



**MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

**UNIVERSITÉ KASDI-MERBAH OUARGLA
FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES
DÉPARTEMENT DE GENIE DES PROCÉDÉS**



MEMOIRE

De fin d'études pour l'obtention du diplôme de MASTER

OPTION : MASTER INGENIERIE DU GAZ NATUREL (I G N)

Présenté par :

BEKKOUCHE Mohammed Nahi

BELKOU Ahmed

Thème:

**Etude des propriétés piézoélectriques d'un nouveau matériau
céramique : $\text{Pb}_{1-x}\text{Sm}_x[(\text{Zr}_{0.51}\text{Ti}_{0.49})_{1-x} - (\text{Fe}_{0.5}^{3+}\text{Nb}_{0.5}^{5+})_x]\text{O}_3$**

Soutenu publiquement le:

Devant le jury composé de :

Mr. Maître. A . TABCHOUCHE

Univ. Ouargla

Président

Mr. Maître. L . HAMZIOUI

Univ. Ouargla

Examineur

Mr. Maître. F . KAHOUL


Univ. Ouargla

Rapporteur

Année universitaire : 2014/2015

Dédicace



Nous rendons  un grand hommage à travers ce modeste travail, en signe de respect et de reconnaissance envers :



Nos pères




Nos mères



Pour tous les sacrifices et leur soutien moral et matériel dont ils ont fait preuve pour que nous réussissions.



Nous le dédions également à 

Mes frères et mes sœurs

En un mot, à toute nos familles, nos amis et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin de notre formation.



Remerciement :

Tout d'abord, Je remercie Allah de m'avoir prêté vie et volonté pour achever ce travail.

Notre profonde gratitude s'adresse tout particulièrement à nos

rapporteur de mémoire .Mr. Fraes KAHOUL, qui nous avons accordé leur confiance dans la réalisation de ce mémoire. Tout en suivant de près notre démarche scientifique, ils nous ont fait partager leur expérience enrichissante dans le domaine de céramiques à base de PZT et nous ont prodigué de précieux conseils et encouragements durant toutes les phases de nos études et pour mener à bien ce travail

Nos chaleureux remerciements à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à notre formation.

Nous remercions aussi l'ensemble des enseignants de

l' Université kasdi-Merbah de Ouargla.

Nos sincères reconnaissances et gratitude à tous nos collègues dans la faculté des sciences appliquées et de l'univers.

Nous voulons accorder nos remerciements les plus francs à tous ceux et toutes celles qui ont été disponibles pour répondre à nos questions et éclaircir nos incertitudes, à ceux qui ont soutenu nos efforts tout au long de ces années, à ceux qui n'ont pas pu le faire mais l'auraient souhaité.

Enfin, pour le soutien très précieux de tous les instants, nous associons à ce travail nos Parents, nos sœurs, nos frères, ainsi que

toute nos familles, nos amis. Merci.

A nos Parents

A toutes nos familles, nos amis...

À tous ceux qui nous sont chers

Résumé

Une série de compositions de céramiques piézoélectrique de type PZT de formule générale $(1-x)\text{Pb}(\text{Zr}_y \text{Ti}_{1-y})\text{O}_3 \cdot x\text{Sm}(\text{Fe}^{3+}_{0.5}, \text{Nb}^{5+}_{0.5})\text{O}_3$ où $x = 0.02; 0.04; 0.06; 0.08; 0.1$ successivement, ont été élaborées par voie solide à une température de frittage $1150\text{ }^\circ\text{C}$. Des mesures piézoélectriques en fonction de la concentration des dopants, la température et la fréquence faite sur l'ensemble de nos échantillons, ont montré que la réponse diélectrique est optimale pour la composition où la concentration des dopants $x = 8\%$ mol (échantillon A₄). A une fréquence de 1kHz et à la température ambiante le facteur de couplage électromécanique planaire K_p , le coefficient piézoélectrique de charge d_{31} , le coefficient piézoélectrique de tension g_{31} , le facteur de qualité mécanique Q_m et le module de Young E de la céramique 0.92PZT–0.08SFN sont 67.10 %, 119 pC/N, 16 mV/N, 326, $8.80 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$ respectivement.

Mots clés: synthèse, PZT, propriétés piézoélectrique, propriétés électromécaniques, propriétés diélectriques, DRX.

Abstract

A series of piezoelectric ceramics compositions of type PZT of general formula $(1-x)\text{Pb}(\text{Zr}_y \text{Ti}_{1-y})\text{O}_3 \cdot x\text{Sm}(\text{Fe}^{3+}_{0.5}, \text{Nb}^{5+}_{0.5})\text{O}_3$ where $x = 0.02; 0.04; 0.06; 0.08; 0.1$ successively, were prepared by solid route at a temperature of sintering $1150\text{ }^\circ\text{C}$. Piezoelectric measurements, depending on the concentration of the doping, the temperature and the frequency for different samples, showed that the piezoelectric answer is optimal for the composition where concentration of the doping $x = 8\%$ mol (sample). With a frequency of 1kHz and the room temperature the electromechanical coupling factor k_p , the piezoelectric coefficient d_{31} , the piezoelectric coefficient of tension g_{31} , the mechanical quality factor Q_m and the Young modulus E of 0.92PZT–0.08SFN ceramics are 67.10 %, 119 pC/N, 16 mV/N, 326, $8.80 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$ respectively.

Keywords: synthesis, PZT, piezoelectric properties, electromechanical properties, dielectric properties, XRD.

Liste des figures

Chapitre I

Figure 1 : Illustration des effets Piézoélectriques d'un matériau en céramique a) Effet direct b) effet inverse	8
Figure:2 Piézoélectricité du Quartz naturel à l'équilibre (a) et avec une force appliquée (b)	9
Figure 3 : Représentation schématique de l'apparition de la piézoélectricité	10
Figure 4 : Microstructure typique d'une surface céramique	11
Figure 5 : briquet piézoélectrique	14
Figure 6 : Un t-shirt pour recharger le portable	14
Figure 7 : La production de l'énergie basée sur la marche	15
Figure 8 : Métro piézoélectrique à Tokyo	16
Figure 9 : Production d'énergie à partir d'une autoroute	16
Figure 10 : Mode radial de vibration d'un échantillon sous forme de disque	20
Figure 11 : Schéma représentant le processus de polarisation	24
Figure 12 : Schéma représentant le principe de la méthode résonance – antirésonance	25
Figure 13 : Schéma équivalent d'un matériau piézoélectrique	26

Chapitre II

Figure 1 : Evolution du facteur de couplage KP en fonction de la température pour l'ensemble des échantillons fritté à 1150 °C	33
Figure 2 : Evolution de KP en fonction du taux de dopant	34
Figure 3 : Evolution du coefficient piézoélectrique de charge d31	

en fonction de la température	35
Figure 4 : Evolution du coefficient piézoélectrique de charge d31	
en fonction du taux des dopants	36
Figure 5 : Evolution de g31 en fonction de la température	37
Figure 6 : Evolution de g31 en fonction du taux des dopants	37
Figure 7 : Evolution de Qm en fonction de la température	38
Figure 8 : Evolution de Qm en fonction du taux des dopants	39
Figure 9 : Evolution du module de Young en fonction de la température	40
Figure 10 : Evolution du module de Young en fonction du taux des dopants	41

Liste des tableaux

Tableau: Les caractéristiques des PZT comparées à celles d'autres matériaux piézo-électriques	21
Tableau: Différentes compositions préparées pour notre étude.	32

Sommaire

Dédicace

Remerciements

Résumé

Liste des figures

Liste des tableaux

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE

Chapitre I

Partie I : Généralités et définitions

Introduction

Les céramiques

La Piézoélectricité

Définition

La piézoélectricité naturelle

Origine de la piézo-électricité

Phénomène de la piézoélectricité

Propriétés générales des PZT

Matériaux piézoélectriques

Applications des matériaux piézoélectriques

L'effet direct

L'effet inverse

Les avantages et les inconvénients des céramiques PZT

Caractéristiques piézoélectrique

La constante piézoélectrique de charge d_{mn}

La constante piézoélectrique de tension g_{mn}

Coefficient de couplage électromécanique K

Coefficient de surtension mécanique Q_m

L'élasticité

1

3

K

Uy

6

6

7

7

8

9

10

10

12

13

13

17

17

18

18

19

19

20

20

21

Caractéristiques physiques d'une céramique PZT

Partie II: Techniques de caractérisation	22
Caractérisations piézoélectriques	23
Les mesures piézoélectriques	23
La polarisation	23
Mesure des facteurs piézoélectriques par la méthode de résonance antirésonance	24
Chapitre II : Résultats et discussions	31
Synthèse	32
Résultats et discussions	32
Etude des propriétés piézoélectriques	32
Le facteur de couplage électromécanique planaire K_p	33
Le coefficient piézoélectrique de charge d_{31}	34
Variation du coefficient piézoélectrique de tension g_{31}	36
Etude des propriétés mécaniques	38
Le facteur de qualité mécanique Q_m	38
Le module de Young E	39
Références bibliographies	42
Conclusion générale	43

Introduction générale

L'origine du mot piézoélectricité dérive du grec "Piézo" qui signifie pression. La piézoélectricité est une propriété basée sur la capacité de certains cristaux de générer un champ électrique lorsqu'ils sont soumis à une pression mécanique externe ; on parle alors d'effet piézoélectrique direct. Par contre, ces mêmes cristaux subissent une déformation sous l'action d'un champ électrique ; c'est l'effet piézoélectrique inverse.

Dans la seconde partie du XXème siècle, une activité de recherche importante a été orientée vers les céramiques titanates de baryum (BaTiO_3) présentant soit des propriétés ferroélectriques et piézoélectriques, soit des propriétés électrostrictives, en vue d'applications dans les dispositifs électromécaniques ou ultrasonores, puis, un peu plus tard, la majorité des travaux concerne des pérovskites à base de plomb les titano-zirconates de plomb $\text{Pb}(\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3$ (PZT). En effet, leurs propriétés sont globalement bien meilleures que celles des cristaux naturels parce qu'ils présentent des coefficients piézoélectriques environ 100 fois supérieurs [1].

