



N° d'ordre :...../2016

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et
de la Recherche Scientifique

Université Mohamed Boudiaf - M'sila

Faculté des Sciences

Département de Physique

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de :

MASTER

Domaine : **Sciences de la matière**

Filière : **Physique**

Option : **Physique Appliquée : Physique des matériaux intelligents**

Par

TALLAB Mouna

THEME

**Mesure des constantes piézoélectrique de PZT par des
moyens électriques**

Soutenue le : 04/06/2016

Devant le jury composé de :

- IBRIR Miloud	MCA Univ. de M'sila	Président
- BAADJI Nadjib	MCA Univ. de M'sila	Rapporteur
- TORKI Zohir	MAA Univ. de M'sila	Examineur

Promotion Juin 2016

REMERCIEMENTS

Je remercie ALLAH le Tout-puissant de m'avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce présent travail.

J'adresse mes vifs remerciements à mon Encadreur Mr. BAADJI Nadjib

pour m'avoir constamment guidé tout le long de mon projet et pour les précieux conseils qu'elle m'a donnés, et pour sa serviabilité, sa disponibilité et ses conseils constructifs.

Enfin, je destine mes derniers remerciements à ma famille et tout me amis .

DÉDICACE

Je dédie ce travail :

A mon père

A mes sœurs et A mes frères

A toute famille Tallab

A toute famille Karouche

A toute mes amis

A ceux que j'aime

REMERCIEMENT	I
DEDICACE	II
TABLES DES MATIERES	III
INTRODUCTION GENERALE	01
Chapitre I : Généralités pour piézoélectricité	
I.1 Historique	04
I.2 Définition l'effet piézoélectrique	05
I.2.1) L'effet direct	05
I.2.2) L'effet inverse	06
I.2.3) Aspect chimique des éléments piézoélectriques	06
I.2.4) Aspect physique des éléments piézoélectriques	07
I.3 Matériaux piézoélectrique	07
I.3.1) Les cristaux	08
I.3.2) Les polymères	08
I.3.3) Les céramiques	08
I.3.4) Les composites	08
I.5 Le PZT	09
I.6 applications de piézoélectrique	09
I.6.1) Application basé sur l'effet direct	09
I.6.2) Application basé sur l'effet inverse	10
I.6.3) Application basé sur les deux effets	10
I.7 Méthodes de caractérisation de matériaux piézoélectrique	10
I.7.1) Caractérisation par méthode de spectroscopie de transmission	10
I.7.2) Caractérisation utilisant la propagation	11
I.7.3) Méthode de caractérisation électrique : Impédancemétrie électrique	11
Chapitre II : Méthode de caractérisation électrique : Impédancemétrie électrique	
II.1 Introduction	13
II.2 L'expression de l'impédance	13
II.3 Application numérique	17
Chapitre III : Caractérisation de matériaux piézoélectrique	
III.1 La première expérience	21
III.1.1) mesure l'impédance2	21

Tables des matières

III.1.1.a) échantillon cylindrique	22
III.1.1.b) Le deuxième échantillon carré	25
III .1.2) Les résultats expérimentales	28
III.2 la deuxième expérience	31
Conclusion Générale	35
Références bibliographiques	36
Résumé	

A l'heure actuelle, la quasi-totalité des dispositifs ultrasonores du marché sont basés sur l'utilisation de matériaux piézoélectriques, que ce soient des céramiques ferroélectriques polarisées telles que les PZT, des cristaux tels que le quartz, ou des polymères tels que le PVDF. Les propriétés électromécaniques de ces matériaux sont déterminantes pour les performances des transducteurs qui, à leurs tours, définissent l'essentiel des performances du système : rendement, sensibilité, résolution, dynamique, rapport signal à bruit. Dès lors L'amélioration des matériaux électroactifs reste une priorité de nombreux laboratoires et industriels fabricants les matériaux.

Le développement de ces nouveaux matériaux et dispositifs va de pair avec une demande croissante de méthodes de caractérisation permettant de contrôler la qualité, la fiabilité et la reproductibilité de leur production. La détermination des propriétés tensorielles de matériaux apporte en effet des éléments de réponse en terme de qualité des matériaux. De plus, ces propriétés servent de données d'entrée aux modèles analytiques et numériques de transducteurs. La connaissance de l'ensemble des propriétés des matériaux constitutifs des dispositifs électroactifs devient donc un élément essentiel à la conception et à l'optimisation de ces matériaux et dispositifs.

Les méthodes les plus classiques de caractérisation tensorielle des matériaux piézoélectriques reposent sur des mesures électriques et requièrent plusieurs échantillons de géométries différentes. Bien que largement utilisées, leur mise en œuvre pour une caractérisation tensorielle complète est délicate car les propriétés mesurées dépendent également de la préparation de l'échantillon.

Plusieurs techniques permettent la détermination de l'ensemble des propriétés d'un matériau piézoélectrique à partir d'un seul échantillon. Qu'exposera trois méthodes et on utilisera la mesure l'impédance pour déterminer la constant piézoélectrique pour deux échantillon ce travail est réparti sur trois chapitres : le premier chapitre, on exposera des généralités de l'effet piézoélectrique et ses l'applications , ainsi on présentera trois méthodes principale de caractérisation.

Dans le deuxième chapitre, on dérivera l'expression de l'impédance des deux échantillons piézoélectriques carré et cylindre en fonction des caractéristiques de l'échantillon en partent de l'équation dynamique de la piézoélectricité.

Dans le troisième chapitre on a réalisé deux expériences : une pour mesurer l'impédance et déduire le coefficient de couplage électromécanique K_t et une deuxième expérience pour

INTODURCTION GENERALE

mesurer la vitesse de propagation et déduire le constant élastique. Combiner les deux expériences on obtient les caractéristiques des échantillons : h_{33} ; ε ; ρ ; V_D ; k_t .

Finalement on conclue ce travail et propose les perspectives.

I.1. Historique :

La piézoélectricité a été mise en évidence à Paris en 1880 par les frères Pierre et Jacques Curie. Ces derniers ont montré que les cristaux de quartz, topaze, tourmaline, niobate de lithium, cane à sucre et sel de Rochelle génèrent une polarisation électrique sous contraintes mécaniques. C'est la première mise en évidence de l'effet piézo-électrique et ultérieurement connu comme l'effet piézo-électrique direct.

Cette découverte attira immédiatement l'attention des scientifiques : le français Gabriel Lippmann (1845-1921), démontra de son côté l'année suivante que le phénomène était réversible et déduira mathématiquement du principe fondamental de la thermodynamique la théorie des cristaux piézoélectriques; ainsi si des signaux électriques sont appliqués sur le cristal piézoélectrique, celui-ci se dilate et se comprime dans une certaine direction, et la résonance mécanique favorisant des vibrations à une fréquence donnée.

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

Immédiatement les frères Curies confirmèrent l'existence de l'effet piézoélectrique inverse.

Ils apportèrent une preuve quantitative de la réversibilité complète de la déformation électro - élasto - mécanique dans les cristaux piézoélectriques. La piézoélectricité n'était qu'une curiosité de laboratoire mais la première guerre mondiale (1914-1918) la fit entrer dans la voie des applications pratiques.

En 1917, Paul Langevin eut l'idée d'exciter des lames de quartz par un signal électrique alternatif pour créer des ultrasons ; ceux-ci, réfléchis sur la coque des sous-marins ennemis, retournent vers d'autres cristaux piézoélectriques et y font naître des tensions électriques alternatives aisées à détecter. Ce générateur d'ondes ultrasonores « Sonar » est la première utilisation conjuguée des effets piézoélectriques direct et inverse. Cependant, cette invention ne s'est pas perfectionnée jusqu'à la fin de la guerre. Le succès du sonar a stimulé l'activité intense de développement sur toutes sortes de dispositifs piézoélectriques, résonnant et non-résonnant. Walter G. Cady, en 1918, réalisa le premier oscillateur électronique stabilisé par un cristal de quartz. Il établit le schéma électrique équivalent du résonateur piézoélectrique.

Dès lors, la piézoélectricité devint l'associée de l'électronique naissante. Elle permit la génération de fréquences électriques, donc d'échelles de temps, extrêmement stables.

