

Stay home, save your country

Université Mohamed Boudiaf M'sila
Faculté des Science
Département de Physique
Master 1 Physique Appliquée



PIEZOELECTRICITE

I. PIEZOELECTRICITE

I.1. HISTORIQUE

La piézoélectricité, la pyroélectricité et la ferroélectricité sont connues depuis de nombreuses années. Le phénomène électrique résulte de l'action d'une contrainte mécanique sur certains cristaux fut observé qualitativement pour la première fois en 1817 par l'Abbé René Just HAUY.

L'étude théorique et expérimentale de ce phénomène fut entreprise par les frères pierre et Jacques CURIE en 1880 [1], à qui l'on attribue la découverte de l'effet piézoélectrique directe. L'effet piézoélectrique inverse fut énoncé théoriquement par LIPMAN en 1881 et vérifié expérimentalement la même année par les frères CURIE. Cet effet inverse se manifeste par une déformation mécanique provoquée par l'application d'un champ électrique.

Les premières applications industrielles apparaissent pendant la première guerre mondiale avec le générateur d'ondes ultrasonores pour la mesure et la détection sous – marine mis au point par Paul LANGEVIN [2].

À partir de 1943 les progrès technologiques permettent l'élaboration des premiers matériaux piézoélectriques sous forme de céramiques de titanate de baryum. Quelques années plus tard, des céramiques formées de solutions solides de zircon-titanate de plomb (PZT) de formule de base $Pb(Zr_{1-x}Ti_x)O_3$ furent mises au point. Aujourd'hui les céramiques de types PZT sont utilisées dans de nombreuses applications telles que les générateurs d'impulsions, les capteurs et les actionneurs [1].

I.2. DEFINITION

La piézoélectricité, est la propriété que possèdent certains corps de se polariser électriquement sous l'action d'une contrainte mécanique et réciproquement de se déformer lorsqu'on leur applique un champ électrique[2].

Les deux effets sont indissociables. Le premier est appelé effet piézoélectrique direct ; le second effet piézoélectrique inverse.

I.2.a. PRINCIPE PHYSIQUE

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.

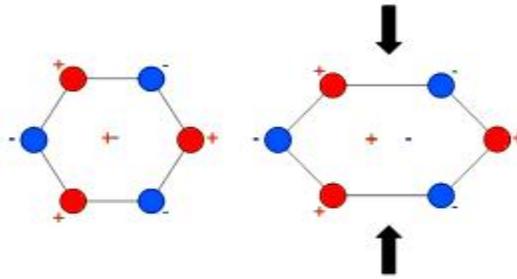


Figure I.6 : Séparation des centres des charges positives et négatives [2]

I.2.b. EFFET PIEZOELECTRIQUE

Effet direct : on applique une contrainte mécanique et produit un courant électrique.

Effet inverse : on applique une tension électrique et produit une déformation mécanique.

Si une plaque piézoélectrique (figure I.7) polarisée dans la direction indiquée par Porte des électrodes au-dessus de ses deux faces plates, alors un effort de compression fait entrer un courant transitoire dans le circuit externe et un effort de tension produit le courant dans le sens opposé (figure I.7 (a)). Réciproquement, l'application d'un champ électrique produit une contrainte dans le cristal, dite une contrainte négative, l'inversion du champ cause une contrainte positive (Figure I.7 (b)). [2]

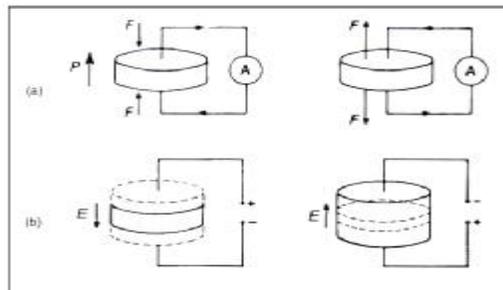


Figure I.7 : (a) L'effet piézoélectrique direct, (b) L'effet piézoélectrique indirect [2]

I.3. SYMETRIE CRISTALLINE

Lorsque l'on soumet un cristal à une contrainte mécanique, celui-ci va se déformer [3]. Si la structure cristalline n'est pas Centro symétrique, les barycentres des ions positifs et négatifs vont se dissocier et former un dipôle. Parmi les 32 structures cristallines possibles, 21 sont non centrosymétriques. Parmi ces 21 structures non centrosymétriques, 20 sont piézoélectriques [2].