Les solutions solides de zircono-titanate de plomb, notamment la composition $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$, appelées PZT, ont connu un essor très important dans le monde de la technologie. En effet, de nombreux articles et de manifestations scientifiques internationaux leur sont consacrés régulièrement. Ces céramiques convertissent jusqu'à 70% de l'énergie mécanique qu'elles reçoivent lorsqu'elles sont déformées en énergie électrique (et réciproquement). Cette propriété exceptionnelle est exploitée depuis plus de 50 ans dans de nombreuses applications technologiques: sonores, sondes échographiques, injecteurs des moteurs diesels, capteurs divers, générateurs d'impulsion, actionneurs, dispositifs de positionnement...etc., dans divers domaines tel que la médecine, l'aéronautique, l'électronique, l'électrotechnique, ...etc [2].

Le présent travail est composé de deux chapitres:

Le premier chapitre est réparti en deux grandes parties :

- La première partie est consacrée à une présentation générale sur le phénomène piézoélectrique et un aperçu général relatif aux piézoélectriques et aux céramiques. Ensuite, nous donnerons quelques notions de base relatives à la piézoélectricité de ces

matériaux en céramiques. Puis, nous passerons aux caractéristiques de la structure pérovskite.

- La deuxième partie, décrit les techniques de caractérisations piézoélectriques employées pendant ce travail.

Le deuxième chapitre nous présentons avec discussion les résultats obtenus de la caractérisation piézoélectrique, en fonction de la température, la fréquence et la concentration des dopants des matériaux étudiés.

Nous terminons enfin cette présente de mémoire par une conclusion générale qui résume les principaux résultats obtenus.

Références bibliographiques

- [1] **L. Hamza**, *étude, élaboration et caractérisation des céramiques piézoélectriques*, Thèse de doctorat, Constantine (2011).

- [2] **E. Boucher**, *Elaboration et caractérisation de céramiques PZT bi-substituées et modélisation non-linéaire de leur comportement en contrainte et en champ électrique*, Thèse de doctorat, Lyon (2002).

Chapitre I

Partie 1

Généralités et définitions

1. Introduction

Une définition très générale d'une céramique pourrait être la suivante : une céramique est un matériau inorganique polycristallin, présentant une structure complexe de grains et de joints de grains.

Le terme générique de céramique recouvre des domaines aussi divers et variés que celui des céramiques traditionnelles (tuiles, briques, carreaux, ...), ou que celui des céramiques dites techniques à applications thermomécaniques ou électroniques (c'est bien entendu ce dernier domaine qui nous intéresse plus particulièrement).

Les matériaux céramiques présentent une caractéristique essentielle par rapport à d'autres matériaux : les atomes ou constituants de leur réseau cristallin sont en général très solidement liés entre eux par des liaisons fortes (ioniques et covalentes).

Les céramiques jouent actuellement un rôle de plus en plus important mettant à profit leurs propriétés électriques, électromécaniques, isolantes et optiques.

Depuis près de 40 ans, les céramiques Zircono-Titanate de Plomb de formulation générale $Pb (Zr_x Ti_{1-x}) O_3$ (PZT) sont étudiées et massivement utilisées comme matériaux actifs dans de nombreuses applications industrielles (condensateurs électriques, écouteurs, microphones, les générateurs d'impulsions, les capteurs et les actionneurs.....), en raison de leurs excellentes propriétés piézoélectriques, diélectriques, électromécaniques remarquables et de leur coût très faible.

Les Zircono-Titanate de Plomb (PZT) sont élaborés à partir d'une composition intermédiaire et d'un mélange binaire de $PbTiO_3$ et de $PbZrO_3$ dans la zone de coexistence appelée "Frontière Morphotropique de phase (FMP)". Ceci est justifié par l'intense activité piézoélectrique de la PZT.

Les propriétés électromécaniques et piézoélectriques des céramiques PZT ont été améliorées par l'adjonction d'additifs.

2. Les céramiques

Le terme céramique échelonne souvent des objets rustiques comme les argiles, les briques et les tuiles mais il signifie plus généralement un solide qui n'est ni un métal ni un polymère.

Une céramique est un matériau solide de synthèse qui nécessite souvent des traitements thermiques pour son élaboration. La plupart des céramiques modernes sont préparées à partir de poudres consolidées (mises en forme) et densifiées par un traitement thermique (le frittage). La plupart des céramiques sont des matériaux polycristallins, c'est à-dire comportant un grand nombre de microcristaux bien ordonnés (grains) reliés entre eux par des joints de grains.

3. La Piézoélectricité

a. Définition

La piézoélectricité, qui littéralement veut dire pression (piézo signifie pression en Grec) et électricité a été expliquée par Pierre et Jacques Curie en 1880. Cady a défini la piézoélectricité de la façon suivante: «polarisation électrique produite par des contraintes mécaniques dans les cristaux se rapportant à certaines classes, la polarisation étant proportionnelle à la contrainte et changeant». Deux effets existent: l'effet piézoélectrique direct défini comme étant l'apparition de charges électriques par l'application d'une pression et l'effet piézoélectrique inverse caractérisé par l'apparition d'une déformation à l'application d'un champ électrique, dont la nature (expansion ou contraction) dépendant de la polarité. L'effet direct peut être utilisé dans les capteurs, tandis que l'effet indirect est à la base des actionneurs.

L'épaisseur de la céramique augmente si le champ électrique appliqué est dans le même sens que le champ électrique de polarisation (P). Si l'on inverse le sens du champ électrique, l'allongement change de signe, c'est-à-dire que l'on passe d'une dilatation à une compression.

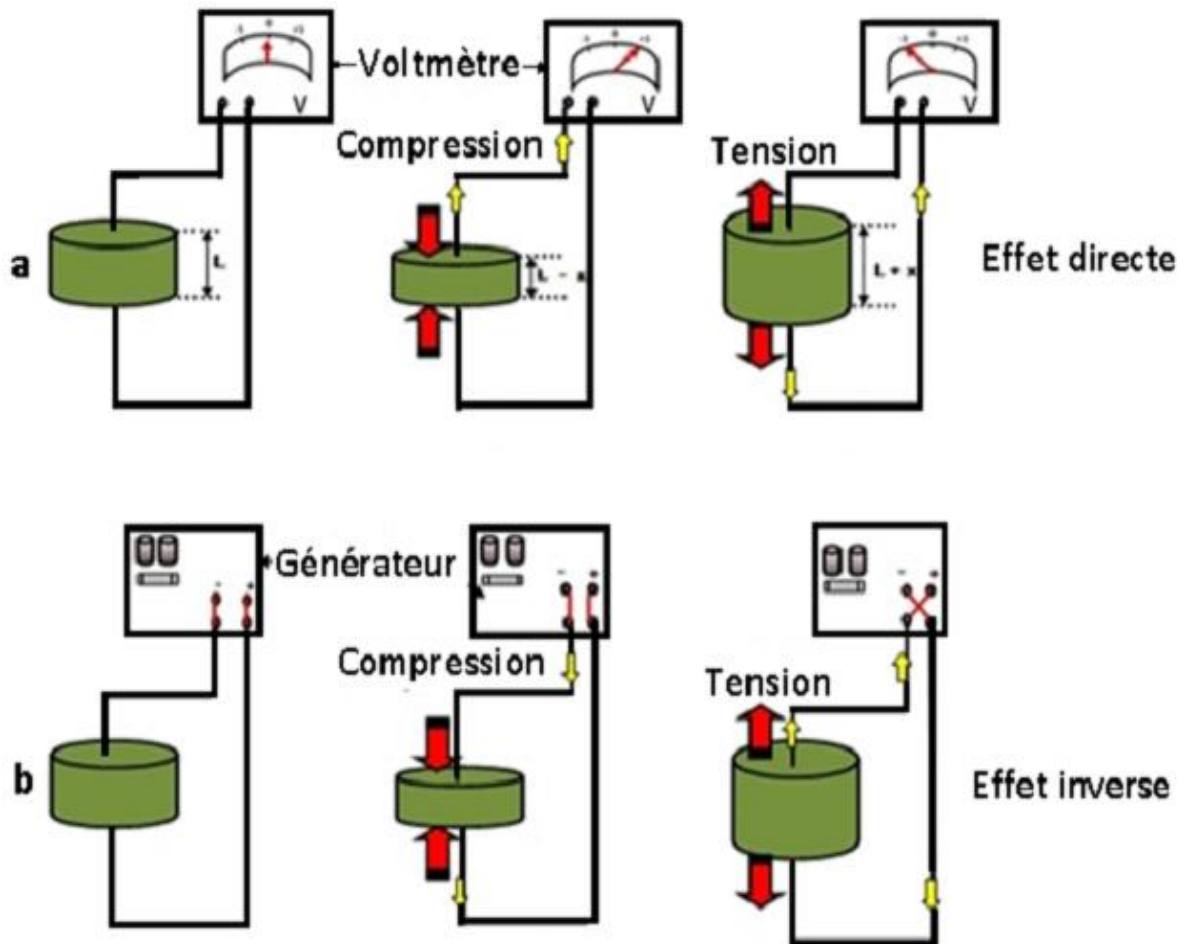


Figure 1 : Illustration des effets Piézoélectriques d'un matériau en céramique:

a) Effet direct b) effet inverse.

b. La piézoélectricité naturelle

Certains cristaux existant naturellement tel que le Quartz sont piézoélectriques. La maille du Quartz est composée d'atomes de Silicium portant une charge électrique positive et d'atomes d'oxygène portant une charge électrique négative. Sur la figure 2, on voit bien qu'en l'absence de déformation, le barycentre des charges positives est confondu avec celui des charges négatives (représenté par le point noir au milieu). Par contre, si l'on applique une force de compression, la maille cristalline se déforme de telle sorte que les barycentres des charges positives et négatives s'écartent. Ainsi, sera créé un dipôle électrique qui, par réaction, va faire apparaître des charges de signes opposés sur les deux électrodes, c'est l'effet

piézoélectrique direct. Au contraire, si l'on crée une différence de potentielle entre les électrodes pour y apporter des charges électriques, c'est alors la maille cristalline qui se déforme pour rétablir l'équilibre des forces électrostatiques, c'est l'effet inverse ou réciproque.

