

Chapitre I Piézoélectricité, ferroélectricité et applications industrielles du PZT

Résumé :

Dans ce chapitre nous allons rappeler les définitions et les propriétés associées à la piézoélectricité. Nous présentons également une partie sur les matériaux de type PZT, le diagramme de phase et, en particulier, la structure pérovskite. Puis, après avoir rappelé les équations régissant la piézoélectricité, nous présentons les applications les plus répandues pour les matériaux piézoélectriques sous forme massive.

I.1. Introduction

L'effet piézoélectrique a beau avoir été découvert il y a plus d'un siècle, il intéresse toujours autant la communauté scientifique. En effet, c'est en 1880 que l'effet piézoélectrique est découvert sur le quartz par les frères Curie. En 1917 Langevin se sert de cristaux de quartz pour engendrer des ondes de pressions, puis, la découverte dans les années 40 des sels piézoélectriques comme le BaTiO_3 permettent d'augmenter le couplage électromécanique (application pour les sonars). C'est dans les années 1950-1960 que de nouvelles céramiques, donnent un deuxième souffle à la piézoélectricité¹, les oxydes ternaires de plomb (PZT) permettent de réaliser un saut technologique qui n'a pas été renouvelé depuis. Les principaux atouts de ces matériaux résident dans d'excellentes propriétés piézoélectriques un fort coefficient de couplage électromécanique ce qui entraîne une grande efficacité d'actionnement et une grande linéarité des propriétés. Dans un premier temps, ces matériaux, sous forme de céramiques massives, étaient utilisés pour effectuer des microdéplacements ou des micropositionnements. Aujourd'hui, pour des raisons de réduction de taille des transducteurs, ces céramiques sont intégrées sous forme de films de plus en plus minces. Pour cela les techniques de dépôt en couches minces utilisées en microélectroniques ont été appliquées à ces céramiques. D'autres céramiques dérivées du PZT (céramiques dopées : PZNT, PMN-PT, PLZT...) présentent des propriétés supérieures au PZT mais elles ne sont pas disponibles industriellement. Ce chapitre commence par un rappel de la piézoélectricité et de la ferroélectricité. Nous donnerons ensuite les conditions *sine qua non* pour qu'un matériau présente l'effet ferroélectrique. Le titanate zirconate de plomb (PZT) est un excellent représentant de la catégorie des céramiques ferroélectriques. Nous rappellerons la structure cristalline du PZT ainsi que les phases possibles en fonction du taux de zirconium ajouté. Un rappel des équations régissant la piézoélectricité pour les céramiques massives nous permet d'introduire les notions de coefficients piézoélectriques ainsi que de coefficient de couplage. Enfin, l'utilisation des céramiques massives pour leurs applications privilégiées est présentée sous la forme d'un tableau non exhaustif.

I.2. Définition de la piézoélectricité.

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

Ce sont les frères Curie qui ont observé et expliqué l'effet direct en 1880², mais c'est Lippmann qui suggéra théoriquement l'effet inverse qui fût confirmé expérimentalement par les frères Curie.

I.3. La piézoélectricité naturelle

Certains cristaux naturels tel que le quartz sont piézoélectriques. Une maille de cristal de quartz est composée d'atomes de silicium portant une charge électrique positive et d'atomes d'oxygène portant une charge électrique négative. Sur la Figure I-1 on voit qu'en l'absence de déformation, le barycentre des charges positives est confondu avec celui des charges négatives (représenté par le point noir). Si on applique une force de compression, la maille cristalline se déforme de telle sorte que les barycentres des charges positives et négatives s'écartent. On crée ainsi un dipôle électrique qui par réaction, va faire apparaître des charges de signes opposés sur les deux électrodes, c'est l'effet piézoélectrique direct. Si au contraire, on apporte des charges électriques (c'est à dire que l'on crée une différence de potentiel entre les électrodes), alors, pour rétablir l'équilibre des forces électrostatiques, c'est la maille cristalline qui se déforme, c'est l'effet inverse ou réciproque.

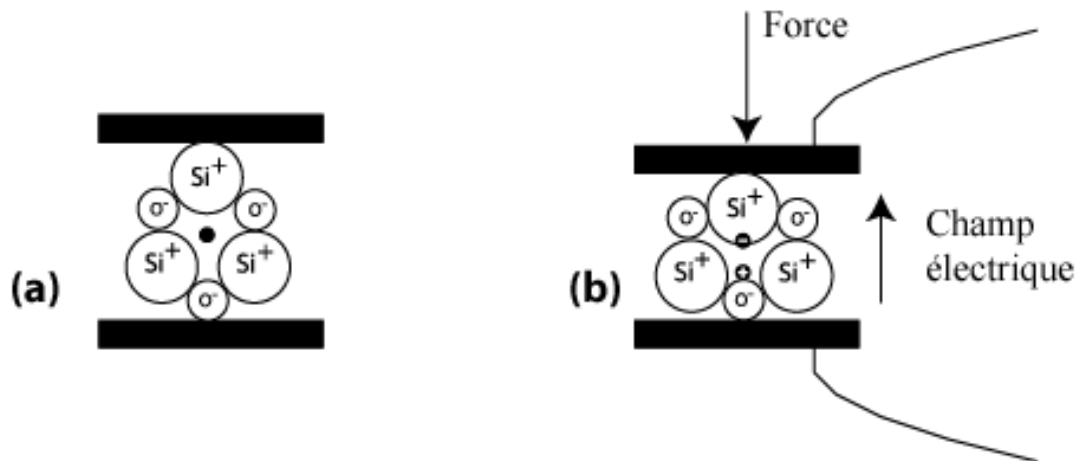


Figure I-1 - piézoélectricité du quartz naturel à l'équilibre (a) et avec une force appliquée (b).

