

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

Domaine : Sciences de la matière
Filière : Physique

N : PhAPP05/2019 Option : Physique Appliquée



Mémoire Présenté pour l'obtention
du diplôme de Master Académique

Par : BISSR Abde ssmie

Thème

Etude thermo-magnéto-électrique de matériau piézoélectrique

Soutenu le 22 /07/2019 devant le jury composé de

IBRRIR Miloud

Pr Univ. de M'sila

Président

BELOUADAH Rabah

Pr Univ. de M'sila

Encadreur

TORKI Zohir

MCA Univ. de M'sila

Co- Encadreur

BADJI Najib

MCA Univ. de M'sila

Examineur

Promotion Juin 2019

Remerciements

Remerciements

Avant tout, je remercie ALLAH tout puissant qui m'a donné et m'a orienté vers la bonne voie.

Le présent travail a été effectué au sein de l'université de Msila sous la direction du Dr. Rabeh BOULOUDAHAH comme encadreur et Dr. Zohir TORKi comme co-encadreur.

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance au directeur de thèse le Docteur Rabeh BOULOUDAHAH de l'école normale supérieure (ENS) de Boussaada-wilaya de Msila, pour son aide immense, pour son soutien, pour sa confiance partagée, pour ces belles remarques et toutes les connaissances qu'il m'a transmises.

Je tiens à remercier le Docteur Zohir TORKi de l'Université de M'sila, co-promoteur de cette thèse, pour m'a voir initiée aux multiples disciplines entamées dans ce travail, pour ses orientations, ses remarques, ses conseils précieux, pour l'aide et le temps qu'elle m'a apporté tout au long de ce travail.

Je remercie également le Dr. Yousf Islem BOUREZG maître assistant à l'université de Djelfa, pour son encouragement, sa disponibilité et sa gentillesse.

Enfin, je dédie ce travail à mes parents, mes frère, mes sœurs et toute la famille pour leur soutien pendant toutes mes études.

SOMMAR

CHAPITRE I : Généralités	
Introduction générale	1
I.1.Introduction	3
I.2. Convertisseur électromécanique	3
I.3. Piézoélectricité	4
I.4. Différents catégories des matériaux piézoélectriques	5
I.4.1. Cristaux	6
I.4.2. Céramiques	7
I.4.3. Les composites piézoélectriques	8
I.4.4. Polymères PVDF	9
I.5. Équation piézoélectrique	10
I.5.2. Les Actionneurs Magnétostriction	11
I.5.1. Capteurs magnétostrictifs ou magnéto-élastiques	13
I.5.1.1. Définition	13
I.5.1.2. Présentation du phénomène	14
I. 5. Applications industriels	15
Chapitre II: Modèle d'étude expérimentale	
II.1.Introduction	17
II.2.L'effet magnétoélectrique	17
II.3. Les courants induits	18
II.4. L'effet de PILTER	19
II.5. Caractéristique de PELTER	20
II.6. Caractéristique de Piézo céramique	21
II.7. Forces de Lorentz dans les électrodes	22
II.8. Épaisseur de peau	23
II.9. Effet de la tension électrique	24
II.10. Différents états de polarisation d'une pastille piézoélectrique	25
II.11. Modèle de courant de Lorentz	26
II .12. Contribution de couplage piézoélectrique relié avec le champ électrique	27
II.13. Effets de la température	27
II .14. Pertes diélectrique en fonction de la température	29
II.15.Dépendance thermique de la constante de charge d31	30
II.16Conclusion	31
Chapitre III : Etude Expérimentales	31
III.1. Introduction	32
III.2 Description du protocole expérimental	32
III.2.1 Travail de préparation	32
III.2.2 description de dispositif magnétoélectrique et montage	32
III.3. Matériels utilisé	34
III.6. Etude exprimental	36
III.6.1. fréquence de résonance	35
V. Effet de la température sur la réponse magnétoélectrique	63
VI. Discussions	37
VII. Conclusion	39
Conclusion générale	

Introduction général

INTRODUCTION GENERALE

Les matériaux piézoélectriques peuvent être définis comme étant des matériaux capables de transformer une énergie mécanique en une énergie électrique, découvert pour la première fois en 1871 par l'Abbé René Just HAUY [1]. L'étude théorique et expérimentale de ce phénomène fut entreprise par les frères Pierre et Jacques Curie en 1880[2], à qui l'on attribue la découverte de l'effet piézoélectrique direct. L'effet piézoélectrique inverse fut énoncé théoriquement par LIPMAN en 1881 et vérifié expérimentalement la même année par les frères Curie. [2],

Les céramiques de type PZT sont des mauvais conducteurs d'électricité et de chaleur mais ils résistent mieux que les métaux et les polymères aux conditions extérieures rigoureuses aux températures élevées[3] a cause de leurs propriétés mécaniques, les céramiques sont à la fois dures et très fragiles. [4],

Les matériaux piézoélectriques sont capables de convertir l'énergie mécanique en énergie électrique et vice-versa, [5] collant deux couches constructrices aux deux côtés d'un matériau piézoélectrique, et en appliquant deux champs magnétiques B alternatif et B contenir pour assurer une charge de nature électromagnétique l'étude dans ce cas repose sur l'évaluations de l'effet de la température et le comportement d'un matériau piézoélectrique soumis a une contrainte varie en fonction de B contenir.

Dans ce cas, nous obtenons nouveau matériau de fort coefficient de couplage thermo-magnéto-électrique.

Plusieurs travaux de recherche consacrés a l'étude de couplage magnéto-élasto-électrique, a l'intermédiaire d'un dispositif qui se compose de deux couches l'un magnétostrictive et l'autre piézoélectrique afin de récupérer le courant magnéto-électrique I_{me} , et dans ce contexte, des travaux de recherches muni une différente procédure pour récupérer l'énergie, qui consiste à créer une charge sur une surface plane piézoélectrique coller a une autre plan conducteur , a travers la force de Laplace produite par des courants induit engendrées sur la couche conductrice .

Des autres travaux dans cet axe, sont améliorés le dispositif conducteur-piézoélectrique, par le changement de la forme de plan vers disque, a fin d'écarter le mode de vibration radiale.

Ce travail entrant dans le cadre d'un mémoire de master en physique appliquée, et l'objectif de ce travail est l'étude expérimentale de l'effet de la température sur un dispositif magnéto-électrique, qui se compose de deux couches l'une conductrice et l'autre piézoélectrique se forme d'un disque, pour but de récupérer l'énergie électrique.

Pour ce faire, nous avons réparti le travail en trois chapitres :

Le 1^{er} chapitre, l'étude bibliographique qui a pour but d'expliquer les phénomènes physiques est consacré à une présentation générale sur certains des concepts électromagnétiques et physiques dont nous avons besoin sont comme les courant induit , l'induction électromagnétique , la loi de Lenz-Faraday et la force électromotrice et les forces électromagnétiques avec mentionnaient le concept de piézoélectricité et les différents phénomènes qui existent en eux qui sont la pyroélectricité et la ferroélectricité , et les matériaux piézoélectrique naturels et synthétiques , nous avons aussi parlé de la description de la structure pérovskite et la transition de phase et les modes de déformation et l'équations constitutives de la piézoélectrique et avec la polarisation et cycle d'hystérésis des matériaux ferroélectrique . En termine par un aperçu sur la thermoélectricité et l'effet très important de ce phénomène.

Le deuxième chapitre sera consacré aux calcule analytique des courants électriques entrants dont la relation de courant totale récupérer devant le dispositif magnétoélectrique, a l'aide des principales lois qui gouvernent chaque phénomène électromagnétique, et les lois de comportements pour chaque milieu. Ainsi le calcule de la force de Lorentz soumis sur le céramique PZT à cause l'interaction entre les courants induits engendrés dans le disque conductrice et le champ magnétique appliqué sera l'intérêt de ce chapitre.

Le troisième chapitre consiste a présenté ; le banc d'essai expérimental et le matériel utilisé ainsi les caractéristiques de Bizo céramique utilisé dans l'expérience d'une part.

Et d'autre part, des résultats et la discussion concerne la contribution de L'effet de la température sur la valeur du courant électrique mesuré.

Nous terminerons par une conclusion générale qui englobera l'ensemble des résultats obtenus.

CHAPITRE I
Généralités

I.1.Introduction

Ce chapitre constitue tout d'abord une introduction à la piézoélectricité et l'effet piézoélectrique. Nous présentons ensuite les matériaux piézoélectriques de structure pérovskite en détaillant les différentes catégories des matériaux piézoélectriques. Enfin, ce chapitre comprend également une étude bibliographique sur les applications industrielles des céramiques piézoélectriques et en termine par présentations de l'effet de pilter et les courants induits.

I.2. Convertisseur électromécanique

Un matériau piézoélectrique est par définition capable de convertir [6] :

- 1) L'énergie mécanique en énergie électrique, c'est l'effet piézoélectrique direct.
- 2) L'énergie électrique en énergie mécanique, c'est l'effet piézoélectrique inverse.

En détail, Si on applique un effort, les contraintes mécaniques qui apparaissent dans le matériau provoquent des déformations de sa structure cristalline et ainsi des déplacements relatifs des charges électriques des ions. Ces déplacements correspondant à une polarisation électrique dans le matériau. L'état électrostatique (représenté par les champs électrique E et déplacement électrique D , reliés à la polarisation P par l'équation :

(I.1)

ϵ_0 : La permittivité électrique du vide.

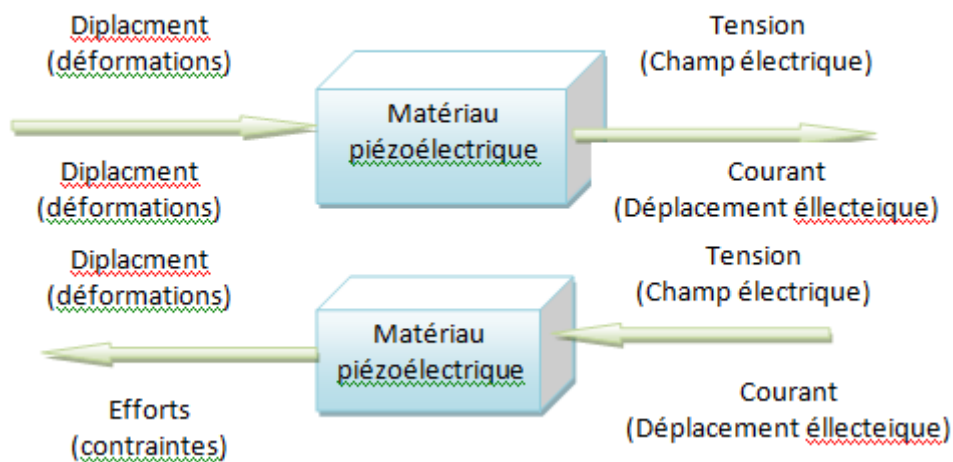


Figure I.1 : L'effet piézoélectrique [7]

Ces équations permettent de lier les parties électriques et mécaniques des matériaux piézoélectriques. Plusieurs formes de ces matériaux existent en modifiant les variables indépendantes. Le coefficient le plus important est le coefficient d qui indique le nombre de charges électriques que fournit le matériau en fonction de la force appliquée.

I.4. Différentes catégories des matériaux piézoélectriques

De nombreux cristaux naturels présentent des propriétés piézoélectriques. On peut citer le quartz, la topaze, la tourmaline, la berlinite ($AlPO_4$). Dans la pratique, les matériaux utilisés pour la fabrication des différents dispositifs sont des matériaux de synthèse qu'on peut classer selon leur structure cristallographique ou leur composition chimique. Ces matériaux peuvent être regroupés en trois classes principales :

- Matériaux cristallins (comme le quartz),
- Matériaux céramiques (comme le PZT),
- Matériaux polymères (comme le PVDF).

Le tableau I.1 présente un exemple de chaque classe

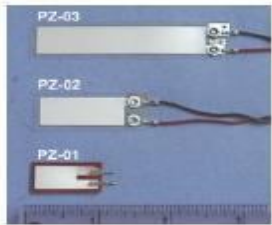

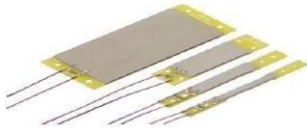
<p>Les Polymères</p>	<p>Les matériaux polymères sont généralement utilisés pour leurs propriétés mécaniques particulières et leur aptitude à être mis en œuvre. Il existe également des polymères qui présentent des propriétés Piézoélectriques. Les plus couramment utilisés sont des polymères de synthèse, notamment le polyvinyle -dinedifluoride (PVDF).</p>	 <p>Polyvinyle-dinedifluoride(PVDF)</p>
<p>Les cristaux</p>	<p>Le plus connu est le quartz, se trouve à l'état naturelle, considéré comme cristallins, il est particulièrement sensible à leur coupe d'orientation, et présente des propriétés piézo-électriques en fonction de l'orientation cristalline.</p>	 <p>Le quartz</p>
<p>Les Céramiques</p>	<p>Ces matériaux présentent des coefficients de couplage élevés, et sont très flexibles, de sorte qu'ils sont très adaptés aux applications personnalisées.</p>	 <p>Plomb Zirconium Titanate (PZT)</p>

Tableau I.1. Différentes classes des matériaux piézoélectrique.[10]

Le choix du matériau se base sur les paramètres suivants :

- Le couplage électromécanique k .
- La raideur des matériaux piézoélectriques ou le module d'Young.
- Un matériau piézoélectrique à faible raideur aide à obtenir de basses fréquences de résonances.

Le facteur de qualité Q_m : Il est important de choisir le matériau avec le meilleur facteur de qualité pour minimiser les pertes mécaniques dans la structure.

- Les pertes diélectriques ($\tan(\delta)$) : Ces pertes doivent bien entendu être minimisées.
- La plage de variation de température ($-20 < T < 80^\circ\text{C}$) limitée par la température de Curie

I.4.1. Cristaux

Un certain nombre de cristaux présentent un comportement piézoélectrique ; on peut citer le quartz, la tourmaline, le sel de Seignette, le sucre ... [2] Ce comportement apparaît dans des cristaux présentant une structure asymétrique et des liaisons ioniques ; il peut être décrit en observant la figure (I.2), qui représente une vue de la structure du quartz.