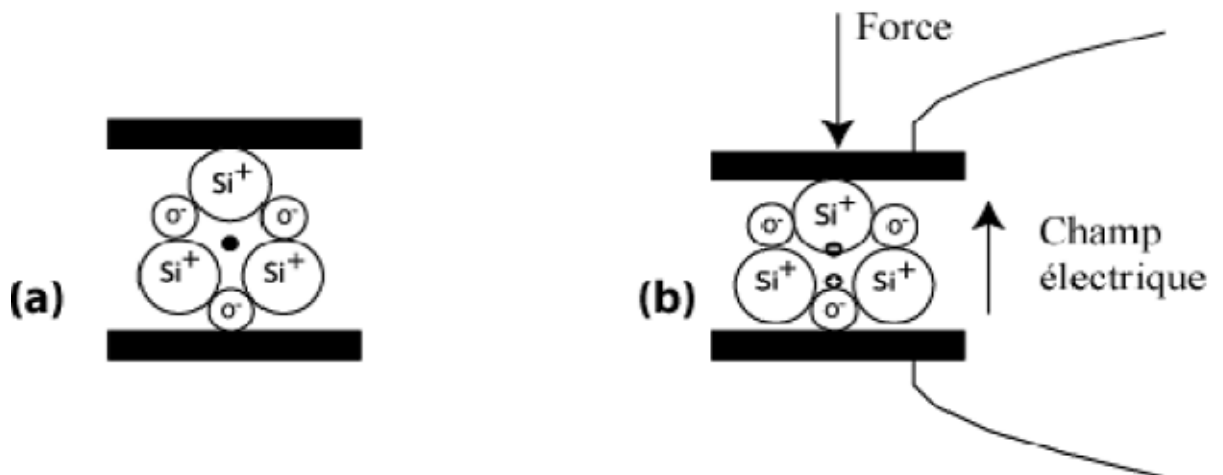


Figure 2 : Piézoélectricité du Quartz naturel à l'équilibre (a) et avec une force appliquée (b).

c. Origine de la piézo-électricité

Dans les solides cristallins, la piézoélectricité est directement liée à la symétrie des cristaux et se manifeste par une polarisation de la maille. Ce moment dipolaire est créé par la séparation du centre de gravité des charges positives et de celui des charges négatives, suite aux déformations sous l'action de contrainte.

Les propriétés de symétrie des cristaux ont une importance fondamentale pour l'existence ou non de la piézoélectricité. Tout corps présentant un centre de symétrie ne peut être piézoélectrique alors que les cristaux ne possédant pas de centre de symétrie peuvent l'être.

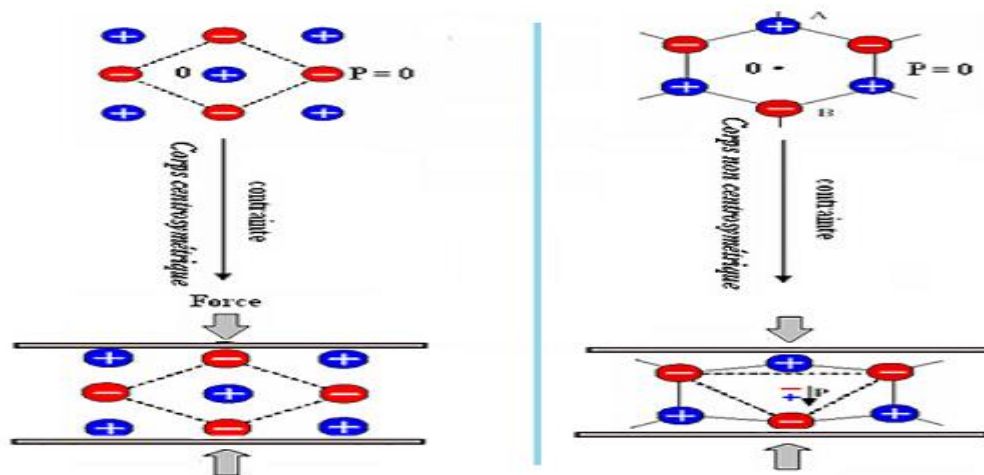


Figure 3 : Représentation schématique de l'apparition de la piézoélectricité.

3. Phénomène de la piézoélectricité

On appelle piézoélectricité, la propriété que possèdent certains matériaux (cristaux, céramiques, polymères ou composites) à pouvoir transformer une énergie électrique en une énergie mécanique. La charge électrique est proportionnelle à la contrainte mécanique imposée : c'est l'effet piézoélectrique direct l'effet réciproque, encore appelé effet inverse, fait que l'application d'un champ électrique externe provoque une déformation mécanique du matériau. Ce sont les frères Curie qui ont observé et expliqué l'effet direct en 1880. Mais c'est Lippmann qui suggéra théoriquement l'effet inverse qui fut confirmé expérimentalement par les frères Curie.

La piézoélectricité peut se définir comme un phénomène de couplage entre énergie élastique et énergie électrique (relation entre deux variables : électrique et mécanique et vice-versa). Ces effets piézoélectriques ne peuvent être observés que sur des isolants.

4. Propriétés générales des PZT

Les céramiques sont des matériaux inorganiques, non métalliques obtenus suite à la mise en forme d'une poudre et un traitement thermique à haute température. Elles sont très dures et très rigides (supportent bien des tensions très élevées), elles résistent à la chaleur, à l'usure, aux agents chimiques et à la corrosion. Leur principale inconvénient est la fragilité (se casse facilement sous une sollicitation).

Les propriétés générales des céramiques découlent des propriétés de leurs liaisons chimiques, de leur état (cristallin ou amorphe) et de leur microstructure.

a. Liaisons chimiques

Les éléments qui entrent dans la composition des céramiques sont liés entre eux par des liaisons fortes, covalentes ou ioniques, et forment des composés hétéro polaires (anion et cation). Les propriétés générales qui découlent de ces liaisons sont :

- ✓ Mauvaise conductivité de l'électricité et de la chaleur par les céramiques. Donc on les utilise comme diélectriques et comme isolants thermiques.
- ✓ Les céramiques ont des températures de fusion très élevée due à la forte stabilité des liaisons ioniques et covalentes. Donc on les utilise largement comme matériaux réfractaires.

b. Microstructure

La plupart des céramiques sont des matériaux polycristallins, c'est à dire comportant un grand nombre de microcristaux bien ordonnés (grains) reliés par des zones moins ordonnées (joints de grains).

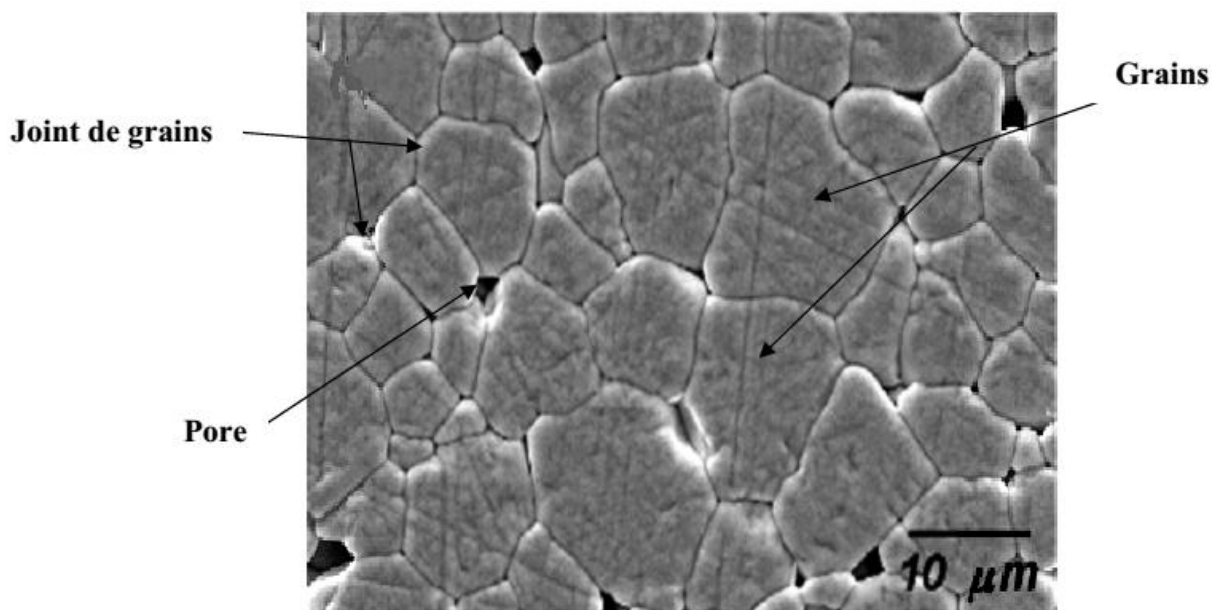


Figure 4 : Microstructure typique d'une surface céramique.

5. Matériaux piézoélectriques [1]

Rapidement après la découverte de la piézoélectricité, plusieurs matériaux ayant cette caractéristique ont été trouvés. Néanmoins des nouveaux matériaux continuent à apparaître, toujours avec des meilleures caractéristiques et performances. Maintenant les matériaux, leurs présentations, leurs tailles, peuvent s'adapter à leurs applications pratiques et non l'inverse comme on le faisait il y a quelques années. C'est pour cela que les innovations dans le domaine de la piézoélectricité sont à l'ordre du jour.

Les matériaux piézoélectriques peuvent être soit des cristaux ou matières minérales naturelles, soit des créations de l'homme.

- Cristaux naturels
 - ❖ Berlinite
 - ❖ Quartz
 - ❖ Topaze
- Céramiques et cristaux fabriquées par l'homme
 - ❖ Phosphate de gallium
 - ❖ Titanate de barium
 - ❖ Sodium tungstane
 - ❖ Lithium niobate
 - ❖ Titanate zirconate de plomb nommé PZT par ses sigles en anglais. Ses propriétés piézoélectriques sont efficaces pour fabriquer des outils de type capteurs ou actionneurs. Les plaques piézoélectriques que l'on a achetées aux Etats-Unis sont en PZT.
 - ❖ Sodium potassium niobate
 - ❖ Ferrite de bismuth
 - ❖ Titanate de bismuth
 - ❖ Polymères (Substance composée de macromolécules comme polyvinylide fluoride)

La performance des différents matériaux est différente, leur prix et accessibilité sont tout à fait inégaux. La plupart des matériaux sont encore très rares, et par conséquent, trop chers. Il n'y a que quelques entreprises qui les fabriquent et distribuent. La piézoélectricité reste encore un domaine qui se renouvelle chaque jour mais qui manque de

recherche et d'investissement. C'est pour cela que dans notre pays presque tous les matériaux piézoélectriques artificiels peuvent être considérés comme inexistant.