I.4. Les matériaux piézoélectriques

Tous les matériaux ne sont pas piézoélectriques, en effet, il faut déjà que la maille cristalline ne possède pas de centre de symétrie, autrement dit, tous les matériaux piézoélectriques sont anisotropes. Ceci signifie qu'ils possèdent des propriétés physiques variant selon la direction considérée. Parmi les 32 classes cristallines existantes, 20 sont dépourvues de centre de symétrie et peuvent donc présenter l'effet piézoélectrique (voir Figure I-2).

Dix des vingt classes cristallines piézoélectriques présentent une polarisation électrique spontanée (aussi appelée moment dipolaire permanent) en l'absence de contrainte ou champ extérieur. Ces classes sont dites polaires et sont appelées pyroélectriques en raison de l'effet de la température sur leur polarisation spontanée.

I.4.1 Les principaux matériaux piézoélectriques

Les matériaux piézoélectriques peuvent se regrouper en trois classes principales, les cristaux, les polymères et les céramiques :

Les cristaux, dont le plus connu est le quartz, ont des propriétés peu attrayantes pour des applications telles que les générateurs d'ultrasons. Leurs principaux défauts sont un ϵ_r^a et des constantes piézoélectriques peu élevées, un coefficient de couplage électromécanique trop faible.

Les polymères ou les co-polymères comme respectivement le Poly-Vinyl-DiFluoridène ou PVDF et le P(VDF-TrFE) partiellement cristallisés peuvent permettre d'obtenir des matériaux plus compliants, mécaniquement adaptés aux grandes déformations ou à l'acoustique sous-marine en réception. Le PVDF en est le représentant le plus connu, les chaînes de polymère peuvent s'orienter lorsqu'on applique un champ électrique.

Les céramiques piézoélectriques se sont vite imposées par leurs forts coefficients piézoélectriques. La famille des céramiques comporte de nombreux éléments, citons entre autres, les titanates de baryum qui sont les ancêtres des céramiques actuelles, les titanates de plomb ou les méta-niobates de plomb utilisés pour l'imagerie haute résolution. La famille des PZT (plomb, zirconate, titanate) compte à elle seule cinq à six compositions différentes sans compter les structures dopées type PLZT. C'est cette famille des PZT qui offre le plus de possibilités au niveau industrialisation. Par ailleurs le LiNbO_3 est couramment utilisé en imagerie haute fréquence. Notons que les céramiques sont des matériaux fabriqués par frittage d'un mélange d'oxydes et que les procédés de fabrication sont ajustables afin de pouvoir adapter leurs propriétés diélectriques, mécaniques et piézoélectriques à la demande.

ci-dessous se trouve un tableau récapitulatif des propriétés des différents matériaux piézoélectriques évoqués plus haut.

	Quartz SiO_2	LiNbO_3	BaTiO_3	PVDF	PZT
Densité g.cm^{-3}	2.65	4.64	5.7	1.76	7.5
Constante diélectrique ϵ_{11}	4.5	40	1700	12	200-4000
Température de Curie en $^\circ\text{C}$	573	1210	130	180	<350

Tableau I-1 - Constantes physiques de matériaux piézoélectriques

I.4.2 Une propriété de certains matériaux piézoélectriques : La ferroélectricité

I.4.2.1 Définition

La ferroélectricité forme un sous-groupe de la pyroélectricité comme le montre la Figure I-2. La direction de polarisation d'un cristal ferroélectrique varie en fonction du champ

^a ϵ_r est la constante diélectrique relative caractérisant la permittivité de l'isolant par rapport au vide

électrique extérieur, elle peut être simplement réorientée voire même s'inverser si le champ est suffisamment intense.

