REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU

FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET INFORMATIQUE

DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme master II

Spécialité : Electronique

Option : Electronique biomédicale

Thème :

Elaboration d'une pastille piézoélectrique pour une application médicale

Proposé par :

M^r^ H.ACHOUR

M^r^ A.CHAOUCHI

Réalisé par :

M^elle^ CHELLI Zakia

M^elle^ CHERFAOUI Lamia

Soutenues le 03/07/2016

Remerciements

En préambule à ce travail, nous tenons à rendre grâce à DIEU le tout puissant de nous avoir donné la patience et le courage pour aller au bout de nos objectifs.

Ces remerciements vont tout d'abord au corps professoral et administratif de l'Université MOULOUD MAMMERIE de Tizi Ouzou pour la richesse et la qualité de leur enseignement et qui déploie de grands efforts et une grande technique pédagogique pour assurer à ses étudiants une formation actualisée.

Nous aimerons exprimer toute notre gratitude à Monsieur M.LAGHROUCHE , professeur à l'UMMTO qui s'est toujours montré à notre écoute et très disponible tout au long du déroulement de notre recherche. Ainsi nous lui devons beaucoup pour sa contribution, son aide et ses conseils en consacrant presque tout son temps pour l'aboutissement de ce travail.

Nous tenons à remercier très sincèrement messieurs les membres de jury qui nous font l'honneur de lire, de juger et d'évaluer notre travail.

Nos vifs remerciements et profonde reconnaissance vont à Monsieur A.CHAOUCHI et H.ACHOUR, Professeurs à l'UMMTO pour leurs grande disponibilité, leurs encouragements, leurs patience et surtout leurs judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter notre réflexion et qui n'ont jamais cessé de nous guider et de nous aidé à trouver des solutions pour avancer dans notre recherche.

Nous voudrons exprimer notre reconnaissance à Madame M.SAIDI pour sa diligence dont elle a fait preuve suite à notre requête.

Grand merci à Monsieur Kati Samir qui nous a durablement soutenu et qui a été longuement patient, éclairant, compréhensif et soucieux.

Nos remerciements s'adressent également aux membres du laboratoire de chimie appliquée et génie chimique de l'UMMTO pour leur chaleureux accueil et pour toutes les commodités qu'ils ont mit à notre disposition en matière de disponibilité, d'orientation et d'accès à l'information.

Enfin, nous voulons exprimer nos remerciements les plus sincères à tous ceux et celles qui nous ont soutenu et encouragé et qui, de prés ou loin ont contribué à la réalisation de ce mémoire.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

Ma très chère mère et mon très cher père qui ont toujours été là pour moi, qui ont œuvré pour ma réussite par leur amour, leur soutien et leur présence dans ma vie. « Vous avez tout sacrifié pour vos enfants n'épargnant ni santé ni efforts. Vous m'avez donné un magnifique modèle de labeur et de persévérance. Je suis redevable d'une éducation dont je suis fier. Je vous dois ma vie, grâce a vous je suis ce que je suis aujourd'hui ».

Mes cher grands parents

Mes frères Fateh et Nafaa.

Mes sœurs.

Tous mes amis (es).

lamia

Dédicaces

Je dédie ce travail à tous qui me sont très chers plus particulièrement à :

Mes chers parents

Mes frères et mes petites sœurs

Toute la famille et tous mes amis (es)

Zakia

Sommaire

Listes des figures

Listes des tableaux

INTRODUCTION GENERALE……...……..**1**

CHAPITRE I : Généralités sur les propriétés diélectriques, ferroélectriques et piézoélectriques ……..**6**