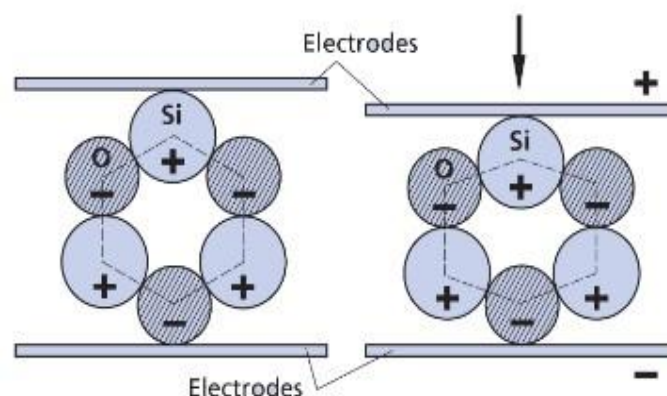


Figure I.2 : Coupe d'une cellule élémentaire d'un cristal de quartz sous l'action d'un effort mécanique [11]

Les cristaux naturellement disponibles étaient au départ la source exclusive de matériaux piézoélectriques [12]. ; Cependant leur fragilité, la difficulté de les obtenir en grandes pièces et de les mettre en forme est un problème. De plus, le coefficient de couplage des cristaux naturels n'est pas très élevé. À l'heure actuelle, on développe des cristaux de synthèse comme l'orthophosphate de gallium GaPO_3 , au coefficient de couplage très élevé ; les difficultés de fabrication et de mise en œuvre subsistent. [13].

I.4.2. Céramiques

La plupart des matériaux piézoélectrique tels que le titanate de baryum (BT) ou le titanate de plomb (PT) cristallisent en une structure pérovskite de type ABO_3 . La pérovskite est le nom de la structure minéral du titanate de calcium ($CaTiO_3$). Dans sa forme la plus simple, cette structure présente une maille cubique où les différents ions sont positionnés comme suit Figure I.3 [14].

- Les sommets sont occupés par le cation A de grand rayon, bivalent et de coordination 12 par rapport d'O
- Le centre est occupé par le cation B de faible rayon, tétravalent et de coordination 6 par rapport d'O
- Les centres des faces sont occupés par les atomes d'oxygène qui forment un octaèdre au centre duquel se trouve le cation B

Les substitutions par des atomes de tailles différentes sur les sites A et B entraînent l'apparition de distorsions de la maille.

Deux facteurs rendent compte de la stabilité de la structure pérovskite. Le premier est le facteur de tolérance de Goldschmidt t :

$$t = \frac{r_A}{r_B + r_O} \quad (I.3)$$

Il varie entre 0,8 et 1,05 pour la structure pérovskite

Si $t=1$, tous les ions sont en contact, l'empilement est compact

Si $t < 1$, l'ion A dispose d'un espace grand pour se mouvoir. En revanche $t > 1$ est l'ion B qui peut se déplacer dans la maille

Le deuxième facteur rendant compte de la stabilité de la structure est l'ionicité de la liaison anion-cation. Cette ionicité est quantifiée à partir de l'échelle de Pauling par la différence d'électronégativité :

$$\frac{X_{A-O} - X_{B-O}}{X_{A-O} + X_{B-O}} \quad (I.4)$$

Avec X_{A-O} et X_{B-O} sont respectivement les différences d'électronégativité entre A et O et B et O

La structure est d'autant plus stable que la liaison anion-cation présente un fort caractère ionique

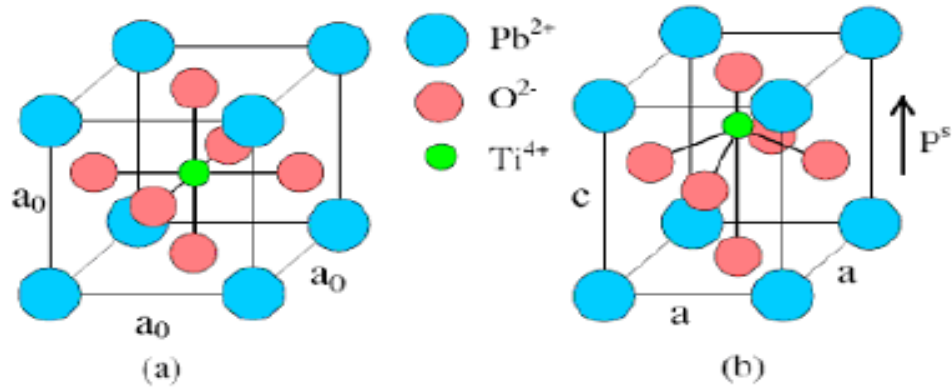


Figure I.3 : Structure pérovskite de PbTiO_3 (type ABO_3). (a) Structure cubique (paraélectrique) au-dessus de la température, (b) : Structure quadratique (ferroélectrique) au-dessous de la température de Curie [15].

I.4.3. Les composites piézoélectriques

Afin de s'affranchir d'un certain nombre de problèmes inhérents aux céramiques (fragilité, raideur excessive) de nombreux travaux visent actuellement à associer des fibres en céramique piézoélectrique (la qualité de fabrication - et la durée de vie - de la céramique est bien meilleure sous cette forme) à un réseau d'électrodes appropriées (par exemple, orthogonales à la fibre et alternées, **Figure I.7**). Le tout est noyé dans une matrice époxy qui protège et assure la tenue mécanique de l'ensemble. En choisissant bien la forme des électrodes on peut assurer une polarisation du matériau permettant un bon couplage piézoélectrique ; l'idée est d'obtenir une polarisation dans la direction des fibres (et de la contrainte que subira le matériau), et d'exploiter ainsi le couplage "33" (**Figure I.6**).

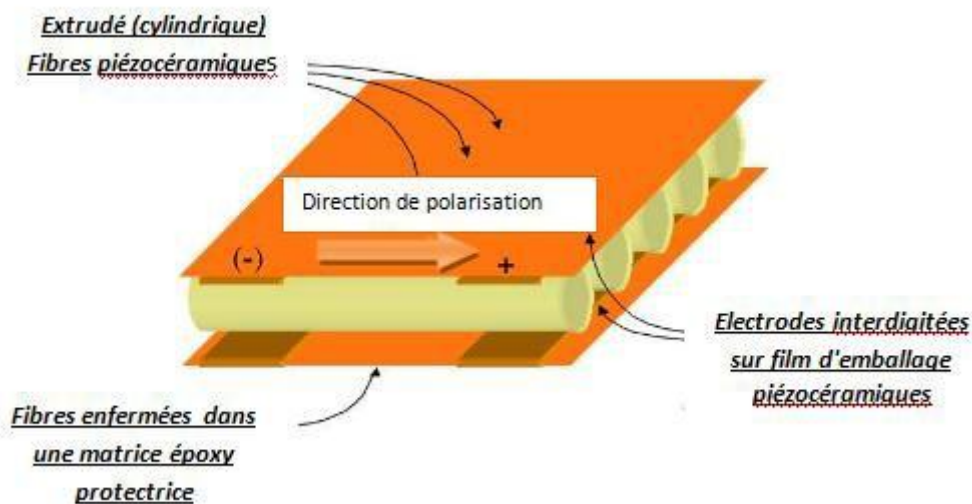


Figure I.7 : Composite piézoélectrique à électrode croisée. Le champ électrique est dans la direction de contraction et d'étirement des fibres. [18]

Le composite obtenu ainsi est souple et peut être facilement associé à des surfaces courbes. De nombreux travaux sont consacrés à ces développements [21,22]. La modélisation de ces matériaux fait souvent appel à une première phase d'homogénéisation de l'élément composite, pour obtenir des équations similaires à un élément piézoélectrique monolithique [13]

I.4.4. Polymères PVDF

Le poly fluorure de VINYLIDENE (POLYVINYLIDENE FLUORIDE, PVDF) est un polymère *THERMO-PLASTIQUE* très résistant et léger ; il peut de plus présenter des propriétés piézoélectriques. Le motif élémentaire (monomère) qui constitue le matériau est répété suivant la formule $-(CH_2CF_2)_n-$, avec les atomes de fluor et d'hydrogène constituant un dipôle électrostatique (**Figure I.9**). Sur une même chaîne les directions de ces dipôles sont variées et aucune polarisation n'apparaît globalement. De plus, le matériau est constitué de nombreuses chaînes moléculaires entre mêlées ; il est difficile d'obtenir une polarisation rémanente dans cette configuration.

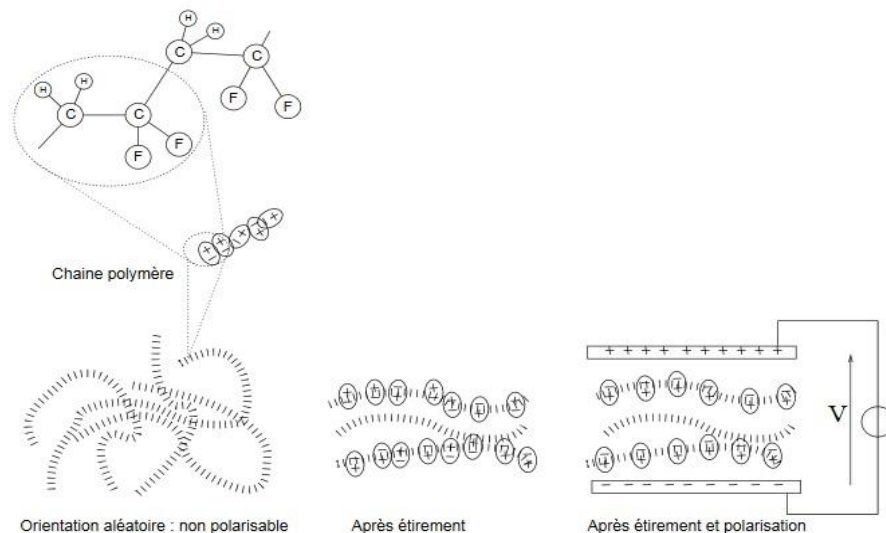


Figure I.9 : Structure du PVDF

Afin d'avoir une polarisation rémanente il est nécessaire d'aligner les chaînes de molécules ; pour ce faire le matériau est étiré à chaud, puis muni d'électrodes (souvent un film mince de métal) ; il est alors possible d'appliquer un champ électrique intense et d'aligner chaque dipôle avec le champ ; on obtient une polarisation rémanente du matériau. Cela a aussi pour effet de faire apparaître un effet piézoélectrique [23] Par rapport aux céramiques et cristaux, le PVDF est bien plus souple, léger, et supporte des déformations plus importantes. L'obtention du matériau sous forme de film souple, peu cher et facile à mettre en œuvre lui

donne de bonnes propriétés en tant que capteur. Par contre le couplage piézoélectrique est plus faible que celui observé dans les autres matériaux. Cette raideur réduite rend difficile l'adaptation d'impédance mécanique avec des structures rigides [24].

I.5. Équation piézoélectrique

Le formalisme mécanique présenté dans cette partie s'appuie sur la norme ANSI/IEEE éditée en 1987 [25] et mise à jour en 1996 [26] qui porte sur les effets piézoélectriques.

Si l'on ne prend en compte que les effets mécaniques et électriques ainsi que les couplages associés, on peut alors écrire les équations piézoélectriques (I.15) et (I.16) :

(I.15)

(I.16)

S_{ij} : Représente les déformations,

s^E_{ijkl} : Les modules d'élasticité du matériau,

T_{ik} les contraintes appliquées sur le matériau,

d_{kij} : Les coefficients piézoélectriques,

E_k : Le champ électrique appliqué sur le matériau,

D_i : L'induction électrique

ϵ_{ij} : La permittivité diélectrique du matériau.

Pour l'équation (I.15), la déformation libre du matériau dépend linéairement de la contrainte appliquée, ce qui correspond à *la loi de Hooke* mais dépend aussi linéairement du champ électrique, ce qui correspond à *l'effet piézoélectrique* indirect. Dans l'équation (I.16), l'induction électrique dépend linéairement du champ électrique appliqué sur le matériau mais dépend aussi linéairement de la contrainte appliquée sur le matériau, ce qui correspond à l'effet piézoélectrique direct. Nous pouvons faire cette hypothèse linéaire car les déformations des structures présentées dans ce manuscrit sont très inférieures à l'unité.

Si l'on utilise un autre jeu de variables indépendantes, on obtient alors un autre jeu indépendant d'équations (I.17) et (I.18) permettant de modéliser l'effet piézoélectrique :

(I.5)

(I.6)

Dans ce cas, les coefficients C_{il} représentent les coefficients de rigidité du matériau et e_{kij} les coefficients piézoélectriques.

Ces systèmes sont aussi utilisés dans l'air et maintenant répandus jusque dans les pare-chocs de certaines voitures (improprement appelés radars de recul). [29].

– Le rendement et la puissance des émetteurs peuvent être très élevés si on les utilise à leur résonance mécanique ; on le trouve dans des applications comme le nettoyage à ultrasons (les ondes de pression émises dans un liquide provoquent de la cavitation à la surface de la pièce à nettoyer), la soudure par ultrasons (où les vibrations à l'interface entre deux pièces créent de la chaleur), la destruction de calculs rénaux et tumeurs cancéreuses (où on focalise des ultrasons sur la partie à détruire), le détartrage des dents (où l'outil du dentiste vient gratter la surface des dents) . [30].

– On peut aussi utiliser des éléments piézoélectriques comme haut-parleurs d'aigu (tweeters à pavillon avec élément céramique) ou large bande (où la membrane du haut-parleur est un film PVDF) ; ils ont un meilleur rendement que des haut-parleurs électrodynamiques mais une qualité souvent réduite, du fait de la présence de résonances mécaniques. [31].

– On utilise des éléments piézoélectriques dans des circuits d'horloge (montre à quartz) où les oscillations mécaniques à haute fréquence d'un petit élément piézoélectrique (souvent appelé quartz) sont couplées à un circuit qui compte les oscillations ; l'oscillateur ainsi constitué est très stable et constitue l'horloge de nombreux circuits électroniques.

– On peut également réaliser des gyroscopes piézoélectriques ; un élément piézoélectrique est mis en vibration par effet indirect ; puis l'effet direct est utilisé pour mesurer les variations de ces vibrations liées aux effets de Coriolis.

– Dans certains transformateurs, on utilise les vibrations d'un bloc de matériau piézoélectrique pour abaisser une tension ; le bloc est mis en vibration par le circuit primaire et l'énergie des vibrations est récupérée pour alimenter le circuit secondaire, avec une tension différente. [32].

– Dans les briquets dits "électroniques", les hautes tensions générées par un choc ou une pression importante sur une céramique permettent d'obtenir une étincelle.

– On utilise des éléments piézoélectriques pour des applications de micro-positionnement dans des microscopes, de contrôle de déformation dans des optiques adaptatives, ou de contrôle de vibrations. [33].

