

2 - Phénomène de piézo-électricité

F. Patat

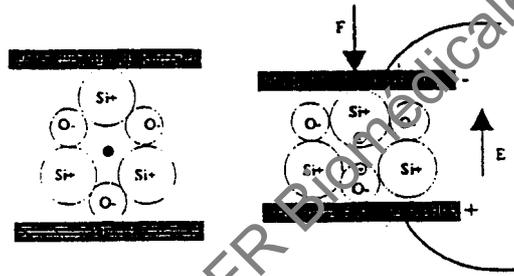
On appelle piézo-électricité, la propriété que possèdent certains matériaux de pouvoir transformer une énergie électrique en énergie mécanique, c'est-à-dire une onde électrique en onde acoustique ou inversement.

La piézo-électricité directe a été découverte en 1880 par les frères CURIE qui ont observé l'apparition de charges électriques à la surface de certains matériaux soumis à une déformation. L'effet inverse, à savoir la déformation d'un matériau piézo-électrique auquel on applique une tension électrique a été observé plus tard : la piézo-électricité est un phénomène réciproque.

1 - Principe de la piézo-électricité

1.1. piézo-électricité naturelle

Certains cristaux tel que le quartz sont naturellement piézo-électriques. 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 suivante, on voit qu'en l'absence de déformation, le barycentre des charges positives est confondu avec celui des charges négatives. Si maintenant on applique une force de compression, la maille cristalline va se déformer, de sorte que le barycentre des charges positives et celui des charges négatives vont s'écarter. On a ainsi créé un dipôle électrique qui par réaction, va faire apparaître des charges de signes opposés sur les deux électrodes : c'est l'effet direct.

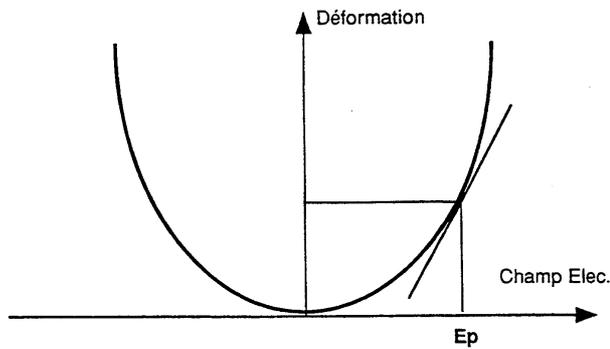


Si au contraire on apporte des charges électriques, sous l'effet de forces électrostatiques, la maille va se déformer : c'est l'effet inverse. Dans ces deux formes, l'effet piézo-électrique est linéaire : champ électrique et déformation sont proportionnels.

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

1.2 piézo-électricité artificielle

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



On remarque cependant sur la figure précédente, que si on observe une partie de la courbe autour d'une valeur élevée du champ électrique E_p on retrouve une relation linéaire (la tangente à la courbe).

Il nous faut maintenant considérer la structure des matériaux ferro-électriques. En effet, ils sont composés d'une multitude de grains dont chacun est un cristal : ce sont des matériaux polycristallins. Chaque petit cristal possède un axe privilégié, ici représenté par une flèche, mais ces axes sont orientés de façon aléatoire, de sorte que l'effet piézo-électrique résultant est nul.

On peut cependant réorienter dans le même sens les axes des grains par l'application d'un champ électrique intense, d'abord à haute température, puis pendant une phase de retour à la température ambiante : cette procédure est appelée POLARISATION et il en résulte que le matériau ferro électrique a acquis une piézo-électricité. Il garde en quelque sorte la mémoire du champ électrique intense qui lui a été appliqué sous forme d'un champ électrique permanent E_p .



Matériau non polarisé



Matériau polarisé

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

2 – Les différents matériaux piézo-électriques

Nous allons considérer les quatre classes principales de matériaux piézo-électriques : les cristaux qui possèdent une piézo-électricité naturelle, les céramiques, les polymères et les composites qui doivent être polarisés.