Introduction……...……..**7**

I.1. Un petit historique sur les matériaux piézoélectriques…….……...**7**

I.2. Le diélectrique……..**8**

I.2.1. Définition du diélectrique…….……**8**

I.2.2. Les principales propriétés des matériaux diélectriques…...…….**8**

I.2.3. La polarisation d'un diélectrique…….…….……..**10**

I.3. La piézoélectricité……...**14**

I.3.1. Définition de la piézoélectricité……...…..**14**

I.3.2. Le principe de la piézoélectricité……...**15**

I.3.3. Les différents matériaux piézoélectriques……**17**

I.3.3.a. les matériaux PE naturels…….….**17**

I.3.3.b. les matériaux PE artificiels…….…….…..…**17**

I.3.4. Les équations constitutives de la piézoélectricité…….…**20**

I.3.5. Les coefficients piézoélectriques…….…….…..…**21**

I.3.6. Le coefficient de couplage électromécanique…….…….…..**22**

I.3.7. les matrices piézoélectriques…….……..…**24**

I.3.8. Les modes de vibrations…….…..……..**26**

I.4. La ferroélectricité…….…….…….**27**

I.4.1. Définition de la ferroélectricité……...…….……..**27**

I.4.2. La Polarisation des materiaux ferroelectriques et le cycle d'hystérésis…….…...**28**

I.4.3. Les céramiques ferroélectriques de type pérovskite……..**29**

Conclusion……**31**

CHAPITRE II : Les matériaux composites piézoélectriques : céramique/polymère……..…….…….**33**

Introduction…….…….**34**

II.1. Les matériaux composites……**34**

II.1.1. Définition…….…….**....34**

II.1.2. Classification des composites……...……..….**35**

II.2. Les matériaux composites piézoélectriques……...……...**36**

II.2.1. Définition…….…….…**36**

II.2.2. Les Composite piézoélectrique 1.3…….…..**40**

II.2.3. Mécanisme de transfert d'une contrainte…….…..……**41**

II.2.4. Les technologies utilisées pour la fabrication des composites 1.3…….…..…**41**

II.2.4.a. Méthode "Dice and Fill"……...……..…**42**

II.2.4.b. Moulage par injection……...…**42**

II.2.4.c. Méthode "Soft molding"…….…….**.....43**

II.2.4.d. Composite de PZT à fibres……...…….**.....44**

II.3. Les secteurs d'applications des matériaux piézocomposites…….……**45**

II.3.1. La détection sous marine…….……...…….……**45**

II.3.2. Le domaine médical……...……..…**46**

II.3.3. Le contrôle actif…….…...**46**

II.4. Avantages et inconvénients des matériaux composites……..…….…..**47**

Conclusion…….…….…..**48**

CHAPITRE III : Application des matériaux piézoélectriques dans le domaine médicale……..…..…**49**

Introduction…….**.....50**

III.1. Quelques applications de l'effet piézoélectrique dans le domaine médical…….…..**51**

III.1.1. L'accéléromètre piézoélectrique…….…....**51**

III.1.1.a. Le principe de fonctionnement……...…..**52**

III.1.1.b. Les données métrologiques……...…**53**

III.1.1.c. Les points forts……..…….…...**53**

III.1.1.d. Les limitation……..…….…..…**53**

III.1.2. Les générateurs piézoélectriques…..…….……..……..….**53**

III.1.2.a. Le principe de fonctionnement……..……..…**54**

III.1.3. Micropompe pour contrôler le taux d'insuline délivré a base d'un actionneur piézo-électrique……..…….**56**

III.1.4. L'échographie…….…….……..**58**

III.1.4.a. Le principe de fonctionnement…….…….....**58**

III.2. Autres applications…….……...**60**

III.2.1. Les moteurs piézoélectriques à onde progressive……**60**

III.2.1.a. Principe de Fonctionnement…….……...…**60**

III.2.1.b. Les caractéristiques…….……**61**

III.2.2. Le télémètre……..…….…….……**62**

III.2.2.a. Le principe de fonctionnement…….…..…**63**

III.2.2.b. Les caractéristiques……..……..**64**

III.2.3. Système commercialisé pour la récupération d'énergie……....….**64**

III.2.4. Capteurs de vibrations et choc piézoélectriques……..…….……**65**

Conclusion……...……**65**

CHAPITRE IV : Synthèse ,élaboration et caractérisation……..……...**67**

IV.1. Synthèse, élaboration et caractérisation de la céramique……..…**68**

IV.1.1. Introduction……...…..**68**

IV.1.2. Préparation des poudres par voie solide…….....…**68**

IV.1.2.a. Choix et pesés…….……**69**

IV.1.2.b. Mélangeage-broyage des poudres (Broyage par attrition)…….……**69**

IV.1.2.c. Calcination ou chamottage……...…**71**

IV.1.2.d. Rebroyage……..….**72**

IV.1.3. Elaboration des céramiques……..……..….**72**

IV.1.3.a. Mise en forme par pressage…….….**....72**

IV.1.3.b. Frittage de la poudre compactée (pastilles)…….....…**73**

IV.1.3.c. Rectification (polissage des pastilles frittées)…….….**....74**

IV.1.4. Polarisation de la céramique……..……..…....**74**

IV.1.5. Mesure des constantes diélectriques, ferroelectrique et piézoélectriques……..**75**