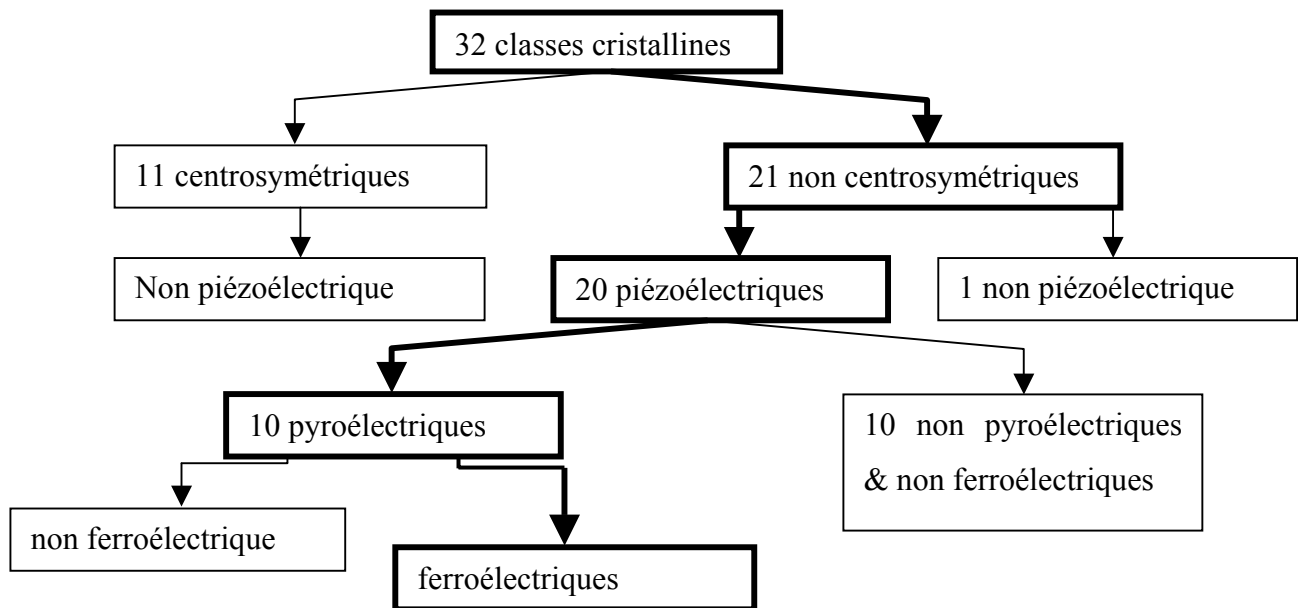


Figure I-2 - Hiérarchisation des classes cristallines

Les céramiques polycristallines ferroélectriques sont composées de grains et de joints de grains. Un grain est composé de domaines séparés les uns des autres par des parois. Chaque domaine peut avoir son axe de polarisation différemment orienté par rapport au domaine adjacent, donc, comme la répartition des domaines est aléatoire, le matériau est globalement non polaire. La structure cristalline fait que l'angle entre la polarisation microscopique de chaque domaine ne peut prendre que quatre valeurs : 71° , 90° , 109° et 180° .

I.4.2.2 Polarisation d'un matériau ferroélectrique

Sous l'application d'un champ électrique, les dipôles de chaque domaine vont se réorienter plus ou moins facilement selon leur angle initial, à savoir que le retournement des domaines à 180° se fait sans déformer la maille tandis que les autres domaines vont induire de fortes déformations pendant leur alignement. Seuls 65% et 53% des domaines seront réorientés pour un angle initial respectivement égal à 71° et 90° . Cette inégalité entraîne, lors d'un balayage en tension, la formation d'un cycle d'hystérésis qui se représente par une courbe $P=f(E)$ (voir Figure I-3). P représente la polarisation moyenne de l'ensemble des domaines et E est le champ extérieur appliqué au matériau ferroélectrique. La polarisation rémanente P_r

est la valeur de la polarisation à champ nul. La valeur du champ à polarisation nulle est le champ coercitif noté E_c qui définit un nouvel axe de polarisation.

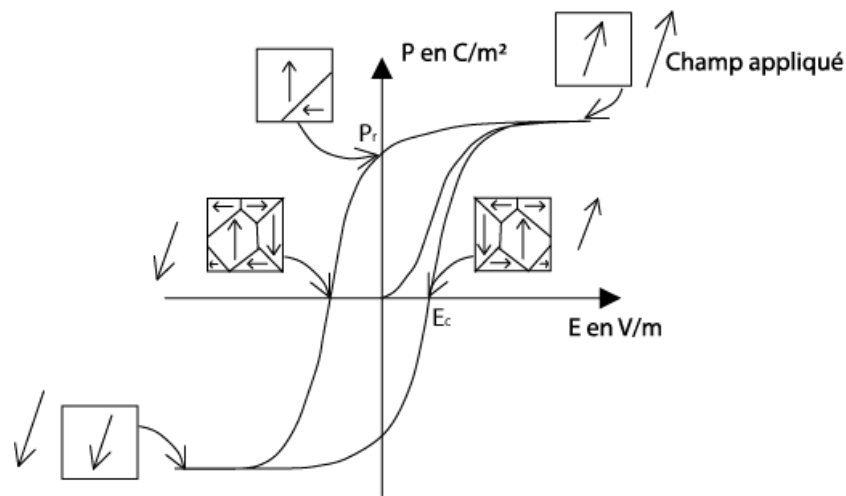


Figure I-3 - Cycle d'hystérésis d'un matériau ferroélectrique

I.4.2.3 Température de Curie et transition de phase.

Quand le matériau ferroélectrique est chauffé, il existe une température nommée point de Curie et notée T_c qui correspond à un changement de phase structurale qui a pour conséquence de supprimer la polarisation rémanente. Le matériau passe alors de l'état ferroélectrique à l'état para-électrique. La permittivité relative du matériau ϵ_r ($\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$) atteint alors sa valeur maximale. Pour les matériaux piézoélectriques non ferroélectriques, cette notion existe également et se caractérise par une modification notable de leurs propriétés piézoélectriques. Par exemple, le quartz α se transforme en quartz β (hexagonal) lors du passage au point de Curie.

I.5. Les équations de la piézoélectricité.