– Dans des moteurs piézoélectriques, ou moteurs à ultrasons, on utilise un élément piézoélectrique pour produire des ondes de surface dans une pièce métallique au contact d'une autre ; suivant la nature des ondes les points de contact vont se déplacer et provoquer le mouvement relatif des deux pièces. Ce type de moteur est utilisé dans certains dispositifs

auto-focus d'appareils photo ; ses avantages sont d'être bloqués à l'arrêt et d'avoir la forme d'un anneau monté autour de l'objectif. D'autres applications font actuellement l'objet de développements [34].

– On envisage de récupérer l'énergie de vibrations mécaniques sous forme électrique : on parle de piézoélectrique énergie harvesting. [34, 35].

– La miniaturisation croissante fait que les procédés de fabrication permet d'intégrer des éléments piézoélectriques directement sur des circuits intégrés ; puis les échelles ont diminué jusqu'à ce que l'on parle de MEMS et NEMS (Micro et Nano ElectroMechanical System) ; ils sont toujours utilisés comme capteurs ou actionneurs, mais l'application finale peut différer complètement ; on peut ainsi créer de nouveaux capteurs physiques ou chimiques [60], ou encore des filtres électroniques.

– Un effort est en cours pour réduire les coûts des capteurs piézoélectriques, en utilisant des films PVDF par exemple, et pour les adapter à des cas spécifiques : écrans ou capteurs tactiles par exemple ; en imprimant des électrodes adaptées on peut réaliser différentes fonctions. [38].

I.5.1. Capteurs magnétostrictifs ou magnéto-élastiques

I.5.1.1. Définition

Le terme de magnétostriction est un terme générique qui regroupe un grand nombre de phénomènes qui mêlent magnétisme et variation des propriétés mécaniques d'un matériau. Comme le montre la Figure 10, il est impropre d'utiliser le terme de magnétostriction qui regroupe à la fois les phénomènes de magnétostriction mais aussi de paléomagnétisme (analogiquement avec l'électrostriction et la piézoélectricité).

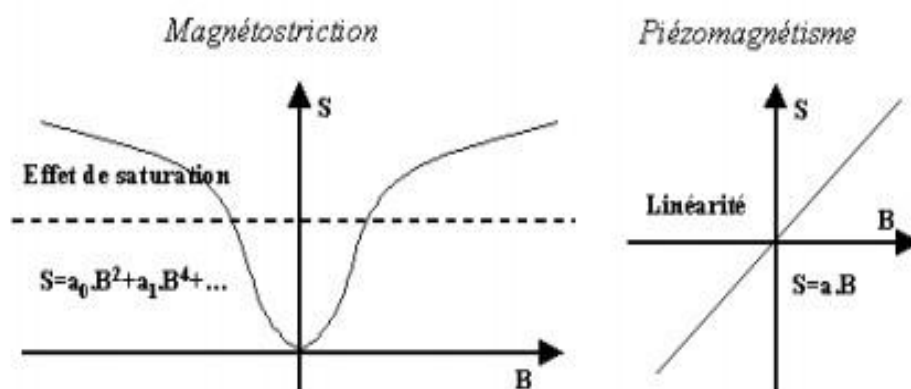


Figure I.10 : Différences entre magnétostriction et piézo-magnétisme

Les manifestations de la magnétostriction (Figure I.11(a)) les plus évidentes sont les bruits et vibrations qu'émettent les transformateurs ou les inductances lorsqu'ils sont branchés sur le réseau électrique. Les tôles ferromagnétiques constitutives des transformateurs et des moteurs électriques vibrent à la fréquence du réseau, c'est-à-dire à 50Hz ce qui est bien audible.

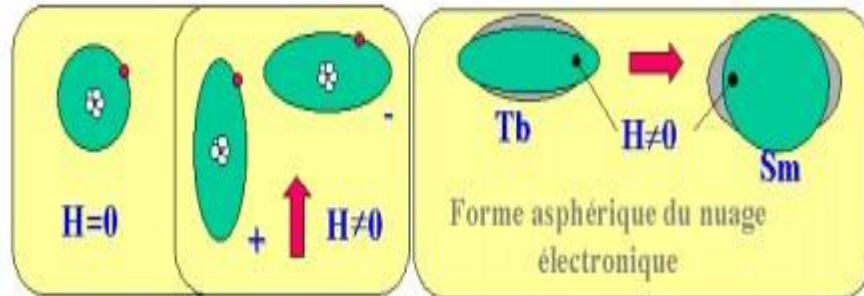


Figure I.11 : (a) Magnétostriction positive et négative : Représentation de la déformation du nuage électronique de l'atome sous l'effet d'un champ magnétique H [39], (b) Forme des nuages électroniques 4f de quelques terres

I.5.1.2. Présentation du phénomène

Deux causes peuvent être évoquées au niveau atomique pour expliquer ces effets. Il s'agit tout d'abord de la répartition du nuage électronique et de la direction de facile aimantation [39]. Lorsque les caractéristiques physiques et chimiques des matériaux sont totalement définies, l'état magnétique du matériau l'est lui aussi, de ce fait il existe un couplage magnéto-élastique au sein du matériau [40]. La configuration physique du matériau définit un nuage électronique (**Figure I.11(b)**) de la structure qui est non sphérique dû à l'hétérogénéité des différents composants. De plus ce nuage électronique tourne sur lui-même, il influe donc sur la position des ions constitutifs de la structure en les attirant ou en les repoussant. Ce nuage sensible au champ magnétique explique les variations de propriétés mécaniques qu'occasionne la mise en place d'un champ magnétique. Les matériaux magnétiques sont constitués de petits domaines magnétiques orientés aléatoirement appelés domaines de Weiss [41]. Ils sont généralement orientés au sein du matériau pour minimiser l'énergie magnétique, c'est-à-dire en refermant au maximum les champs magnétiques à l'intérieur du matériau. Lorsqu'un champ magnétique est appliqué sur un matériau magnétique ses domaines de Weiss s'alignent sur ce champs extérieur, et le matériau se « polarise » magnétiquement. Les domaines de Weiss ont donc tendance à « tourner » pour s'aligner avec le champ ce qui occasionne une réorganisation interne et crée donc un réarrangement mécanique de la structure. Ce phénomène contribue à modifier les paramètres géométriques du matériau magnétique en fonction du champ magnétique appliqué sur la

vibre à l'air ambiant ce qui génère du son [46]. Le domaine qui nous intéresse le plus est le domaine des capteurs comme les capteurs de position et de couple et tout particulièrement les capteurs de pression et de force. Ces capteurs sont bien étudiés et certains sont même commercialisés [47]. Pour le capteur de force développé par Cédric (Figure I.13) [49], l'application visée est le génie civil avec une possibilité d'implanter les capteurs dans les haubans des ponts suspendus [48].

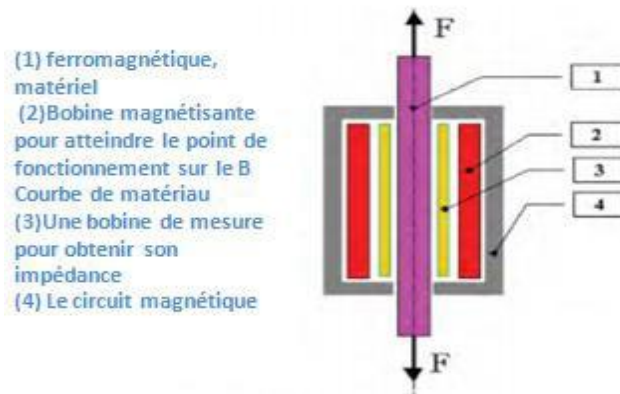


Figure I.13 : Capteur de force magnétostrictif développé par CEDRAT [50]

Le principe de la mesure est tout simple. La perméabilité du matériau varie en fonction de la contrainte appliquée. Elle varie toutefois d'une manière extrêmement non linéaire (Figure I.14 (a)) ce qui implique que le capteur a une plage de fonctionnement limitée qu'il convient d'adapter en appliquant une précontrainte sur le barreau.

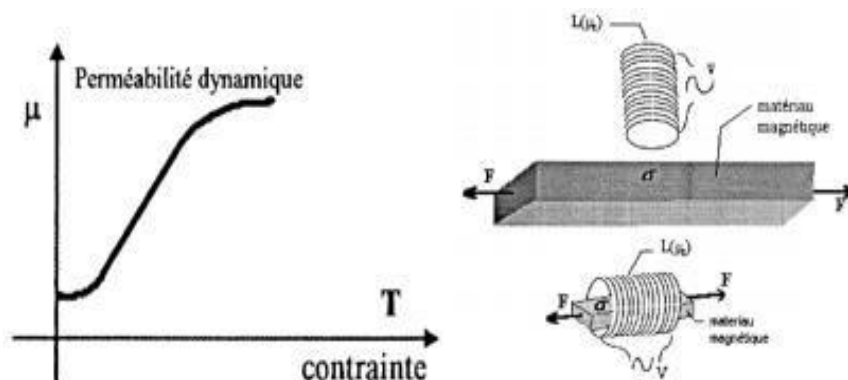


Figure I.14 : (a) Diagramme contrainte – Perméabilité magnétique d'un acier, (b) Positionnement de la bobine pour capter la variation de perméabilité du matériau magnétique

La polarisation magnétique se mesure grâce à l'apparition furtive d'un courant induit dans la bobine ; cela revient à observer l'impédance électrique du système exciteur (une bobine située autour ou à côté du matériau ferromagnétique, **Figure I.14**).

CHAPITRE II :

Modèle d'étude
expérimentale

II.1.Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons l'effet magnétoélectrique et l'effet de PILTER, ainsi les courants induits et on termine par l'effet de température sur un matériau Piézo-céramique.

Comme deuxième parti, nous présentons le modèle d'étude et leurs caractéristiques géométriques, ainsi la modélisation de courant magnétoélectrique et la force de Lorentz engendré sur le disque.

II.2. L'effet magnétoélectrique

L'effet ME est caractérisé par le coefficient ME. Un champ magnétique \mathbf{H} appliqué sur un échantillon ME d'épaisseur e crée une polarisation électrique à l'intérieur de l'échantillon et donc un potentiel électrique (figure I.19). [54].

Effet direct : modification de l'état électrique induite par un champ magnétique.

Effet inverse : modification de l'état magnétique induite par un champ électrique.

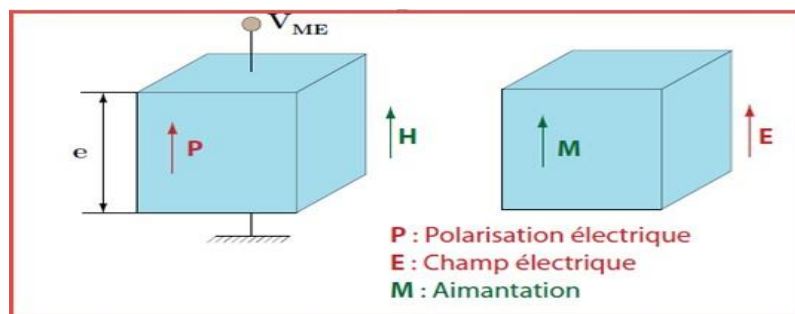


Figure II.1.Effet magnéto-électrique direct et inverse [55].

En régime statique, le coefficient ME est défini par :

$$\frac{P}{H} = \alpha \quad (II.1)$$

En régime dynamique : $\mathbf{H} = \mathbf{H}_0 + \mathbf{h}$, où \mathbf{H}_0 est la composante statique et \mathbf{h} la composante harmonique. On définit alors :

$$\frac{P}{h} = \beta \quad (II.2)$$

II.3. Les courants induits

L'origine de ces courants induits résulte de la variation d'un flux magnétique inducteur au travers d'un circuit fermé appelé induit.

La tension induite engendre alors un courant électrique (si celui-ci peut circuler) dit alors « courant induit » qui crée tend à s'opposer aux variations du flux inducteur (si le flux extérieur diminue, on ajoute un flux positif. Si le flux extérieur augmente, au contraire on ajoute une valeur négative).

Michael Faraday découvrit le phénomène d'induction en 1831. Il établit que la force électromotrice produite le long d'un chemin fermé est proportionnelle au taux de changement du flux magnétique [51].

Pour une bobine sujette à un changement de champ magnétique, la loi de Faraday pour l'induction établit que :

(II.3)

Avec :

ε : la force électromotrice en V

N : le nombre de spires de la bobine

Φ : le flux magnétique en Wb

U : la tension induite en V.

De plus, la loi de Lenz donne la direction de la force électromotrice induite.

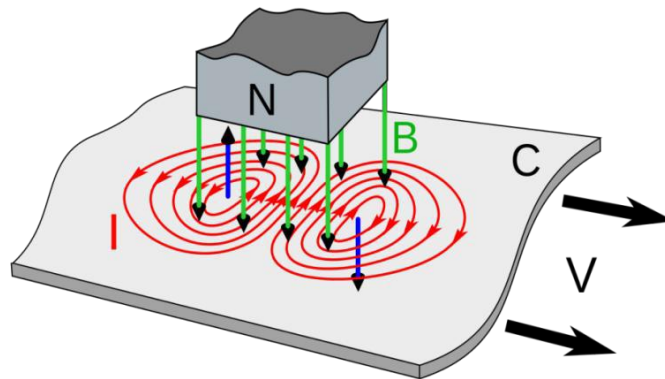


Figure II.2: l'allure des courants induits [52].

Lorsque la variation de flux est due à un déplacement du milieu devant un champ magnétique constant, les courants de Foucault sont responsables de l'apparition de forces de Laplace qui s'opposent au déplacement, d'où l'effet de freinage observé sur les systèmes utilisant ce genre de dispositif.

Plus en détail, la circulation d'un courant dans un conducteur s'accompagne d'un mouvement de porteurs de charge. Dans un champ magnétique extérieur, ces particules chargées sont soumises à la partie magnétique de la force de Lorentz [53] :

$$\vec{F}_m = q \vec{v} \times \vec{H} \quad (\text{II.4})$$

Les porteurs de charge sont alors temporairement déviés dans le conducteur. L'inhomogénéité des charges dans le conducteur conduit à l'apparition d'un champ de Hall E_H . Ce champ exerce alors une force de Lorentz sur les charges fixes du conducteur

Cette force agissant sur la masse du conducteur n'étant pas compensée, le matériau se déplace.

Il ne faut pas confondre la force de Laplace, résultante macroscopique, avec la force de Lorentz, résultante microscopique, sur une particule chargée q en mouvement à une vitesse (v) dans un champ magnétique

La puissance perdue par unité de masse (W/kg) du fait des courants de Foucault dans un matériau de résistivité ρ , d'épaisseur e et soumis perpendiculairement à un champ magnétique d'amplitude (induction magnétique) variant sinusoidalement au cours du temps avec une fréquence f est donnée par la relation suivante :

$$P = \frac{1}{2} \frac{K}{\rho} \mu_0^2 H_m^2 f^2 e^3 \quad (\text{II.6})$$

Où

K : est une constante valant 1 pour une tôle mince et 2 pour un fil fin, et
 ρ : est la masse volumique du matériau (kg/m^3).