IV.1.5.a. Mesure des constantes diélectriques…….……..**75**

IV.1.5.b. Mesure des constantes piézoélectriques…….……**78**

IV.1.5.c. Mesure des propriétés ferroélectriques……..….**79**

IV.2. Montage de conditionnement de la céramique……..…….**79**

IV.2.1. Le convertisseur de charge/tension……..……**...80**

IV.2.1. La partie amplification…….……..…..**81**

Conclusion……...…….**.....84**

CONCLUSION GENERALE ET PERESPECTIVES…….....……..……..**85**

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES…….....**88**

Figure I.1: a) Force imposée à un dipôle par un champ électrique, b) Alignement du dipôle avec le champ électrique…….....**11**

Figure I.2: Déférents types de polarisation…….....**12**

Figure I.3: Illustration de l'effet piézoélectrique : a)Effet piézoélectrique direct, b) Effet piézoélectrique inverse……..**14**

Figure I.4: Comportement du chlorure de césium (Cs Cl) Centro symétriques……..**15**

Figure I.5: Comportement du quartz (SiO2) non centrosymétrique……**15**

Figure I.6: Diagramme des Classes cristallines……...**16**

Figure. I.7: a) piézoélectricité du quartz naturel à l'équilibre, b) avec une force appliquée**...17**

Figure. I.8: Microstructure typique d'une surface céramique polie qui illustre les grains…..**18**

Figure. I.9: Structure du PVDF……..**19**

Figure I.10: Définition des directions dans un milieu piézoélectrique……...**22**

Figure I.11 : Représentation des fréquences de résonance et anti résonance…….**23**

Figure I.12: Repère associé aux vecteurs contrainte et déformation……**25**

Figure I.13: Modes de vibrations fondamentaux d'une céramique piézoélectrique……...**26**

Figure I.14: Illustration des modes de couplages : a) le mode 33 et b) le mode 31……...**26**

Figure I.15: Cycle d'hystérésis caractéristique d'un matériau ferroélectrique……...**28**

Figure I.16: Structure pérovskite cubique de $BaTiO_3$……**29**

Figure I.17: a) Structure originale de $BaTiO_3$ (T<Tc), b) Structure déformée (T>Tc)……..**30**

Figure II.1: Schéma d'un matériau composite……...**34**

Figure II.2: Les différentes connectivités pour un composite biphasé……..**37**

Figure II.3: Les principales réalisations de composites piézo-électriques…….....**37**

Figure II.4: Représentation des piézocomosites de connectivité 2-2, 1-3, 0-3 et 3-3……...**39**

Figure II.5: Représentation du coefficient de couplage électromécanique pour les connectivité 1-3, 3-3 et 0-3 en fonction de la fraction volumique de céramique piézoélectrique…….....**40**

Figure II.6: Vue schématique d'un composite piézoélectrique de connectivité 1-3…….....**40**

Figure II.7: Méthode de fabrication des composites 1.3 "Dice and Fill"…….….**42**

Figure II.8: Moulage par injection pour un composite 1-3: a) Remplissage de moule, b) Retirer la préforme en céramique de moule…….…...**43**

Figure II.9: Illustration de la méthode "Soft molding"…….….**44**

Figure II.10: Diagramme du processus de fabrication de composites 1.3 à fibres PZT…...**45**

Figure III.1 : Représentation typique d'un accéléromètre…….....**51**

Figure III.2: Exemple de prototype piézoélectrique…….…….**53**

Figure III.3: Chaussure piézoélectrique de MIT…….....….**54**

Figure III.3: Modèle d'un générateur piézoélectrique…….……..**54**

Figure III.4: Prototype d'implant dans le genou…….……..**55**

Figure III.5 : Générateur piézoélectrique à manivelle…….…..…**55**

Figure III.6 : Jambe et genouillère génératrice d'énergie pour les tests en situation.…...…**56**