La seconde Guerre mondiale vit naître l'industrie moderne de la piézoélectricité. Cinquante millions de résonateurs à quartz piézoélectriques furent alors fabriqués aux États Unis. A la même époque furent étudiés : des cristaux synthétiques, parfois décevants à l'usage ; mais surtout certaines céramiques, dites ferroélectriques, rendues anisotropes par un champ électrique au cours de leur élaboration et présentant ensuite un effet piézoélectrique intense. En 1954, les zircono titanates de plomb (PZT) ont été élaborés, et se sont répandus très rapidement, car leurs propriétés supplantent de loin celles de toutes les autres familles de composés piézoélectriques.

En 1969, Kawai a été le premier à découvrir les remarquables propriétés piézoélectriques du polyvinylidène difluoré (PVDF). Ce polymère piézoélectrique est le plus étudié et utilisé. Depuis le début des années 80, différents nouveaux matériaux piézoélectriques ont été élaborés. En particulier les composites piézoélectriques qui ont vu jour peu après l'apparition du titanate de barium comme céramique piézoélectrique lorsque les chercheurs du Naval Research Laboratory ont voulu intégrer le titanate de barium dans une matrice de polymère afin d'obtenir un hydrophone flexible. D'autres tentatives ont consisté à combiner des poudres de PZT avec un polymère, toujours afin d'obtenir des matériaux piézoélectriques flexibles.

Les premières communications montrant le potentiel de ces matériaux pour les applications Sous-marines ont déclenché l'attrait des chercheurs pour les composites piézoélectriques, notamment à Pennsylvania State University. [1]

La recherche actuelle se fait la sur la combinaison des propriétés piézoélectriques et d'autres propriétés de la matière telle que le magnétisme et l'optique...ext. donnant naissance à d'autres termes tel la multi-férrique.

I.2. Définition l'effet piézoélectriques :

I.2.1) L'effet direct :

L'effet piézoélectrique direct se caractérise par l'apparition ou la modification de la polarisation du matériau sous l'action d'une contrainte mécanique. À fin de caractériser les propriétés diélectriques on exprime souvent le déplacement électrique \mathbf{D} en fonction de contrainte \mathbf{T} et le champ électrique \mathbf{E} dans le régime linéaire, cette relation devient :

$$D_i = d_{i\gamma} T_\gamma + \varepsilon_{ik} E_k$$

\mathbf{d} : Constante piézoélectrique (C/N ou N/V).

ε : Permittivité électrique (F/m).

I.2.2) L'effet inverse :

L'effet piézoélectrique inverse correspond à la déformation mécanique S de l'échantillon piézoélectrique sous l'effet d'un champ électrique appliqué, et qui s'exprime, dans le régime linéaire, en fonction de la contrainte mécanique et le champ électrique par l'équation:

$$S_\gamma = s_{\gamma\mu} T_\mu + d_{i\gamma} E_i$$

γ, μ Les indices mécanique contractés de (1 à 6) i et k sont indices allant de 1 à 3 pour les trois directions.

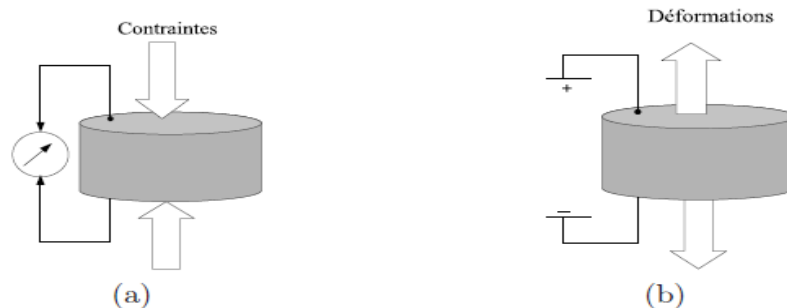


Figure I.1 : Effets piézoélectriques pour un cylindre de céramique piézoélectrique polarisé suivant l'axe vertical : (a) effet direct et (b) effet inverse.

en absence la champ électrique $E = 0$, cette équation devient :

$$S = \bar{s} T \text{ ou bien } T = \bar{c} S$$

S : déformation élastique relative.

\bar{s} : tenseur des constantes de compliance .

\bar{c} : tenseur des constantes élastiques.

I.2.3. Aspect chimique des éléments piézoélectriques :

La plupart des cristaux diélectriques composés de cations (ions de charge positive) et d'anions (ions de charge négative) et lorsqu'ils sont soumis à une contrainte mécanique génèrent un courant. A cause de la contrainte mécanique, la structure ionique des cristaux

se déforme et change les positions des ions ; donc le nuage électrique est déformé et par conséquent deux parties se forment dans ces cristaux, l'une avec majorité de charges négatives, et l'autre avec plus de charges positives, donc une différence de potentiel électrique se forme, soit un tension.

Les matériaux piézoélectriques peuvent être classés principalement en deux groupes les polymères et les céramiques dont PZT fait partie.

I.2.4) Aspect physique des éléments piézoélectriques :

Bercequel [2] a montré qu'il existe une relation de proportionnalité entre la pression appliqué sur le cristal et la tension produite qu'on peut déduire des relations caractéristiques de la piézoélectricité (voir chapitre II). Ces relations sont valables dans le régime linéaire de la déformation (limitée aux faibles contraintes et tensions).

I.3. Matériaux piézoélectrique :

L'étude des matériaux piézoélectriques permet de mieux contribuer à l'optimisation des structures dont on veut contrôler, soit la forme, soit les modes de vibrations. Ces matériaux constituent par exemple le cœur des dispositifs d'imagerie ultrasonore. Ils existent sous différents types parmi lesquels trois sont distingués : les cristaux (dont le plus connu est le quartz), les polymères et les céramiques. Ces dernières possèdent un fort coefficient de couplage et une relative facilité de production qui leur offrent un avantage certain au niveau industriel. L'une des plus utilisées dans l'industrie des transducteurs piézoélectriques est le Titanate Zirconate de Plomb (PZT). mais avant comparer, il y a deux facteurs physiques nécessaire qui sont caractériser ces différents matériaux :

***ZA :** l'impédance acoustique, Celle-ci doit être la plus proche possible de celle des tissus biologiques, c'est-à-dire environ 1,5 Mra, afin que les ultrasons se transmettent bien de la sonde au corps humain.

***kt :** le coefficient de couplage électro-acoustique, caractérise l'aptitude du matériau à convertir une énergie électrique en énergie mécanique ou inversement. Il doit être le plus élevé possible. Ce paramètre, compris entre 0.2 et 0.7.

I.3.1) Les cristaux :

Le cristal piézo-électrique le plus connu est le quartz mais ses propriétés sont peu attrayantes pour les applications de transducteurs. D'autres cristaux, tel que le niobate de lithium (LiNbO_3) ou le tantalate de lithium (LiTaO_3), affichent des valeurs de k_t 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.

I.3.2) 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. 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 hauts fréquence. 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.

I.3.3) Les céramiques :

Les céramiques piézo-électriques sont les matériaux les mieux adaptés à l'heure actuelle pour une utilisation échographique entrent également dans la fabrication des composites que nous décrivons plus loin. Ce succès peut sembler paradoxal car, bien que les valeurs de k_t 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. Parmi les céramiques les plus utilisées dans l'industrie on trouve la famille des PZT (plomb, zirconate, titanate). Le piézoélectrique à base de pzt prend l'objet de section suivant.

I.3.4) Les composites :

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

électriques. Le principe selon lequel, 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.