Pour un circuit magnétique composé d'un empilage de tôles, il convient d'ajouter un coefficient de remplissage inférieur à 1 : une partie du volume du circuit magnétique correspond à la résine qui isole les plaques les unes des autres et qui ne doit pas être pris en compte pour le calcul des pertes.[54]

II.4. L'effet de PILTIER

Ce phénomène a été découvert en 1834 par le physicien français Jean-Charles Peltier. Après avoir relié les extrémités d'un fil de bismuth à un accumulateur par l'intermédiaire de deux fils de cuivre, il a en effet constaté que l'une des jonctions cuivre/bismuth s'échauffait et que l'autre se refroidissait.

Plus généralement, l'effet Peltier se manifeste lorsque l'on soumet deux types de conducteurs à une tension continue. Le sens du déplacement de la chaleur est fonction du sens de circulation du courant dans les conducteurs, ce qui assure la réversibilité du système

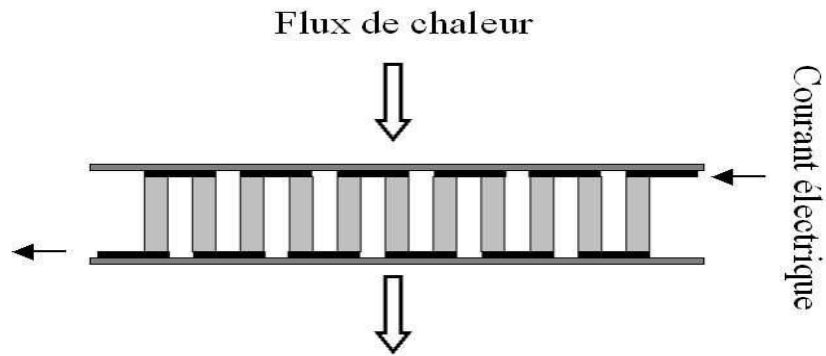


Figure II.3: L'effet de PELTIER

Le coefficient Peltier relatif au couple de matériaux a et b est défini comme la puissance thermique P dégagée ou absorbée par unité d'intensité de courant I . Il s'exprime en volts Π_{ab} est alors défini par [53].

$$(II.7)$$

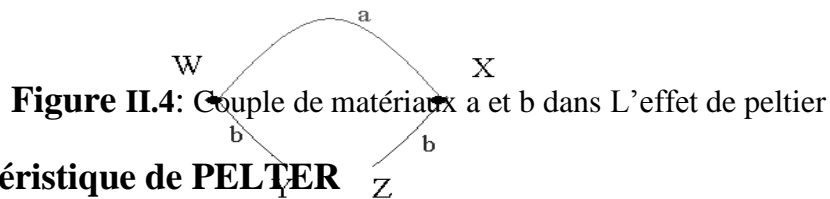
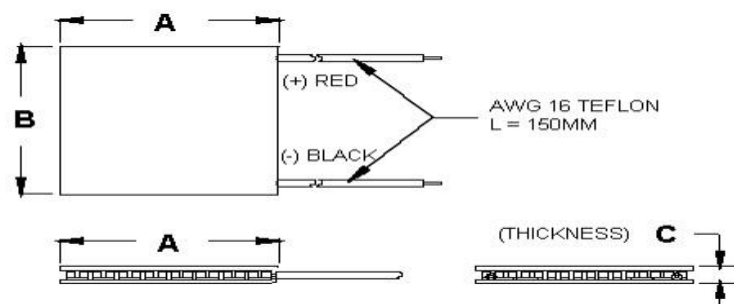


Figure II.4: Couple de matériaux a et b dans L'effet de peltier

II.5. Caractéristique de PELTER

L'illustration schématique de l'effet Peltier utilisé dans notre expérience est présentée dans la figure II.5. Les caractéristiques de l'effet Peltier sont présentées dans le tableau II.2.



Ceramic Material: Alumina (Al_2O_3)
Solder Construction: 138°C, Bismuth Tin (BiSn)

Figure II.5: Illustration schématique de l'effet Peltier utilisé

Tomerature coté chaud	25°C	50°C
Q _{max} (watts)	50	57
ΔT_{max} (°C)	66	75
I _{max} (A)	6,4	6,4
V _{max} (volt)	14,4	16,4
Résistance du module(Ω)	1,98	2,30

Tableau II.1: Caractéristiques de module de Peltier utilisé.

II.6. Caractéristique de Piézo céramique

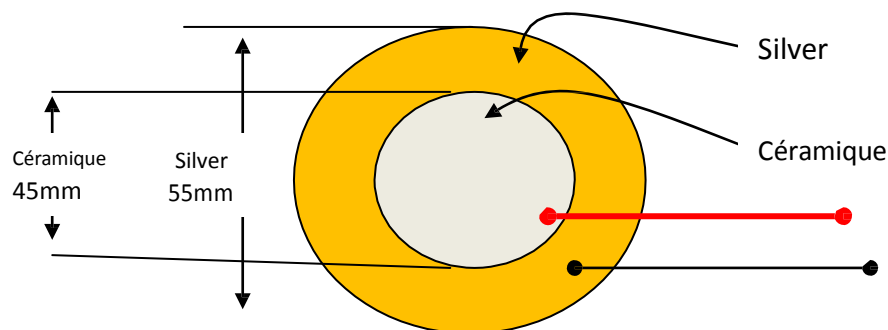


Figure II.6: Céramique piézoélectrique.

L'échantillon utilisé dans notre étude expérimental est de type diaphragme piézoélectrique commercialisé par *RADIOSPEAR Components*. Ce diaphragme est connu sous le nom «BUZZER ». Il est souvent utilisé dans les microphones car il génère un son lorsqu'une tension est appliquée.

Le matériau de base de ce diaphragme est une céramique de type PZT qui présente une propriété de piézoélectricité, ce qui prouve son usage pour la conversion électromécanique d'énergie.

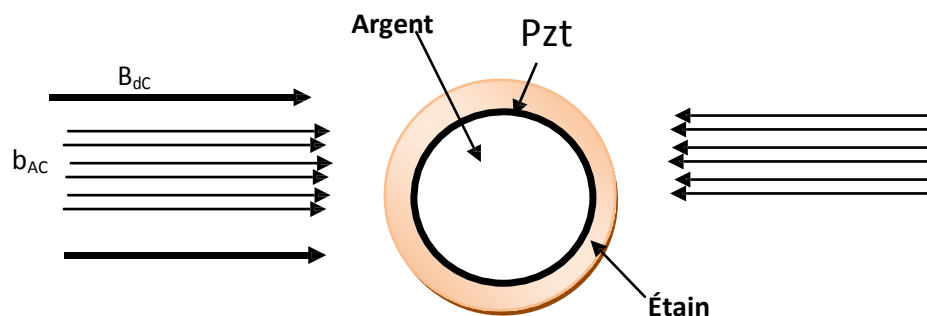


Figure II.7 : .Schéma du système d'étude

Dans cette étude, nous avons montré que le diaphragme piézoélectrique peut être un convertisseur thermoélectrique d'énergie car la céramique, outre la piézoélectricité, elle présente la propriété de pyroélectricité, c'est-à-dire que le Piéze-céramique est capable de générer une tension électrique lorsqu'il est soumis à une variation de température.

Le diaphragme piézoélectrique est composé principalement d'une lamelle céramique collée à un substrat en l'Etain comme le montre sur la figure II. 3 :

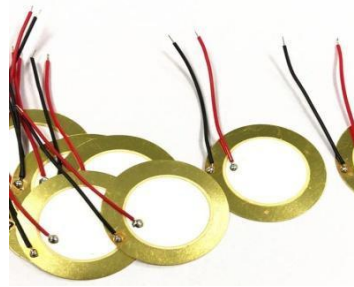


Figure II.8: Piéze-céramique.

Rayon (R)	Épaisseur (th)	Le mode de vibration
27.5mm	500µm	Mode radial (R>>th)

Tableau II.2 : caractéristique de Piéze-céramique utilisé

II.7. Forces de Lorentz dans les électrodes

Lors de l'exposition de la surface des électrodes d'argent et d'Etain au flux magnétique, et selon la loi de Lenz-Faraday, les forces électromotrices apparaissent autour d'anneaux circulaires et concentriques dans le métal, et donc les courants de Foucault sont existés en raison de la nature conductrice d'argent et d'Etain.

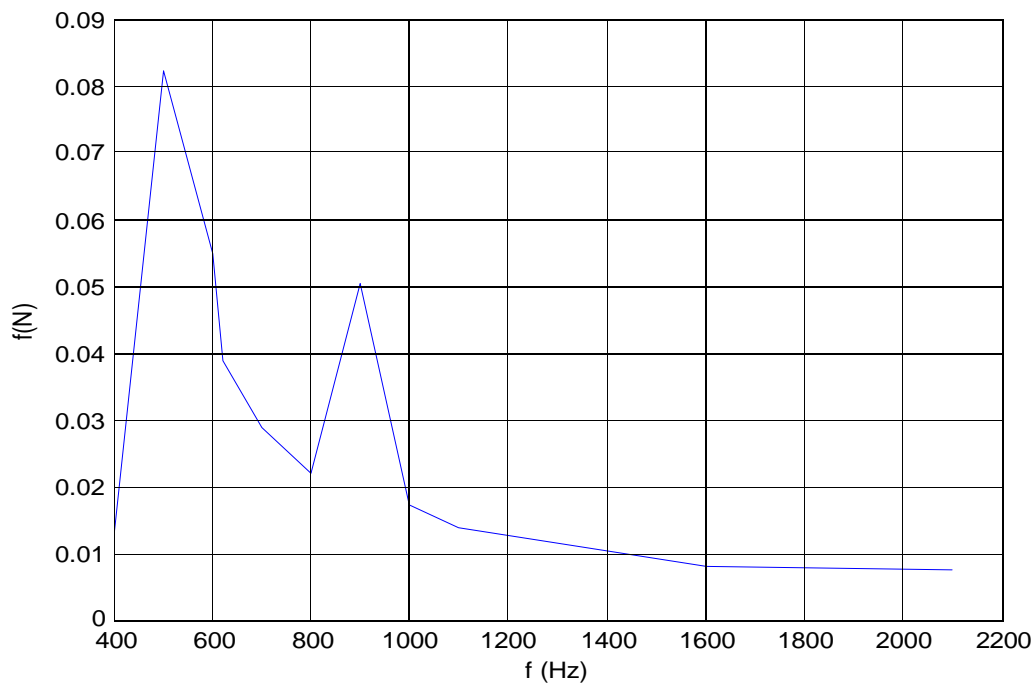


Figure II.9. La contrainte appliquée sur le Piézo-céramique en fonction de la fréquence

Avec $B_{dc} = 200 \text{ mT}$

Afin de donner une expression théorique aux forces de Lorentz et à la contrainte correspondante dans l'épaisseur des électrodes, il est nécessaire de déterminer la densité volumique du courant J associé aux courants Foucault dans les électrodes en argent :

Selon la loi d'Ohm :

→

(II.8)

II.8. Épaisseur de peau

Dans notre étude on peut considérer que la densité de courant ne relie pas avec la direction Z , puisque l'épaisseur de Peau représente la pénétration des courants induits atteindre **0.25 mm**, malgré que l'épaisseur de disque en Argent 0.5 mm, la densité de courant j répartie sur la surface de l'électrode et par conséquent le champ électrique E dépend que r

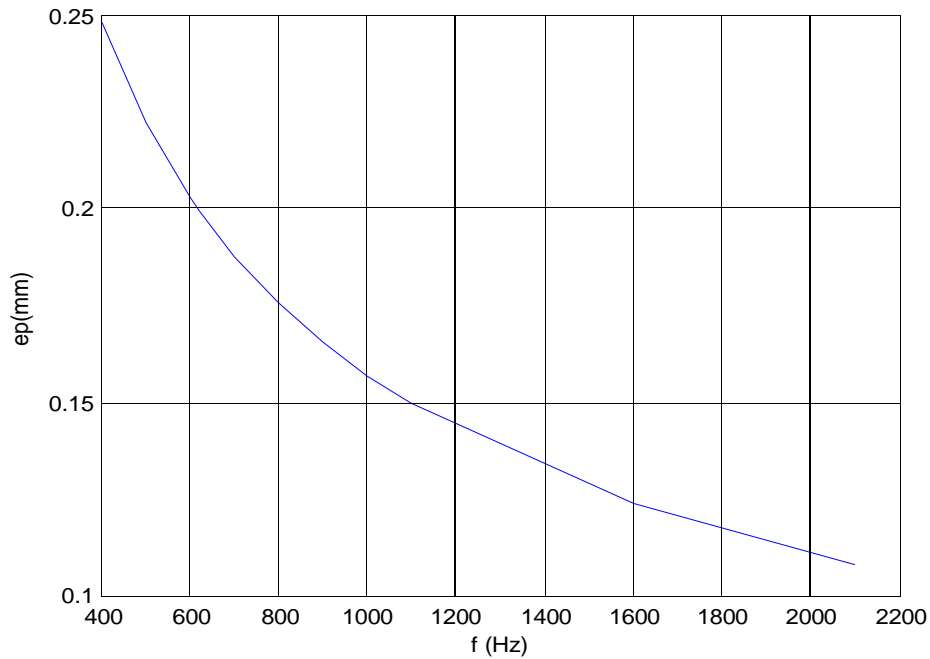


Figure II.10: L'épaisseur de peau en fonction de fréquence de champ magnétique

II.9. Effet de la tension électrique

La limite en tension d'une céramique est une limite au niveau du champ électrique. Si le champ électrique imposé dans la céramique est trop fort, la céramique se dépolarise, elle perd donc ses propriétés piézoélectriques. Cette limite s'explique grâce au cycle de polarisation présenté dans la **Figure I.4**.