La piézoélectricité peut se définir comme un phénomène de couplage entre énergie élastique et énergie électrique (relation entre deux variables : électrique et mécanique) et vice-versa. Soient S et T , respectivement la déformation et la contrainte et soient D et E ,

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

I.5.1 Formalisme général et coefficients piézoélectriques.

Le phénomène de couplage peut être décrit de manière adiabatique s'il s'agit d'une vibration rapide ou isotherme pour une transformation statique ou lentement variable. Comme les matériaux piézoélectriques sont anisotropes, leurs propriétés sont représentées par des tenseurs. Les matrices des constantes piézoélectriques (d , e , g et h) ont six colonnes et trois lignes, les matrices transposées sont repérées par un suffixe t en exposant, les autres grandeurs en exposant signifient que cette grandeur est constante ou nulle, par exemple s^E définit le coefficient de compliance à champ constant ou nul. La norme IEEE des notations tensorielles se trouve référencées sous le standard 176. Soit V une tension appliquée entre deux électrodes déposées sur les faces perpendiculaires à la polarisation spontanée.

Il en résulte une déformation de dilatation ou de contraction $\frac{\Delta a}{a}$ dans la direction 3 et $\frac{\Delta a'}{a'}$ dans les directions 1 et 2. Si la polarisation V est appliquée sur des électrodes déposées sur les faces perpendiculaires à l'axe 1, donc perpendiculaire aussi à l'axe de polarisation spontanée, alors la déformation du matériau piézoélectrique sera en cisaillement.

Abréviations	définitions	Type d'énergie	taille des matrices
D	Induction électrique $C.m^{-2}$	ELECTRIQUE	(3,1)
E	Champ électrique en $V.m^{-1}$		(3,1)
ϵ	Permittivité électrique en $F.m^{-1}$		(3,3)
β	Constante d'imperméabilité diélectrique en $m.F^{-1}$		(3,3)
S	Déformation relative	MECANIQUE	(6,1)
T	Contrainte en $N.m^{-2}$		(6,1)
s	Compliance $m^2.N^{-1}$		(6,6)
c	Raideur élastique $N.m^{-2}$		(6,6)
d	Constante piézoélectrique: proportionnalité entre la charge et la contrainte à champ nul ou constant en $C.N^{-1}$ ou $m.V^{-1}$	PIEZOELECTRIQUE	(3,6)
e	Constante piézoélectrique: proportionnalité entre la charge et la déformation à champ nul ou constant en $C.m^{-2}$		(3,6)
g	Constante piézoélectrique: proportionnalité entre la contrainte et le champ à induction nulle ou constante en $m^2.C^{-1}$		(3,6)
h	Constante piézoélectrique: proportionnalité entre la déformation et le champ à induction nulle ou constante en $V.m^{-1}$ ou $N.C^{-1}$		(3,6)

Tableau I-2 - Glossaire des symboles dans la piézoélectricité

Les matériaux étant anisotropes pour la plupart, chaque symbole possède un indice, soit unique comme D_i , soit double (ϵ_{ij}) ou encore triple. Souvent les indices triples sont contractés à deux en raison des symétries ³.

Comme dit précédemment, les grandeurs envisagées étant tensorielles, d'ordre 1 pour le champ et l'induction électrique ou d'ordre 2 (contrainte et déformation), les facteurs les reliant sont donc aussi tensoriels, d'ordre 4 pour la complaisance ou la raideur, d'ordre 3 pour les constantes piézoélectriques ou d'ordre 2 pour la permittivité électrique. Le Tableau I-2 est un glossaire des symboles utilisés dans les différentes équations et matrices.

De là nous pouvons écrire les quatre formes tensorielles des équations de la piézoélectricité :

$$\left\{ \begin{array}{l} S = s^E \cdot T + d \cdot E \quad \text{et} \quad D = \varepsilon^T \cdot E + d \cdot T \\ E = \beta^T \cdot D - g \cdot T \quad \text{et} \quad S = s^D \cdot T + g^t \cdot D \\ D = \varepsilon^S \cdot E + e \cdot S \quad \text{et} \quad T = c^E \cdot S - e^t \cdot E \\ E = \beta^S \cdot D - h \cdot S \quad \text{et} \quad T = c^D \cdot S - h^t \cdot D \end{array} \right. \quad \text{Équation I-1}$$

L'ordre des tenseurs et leurs nombres impliquent qu'un grand nombre de constantes scalaires sont nécessaires pour décrire le phénomène piézoélectrique mais les symétries permettent de réduire de beaucoup ce nombre. La mise sous forme matricielle des coefficients élastiques, piézoélectriques et diélectriques donne le système ci dessous pour un matériau hexagonal de classe 6mm (c'est à dire possédant un axe de symétrie sénaires et six plans de symétrie).

$$\left(\begin{array}{cccccc} c_{11} & c_{12} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{11} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{13} & c_{13} & c_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{c_{11} - c_{12}}{2} \end{array} \right) \quad \text{Matrice des coefficients élastiques (identique pour } C^E, C^D, S^E \text{ et } S^D).$$

$$\left(\begin{array}{cccccc} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{array} \right) \quad \text{Matrice des coefficients piézoélectriques (identique pour } d, e, g \text{ et } h)$$

$$\left(\begin{array}{ccc} \varepsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{11} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{33} \end{array} \right) \quad \text{Matrice des coefficients diélectriques (idem pour } \varepsilon^S, \varepsilon^T, \beta^S, \text{ et } \beta^T).$$

