèrent souvent à des grandes pressions caractéristiques du fluide. De la même manière on trouve que la majorité des procédés de dépôts par CVD opèrent à des pressions modérées.

Plusieurs procédés de dépôt de couches minces utilisent un milieu plasma. En effet, la grande quantité d'énergie contenue dans ce milieu permet, à faible température, l'activation de la formation des couches. La pression de travail d'un plasma peut être celle d'un fluide.

**c/ Le dépôt :** La troisième étape dans les procédés d'élaboration des films minces est le dépôt du film sur la surface du substrat. Cette phase passe par les étapes de nucléation et de coalescence. Le comportement de déposition est déterminé par les facteurs source, transport et aussi par les principales conditions de la surface du substrat. Ces dernières sont : l'état de surface "Rugosité, niveau de contamination,



potentiel chimique avec le matériau qui arrive", la réactivité du matériau arrivant sur cette surface " Coefficient de collage", l'énergie déposée sur la surface et la " Température de substrat".

**d/ L'analyse :** La dernière étape dans le processus de fabrication est la nécessité de l'analyse du film obtenu. Le premier niveau de contrôle du matériau consiste à effectuer des mesures directes de ses propriétés importantes. Si les résultats de l'analyse sont insuffisants, il est indispensable de recourir à des expériences particulières qui permettent de lever les éventuelles ambiguïtés d'un processus donné

### II.3.2 Techniques de dépôts de couches minces

Nous citons, ci-dessous, les principales méthodes les plus connues utilisées pour élaborer des couches minces suivant les deux techniques PVD et CVD ainsi qu'en phase liquide CBD. Les méthodes de dépôt physiques sont en général utilisées en recherche, alors que les méthodes chimiques sont également utilisées industriellement, à cause de leur meilleur rendement et la qualité des films obtenus.

La classification des méthodes est présentée sur le schéma de la figure III.2 :

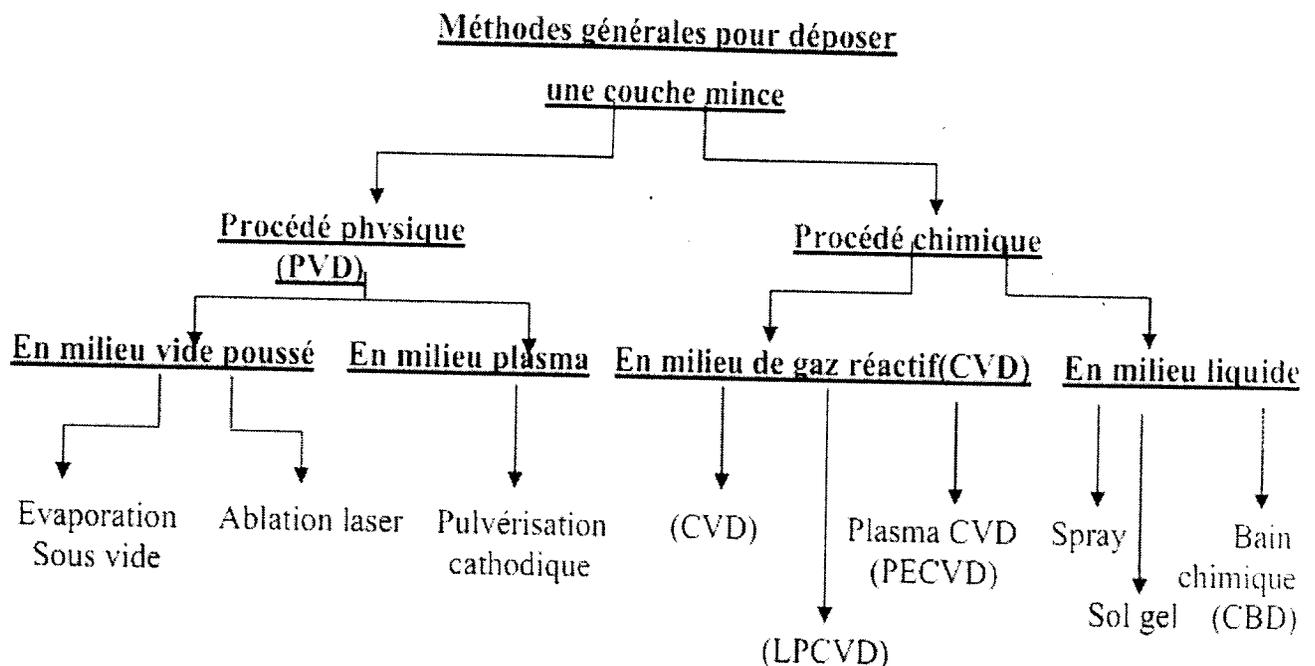


Figure III.2 : Schéma de la classification des procédés de dépôt de couches minces.

### II.3.2.1 Dépôts physiques en phase vapeur (PVD)

Les dépôts physiques en phase vapeur consistent à utiliser des vapeurs du matériau à déposer pour réaliser un dépôt sur un substrat quelconque. Le transport des vapeurs de la cible au substrat nécessite un vide assez poussé (de  $10^{-5}$  à  $10^{-10}$  Pa) pour transporter les atomes de la cible vers le substrat en évitant la formation de poudre liée à une condensation en phase homogène.

Le dépôt en phase vapeur physique (PVD) présente beaucoup d'avantages par rapport au dépôt en phase vapeur chimique, par exemple :

- les films sont denses,
- le processus est facile à contrôler.

### a / Dépôt par évaporation sous vide

Cette méthode consiste simplement à évaporer ou à sublimer le matériau à déposer dans un creuset sous vide en le chauffant à haute température.

Dès que la température de liquéfaction est dépassée, il se trouve que la pression de vapeur du matériau est sensiblement supérieure à celle résiduelle dans l'enceinte. Alors des atomes du matériau s'échappent et se propagent en ligne droite jusqu'à ce qu'ils rencontrent un obstacle. Ce dernier peut être le fait soit d'une surface solide (substrat, paroi de l'enceinte) soit d'un atome ou d'une molécule se déplaçant dans l'espace.

Dans le cas de rencontre d'une surface solide, il y aura séjour de l'atome sur la surface avec échange d'énergie. Si la surface est sensiblement plus froide que l'atome il y a condensation définitive.

La rencontre avec une molécule résiduelle se traduit généralement par une déviation de l'atome d'évaporant. Il est indispensable que la pression dans l'enceinte soit suffisamment faible pour que la probabilité de rencontre d'un atome résiduel soit quasi nulle et les atomes éjectés conservent leur trajectoire rectiligne. Cela est réalisé dans les systèmes courants dès que la pression est de l'ordre de  $10^{-6}$ Torr car alors le libre parcours moyen d'un atome dans l'enceinte est statistiquement supérieur aux dimensions de celle-ci.

Le matériau évaporé est déposé donc, par condensation sur le substrat à recouvrir d'où la formation d'une couche. La vitesse de dépôt dépend :

- de la température de la source,
- de la distance entre le creuset et le substrat,
- du coefficient de collages espèces évaporées sur le substrat.

Elle varie classiquement de 1 nanomètre par minute à 10 micromètres par minute.



### a /1. Description d'un système d'évaporation sous vide

Le schéma de principe est présenté sur la figure :

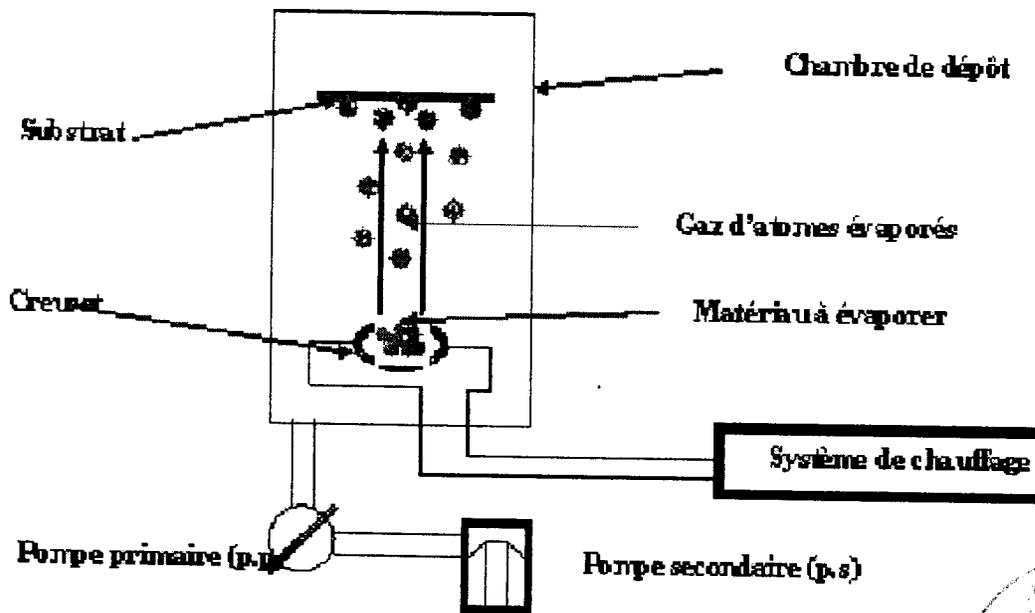


Figure III.3: Schéma descriptif d'un système d'évaporation sous vide.

Un système d'évaporation sous vide est composé de :

- **Une chambre de dépôt** : qui est une simple enceinte en verre ou en acier inox à joint étanche, capable de résister aux grandes différences de pression et ayant des accès nécessaires au chargement du substrat et de l'évaporant. Les joints entre flasques sont des joints toriques en vison ; mais pour un vide poussé ( $< 10^{-8}$  Pa) on utilise des joints de métaux mous (indium ou cuivre). La chambre doit pouvoir être chauffée à  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  quand elle est ouverte à l'atmosphère pour éviter la condensation de vapeur d'eau.
- **Un système de pompage** : il existe deux grande familles de moyen de production de vide, celle qui conduit au vide dit « classique » et celle qui génère un

ultravide encore appelé « vide propre ». Dans chacune de ces techniques le vide poussé sera obtenu en deux étapes :

\* Une étape dite « pompage primaire » à palette qui exploitera un principe de pompage mécanique et conduira à des pressions réduites de l'ordre de  $10^{-2}$  Pa.

\* Et suivie d'une étape de « pompage secondaire » à diffusion d'huile amenant l'enceinte à des très basses pressions ( $10^{-5}$  jusqu'à  $10^{-10}$  Pa ) munie d'un piège à azote liquide pour éviter la contamination de la chambre par des vapeurs d'huile.

- **Un système de chauffage** : qui se constitue d'une source de chauffage et d'un creuset pour déposer le matériau à évaporer .

## a /2. Procédure de chauffage du matériau à évaporer

La procédure peut être réalisée de plusieurs façons (pour chauffer le matériau) qui seront choisies en général en fonction de critères de qualité du résultat attendu : à l'aide d'un filament réfractaire par effet Joule, à l'aide d'un faisceau d'électrons intense et énergétique, typiquement 5 à 10 KeV ou à l'aide d'un laser. Le premier sert à l'évaporation de matériau facile à fondre et le deuxième sert à l'évaporation de matériaux réfractaires.

### ✓ Par effet joule

On note fréquemment l'emploi d'un creuset chauffé par effet joule (fig.III.4), limité aux matériaux s'évaporant à relativement basse température (et en tout cas très en dessous du point de fusion du creuset qui sera souvent en alumine frittée, parfois en graphite ou en oxyde de béryllium).



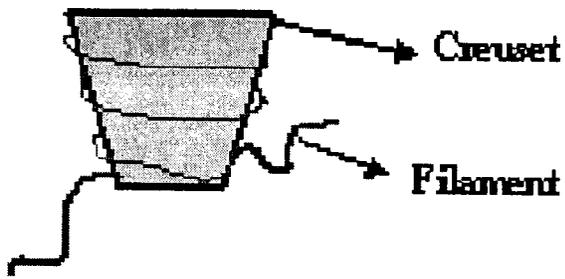


Figure III.4 : Creuset d'évaporation thermique.

#### ✓ Par canon à électrons

Une seconde technique consiste à user d'un canon à électrons à déflexion électromagnétique permettant en théorie l'évaporation de tout matériau (même très réfractaire) sans risque de pollution par le support. Notons que le faisceau d'électrons émis par un filament de tungstène est focalisé ponctuellement sur le sommet de l'échantillon à évaporer (fig.III.5 ). On condense ainsi jusqu'à 2 KW de puissance sur un volume inférieur au  $\text{mm}^3$ . Le matériau repose en pratique sur une nacelle de cuivre refroidie par une circulation d'eau afin d'éviter qu'elle ne s'évapore également. En jouant sur la tension d'accélération des électrons et sur le champ magnétique, il est aisé de déplacer le point d'impact du faisceau d'électrons. On dispose alors de la possibilité de déposer plusieurs matériaux différents placés dans des emplacements séparés sur la nacelle.

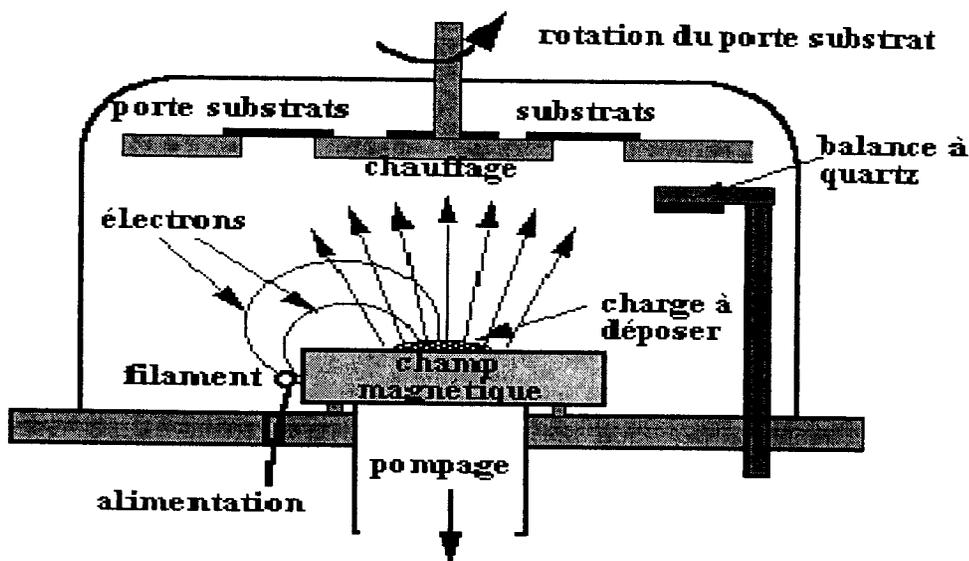


Figure III.5: Schéma de principe d'un système d'évaporation par un faisceau d'électrons [4]

✓ Par faisceau laser (ablation laser)

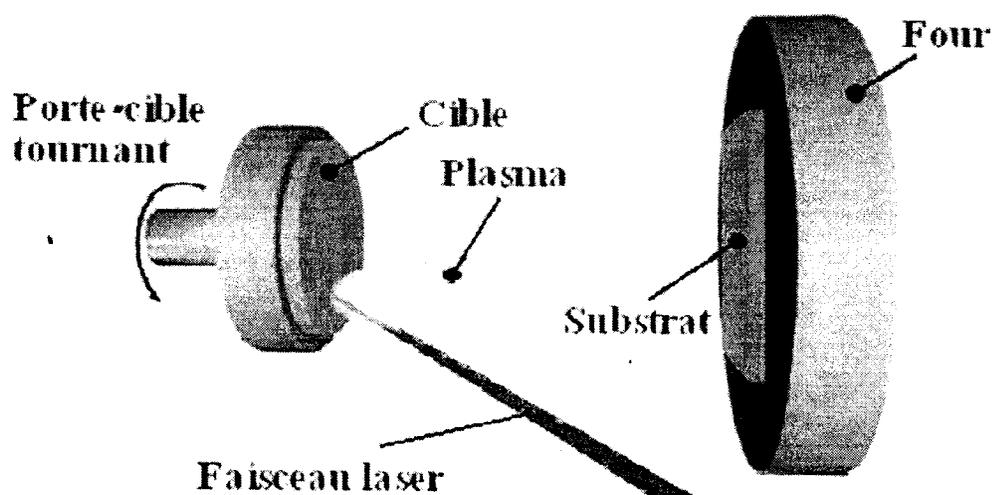


Figure III.6 : Principe de l'ablation par faisceau laser pulsé [5]

Une troisième technique plus récente utilise un faisceau laser PLD (Pulsed Laser Deposition) focalisé sur le matériau à évaporer, et qui permet d'obtenir des films de

meilleure qualité que ceux obtenus avec d'autres méthodes de dépôt comme l'évaporation ou la pulvérisation cathodique.