I.5. Le PZT :

Les céramiques PZT (zircono -titanate de plomb) sont des matériaux Piézoélectrique de synthèse et de structure pérovskite [1 ; 1]. Elles sont apparues en 1954 et se sont répandues très rapidement car leurs propriétés piézoélectriques supplantent de loin celles des cristaux non ferroélectriques. C'est une structure binaire (mélange $PbTiO_3$ et $PbZrO_3$) dont les propriétés varient en fonction du taux de titane noté x et dont la structure générique est :

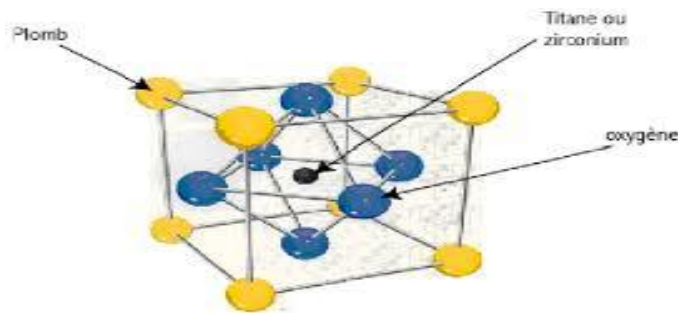
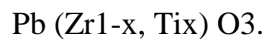


Figure I.1 : structure de pérovskite de PZT.

I.6. Applications de piézoélectrique :

Les premières applications industrielles du phénomène piézoélectrique ont vu le jour pendant la première guerre mondiale (1916-1917) lorsque Paul LANGEVIN a au point le générateur d'ondes ultrasonores pour la mesure et la détection sous-marine en utilisant le quartz. Aujourd'hui, différents applications sont utilisés telles que la téléphonie, l'automobile, l'aérodynamique Il est possible de distinguer trois grandes classes d'applications selon qu'il s'agisse de l'effet piézoélectrique direct et/ou inverse.

I.6.1. Application basé sur l'effet direct :

- Générateurs d'impulsion haut tension :
 - Allumage des explosifs.
 - Allumage des gaz.

- Briquets.

Capteurs : Microphone ; hydrophone. Télécommande. Accéléromètres .Jauges de dureté, de contraintes.

I.6.2. Application basé sur l'effet inverse :

Transducteurs ultrasonores de puissance :

- Perçage et soudage par ultrasons.
- Nettoyage ultrasonore, projecteur sonar.
- Dispositifs de positionnement :
 - Contrôles des petits mouvements en mécaniques.
 - Actuateurs pour positionnement miroirs.
 - Imprimante jet d'encre.

I.6.3. Application basé sur les deux effets :

- Transducteurs ultrasonores de faible puissance [4]:
 - Contrôles non destructifs ; diagnostic médical. Lignes à retard
 - Filtres électromécaniques.
 - Capteurs sonar.

I.7. Méthodes de caractérisation de matériaux piézoélectrique :

Les méthodes de caractérisation servent à déterminer de l'ensemble propriétés électromécaniques (élastique, diélectrique, et piézoélectrique) d'un matériau à partir utilisé des méthodes. Dans cette section nous allons présenter trois des ces méthodes Principales pour déterminé la propriété de matériaux piézoélectrique. Caractérisation des matériaux piézoélectriques reposent sur des mesures électriques et requièrent plusieurs échantillons de géométries différentes, Et spécifiques à notre étude la caractérisation de céramiques de types PZT.

I.7.1) Caractérisation par méthode de spectroscopie de transmission :

Cette méthode basée sur la spectroscopie acoustique de résonance appliquée à des cubes de céramique piézoélectrique. Elle permet à partir d'un seul échantillon de petite taille l'identification de l'intégralité du tenseur Piézoélectrique. Basée sur l'étude de la transmission d'ondes planes à travers des structures planes, la méthode s'appuie sur la comparaison des

évolutions angulaire et fréquentielle de spectres de transmission théoriques et expérimentaux. [5]

I.7.2. Caractérisation utilisant la propagation :

Cette méthode basé sur mesuré la vitesse de propagation d'un échantillon piézoélectrique. Pratiquement, la caractérisation d'un matériau piézoélectrique s'effectue de la façon suivant : un échantillon de forme parallélépipédique est découpé dans le matériau et les orientations des faces par rapport aux axes cristallographiques ou de polarisation sont notées.

Les dimensions géométriques a_i , sont mesurées au moyen d'un pied à coulisse ou d'un palmer. Les vitesses sont déterminées en plaçant un émetteur ultrasonore sur les faces de l'échantillon.

Supposons tout d'abord que le transducteur émette une onde plane de type longitudinal de courte durée dont la direction de propagation est perpendiculaire à la face émettrice. Pour chaque face couple de faces on mesure le temps de transit mis par l'onde pour effectuer un aller-retour entre deux faces parallèles. Connaissant les dimensions Géométriques a_i ; la vitesse de propagation selon la direction considérée se détermine par la Relation : $V = \frac{2a_i}{t}$ Donc il y a la vitesse de propagation et connaissant la masse volumique ρ du matériau Céramique piézoélectrique, il possible de remonter au coefficient élastique lié à la direction considéré et d'obtenir ainsi les coefficients $C_{11}^E; C_{22}^E; C_{33}^D$ [6].

En autre face on peut mesurer la fréquence d'échantillon piézoélectrique, à partir de cette fréquence on peut calculer la vitesse de propagation.

I.7.3) Méthode de caractérisation électrique : Impédance électrique

On peut montrer que l'impédance d'un circuit contient un piézoélectrique dépend de Kt et la fréquence de résonance (voir de chapitre II).les mesures d'impédance exposée à travers la présentation du modèle d'impédance et du dispositif expérimental.

Cette méthode, très précise pour l'identification des propriétés, l'emploi de plusieurs échantillons de forme différente. Dans ce travail on mesurera l'impédance d'un circuit contient un l'échantillon piézoélectrique et relie cette impédance à facteur K_t .

Cette relation est dérivée dans le chapitre II et le résultat expérimental dans le chapitre III.

II.1. Introduction :

Différentes méthodes de caractérisation existent et permettent d'identifier les propriétés électromécaniques des matériaux. Les méthodes de caractérisation les plus largement utilisées sont basées sur des mesures électriques. Il est très rapidement apparu nécessaire de normaliser les tailles des échantillons et de définir de façon précise les procédures utilisées.

Les normes IRE d'origine américaine ont été les premières à voir la fin de années 1940 ; vers la fin des années 1980 ces normes ont été mises à jour et complétées puis elles ont été publiées par l'IEEE (Institute of Electronic and Electrical Engineering) .il y a d'autres normes sont apparues en Europe et au Japon.

Elles reposent sur les mesures des fréquences de résonance d'études d'échantillons de forme carré ou cylindriques. En utilisant un modèle de vibration considéré la détermination du ou des coefficient liés à ce mode fréquence étant simples et précises, l'incertitude due à la mesures des paramètres dépendra essentiellement de la validité du modèle analytique qui ces mesures.

Généralement du fait des dimensions bien choisies des échantillons, un modèle simple unidimensionnelle ou 1D du modèle vibration examine peut être établi, ce modèle Permet de déterminer, pour chaque échantillon, le coefficient de couplage Caractéristique du mode considéré et une ou deux constant élastique, rarement plus.

On peut aussi en déduire un coefficient piézoélectrique et une valeur particulière de permittivité électrique On peut détailler maintenant cette méthode pour trouver l'expression de l'impédance à partir de l'équation de piézoélectrique, pour deux échantillons cylindriques et carré.

II.2. L'expression de l'impédance :

Le premier échantillon utilisant est carré de l'épaisseur très petit, et pour trouver l'expression de l'impédance on utilise l'équation piézoélectrique suivant :

$$T = C_{pq}S_q - h_{pm}D_3 \quad (\text{II -1})$$

$$E_m = \beta_{mn}D_n - h_{pm}S_p \quad (\text{II -2})$$

T : Contrainte mécanique (N/m²).

C : constant de compliance élastique.

S : constant compliance élastique.

h : constant piézoélectrique (C/N ou N/V).

D : Déplacement électrique ou induction (C/m²)

β : Permittivité inverse électrique (F/m).

E : Champ électrique (V/m).

On utilise la loi de Newton : $\sum F = m\delta$

On obtient :

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{C_{33}}{\rho} \frac{\partial^2 u_3}{\partial x_3^2} \quad (\text{II -3})$$

u : La quantité de déformation.

ρ : densité volumique (kg/m³).