Figure III.7: Description simplifiée du fonctionnement d'une micropompe……...….**57**

Figure III.8: Principe de fonctionnement d'une micropompe avec actionneur piézoélectrique en contraintes axiales (a) à l'aspiration (b) au refoulement.....…….**58**

Figure III.9: Fonctionnement des transducteurs à ultrasons en imagerie médicale…...….**59**

Figure III.10: Structure d'un transducteur piézoélectrique……..**59**

Figure III.11: Vue détaillé des différents composants d'un moteur à onde progressive.....**60**

Figure III.12: Représentation de l'entraînement du rotor par les crêtes de l'onde progressive…….…...…**61**

Figure III.13: Représentation des blocs constitutifs d'un télémètre……...**62**

Figure III.14: Les différents modules du télémètre……**63**

Figure III.15: Emission de l'onde ultrasonore et réception de l écho refléter par l'objet**....63**

Figure III.16: le système de récupération d'énergie a base d'un circuit LTC3588-1……**65**

Figure III.17 : Schéma interne de LTC3588……...**65**

Figure IV.1: Principales étapes de fabrication d'une céramique……**69**

Figure IV.2 : Dispositif d'attrition…….……**70**

Figure IV.3: Mortier en agate……...……..**70**

Figure IV.4 : Le cycle thermique de la calcination……...……**71**

Figure IV.5: Illustration et image de la presse uni-axiale à froid utilisée pour le compactage de la poudre……**73**

figure IV.7 : les pastilles préparés……...**74**

Figure IV.6 : Cycle thermique du frittage…….....**74**

Figure IV.8 : Photo de l'appareil de mesures des propriétés diélectriques……...…….**75**

Figure IV.9 : Evolution de la capacité en fonction de la température à différentes fréquences…….……..**74**

Figure IV.10: Evolution des pertes diélectriques en fonction de la température à différentes fréquences……...**76**

Figure IV.11 : Evolution de la permittivité relative en fonction de la température à différente fréquences…….…..**77**

Figure IV.12: Piézomètre (Piezotest PM 200)……..**78**

Figure IV.13: le cycle d'hystérésis de la composition NKLNT……**79**

Figure IV.14: Schéma du conditionnement utilisé……...….**80**

Figure IV.15 : Convertisseur de charge/tension……...…..**80**

Figure IV.16 : a) le schéma interne d'un AD624, b) l'AD624 avec un Gain de 20……..**81**

Figure IV.17: Schéma d'un NE555 monté en VCO…….….**82**

Figure IV.18: Schéma global de notre application……...…..**82**

Tableau I.1: Représentation schématique pour les différents mécanismes de polarisation….**13**

Tableau I.2: Grandeurs électriques et mécaniques……..**21**

Tableau I.3: Formes d'échantillons pour caractérisation des modes fondamentaux……..**28**

Tableau I.4: Symptômes et conséquences classés par degré de gravité d'une intoxication au plomb……...**31**

Tableau II.1: Avantages (+) et inconvénients (-) des matériaux piézoélectriques céramiques, polymères et composites……...**48**

Tableau III.1: Quelques applications des matériaux piézoélectriques……....**50**

Tableau IV.1: Les problèmes possibles liés au chamottage……...**72**

Tableau IV.2 : les différentes constantes piézoélectriques…….**78**

Introduction Générale

Introduction générale :

Aujourd'hui, la demande croissante d'un produit technologique, performant, entièrement électrique et peu gourmand en énergie a met les matériaux possédant plusieurs propriétés au centre de toutes les recherches. Les matériaux piézoélectriques font certainement partie de ces matériaux.