Les barycentres des ions positifs et négatifs peuvent également être séparés même lorsque le cristal est au repos, c'est-à-dire lorsqu'aucune contrainte mécanique n'est appliquée sur le matériau.

Les matériaux pyro-électriques présentent une polarisation électrique, même en l'absence de champ électrique extérieur.

Parmi les 20 classes de structures piézoélectriques, 10 sont pyro-électriques. [3]

Les dépendances entre les différentes classes cristallines sont présentées Figure I.8.

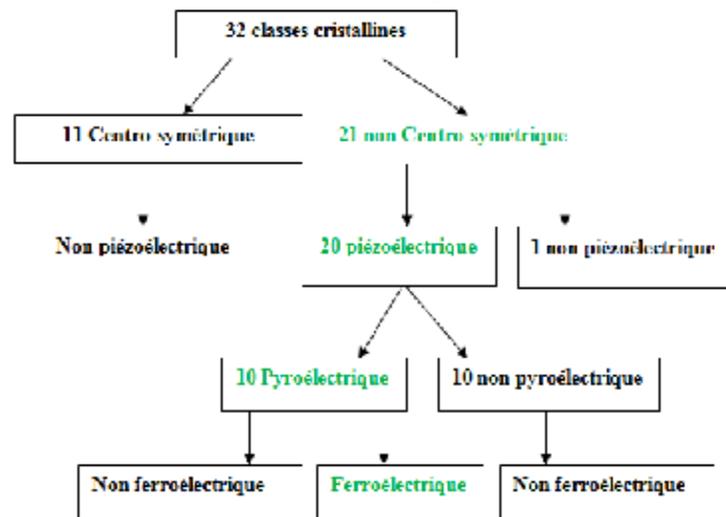


Figure I.8 : Différentes classes cristallines

II.4. MATERIAUX PIEZOELECTRIQUE

II.4.1. DEFINITION

Les matériaux piézoélectriques peuvent être naturels ou synthétiques.

Les matériaux piézo-électriques naturels sont des matériaux cristallins tels que : le quartz (SiO_2), le sel de Rochelle, la topaze, les minéraux du groupe de la tourmaline et certaines substances organiques telles que la soie, le bois, l'émail, la dentine, les os.

Les matériaux piézoélectriques synthétiques sont des cristaux d'isotopes de quartz, de céramiques, de polymères et de composites.

II.4.2. LES MATERIAUX PIEZOELECTRIQUE SYNTHÉQUES

II.4.2.a. POLYMERE PVDF

Le Poly Fluorure de Vinylidène (PolyVinylidèneFloride, PVDF) est un polymère thermoplastique très résistant et léger ; Le motif élémentaire (monomère) qui constitue le matériau est répété suivant la formule $-(\text{CH}_2 \text{CF}_2)_n-$, avec les atomes de fluor et d'hydrogène constituant un dipôle électrostatique (figure II.5) [11].

Dans une même chaîne les directions de ces dipôles sont variées et aucune polarisation n'apparaît globalement.

Pour obtenir une polarisation rémanente, le polymère est dilaté par la chaleur, puis en appliquer un champ électrique intense et produire une séparation du barycentre des charges [5]. Ce procédé permet d'obtenir une direction de polarisation dans le sens de l'épaisseur de l'échantillon.

La majorité des atomes d'hydrogène (H) se trouve sur l'un des côtés de la feuille tandis que les atomes de fluor se trouvent de l'autre côté. Ce qui créé des dipôles.