La solution générale de cette équation :

$$u_3 = \left[A \sin\left(\frac{\omega x_3}{V_D}\right) + B \cos\left(\frac{\omega x_3}{V_D}\right) \right] e^{-i\omega t} \quad (\text{II -4})$$

V_D : vitesse de propagation (m/s)

On a :

$$S_3 = \frac{\partial u_3}{\partial x_3} \quad (\text{II -5})$$

$$S_3 = \frac{\partial u_3}{\partial x_3} = \frac{\omega}{V_D} \left[A \cos\left(\frac{\omega x_3}{V_D}\right) - \beta \sin\left(\frac{\omega x_3}{V_D}\right) \right] e^{-i\omega t} \quad (\text{II -6})$$

On substitue cette équation en (éq 1) :

$$T_3 = \left[C_{33} \left(\frac{\omega}{V_D} \left[\cos\left(\frac{\omega x_3}{V_D}\right) - \beta \sin\left(\frac{\omega x_3}{V_D}\right) \right] \right) - h_{33} D_{33} \right] e^{-i\omega t} \quad (\text{II -7})$$

avec la condition aux limites $x_3 = 0$; $T_3 = 0$

$$0 = \left[C_{33} \left(\frac{\omega}{V_D} [\cos(0) - \beta \sin(0)] \right) - h_{33} D_3 \right] e^{-i\omega t}$$

On obtient :

$$A = \frac{h_{33} D_3 V_D}{C_{33} \omega}$$

Lorsque $T_3 = 0 ; x_3 = l$

l : l'épaisseur d'échantillon (m)

$$0 = \left[C_{33} \left(\frac{\omega}{V_D} \left[\cos \left(\frac{\omega l}{V_D} \right) - \beta \sin \left(\frac{\omega l}{V_D} \right) \right] \right) - h_{33} D_3 \right] e^{-i\omega t}$$

On obtient :

$$B = \frac{h_{33} D_3 V_D \cos \left(\frac{\omega l}{V_D} \right) - 1}{C_{33} \omega \sin \left(\frac{\omega l}{V_D} \right)}$$

Alors on compense A et B dans l'expression S_3

$$S_3 = \left[\frac{h_{33} D_3}{C_{33}} \left(\cos \left(\frac{\omega x_3}{V_D} \right) - \frac{\cos \left(\frac{\omega l}{V_D} \right) - 1}{\sin \left(\frac{\omega l}{V_D} \right)} \sin \left(\frac{\omega x_3}{V_D} \right) \right) \right] e^{-i\omega t} \quad (\text{II -8})$$

Maternant on va trouver l'expression de potentiel :

$$V = - \int_0^l E_3 dx_3 = \int_0^l (h_{33} S_3 - \beta_{33} D_3) dx_3$$

$$V = \int_0^l \left(h_{33} \left[\frac{h_{33} D_3}{C_{33}} \left(\cos \left(\frac{\omega x_3}{V_D} \right) - \frac{\cos \left(\frac{\omega l}{V_D} \right) - 1}{\sin \left(\frac{\omega l}{V_D} \right)} \sin \left(\frac{\omega x_3}{V_D} \right) \right) \right] - \beta_{33} D_3 \right) dx_3 \quad (\text{II - 9})$$

Ont intégré cette expression pour trouver le potentiel :

$$V = \beta_{33} D_3 l - \frac{h_{33}^2 D_3 V_3}{C_{33} \omega} \left(\frac{2 \cos \left(\frac{\omega l}{V_3} \right) - 2}{\sin \left(\frac{\omega l}{V_D} \right)} \right) \quad (\text{II- 10})$$

En utilise la relation suivant : $\tan \left(\frac{x}{2} \right) = \frac{1 - \cos x}{\sin x}$

Donc la tension simplifie à :

$$V = -\beta_{33} D_3 l + \frac{h_{33}^2 D_3 V_3}{C_{33} \omega} \left(2 \tan \left(\frac{\omega l}{2V_D} \right) \right) \quad (\text{II -11})$$

La variable complexe : $D_3(t) \Rightarrow D_3 e^{-i\omega t}$

On a $I = \frac{dQ}{dt}$; $Q = D_3 * A$

I: courant électrique.

Q:la charge électrique.

A:la surface d'échantillon (m²)

$$\text{Donc } I = A * \frac{dD_3}{dt} = -i\omega AD_3$$

L'impédance du résonateur est finalement trouvée avec $Z = \frac{V}{I}$:

$$Z = \frac{\beta_{33} D_3 l - \frac{h_{33}^2 D_3 V_D}{C_{33} \omega} \left(2 \tan \left(\frac{\omega l}{2V_D} \right) \right)}{i\omega AD_3} \quad (\text{II-12})$$

En dévissé par D_3 est trouvé :

$$Z = \frac{\beta_{33} l - \frac{h_{33}^2 V_D}{C_{33} \omega} \left(2 \tan \frac{\omega l}{2V_D} \right)}{i\omega A}$$

$$\text{On pose : } K_t^2 = \frac{h_{33}^2}{\beta_{33} C_{33}} ; \quad 4f_p = \frac{2V_D}{l} ; \quad \beta_{33} = \frac{1}{\epsilon_{33}}$$

Donc :

$$Z = \frac{1}{i\omega A \epsilon_{33}} \left(1 - \frac{K_t^2 \tan \left(\frac{\omega}{4f_p} \right)}{\frac{\omega}{4f_p}} \right) \quad (\text{II-13}) .$$

K_t : le coefficient de couplage.

f_p :fréquence de résonance.

ϵ : Permittivité électrique.

A : la surface de l'échantillon.

ω : la fréquence expérimentale.

L'échantillon cylindrique : c'est la même expression de Z .

$$Z = \frac{1}{i\omega A \epsilon_{33}} \left(1 - \frac{K_t^2 \tan \left(\frac{\omega}{4f_p} \right)}{\frac{\omega}{4f_p}} \right)$$

Dans l'équation ci-dessus :

Si le K_t et ε_{33} est réel donc Z imaginaire pure et donc différence de phase entre le courant qui traverse le piézoélectrique et la tension appliqué est $\frac{\pi}{2}$; $-\frac{\pi}{2}$.

Cependant ε_{33} est complexe ainsi que K_t avec : $\varepsilon = \varepsilon_r + i\varepsilon_i$

et l'expression de Z s'écrit comme :

$$Z = Z_R + iZ_{Im} = |Z|e^{i\theta}$$

La phase θ est présenté la différence de phase entre le potentiel et le courant qui traverse le PZT.

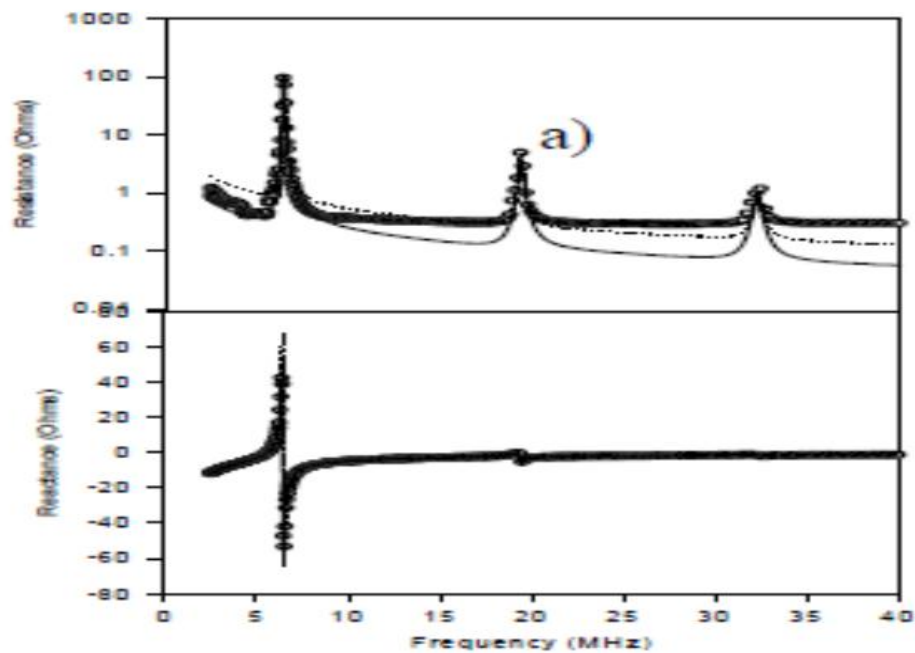


Figure II.1 : l'impédance en fonction de la fréquence.