6. Applications des matériaux piézoélectriques [1]

a. L'effet direct

✓ Capteurs

La première application industrielle et la plus présente de nos jours des piézoélectriques est pour des capteurs, ils sont appelés transducteurs piézoélectriques. Grâce à la capacité des piézoélectriques de créer une tension dès qu'une force leur est appliquée, ils sont utilisés pour une grande variété de capteurs :

- **Accéléromètres** : Un cylindre avec une bille et un capteur piézoélectrique sur chaque base permet de détecter le mouvement et la vitesse sur un axe. Plusieurs accéléromètres sont placés dans les systèmes pour pouvoir capter le mouvement sur tous les axes comme dans la manette de la console de jeux vidéo Wii ou dans quelques systèmes de sécurité routière.
- **Capteurs de vibration** : des capteurs piézoélectriques sont utilisées pour capter les vibrations qui sont aussi une action mécanique comme sur des systèmes anti cambriolage des voitures et le phonographe.
- **Capteurs de vibrations sonores** : la première application, comme beaucoup de systèmes innovants, a été développé par l'armée. Un système qui capte des vibrations ultrasonores créés par lui même, grâce à une plaque de quartz, peut faire une image d'un environnement invisible ou lointain (en calculant le temps d'aller-retour de l'onde émise puis réfléchi) :c'est le premier sonar. De plus, ces capteurs sont utilisés pour des microphones.
- **Capteurs d'impact** : Des transducteurs sont placées dans des systèmes où l'on veut calculer la force appliquée et le moment de son application comme dans des batteries (instrument de musique) électriques ou des capteurs de proximité comme dans le métro japonais ou les escaliers électriques qui s'actionnent uniquement quand les matériaux envoient un signal de présence d'un utilisateur.

✓ Production d'énergie

A petite échelle

- Le briquet piézoélectrique : le briquet piézoélectrique est un exemple de création d'un arc. En appuyant sur le bouton, l'élément piézoélectrique reçoit une pression. L'élément piézoélectrique transforme l'énergie mécanique en énergie électrique.

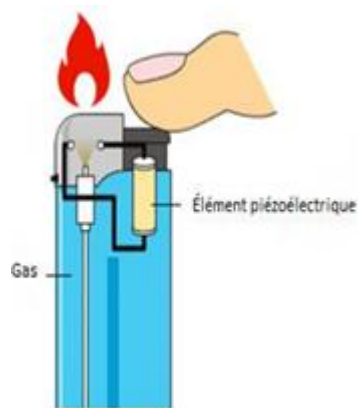


Figure 5 : briquet piézoélectrique.

- Un t-shirt pour recharger le portable : la compagnie téléphonique Orange profite chaque année du festival de musique de Glastonbury pour lancer un produit innovant permettant de recharger son téléphone portable. Ce t-shirt nommé « Sound Charge » est équipé d'un dispositif piézoélectrique permettant de recharger son téléphone portable à partir du son émis lors du festival.



Figure 6 : Un t-shirt pour recharger le portable.

- La production de l'énergie en marchant : il existe aussi des chaussures pour produire de l'énergie en marchant. Un élément piézoélectrique est introduit dans les semelles d'une paire de chaussures. L'armée américaine a déjà utilisé ce système pour recharger tous les appareils électriques tels que les walkies-talkies, radios, GPS, etc. Afin de rendre les soldats électriquement indépendants.



Figure 7 : La production de l'énergie basée sur la marche.

Pour rendre le trajet lumineux et clair quand il fait noir, il existe des chaussures de course équipées de polymères électroluminescents alimentés par des générateurs piézoélectriques. Conçus par le designer industriel mexicain Alberto Villarreal, ces chaussures aident les sportifs à éclairer leurs chemins sans avoir à transporter quoi que ce soit.

A grande échelle

Même si cette source d'énergie n'est pas encore massivement exploitée à grande échelle, il existe des endroits où l'on commence à utiliser.

- Parking piézoélectrique : dans la ville de Gloucester, en Angleterre, un parking de grande surface commerciale a été équipé de matériaux piézoélectriques. Cette installation permet de récupérer de l'énergie à chaque passage de véhicule et, ainsi, d'alimenter les caisses de paiement du supermarché.

- Métro piézoélectrique à Tokyo : de même, dans le métro de Tokyo, le sol des stations sont équipés par des plaques piézoélectriques qui produisent de l'énergie au passage des centaines de passagers descendant des wagons.



Figure 8 : Métro piézoélectrique à Tokyo.

- Une autoroute électriquement autonome : une recherche en Israël consiste à placer des matériaux piézoélectriques sous la surface de la route pour que l'énergie mécanique des voitures puisse être capturée et transformée en électricité. Les routes deviennent donc des sources de production d'énergie.



Figure 9 : Production d'énergie à partir d'une autoroute.

b. L'effet inverse

✓ Les générateurs de vibrations

Une autre application importante dans l'industrie est celle de l'effet piézoélectrique inverse, grâce à la capacité de vibrer des matériaux piézoélectriques lorsqu'un courant leur est appliqué.

- Générateurs de son audible : Des transducteurs piézoélectriques sont utilisées aussi pour produire du son, ils sont utilisés dans des écouteurs normaux ou flexibles, des buzzers, même dans des systèmes qui ne peuvent être écoutés que quand on les mord.
- Générateurs d'ultrasonores: Utilisées dans des appareils chirurgicaux.
- Horloges : Dans les montres, les chronomètres, un cristal de quartz vibre toujours à la même fréquence et cette vibration est mesurée et permet d'indiquer le temps écoulé.

7. Les avantages et les inconvénients des céramiques PZT

Les avantages des céramiques PZT peuvent être regroupés comme suit:

- Les céramiques PZT sont caractérisées par le coût abordable et peuvent être obtenues sous différentes formes.
- Leur température de Curie, d'environ 320 °C, permet de les utiliser à des températures très supérieures à celles du titanate de baryum.
- Les céramiques PZT possèdent un coefficient de couplage électromécanique k_p très élevé par rapport à d'autres matériaux piézo-électriques. Cela nécessite une application d'une énergie électrique moyenne pour obtenir une énergie mécanique.
- Leurs pertes électriques sont faibles, elles ne s'échauffent donc presque pas et leur rendement acoustique est très bon.
- Les PZT peuvent supporter des déformations beaucoup plus grandes que la plupart des autres céramiques, c'est pourquoi on peut obtenir la même puissance, avec un cristal de plus faible volume.

A cause des tous ces avantages, le PZT (titanate de zirconate de plomb) est très utilisé dans les équipements ultrasonores du commerce. De plus, il peut être façonné à volonté, que ce soit sous forme de disques, de tubes ou de blocs.

Le principal désavantage d'une céramique PZT réside dans son impédance acoustique très élevée par rapport à d'autres matériaux piézo-électriques. Elles sont donc plus difficiles à coupler aux autres matériaux.

8. Caractéristiques piézoélectrique

Le phénomène piézoélectrique se manifeste par la conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique et réciproquement.

Trois types de coefficients interviennent :

- Des coefficients purement électriques.
- Des coefficients purement mécaniques.
- Des coefficients mixtes qui traduisent le couplage entre les grandeurs électriques et les grandeurs mécaniques.

a. La constante piézoélectrique de charge d_{mn}

Elle indique la charge produite par une force d'unité où la déformation produite par un potentiel donné.

❖ Effet direct (à champ constant)

$$d_{mn} = \frac{\text{densité de charge sur l'électrode normale à l'axe } m}{\text{contra int e suivant l'axe } n} \quad (\text{C/N})$$

❖ **Effet inverse (à effort constant)**

$$d_{mn} = \frac{\text{déformation relative suivant l'axe } n}{\text{champ électrique suivant l'axe } m} \quad (\text{m/V})$$

b. La constante piézoélectrique de tension g_{mn}

Elle indique le gradient de potentiel causé par un effort donné, ou réciproquement la contrainte produite par une densité de charge donnée.

❖ **Effet direct (à induction constante)**

$$g_{mn} = \frac{\text{champ électrique suivant l'axe } m}{\text{contrainte suivant l'axe } n} \quad (\text{V.m/N})$$

❖ **Effet inverse (à effort constant)**

$$g_{mn} = \frac{\text{déformation relative suivant l'axe } n}{\text{densité de charge sur l'électrode normale à l'axe } m} \quad (\text{m}^2 / \text{C})$$

Les deux indices des coefficients piézoélectriques (m, n) désignent respectivement la direction de l'axe de polarisation et celui de la déformation de l'échantillon [2].

c. Coefficient de couplage électromécanique K

Les céramiques piézoélectriques sont également caractérisées par un coefficient de couplage électromécanique **K**. Il caractérise la qualité de la conversion électromécanique dans le matériau piézoélectrique [3] et donc l'aptitude de l'oscillateur à transformer l'énergie électrique en énergie mécanique.

$$k^2 = \frac{\text{énergie transformée}}{\text{énergie fournie}}$$

Ce coefficient varie en fonction de la géométrie des matériaux et de leur mode de vibration.

Les coefficients K_p , d_{31} , g_{31} sont calculés à partir des courbes d'admittances en fonction de la fréquence.

Dans notre cas le mode de vibration est radial (figure 10) et la céramique est sous forme d'un disque, alors les coefficients utiles sont : K_p , d_{31} , g_{31} .

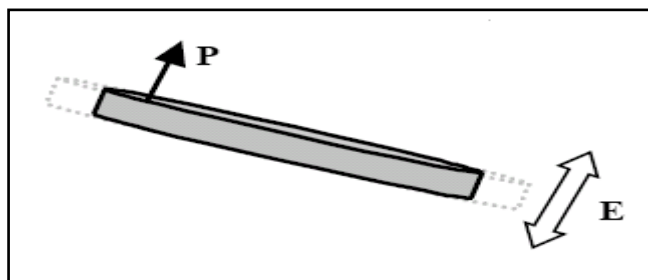


Figure 10 : Mode radial de vibration d'un échantillon sous forme de disque.

d. Coefficient de surtension mécanique Q_m

Le coefficient de surtension mécanique (Q_m), appelé aussi facteur de qualité mécanique traduit les pertes mécaniques dans la céramique. Ce facteur est défini comme le rapport de l'énergie emmagasinée pendant une période sur l'énergie dissipée pendant une période.

$$Q_m = 2\pi \frac{\text{énergie maximale emmagasinée pendant une période}}{\text{énergie dissipée pendant une période}}$$

e. L'élasticité

Le module de Young (module d'élasticité) traduit la rigidité d'un matériau, c'est-à-dire la propriété qu'à un matériau à se déformer de façon élastique réversible sous l'action d'une contrainte, sa formule est donnée par la relation :

$$E = (\text{Contrainte} / \text{Déformation}) \quad (\text{N/m})$$

La grandeur de module de Young dépend de l'intensité des liaisons atomiques.