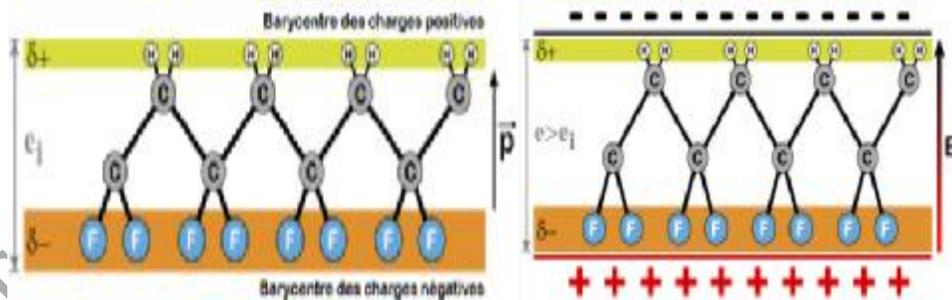


Figure II.6 : La polarisation de PVDF

II.4.2.b. COMPOSITES PIEZOELECTRIQUE

Un composite piézoélectrique (ou piézocomposite) est formé de deux constituants également appelés phases : une phase piézoélectrique (fibre piézocéramique) et une phase non piézoélectrique (typiquement une résine époxy qui protège et assure la tenue mécanique de l'ensemble).

Lorsqu'en appliqué une pression sur le composite il produit une polarisation dans la direction des fibres [6].

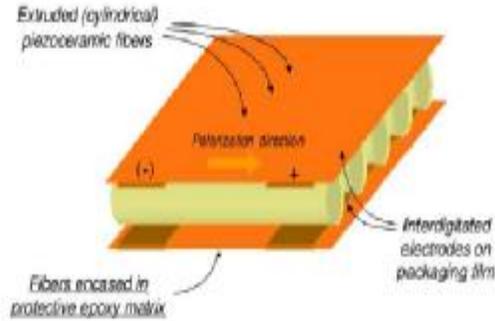


Figure II.7 : Composite piézoélectrique

II.4.2.c. CERAMIQUE PIEZOELECTRIQUE

À la différence des cristaux dont la structure est figée, les céramiques piézoélectriques ont une structure qui peut varier ; leur polarisation peut être modifiée, après quoi ils présentent une polarisation rémanente. Une famille importante de céramiques piézoélectriques est celle des PZT (Oxyde de plomb, zirconium et titane) qui possèdent d'excellentes propriétés piézoélectriques [4].

Il y'a 3 types de céramique piézoélectrique :

-Titanate de baryum (BaTiO_3) -Le titanate de barium a été la première céramique piézoélectrique découverte

-Le titanate de zirconite de plomb ($\text{Pb}[\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x}]\text{O}_3$ $0 < x < 1$), plus communément appelé PZT, le titanate de zirconite de plomb est la céramique piézoélectrique la plus utilisée actuellement.

-Le niobate de lithium (LiNbO_3).[7]

Les céramiques (PZT) peuvent être classées dans deux groupes :

Les PZT doux et les PZT durs.[26]

PZT durs : Ce sont les dopants accepteurs, comme : Fe^{3+} , Mg^{2+} et Al^{3+} .

Ils provoquent l'augmentation :

- Du facteur de qualité mécanique, du champ coercitif, de la conductivité, et une diminution : de la permittivité, des pertes diélectriques, des coefficients de couplage.

PZT doux : L'excès de charge positive apporté par les dopants donneurs comme La^{3+} en site A ou Nb^{5+} , Sb^{5+} et W^{6+} en site B est compensé par des lacunes cationiques comme des lacunes de Pb^{2+} en site A ou un changement de valence de Ti^{4+} en Ti^{3+} . Les matériaux PZT ainsi obtenus sont dits doux. Ils sont facilement polarisables car les lacunes de Pb

n'interdisent pas le déplacement des parois de domaines contrairement aux lacunes d'oxygène. Elles entraînent généralement une augmentation :

- De la permittivité, des pertes diélectriques, des coefficients de couplage, de la compliance élastique.

On observe également une diminution :

- Du facteur de qualité mécanique,
- Du champ coercitif, - de la conductivité, - du point de Curie.

II.4.3. COMPARAISONS ENTRE LES MATERIAUX PIEZOELZCTRIQUE

La plupart des matériaux sont encore très rares, et par conséquent, trop chers.