La courbe haut si la partie réel, et la courbe bas si la partie imaginaire de Z . on note l'apparition des pics(a), chaque pic représente la fréquence de résonance.

II.3. Application numérique :

Les valeurs typiques d'ordre c_{33} ; K_t ; ε_{33} sont extraites de l'article de caractérisation de pzt[8] Maintenant nous avons calculé les valeurs de vitesse de propagation et fréquence de résonance pour l'échantillon 'carré :

$$V_D = \sqrt{\frac{c_{33}}{\rho}}$$

$$c_{33} = 1.05 * 10^{11} Pa ; \rho = 7450 kg/m^3$$

$$V_D = \sqrt{\frac{c_{33}}{\rho}} = \sqrt{\frac{1.05 * 10^{11}}{7450}} = 3754.019 \text{ m/s}$$

$$4f_p = \frac{2V_D}{l} \Rightarrow f = \frac{2V_D}{4l} = \frac{2 * 3754.19}{4(0.52 * 10^{-3})} = 3.6097 \text{ MHz}$$

Remarque : l'épaisseur l d'échantillon utilisant dans expérience

La vitesse de propagation pour l'échantillon cylindre [9] :

$$c_{33} = 1.63 * 10^{11} \text{ Pa} ; \rho = 7500 \text{ kg/m}^3.$$

$$V_D = \sqrt{\frac{c_{33}}{\rho}} = \sqrt{\frac{1.63 * 10^{11}}{7500}} = 4661.9 \text{ m/s}$$

$$4f_p = \frac{2V_D}{l} \Rightarrow f = \frac{2V_D}{4l} = \frac{2 * 4661.9}{4(0.183 * 10^{-3})} = 12.73 \text{ MHz}$$

La valeur permittivité typique est d'ordre : $\epsilon_{33} = 3400\epsilon_0$

$$\epsilon_0 = \frac{1}{36\pi * 10^9} = 8.84 * 10^{-12} \text{ F/m}$$

$$\epsilon_{33} = 3400 * 8.84 * 10^{-12} = 3.80 * 10^{-8} \text{ F/m}$$

Donc la permittivité inverse :

$$\beta_{33} = \frac{1}{3.80 * 10^{-8}} = 2.63 * 10^7 \text{ m/F}$$

La valeur typique est : $k_t = 52.4\%$.

À partir de l'expression(13) :

On suppose $Z \rightarrow 0$ donc :

$$\left(1 - \frac{K_t^2 \tan\left(\frac{\omega}{4f_p}\right)}{\frac{\omega}{4f_p}} \right) = 0 \Rightarrow \frac{K_t^2 \tan\left(\frac{\omega}{4f_p}\right)}{\frac{\omega}{4f_p}} = 1$$

$$K_t^2 \tan\left(\frac{\omega}{4f_p}\right) = \frac{\omega}{4f_p} \quad (\text{II-14})$$

Comme cette équation ($a \tan(x) = x$): accepte plusieurs solution comme montrer sur la Figure II.2. La valeur de la racine dépend de la valeur de Kt Nous avons dessiné des solutions à cette équation dans le figure II.2.

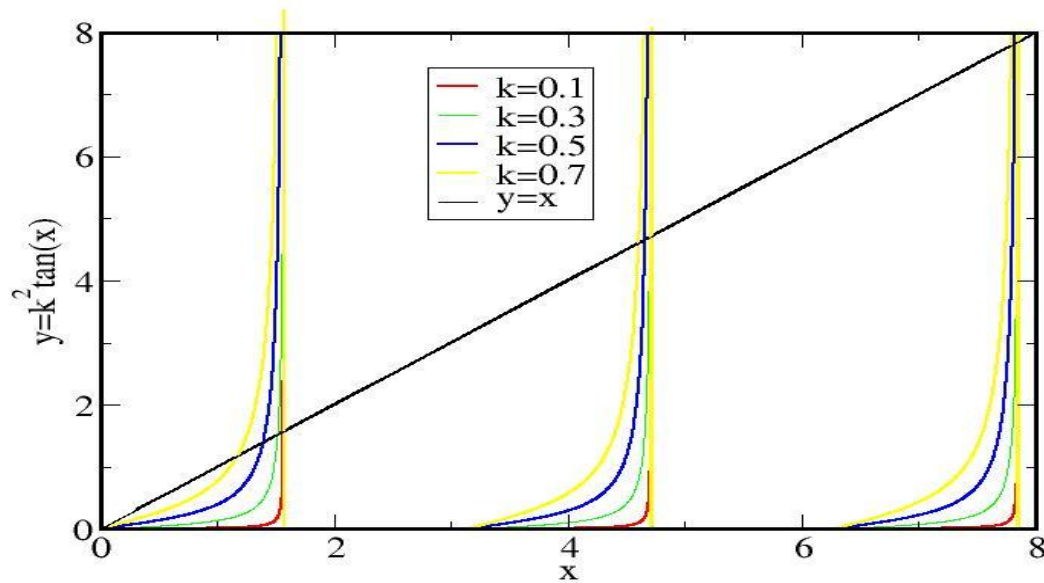


Figure II.2 : la solution La solution géométrique de l'équation $a \tan(x) = x$

Sur la Figure II.2, on présente la solution géométrique de l'équation II.14. On remarque que la première solution se proche de la valeur $\frac{\pi}{2}$ lorsque la valeur de kt est minimale. La deuxième solution est proche de la valeur $\frac{3\pi}{2}$ la troisième de $\frac{5\pi}{2}$. Donc la deuxième fréquence est presque trois fois la première fréquence et le troisième est cinq fois et ainsi de suite.

Comme on a montré dans le chapitre précédent l'impédance d'un échantillon piézoélectrique dépend de Kt et ϵ_{33} . Dans ce chapitre on réalisera un circuit contenant un piézoélectrique et une résistance en série, et mesurer l'impédance et la fréquence de résonance électrique. Ayant obtenu la valeur de Kt , on peut déduire ensuite la constante piézoélectrique h_{33} , mais on doit connaître les valeurs de ϵ et C_{33} ($K_t^2 = \frac{h_{33}^2}{\beta_{33} C_{33}}$). La valeur de E est obtenue directement de la mesure de C . La valeur de E est obtenue directement de la mesure de C . La constante élastique C_{33} peut être calculer à partir de la vitesse de propagation de son V_D , qui est mesurée dans la deuxième expérience, et la densité par une mesure directe de la masse et le volume peut être déduite $\rho = \frac{M}{V}$

III.1. La première expérience :

III.1.1. mesure l'impédance :

Le schéma I.1 décrit le montage permettant la mesure de l'impédance, un générateur de tension sinusoïdale de valeur V ; un oscilloscope est utilisé pour mesurer la tension appliquée et le courant qui traverse le circuit, et une résistance. L'échantillon choisi ici est une plaque de forme carrée et cylindre d'épaisseur très petit.

Donc : $Z' = R + Z_p$

Z' : l'impédance de circuit.

R : résistance.