9. Caractéristiques physiques d'une céramique PZT

Le tableau suivant présente quelques caractéristiques des PZT comparées à celles d'autres matériaux piézo-électriques. Le PZT est apprécié pour ses meilleures propriétés piézo-électriques par rapport aux autres composites. Il constitue la majorité des matériaux.

Tableau 1 : Les caractéristiques des PZT comparées à celles d'autres matériaux piézo-électriques.

	Quartz	LiNbO ₃	BaTiO ₃	PZT
Densité (g. cm⁻³)	2,5	4,4	5,7	7,5
Constante diélectrique	4,5	29	1200	200-4000
Constantes piézoélectriques				
d_{33} (C.N⁻¹).10⁻¹²	2	6	180	40-750
g_{33}(V.m.N⁻¹).10⁻³	50	20	17	15-40
Température de Curie	573	1210	130	<350
Coefficient de couplage k_t (%)	10	10	40	40-70

Partie 2

Techniques de caractérisation

1. Caractérisations piézoélectriques 10

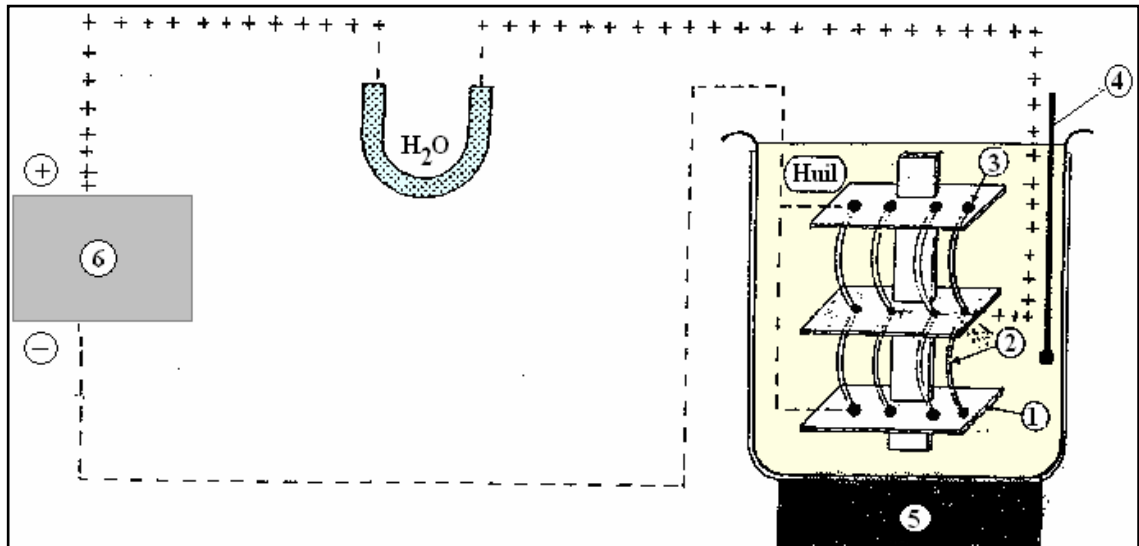
Avant de commencer les mesures, il faut tout d'abord réaliser une étape importante qui est l'argentage. En fait, afin d'assurer un meilleur contact avec les électrodes (appareil de mesure), les pastilles sont métallisées par une couche mince de pâte d'argent sur les deux faces. Cette pâte est préparée selon la composition des constituants suivants [4] : Ag_2O (96.3%), Bi_2O_3 (1.5%), Colophane (2.2%), en ajoutant l'eau bidistillée. Après séchage, les pastilles métallisées vont subir une calcination à 750°C pendant trente minutes pour assurer la fusion et l'accrochage de la pâte. Le contrôle de vitesse est nécessaire afin d'éviter le bullage, la carbonisation des composants organiques de la pâte d'argent et avoir des pastilles non poreuses.

2. Les mesures piézoélectriques

a. La polarisation

Avant de faire les mesures piézoélectriques, nous avons réalisé tout d'abord la polarisation. Celle-ci est un procédé qui sert à aligner les polarisations élémentaires des microcristaux ferroélectriques et par conséquent, permet d'introduire l'anisotropie nécessaire à l'existence de la piézoélectricité.

La polarisation de nos échantillons a été effectuée dans un bain d'huile de silicone porté à 110°C . Le champ électrique externe appliqué sur les pastilles est de l'ordre 3 kHz à 5 kHz pendant 45 minutes, on doit tenir compte du fait que le champ appliqué doit être suffisant pour aligner tous les moments dipolaires. La figure 11 illustre le schéma de principe de ce procédé [5].



- 1- Céramique isolante 2- Plaque en cuivre 3- L'échantillon
 4- Thermomètre 5- Plaque chauffante 6- Transformateur

Figure 11 : Schéma représentant le processus de polarisation.

b. Mesure des facteurs piézoélectriques par la méthode de résonance - antirésonance

Après 24 heures de l'opération de la polarisation, les différents facteurs piézoélectriques telles que le facteur électromécanique de couplage planaire K_p , la constante piézoélectrique de charge transversale d_{31} , le module de Young E et la constante de tension g_{31} sont déterminées par la méthode standard de résonance et d'antirésonance.

Le schéma du principe de la méthode de mesure est donné par la figure 12.

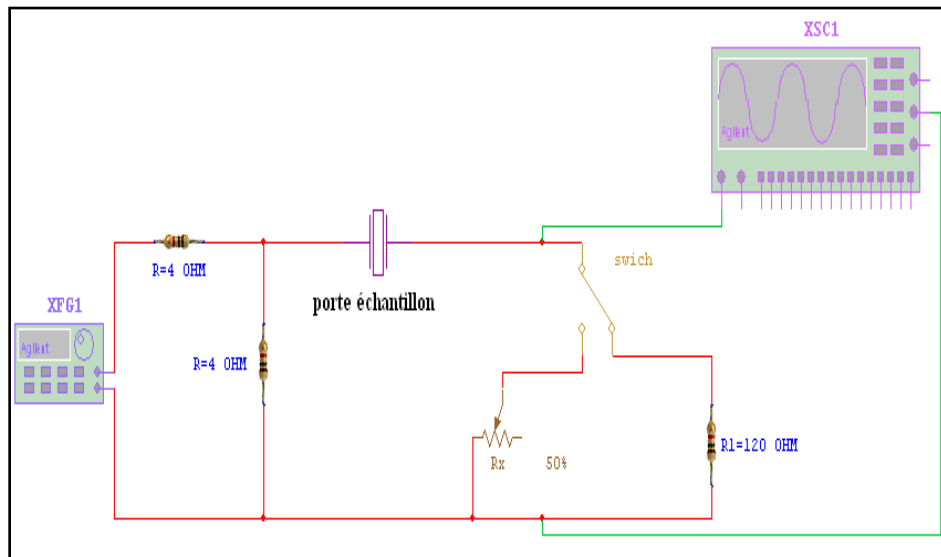


Figure 12 : Schéma représentant le principe de la méthode résonance – antirésonance.

Appareillage utilisé:

- ❖ Générateur de fonction numérique (TG 1010 programmable 50 kHz-10MHz DDS).
- ❖ Oscilloscope (Phywe 11448.93. 0-10 MHz).
- ❖ 2 Résistances variables (R D 6 E 05 A Resistor Decade).
- ❖ 2 Résistances fixes (R D 6 E 05 A Resistor Decade).
- ❖ Etuve avec thermocouple numérique (Heraeus, T 50 50 E K).

Les fréquences de résonance et d'antirésonance ont été obtenues en visualisant le maximum et le minimum d'amplitude du signal de sortie.

A la résonance, un élément piézoélectrique peut être modelé par le circuit équivalent (figure 13) [6-8].

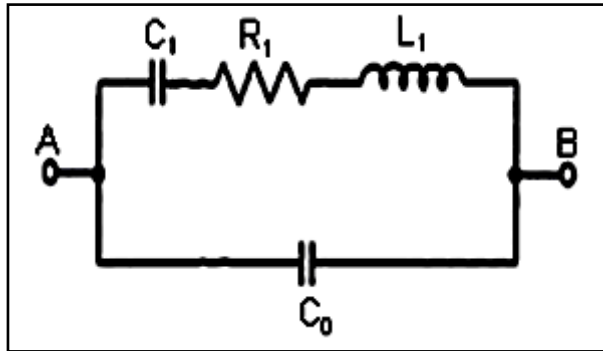


Figure 13 : Schéma équivalent d'un matériau piézoélectrique.

- Fréquence de résonance f_r : c'est la fréquence du signal d'entrée qui correspond à une amplitude maximale du signal de sortie.
- Fréquence d'antirésonance f_a : c'est la fréquence du signal d'entrée qui correspond à une amplitude minimale du signal de sortie.

Les valeurs de la fréquence de résonance et d'antirésonance sont prélevées directement de l'appareillage (GBF), par contre, la résistance de résonance (R_r) est mesurée par la substitution de l'échantillon (pastille) par une résistance ajustable qui va être étalonnée pour donner la même allure du signal de sortie à la résonance.