I.5.2 Le coefficient de couplage électromécanique

Ce coefficient définit la capacité d'un matériau piézoélectrique à transformer l'énergie électrique en énergie mécanique et réciproquement⁴. Soit la déformation en fonction de la contrainte à champ nul et à induction nulle, représentée sur Figure I-4. L'énergie électrique

transformée s'écrit : $\Delta W_{\text{élect}} = \frac{1}{2} s^D T_M^2 - \frac{1}{2} s^E T_C^2$ (aire OAC)

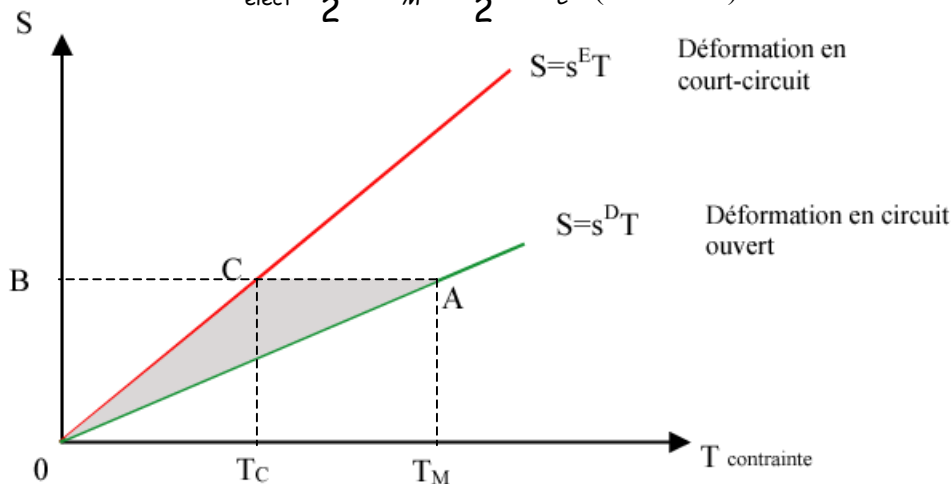


Figure I-4 - Décharge à déformation constante

Soit k le coefficient de couplage défini par :

$$k^2 = \frac{\Delta W_{\text{élect}}}{\Delta W_{\text{méca.f}}} = 1 - \frac{s^E T_C^2}{s^D T_M^2} = 1 - \frac{s^D}{s^E}$$

k relie bien l'aptitude de la céramique à transformer l'énergie électrique en énergie mécanique : $k^2 = \frac{\text{énergie transformée}}{\text{énergie fournie}}$

L'expression du coefficient de couplage dépend de la forme du matériau et de la distribution des lignes de champ permettant d'exciter et de détecter les vibrations. Un disque, un barreau ou un film mince n'auront pas forcément le même coefficient de couplage. Le PZT a un fort coefficient de couplage, mais ce n'est pas son seul atout, le Tableau I-3 montre un comparatif entre les céramiques piézoélectriques massives les plus utilisées.

Matériaux piézoélectriques massifs		Constante diélectrique relative	coefficient piézoélectrique e_{15} (C.m ⁻²)	coefficient piézoélectrique e_{31} (C.m ⁻²)	coefficient piézoélectrique e_{33} (C.m ⁻²)	
BaTiO ₃ ³		$\epsilon_{11}=1744$ $\epsilon_{33}=97$	21,3	-2,65	3,64	
Pb(Zr,Ti)O ₃	d_{ij} moyen ^b	PZT massif ^c 3	$\epsilon_{11}=650$ $\epsilon_{33}=560$	12,7	-5,2	15,1
		composite ^d 5		$d_{33}=7,9$ pC.N ⁻¹		
	avec dopants		200 ⁶ -15000 ⁷	$d_{33}=490$ pC.N ⁻¹ 7		
LiNbO ₃ ³		$\epsilon_{11}=39$ à 80 ⁸ $\epsilon_{33}=26$	3,7	0,2	1,3	
ZnO ³		$\epsilon_{11}=7,38$ $\epsilon_{33}=7,83$	-0,59	-0,61	1,14	

Tableau I-3 - Caractéristiques des matériaux piézoélectriques massifs les plus rencontrés.

I.6. Le PZT

I.6.1 Introduction

On sait depuis quelques années que l'existence d'un désordre structural ou chimique au sein de composés ferroélectriques de structure pérovskite ABO₃ induit des changements drastiques des propriétés physiques de ces matériaux. En particulier, lorsqu'on effectue une substitution sur le site A ou B de la structure, on peut dans certains cas obtenir des composés dipolaires désordonnés présentant des propriétés physiques remarquables et à l'origine d'applications industrielles multiples : condensateurs à forte capacité volumique, transducteurs piézoélectriques, actionneurs. Il existe notamment une large classe de composés du type PbBB'O₃ (noté PBB') caractérisés par une très forte valeur de leur constante diélectrique dans une large gamme de température, contrairement aux composés

^b Valeurs moyennées des résultats obtenus avec différentes méthodes de caractérisation

^c Valeurs provenant de matériaux commercialisés sous l'appellation PZT-4

^d Particule de PZT noyées dans de l'époxy

ferroélectriques classiques pour lesquels ces fortes valeurs sont confinées au voisinage de la température critique. De plus, cette constante diélectrique dépend souvent de la fréquence de mesure, d'où le nom de relaxeur donné à ces composés.