Z_p : l'impédance de PZT. Le courant du circuit et le potentiel aux bornes de la résistance

soit données par :

$$I = \frac{V}{Z'} = \frac{V}{R + Z_p}$$

$$V_{PP} = R * I = R * \frac{V}{R + Z_p}$$

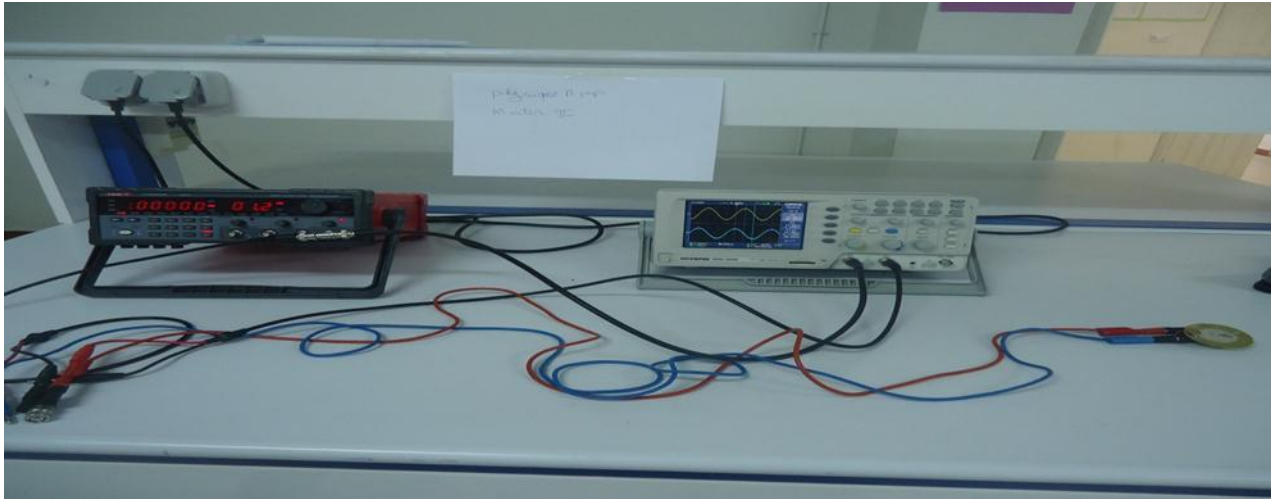


Figure III.1-Dispositif expérimental permettant de mesurer l'évolution, avec la fréquence, des impédances électriques d'un échantillon piézoélectrique(PZT).

Nous avons changé la fréquence de la tension appliqué au circuit et lire les valeurs de potentielle V_{pp} et la valeur de différent phase Δt , ces valeurs sont présentées sur tableau 1 et 2. pour l'échantillon cylindre on a appliqué un potentiel $V=10$ volt ; et la résistance $R=1.48K\Omega$.

III.1.1.a) échantillon cylindrique :



Figure III.2 : échantillon de PZT

Les résultats écrits sur le tableau(1) suivant :

Fréquence en MHz	V_{pp}	Δt
1	10.2 V	20 ns N
1.5	10.4 V	20 ns
2	10.4 V	12 ns
2.5	10.4 V	12 ns
3	10.6 V	12 ns
3.5	10.6 V	12 ns
4	10.8 V	12 ns
4.5	11 V	8ns
5	11.02 V	8 ns
5.5	11.06V	8ns
6	11.8 V	8 ns
6.5	11.8 V	8ns
7	12.02 V	8ns
7.5	13 V	4ns
8	13.02 V	4ns
8.5	14 V	4ns
9	14.02 V	4ns
9.5	14.8 V	4ns
10	15.8 V	6ns
10.5	16.2 V	6 ns
11	17.2 V	14 ns
11.5	18.6 V	14 ns
12	15.6 V	20 ns
12.5	14.8V	20ns
13	13.8 V	32ns
13.5	13.6V	32ns
14	12.8V	35ns
14.5	12.6V	35 ns
15	11.8V	35ns
15.5	11.6V	35ns

16	11V	35ns
16.5	10.8V	35ns
17	10.2 V	34ns
17.5	9.8 V	34 ns
18	9.8 V	32 ns
18.5	9.2 V	32 ns
19	8.8 V	32ns
19.5	8.2V	32 ns

Tableau III.1 : Le résultat expérimental des valeurs de tension V_{pp} et la diffèrent de phase Δt d'un échantillon cylindrique.

On remarque que le spectre présent un premier pic au voisinage de la fréquence de résonance

$$f_0 = 11.5\text{MHz}$$

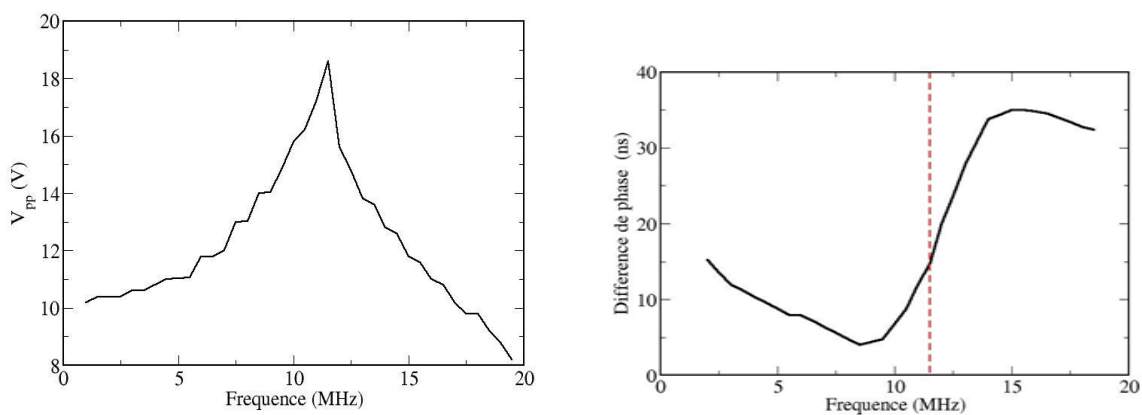


Figure III.3 : présenté la variation de V_{pp} et Δt en fonction de fréquence d'un échantillon cylindrique .

Les valeurs de la tension et la différence de phase Δt se présentent sur la figure(III.3) on voit que le V_{pp} possède un pic au voisinage 11.5 MHz, et ce qui correspond à la fréquence de résonance électrique d'échantillon cylindrique.

Pour la différence de phase on voit un minimum et maximum, un minimum se trouve au voisinage 10 MHz et maximum de 12 MHz, le centre de ces deux fréquences correspond bien à la fréquence de résonance. (Présenté par une ligne discontinue). Cette fréquence de résonance va nous permettre de calculer le constant de couplage K_t selon la formule de chapitre précédent.

Le spectre de V_{pp} présente un seul pic mais selon la figure –II.2- dans le chapitre II, il y a en principe plusieurs pics où Z est minimale. On doit observer plusieurs pics, mais la deuxième fréquence perdue par le modèle théorique est 3 fois la première fréquence elle doit se trouver aux alentours de 30 MHz qui dépasse la fréquence maximale, de générateur de tension.

III.1.1.b) Le deuxième échantillon carré :

On répète la même expérience précédente pour un échantillon carré on a appliqué un potentiel (1.2V), et la résistance (216 Ω).

Les résultats écrits sur le tableau (2) suivant :

Fréquence	V_{pp}	Δt
1	840 m V	70 ns
1.1	860 m V	20 ns
1.2	920 m V	50 ns
1.3	940 m V	50 ns
1.4	940 m V	40 ns
1.5	960 m V	40 ns
1.6	960 m V	40 ns
1.7	980 m V	30 ns
1.8	980 m V	30 ns
1.9	980 m V	30 ns
2	1 V	12 ns

2.1	1 V	12 ns
2.2	1 V	12 ns
2.3	1V	12 ns
2.4	1.02 V	12 ns
2.5	1.02 V	8 ns
2.6	1.02 V	8 ns
2.7	1.02 V	8 ns
2.8	1.04 V	8 ns
2.9	1.04 V	8 ns
3	1.04 V	8 ns
3.1	1.04 V	8 ns
3.2	1.06 V	8 ns
3.3	1.06 V	8 ns
3.4	1.06 V	20 ns
3.5	1.08 V	16 ns
3.6	1.08 V	16 ns
3.7	1.08 V	16 ns
3.8	960 m V	20 ns
3.9	960 m V	20 ns
4	840 m V	20 ns
4.1	840 m V	20 ns
4.2	860 m V	12 ns
4.3	860 m V	12 ns
4.4	880 m V	12 ns
4.5	1 V	12 ns
4.6	1 V	12 ns
4.7	1 V	12 ns

4.8	1.02 V	12 ns
4.9	1.02 V	12 ns
5	1.02 V	12 ns
10	1.06 V	36 ns
10.1	960 m V	36 ns
10.2	960 m V	36 ns
10.3	1 V	36 ns
10.4	1 V	39 ns
10.5	920 m V	39 ns
10.6	920 m V	39 ns
10.7	900 m V	39 ns
10.8	960 m V	36 ns
10.9	840 m V	36 ns

Tableau III.2: Le résultat expérimental des valeurs V_{pp} de tension et la différence phase d'un échantillon piézoélectrique carré.