Les différents facteurs piézoélectriques sont déterminés d'après les formules suivantes [9-12] :

❖ **Facteur de couplage électromécanique planaire K_p**

$$K_p^2 = \frac{\eta^2 - (1 - \alpha^{E^2})}{2(1 + \alpha^E)} * \frac{f_a^2 - f_r^2}{f_a^2} = \frac{2.51}{2} * \frac{f_a^2 - f_r^2}{f_a^2}$$

❖ **Module de Young E**

$$E = \left[\frac{\pi \Phi f_r}{\eta} \right]^2 * (1 - \alpha^{E^2}) * d \quad (N / m^2)$$

❖ **La constante piézoélectrique de charge d_{31}**

$$d_{31} = K_p \sqrt{\frac{(1 - \alpha^E) \varepsilon_r \varepsilon_0}{2 E}} \quad (C / N) \text{ à } 25^\circ$$

❖ **La constante de tension g_{31}**

$$g_{31} = \frac{d_{31}}{\varepsilon_0 \varepsilon_r} \quad (mV / N) \text{ à } 25^\circ C$$

Le calcul de d_{31} et de g_{31} aux températures élevées se fera à l'aide des relations suivantes :

$$d_{31}^B = d_{31}^A \frac{K_p^B \cdot f_r^A}{K_p^A \cdot f_r^B} * \sqrt{\frac{\varepsilon_r^A}{\varepsilon_r^B}}$$

Et

$$g_{31}^B = \frac{d_{31}^B}{\varepsilon_0 \varepsilon_r^B}$$

Avec :

A : Température ambiante ($^\circ C$).

B : La température évaluée ($^\circ C$).

Φ : Diamètre de l'échantillon (m).

α^E : Le coefficient de poisson ($\alpha^E = 0.31$ pour les céramique).

η : La racine de l'équation de Bessel ($\eta=2.05$).

d : Densité (kg/m^3).

ϵ_0 : La permittivité de vide = $8.85 \cdot 10^{-12}$ (F/m).

ϵ_r : Constante diélectrique relative.

f_r : Fréquence de résonance (kHz).

f_a : Fréquence d'antirésonance (kHz).

❖ Le facteur de qualité mécanique Q_m

Le facteur de qualité mécanique Q_m mesure les pertes mécaniques dans les céramiques [6, 11], il est calculé par la relation suivante :

$$Q_m = \frac{1}{4 \pi R_1 C_1 (f_a - f_r)}$$

Avec :

C_1 : Capacité (F)

R_1 : Résistance de résonance (Ohm)

Références bibliographiques

- [1] **S. ALMEIDA, A.GOLDIN and M.SANTOSCOY** . (2013) . *Étude de l'effet piézoélectrique . Olympiades de physique France: Lycée Franco-Mexicain.*
- [2] **B. GUIFFARD**, *Elaboration et caractérisation de céramiques ferroélectriques de type PZT fluore. Thèse de doctorat, Institut National des Sciences appliquées de Lyon,(1999).*
- [3] **B. NOGAREDE**, *Moteurs piézoélectriques D 3 765, Techniques de l'ingénieur, traité convertisseurs et machines électriques, (1996).*
- [4] **A. BOUTARFAIA**, *Etude de la ligne de transition de phase de la céramique de type Zircone –Titanate de Plomb notée PZT dans le système : $x\text{PbZrO}_3$ - $y\text{PbTiO}_3$ - $\text{ZPb}(\text{Fe}^{3+}_{0.2}, \text{Ni}^{2+}_{0.2}, \text{Sb}^{5+}_{0.6})\text{O}_3$, Mémoire de Magister, Université de Constantine (1992).*
- [5] **F. KULCSAR**, *Electromechanical properties of Lead Titanate Zirconate ceramics with Lead partially replaced by Calcium or Strontium, J. Am. Ceram. Soc, Vol 42, N° 1, p 49 – 51, (1959).*
- [6] **W. P. MASON and H. JAFFE**, *Methodes for measuring piezoelectric, elastic, and dielectric constants of crystals and ceramics. Proceedings of the IRE, Vol 42, p 921 - 930, (1954).*
- [7] **H. OUCHI, M. NISHIDA and S. HAYAKAWA**. *Piezoelectric properties of $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ PbTiO_3 - PbZrO_3 ceramics modified with certain additives, J. Am. Ceram. Soc, Vol 49, N° 11, p577 - 582, (1966).*
- [8] **S. TAKAHASHI, S. HIROSE and K. UCHINO**, *Stability of PTZ piezoelectric ceramics under vibration level change, J. Am. Ceram. Soc, Vol 77, N° 9, p 2429-2432, (1994).*

[9] **K. H. HARDTL**, *Physics of ferroelectric ceramics used in electronic devices*, *Ferroelectrics*, Vol 12, p 9 – 19, (1976).

[10] **R. KODURI and M. LOPEZ**, *Ferroelectric and piezoelectric properties of Ag modified PMN – PZT solid solutions*, *Europ. Physic. J. Appli. Physi*, Vol 37, N°1, p 93 – 99, (2007).

[11] **B. JAFFE, R. S. ROTH and S. MARZULLO**, *Properties of piezoelectric ceramics in the solid-solution series Lead Titanate-Lead Zirconate-Lead oxide: Tin oxide and lead Titanate- Lead Hafnate*, *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, Vol 55, p 239- 254, (1955).

[12] **W. P. MASON and H. JAFFE**, *Methods for measuring piezoelectric, Elastic, and dielectric coefficients of crystals and ceramics*, *Proceedings of the IRE*, Vol 42, N° 6, p 921 - 930, (1954).

Chapitre II

Résultats et discussions

1. Synthèse

La synthèse de nos échantillons en céramique a été faite par la méthode céramique (la voie solide) à une température de frittage 1150 °C. La formule chimique de nos échantillons que nous avons choisie pour cette étude est : $(1-x)\text{Pb}(\text{Zr}_y \text{Ti}_{1-y})\text{O}_{3-x}\text{Sm}(\text{Fe}^{3+}_{0.5}, \text{Nb}^{5+}_{0.5})\text{O}_3$ ou par cette formule $\text{Pb}(1-x)\text{Sm}_x [(\text{Zr}_y \text{Ti}_{1-y})_{1-x} - (\text{Fe}^{3+}_{0.5}, \text{Nb}^{5+}_{0.5})_x]\text{O}_3$ avec une valeur de y est fixée à 0.51, et en varions la valeur de x : $0.02 \leq x \leq 0.1$ où le pas de x = 2%, cette formule est abrégée dans le texte comme suit PZT-SFN.

Le tableau 1 présente les différentes compositions étudié dans ce travail.

On note que la recherche des limites de la zone de coexistence nous a amené à ajouter des compositions à droite ou à gauche du diagramme ternaire.

Tableau 1: Différentes compositions préparées pour notre étude.

N° d'échantillon	Matrice
A ₁	Pb_{0.98} Sm_{0.02} [(Zr_{0.51} Ti_{0.49})_{0.98} - (Fe_{0.5}³⁺ Nb_{0.5}⁵⁺)_{0.02}] O ₃
A ₂	Pb_{0.96} Sm_{0.04} [(Zr_{0.51} Ti_{0.49})_{0.96} - (Fe_{0.5}³⁺ Nb_{0.5}⁵⁺)_{0.04}] O ₃
A ₃	Pb_{0.94} Sm_{0.06} [(Zr_{0.51} Ti_{0.49})_{0.94} - (Fe_{0.5}³⁺ Nb_{0.5}⁵⁺)_{0.06}] O ₃
A ₄	Pb_{0.92} Sm_{0.08} [(Zr_{0.51} Ti_{0.49})_{0.92} - (Fe_{0.5}³⁺ Nb_{0.5}⁵⁺)_{0.08}] O ₃
A ₅	Pb_{0.9} Sm_{0.1} [(Zr_{0.51} Ti_{0.49})_{0.9} - (Fe_{0.5}³⁺ Nb_{0.5}⁵⁺)_{0.1}] O ₃

2. Résultats et discussions

2.1. Etude des propriétés piézoélectriques

Pour étudier les propriétés piézoélectriques des échantillons obtenus, il faut polariser ces échantillons. Cette étape consiste à placer l'échantillon dans un bain d'huile de silicone de façon à prévenir tout arc électrique.

Les céramique PZT-SFN, sont polarisées à une température ambiante sous un champ électrique externe d'environ 4 KV/mm avec un palier durant 3 minutes environ.

Après 24 heures de l'opération de la polarisation, les constantes piézoélectriques sont déterminées par la méthode de résonance-antirésonance pour une fréquence de mesure 1kHz.

2.1.1. Le facteur de couplage électromécanique planaire K_p

❖ Evolution de K_p en fonction de la température

La variation de K_p en fonction de la température pour l'ensemble des échantillons fritté à 1150 °C est illustrée par la figure 1. On observe une diminution légère du coefficient K_p avec l'augmentation de la température dans le premier étendu de 25 à 150 °C pour l'ensemble des échantillons, suivie par une diminution progressive de ce facteur dans le deuxième étendu de la température de 150 à 400 °C.

La diminution de K_p est due au fait que l'augmentation de la température favorise la mobilité des ions, ceci engendre un bouleversement progressif des moments dipolaires qui s'orientent au hasard.

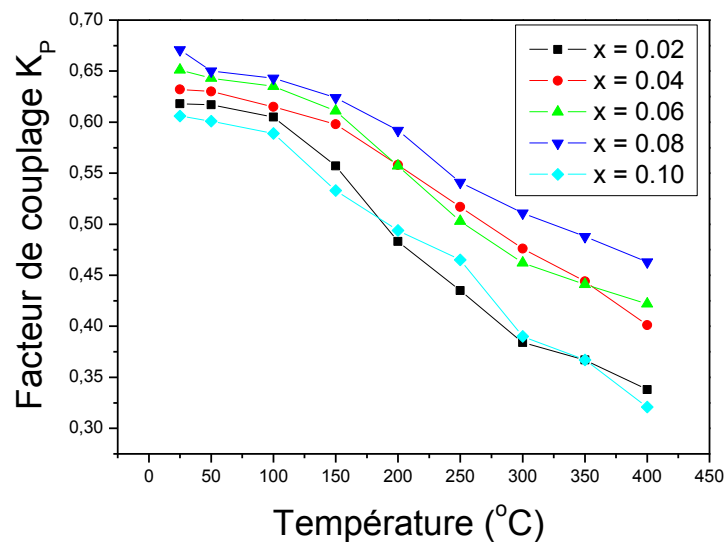


Figure 1 : Evolution du facteur de couplage K_p en fonction de la température pour l'ensemble des échantillons fritté à 1050 °C.