Les matériaux piézoélectriques peuvent être définis comme étant des matériaux capables de transformer une énergie électrique en une énergie mécanique (et vice versa) **[1].** Ils permettent le développement de nouvelles technologies, aptes aux diverses applications. En effet, leurs propriétés réversibles font d'eux des candidats idéaux, sensibles et évolutifs **[2].** Ils possèdent des fonctions qui leurs permettent de se comporter par exemple comme capteurs (détecteur de signaux) et actionneurs (effectuer une action sur son environnement) **[3].** Leurs applications ne cessent de s'élargir et des performances toujours plus accrues sont vivement recherchées afin d'améliorer leurs caractéristiques pour une bonne adaptation à l'application demandée. Ils sont incorporés dans beaucoup d'équipements électriques et électroniques tels que les transducteurs ultrasonores pour l'imagerie médicale, le sonar et les capteurs de pression en raison de leurs larges gammes de propriétés **[4].**

Les utilisations de la piézoélectricité sont présentes dans notre quotidien depuis longtemps, dans différents domaines tells que l'aéronautique, l'industrie informatique et la médicine **[5].** A l'heure actuelle, les applications de la piézoélectricité sont nombreuses et intenses que l'activité de recherche et de développement.

Il semble intéressant à ce niveau d'énoncer les raisons pour lesquelles il y a un intérêt particulier à développer des dispositifs piézoélectriques dans un objectif donné. Tout d'abord, les temps de réponse sont faibles **[6]**, les matériaux pourront donc être exploités à des fréquences élevées, les niveaux de contrainte que peuvent supporter sont élevés, la conversion électromécanique est intrinsèque et les faibles déplacements engendrés (sous des niveaux de tension élevés) conduisent à une bonne contrôlabilité des actionneurs et à une résolution élevée.

L'objectif de notre travail, est l'élaboration de matériau céramique de la composition chimique : $((Na_{0.535}, K_{0.48})_{0.966}\ Li_{0.058}\ Nb_{0.9}\ Ta_{0.1}\ O_3$ synthétisée par voie solide ainsi que l'étude des caractérisations diélectriques, ferroélectriques et piézoélectriques.

Ce présent mémoire comprend quatre chapitres, le premier rassemble des généralités sur les propriétés diélectriques, ferroélectriques et piézoélectriques ainsi qu'un historique sur la piézoélectricité et son origine, puis on a présenté les différents types de matériaux piézoélectriques, le deuxième concerne les matériaux piézocomposites où on a basé sur les composites : céramique-polymère, on a développé aussi les technologies de fabrication de ces matériaux ainsi que leurs applications, on a terminé ce chapitre par quelques caractéristiques des composites ; quant' au troisième chapitre, nous nous somme intéressés aux applications piézoélectriques dans le domaine médical, on donnera aussi quelques autres applications en dehors de ce domaine, et enfin le dernier chapitre est divisé en deux parties, la première est consacrée à la synthèse des poudres par voie solide, à la caractérisation et l'élaboration de la pastille piézoélectrique, alors que la seconde, est réservée à la partie conditionnement et étalonnage de cette dernière. A la fin, on terminera par une conclusion générale qui résume les résultats obtenus durant cette étude suivie de quelques perspectives à apporter dans un avenir proche.

Chapitre I : Généralités

Introduction **:**

L'utilisation des matériaux électro-actifs de type piézoélectriques dans les systèmes électromécaniques n'est pas nouvelle. Depuis quelques années, et notamment grâce à l'amélioration de la qualité des ces matériaux, quelques groupes de recherche s'intéressent à les adapter et à les optimiser pour répondre aux exigences technologiques.

Pour mieux comprendre le principe de la piézoélectricité et les différents matériaux PE, nous allons rappeler quelques généralités sur le diélectrique, la ferroélectricité et la piézoélectricité ainsi que leurs principales propriétés.

I.1. Généralités sur les propriétés diélectriques, ferroélectriques et piézoélectriques

I.1.1. Un petit historique de la piézoélectricité :

Abbé Just-Haüy (1743-1822) Minéralogiste français, père de la minéralogie et de la cristallographie moderne.
Premier observateur de la propriété piézoélectrique direct sur des matériaux naturels (quartz, sel de Seignette) en 1817 **[7].**

Pierre et Jacques Curie (1859-1906)-(1856-1941) Physiciens français.

Découvrent et interprètent le phénomène piézoélectrique direct en 1881**[8].**

Gabriel Lippmann (1845-1921) Physicien français, (Prix Nobel en 1908).