On remarque une première fréquence de résonance dans l'intervalle 3.4 MHz à 3.7MHz

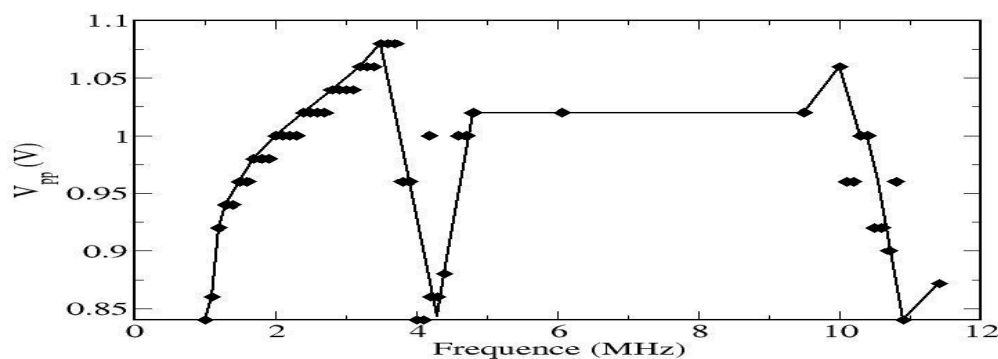


Figure III.4 : présenté la variation de V_{pp} et Δt en fonction de fréquence d'un échantillon carré

Les valeurs de V_{pp} d'échantillon carré se présentent sur la figure (III.4) est contrairement à l'échantillon cylindrique les données sont moins régulières mais on peut distinguer deux fréquences de résonance électriques, une première 3.4 MHz une deuxième à 10 MHz.

La valeur de la deuxième fréquence est trois fois de la valeur de la première fréquence. comme on expliqué dans le chapitre précédent.

III .1.2.Les résultats expérimentales :

Après trouver la fréquence de résonance, nous allons calculer la K_t le coefficient de couplage à partir de l'équation (13) qui se trouve dans chapitre II :

$$Z = \frac{1}{i\omega A \epsilon_{33}} \left(1 - \frac{K_t^2 \tan\left(\frac{\omega}{4f_p}\right)}{\frac{\omega}{4f_p}} \right)$$

et la relation : $V_p = R * I = R * \frac{V}{R+Z_p}$

Lorsqu'il est V_p max on correspond à $Z \rightarrow 0$

Donc :

$$\left(1 - \frac{K_t^2 \tan\left(\frac{\omega}{4f_p}\right)}{\frac{\omega}{4f_p}} \right) = 0 \Rightarrow K_t^2 = \frac{\frac{\omega}{4f_p}}{\tan\left(\frac{\omega}{4f_p}\right)}$$

III .1.2.1.Pour l'échantillon cylindre on a :

La fréquence de résonance obtenue à partir de l'expérience $\omega = 2\pi * 11.5$ MHz ;

et le f_p on a calculé dans la deuxième chapitre $f_p = 12.94$ MHz donc :

$$K_t = \sqrt{\frac{\frac{2\pi * 11.5}{4 * 12.94}}{\tan\left(\frac{2\pi * 11.5}{4 * 12.94}\right)}} = 0.49 = 49\%$$

a) Calcul de surface de l'échantillon :

Les dimensions d'échantillon : $R=3$ cm ; $w=0.18$ mm ; $C=79$ nF

$$A = 28.26 * 10^{-4} m^2.$$

b) Calcul de permittivité électrique à fréquence nulle :

On mesuré la capacité avec multimètre est donné la valeur suivant $C=79 \text{ nF} = 79 * 10^{-9} F$

donc :

$$\varepsilon = \frac{e * C}{S}$$

e : l'épaisseur d'échantillon en m.

C : la capacité en Farad.

S : la surface en m^2 .

$$\varepsilon = \frac{0.18 * 10^{-3} * 79 * 10^{-9}}{28.26 * 10^{-4}} = 5.03 * 10^{-9} F/m$$

La permittivité inverse :

$$\beta_{33} = \frac{1}{\varepsilon_{33}} = \frac{1}{5.03 * 10^{-9}} = 1.95 * 10^8 m/F$$

III.1.2.2. Pour l'échantillon carré on a :

La fréquence de résonance obtenue à partir de l'expérience $\omega = 2\pi * 3.6 \text{ MHz}$;

$$f_p = 3.96 \text{ MHz donc :}$$

$$K_t = \frac{\frac{2\pi * 3.4}{4 * 3.96}}{\tan\left(\frac{2\pi * 3.4}{4 * 3.96}\right)} = 0.45 = 45\%$$

a) Calcul de surface de l'échantillon :

Dimensions d'échantillon : L=1.3 cm ; l=1.1cm ; h=0.52 mm ; C=63 nF

$$A = 1.43 * 10^{-4} m^2$$

b) Calcul de permittivité électrique :

On mesuré la capacité avec multimètre est donné la valeur suivant $C=63 \text{ nF} = 63 * 10^{-9} F$

Donc :

$$\varepsilon = \frac{e * C}{S}$$

$$\varepsilon = \frac{0.52 * 10^{-3} * 63 * 10^{-9}}{1.43 * 10^{-4}} = 22.90 * 10^{-8} F/m$$

La permittivité inverse :

$$\beta_{33} = \frac{1}{\varepsilon_{33}} = \frac{1}{22.9 * 10^{-8}} = 4.3 * 10^6 m/F$$

Pour trouver la constante piézoélectrique h_{33} nous allons faire d'expérience suivante pour calculer la densité volumique d'échantillon Piézoélectrique.

Nous mesurons la masse de deux échantillons piézoélectrique à forme carré, on utilise la balance ultra-sensible montrée dans la figure 5.



Figure III.5: La balance ultra-sensible montrée.

Après la mesure ont trouvé :

Échantillon 1 : 0.3692 g

Échantillon 2 : 0.2873g

La densité volumique : $\rho = \frac{M}{V}$

M : la masse d'échantillon

V : le volume d'échantillon

Dimensions échantillon 1: L=1.3 cm ; l=1.1cm ; h=0.52mm

Échantillon 2: L=1.2 cm ; l=1cm ; h=0.52 mm

$$V_1 = 0.7436 * 10^{-7} m^3 \text{ donc } \rho_1 = \frac{0.3692 * 10^{-3}}{0.7436 * 10^{-7}} = 4965.03 Kg/m^3$$

$$V_2 = 0.624 * 10^{-7} m^3 \text{ donc } \rho_2 = \frac{0.2873 * 10^{-3}}{0.624 * 10^{-7}} = 4604.16 kg/m^3$$

La valeur moyenne est :

$$\rho = \frac{\rho_1 + \rho_2}{2} = \frac{4965.03 + 4604.16}{2} = 4784.59 kg/m^3$$

Nous considérons que l'échantillon carré et cylindrique la même densité

$$\rho = 4784.59 kg/m^3 .$$

III.2.la deuxième expérience :

Le but dans cette expérience calculé constant élastique d'un matériau piézoélectrique. Elle est basée sur la technique d'excitation impulsionnelle (Impulsion Excitation Technique) qui permet de relie le module de Young à la fréquence naturelle de l'échantillon (III.1).

L'appareil Grindo Sonic est basé sur la technique d'excitation impulsionnelle. Il a été conçu pour mesurer les propriétés élastiques des matériaux. L'appareil analyse la vibration transitoire d'un objet de test suivant une impulsion mécanique légère. Le résultat est une mesure très précise de la fréquence naturelle. Associée aux dimensions et la masse de l'objet, on effectue le calcul de les constantes élastiques facile selon la formule(III.1). L'obtention des constantes élastiques permet

de calculer la vitesse de propagation : $V_D = \sqrt{\frac{C_{33}}{\rho}}$

Les matériels utilisés : l'appareil grindosonic (donné la fréquence); échantillon piézoélectrique (carré et cylindrique) ; Le schéma (III.4) décrit le montage de cette expérience.