❖ Evolution de K_p en fonction du taux des dopants

L'influence de dopage sur le facteur de couplage électromécanique planaire K_p est présentée sur la figure 2. Ce facteur traduit l'aptitude d'une céramique à transformer l'énergie électrique en énergie mécanique. La courbe de la figure 2 montre que ce facteur est très sensible à la variation des dopants : il augmente avec l'augmentation de la concentration des dopants jusqu'à atteindre une valeur maximale pour l'échantillon A_4 ($x = 8\%$) ($K_p = 0,671$) puis il diminue. Cette augmentation est due au fait que pendant la polarisation du matériau, le degré d'alignement des domaines augmente (K_p augmente) et devient plus élevé dans la région de coexistence des phases tétragonale et rhomboédrique [1,2]. Cette prétention a été soulignée et confirmée par Dantsiger et Fesenko [3].

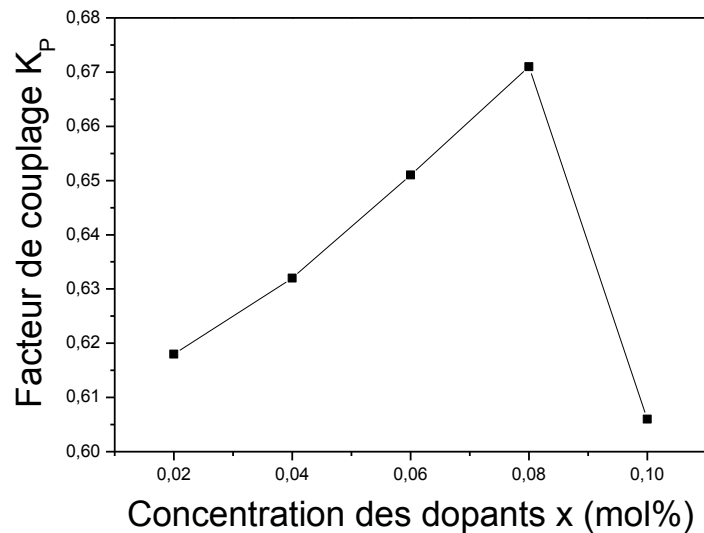


Figure 2 : Evolution de K_p en fonction du taux de dopant.

2.1.2. Le coefficient piézoélectrique de charge d_{31}

❖ Evolution de d_{31} en fonction de la température

La figure 3 donne l'évolution du coefficient piézoélectrique de charge d_{31} en fonction de la température pour l'ensemble des échantillons fritté à $1150\text{ }^\circ\text{C}$. On remarque que ce coefficient décroît au fur et à mesure que la température augmente. Cette diminution est due aux agitations thermiques qui sont responsables du désordre dans le matériau.

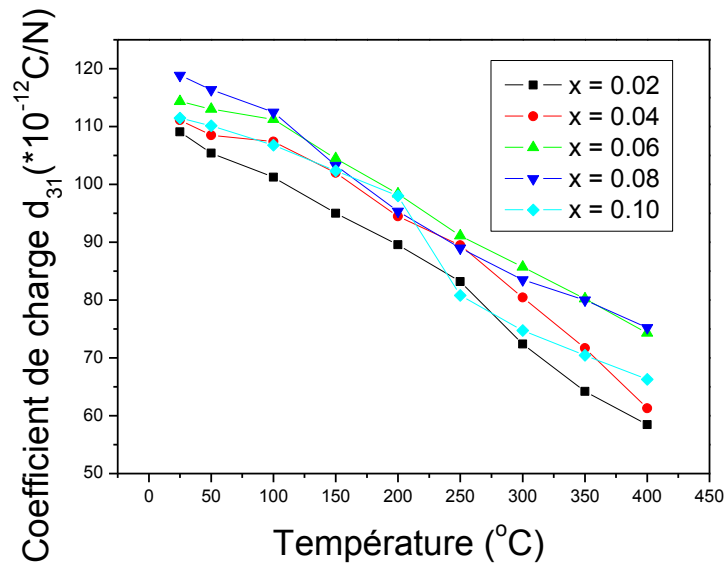


Figure 3 : Evolution du coefficient piézoélectrique de charge d_{31} en fonction de la température.

❖ Variation de d_{31} en fonction de la concentration des dopants

La figure 4 montre la variation du coefficient piézoélectrique de charge d_{31} en fonction de la concentration des dopants à la température de frittage 1150 $^{\circ}$ C.

On remarque clairement que ce coefficient croit avec l'augmentation du taux des dopants et prend une valeur maximale pour l'échantillon A₄ ($x = 8\%$), ensuite une diminution notée de ce coefficient pour l'échantillon A₅.

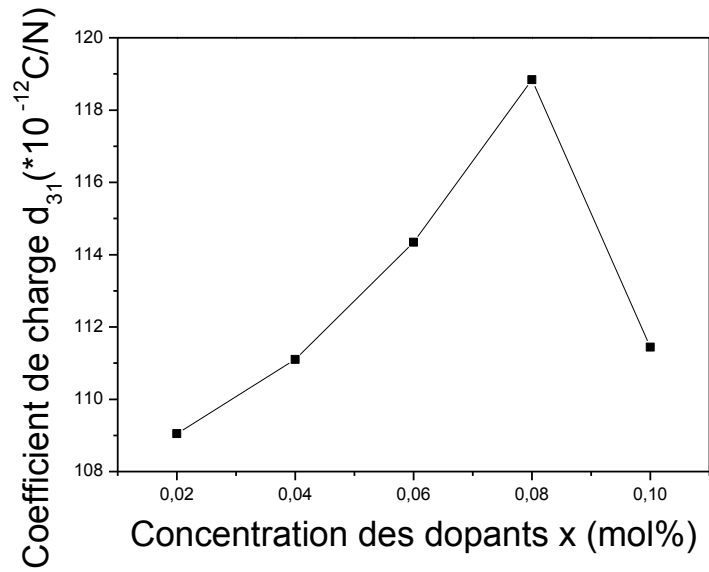


Figure 4 : Evolution du coefficient piézoélectrique de charge d_{31} en fonction du taux des dopants.

2.1.3. La variation du coefficient piézoélectrique de tension g_{31}

❖ En fonction de la température

L'étude de l'évolution du coefficient de tension g_{31} en fonction de la température pour l'ensemble des échantillons fritté à 1150 °C, est représentée sur la figure 5. On constate que ce coefficient diminue quand la température augmente. De manière générale les coefficients piézoélectriques évoluent contrairement en fonction de la température. Ce qui aurait pour conséquence une diminution des propriétés piézoélectriques des compositions.

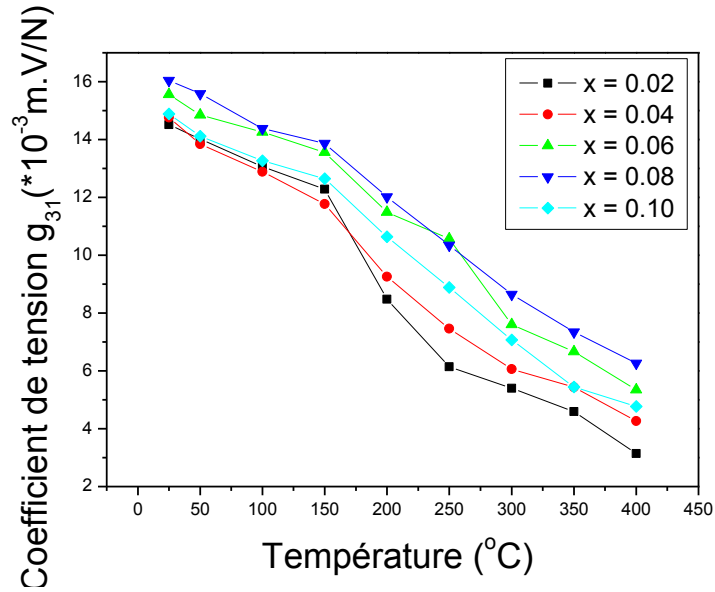


Figure 5 : Evolution de g_{31} en fonction de la température.

❖ En fonction du taux des dopants

La variation du taux des dopants influe sur le coefficient piézoélectrique de tension g_{31} , cette dépendance est illustrée sur la figure 6. Plus le taux des dopants croît, le coefficient g_{31} croît jusqu'à atteint une valeur maximale de 16.10^{-3} mV/N pour l'échantillon dopé avec 8 % de SFN puis il diminue d'une façon continue.

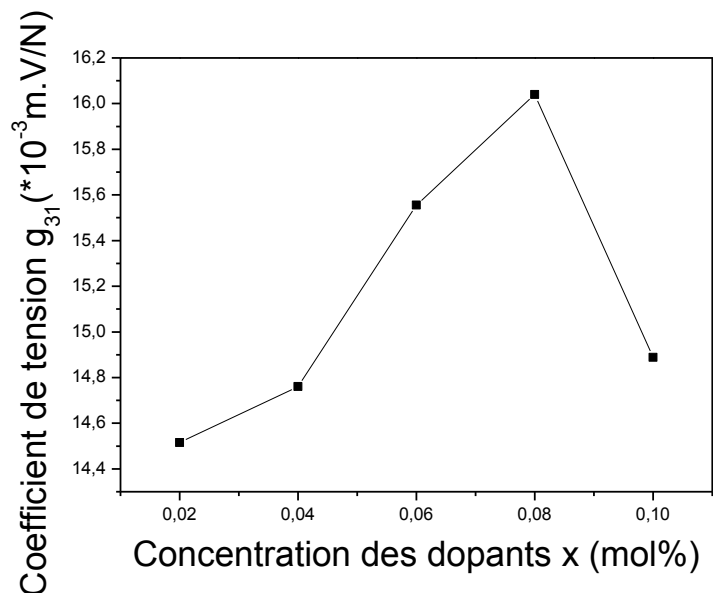


Figure 6 : Evolution de g_{31} en fonction du taux des dopants.

2.2. Etude des propriétés mécaniques

2.2.1. Le facteur de qualité mécanique Q_m

❖ Evolution de Q_m en fonction de la température

L'influence de la température sur le facteur de qualité mécanique Q_m est présentée sur la figure 7 pour l'ensemble des échantillons préparé à la température de frittage 1150 °C. Ces courbes montrent une diminution continue du facteur de qualité mécanique Q_m lorsque la température augmente.