Cette technique a été proposée par l'équipe de Bell Core et rapidement appliquée par d'autres groupes. L'énergie étant apportée par l'impact d'un faisceau laser de puissance élevée, (typiquement laser Eximere ou laser YAG). Un avantage considérable est de pouvoir utiliser des cibles de très petites dimensions, l'ablation se produisant sur une surface de quelques millimètres carrés.

La méthode consiste à diriger un faisceau laser pulsé (fig.III.7 ), généralement les radiations laser sont dans l'UV, sur une cible constituée du matériau à déposer ; au contact de ce faisceau, de la matière va s'arracher pour venir se déposer sur le substrat placé en face de l'impact laser.

En fait, le processus d'ablation-dépôt est plus complexe, puisqu'il se forme localement une " plume " de plasma.

L'intérêt de cette technique est que, à l'inverse des deux précédentes, la source principale d'énergie thermique est externe au système à vide et ne provoque pas d'effets secondaires de dégazage, dus au rayonnement d'un filament chauffant porté à 2000 °C ou plus à l'intérieur de l'enceinte (aucune source thermique polluante à l'intérieur de l'enceinte), ce qui est un avantage très significatif pour les dépôts effectués dans un environnement ultravide .



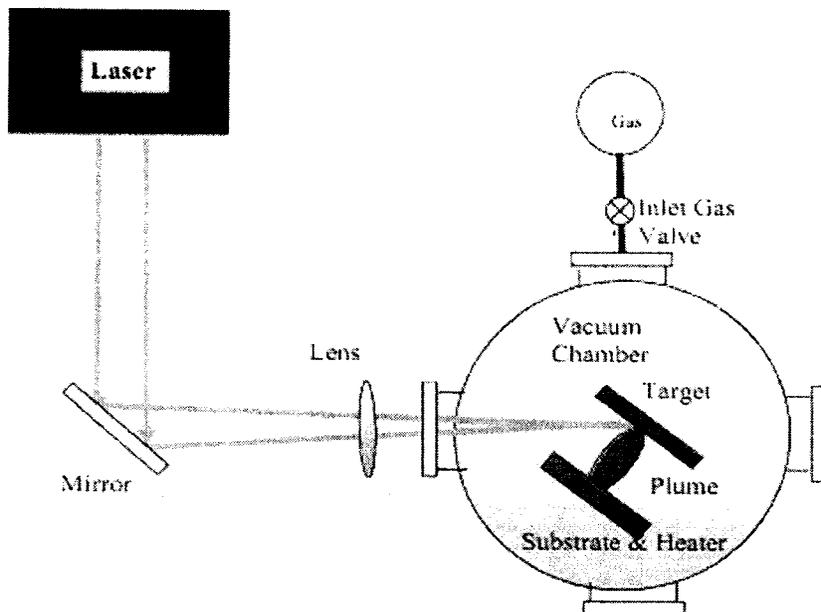


Figure III.7 : Schéma conventionnel d'un système d'ablation laser

### b / La pulvérisation cathodique

La pulvérisation consiste à bombarder une cible avec des particules énergétiques en appliquant une tension électrique entre les deux électrodes. Lorsque cette tension est suffisante, il y a ionisation de l'atmosphère (composée en général d'argon) et création d'un plasma de décharge lumineuse. Les ions présents sont alors accélérés jusqu'à la cathode (la cible à déposer). La mise en phase vapeur se fait alors suivant un processus purement mécanique, par transfert de l'énergie cinétique des ions aux atomes de la cible qui seront éjectés.

Cette méthode est d'une très grande popularité dans les milieux industriels pour la simplicité de sa mise en œuvre. Elle permet le dépôt de tout type de matériaux organiques qui sont moins stables en température notamment les polymères [6].

Un plasma est défini comme un gaz partiellement ionisé contenant un nombre égal de charges positives et négatives. On utilisera un plasma composé d'un gaz inerte, c'est-à-dire non réactif chimiquement et si nécessaire d'un gaz réactif. On préfère le

plus souvent utiliser l'argon plutôt que le xénon et le krypton. Ce gaz est en effet moins cher et il offre un rendement de pulvérisation supérieur à celui du néon. Sous l'effet du champ électrique, les espèces positives du plasma se trouvent attirées par la cathode (cible) et entrent en collision avec cette dernière. Elles communiquent alors leur quantité de mouvement, provoquant ainsi la pulvérisation des atomes sous forme de particules neutres qui se condensent sur le substrat. La formation du film s'effectue selon plusieurs mécanismes qui dépendent des forces d'interactions entre le substrat et le film.

La décharge est auto-entretenu par les électrons secondaires émis de la cible. En effet, ceux-ci, lors de collisions inélastiques, transfèrent une partie de leur énergie cinétique en énergie potentielle aux atomes d'argon qui peuvent s'ioniser.

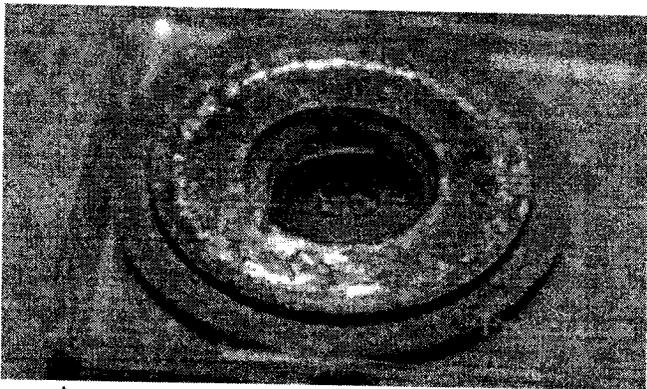


Figure III.8 : Une cible de pulvérisation avec une géométrie typique en anneau, ici de l'or, montrant la cathode constituée du matériau à déposer, l'anode contre-électrode et un anneau extérieur pour éviter la pulvérisation du foyer qui maintient la cible.

La combinaison du métal avec des gaz comme l'azote ou le gaz carbonique permet d'obtenir des composés aux duretés extrêmement élevées. Les ions du gaz réactif peuvent réagir avec les particules éjectées de la cible au niveau de la cible, ou au niveau du plasma ou encore au niveau du substrat pour former l'alliage par liaisons covalentes. Ils se condensent ensuite à la surface du substrat pour former la couche mince [7].

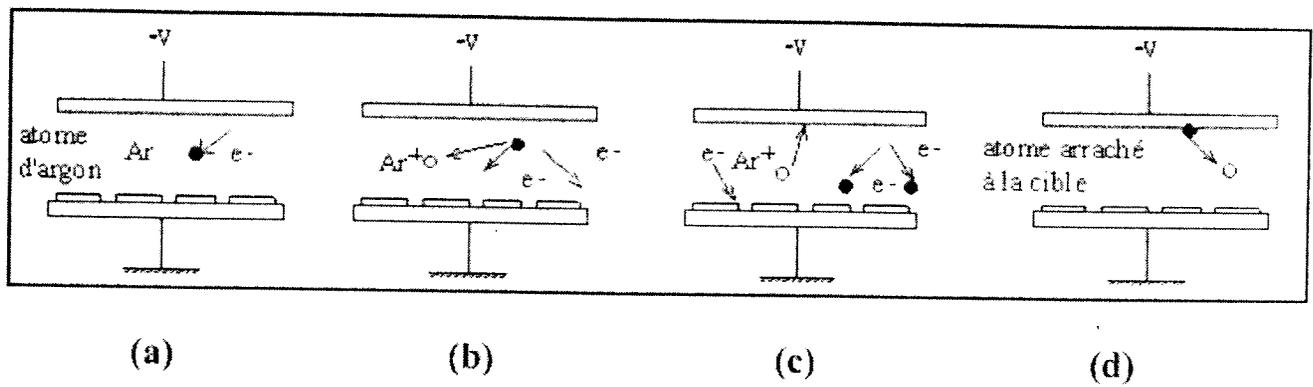


Figure III.9 : schéma de principe de la pulvérisation cathodique :

- (a) Choc d'un électron sur un atome d'argon
- (b) Ionisation de l'argon avec production d'un électron
- (c) Bombardement de l'ion d'argon sur la cible, choc des électrons sur des atomes d'argon et neutralisation d'électrons.
- (d) Ejection d'un atome de la cible vers les substrats.

### b/1.L'installation de pulvérisation cathodique

Une installation de pulvérisation cathodique (figure III.10) est équipée de :

1. Un système de pompage avec des pompes primaires permettant d'évacuer l'air entre la pression atmosphérique  $10^3$  mbar et  $10^{-2}$  mbar, et des pompes à vide poussé qui permettent d'atteindre  $10^{-5}$  à  $10^{-7}$  mbar sur des périodes de temps relativement courtes. Il comprend également des systèmes de jauges ou encore des systèmes analytiques ;
2. les magnétrons équipés de cibles métalliques où se déroulent les phénomènes physiques de bombardement ;
3. les alimentations électriques qui produisent du courant continu ou pulsé ou encore radiofréquence sous haute tension (1000v) et de forte intensité (de dizaines d'ampères) ;

4. Un système d'eau chaude et un système d'eau froide afin d'adapter la température de l'enceinte aux différentes phases du process.

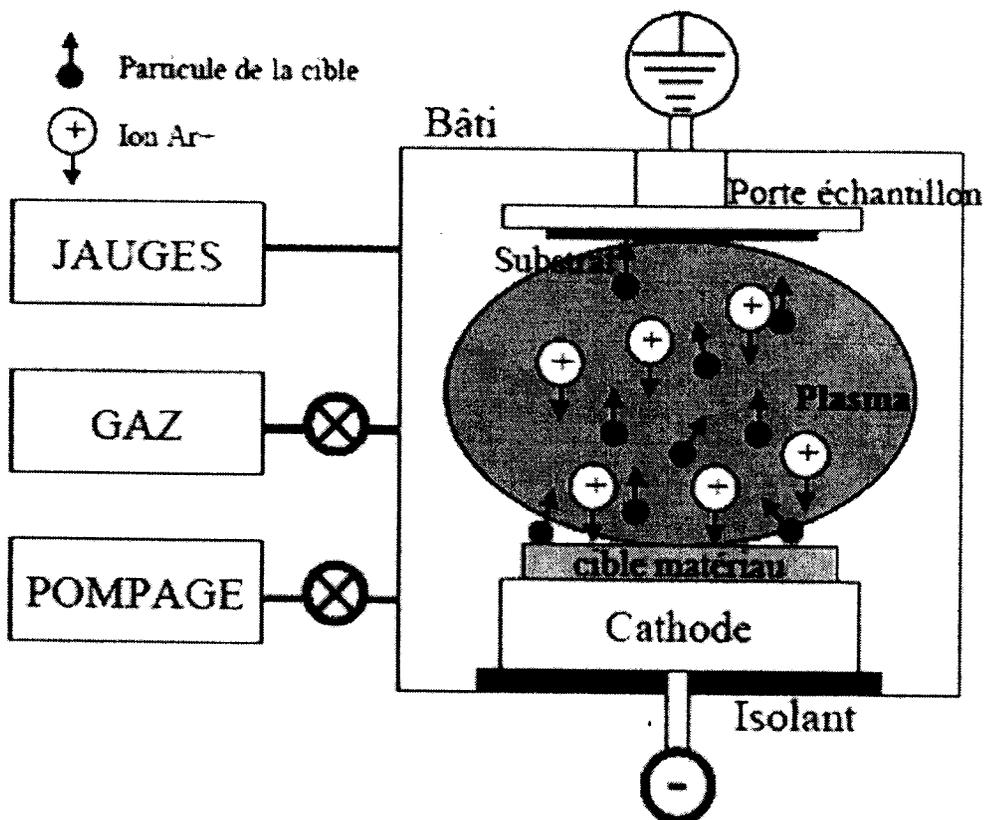


Figure III.10 : Schéma de fonctionnement d'un bloc de pulvérisation cathodique

### ■ La pulvérisation DC

La tension appliquée au cours de la pulvérisation DC est une tension continue (de 3 à 5 KV) Cette méthode ne peut pas être utilisée avec des cibles isolantes, car il y'aura une accumulation des charges positives sur la cible, ce qui conduira à annuler le champ provoquant l'ionisation. La solution du problème posé est l'utilisation d'une tension alternative entre les deux électrodes est utilisée exclusivement dans l'élaboration des couches minces métalliques ou semi-conductrices.

Elle exige des pressions de travail élevées de l'ordre de  $10^{-1}$  à  $10^{-2}$  mbar [8].

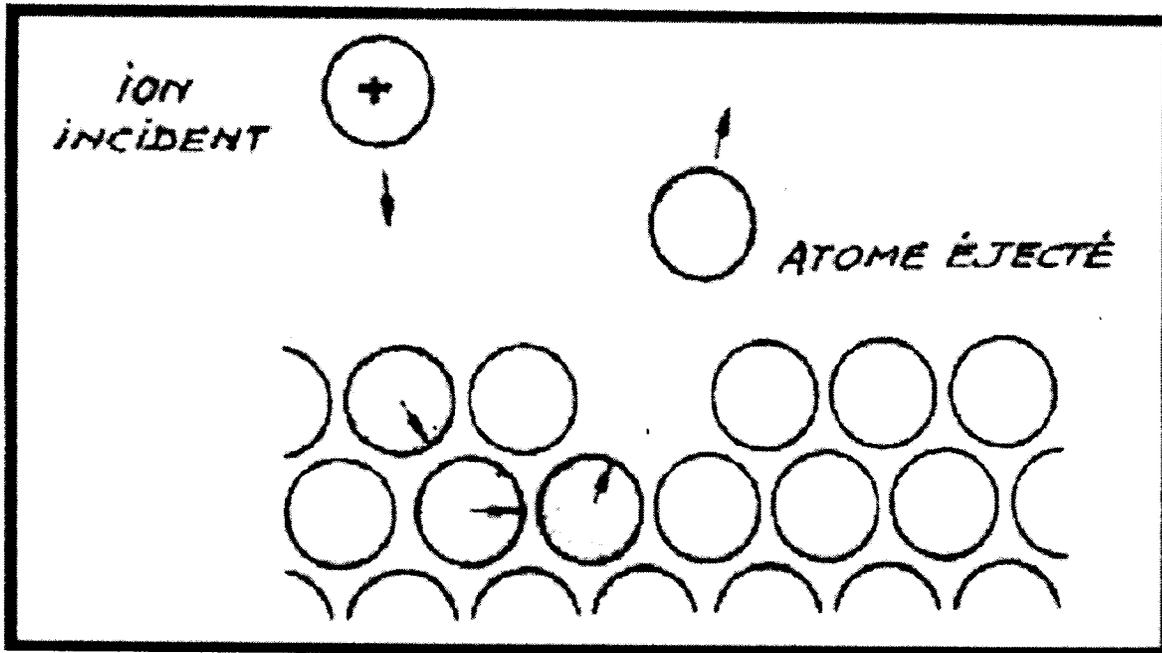


Fig.III.11: Phénomène de collisions sur les atomes de la cible matériau à pulvériser

### ■ La pulvérisation radio fréquence RF

On polarise la cathode par un signal alternatif radiofréquence à 13.56 MHz. Au cours de l'alternance négative. Les ions sont attirés par la cible (situation semblable à DC). Pendant l'alternance positive. Ce sont les électrons qui vont être attirés par la cible et neutralisent ainsi la charge positive qui est apparue lors de l'alternance précédente. Vu leur grande inertie, les ions ne sentiront pas la fréquence contrairement aux électrons. Ainsi la cible sera en permanence bombardée par des électrons qui vont la charger négativement (auto polarisation). Cette tension d'auto polarisation joue le rôle de la tension accélératrice pour les ions qui vont pulvériser la cible. Les puissances RF utilisées sont généralement supérieures à 100 W. Cependant dans la méthode de dépôt par décharge lumineuse elles ne dépassent guère 70W. Ceci résulte de l'énergie de dissociation du silane qui est plus faible de celle de l'ionisation de l'Argon.