I.6.2 Structure de la maille pérovskite ABO_3

La structure de type pérovskite ABO_3 cristallise dans sa forme la plus simple dans une maille cubique si A est pris comme origine de la maille. Dans cette structure, A est un cation bivalent de grand rayon et de coordinence douze. Huit cations A forment la maille cubique. Les ions oxygène sont au centre de chaque face et forment un octaèdre au centre duquel se trouve le cation B qui doit, de part le fait, avoir un rayon très faible. Il est tétravalent et de coordinence six. Dans le cas du PZT (Figure I-5), le cation A est Pb^{2+} de rayon 119 pm, le cation B est soit un ion Zr^{4+} (84 pm), soit un ion Ti^{4+} (61 pm).

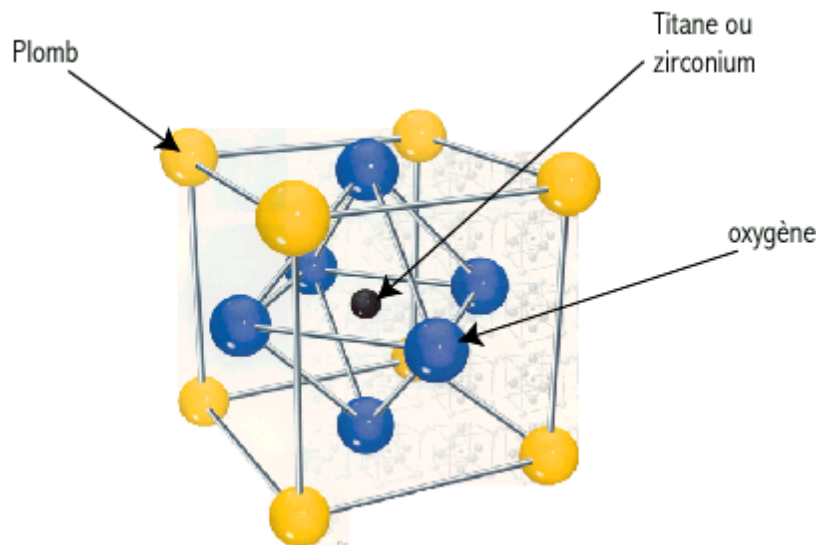


Figure I-5 - Maille cubique de PZT

Le site octaédrique pouvant être occupé par des ions de tailles différentes, cela entraîne des distorsions de la maille pérovskite. Ce sont ces distorsions qui donnent un caractère ferroélectrique au matériau, puisque la maille cubique est paraélectrique.

I.6.3 Diagramme de phase de l'oxyde ternaire $Pb(Zr_xTi_{1-x})O_3$

Au-dessus de la température de Curie, c'est dans la phase cubique que le PZT cristallise. En dessous de cette température T_c , différentes structures deviennent possibles en fonction du rapport de Zr et de Ti. Nous pouvons classer ces structures en fonction du taux de zirconium noté "x" dans la formule générique : $Pb(Zr_x, Ti_{1-x})O_3$.

Pour $x > 0,55$, nous sommes dans le domaine riche en zirconium et la phase de cristallisation présente une structure rhomboédrique. Le PZT possède un moment dipolaire permanent.

Pour $x < 0,45$, nous sommes dans le domaine riche en titane et cette fois la phase de cristallisation présente une structure quadratique.

Pour une valeur de x entre 0,45 et 0,55, nous avons un mélange des deux structures et c'est pour cette raison que cette phase se nomme morphotropique. C'est dans cet intervalle que les propriétés piézoélectriques du PZT sont les meilleures.

La Figure I-6 donne le diagramme de phase du PZT en fonction du pourcentage de titanate de plomb en solution solide[°] dans du zirconate de plomb, les deux étant miscibles en toute proportion. Nous pouvons noter qu'une petite zone correspondant à une céramique pauvre en titane est anti-ferroélectrique (noté A₀ sur la Figure I-6) la partie grisée est la zone morphotropique.

[°] Solution solide : mélange homogène de titanate de plomb et de zirconate de plomb