Prédit l'effet piézoélectrique inverse. Confirmé ensuite par les frères Curie **[9].**

Woldemar Voigt (1850-1919) Physicien allemand.Améliore l'interprétation du phénomène avec Gottlieb Hankel **[10].**

Paul Langevin (1872-1946) Physicien français, Inventeur de la première application piézoélectrique, le sonar sous-marin durant la première guerre mondiale en 1917 avec Constantin Chilowski **[11].**

- A partir de 1947, Elaboration des premiers matériaux piézoélectriques sous forme céramique de Titanate de Baryum.
- En 1952, Découverte d'un matériau aux propriétés électriques excellentes, le Titano-Zirconate de plomb (PZT, (PbxZr1-x)TiO3).
- Depuis les années 2000, deux nouvelles voix de recherche sont explorées :

→ Le couplage entre les matériaux piézoélectriques et magnétiques dans le but d'obtenir des coefficients de déformation plus importante.

→ La recherche de nouveaux matériaux piézoélectriques sans Plomb pour remplacer le PZT et ces dérivés.

I.2. Le diélectrique :

I.2.1. Définition:

Un diélectrique est un matériau qui ne peut pas conduire le courant électrique, car il ne contient pas des charge susceptible à se déplacer de façon macroscopique. Il est caractérisé par une résistivité (ρ) très élevée. A ce titre, on l'appelle parfois isolant électrique.

Malgré l'impossibilité des milieux diélectriques de conduire le courant, ils présentent de nombreuses caractéristiques électriques. En effet les atomes qui constituent ce matériau peuvent présenter des dipôles électrostatiques qui sont susceptibles d'interagir avec un champ électrique. Cette interaction se traduit par la création d'une polarisation reliée à ce champ. Au niveau microscopique, on l'appelle une polarisabilité, et au niveau macroscopique, la susceptibilité électrique. Le coefficient qui décrit la facilité qu'a un *para*-électrique (diélectrique) de se polariser est la constante diélectrique relative ε_r.

I.2.2. Les principales propriétés des matériaux diélectriques :

Les matériaux diélectriques sont caractérisés en particulier par :

- **Les pertes diélectriques:**

Cette notion de perte est un facteur qui varie selon la température et la fréquence, il joue un rôle important car il caractérise la perte d'énergie due à la création et à l'orientation des dipôles. Cette perte d'énergie se traduit par une augmentation de température. L'angle de perte est mesuré par la relation :

$$\tan \Theta = R\, C.\omega \qquad \textbf{Eq.I.1}$$

Avec :

$\omega = 2\,\pi\, f$ (f : fréquence utilisée) : pulsation (rad.Hz).

R : résistance du matériau (Ω).

C : capacité du matériau (F).

- **La rigidité diélectrique :**

La rigidité diélectrique d'un milieu isolant représente la valeur maximum du champ électrique que le milieu peut supporter avant d'avoir un claquage. On utilise aussi l'expression du champ disructif. Si le champ électrique dépasse la rigidité diélectrique du matériau, on parle alors de claquage, et le matériau peut avoir ses propriétés physiques modifiées.

La rigidité diélectrique est donnée par le rapport de la tension de claquage sur l'épaisseur du matériau.

Cas particulier :

Dans le cas d'un isolant gazeux, la rigidité diélectrique dépend de la pression du gaz.

- **La permittivité diélectrique :**

La constante diélectrique ou également nommée permittivité **ε**, elle décrit la propriété du matériau à s'opposer au passage d'un courant électrique. Plus le matériau limite le passage d'un courant électrique, plus sa constante diélectrique est élevée. Dans la littérature, on parle souvent de la constante diélectrique relative $\boldsymbol{\varepsilon_r}$. C'est à dire du rapport entre la constante diélectrique du matériau et celle de la constante diélectrique du vide prise comme référence ($\boldsymbol{\varepsilon_0}$ = 8.85.10−12F/m).

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon 0} \qquad \textbf{Eq.I.2}$$

- **Le coefficient de température :**

Le coefficient de température (τ_ε) présente la variation de la permittivité en fonction de la température. Cette propriété est définie par la relation suivante :

$$\tau_\varepsilon = \frac{1}{\varepsilon} \times \frac{\Delta\varepsilon}{\Delta T} \qquad \textbf{Eq.I.3}$$

- **La résistivité ou la résistance d'isolement :**

La résistivité (ρ) est aussi un paramètre qui rend compte des pertes énergétiques. Elle présente le caractère isolant d'un matériau diélectrique sous un champ électrique appliqué. Pour un isolant parfait (ce qui n'existe pas réellement), Cette grandeur est infinie ce qui traduit donc une imperfection des matériaux diélectriques isolants.