Il n'y que quelques entreprises qui les fabriquent et distribuent. La piézoélectricité reste encore un domaine qui se renouvelle chaque jour mais qui manque de recherche et d'investissement.[9]

Propriétés	Unités	PVDF Film	PZT	BaTiO ₃
Densité	10 ³ Kg/m ³	1.78	7.5	5.7
Permittivité Relative	ϵ/ϵ_0	12	1.200	1.700
d₃₁ Constant	(10 ⁻¹²)C/N	23	110	78
g₃₁ constant	(10 ⁻³)Vm/N	216	10	5
k₃₁ constant	% at 1KHz	12	30	21

Table II. 6. Comparaison des matériaux piézoélectriques

PZT	Quartz	LiNbO ₃	BaTiO ₃	PZT
Caractéristiques				
Densité(g.cm ⁻³)	2.5	4.4	5.7	7.5
Constante diélectrique	4.5	29	1200	200-4000
d₃₃(C.N⁻¹).10⁻¹²	2	6	180	40 -750
g₃₃(V.m.N⁻¹).10⁻³	50	20	17	15- 40
Température de curie	573	1210	130	<350
Coefficient de couplage K	10	10	40	40-70

Table II.7. Les caractéristiques des PZT comparées à celles d'autres matériaux

Piézoélectriques.

II.4.4. DESCRIPTION DE LA STRUCTURE PEROVSKITE ABO₃

Les pérovskites forment une large famille de matériaux cristallins dont le nom dérive d'un minéral naturel [10] :

Le titanate de calcium (CaTiO_3) identifié par le minéralogiste russe **L. A. Perovski**.

On désigne sous la dénomination générique de pérovskite un nombre considérable d'oxydes mixtes représentés conventionnellement sous la formule chimique ABO_3 .

La maille prototype contient une seule molécule ABO_3 avec :

-**A**, un cation de grand rayon ionique (ex : Ba, Ca, Pb, Na, K, ...) avec douze anions d'oxygène comme proches voisins (coordinance égale à 12).

-**B**, un cation de rayon ionique plus faible (ex : Ti, Sn, Zr, ...), de valence plus grande entourée par six anions d'oxygène comme proches voisins (coordinance égale à 6).

-**O** est l'ion d'oxygène, possédant dans cette structure six proches voisins (4 cations du type A et 2 du type B).

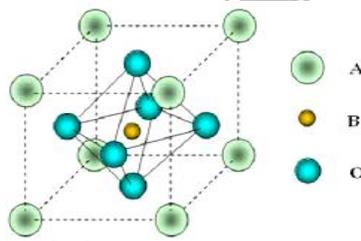


Figure II.8 : La structure pérovskite ABO_3

Dans le cas du PZT, le cation A est Pb^{2+} , le cation B est soit un ion Zr^{4+} soit un ion Ti^{4+} [8].

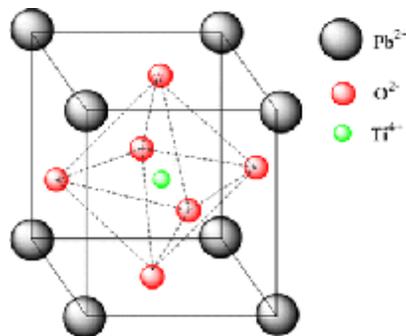


Figure II. 9 : La structure de PZT

La céramique piézoélectrique est affectée par la température ainsi que par le champ électrique externe où se produisent des déformations dans sa structure, ce qui entraîne une polarisation électrique.

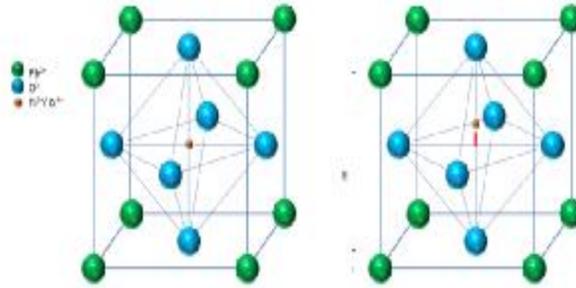


Figure II.10 : L'influence d'un champ électrique sur la structure de PZT

La polarisation rémanente d'une céramique piézoélectrique décroît avec la température et s'annule au-dessus d'une température T_c appelée température de Curie.