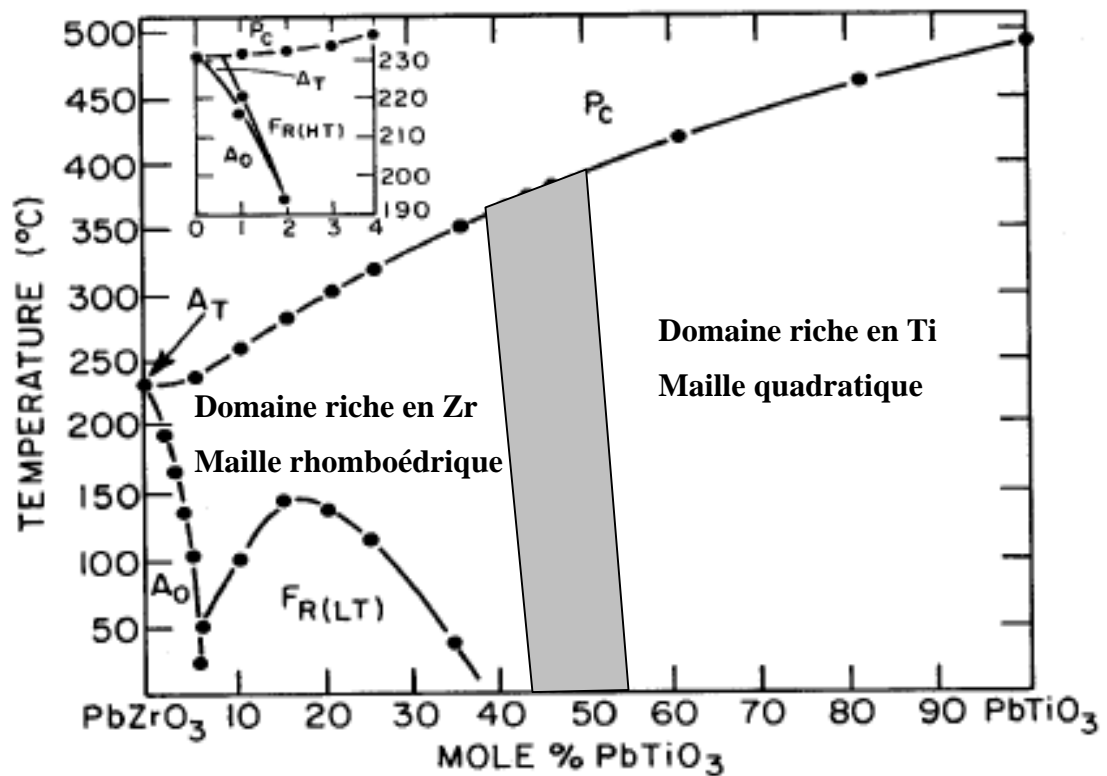


Figure I-6 - Diagramme de phase du $\text{Pb}(\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3$ tiré de Jaffe et al. ⁹
la zone grisée est la zone morphotrope

I.6.4 Directions de polarisation possibles de la maille pérovskite.

Nous avons vu qu'il y avait un mélange de phases quadratiques et rhomboédriques dans la zone morphotrope, ceci entraîne des directions de polarisation différentes pour les deux systèmes. En effet, la polarisation d'une maille quadratique se fera selon l'une des six directions équivalentes [100], tandis que pour une maille rhomboédrique elle se fera selon l'une des huit directions équivalentes [111] (voir Figure I-7).

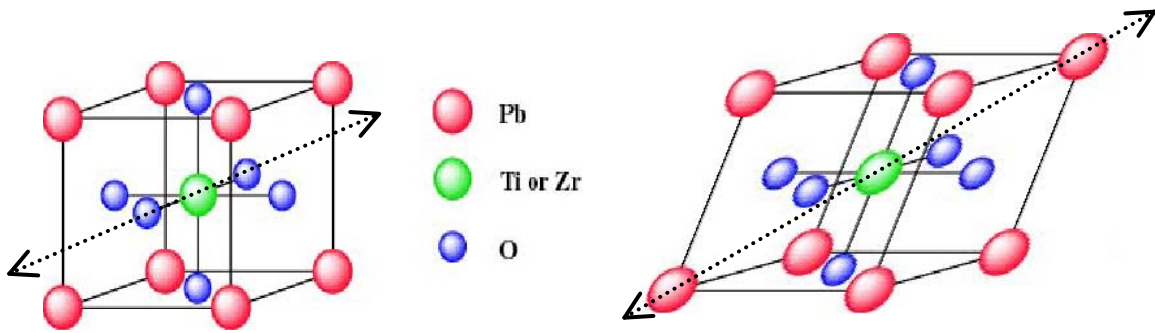


Figure I-7 - Directions de polarisation possibles pour une maille quadratique ou rhomboédrique.

I.7. Applications des matériaux piézoélectriques.

Depuis leur découverte, le nombre d'applications utilisant des matériaux piézoélectriques a été en continuelle augmentation. D'abord sous forme massive puis sous forme de couches de plus en plus minces, leurs propriétés n'ont eu de cesse d'intéresser les chercheurs. Une présentation non exhaustive des différentes applications des céramiques de PZT est présentée sous une forme de tableau (Tableau I-4).

Chapitre I - Piézoélectricité, ferroélectricité et applications industrielles du PZT

Propriété(s) du PZT	Définition	Application	Exemple(s)
Céramiques massives	La piézoélectricité Pouvoir transformer une énergie mécanique en une énergie électrique pour les applications utilisant l'effet direct. Pouvoir transformer une énergie électrique en énergie mécanique pour les applications utilisant l'effet inverse.	Générateurs haute-tension	<ul style="list-style-type: none"> • l'allume-gaz • les déclencheurs de lance-roquettes • les amorces
		Emission d'ultrasons et transducteur des sons dans l'air, dans les solides et dans les fluides	<ul style="list-style-type: none"> • Sonars • Soudure • usinage et décollement de films minces (quelques centaines de microns) • micro-dispersion des fluides • contrôle non destructif • nettoyage de surface • en médecine : <ul style="list-style-type: none"> ○ soins dentaires ○ pulvérisation des calculs rénaux ○ imagerie médicale (échographie) • microphones de téléphones et hydrophones • enregistreur de pulsation • buzzer et autres tweeters • sirène
		Capteurs et actionneurs	<ul style="list-style-type: none"> • Tête d'impression des imprimantes "jet d'encre" • asservissement en tension dans l'industrie du textile • mesure de pression artérielle • actionneur de soupape • jauges de dureté, de contraintes • commande de petits mouvements en mécanique • actionneurs pour le positionnement précis de miroirs • moteurs