La résistivité dépend de la température qui augmente la mobilité et la concentration des porteurs de charges, la tension appliquée et le temps écoulé après la mise sous tension du matériau, elle est déduite directement par la relation suivante :

$$R = \rho . \frac{l}{S} \qquad \textbf{Eq.I.4}$$

Avec :

R: résistance du matériau (Ohm).

ρ : résistivité du matériau (Ohm.cm).

l: langueur de l'échantillon (cm).

S: surface de l'échantillon (cm^2).

I.2.3. La Polarisation diélectrique :

Dans les diélectriques, toutes les charges sont liées : le seul mouvement possible en présence d'un champ électrique est de minuscules déplacements, en général petits par rapport aux dimensions atomiques. Un diélectrique dans lequel a lieu un déplacement de charges liées est dit polarisé et ses molécules ont un moment dipolaire induit. Ces dipôles créant leurs propres champs, qui s'ajoutent à ceux créés par d'éventuelles charges extérieures, le champ des dipôles et le champ extérieur appliqué pouvant être alors d'amplitudes comparables.

En présence d'un champ électrique E, une force s'impose à un dipôle électrique et l'oriente selon le champ appliqué, comme le montre **la figure I.1.**

La polarisation désigne l'alignement des moments dipolaires atomiques ou moléculaires, permanents ou induits, sous un champ électrique externe appliqué **[1].**

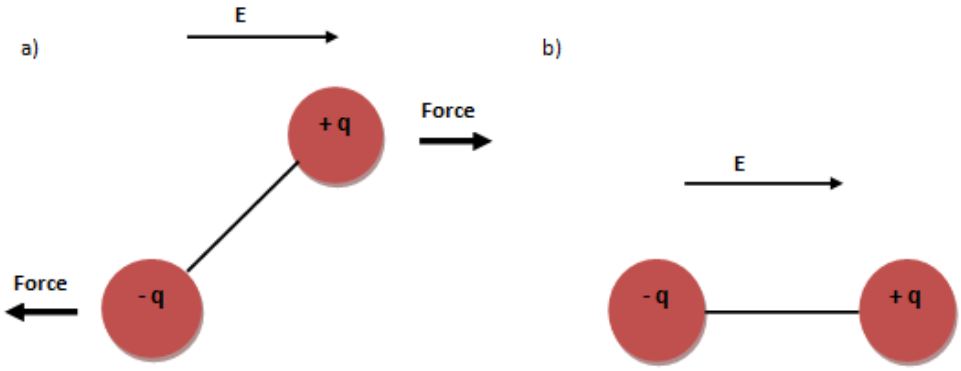


Figure I.1 : a) Force imposée à un dipôle par un champ électrique. b) Alignement du dipôle avec le champ électrique.

Pour des matériaux linéaires, cette polarisation est proportionnelle au champ appliqué, par la susceptibilité électrique **[12].**

$$P_k = \varepsilon_0 \, \chi_{kj} \, E_j \qquad \textbf{Eq.I.5}$$

Avec **:**

$\vec{\boldsymbol{P}}$ **:** C'est la polarisation diélectrique.

$\vec{\mathbf{E}}$ **:** C'est le champ électrique.

$\boldsymbol{\chi}$ **:** C'est la susceptibilité électrique, qui est une grandeur caractérisant la polarisation créée par le champ électrique.

Cette grandeur se réduit à un scalaire χ pour des matériaux isotropes et homogènes et l'équation I.4 devient :

$$\vec{P} = \varepsilon_0 . \chi . \vec{E} \qquad \textbf{Eq.I.6}$$

La permittivité relative ε_r s'obtient en combinant cette équation du vecteur induction électrique $\vec{D}$ et les équations de Maxwell :

$$\vec{P} = \varepsilon_0 . \chi . \vec{E} \qquad \textbf{Eq.I.6}$$

$$\vec{D} = \varepsilon_0 . \varepsilon_r . \vec{E} \qquad \textbf{Eq.I.7}$$

$$\vec{D} = \varepsilon_0 . \vec{E} + \vec{P} \qquad \textbf{Eq.I.8}$$

$$\varepsilon_r = 1 + \chi \qquad \textbf{Eq.I.9}$$

Il est important de signaler que, dans un diélectrique, différents types de polarisation peuvent intervenir pour différentes fréquences **[13] Figure I.2.**