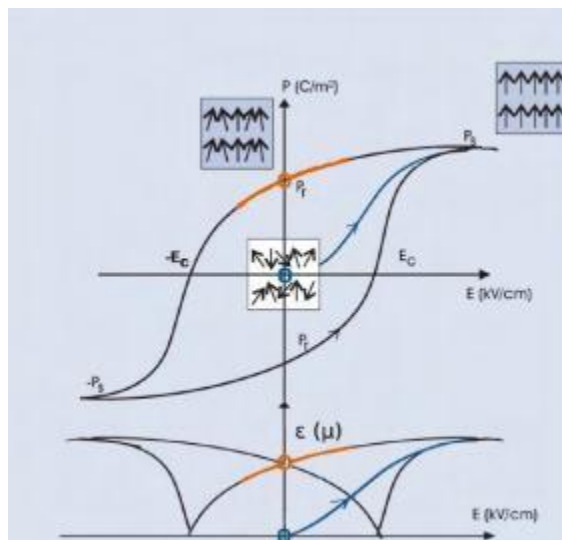


Figure II.11: Polarisation et déformation en fonction du champ électrique (Cycle de polarisation) [18]

II.10. Différents états de polarisation d'une pastille piézoélectrique

Généralement, il existe les cas suivants :

- Aucun champ appliqué : Le matériau à ce stade est globalement isotrope et ne présente pas de couplage piézoélectrique (**figure II.12 (a)**).
- Polarisation partielle : On munit l'élément piézoélectrique d'électrodes et on applique un champ électrique important. P , D et E prennent des valeurs importantes (**figure II.11**) ; au sein du cristal, les ions B^{4+} se déplacent dans les mailles en direction de l'électrode négative. La polarisation augmente rapidement et de façon non linéaire ; dans chaque cristallite, le domaine de Weiss qui correspond à une des 6 directions la plus proche du champ électrique croît, jusqu'à ce que chaque cristallite soit entièrement polarisé dans la même direction. Ensuite la polarisation cesse d'augmenter rapidement ; on dit que l'on est arrivé à saturation, et presque tous les dipôles sont alignés avec le champ électrique (**figure II.12 (b)**). En même temps que ces modifications se produisent, les mailles se déforment, s'étirent légèrement dans la direction du champ et se rétrécissent orthogonalement ; au niveau macroscopique on observe que le matériau s'étire dans la direction d'application du champ et se rétrécit dans la direction orthogonale [19].

-Polarisation rémanente : Si maintenant on cesse d'appliquer un champ électrique et que l'on ramène la différence de potentiel entre les électrodes à $V=0$ (**Figure II.12 (c)**), les ions ne se réarrangent pas dans les mailles de manière uniforme ; la plupart d'entre eux restent orientés vers l'électrode négative. Il subsiste ainsi une polarisation rémanente P_r et un déplacement électrique D ; ainsi qu'une charge libre à la surface des électrodes, qui assure un champ électrique nul [20] : $Q_r = P_r \cdot A$ Où A est la surface des électrodes.

À partir de de cet état d'équilibre le matériau présente aussi une déformation rémanente.

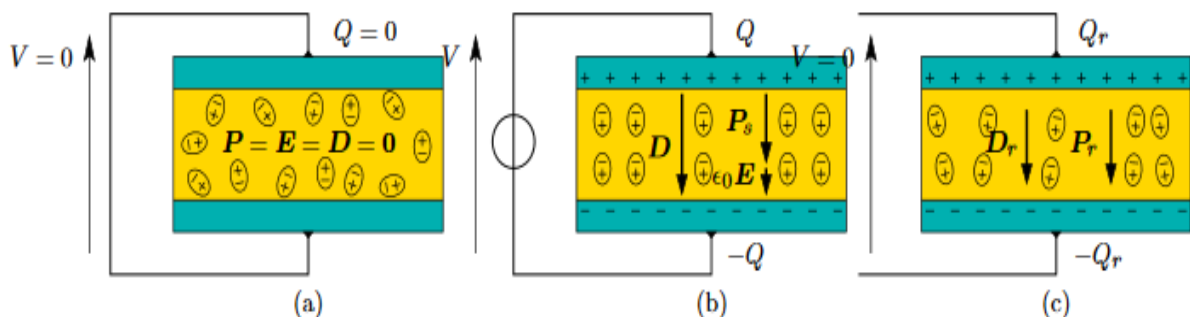


Figure II.12 : Différents états d'une pastille piézoélectrique : (a) état non polarisé ($P=0$) ; (b) état saturé ($P=P_s$) et (c) pastille après polarisation ($P=P_r$) [16]

L'effet piézoélectrique se fait par des petites variations du champ électrique autour de cet état polarisé, on obtient une déformation du matériau (**figure II.13**, partie du graphe en orange); le matériau au niveau macroscopique présente désormais un couplage piézoélectrique. Ce comportement peut s'expliquer par le fait que les mailles sont plus ou moins toutes alignées ;si on observe une maille seule (**Figure II.13**), sous l'application d'un champ électrique dans la direction de polarisation rémanente (souvent appelée direction 3), on observe un étirement dans l'axe de polarisation (ce qu'on appelle le couplage "33") et une contraction dans les directions orthogonales (couplage "31") (**Figure II.13**, au centre). Ces deux couplages sont les plus fréquemment utilisés, car les mêmes électrodes sont utilisées pour la polarisation et pour utiliser l'effet piézoélectrique [11]. Si par contre on parvient à appliquer un champ orthogonal à la direction de polarisation rémanente, ce qui requiert de nouvelles électrodes et éventuellement d'enlever les anciennes, on obtient un cisaillement du matériau (couplage "51" **Figure II.13**, au centre). On peut remarquer que si l'on dépasse certaines valeurs du champ électrique on risque de dépolariiser le matériau, en changeant de branche du cycle de la **Figure II.13**.

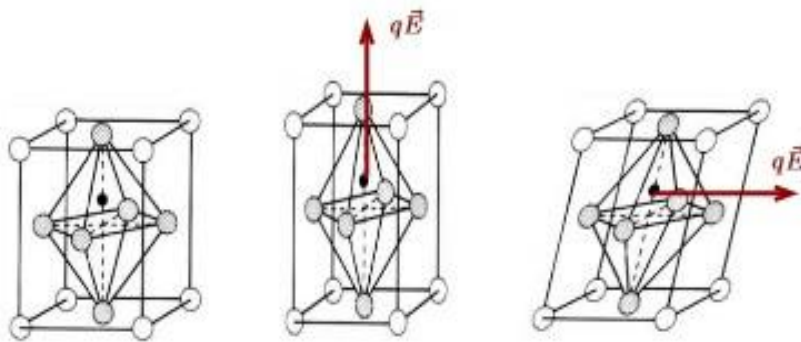


Figure II.13: Efforts sur l'ion positif et déformations de la maille pour un champ nul, parallèle ou orthogonal à la polarisation rémanente

II.11. Modèle de courant de Lorentz

Le courant de Lorentz est résulte à cause la contrainte de Lorentz en fonction de B_{ac} et B_{dc} et la conductivité de L'Argent et le rayon de disque, ainsi le coefficient de couplage d_{31} et la fréquence de résonance f_r est montrer dans [37] est donné par la relation suivant :

$$- \quad (II.9)$$

Où : $w = 2 f_r$

II.12. Contribution de couplage piézoélectrique relié avec le champ électrique

La contribution de couplage piézoélectrique relié avec la contrainte de Lorentz donne $I_{Lorentz}$ et la contribution de couplage piézoélectrique relié avec le champ électrique nous a permis de calculer I_E [37], par la relation suivante :

$$\text{---} \quad (II.10)$$

Le courant I_E est calculé avec $B_{dc} = 0$, c-a-d la déformation S est relié directement avec le champ électrique E a travers le coefficient de couplage d_{31} suivant l'axe perpendiculaire au surface de disque piézo céramique (l'axe Z), par la relation suivant :

$$(II.11)$$

Où ϵ_{33} est la permittivité électrique avec une contrainte constante, et on adopte que $S_1 = S_2$ dans la fréquence de résonance [37]

Talque :

A :surface de disque

μ_{31} :coeffiaient piézo-magnétique

E_3 :champ électrique direction « Z »

d_{31} :coeffiaient de couplage

Q :coefficent de charge mécanique

ϵ_{33} :constant diélectriques avec déformation constant

II.13. Effets de la température

Quand la température augmente, le mouvement thermique des atomes augmente, ce qui a pour effet de diffuser davantage les électrons de conduction, de diminuer leur libre parcours moyen et ainsi d'abaisser leur capacité de transporter les charges électriques. Par conséquent, la résistivité augmente et la conductivité électrique diminue

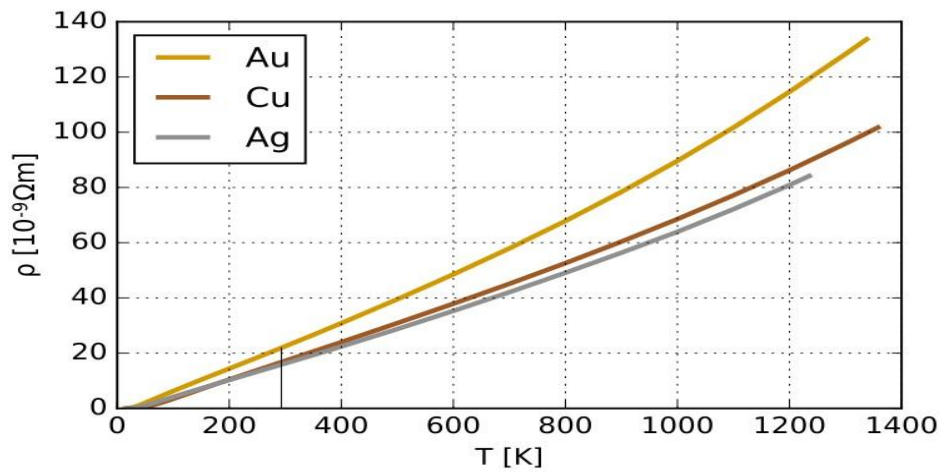


Figure II.14: Comparaison de la résistivité de l'argent avec le cuivre et l'or

À des températures supérieures à 100-200 ° C, la résistivité de la plupart des métaux est approximativement proportionnelle à la température absolue. L'argent est le métal le plus conducteur avec à 0 ° C, L'Étain, l'un des moins conducteurs, a :

L'expression de la conductivité électrique en fonction de température d'un métal donnée par la relation suivant :

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \tag{II.9}$$

Où σ_0 : la conductivité à la température de référence T_0
 : Le coefficient de température [K⁻¹].

	Conductivité électrique à 25 [S/m]	Coefficient de température [K ⁻¹]
Argent		0.0038
Cuivre		0.0039

Tableau II.2: Comparaison de la résistivité de l'argent avec le cuivre et l'or

Les matériaux piézoélectrique étant considérés comme diélectrique donc la conductivité électrique d'un diélectrique, ils sont écrive comme suit :

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \tag{II.10}$$

: L'énergie d'activation expérimentale.

K : Constante de Boltzmann ($K = \dots$).

T : Température.

II.14. Pertes diélectrique en fonction de la température

De manière générale, la permittivité diélectrique des céramiques et des monocristaux PMN-PT et des céramiques PZT chute avec la température. Les PMN-PT à structure quadratique à l'ambiante (PMN-38PT et PMN-42PT) ont la plus forte constante diélectrique à basse température. Des changements de pentes sont visibles à basses températures pour les PMN-PT [56].

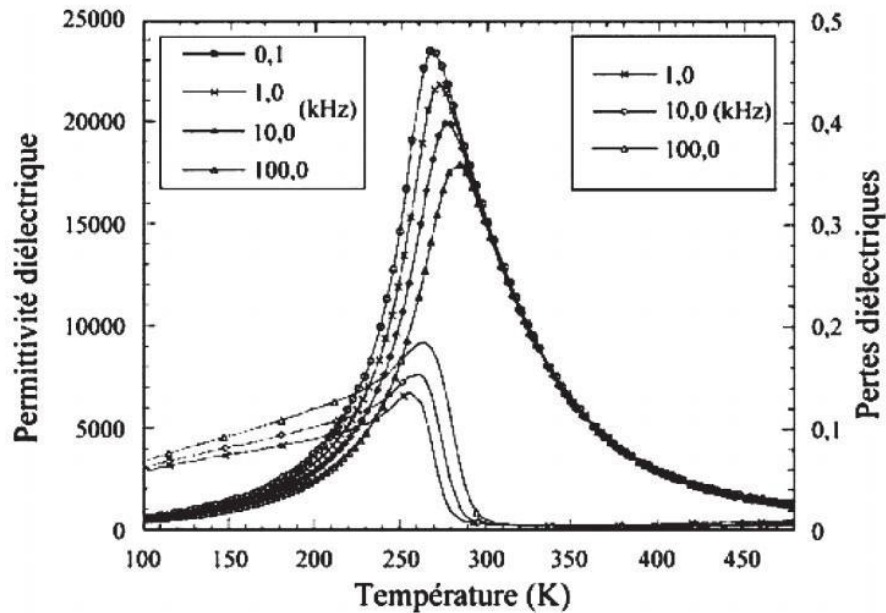


Figure II.15. : Évolution de la permittivité diélectrique et des pertes diélectriques (tg) d'un PMN en fonction de la température pour différentes fréquences

À l'ambiante comme à 10 K, les PMN-PT ont de faibles pertes diélectriques. Toutefois, tous les PMN-PT voient un accroissement plus ou moins brutal des pertes diélectriques et de la permittivité complexe entre 200 K et 50 K. Ce phénomène semble commun aux pérovskites à base de plomb. Les céramiques PZT ont de meilleures constantes de couplage électromécanique k_{31} que les céramiques PMN-PT sur une gamme 300 K – 10 K. En revanche les monocristaux PMN-28PT [001]/[110] et PMN-38PT [001]/[110] ont les plus forts coefficients de couplage k_{31} . La plupart des PMN-PT et PZT ont une constante de couplage k_{31} stable entre l'ambiante et environ 150 – 100 K. A plus basse température il y a une chute de la constante de couplage plus ou moins importante selon le matériau. Lorsque la température baisse, les céramiques et monocristaux PMN-PT et les céramiques PZT subissent un durcissement structural. C'est à dire que leur souplesse (ou compliance) diminue.

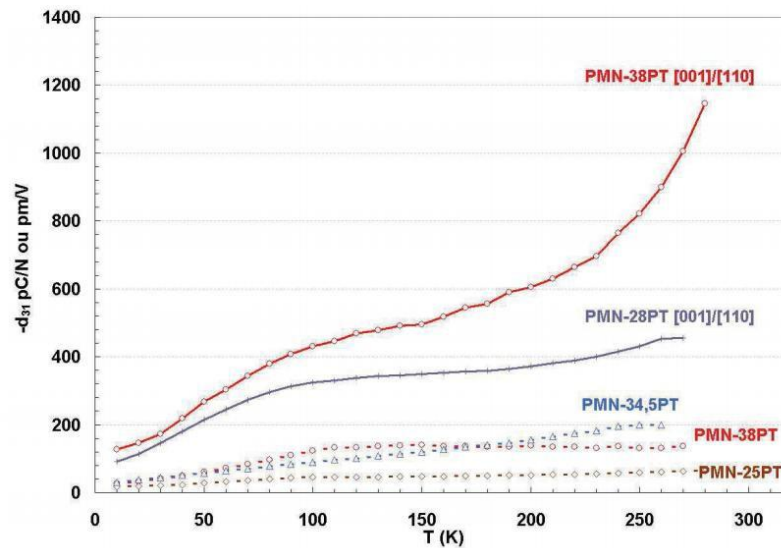


Figure II.16 : Dépendance thermique de la constante de charge d_{31} des monocristaux PMN-28PT et PMN-38PT et des céramiques PMN-25PT et PMN-38PT, de 300 K à 10 K[57]

Comme pour toutes les constantes précédentes, le coefficient piézoélectrique d_{31} décroît avec la température. La seule céramique PMN-PT qui a un d_{31} stable et fort est le PMN-38PT, sa gamme de stabilité est 300 K – 100 K. Les monocristaux ont de très forts coefficients piézoélectriques, mais ils sont peu stables.