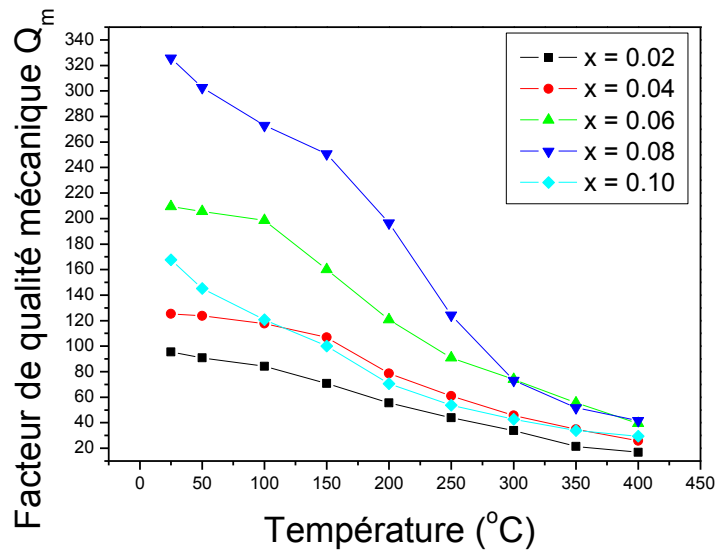


Figure 7 : Evolution de Q_m en fonction de la température.

❖ Evolution de Q_m en fonction du taux des dopants

La variation du facteur de qualité mécanique Q_m en fonction de la concentration des dopants est illustrée sur la figure 8. On constate que ce facteur évolue de façon similaire aux coefficients piézoélectriques (K_p , d_{31} , g_{31}). Il atteint une valeur maximale de 325 pour un échantillon dopé avec 8 % de SFN, puis il diminue.

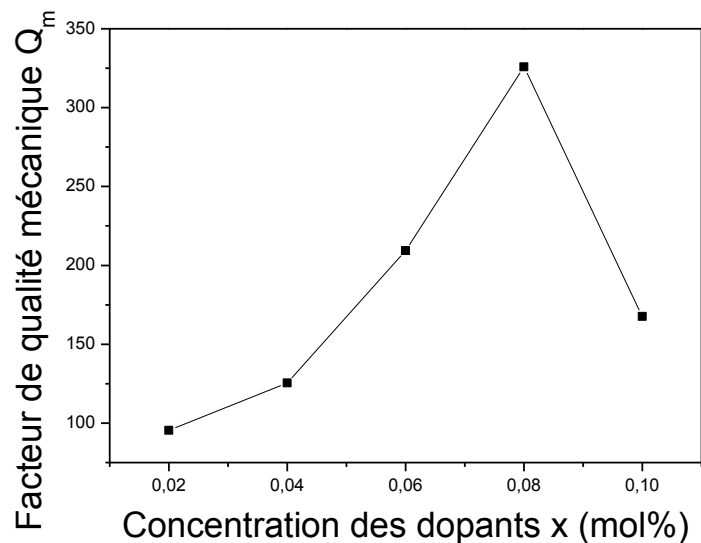


Figure 8 : Evolution de Q_m en fonction du taux des dopants.

Le facteur de qualité mécanique est défini en tant que réciproque du frottement interne. Le frottement interne dans la céramique piézoélectrique est dû à l'interaction entre le mouvement de mur de domaine et les domaines. Les sites vacants en Pb favorisent le mouvement des murs de domaine et augmentent le frottement interne, à l'intérieur de la céramique diminuant ainsi le facteur de qualité mécanique [4].

2.2.2. Le module de Young E

❖ Evolution de E en fonction de la température

La figure 9 montre la variation du module de Young en fonction de la température pour l'ensemble des échantillons préparé à la température de frittage 1150 °C. Cette figure indique qu'il y a une forte diminution de ce module avec l'augmentation de la température.

La diminution des valeurs de ce module est due à la rupture de quelques liaisons dans la céramique.

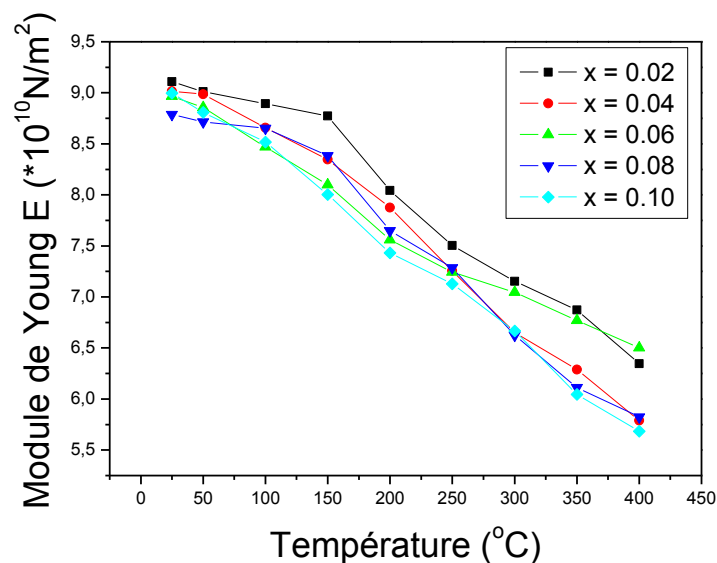


Figure 9 : Evolution du module de Young en fonction de la température.

❖ Evolution de E en fonction de la concentration des dopants

L'évolution du module de Young E pour tous les échantillons fritté à 1150 °C en fonction du taux des dopants est représentée sur la figure 10.

Cette courbe montre une diminution progressive du module de Young E avec l'augmentation du taux des dopants jusqu'à atteindre une valeur minimale de $8.79 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ pour l'échantillon dopé avec 8 % de SFN. Au delà de cette valeur on constate une augmentation de ce module.

La diminution de ce facteur pourrait être expliquée par les forces d'attraction qui empêchent la vibration des dipôles [5].

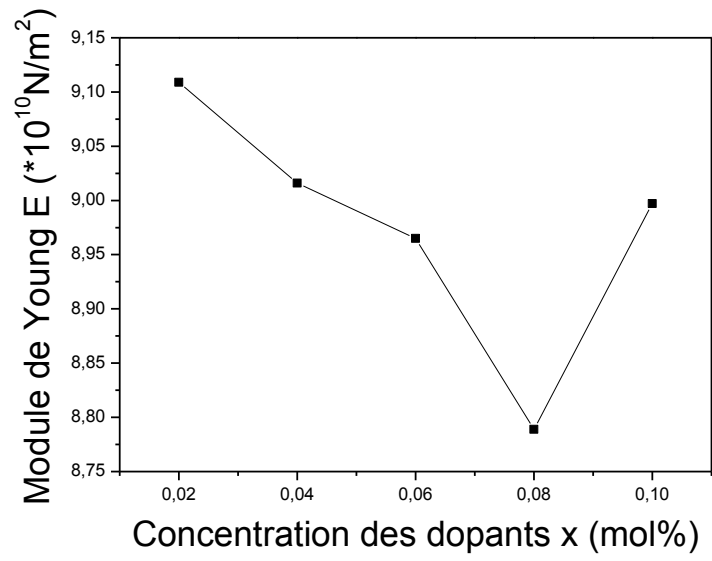


Figure 10 : Evolution du module de Young en fonction du taux des dopants.

Références bibliographiques

- [1] **L. Qian and al**, *Microstructural characteristics and electrical properties of $x\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Ta}_{2/3})\text{O}_3-(0.1-x)\text{Pb}(\text{Mn}_{1/3}\text{Sb}_{2/3})\text{O}_3-0.9\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ high power piezoelectric ceramics*, *Mat. Sc. Eng.*, Vol. 163, (2009), 145–150.

- [2] **M.M.S. Pojucan, M.C.C. Santos, F.R. Pereira, M.A.S. Pinheiro and M.C. Andrade**, *Piezoelectric properties of pure and $(\text{Nb}^{5+} + \text{Fe}^{3+})$* , *Ceramics International*, Vol. 36, (2010), 1851–1855.

- [3] **A. Y. DANTSIGER and E. G. FESENKO**, *Relation between the Main Electro-Physical and Structural Parameters of Ferro- (Piezo-) Electric Ceramics and Methods of Their Changing*, *J. phys. Soc. Japan*, Vol 28, p325 - 327, (1970).

- [4] **W. Long, W. Chung-Chuang, W. Tein-Shou and L. His-Chuan**, *Piezoelectric properties of modified PZT ceramics*, *J. Phys. C: Solid State Phys.*, Vol. 16, (1983), 2813-2821.

- [5] **A. Boutarfaia and S.E. Bouaoud**, *Tetragonal and Rhombohedral Phase Co-Existence in the System: $\text{PbZrO}_3\text{-PbTiO}_3\text{-Pb}(\text{Fe}_{1/5}, \text{Ni}_{1/5}, \text{Sb}_{3/5})\text{O}_3$* , *Ceramics International*, Vol. 22, N^o. 4, (1996), 281-286.

CONCLUSION GENERALE

Au cours de cette étude, nous nous sommes intéressés à la caractérisation piézoélectrique d'un nouveau matériau en céramique à base de PZT selon la formule $\text{Pb}_{1-x}\text{Sm}_x[(\text{Zr}_{0.51}\text{Ti}_{0.49})_{1-x} - (\text{Fe}_{0.5}^{3+}\text{Nb}_{0.5}^{5+})_x]\text{O}_3$ avec des valeurs de $x = 0.02; 0.04; 0.06; 0.08$ et 0.1 . L'intérêt de cette étude a été porté sur le rôle d'incorporation des dopants (Sm_2O_3 , Fe_2O_3 et Nb_2O_5) dans la structure cristalline PZT-SFN, et l'effet de la température sur les propriétés piézoélectriques des céramiques synthétisées.

La réponse piézoélectrique en fonction des différents paramètres (taux des dopants, température et fréquence) des PZT-SFN est optimales pour la composition où la concentration des dopants $x = 8 \%$ mol (échantillon A₄).

A une fréquence de 1kHz et à la température ambiante le facteur de couplage électromécanique planaire K_p , le coefficient piézoélectrique de charge d_{31} , la variation du coefficient piézoélectrique de tension g_{31} , le facteur de qualité mécanique Q_m et le module de Young E de la céramique $\text{Pb}_{0.92}\text{Sm}_{0.08}[(\text{Zr}_{0.51}\text{Ti}_{0.49})_{0.92} - (\text{Fe}_{0.5}^{3+}\text{Nb}_{0.5}^{5+})_{0.08}]\text{O}_3$ sont 67.10 %, 119 pC/N, 16 mV/N, 326, $8.80 \cdot 10^{10}$ N/m² respectivement, qui signifient qu'ils ont une grande promesse pour des applications de déclencheur.