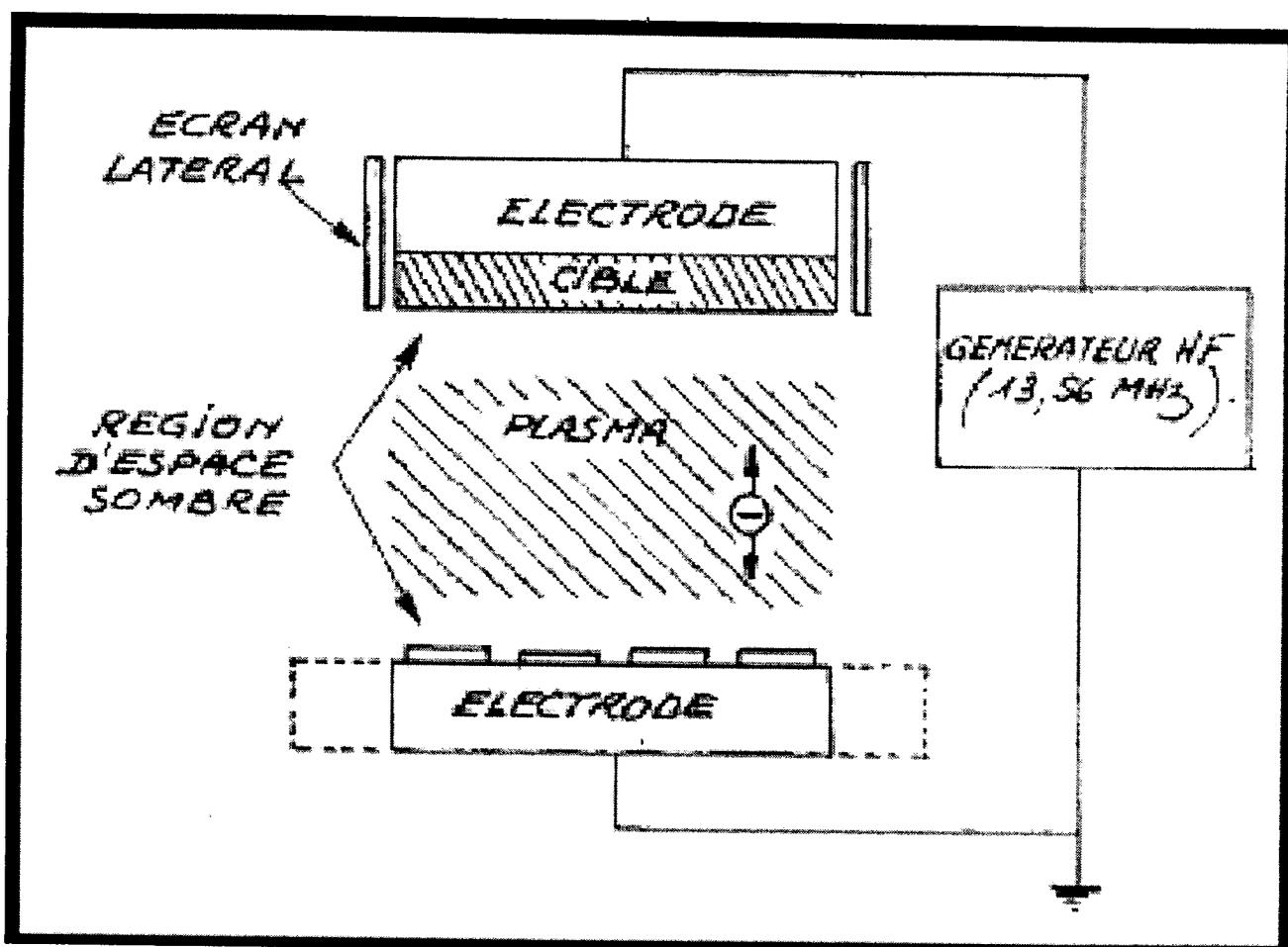


Fig. III.12: Principe de fonctionnement de la pulvérisation RF

#### ■ La pulvérisation magnétron :

Afin d'augmenter le taux d'ionisation, on utilise la pulvérisation magnétron qui consiste à placer un aimant sous la cible, dont le champ magnétique fait tourbillonner les électrons, ce qui augmente le taux d'ionisation du plasma. Par conséquent, les vitesses de dépôt sont élevées, tout en minimisant l'échauffement du substrat (figure III.13)

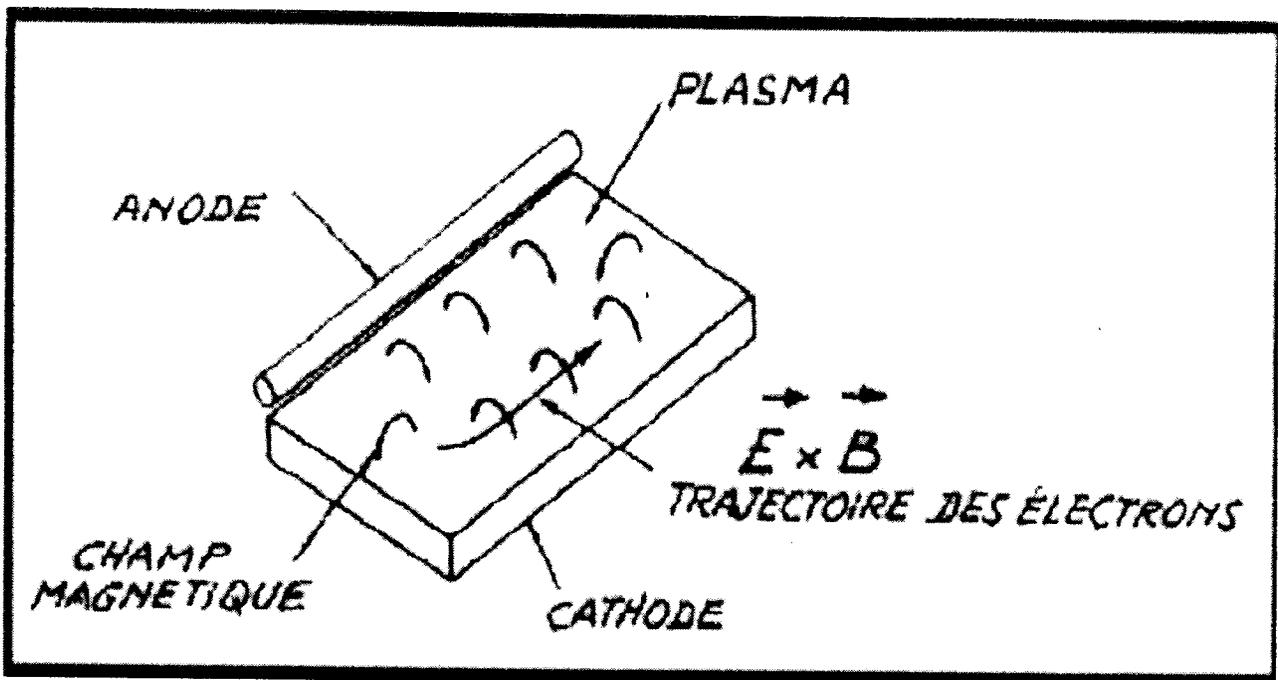


Fig. III-13: Illustration du fonctionnement d'une cathode magnétron

### II.3.2.2 Les techniques Dépôts chimiques (CVD):

Le procédé CVD (Chemical Vapour Deposition) est une technique utilisée depuis plus d'un siècle dans l'industrie céramique. Le procédé de dépôt chimique à partir d'une phase gazeuse consiste à mettre en contact un ou plusieurs composés volatils précurseurs du matériau à déposer, soit avec la surface à recouvrir, soit avec un autre gaz au voisinage de cette surface, de façon à provoquer, directement sur le substrat, une réaction chimique donnant au moins un produit solide défini et stable[6].

Les sous-produits de la réaction doivent être gazeux afin d'être facilement éliminés du réacteur. Ce procédé nécessite systématiquement un apport d'énergie pour activer la réaction chimique et favoriser l'adhérence du dépôt. C'est la température du substrat qui fournit l'énergie nécessaire à l'activation de la réaction ainsi qu'à la diffusion des atomes apportés à sa surface. Cette température nécessaire peut être obtenue de plusieurs façons :

- chauffage direct par passage d'un courant électrique dans le substrat ;
- chauffage par induction haute fréquence (HF) ;
- chauffage par radiation thermique : cette méthode peut s'appliquer aux substrats mauvais conducteurs électriques.

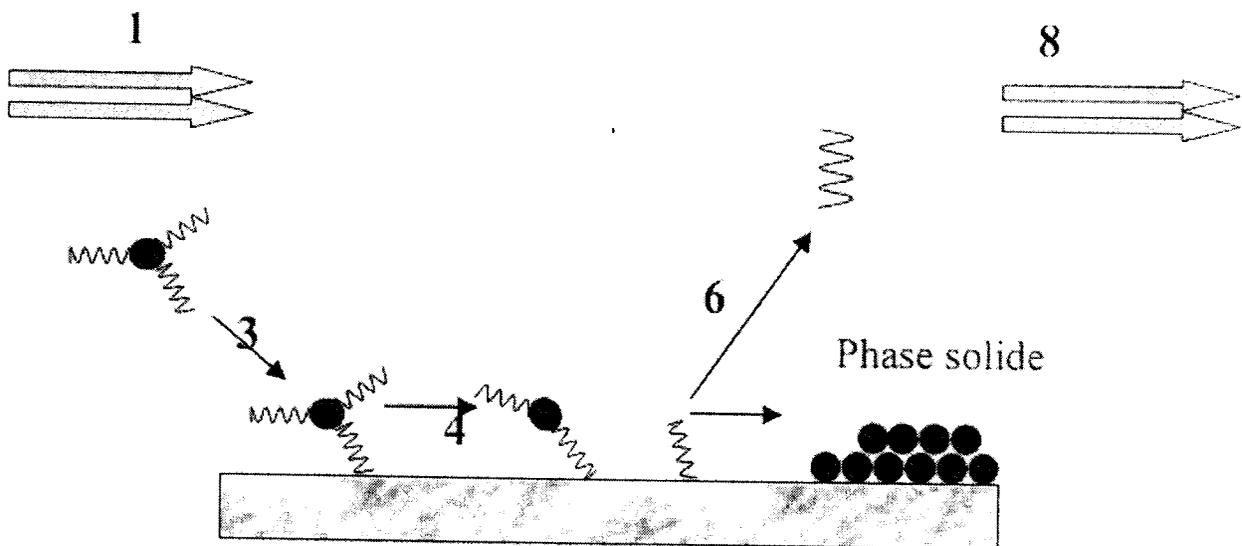


Fig.III.14 Principales étapes du procédé de dépôt chimique en phase vapeur (CVD)

Les étapes individuelles du procédé CVD sont résumées dans la séquence de dépôt suivante :

1. transport des réactifs à proximité du substrat ;
2. diffusion des réactifs vers la surface du substrat ;
3. adsorption des réactifs sur la surface ;
4. réaction chimique sur la surface ;
5. migration sur la surface pour former des germes stables ;
6. désorption des produits de réaction ;

7. diffusion des produits volatils loin de la surface ;
8. transport des produits volatils hors de la zone de dépôt ;

Chacune des étapes apparaît consécutivement. La plus lente sera l'étape limitant du mécanisme de dépôt. Trois régimes principaux de fonctionnement d'un procédé CVD sont ainsi mis en évidence :

- mécanisme contrôlé par le transport : l'étape d'alimentation en réactifs ou d'élimination des produits de réaction est l'étape la plus lente ;
- mécanisme contrôlé par la diffusion à travers la couche limite : l'étape lente correspond à l'étape 2 ou 7 ;
- mécanisme contrôlé par la cinétique chimique: l'étape limitant est un processus de surface (étape 3, 4, 5 ou 6).

Le régime de contrôle cinétique est le plus propice à l'obtention de dépôts uniformes. Les paramètres principaux sur lesquels on peut agir pour optimiser le procédé sont :

- i) la géométrie du four,
- ii) la nature chimique du précurseur gazeux,
- iii) le débit des gaz (réactifs et dilution),
- iv) la pression totale,
- v) la température des parois du four et du substrat.



Le régime de contrôle chimique est généralement à basse température et à basse pression pour des débits de gaz importants.

La technique CVD est largement utilisée pour la réalisation de dépôts car elle est techniquement facile à mettre en œuvre (Tableau III.1). Elle permet le dépôt de tous les types de matériaux, sous forme polycristalline ou monocristalline (croissance épitaxiale). Ces familles de matériaux répondent à des besoins d'amélioration des propriétés de surface comme la résistance à l'usure, au frottement ou la corrosion. Toutefois, elle est de plus en plus utilisée pour l'obtention de films minces destinés à des nouvelles applications en catalyse, en optique et dans le développement des capteurs.

Avantages	Inconvénients
Technique relativement facile à mettre en œuvre	Le substrat doit être chauffé
Grande vitesse de dépôt	Toxicité et agressivité des précurseurs
Contrôle de la stœchiométrie, de la morphologie et de la structure cristalline des dépôts	Contamination en carbone (MOCVD)
Recouvrement uniforme de supports de grandes dimensions, de formes complexes et creuses ( <i>conformal step covering</i> )	Prix élevé de certains précurseurs de pureté satisfaisante
Alimentation en continu sans interruption du vide dans l'enceinte de réaction pour le cas des CVD sous basse pression	La CVD (sous basse pression) est relativement une technique de dépôt onéreuse

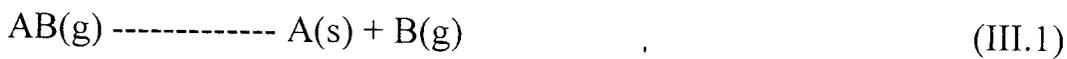
Tableau.III.1. La technique Dépôt Chimique en phase Vapeur (CVD)



### II.3.2.2.1 Réactions de la CVD :

Les réactions CVD peuvent être classées par catégories, en termes de description usuelle pour les processus chimiques utilisés par les chimistes. Parmi celles-ci, on peut citer l'oxydation, la pyrolyse, la réduction et la formation des composés qui peuvent être illustrées par les réactions suivantes :

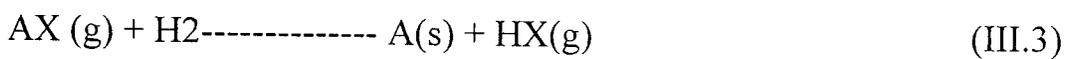
Pyrolyse et activation thermique :



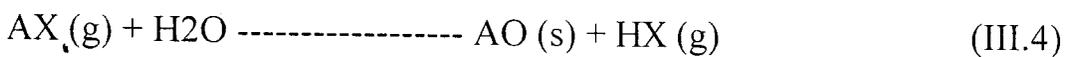
Oxydation (en utilisant O<sub>2</sub>) :



Réduction en utilisant H<sub>2</sub> :



Formation des composés en utilisant les vapeurs d'eau :



### II.3.2.2.2 Les différentes techniques CVD

Plusieurs types de techniques CVD sont distinguées selon que le dépôt s'effectue à pression atmosphérique (Air Pressure Chemical Vapour Deposition : APCVD), à basse pression comme par exemple (Low pressure Chemical Vapour Deposition : LPCVD), selon l'utilisation d'un plasma (Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition : PECVD) ou selon l'utilisation de précurseurs organométalliques : on parle alors de MOCVD (Metal Organic Chemical Vapor Deposition).