Enfin, le PMN-38PT semble présenter à la fois une transition de phase autour de 200 K d'après Singh.[58] passant d'une structure quadratique à une structure monoclinique, et un phénomène basse température pour le moment non explicable.

II.15. Dépendance thermique de la constante de charge d_{31}

Autre conséquence de ce phénomène basse température, il y a une chute du coefficient piézoélectrique d_{31} après 100 K que ce soit pour les monocristaux ou pour les céramiques. La **Figure 72** représente l'évolution du coefficient piézoélectrique d_{31} des monocristaux PMN-28PT [001]/[110] et PMN-38PT[001]/[110], comparé au coefficient piézoélectrique d_{31} des céramiques PMN-25PT, PMN-34,5PT(Mn) et PMN-38PT. Le PMN-38PT [001]/[110] a un coefficient piézoélectrique d_{31} beaucoup plus élevé que le PMN-28PT [001]/[110] à l'ambiante, mais peu stable en température. Notons les points d'inflexions remarquables sur les courbes de permittivité diélectrique. En revanche, à basse température le PMN-38PT [001]/[110] a une constante de charge d_{31} légèrement plus forte que le PMN-28PT [001]/[110] mais l'écart est plus faible qu'à l'ambiante. On retrouve cette convergence des coefficients vers 10 K que l'on remarquait précédemment pour les céramiques. En termes de valeur, les coefficients piézoélectriques et électromécaniques des monocristaux sont très élevés par rapports aux céramiques isotropes.

La Figure II.17 présente l'évolution thermique du coefficient de couplage électromécanique

k_{31} de ces deux monocristaux et de trois céramiques du système PMN-PT. Les deux monocristaux voient leur coefficient de couplage électromécanique k_{31} respectif chuter après 100 K. La chute est plus marquée pour le PMN-28PT [001]/[110]. Le PMN-28PT [001]/[110] possède toutefois un coefficient de couplage électromécanique k_{31} plus stable entre 300 K et 100 K et égale à 70 % contre 90 % pour le PMN-38PT [001]/[110]. Le PMN-28PT [001]/[110] a une constante de couplage k_{31} qui a un comportement proche de PMN-25PT sous forme de céramique. Par rapport aux céramiques, les monocristaux ont un coefficient de couplage électromécanique k_{31} bien plus fort. Ce résultats étaient attendu, du fait de l'orientation cristallographique des monocristaux. Leurs propriétés sont bien plus importantes puisqu'elles ne sont pas moyennées comme dans le cas des céramiques isotropes

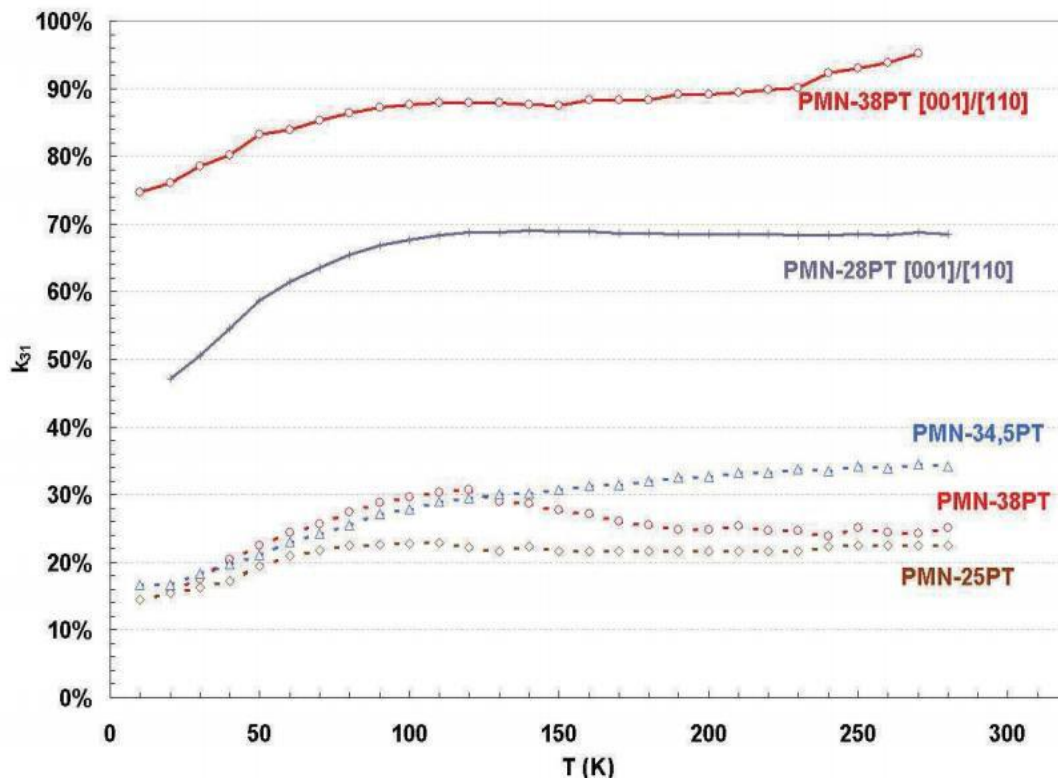


Figure II. 17 : Dépendance thermique de la constante de couplage k_{31} des monocristaux PMN-28PT et PMN-38PT et des céramiques PMN-25PT et PMN-38PT, de 300 K à 10 K

II.16 Conclusion

Ce chapitre nous a permis de connaître la force électromagnétique engendré par la variation de champ magnétique et la force résulte grâce à l'interaction des courants induits et le champ magnétique, ainsi l'effet de la température sur la polarisation de piézo céramique et sur la conductivité électrique des métaux

La mise en vigueur de la contribution de B_{dc} , dans l'identification de courant de sortie avec la température ambiante, et la réponse magnétoélectrique qui sera détecté par la mesure de courant piézoélectrique sera l'intérêt de la partie expérimentale.

CHAPITRE III :

**Etude
Expérimentales**

III.1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre, un banc d'essai expérimental est réalisé au niveau du laboratoire pédagogique à l'université de M'sila, dans but de mesurer le courant magnétoélectrique résulte sur un dispositif magnétoélectrique à l'aide des moyens électronique pour amplifier le signal requis.

Dans la première partie, on a exposé le schéma de principe, et le matériel utilisé et les techniques électriques pour les différents appareils de mesures, ainsi les caractéristiques de Piézo-céramique utilisé dans notre manipulation.

L'effet thermique et leur contribution sur la valeur du courant totale sera l'intérêt de ce chapitre. On termine par des résultats et des interprétations

III.2 Description du protocole expérimental

III.2.1 Travail de préparation

Avant de réaliser le banc expérimental, on étalonne les différents appareils de mesures et affirme leur état (bornes de connexion, afficheur.....) Tel que:

1. Générateur de fonction, faire un essai pour assurer leur fonctionnement correct.
2. Oscilloscope : étalonner les repères de mesures.
3. Étalonnage l'amplificateur.
4. le choix des câbles de connexion fiables.
5. Isoler l'environnement expérimental de toutes les perturbations électromagnétiques externes.
6. Mesure la fréquence de résonance de Piézo-céramique.

III.2.2 description de dispositif magnétoélectrique et montage

Durant toute l'expérience, nous avons mis le matériau étudié entre les deux bobines, la première pour alimenter un courant alternatif variable à l'aide d'un générateur à base fréquence, et la deuxième d'un autre coté attachée également avec un générateur de tension afin de faire produire un courant continue de différents intensités. On mesure la tension aux bornes de Piézo-céramique d'un oscilloscope pour la lecture et l'enregistrement. Un tesla mètre est également utilisé pour mesurer et contrôler le champ magnétique induit.

Le banc expérimentale est constitué deux bobines, la première sert a produire un champ magnétique alternatif a l'aide d'un générateur de fonction (GBF) piloter via

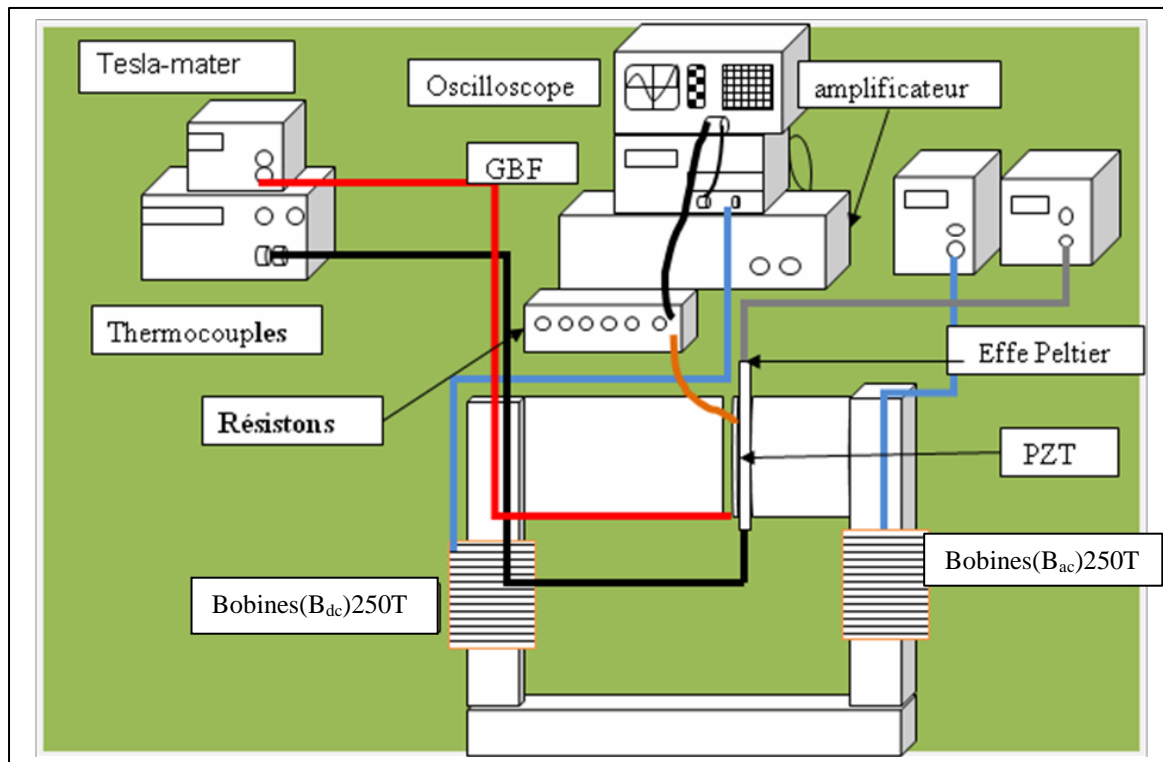
amplificateur de tension , la deuxième bobine alimenter par alimentation stabiliser afin de produire champ magnétique constant .

La variation de la température du Piézo-céramique est assurée par module de l'effet de Peltier alimenté par un générateur de tension continu.

Le piézo-céramique met entre deux bobines, pour mesurer la tension entre ses bornes nous avons utilisé un oscilloscope.

La température a été mesurée et contrôlé par un thermocouple. La figure II.2 montre un vu globale de banc expérimentale

Nous étudions l'effet de B_{dc} et la force sur la réponse magnétoélectrique à deux températures 24 c° et 50 c° schématique détaillée pour les différents appareils utilisés et le



mode de câblage.

Figure II.1 : Illustration schématique du dispositif expérimental

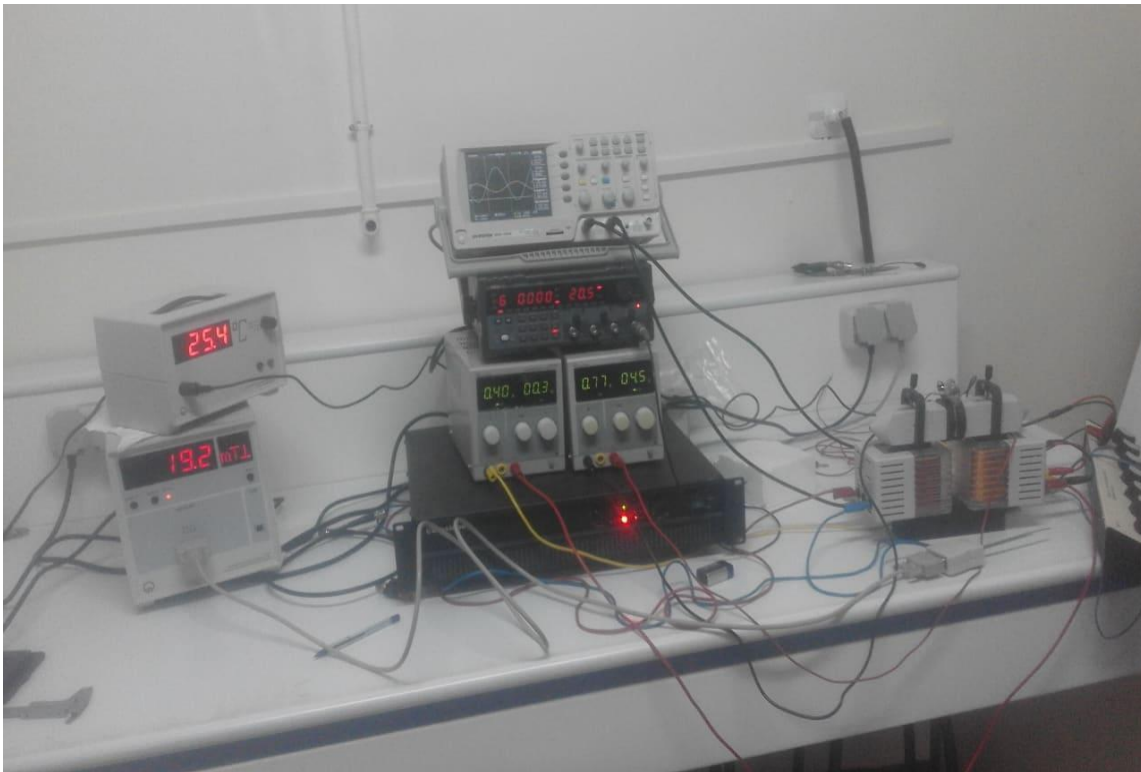


Figure II.2 : Vu de banc d'essai Experimental

III.3. Matériels utilisé

Les différents appareils utilisés dans notre montage sont:

1. Générateur de courant
2. Circuit magnétique a base de Fr-Si
3. Deux Bobines en cuivre avec 250 spires
4. Oscilloscope
5. Tesla mètre
6. amplificateur de courant
7. GBF
8. Module de PELTER
9. Piézo-céramique

III.6. Etude expérimental

III.6.1. Fréquence de résonance

Pour tester la réponse magnétoélectrique de Piézo-céramique utilisé avec la température ambiante on a varié la force électromotrice induite sur le disque en Argent par un champ magnétique variable de pulsation ($2\pi f$), et on a mesuré la tension électique aux bornes de Piézo-céramique par l'intermédiaire des électrodes coller aux surfaces de disque PZT.