Avant de les comparer, il est nécessaire de définir les deux principales grandeurs physiques qui vont caractériser ces différents matériaux :

- Z_A , l'impédance acoustique. Celle-ci doit être la plus proche possible de celle des tissus biologiques, c'est-à-dire environ 1,5 Mray, afin que les ultrasons se transmettent bien de la sonde au corps humain.
- kt , le coefficient de couplage electro-acoustique. Ce paramètre, compris entre 0 et 1, caractérise l'aptitude du matériau à convertir une énergie électrique en énergie mécanique ou inversement. Il doit être le plus élevé possible.

2.1 Les cristaux

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

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

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

2.2 Les céramiques

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

Citons entre autres, les titanates de baryum qui sont les ancêtres des céramiques actuelles, la famille des PZT (plomb, zirconate, titanate) qui compte à elle seule cinq à six compositions différentes et qui est la plus utilisée ; les titanates de plomb qui tendent de plus en plus à concurrencer les PZT et enfin les métaniobates de plomb utilisés pour l'imagerie haute résolution. Notons que les céramiques sont des polycristaux qui sont fabriqués par frittage d'un mélange d'oxydes et que leur procédé de fabrication peut être modulé comme leur composition, afin d'ajuster leurs performances diélectriques, mécaniques et piézo-électriques.

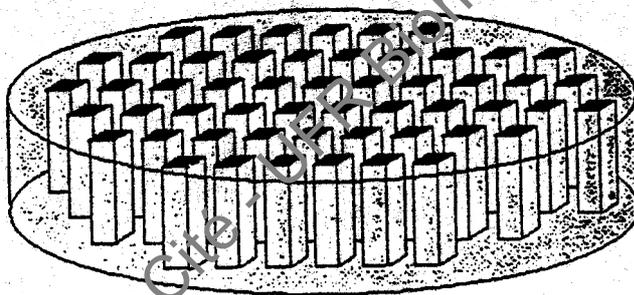
2.3. Les polymères

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

2.4 Les composites

Ces matériaux, d'abord développés pour des applications sonar, ont fait leur apparition au début des années 80 et représentent l'avancée majeure dans le domaine des matériaux piézo-électriques, depuis l'apparition des PZT dans les années 60.

Leur origine provient du constat selon lequel aucun matériau existant n'avait à la fois une impédance acoustique assez faible pour bien transmettre son énergie aux tissus biologiques et une valeur de kt élevée. En effet, les céramiques souffrent d'une impédance acoustique, trop élevée et les polymères d'une valeur de kt trop faible. L'idée est donc née qu'il fallait utiliser à la fois une céramique à kt élevée, associée à un matériau passif de faible impédance acoustique de sorte que le matériau résultant ait une impédance acoustique plus faible tout en gardant un kt comparable avec celui d'une céramique.



**STRUCTURE D'UN COMPOSITE 1-3 :
PILIER DE CERAMIQUE NOYE DANS UN POLYMERE**

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

Pour les applications médicales, le composite de connectivité 1-3 représenté sur la figure s'est imposé rapidement comme le matériau le plus performant : il est constitué de barreaux de céramiques noyés dans une matrice en résine. Des études théoriques confirmées par des mesures ont montré que la valeur du kt pouvant être égale, voire supérieure à celle de la céramique seule, avec une impédance acoustique deux à trois fois plus faible.

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

Le tableau ci-après résume les performances des différents matériaux.

MATERIAUX PIEZO ELECTRIQUES

CERAMIQUES : $kt = 0.3$ à 0.5

et $Z = 30$ à 35 Mrayleigh

Ex : Titanate de Baryum, kt faible

Zirconate – Titanate de plomb (PZT), kt élevé (233Mra)

FILMS PLASTIQUES : kt faible

et $Z = 4-5$ Mrayleigh

Ex : PVDF (polyvinylidène difluorure) $kt < 0.2$

Copolymères $kt < 0.3$

CRISTAUX :

Fragiles et chers

Ex : Quartz, kt très faible (résonnateur)

NbLiO₃, $Kt = 0.16$, $Z = 34$ Mra (HF)

COMPOSITES :

$Kt = 0.5$ à 0.7 et $Z = 12-30$ Mrayleigh

Céramiques + résine

Ex : composites de connectivité 1-3, le plus utilisé

Université Paris Cité - UFR Biomédicale - DIUETUS ET DIUEA