### **a. La CVD à pression atmosphérique ou APCVD**

L'avantage de cette technique est le fait que les dépôts s'effectuent à l'air. Ce qui réduit le coût de sa mise en œuvre relativement aux techniques qui utilisent un vide, ceci facilite son intégration dans les milieux industriels. Elle permet de déposer de nombreux matériaux tels que les métaux, les alliages, les semi-conducteurs...

### **b. La CVD à basse pression ou LPCVD**

Une autre technique de dépôt comme évoquée ci-dessus est la technique LPCVD. Cette technique consiste à réaliser un dépôt chimique en phase vapeur à basse pression. Ce dépôt s'effectue normalement dans un four à mur chaud à des températures de l'ordre de 500 à 600 °C.

On peut injecter les gaz qui réagissent et qui synthétisent le matériau à déposer. Pour ce type de dépôt les paramètres les plus importants sont la pression et la température. De ces paramètres, dépendent la morphologie du matériau qui conditionne ainsi les propriétés électriques.

L'utilisation du vide augmente le prix de la mise en œuvre global de cette technique ; ceci peut être vu comme un inconvénient du fait qu'elle s'intègre plus difficilement dans une chaîne industrielle.

### **c. La CVD assisté par plasma PECVD (Plasma Enhanced CVD)**

Le dépôt PECVD est fondé sur la réaction d'espèces ou d'éléments à déposer à basse température grâce à l'apport d'énergie sous forme électromagnétique (source radiofréquence en général). Cette technique évite donc des passages à haute température qui peut entraîner une redistribution des dopants par exemple. Toutefois, afin d'améliorer la qualité du matériau des couches déposées, il est nécessaire de chauffer « légèrement » les substrats (quelques centaines de degrés éventuellement).



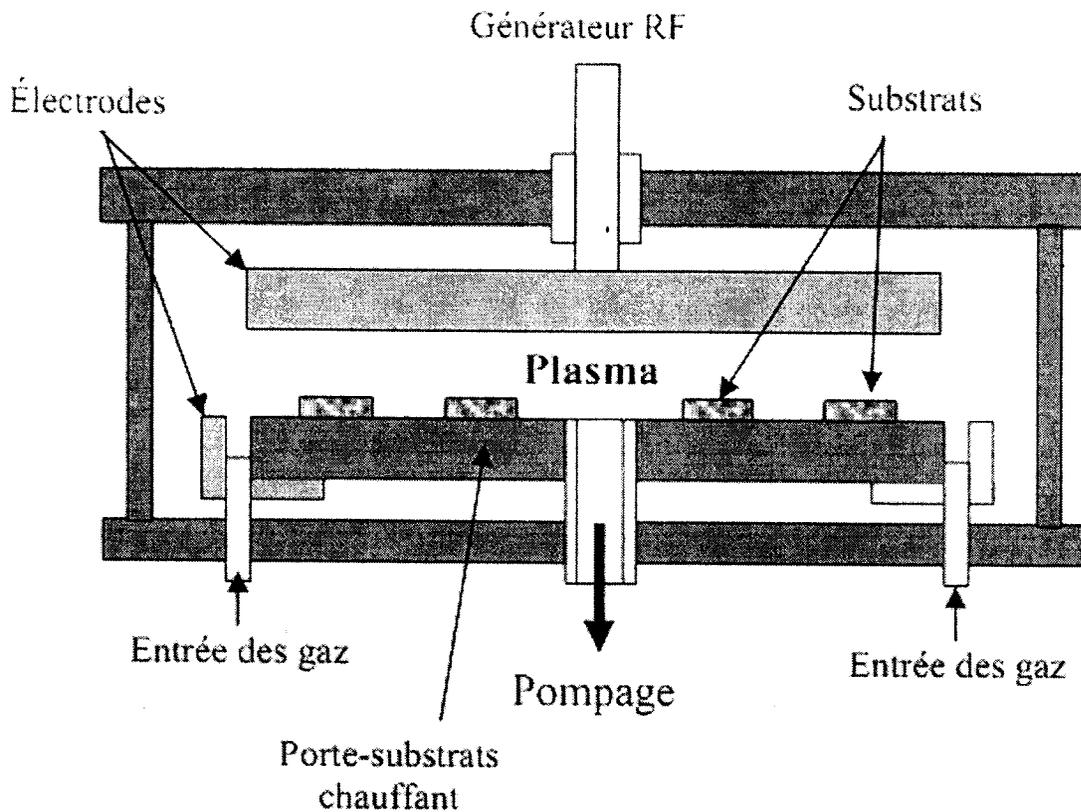


Figure III.15 Four à platine porte-substrat horizontal

Cependant, en raison des températures très basses, l'élimination des produits de réaction parasites est difficile, et on observe parfois leur incorporation dans les films en croissance. De plus, le bombardement du substrat par des particules énergétiques peut entraîner la création de défauts microstructuraux et de contraintes résiduelles importantes.

#### d. La MOCVD (Organo-Metallic CVD)

Le principe de la méthode est assez simple : les précurseurs organométalliques sont vaporisés puis transportés par un gaz (azote, argon ou hydrogène par exemple) dans la chambre de réaction, où sont réalisées la décomposition des précurseurs et la recombinaison des atomes pour former le dépôt sur le substrat.

Les précurseurs utilisés dans cette technique comportent, dans leur structure, des liaisons caractéristiques des matériaux à déposer. L'instabilité thermique de ces composés permet d'obtenir leur décomposition et leur réaction à plus basse température. L'autre grand intérêt de cette technique est la grande diversité des précurseurs disponible

Cependant, des réactions parasites peuvent apparaître, entraînant l'introduction d'impuretés au sein de la couche. De plus, l'intérêt industriel pour cette technique est encore limité du fait du prix de ces précurseurs ainsi que de leur toxicité dans un bon nombre de cas.

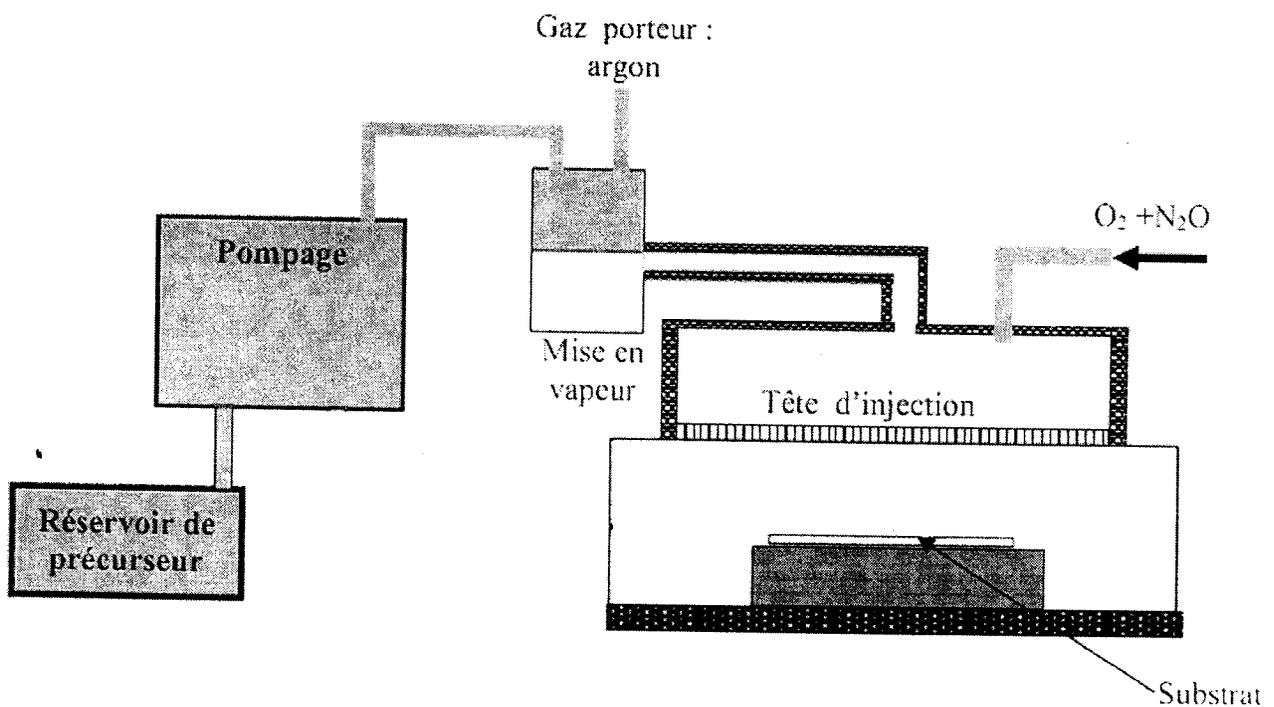


Figure III.16 Dispositif expérimental de dépôt par CVD.



Les précurseurs utilisés dans cette technique comportent, dans leur structure, des liaisons caractéristiques des matériaux à déposer. L'instabilité thermique de ces composés permet d'obtenir leur décomposition et leur réaction à plus basse température. L'autre grand intérêt de cette technique est la grande diversité des précurseurs disponible

Cependant, des réactions parasites peuvent apparaître, entraînant l'introduction d'impuretés au sein de la couche. De plus, l'intérêt industriel pour cette technique est encore limité du fait du prix de ces précurseurs ainsi que de leur toxicité dans un bon nombre de cas.

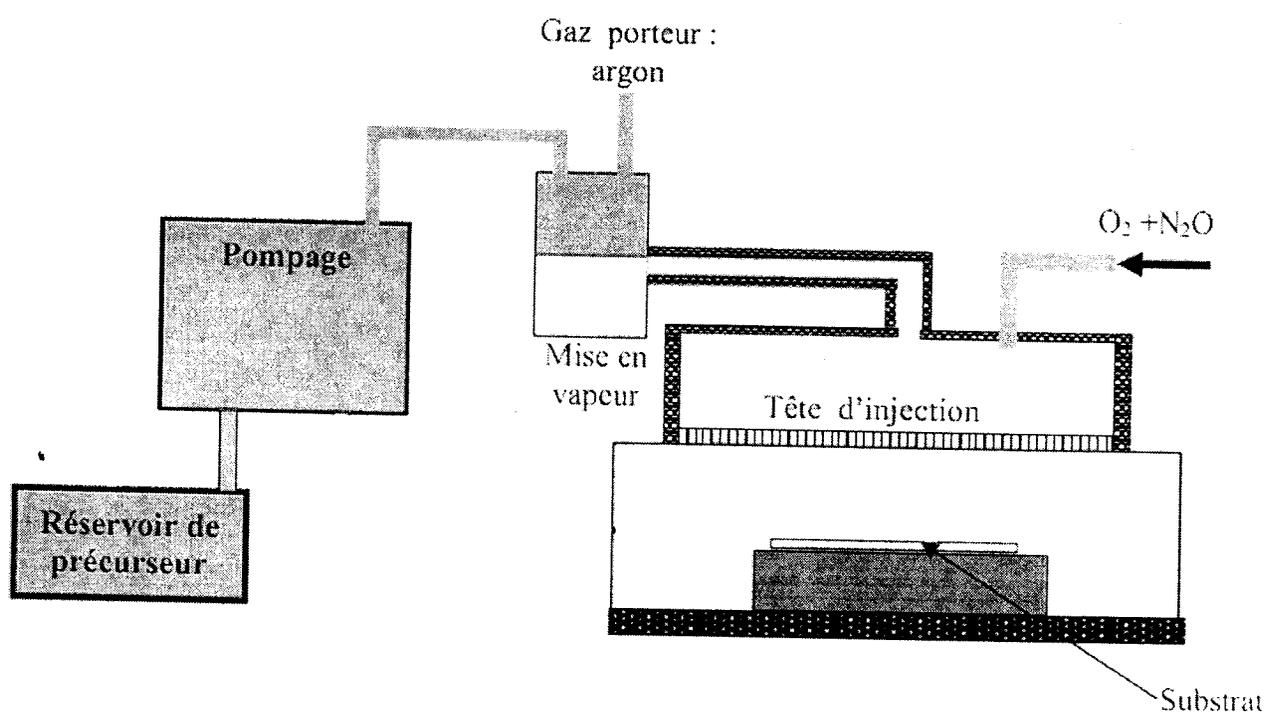


Figure III.16 Dispositif expérimental de dépôt par CVD.

### III. Méthodologie de la photolithographie pour la réalisation de dispositifs SAW :

Pour réaliser notre système à onde acoustique de surface, nous avons suivi les étapes de la photolithographie, dont les étapes sont les suivantes :

#### III.1. Dépôt de la résine :

La résine photosensible permet de définir les zones de masquage pour la réalisation d'implantations ioniques, de gravures ioniques par canon (IBE) ou ioniques réactives (RIE), et de gravures humides. Elle permet aussi d'effectuer des dépôts métalliques de contact ou d'interconnexion. Elle constitue encore l'architecture de ponts d'air, ou peut simplement servir d'isolant.

Cette étape nécessite la préparation de l'échantillon par un traitement chimique. Ce traitement consiste à nettoyer l'échantillon dans un bain d'acétone soumis à des ultrasons pendant 5min, de le rincer avec de l'eau désionisée et enfin de le sécher avec de l'azote sec. Le rôle de ce traitement est d'éliminer toute particule ou polluant qui empêche la bonne adhérence de la résine sur l'échantillon. Après cette préparation chimique, on dépose une résine photosensible en film mince, uniforme, de grande qualité et fortement adhérente. Ces résines sont des composés organiques (généralement des polymères thermoplastiques) dont la solubilité est affectée par le rayonnement UV.

Il existe deux types de résines :

- Les résines positives pour lesquelles le rayonnement UV entraîne une rupture des macromolécules, d'où une solubilité accrue des zones exposées dans le révélateur.
- Les résines négatives pour lesquelles le rayonnement UV entraîne une polymérisation des zones exposées, conférant ainsi à ces zones une tenue particulière



### III. Méthodologie de la photolithographie pour la réalisation de dispositifs SAW :

Pour réaliser notre système à onde acoustique de surface, nous avons suivi les étapes de la photolithographie, dont les étapes sont les suivantes :

#### III.1. Dépôt de la résine :

La résine photosensible permet de définir les zones de masquage pour la réalisation d'implantations ioniques, de gravures ioniques par canon (IBE) ou ioniques réactives (RIE), et de gravures humides. Elle permet aussi d'effectuer des dépôts métalliques de contact ou d'interconnexion. Elle constitue encore l'architecture de ponts d'air, ou peut simplement servir d'isolant.

Cette étape nécessite la préparation de l'échantillon par un traitement chimique. Ce traitement consiste à nettoyer l'échantillon dans un bain d'acétone soumis à des ultrasons pendant 5min, de le rincer avec de l'eau désionisée et enfin de le sécher avec de l'azote sec. Le rôle de ce traitement est d'éliminer toute particule ou polluant qui empêche la bonne adhérence de la résine sur l'échantillon. Après cette préparation chimique, on dépose une résine photosensible en film mince, uniforme, de grande qualité et fortement adhérente. Ces résines sont des composés organiques (généralement des polymères thermoplastiques) dont la solubilité est affectée par le rayonnement UV.

Il existe deux types de résines :

- Les résines positives pour lesquelles le rayonnement UV entraîne une rupture des macromolécules, d'où une solubilité accrue des zones exposées dans le révélateur.
- Les résines négatives pour lesquelles le rayonnement UV entraîne une polymérisation des zones exposées, conférant ainsi à ces zones une tenue particulière



au solvant de révélation. Par contre, les parties non insolées disparaissent sélectivement dans ce solvant.

Les procédés de photolithographie classiques utilisant des rayons lumineux dans les limites du domaine visible (proche Ultra Violet) ne permettent pas toujours d'atteindre une résolution suffisante pour les nouvelles technologies en développement. Ceci est essentiellement dû au phénomène physique de diffraction.