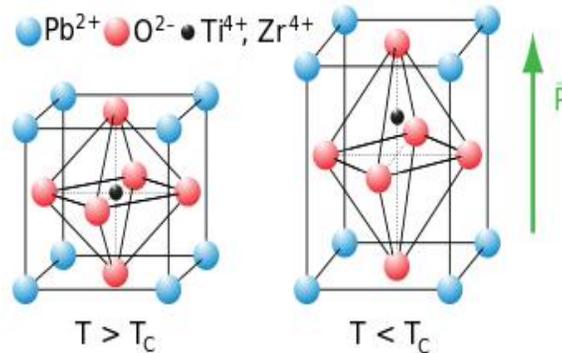


Figure I.11 : Déformation de la structure pérovskite de PZT sous l'influence de température

III. Application industrielle

Les applications de la piézo-électricité sont de deux types : les unes sont statiques ou a périodiques, c'est-à-dire qu'elles ne font pas appel à la résonance mécanique des composants piézo-électriques utilisés (mesure des pressions électro-acoustiques, etc.) ; les autres font, au contraire, appel à cette résonance (génération ou filtrage des fréquences, génération d'ultrasons).

III.1. Mesure des pressions et des forces

La mesure des pressions et des forces est l'application la plus évidente de l'effet piézo-électrique. Elle n'amène cependant pas à des réalisations industrielles notables. Les corps piézo-électriques permettent surtout les mesures dynamiques de chocs ou de variations brusques de pression.[12]

En particulier, l'emploi de lames piézo-électriques dans certaines mesures permet de constituer un accéléromètre. De tels capteurs, petits, légers et robustes, ont de plus une fréquence de résonance propre élevée. Ils rendent possibles la détection et la mesure à large bande des accélérations (mobiles divers, engins, projectiles) et des vibrations de structures mécaniques.

III.2.Applications électro-acoustiques

Les têtes de lecture des électrophones ont constitué un débouché important pour les céramiques piézo-électriques. Celles-ci permettent la réalisation de capteurs sensibles et possédant une fréquence de résonance mécanique propre élevée, ce qui est indispensable à la reproduction fidèle des enregistrements. [12]

Les céramiques utilisées (souvent le titanate zirconate de plomb) sont insensibles aux variations des conditions atmosphériques ambiantes. Grâce à elles, on peut obtenir, à partir d'un disque normal, des tensions de quelques dizaines ou centaines de millivolts, soit plus de dix fois la valeur obtenue avec les têtes à réluctance variable.

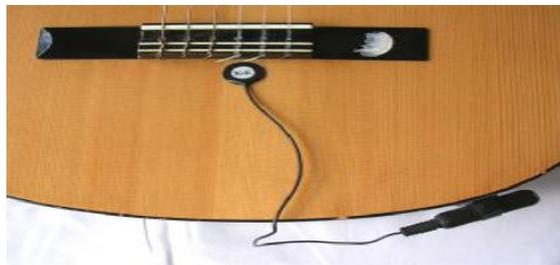
III.3 .Transducteurs acoustiques

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 piézoélectriques (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.



Microphone de contact piézoélectrique sur une guitare classique.

III.4Moteurs piézoélectriques

Les moteurs piézoélectriques, ou « piézomoteurs », utilisent l'effet piézoélectrique inverse pour convertir un signal électrique en mouvement continu, rotatif ou linéaire. On parle parfois également de « moteur ultrasonique », en référence à la gamme de fréquences dans laquelle sont activés les éléments piézoélectriques. Il existe plusieurs principes de fonctionnement, qu'on peut classer en grandes familles selon que le mouvement est généré par une onde stationnaire ou une onde progressive produite dans le matériau piézoélectrique.

Les principaux atouts des moteurs piézoélectriques sont les suivants :

- ils présentent des couples élevés et des vitesses lentes ;
- ils peuvent être miniaturisés facilement ;
- ils présentent un très bon rapport poids/puissance ;
- ils sont rapides et très précis ;
- ils sont discrets, voire silencieux.