L'étude montre que la fréquence de résonance électromécanique est 620 Hz avec le piézo-céramique, la figure III .7 illustre la variation de V_{ME} en fonction de la fréquence.

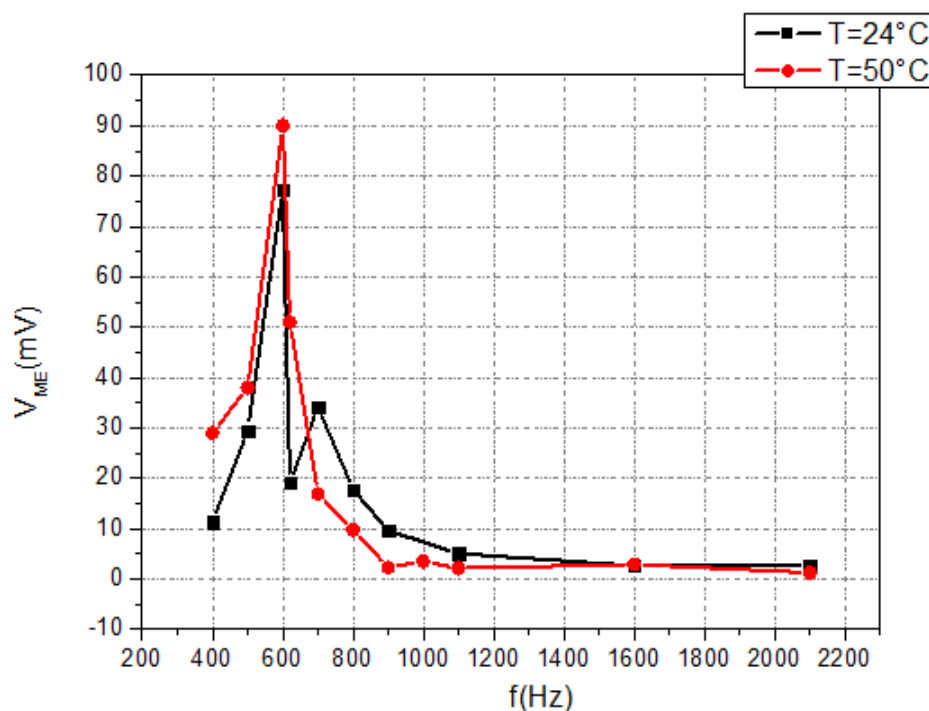


Figure III .3: Variation de V_{ME} en fonction de la fréquence À deux températures 24°C (Courbe noire) et 50°C (Courbe rouge)

A travers la courbe, nous remarquons que la tension augmente en augmentant la température dans le champ moins que la fréquence de la réponse

V. Effet de la température sur la réponse magnétoélectrique

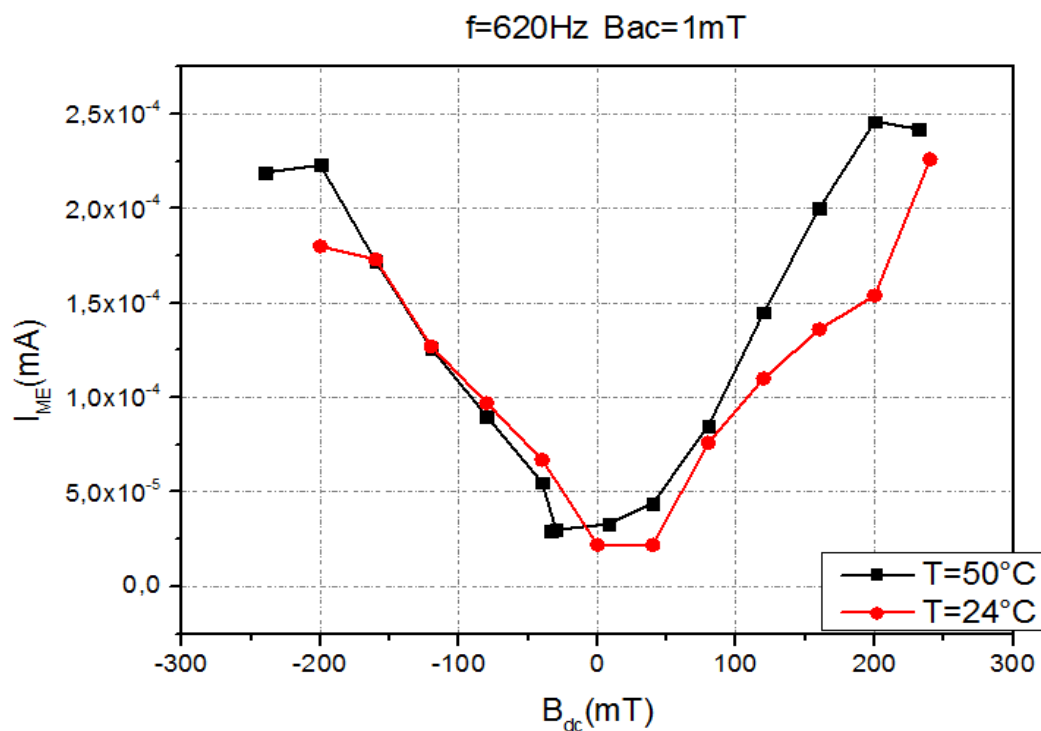


Figure III .5 : variation de I_{ME} (mA) en fonction de B_{dc} (mT) À deux températures 50°C (Courbe noire) et 24°C (Courbe rouge)

A travers la courbe, on note que lorsque la température augmente, la valeur du courant électrique induit par la piézo céramique dans le champ inverse, la valeur de l'autre zone diminue en augmentant la température de la température

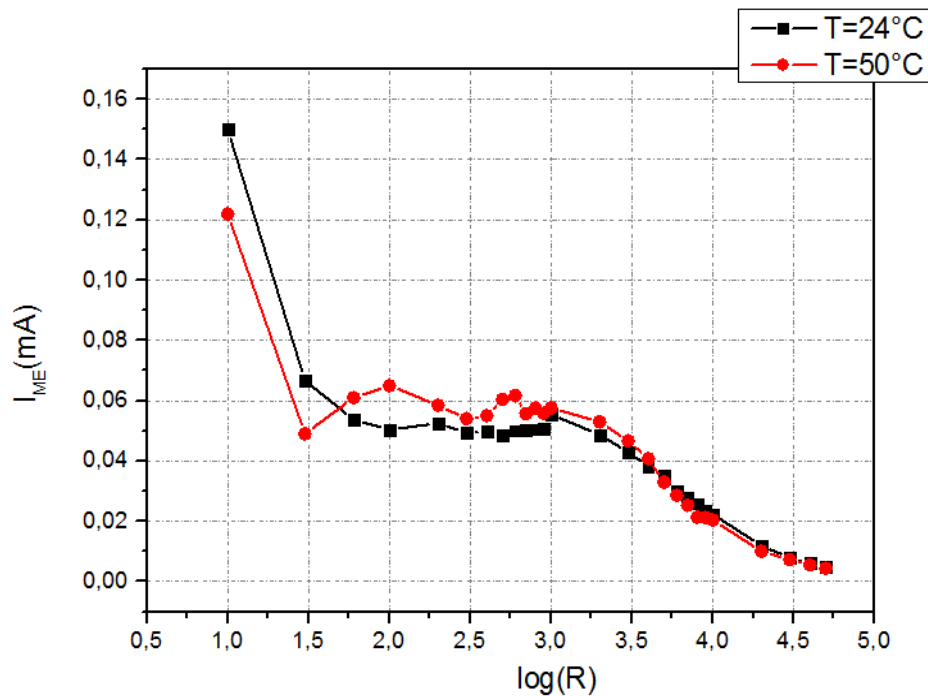


Figure III .4 : Représentations logarithmique du courant magnétoélectrique mesurer en fonction de la résistance relie aux bornes des électrodes de Piézo-céramique À deux températures 24°C (Courbe noire) et 50°C (Courbe rouge) .

D'après les résultats obtenus dans l'expérience, on note que le courant induit par la céramique peso augmente en augmentant la température dans une certaine zone de la résistance liée dans la sortie, où l'on dit que l'énergie peut être récupérée sous la forme d'un joule dans un certain champ de résistance.

VI. Discussions

Une résistance variable R relie au bornes des électrodes de Piézo-céramique aide nous de mesurer le courant magnétoélectrique et comporte aussi une charge électrique, et puisque les grandeurs de courants sont faibles.

Le courant de sortie représenté la réponse magnétoélectrique a travers l'action de la force de Lorentz et la contribution de B_{DC} est évidemment apparaitre dont la construction de courant totale récupérer a partir le dispositif magnétoélectrique, pour ce faire l'étude présenté dans le deuxième chapitre montre la constitution de courant totale, on tient en compte les différents interactions physiques et les paramètres expérimentales.

Les figures III.8 et III.10, montrons les variations de courant magnétoélectrique mesurer en fonction de la résistance variables R , on note que le système comporte comme un condensateur de capacité C relie avec résistance R en parallèle, ce qui donne $U_c=U_R$, tel que U_c la tension au bornes les électrodes de PZT et U_R la tension au bornes la résistance.

La puissance dissipée par l'effet de Joule est donné comme suit :

$$P_j = R \cdot I_{ME}^2 = U_c \cdot I_{ME} \quad \text{III.1}$$

D'après l'éq III.1 les figures précédentes représentent l'énergie dissipée par l'effet de joule à travers le câblage et les différents appareils de mesures .

La représentation a l'aide l'échèle logarithmique nous a permis de voir les petites variations de I_{ME} dans les petits gammes de la résistance R variable , on distingue que, pour les deux valeurs de la température, le courant est diminué lorsque la résistance augmente, et le changement de la résistance provoque une petit augmentation suivi par une diminution qui comporte une perturbation pour les valeur de courant électrique mesure, et on distingue aussi que, les valeurs des courant mesurer ils restes un peu stable pour des autres intervalles de changement de R ; figure III4 .

La figure III.12 montre la variation de V_{ME} en fonction de B_{dc} pour les deux valeurs de températures, ses mesures réalisé a l'aide l'oscilloscope numérique , le valeurs de B_{dc} enlevé a l'aide tesla mètre, le deux valeurs de la température sont assurer a l'aide module de PILTER coller au bord de disque métallique en Argent , un capteur de température était installer pour mesure la valeur de température exacte .

On note qu'il y a une variation considérable de I_{ME} (mA) entre les deux valeurs de la température, ce que éprouve la contribution de la température dans l'identification de la valeur de I_{me} , où le Piézo-céramique soumis a une contrainte de Lorentz.

On peut expliquer cet effet thermoélectrique par les deux points suivant :

1. Une variation de la polarisation rémanente de Piézo-céramique due à la variation de la contrainte de Lorentz résulte à la variation de la conductivité thermique de L'Argent.

Puisque la variation de la température provoque une variation de la conductivité thermique de L'Argent, qui contribuée à la conductivité électrique de L'Argent, ce qui donne une augmentation de la densité de courant électrique engendrée sur le disque métallique par les courants induits (Equation II.9 chapitre II)

2. Une variation de la polarisation rémanente de Piézo-céramique soumis à une contrainte de Lorentz a cause du changement de température, C a d l'interaction entre la polarisation rémanente et la température, ce qu'est appelé l'effet pyroélectrique.

Et lors du chauffage ou du refroidissement un matériau piézoélectrique, une tension électrique est générée, car le changement de température il travail sur la modification des positions de certains atomes dans la structure cristalline

VII. Conclusion

Le présent chapitre montre les étapes d'étude expérimentales, il explique le banc d'essai et le matériel utilisé pour étudier l'effet de la température sur le Piézo-céramique .

L'étude montre que le changement de la température provoque un changement de courant magnétoélectrique, qui comporte une énergie récupérable.

A cet effet, on peut considère que l'origine de la variation de I_{MEa} cause le changement de températures est soit d'origine externe a cause le changement de la conductivité thermique soit d'origine interne résulte a l'interaction entre la polarisation rémanente de Piézo-céramique soumis a une contrainte et la température.

Conclusion général

CONCLUSION GENERALE

Le dispositif magnétoélectrique est l'intérêt de plusieurs recherches puisque elle se compose d'un ensemble des matériaux actifs sensibles AC et DC avec une température ambiante.

Il faut noter que, dans chaque point le champ magnétique (H_{ac}) appliquée, induit des courants ($J(\mathbf{R})$) sur le disque métallique, et par conséquent le couplage magnétoélectrique apparaît à travers la polarisation (\mathbf{P}).

Généralement, les composites magnétoélectrique sont classées en deux catégories :

1. Composites à monophasé tels que manganites hexagonaux ou boracites qui présentent un faible coefficient de couplage avec une température basse [35].
2. Les composites composés

Le dernier groupe est largement étudié, à cause du fort couplage magnétoélectrique avec la température ambiante.

Le présent travail consiste à l'étude de l'effet magnétoélectrique obtenu par le disque en céramique piézoélectrique d'un composite qui se compose de deux couches conductrices et une couche de piézoélectrique. La forme de disque et la force de Lorentz et les contraintes sont engendrées par la densité de courants induits ; sont des facteurs manipulateurs de la réponse magnétoélectrique.

L'étude expérimentale basée sur la mesure d' I_{me} avec la fréquence de résonance $f_r = 620 \text{ Hz}$, on note que I_{me} est varié en fonction de B_{dc} .