La figure montre les différentes étapes de photolithographie (lift-off et gravure)

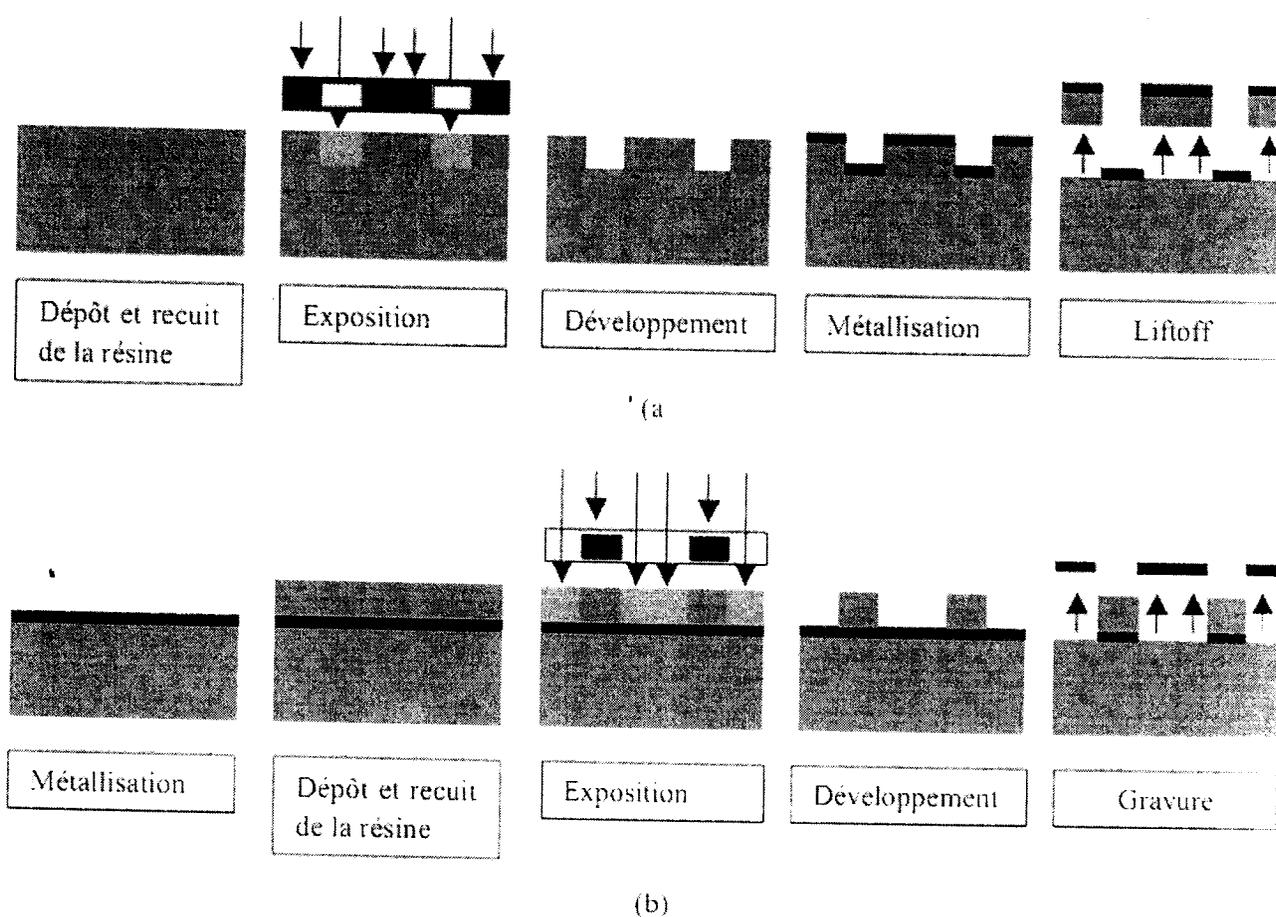


Figure III.17 : Procédé de photolithographie. (a) Lift-off. (b) gravure.

au solvant de révélation. Par contre, les parties non insolées disparaissent sélectivement dans ce solvant.

Les procédés de photolithographie classiques utilisant des rayons lumineux dans les limites du domaine visible (proche Ultra Violet) ne permettent pas toujours d'atteindre une résolution suffisante pour les nouvelles technologies en développement. Ceci est essentiellement dû au phénomène physique de diffraction.

La figure montre les différentes étapes de photolithographie (lift-off et gravure)

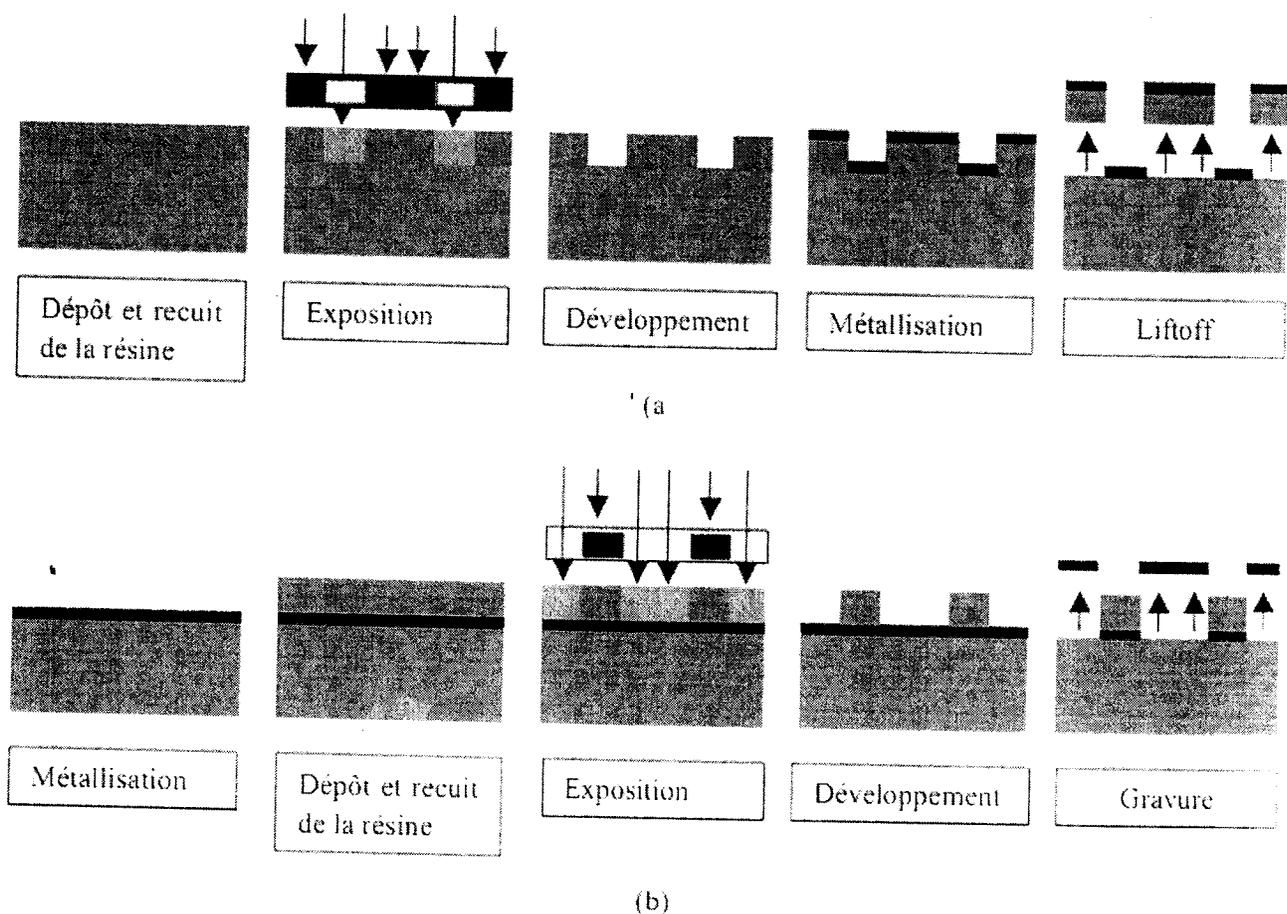


Figure III.17 : Procédé de photolithographie. (a) Liftoff. (b) gravure.

### III.2. L'insolation

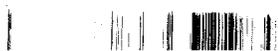
L'alignement et l'insolation de motifs sur une couche se fait à l'aide de la machine d'alignement de masque MA750 par contact. L'échantillon est positionné avec précision par rapport au masque dans le microscope de la machine et ensuite mis en contact avec le masque par aspiration et est insolé pendant une durée de 4 à 10 secondes, selon l'épaisseur de résine et la réflexion du substrat. L'appareil comporte une lampe UV à vapeur de mercure ( $\lambda = 350 - 500 \text{ nm}$ ). La dimension du motif doit rester largement supérieure à la longueur d'onde pour éviter les phénomènes de diffraction, ce qui explique la raison pour laquelle l'insolation se fait avec une lumière ultraviolette. L'insolation de motifs du masque de dispositifs SAW dure 5 secondes, ce qui correspond à des énergies de  $70 \text{ mJ/cm}^2$ .

La réalisation micro- ou nano-technologique requiert plusieurs étapes de fabrication, impliquant en moyenne une lithographie par étape. C'est à ce moment qu'intervient l'alignement. Comme les structures en couches minces et leur fonctionnalité sont aussi bien définies par leurs propriétés chimiques que par leur géométrie, il est nécessaire que chaque couche soit correctement disposée par rapport aux structures des couches adjacentes.

L'alignement permet de superposer avec précision les points de repère de chaque couche composant la structure. Cette étape se fait avec une aligneuse, outil de positionnement équipé d'une table mobile XY et d'un microscope. La précision d'un tel alignement avoisine le micron. Après le transfert du masque à l'échantillon, on procède à l'exposition.

### III.3. L'exposition

L'exposition en lithographie optique se fait à l'aide d'une lampe Hg-Xe (Mercure-Xénon), soit en UV proche (ligne g à  $436 \text{ nm}$ , ligne i à  $365 \text{ nm}$ ) ou en UV lointain,



entre 150 et 300mm. Il est aussi possible d'utiliser d'autres sources de lumière comme par exemple un laser KrF (Krypton-Fluor) dont la longueur d'onde se situe vers 240 nm.

La dose de l'exposition  $D$  (J/cm<sup>2</sup>) est donnée par :

$$D = IT_{exp}$$

$I$  étant l'intensité émise de la source (en W/cm<sup>2</sup>) et  $T_{exp}$  étant le temps d'exposition.

L'énergie reçue par la résine photosensible (photoresist) sous forme de radiation induit des réactions chimiques en modifiant la solubilité du photoresist dans un solvant directement, ou par le biais d'un sensibilisateur, mais ce uniquement dans les régions exposées.

Un sensibilisateur, contenu dans la résine, modifie, sous l'influence de la radiation absorbée, les propriétés optiques de la résine même en la rendant transparente à la longueur d'onde de la lumière incidente. L'utilisation d'un sensibilisateur permet ainsi l'exposition de couches de résine épaisses en évitant une grande dégradation du motif lithographié.

### III. 4. Pré-recuit

La résine photosensible, visqueuse après son étalement sur l'échantillon, est alors durcie sur une plaque chauffante, de façon à éliminer toutes les traces du solvant avant son insolation. La température de chauffage doit être réglée avec précision afin d'éviter de détruire le composé photosensible. Cette étape est réalisée à une température de 115°C pendant un temps de 30 secondes.



### III.5. Développement

La dernière étape consiste à développer la résine insolée en utilisant le développeur pendant une durée de temps qui dépend du temps d'insolation et de l'épaisseur de la résine. Ensuite on arrête le développement par un rinçage abondant avec de l'eau désionisée suivi par un séchage à l'azote sec. Dans notre cas nous utilisons un développeur de composé organique (l'acétone) pendant 40 secondes.

#### ■ Gravure:

La gravure consiste à éliminer de faibles épaisseurs d'un matériau dans des zones délimitées et de façon reproductible. Deux techniques sont couramment utilisées: la gravure sèche et la gravure humide.

#### ■ Le « lift-off » :

Le « lift-off » est une autre technique de fabrication des électrodes de type IDT, permettant de déposer de la matière de façon structurée sur un échantillon. L'idée est de se servir de la résine photosensible pour masquer les zones de l'échantillon où l'on ne désire pas avoir de matière. Après l'exposition et le développement, on dépose par exemple une couche de métal, dont l'épaisseur doit être inférieure à celle de la résine, sur toute la surface de l'échantillon, le métal recouvre alors toute la surface. Ce procédé permet de faire des dépôts de structures au profil arrondi, ceci est dû à des effets d'ombrage lors de la déposition.

### Conclusion

Ce chapitre a été donc consacré aux techniques de fabrications des couches minces (CVD et PVD) et ses procédés différentes avec la méthodologie de la photolithographie pour réaliser les dispositifs à ondes acoustiques de surface SAW.



**Bibliographie**

- [1] : Mohamed Badreddine ASSOUAR « étude de dispositifs a ondes acoustiques de surface (saw) a structure multicouche nitrure d'aluminium / diamant : croissance de materiaux en couches minces et technologie de realisation», thèse de doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy I, 2001.
- [2]: HAFDALLAH Abdelkader « Étude du Dopage des Couches Minces de ZnO Elaborées par Spray Ultrasonique » ,memoire de magister université mentouri-constantine, 2007.
- [3]: SANA HARIECH «Elaboration et caractérisation des couches minces de sulfure de cadmium (CdS) préparées par bain chimique (CBD)», mémoire de magister de l'universite mentouri-constantine, 2009.
- [4]: [http: www.microélectronique.univ-rennes1.fr /chap8c.htm](http://www.microelectronique.univ-rennes1.fr/chap8c.htm)
- [5]: Fayssal YNINEB «Contribution à l'élaboration de couches minces d'Oxydes Transparents Conducteurs (TCO)», mémoire de magister de l'université Mentouri Constantine, 2010.
- [6] : Melle BOUSSOUM Ouiza «Etude de l'effet d'une couche mince de TiO<sub>2</sub> sur les paramètres d'une cellule solaire au Silicium », mémoire de magister de l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2011.
- [7] : Mme FARDEHEB- MAMMERI Amina-Zahia « depot par pulverisation magnetron de couches minces de nitrure d'aluminium a axe c incline en vue de la realisation des dispositifs a ondes acoustiques vibrant en mode de cisaillement»,thèse de doctorat de l'université Abou Bekr belkaid, Tlemcen,2009.
- [8] : KHALED AMIRA «élaboration de nouvelles phases De silicium en couches minces», mémoire de magister de l'université Mentouri Constantine, 2008.



**Chapitre IV :**  
**Applications des ondes acoustiques et de la**  
**piézoélectricité**



1. Cas de la cellule solaire :

La piézoélectricité améliore l'efficacité des cellules solaires :

Des chercheurs américains ont mis au point une explication de leurs résultats récents qui montrent que l'introduction de nanofils semi-conducteurs piézo-électriques dans les cellules solaires améliore leur efficacité.

La piézoélectricité est la charge électrique créée lorsque certains matériaux sont placés en situation de compression ou d'étirement. Les matériaux piézoélectriques ont été utilisés comme des capteurs dans les voitures et aussi des sources d'inflammation dans les briquets électriques. Des chercheurs de partout dans le monde travaillent sur l'amélioration de l'efficacité des dispositifs photovoltaïques, mais jusqu'à récemment, on n'avait pas songé à exploiter le piézo-potential pour le faire.