En revanche :

- ils ont une durée de vie limitée à cause des effets de frictions ;
- ils requièrent des alimentations électriques à hautes fréquences ;
- les céramiques piézoélectriques peuvent être coûteuses et délicates à intégrer au dispositif.

Les applications principales des moteurs piézoélectriques se trouvent dans les cas où leur taille réduite répond à des contraintes d'encombrement : systèmes autofocus d'appareils photographiques, dans les mécanismes de vitre électrique de voiture, etc. [12]



Moteur piézoélectrique de l'autofocus d'un appareil photographique

III. 5. Actionneurs piézoélectriques

Les actionneurs et moteurs piézoélectriques tirent profit de l'effet piézoélectrique inverse : dans ces dispositifs, un champ électrique est utilisé pour commander une déformation ou un déplacement. On appelle actionneur piézoélectrique des actionneurs monoblocs contrôlables, utilisant la déformation induite par une tension électrique pour entraîner le déplacement. Les moteurs piézoélectriques se distinguent des actionneurs en ce qu'ils ne sont pas monoblocs mais composés de plusieurs parties mobiles entre elles.

Il existe principalement deux types d'actionneurs piézoélectriques :

- les actionneurs directs, dans lesquels le déplacement obtenu est égal à la déformation du matériau piézoélectrique. Les actionneurs directs permettent d'obtenir des courses entre 0 et 100 μm ;
- les actionneurs amplifiés, dans lesquels un dispositif mécanique vient amplifier ce mouvement, d'un facteur de 2 à 20. Les actionneurs amplifiés ont généralement des courses comprises entre 0,1 et 1 mm. [12]

- [1] P, Curie, J, Curie. Développement par compression de l'électricité polaire dans les cristaux hémidres à faces inclinées. *Comptes Rendus des Séances de l'Académie des Sciences Paris, Tome 91*, p. 295. (1880).
- [2] P;V, Lambeck, et G;M, Jonker. Ferroelectric domain stabilization in BaTiO₃ by bulk ordering of defects. *Ferroelectrics*. Vol. 22, p. 729-731. (1978).
- [3] E, Boucher. Elaboration et caractérisation de céramiques PZT Bi-Substituées et modélisation non linéaire de leur comportement en contrainte et en champ électrique. Thèse de doctorat en Mécanique, Energétique. Génie Civil. L'institut National des Sciences Appliquées de Lyon. (2002).
- [4] L, Garbuio. Etude du phénomène de lubrification électro active à l'aide d'actionneurs piézoélectriques. Thèse de doctorat. L'institut national polytechnique de Toulouse, France. (2006).
- [5] B, Gusarov. PVDF piezoelectric polymers : characterization and application to thermal energy harvesting. *Electric power*. Université Grenoble Alpes, English. (2015).
- [6] R, Rouffaud. Modélisation et caractérisation de nouveaux matériaux piézoélectriques (sans plomb et composites de connectivité 1-3) pour la transduction ultrasonore, Acoustique. Université de Tours, Français. (2014).
- [7] Friday Morning Meeting. Piezoelectricity Basics and applications. Technical Talk Petar Jurcevic. (2010).
- [8] A, Hizebry. Propagation de fissures dans les céramiques piézoélectriques de type PZT : effet de dopage au potassium et au niobium. thèse doctorat en génie des matériaux, Lyon (France). (2007).
- [9] S, Hamouche. Simulation des phénomènes magnétoélectriques dans les multicouches piézo-magnétiques. Université Mohamed Boudiaf - M'sila. (2016)
- [10] H, Menasra. Influence de la température de frittage sur les propriétés structurales, diélectriques et piézoélectriques dans le système ternaire: Pb_{0.95}(La_{1-z}, Bi_z)_{0.05}[(Zr_{0.6}, Ti_{0.4})_{0.95}(Mn_{1/3}, Sb_{2/3})_{0.05}]O₃. Thèse de doctorat, Sciences des Matériaux. Université Mohamed Khider-Biskra. (2015).
- [11] https://fr.wikipedia.org/wiki/Polyfluorure_de_vinylidène

[12] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Piezoelectricité>