L'expérience montre que le courant mesurer I_{me} dans la fréquence de résonance pour toutes les valeurs de B_{dc} , varie en fonction des trois contributions qui sont, courant piézoélectrique dus à la contrainte de Lorentz, courant piézoélectrique dus au couplage inductive de champ électrique, le courant de circuit de montage.

L'expérience montre que la température peut être contribué à la valeur d' I_{me} mesuré, car les valeurs mesures d' I_{me} en fonction de deux valeurs de températures différentes montrent une variation considérable.

Cet effet thermoélectrique peut être à cause d'une variation de la conductivité thermique ou l'interaction entre la polarisation rémanente et le changement de la température.

Et comme perspectives pour des autres travaux :

1. Modéliser mathématiquement la contribution de la température dans la valeur d'*Ime* totale
2. L'explication de l'origine de cette réponse à l'échelle microscopique.
3. Etablir un modèle numérique valide pour approfondir l'étude sur la nature de cette réponse thermo-magnéto-électrique.

Bibliographie

REFERENCE

- [1] Curie, J. & Curie, P., Développement, par pression de l'électricité polaire dans les cristaux hémicèdres à faces inclinées, Comptes rendus des séances de l'académie française des sciences,(1880), 91, 294-295
- [2] Curie, J. & Curie, P., Oeuvres de Pierre Curie, Société Française de Physique, <http://gallica.bnf.fr> (1881), 26-29
- [3] J. Bénard et J. Moreau « Recherches sur l'oxydation des alliages Fer-Nickel aux températures élevées » Rev. Met. Paris ,Volume 47, Number 4, Avril 1950
- [4] Lippman, G., Principe de la conservation de l'électricité, Annales de chimie et de physique, (1881), 24, 145
- [5].Y.matsuda ,M,Yamada .Y,etal.Symmety of High-piezoelectric Pb- Based Complex Perovskites at the morphotropic Phase Bound ry:I.Neutron Diffraction Stidy on Pb(Zn1/3Nb2/3)O3-9%PbTiO3.J.Phys .Soc Jpn ,2002
- [6] Matthieu Cuff. Micro-actionneurs piézoélectriques. Autre. Université de Grenoble, 2011. Français.<NNT : 2011GRENT103>. <tel-00716847>
- [7]. I ,Yahia-Berrouiguet, B Djoubir , « Etude et conception d'une micro poutre pour generer de l'electricite »Thèse, Université ABOU BEKR BELKAID, 2017
- [8]. Julien Ducarne, Olivier Thomas, Jean-François Deü. Optimisation de dispositifs passifs d'atténuation de vibration par shunt piézoélectrique. 8e Colloque national en calcul des structures, CSMA, May 2007, Giens, France
- [9]. Olivier Noblanc« Structures et propriétés électromécaniques de céramiques de Pb (Mg 1/3 Mb 2/3) O3-PbTiO3 : application au contrôle actif de vibrations » Châtenay-Malabry, Ecole centrale de Paris(1994)
- [10] . MrYahia-Berrouiguet Ilyes,MrDjoubir Bachir « Etude Et Conception D'une Micro Poutre Pour Generer De L'electricite » Université ABOU BEKR BELKAID 2017
- [11]. J, YONG , , « Contribution à l'étude d'un capteur de force piézoélectrique résonant à forte raideur pour interfaces haptiques aéronautiques » THÈSE UT3 Paul Sabatier, 2013
- [11]. Louis Carlioz. Générateur piézoélectrique à déclenchement thermo-magnétique. Sciences de l'ingénieur [physics]. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2009. Français
- [11]. Matériaux piézoélectriques, Michel Brissaud – 2007
- [14]. Abdelowahed HAJJAJI « Caractérisation multi échelle et lois de comportement les matériaux ferroélectriques »these doctoura 2007 L N des sciences Apliquées de lyon
- [15]. K. Alilat, Thèse « Matériaux piézoélectriques pour application transducteurs acoustiques de puissance : PIN-PT nanocéramiques et PMN-PT céramiques texturées », Thèse de l'Ecole Centrale Paris (2009)
- [16]. Physik Instrumente. Piezoelectric ceramic products. <http://www.piceramic.com>, 2009
- [17]. Damjanovic., Ferroelectric, dielectric and piezoelectric properties of ferroelectric thin films and ceramics, Reports on Progress in Physics, (1998), 61, 1267-1324
- [18]. Wilkie, W. K., Bryant, R. G., High, J. W., Fox, R. L., Hellbaum, R. F., Jr., A. J., Little, B. D., and Mirick, P. H. Low Cost Piezocomposite Actuator for Structural Control Applications. In SPIE's 7th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials (2000), NASA Langley Research Center
- [19]. Delehelle, Adao. Étude d'un concept innovant d'actionneur électromécanique linéaire à effets magnétique et piézoélectrique en vue d'applications dans le domaine des commandes de vol. PhD, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2008
- [20] . Maurice Bernard Roland Brio Gérard Grange « Étude expérimentale et théorique de la polarisation des PZT durs dopes au niobium » Journal of Solid State Chemistry Volume 31, Issue 3 1 March 1980, Pages 369-376

- [21]. Sodano, H. A., Lloyd, J., and Inman, D. J. An experimental comparison between several active composite actuators for power generation. *Smart Materials and Structures* 15 (2006), 1211–1216.
- [62]. Moheimani, S. O. R. A Survey of Recent Innovations in Vibration Damping and Control Using Shunted Piezoelectric Transducers. *IEEE transactions on control systems technology* 11,4 (2003)
- [23]. Sessler, G. M. Piezoelectricity in polyvinylidene fluoride. *Journal of the Acoustical Society of America* 70, 8 (1981), 1596–1608
- [24]. EU-Directive 2002/96/EC: Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE),” *Off. J. Eur. Union*, 46 [L37]. 24–38 (2003) and “EU-Directive 2002/95/EC: Restriction of the Use of Certain Hazardous Substances in Electrical and Electronic Equipment (RoHS),” *Off. J. Eur. Union*, 46 [L37]. 19–23 (2003)
- [25]. IEEE standard on piezoelectricity, ANSI/IEEE, (1987)
- [26]. Publication and Proposed Revision of ANSI/IEEE Standard 176-1987 "ANSI/IEEE Standard on Piezoelectricity", *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, (1996),
- [27]. THU Trang Nguyen, Frédéric Bouillault " Finite element modeling of magnetic field sensors based on nonlinear magnetoelectric effect "; *Journal of applied physics* 109,084904 , 2011
- [28]. J.L. MESTAS et D. CATHIGNOL « Capteurs de pression pour le contrôle de générateurs d'ondes de choc électrohydraulique » *J. Phys. Colloques* 51 (1990) C2-1287-C2-1290
- [29]. « Auscultation non destructive du chevrete du pont de la Marque (59) » *Journal Revue Européenne de Génie Civil* , Pages 7-24, 2011
- [30]. Grossier, Romain « Étude expérimentale de la ségrégation d'un liquide binaire par une bulle de cavitation acoustique » *I.N. Polytechnique de toulouse* (2006)
- [31]. Eric Sturtzer. Modélisation en vue de l'intégration d'un système audio de micro puissance comprenant un haut-parleur MEMS et son amplificateur. Autre. INSA de Lyon, 2013. Français.
- [32]. Jean-Michel Friedt. Etude et réalisation d'un micro-nano manipulateur avec retour de force : contribution à son intégration dans une plateforme multicapteurs. Autre. Université de Franche-Comté, 2000. Français»
- [33]. Marc Budinger. Contribution à la conception et à la modélisation d'actionneurs piézoélectriques cylindriques à deux degrés de liberté de type rotation et translation. *Vibrations [physics.class-ph]*. Institut National Polytechnique de Toulouse - INPT, 2003. Français
- [34]. L. Gros, Modélisation, conception et caractérisation de pots vibrants magnétostrictif – Application au contrôle actif des vibrations, thèse, 1999
- [35]. Lesieutre, G. A., Ottman, G., and Hoffman, H. Damping as a result of piezoelectric energy harvesting. *Journal of Sound and Vibration* 269, 1 (2004), 991–1001
- [36]. Lefeuvre, E., Badel, A., Richard, C., and Guyomar, D. Piezoelectric Energy Harvesting Device Optimization by Synchronous Electric Charge Extraction. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* 16 (2005), 865–876..
- [37]. B. Guiffard, J.-W. Zhang, D. Guyomar, L. Garbuio, P.-J. Cottinet, and R. Belouadah « Magnetic field sensing with a single piezoelectric ceramic disk: Experiments and modeling » *journal of APPLIED PHYSICS* 108, 094901 _2010_
- [38]. Preumont, A., François, A., Man, P. D., Loix, N., and Henriouille, K. Distributed sensors with piezoelectric films in design of spatial filters for structural control. *Journal of Sound and Vibration* 282 (2005), 701–712.

- [39]. L. Gros, Modélisation, conception et caractérisation de pots vibrants magnétostrictif – Application au contrôle actif des vibrations, thèse, 1999
- [44]. B.D. Cullity, Introduction to magnetic materials, Addison-Wesley publishing company, 1972
- [41]. B. Carlin, Les ultrasons, pp. 222, 1953
- [42]. C. Kittel, Solid state physics, 1996
- [43]. M. Brissaud, Matériaux piézoélectriques: caractérisation, modélisation et vibration, annexe 5, 2007
- [44]. <http://www.cedrat.com/en/technologies/sensors.html>
- [45]. M. Pasquale, Mechanical sensors and actuators, Sensors and Actuators pp. 142–148, 2003
- [46]. L. Gros, Modélisation, conception et caractérisation de pots vibrants magnétostrictif – Application au contrôle actif des vibrations, thèse, 1999
- [47]. B.D. Cullity, Introduction to magnetic materials, Addison-Wesley publishing company, 1972
- [48]. B. Carlin, Les ultrasons, pp. 222, 1953
- [49]. C. Kittel, Solid state physics, 1996
- [50]. M. Brissaud, Matériaux piézoélectriques: caractérisation, modélisation et vibration, annexe 5, 2007
- [51]. A. Bossavit « Le calcul des courants de Foucault en dimension 3, avec le champ électrique comme inconnue. I : Principes » Rev. Phys. Appl. (Paris), Volume 25, Numéro 2, février 1990, P 189 – 197
- [52]. https://fr.wikipedia.org/wiki/Courants_de_Foucault
- [53]. E.B. Penrod et Cho Yen Ho « Théorie mathématique d'un réfrigérateur à effet Peltier et d'un générateur thermo-électrique » J. Phys. Phys. Appl. Volume 21, Numéro S7, juillet 1960
- [54]. Denise Laforgue-Kantzer « Mise en évidence, sur les conducteurs ioniques, d'un effet magnétoélectrique semblable à l'effet Hall » J. Phys. France 25, 840-842 (1964)
- [55]. B. Guiffard, J.-W. Zhang, D. Guyomar, «Magnetic field sensing with a single piezoelectric ceramic disk:Experiments and modeling »
- [56]. B. Dkhil, Rôle des nanostructures chimiques et polaires sur la transition de phase relaxeur-fer roélectrique dans les composites PMN et PMNPT, Thèse Ecole Centrale Paris, 1999
- [56]. Richard E. Mistler, Tape Casting: Theory and Practice, American Ceramic Society, 2006.
- [57] Y. Saito, H. Takao, Journal of the European Ceramic Society 27 pp. 4085–4092 (2007)
- [58] K. A. Singh, D. Pandey, Physical Review B, 74, 024101 (2006)
- [59] K. Z. Rushchanskii, S. Kamba, V. Goian, P. Vaněk, M. Savinov, J. Proklešk, D. Nuzhnyy, K. Knížek, F. Laufek, S. Eckel, S. K. Lamoreaux, A. O. Sushkov, M. Ležaić and N. A. Spaldin, Nature Materials, DOI: 10.1038, pp. 1-6, (2010).
- [60]. Nicu, L., Guirardel, M., Chambosse, F., Rougerie, P., Hinh, S., Trevisiol, E., François, J.-M., Majoral, J.-P., Caminade, A.-M., Cattan, E., and Bergaud, C. Resonating piezoelectric membranes for microelectromechanically-based bioassay : detection of streptavidin-gold nanoparticles interaction with biotinylated DNA. Sensors and Actuators B : Chemical 110, 1 (2005), 125–136

A	Surface de disque	[]
	Induction magnétique continu	[T]
C	Capacité électrique	[F]
D	Déplacement électrique	[]
E	Champ électrique	[]
E_A	Énergie d'activation	[J]
	Force de coulomb	[]
	Force magnétique	[N]
	Force de Laplace	[N]
H	Champ magnétique	[T]
	Champ magnétique continu	[T]
I	Intensité de courant	[A]
J	Densité de courant	[A]
K	Constante de Boltzmann	[J]
P	Polarisation électrique	[C]
	Facteur de qualité mécanique	[]
R	Résistance	[]
S	Coefficient de Seebeck	[V]
S	Déformation mécanique	[]
T	Contrainte mécanique	[N]
T_c	Température de curie	[K]
V_s	Vitesse de déformation radiale	[m]
	Tension pyroélectrique	[V]
b	Induction magnétique	[T]
	Induction magnétique alternative	[T]
c	Raideur	[]
d	Coefficient Piézoélectrique	[]
e	Force électromotrice	[V]
e	Module Piézoélectrique	[]
	Fréquence de résonance	[Hz]
g	Coefficient Piézoélectrique	[]
h	Module Piézoélectrique	[]
i	Courant électrique	[A]
k	Coefficient de couplage électromécanique	-
	Circonférence de la boucle	[]
	Coefficient pyroélectrique	[]
q	Charge électrique	[C]
r	Rayon de disque	[mm]
s	Souplesse	[]
t	Temps	[s]
u	Vecteur de déplacement	[m]
v	Vitesse de charge	[]
	Flux magnétique	[V. s]
	Épaisseur de peau	[m]
	Conductivité électrique	[S]
	Conductivité thermique	[]
σ	Entropie	[J]

ρ	Densité du cristal	[]
	Ratio de Poisson	-
	Coefficient de dilatation thermique	[]
	Pulsation	[rad]
	Pulsation à fréquence de résonance	[rad]
μ	Perméabilité magnétique	[H]
β	Imperméabilité	[]
θ	Température	[c°]
	Température de Curie Weiss	[c°]
ε	Permittivité diélectrique	[]
	Permittivité relative	-
	Permittivité à vide	[]
	Coefficient de Peltier	[w]
	Coefficient de Thomson	[]
	Capacité thermique spécifique	[J]
th	Epaisseur de disque	[μm]
I_{ME}	Courant magnétoélectrique	[A]
V_{ME}	Tension magnétoélectrique	[V]
R	Résistance électrique	[]