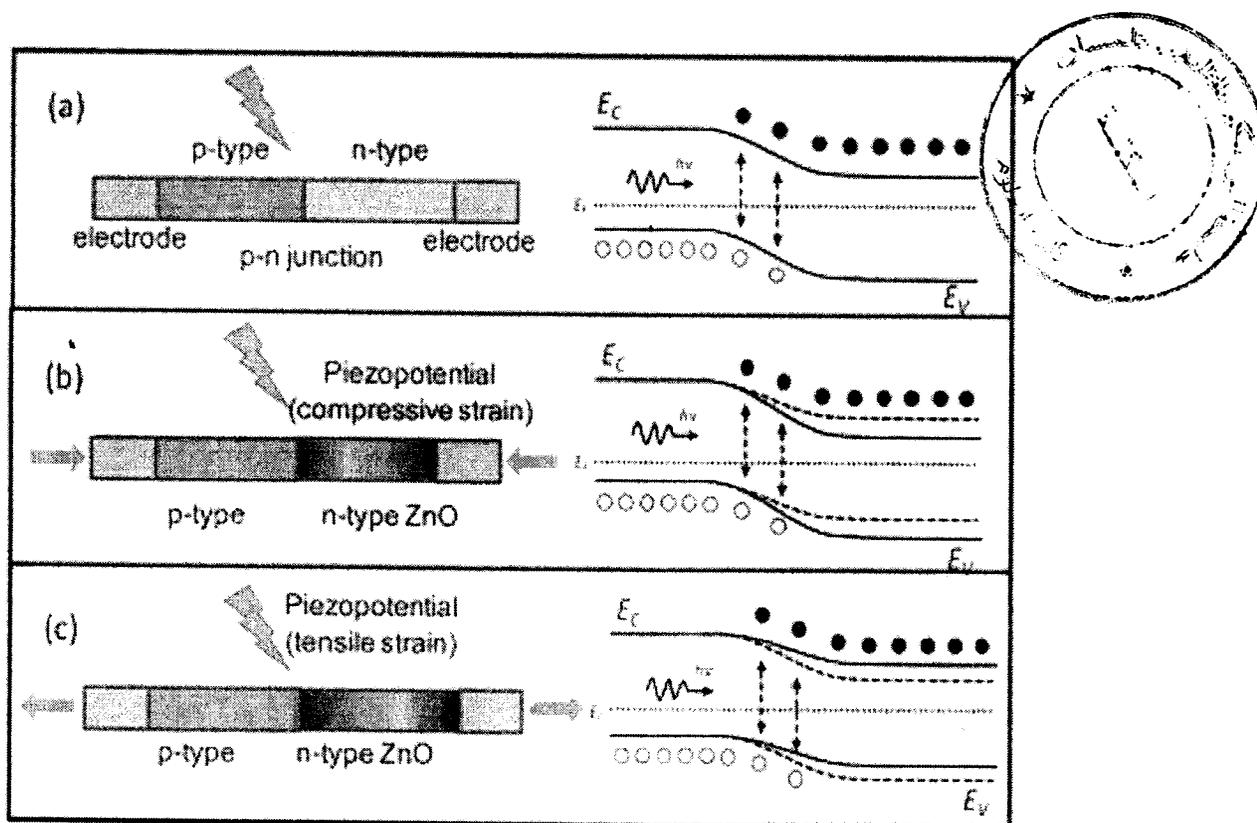


Figure IV.1 : Schéma des diagramme de bande d'énergie

(a) une cellule solaire générale à base d'une jonction pn



- (b) avec cellules piézo-électriques solaires en présence de la contrainte de compression
- (c) avec cellules piézo-électriques solaires en présence de traction,

La figure ? montre que la polarité et la valeur du piezopotential peut contrôler efficacement la génération de porteurs et les caractéristiques de transport. Le code de couleur représente la distribution du piezopotential à semi-conducteur de type n.

Dans une enquête précédente, Zhong Lin Wang et son équipe à la Georgia Institute of Technology, Atlanta, ont montré que la mise en oeuvre d'un semi-conducteur piézoélectrique dans une cellule solaire améliore son efficacité, mais ils ne pouvaient pas expliquer pourquoi. Maintenant, Wang a trouvé comment un film de ZnO piézoélectrique introduit dans une jonction pn pouvait améliorer les performances des cellules solaires en utilisant l'énergie des photons entrants pour séparer les paires électron-trou qui conduisent ensuite à la conduction de la charge électrique.

L'équipe a découvert que les matériaux piézo-électriques permet de modifier la structure de bande électronique à l'intérieur du dispositif, et cela affecte la génération de porteurs et de transport à la jonction. C'est passionnant parce que la tension de sortie de la cellule solaire dans son ensemble peut être contrôlée en changeant le potentiel piézoélectrique. Wang explique le fonctionnement des porteurs de charge et les processus de transport dans le matériau piézoélectrique, que nous appelons l'effet piézo-phototronic.

Dans l'avenir, le Georgia Tech groupe espère se baser sur «l'effet piezophototronic pour améliorer l'efficacité de leurs cellules solaires [1].



### ■ L'hybride photovoltaïque- piézoélectrique

Un **appareil hybride photovoltaïque-piézo-électrique** a été développé à l'IMRI de l'Université de Bolton qui est capable de **produire de l'énergie électrique à partir de l'énergie solaire, le vent, les marées, la pluie et de l'énergie.**

*Des fibres piézo-électriques (tissus) peuvent être tissées pour créer de l'énergie naturelle et être exploités en photovoltaïque. L'énergie est créée lorsque le matériau est déplacé à cause du vent ou la pluie. La nature flexible de la matière signifie qu'elle peut être incorporée dans le tissu, ce qui lui donne de nombreuses applications pratiques.*



Inventeur principal de la fibre hybride est le directeur de recherche à l'Université, le professeur Elias Siores. Il a dit: «Il n'ya rien comme notre **fibre piézoélectrique et photovoltaïque hybride sur** le marché à l'heure actuelle. Les scientifiques en Amérique ont créé des fibres piézoélectriques avec une flexibilité limitée et par conséquent des applications limitées. En tant qu'experts en matière de recherche et le développement de matériaux intelligents, "nous pensons que nous pourrions partant de ces idées conduire au développement de structures intelligentes qui pourraient produire de l'énergie sous l'effet d'un mouvement, mais sont aussi durables et flexibles. Nous avons déjà développé une fibre flexible qui génère de l'électricité par le mouvement créé par le vent et la pluie".

**L'hybride photovoltaïque-matériau piézoélectrique** a tellement de potentiel qu'il peut être tissée dans tout, y compris un ordinateur portable et étuis pour téléphones mobiles. Dans son boîtier, l'appareil pourrait être en charge, car il est manipulé ou placé près de la lumière du soleil.



Les applications les plus immédiates seront dans la zone de faible puissance, la microélectronique, les engins entraînés par des mobiles, des ordinateurs portables comme, MP3, iPad, tout ce qui nécessite batteries rechargeables ou des piles de petite taille afin de fonctionner. De toute évidence vous ne laisseriez pas votre ordinateur portable dans le vent et la pluie, mais le mouvement créé dans son étui placé près d'une fenêtre pourrait être suffisant pour générer l'énergie nécessaire pour le recharger. [2].

## 2. Transducteurs piézoélectriques et acoustiques

Depuis les années 90, l'arrivée des technologies microsystemes a permis des innovations importantes dans le domaine des transducteurs électroacoustiques et ultrasonores. Les méthodes de fabrication de la microélectronique, dans la plupart des cas appliquées au silicium, peuvent être complétées par des étapes supplémentaires pour déposer des couches permettant le mouvement de ces dispositifs.

Dans le cas du silicium qui ne manifeste pas la propriété piézoélectrique, d'autres couches doivent être déposées afin de créer un transducteur piézoélectrique. Le premier microphone MEMS utilisant cette approche a été développé par l'équipe de Royer en 1983. Ce microphone est composé d'une membrane gravée dans un substrat en silicium sur laquelle une couche d'oxyde de zinc (ZnO) couverte par une électrode métallique a été déposée. Cette structure électromécanique a été complétée par un amplificateur MOS intégré sur le même substrat.

L'arrivée des MEMS, ainsi que des applications de haute fréquence, ont stimulé les développements des technologies de fabrication des matériaux piézoélectriques en couches minces. Un autre matériau piézoélectrique, le nitrure d'aluminium (AlN), est intéressant pour l'application en couches sensibles des transducteurs électroacoustiques grâce à son coefficient piézoélectrique transversal élevé..... Après



avoir maîtrisé la technologie du dépôt sur le substrat en silicium suivie de la gravure du substrat, le premier microphone basé sur AlN a été présenté en 1988. Les fortes caractéristiques piézoélectriques du PZT ont motivé la recherche des techniques de dépôt, d'intégration et de conception des dispositifs utilisant des matériaux ferroélectriques. L'application de couches minces du PZT dans les microsystemes est arrivée avec un retard assez important à cause des difficultés d'intégration. Grâce aux résultats obtenus dans le domaine des mémoires (FRAM, DRAM) et des capacitances avec des constants diélectriques élevées, les premiers dispositifs MEMS acoustiques à base de PZT ont pu être publiés dans les années 90. A titre d'exemples, on peut citer un capteur d'émission acoustique et un transducteur ultrasonore micro-usiné (MUT pour Micromachined Ultrasonic Transducer) pour des applications médicales.

Les composants basés sur la propagation des ondes acoustiques dans les solides, couvrant une large gamme de fréquences allant de quelques centaines de kHz jusqu'à des dizaines de GHz, ont été développés depuis les années 60 où les premiers dispositifs employant des ondes acoustiques de surface (SAW pour Surface Acoustic Wave) ont été conçus. Un grand nombre d'applications pour des systèmes de communication professionnels (radar, GPS ...) et de consommation (télévision, téléphones mobiles, ...) tirent parti de ce progrès.

Le couplage piézoélectrique est essentiel pour la génération et la détection des ondes acoustiques de surface et de volume dans la gamme de fréquences RF. Les matériaux piézoélectriques, comme le quartz et le niobate de lithium ( $\text{LiNbO}_3$ ), bien connus des applications avec des ondes de volume, ont servi pendant le premier stade du développement des transducteurs SAW. Des matériaux alternatifs présentant de meilleures caractéristiques en haute fréquence en termes de couplage piézoélectrique, coefficient de température, pertes, génération indésirable des ondes de volume et autres, ont été cherchés.



Ainsi, les matériaux comme le tantalate de lithium ( $\text{LiTaO}_3$ ), l'oxyde de zinc ( $\text{ZnO}$ ) en couches minces sur des substrats de verre ou de saphir ou le tétraborate de lithium ( $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$  ou en abrégé LiT) ont été utilisés pour la fabrication des dispositifs.

La symétrie de la grille atomique des matériaux semi-conducteurs mono-éléments comme le silicium et le germanium engendre l'absence de la propriété piézoélectrique de ces matériaux. En revanche, les semi-conducteurs binaires sont généralement piézoélectriques grâce à la dissymétrie de leurs deux composants constitutifs. Parmi les semi-conducteurs piézoélectriques, c'est plus particulièrement l'arséniure de galium (GaAs) qui a été employé dans de nombreuses applications (lignes à retard, résonateurs, filtres, convolveurs, corrélateurs) utilisant des ondes acoustiques de surface intégrées avec l'électronique.

Plus récemment, des caractéristiques très intéressantes du nitrure de galium (GaN) en termes de mobilité des électrons et de vitesse de propagation des ondes acoustiques ont démarré la recherche orientée vers l'intégration des circuits électroniques de haute fréquence (transistors HEMT pour High Electron Mobility Transistors) et des éléments de propagation des ondes acoustiques.[3]

#### ■ Transducteurs acoustiques

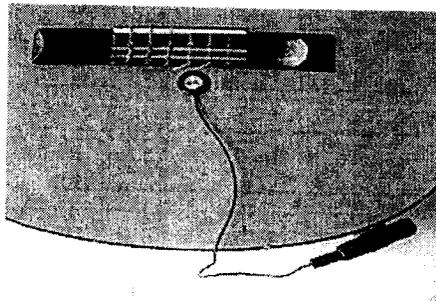


Figure IV.2 : Microphone de contact piézoélectrique sur une guitare classique.

Les matériaux piézoélectriques permettent de convertir une onde acoustique en signal électrique et inversement. Ils constituent le cœur des transducteurs acoustiques utilisés



pour émettre ou détecter des ondes acoustiques dans toutes les gammes de fréquences. On les retrouve dans plusieurs domaines.

- Dans les gammes de fréquences audibles, on réalise des microphones (et en particulier des microphones de contact) et des haut-parleurs, notamment dans les téléphones portables.
- Dans les sonars, utilisés dans la marine, mais aussi dans l'automobile, pour la détection d'obstacles.
- En médecine, on en utilise pour la réalisation d'échographies, qui nécessitent l'émission et la détection d'ondes ultrasonores, ainsi que pour certaines thérapies par ultrasons.[4]

### 3. Résonateurs piézoélectriques

Il est possible de réaliser des résonateurs piézoélectriques très stables au cours du temps et avec des fréquences très précises. La vibration piézoélectrique très stable permet de réaliser des références de temps exploitables en électronique. Les montres à quartz utilisent la résonance d'un diapason en quartz pour générer les impulsions régulières d'horloge.

Une caractéristique principale d'un oscillateur est son facteur de qualité qui mesure la finesse de sa résonance mécanique. Il est habituellement noté  $Q$ . Les quartz atteignent typiquement des facteurs de qualité de l'ordre de  $10^4$  à  $10^6$ .

Les microbalances piézoélectriques, et particulièrement les microbalances à quartz, reposent également sur ce principe et permettent des mesures de masses très précises.

On distingue essentiellement deux grandes familles de résonateurs composites :

Les HBARs (High Overtone Bulk Acoustic Resonators)

Les FBARs (Film Bulk Acoustic Resonators)



**a/ high overtone bulk acoustic resonators :**

Les HBARs sont constitués de deux parties distinctes :

Le matériau piézoélectrique pris en sandwich entre les deux électrodes d'excitation, appelé transducteur, la cavité résonante dans laquelle va s'établir un système d'ondes stationnaires comme dans un interféromètre Fabry-Perot.

La cavité est constituée d'un matériau non piézoélectrique présentant un fort facteur de qualité acoustique (Figure IV.3). Le transducteur, posé sur la cavité, va coupler une petite quantité de son énergie avec cette dernière. La résonance utilisée est celle de la cavité ce qui permet d'obtenir de forts facteurs de qualité (20000 à 2GHz). Un tel système est plutôt utilisé à de hautes fréquences comme partie résonante d'un oscillateur. Les dimensions de la cavité étant très grandes par rapport à celles du transducteur (l'épaisseur du transducteur est proche de la demi-longueur d'onde), la fréquence de fonctionnement utilisée est un multiple de la fréquence fondamentale d'où le nom anglais de High Overtone Acoustic Resonator. Les dimensions, malgré tout, modestes pour ce type de résonateur (0.5mm d'épaisseur pour la cavité), ainsi que l'encombrement excessif du spectre autour de la fréquence de résonance choisie ne permettent pas d'envisager leur utilisation pour des applications de filtrage hautes fréquences [5].



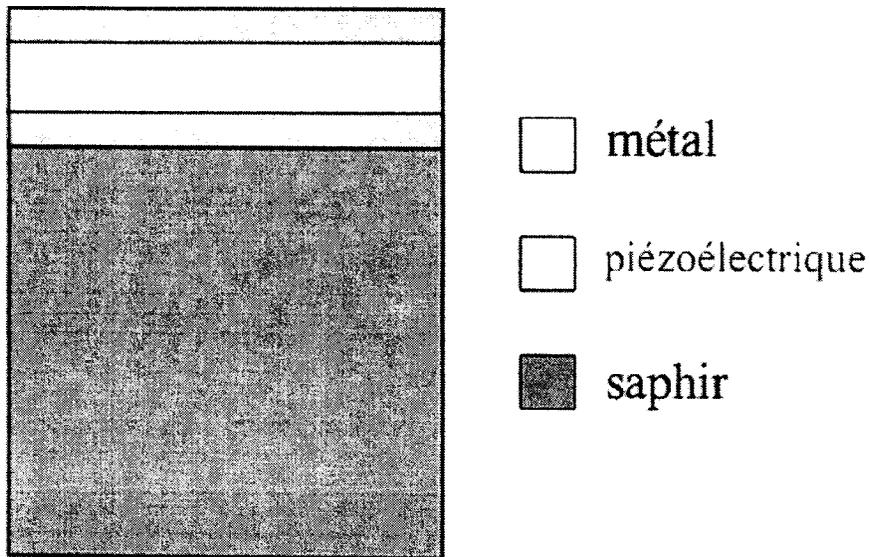


Figure IV.3: HBARs

#### b/ film bulk acoustic resonators

Contrairement au système précédant, le transducteur est posé sur un substrat non piézoélectrique de faible épaisseur. Généralement, l'épaisseur du substrat est comparable à celle de la couche piézoélectrique ou plus fine. La fréquence de résonance et le facteur de qualité de ce système sont fortement liés aux propriétés acoustiques du matériau piézo-électrique, de la métallisation, ainsi qu'à celle du substrat. Un des points clefs dans le design du résonateur est la partie supportant le résonateur. Il faut jouer avec les conditions aux limites mécaniques afin de confiner l'onde acoustique dans la partie résonante, assurant ainsi une diminution des pertes acoustiques. On distingue trois configurations majeures qui sont toutes liées à un procédé microélectronique particulier :

Dans les deux premières configurations, Figure IV-4 et Figure IV-5, les résonateurs présentent une impédance acoustique faible à l'interface résonateur-air.