Figure III.4 : le montage d'expérience de mesure la vitesse de propagation

Tout d'abord, nous avons essayé mesurer la fréquence de nos échantillons mais leurs dimensions ne permettent pas de mesurer une fréquence raisonnable ; pour ces échantillons on a estimé la fréquence :

$f = 12.7\text{MHz}$, pour l'échantillon cylindre.

et $f = 3.96\text{MHz}$, pour l'échantillon carré.

la constante élastique (module de Young) est lié à la fréquence naturelle par :

$$\frac{E}{m} bLw = 0.95 \frac{L^4}{w^2} R^2 T \quad (\text{III.1})$$

E : module de Young.

m : la masse de l'échantillon.

b : largeur en mètre.

L : longueur en mètre .

w : l'épaisseur en mètre .

R : fréquence de résonance naturelle

T : facteur correctif.

On considéré $T=1$; $0.95=1$; $(\frac{L}{w}) \gg 0$

$$\frac{E}{m} bLw = R^2 \frac{L^4}{w^2}$$

On a $V = bLw$; $\frac{bLw}{m} = \rho$

$$\frac{E}{\rho} = R^2 \frac{L^4}{w^2} \Rightarrow V = \sqrt{\frac{E}{\rho}} = R \frac{L^2}{w}$$

Donc $V = R \frac{L^2}{w}$

$$V = 12.7 * 10^6 * \frac{(1.3 * 10^{-2})^2}{0.52 * 10^{-3}} = 4127.5m/s$$

Donc à partir la vitesse de propagation on a calculé la constant élastique :

$$V_D = \sqrt{\frac{C_{33}}{\rho}} \Rightarrow C_{33} = \rho * V^2$$

$$C_{33} = 4784.59 * (4127.5)^2 = 8 * 10^{10}Pa$$

le but général de cette expérience est calculé la constant piézoélectrique et a partir le valeur

K_t ; C_{33} ; β_{33}

$$K_t^2 = \frac{h_{33}^2}{\beta_{33} C_{33}} \Rightarrow h_{33} = K_t * \sqrt{\beta_{33} C_{33}}$$

Pour l'échantillon cylindrique :

$$h_{33} = 0.49 * \sqrt{1.95 * 10^8 * 8 * 10^{10}} = 1.9 * 10^9 Pa$$

Pour l'échantillon carré :

$$h_{33} = 0.45 * \sqrt{4.3 * 10^6 * 8 * 10^8} = 8.37 * 10^7 Pa$$

Les résultats de ce travail sont présentés dans le tableau suivant et on constate que les valeurs obtenues sont en bon accords avec les résultats obtenues par différentes méthodes [9].

Caractérisation	ρ (Kg/m ³)	f_p (MGz)	R (MGz)	ϵ (F/m)	h_{33} (Pa)	c_{33} (Pa)	K_t
Cylindre	4784.59	11.5	12.7	$5.11 * 10^{-9}$	$1.9 * 10^9$	$8 * 10^{10}$	49%
Carré	4784.59	3.4	3.96	$22.* 10^{-8}$	$8.37 * 10^7$	$8 * 10^{10}$	45%
D'autres résultats expérimentaux	7500- 8000			$3.80 * 10^{-8}$	(1.6 – 5.15) 10^9	(1.68 – 1.05) 10^{11}	52.4%

Tableau III.3 : comparaison des caractéristiques de nos échantillons piézoélectriques avec d'autres

résultats expérimentaux.

CONCLUSION GENERALE

Dans ce mémoire on a montré qu'à partir de la mesure de l'impédance électrique d'un échantillon piézoélectrique, on peut déduire le coefficient du couplage électromécanique. Cette déduction est basée sur la dérivation de l'impédance électrique à partir des équations dynamiques. La réalisation du circuit et la mesure de l'impédance montre que les valeurs de courant qui traverse la piézoélectrique présente des pics à des fréquences de résonance spécifiques. Ces fréquences sont reliés au coefficient K_t . la détermination de la constante piézoélectrique h_{33} nécessite la connaissance du constant élastique qui, par une méthode d'excitation impulsionnelle, peut être déduit. Les valeurs obtenues sont finalement comparées aux autres valeurs de référence. Les caractéristiques de nos sont :

$$K_t = 0.45 - 0.49 ;$$

$$c_{33} = 8 * 10^{10} Pa ;$$

$$h_{33} = 1.9 * 10^9 - 8.37 * 10^7 Pa ;$$

$$\varepsilon = 5.11 * 10^{-9} - 22. * 10^{-8} F/m ;$$

$$\rho = 4784.59 (Kg/m^3).$$

Ceci dit, au cours de la réalisation de ce travail on a pu maîtriser les paramètres de chaque une des deux expériences. Ainsi la fréquence de résonance longitudinale est de l'ordre de MHz pour des échantillons très fine. Pour la deuxième expérience, la taille de l'échantillon doit être relativement large pour qu'on puisse mesurer les fréquences normales des échantillons. De cette façon on a développé une procédure pour mesurer des constantes piézoélectriques. Une fois les échantillons sont bien caractérisés, des applications précises seront envisageables telle que le microbalance ou bien un bras STM.

Références bibliographiques

[1;1]: Elle tient son nom du minéralogiste russe L. A. Perovski (1792-1856).

[1] : www.memoireonline.com › Sciences.

[2]: ALMEIDA Susana, GOLDIN Ariel, SANTOSCOY Mauricio. Grossir : un chemin pour la durabilité: étude de l'effet piézoélectrique.

[3] : Phénomène de piézo-électricité F. Patat.

[4] : Thèse : PROPAGATION DE FISEURES DAN S LES CERAMIQUE
PIZOELECTRIQUE DE TYPES PZT : EFFETS DE DOPAGE AU POTASSIUM ET

[5] : Thèse : Formalisme d'octet appliqué à la propagation d'ondes dans des milieux piézoélectriques inhomogènes. Mountaga Lam. le 5 Décembre 2008.

[6] : Michel Brissaud. Matériaux piézoélectriques et méthodes de caractérisation.
France.2007.

AUNIBIUM. Azddine HIZEBRY. 6 November 2007.

[7]: Binu K. Mukherjee. Article: Characterization of Piezoelectric Materials for Transducers.

[8]: Jan Tichý · Jiří Erhart · Erwin Kittinger · Jana Přívratká. Fundamentals of Piezoelectric Sensorics Mechanical, Dielectric, and Thermodynamical Properties of Piezoelectric Materials.
Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2010.

[9]: JIASHI YANG .Article :AN INTRODUCTION TO THE THEORY OF
PIEZOELECTRICITY.

.

Résumé

Résumé

L'objectif de ce travail est la détermination des caractéristiques physiques des échantillons piézoélectriques par la méthode de mesure l'impédance électrique. Pour cela on a dérivé l'expression de l'impédance électrique à partir des équations dynamiques. Cette expression lie Z au coefficient de couplage électrodynamique. La constante élastique est déterminée par la technique d'excitation impulsionnelle. Finalement l'ensemble des caractéristiques sont obtenus et ils sont en bon accords avec les résultats déjà publiés.

Abstract

The objective of this work is determining the physical characteristics of piezoelectric samples by measuring the electrical impedance method. For this was derived the expression of the electrical impedance from the dynamic equations. This expression binds to Z electrodynamic coupling coefficient. The elastic constant is determined by the impulse excitation technique. Finally all of the characteristics are obtained and they are in good agreement with previously published results.

ملخص

الهدف من هذا العمل هو تحديد الخصائص الفيزيائية للعينات الكهرو ضغطية عن طريق قياس الممانعة الكهربائية. لهذا تم اشتقاق عبارة الممانعة انطلاقا من المعادلات الديناميكية. هذه العبارة تربط Z بمعامل الاقتران كهروديناميكي. يتم تحديد ثابت المرونة بواسطة تقنية الإثارة. في النهاية يتم الحصول على جميع الخصائص وهي متوافقة مع النتائج المتحصل عليها سابقا.