Tableau I-4 - Listes des principales applications du PZT massif

Les céramiques de PZT n'ont pas toutes les mêmes propriétés; elles peuvent se classer en deux grands groupes, les PZT doux et les PZT durs, en fonction des substituant des sites A et B formant la maille de PZT.

- Dans les PZT doux, les substituant des sites A et B du PZT sont des ions donneurs par rapport au Pb^{2+} , Zr^{4+} , Ti^{4+} , comme par exemple les ions La^{3+} , Nb^{5+} , Sb^{5+} et W^{6+} .

Ces changements induisent la création de lacunes cationiques. D'un point de vue piézoélectrique, les PZT doux présentent de fortes pertes diélectriques, une grande permittivité et un coefficient de couplage élevé. En revanche, on observe une diminution du facteur de qualité mécanique, de la température de Curie et du champ coercitif.

- En ce qui concerne les PZT durs, les substituants communément employés sont les ions Na^+ , K^+ , $\text{Fe}^{2+/3+}$, $\text{Mn}^{2+/3+}$, Ni^{2+} . Ces ions sont accepteurs et provoquent la création de lacunes d'oxygène et une contraction de la maille pérovskite. Ceci provoque l'augmentation du facteur de qualité mécanique et du champ coercitif, mais abaisse la permittivité, les pertes diélectriques, le coefficient de couplage et la température de Curie. De plus, la taille des grains est plus faible. Il faut également remarquer la présence d'un champ interne dans le matériau. La polarisation est donc plus difficile car le mouvement des domaines est réduit sous l'application d'un champ électrique.

I.8. Conclusion

Les nombreux exemples évoqués au cours de ce chapitre montrent l'intérêt que représente le PZT sous forme de céramique massive. De plus, il est possible d'adapter ce matériau selon la demande en fonction des différents substituants utilisés (une forte constante diélectrique ou un coefficient de couplage important ne s'obtiennent pas forcément avec la même céramique). Le PZT est actuellement l'un des meilleurs candidats pour toutes les applications nécessitant une céramique massive comme par exemple pour les applications médicales ou la maîtrise de petits déplacements en mécanique. La suite naturelle de ce genre de développement est une réduction des dimensions et des coûts de fabrication. C'est pourquoi son intégration en films minces sur silicium ouvre au PZT le champ d'application des micro capteurs et micro actionneurs. Dans cette optique, il est donc important de faire des gros efforts de recherche sur ce matériau en film mince et apporter de nouveaux outils de caractérisation et d'intégration des films de PZT sur silicium.

Bibliographie du chapitre I

- 1 **JAFFE B., ROTH R. S., MARZULLO S.,** *piezoelectric properties of lead zirconate titanate solid solution ceramic*, Journal of Applied Physics, 1954, Vol. 25, pp. 809-810
- 2 **CURIE P., CURIE J.** *Développement par compression de l'électricité polaire dans les cristaux hémidres à face inclinés*, Tome 91. C. R. Acad. Sci. Paris, 1880, P 294
- 3 **ROYER D., DIEULESAINT E.,** *Ondes élastiques dans les solides*, Tome 1, éd. Masson, Paris, 1996, 328 p.
- 4 **BRISSAUD M., EYRAUD L.,** Théories et relations fondamentales de la piézoélectricité, Chapitre III in *Matériaux piézoélectriques, pyroélectriques, électrostrictifs et applications*, Lyon : INSA de Lyon-CAST, 1996 pp. 1-40
- 5 **BURIANOVA L., SULC M., PROKOPOVA M.,** *Determination of the piezoelectric coefficient d_{ij} of PZT ceramics and composites by laser interferometry*. Journal of European ceramic society, 2001, Vol. 21, pp. 1387-1390
- 6 **LE_DREN Sarah,** *Elaboration de couches épaisses piézoélectriques déposées sur substrats pour des applications microtechniques* Thèse INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUEES DE LYON, 2000, 198 p.
- 7 **RONCARI E., GALASSI C., CRACIUN F., CAPIANI C., PIANCASTELLI A.,** *A microstructural study of porous piezoelectric ceramics obtained by different methods*, Journal of the European Ceramic Society, 2001, Vol. 21, pp. 409-417.
- 8 **GUIFFARD Benoit** *Elaboration et caractérisation de céramiques ferroélectriques de type PZT fluore* Thèse: INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUEES DE LYON, 1999, 151 p. Available from internet : <URL:<http://csidoc.insa-lyon.fr/these/1999/guiffard/index.html>> consulté le [19/04/2000]

9 **JAFFE B., COOK W.R., JAFFE H.,** *piezoelectric ceramics*, London : Academic Press, 1971, p 317