La première structure (Figure IV-4) repose sur une membrane micro-usinée sur substrat massif. Les principales étapes de fabrication sont le dépôt de la partie résonateur sur le substrat puis l'élimination localisée du substrat afin d'obtenir une fine membrane sur laquelle repose le résonateur. Le silicium haut résistivité et l'arséniure de gallium sont des substrats couramment utilisés. L'inconvénient de ce type de structure provient des contraintes mécaniques exercées sur la membrane, qui a tendance à se déformer et à se déchirer.

La seconde configuration (Figure IV-5) nécessite la fabrication d'un gap d'air entre le résonateur et le substrat. Celui-ci est réalisé en déposant une couche sacrificielle entre le résonateur et le substrat. La dernière étape de fabrication consiste à enlever cette couche, ce qui permet au résonateur d'être suspendu au-dessus du substrat. La couche sacrificielle est généralement du SiO<sub>2</sub>. Là encore, la structure est fragile et sa conception nécessite une parfaite maîtrise des contraintes mécaniques. Le seul réel avantage par rapport à la première configuration est que cette technique s'applique sur un plus grand choix de substrat.

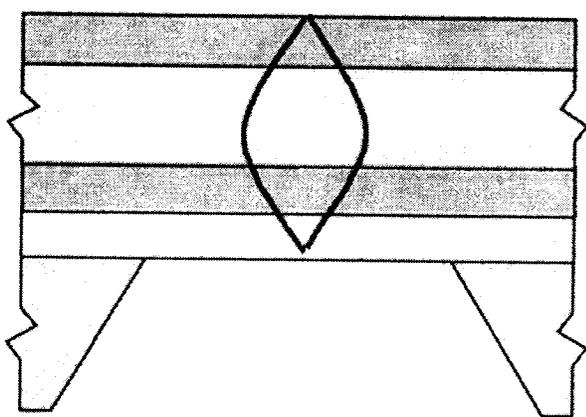


Figure IV-4 Supported FBARs

- onde acoustique
- métal
- ▨ piézoélectrique
- membrane
- ▧ substrat



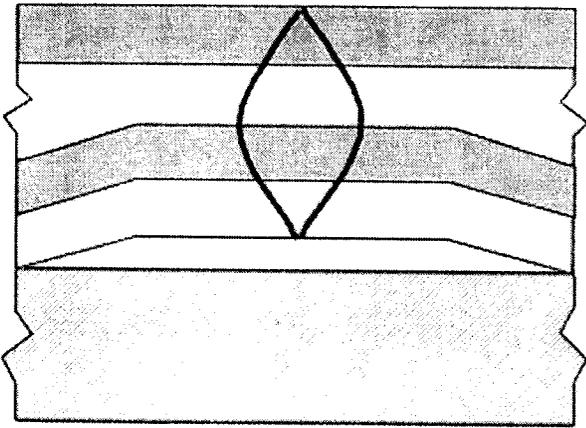


Figure IV-5 Air Gap FBARs

Jae Y. Park et son équipe ont réalisé un résonateur AlN suspendu sur membrane Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> à 2 GHz. Le facteur de qualité avoisine les 1530. C'est le meilleur résultat obtenu à cette fréquence pour ce type de structure. Notons aussi qu'il est possible de réaliser des résonateurs à gap d'air sans membrane.

La troisième configuration de résonateur (Figure IV-6) est à l'opposée du concept de membrane, puisque le résonateur est parfaitement lié au substrat. C'est ce que l'on appelle "Solidly Mounted Resonators" SMR. Il est nécessaire dans cette configuration d'isoler mécaniquement la partie résonante du substrat afin d'éviter que l'onde acoustique ne s'y atténue. En 1965, Newell fut le premier à proposer une technique de transformation d'impédance dans le but d'isoler acoustiquement le résonateur du substrat. C'est la technique du transformateur quart d'onde, où l'onde de référence est celle de la structure résonante.

L'interface acoustique entre le résonateur et le substrat est composée d'un ensemble de couche d'impédance très différente ( $Z_1$ ,  $Z_2$ ) pour assurer l'isolation (réflecteur de Bragg).

L'intérêt principal des résonateurs SMRs est qu'ils peuvent être fabriqués sur une grande variété de substrat, les propriétés acoustiques du substrat étant sans



importances. Leur inconvénient majeur provient du nombre élevé de couches qu'il faut déposer pour atteindre l'isolation acoustique souhaitée, en maîtrisant parfaitement l'épaisseur des couches lors du procédé technologique.

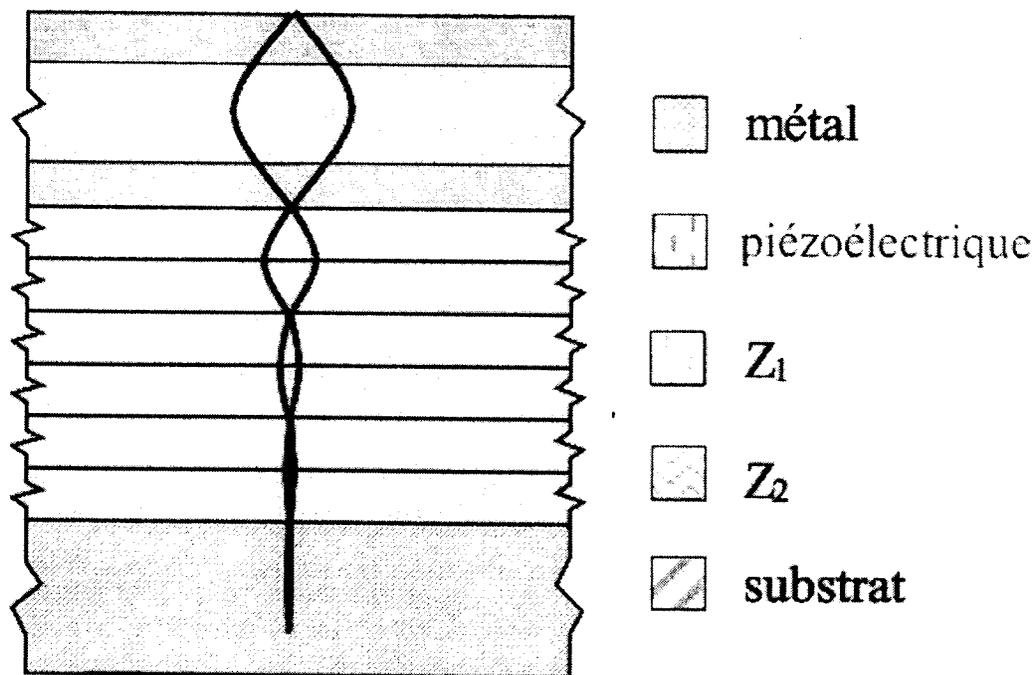


Figure IV-6 SMR

Un tel résonateur a été fabriqué par G. Yoon et J.D. Park. Le résonateur comprend une couche de ZnO de  $1.4 \mu\text{m}$  entre deux électrodes d'aluminium. Le réflecteur de Bragg est composé de 7 couches alternées de SiO<sub>2</sub> (350 nm) et de tungstène (600 nm), le tout reposant sur un substrat Si (0.35mm). La résonance à 2 GHz présente un facteur de qualité de 4000 et les pertes d'insertion sont d'1 dB. Les très bonnes performances électriques proviennent à la fois de l'isolation acoustique et de la technique de dépôt du ZnO.

L'équipe de K. M. Lakin a aussi fabriqué deux résonateurs SMRs à base d'AlN avec une isolation à 9 niveaux AlN/SiO<sub>2</sub>. L'originalité de ces résonateurs se situe dans l'utilisation du matériau piézoélectrique comme couche du réflecteur de Bragg. La fréquence de résonance du premier résonateur est de 5 GHz avec un facteur de qualité



Q de 670 et le second résonne à 20 GHz avec un Q de 300. Les auteurs visent actuellement une résonance à 40 GHz.

Les résonateurs décrits précédemment sont tous dans une configuration électrique 1 port, à savoir une entrée et une référence. Il existe une autre famille de résonateurs montés dans une configuration électrique 2 ports (2 entrées et une référence). Ce sont les résonateurs à double couche piézoélectrique : Les SCs (Stacked Crystals)

### ■ Stacked crystals

Cette structure est constituée de deux couches piézoélectriques superposées l'une sur l'autre mais séparées par une électrode centrale (Figure IV-7). Typiquement, l'électrode du milieu est reliée à la masse. La structure sert de filtre 1 pôle quand le signal d'entrée est appliqué entre l'électrode supérieure et l'électrode centrale ; le signal de sortie est alors prélevé entre l'électrode inférieure et celle du milieu. On parle dans ce cas là de "Stacked Crystals" SCs. Chaque résonateur a une épaisseur correspondant à une demi-longueur d'onde et donc la structure totale opère à la longueur d'onde complète (seconde harmonique). Le problème de la structure SC est que les modes alentours encombrant le spectre. Ces résonateurs sont essentiellement utilisés pour la réalisation de filtre multipôles comme nous le verrons par la suite.

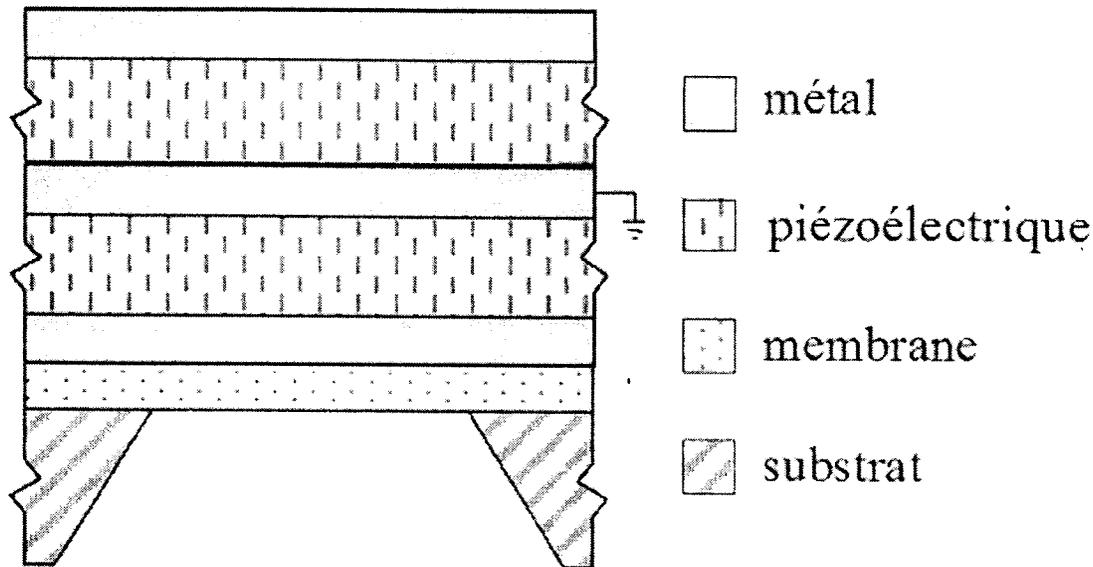


Figure IV-7 SC

#### 4. Capteurs de pression ou d'accélération:

Une pression exercée sur un matériau piézoélectrique génère des charges que l'on peut mesurer électroniquement. Les matériaux piézoélectriques sont donc des candidats naturels pour les applications basées sur la détection de pressions. Des capteurs de pression piézoélectriques sont utilisés notamment pour l'automobile (pression des pneus), l'aéronautique (pression dans les tuyères), des pèse-personnes, ou la musique (batterie électronique).

Sur le même principe, il est possible de mesurer une accélération. On peut ainsi réaliser des capteurs inertiels (accéléromètre à lame vibrante, gyromètre vibrant Coriolis) qui peuvent être utilisés dans les centrales à inertie ou plus couramment dans des applications de plus basse précision : coussin gonflable de sécurité, guidage, manette de console de jeu vidéo.



## 5. Moteurs et actuateurs piézoélectriques

### 5.1 Principe de fonctionnement

Lorsqu'on soumet certains matériaux non conducteurs à une contrainte mécanique, un champ électrique apparaît entre leurs faces. Cet effet est appelé la **piézoélectricité directe**. Le champ électrique est créé par la séparation, suite à la déformation, des centres de charge positive et négative. Inversement, sous un champ électrique imposé, ces matériaux se déforment (légèrement, de l'ordre de 1 pour 1000). Les matériaux piézoélectriques sont, par exemple, le BaTiO<sub>3</sub> (titanate de baryum, élément naturel) ou les **céramiques PZT** (Zirconate, Titanate de Plomb, céramiques artificielles). Lorsque ces éléments subissent un champ électrique variable dans le temps, ils se mettent à vibrer avec la même fréquence que celui-ci. Pour certaines fréquences bien déterminées, les éléments piézo entrent en **résonance**. Leur déformation peut alors être bien plus grande (quelques micromètres) que leur déformation statique [6].

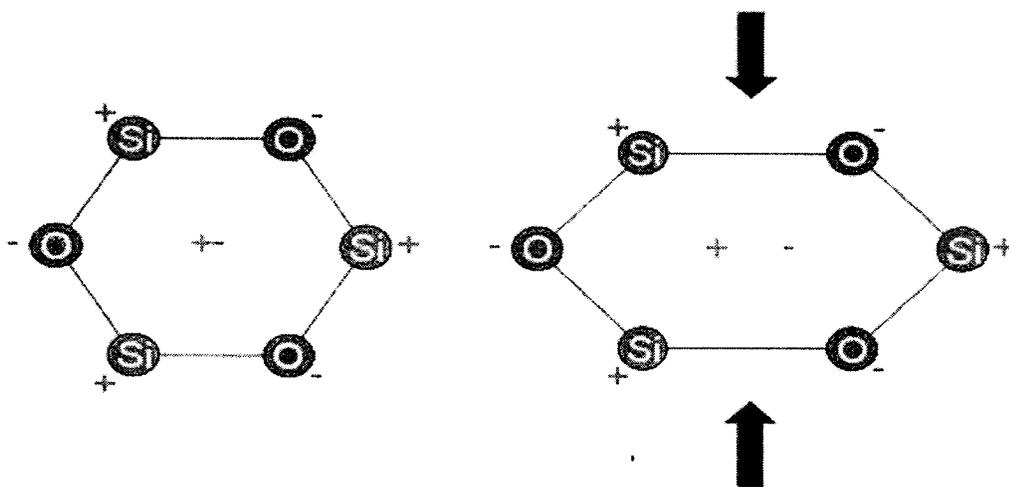


figure IV.8 : Illustration du principe de piézoélectricité directe: la déformation causée par l'effort de compression génère une séparation des centres des charges positives et négatives; d'où l'apparition d'un champ électrique.

Pour fabriquer un moteur piézoélectrique à onde progressive, on colle un anneau de céramique PZT sur une structure métallique, annulaire également. On excite ces

céramiques à l'aide d'un champ variable à une fréquence de quelques dizaines de kHz, correspondant à un des modes propres de flexion de l'assemblage statorique. Les vibrations se transmettent alors à l'anneau qui se met à vibrer. En combinant correctement 2 vibrations sinusoïdales déphasées de  $90^\circ$  dans le temps et d'un quart de longueur d'onde dans l'espace (au niveau de l'excitation des céramiques), on arrive à créer une **onde progressive** au sein de ce stator. Physiquement, cette onde est comparable à la propagation d'une vague.

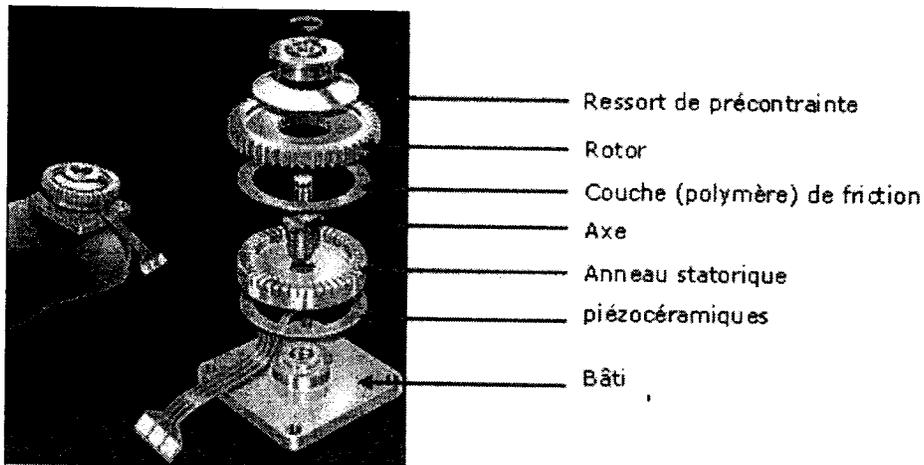


figure IV.9 : Vue éclatée des différents composants d'un moteur à onde progressive.

Cette onde progressive, se propageant dans l'anneau statorique, impose à chaque point de celui-ci une **trajectoire elliptique** comme illustré sur le schéma ci-dessous. En posant un disque libre en rotation sur le stator vibrant, il est entraîné dans un mouvement de rotation opposé à la propagation de l'onde grâce au contact avec les crêtes des "vagues" du stator. On obtient finalement un **mouvement de rotation continu** à partir d'une vibration piézoélectrique à haute fréquence. La modélisation permet de visualiser le comportement du stator excité par les piézocéramiques. Les "**dents**" présentes sur le stator permettent d'amplifier le mouvement d'entraînement sans rigidifier le stator ainsi que d'éliminer les particules d'usure issues du frottement entre le stator et le rotor.

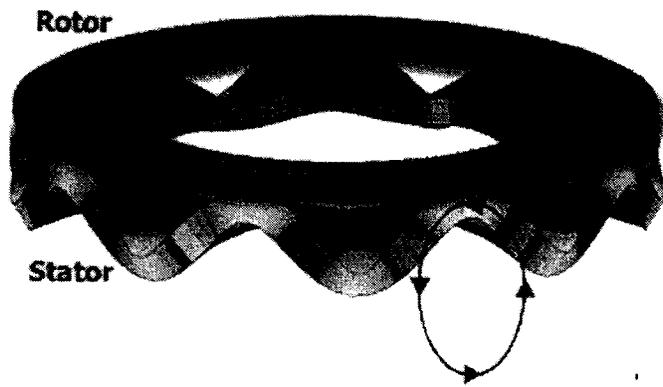


figure IV.10: Représentation de l'entraînement du rotor par les crêtes de l'onde progressive.

## 5.2 Caractéristiques

### a/Avantages:

Par rapport à un moteur classique de même taille (DC, quelques watts):

- La puissance massique est potentiellement plus élevée;
- La vitesse de sortie est faible et le couple élevé, plus besoin de réducteur (+ petit et + léger);
- Le niveau de bruit est très faible voir nul (vibrations ultrasonores);
- La réactivité est de l'ordre de la milliseconde (au lieu de quelques centaines de ms);
- A l'arrêt, le moteur est naturellement bloqué sans consommer d'énergie grâce à la pression du rotor sur le stator;
- Il n'y a aucun risque de perturbation électromagnétique;
- Le moteur est de fabrication simple;
- Son design est très flexible, il peut s'intégrer au cœur même du mécanisme .

### b/ Inconvénients :

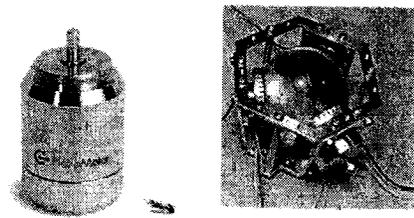
- La faible durée de vie (2000h) due à l'usure de l'interface de friction;



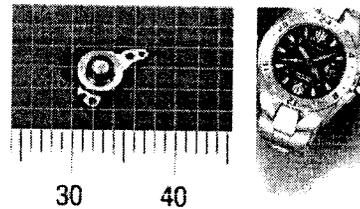
- Le coût élevé (développement, fabrication des céramiques, nouvelle technologie);
- L'alimentation électrique complexe (contrôle et concordance des 2 voies);
- Le rendement énergétique faible (10-25%) dû aux pertes dans la céramique piézo et lors de l'entraînement par friction;
- Le besoin d'une source électrique à haute fréquence.

### 5.3 Quelques Applications :

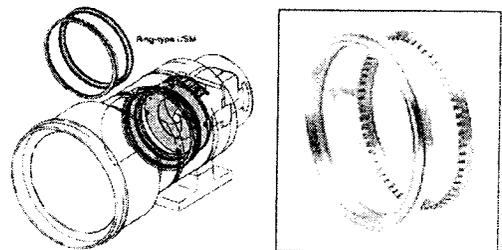
**Microrobotique:** De petits moteurs et actionneurs peuvent être conçus pour des applications de robotique ne nécessitant pas une grande puissance mais une grande précision et un poids limité.



**Montres:** Un micromoteur pour date a été développé par la firme Seiko. Ce système permet d'actionner l'affichage de la date et donc de gérer le nombre de jours dans le mois en cours (28, 29, 30 ou 31). Il s'agit d'un des plus petit moteur intégré actuellement. Son diamètre est de 4mm!

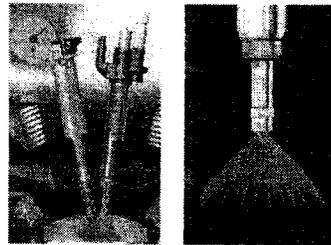


**Auto focus:** L'intégration au sein même du mécanisme est un avantage indéniable des moteurs à onde progressive. Leur géométrie annulaire permet l'utilisation de l'espace intérieur pour le maintien d'instrument (ici la lentille d'un

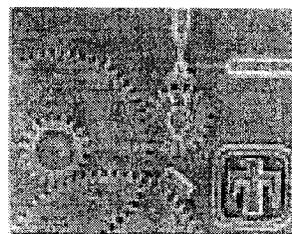


appareil photo). On peut imaginer le passage de fils (commande, alimentation,...) de tubes (refroidissement, lubrification,...), de mécanismes plus complexes,...

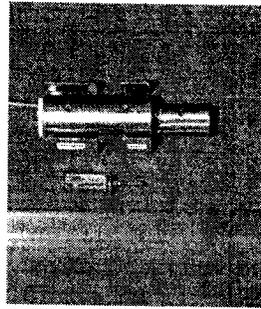
**Automobile:** Les applications automobiles ne sont pas encore largement développées. Cependant, on peut imaginer qu'à l'avenir, les piézomoteurs actionneront les vitres, sièges, ouvertures centralisées, écrans mobiles, vannes,... Une application récente qui devrait se concrétiser dans les prochaines années est l'injection directe d'essence par un moteur linéaire combinant haute pression (200bar) et grande vitesse (0,2ms).



**MEM's:** Les "Micro Electro Mechanical Systems" sont des mécanismes dont la taille avoisine le micromètre. Ces mécanismes nécessitent également des moteurs. La miniaturisation des moteurs électromagnétiques étant impossible à cette échelle, il faut se rabattre sur d'autres technologies telles que les moteurs électrostatiques ou... piézoélectriques.



**Et bientôt...** Un nombre très important d'applications nécessitent des mouvements précis, rapides, "propres" (pas de pollutions électromagnétiques) et silencieux tout en limitant l'encombrement et le poids. Les moteurs piézoélectriques sont une réponse possible à ces besoins. Voici quelques exemples supplémentaires d'applications potentielles: Motorisation de matériel médical; Positionneurs de précision pour microscope; Manipulateur de cartes à puce;...et tous les petits moteurs se trouvant dans nos appareils quotidiens (PC, voiture, électroménager,...)



## 6. Générateurs et transformateurs

L'allume-gaz et le briquet « électronique » sont des exemples de la manière dont les piézoélectriques permettent de produire de fortes tensions. L'effet piézoélectrique direct permet de générer de très fortes tensions, supérieures à la tension de claquage de l'air 30 kV/cm pour un écartement de quelques millimètres. Lorsque cette tension est atteinte, une étincelle de décharge est produite et mise à profit pour allumer le gaz du briquet ou de la gazinière.



### ■ Générateur de signaux piézoélectrique avec/sans électronique

Le cœur du détecteur piézoélectrique est un simple disque piézoélectrique constitué d'une plaque de céramique couverte d'une couche métallique. Si le disque est commandé à partir d'un circuit oscillant externe, on parle d'un transducteur piézoélectrique.

Si le circuit oscillant est dans le boîtier, on dira alors qu'il s'agit d'un buzzer piézoélectrique.

L'avantage de cette construction simple est la solidité et le faible coût de fabrication. Les générateurs Piézoélectrique sonores sont excellents dans le domaine des systèmes d'alerte et de control acoustique sur la bande de fréquences restreinte, par exemple dans les appareils de cuisine ou dans la technique médicale [7].

Les générateurs piézoélectriques sont disponibles en différentes tailles, avec un son qui varie de l'agréable à l'agressif. Ils sont proposés dans les fréquences usuelles comprises entre 2000 Hz et 5000 Hz. La plage de température de fonctionnement possible est de  $-40^{\circ}\text{C}$  à  $+120^{\circ}\text{C}$ . Les tensions nominales se situent entre 3 V et 12 V. Des tensions plus élevées selon les exigences spécifiques du client sont possibles. Les générateurs de signaux sont livrables sous différentes versions : CMS, avec broches ou avec fils.

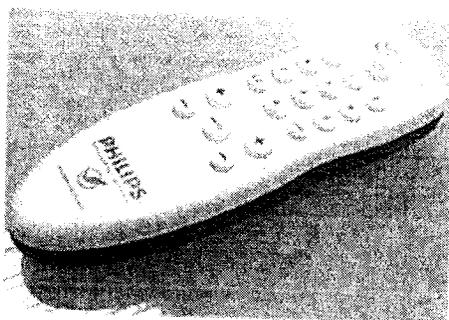
### ■ Transformateurs piézoélectriques

Un transformateur piézoélectrique est un multiplicateur de tension alternative. Contrairement au transformateur classique qui utilise un couplage magnétique, le couplage mis à profit est acoustique. Par effet piézoélectrique inverse, une tension d'excitation permet de générer (à l'aide d'électrodes situées sur une des deux extrémités de la barre) une contrainte alternative dans une barre d'un matériau fortement



piézoélectrique (une céramique PZT par exemple). Cette contrainte permet la mise en vibration de la barre à une fréquence choisie pour correspondre à une fréquence de résonance. Par effet piézoélectrique direct, une tension est générée sur des électrodes situées sur la deuxième extrémité de la barre. Cette tension, qui bénéficie de l'amplification du mouvement dû à la résonance, peut être 1 000 fois plus élevée.

#### ■ Microgénérateurs



Télécommande de TV sans pile, réalisée par Arveni sas pour Philips en 2011

Les piézoélectriques sont aussi au cœur d'applications plus récentes visant à récupérer l'énergie présente dans notre environnement sous différentes formes ou effectuées par des mouvements quotidiens.

Un exemple étudié en laboratoire est l'incorporation d'un film piézoélectrique dans des baskets afin de produire de l'énergie grâce à la pression du talon pendant la marche. Les faibles puissances produites pourraient suffire à terme à alimenter certains dispositifs électroniques. Toutefois, la mise au point de tels dispositifs piézoélectriques reste délicate et de nombreux obstacles restent à surmonter.

Les premiers prototypes, dits microgénérateurs, sont apparus en 2006 (cf démonstrateur de sonnette de maison sans fil et sans pile de la société française Arveni s.a.s.). Ils récupèrent par exemple l'énergie mécanique fournie par la pression du doigt sur un bouton. L'électricité ainsi récupérée sert à alimenter un circuit radio, qui émet



un message vers le récepteur. Il existe aussi des applications industrielles, comme les réseaux de capteurs sans fil où la source d'énergie est la vibration d'une machine par exemple. Les applications sont la maintenance préventive, la surveillance de santé des structures, ou le contrôle de processus [8].

La récupération d'énergie par microgénérateur piezoélectrique, est un domaine technique émergent. A terme, l'idée est de remplacer les piles (qui contiennent souvent des matériaux polluants) par des microsources d'énergie renouvelable, pour toutes les applications communicantes, où une énergie mécanique extérieure existe.



**Bibliographie**

- [1]: [http:// www.RSC/Advancingthechemicalsciences.com](http://www.RSC/Advancingthechemicalsciences.com).
- [2]: [http/ : www.ELECTRONICSBUS.com](http://www.ELECTRONICSBUS.com)
- [3]: Libor Rufer "transducteurs electroacoustiques et ultrasonores : des macro- aux micro-systemes", pour obtenir l'Habilitation à Diriger des Recherches, Université Joseph Fourier de Grenoble, 2007.
- [4]: [http: www.wikipédia/piézoélectricité.com](http://www.wikipédia/piézoélectricité.com).
- [5]: Eric GABORIAUD " Etude des résonateurs piézoélectriques dans le domaine des microondes : application au filtrage", thèse de doctorat de l'université de Limoges, 2004.
- [6]: [http: www.wikipédia/piézoélectricité.com](http://www.wikipédia/piézoélectricité.com).
- [7]: [http/ www.POLYTECH.MONS/piézoélectrique.com](http://www.POLYTECH.MONS/piézoélectrique.com)
- [8]: [http: www.wikipédia/piézoélectricité.com](http://www.wikipédia/piézoélectricité.com).



## Conclusion générale

Dans ce travail, les objectifs étaient tout d'abord, d'étudier théoriquement le phénomène de la piézoélectricité et d'étudier les ondes acoustiques et ses propriétés électriques, puis les propagations de ses ondes dans les milieux piézoélectriques ainsi les techniques de fabrication des couches minces, puis on va voir quelques applications de la piézoélectricité et de l'acoustique.

Ce travail a commencé par une étude sur la piézoélectricité et les matériaux piézoélectriques en expliquant leurs propriétés physiques et chimiques en citant les grandes familles des matériaux puis on passe à l'étude des ondes acoustiques, leur vitesse, fréquence, longueur d'onde et d'autres caractéristiques.

Après cette partie, on étudie les dispositifs à ondes acoustiques de surface SAW et de volume BAW et les tenseurs de déformations et de contraintes de la piézoélectricité avec les relations entre eux, on a aussi les équations de propagation des ondes élastiques dans les milieux piézoélectriques.

Dans la partie suivante, nous avons vu les techniques de dépôt de couches minces, par voie chimique, dépôt chimique en phase vapeur et par voie physique, dépôt physique en phase vapeur et les différents procédés de ces méthodes, ainsi la méthodologie de photolithographie pour réaliser des dispositifs de surface SAW.

La dernière partie de ce travail consacrée à des applications, la première est le cas d'une cellule photovoltaïque en utilisant des matériaux piézoélectriques ainsi les résonateurs et transducteurs acoustiques et piézoélectriques et des générateurs, moteurs et actuateurs piézoélectriques.

Les objectifs que nous avons visés au début de ce travail, ont été majoritairement atteints, à savoir, l'étude des ondes acoustiques de surface, leurs applications, l'étude et le développement des procédés technologiques permettant de réaliser les dispositifs à ondes acoustiques de surface et de volume. On voit donc qu'il y a plusieurs domaines



## Conclusion générale

---

d'utilisation de la piézoélectricité et les matériaux piézoélectriques surtout dans les technologies modernes de la photovoltaïque on peut les utilise pour améliorer l'efficacité des cellules solaires.