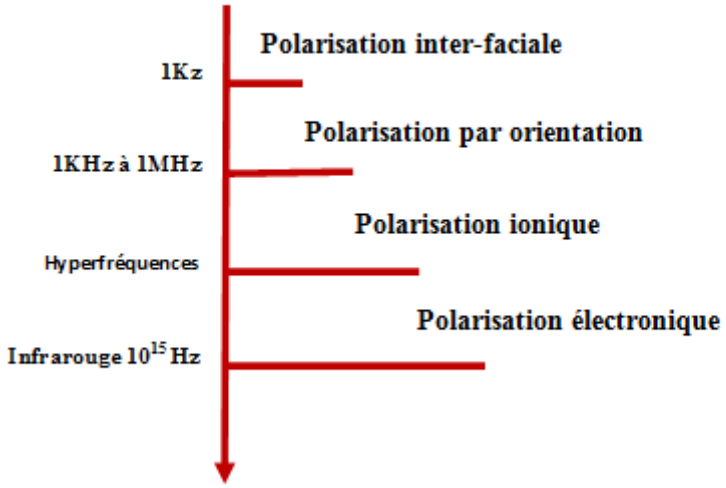


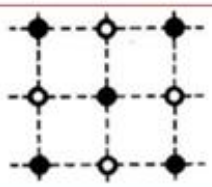
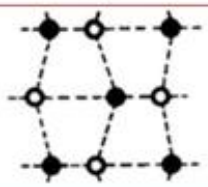
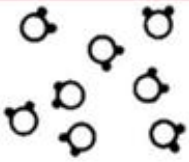
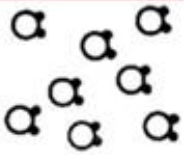
Figure I.2: Déférents types de polarisation.

Ces types de polarisations ont pour origine différents phénomènes :

- **La polarisation électronique** apparaît quand les nuages d'électrons se déplacent par rapport aux centres de masse des noyaux sous l'effet d'un champ électrique.
- **La polarisation ionique** apparait sous l'effet d'un champ électrique dans les matériaux ioniques formés des ions A^+ et B^-. Ces dernies quittent leur position initiale et déplacent en sens opposé, attirés respectivement en suivant le sens du champ appliqué.
- **La polarisation par orientation** aura lieu lorsque les molécules polaires d'un milieu vont chercher à aligner leur charge sous l'effet du champ électrique. C'est ce phénomène qui décrit le comportement des condensateurs électrochimiques.
- **La polarisation interfaciale** est liée aux mouvements libres des charges électroniques à l'intérieur des grains. Ces charges s'accumulent autour des défauts présents dans la structure

comme les joints de grains. Chaque grain du matériau devient alors un dipôle où les charges s'accumulent sur ces parois opposées.

Les différents types de polarisation sont illustrés schématiquement dans **le tableau I.1 :**

Type de polarisations	$\vec{E} = 0$	$\vec{E} \neq 0$
Electronique		
Ionique		
Par orientation		
Interraciale		

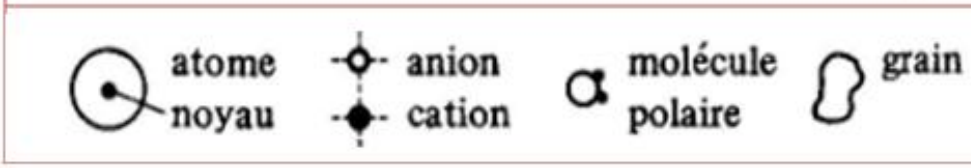


Tableau I.1: Représentation schématique de différents mécanismes de polarisation.

Si nous prenons le cas d'un condensateur, on peut déterminer la valeur de sa constante diélectrique puisque sa capacité sera détectée d'une part par la valeur de la permittivité du matériau diélectrique dont il est constitué, d'autre part par sa géométrie, selon la relation suivante :

$$C = \varepsilon S/e \qquad \textbf{Eq.I.10}$$

Avec : $\varepsilon = \varepsilon_r . \varepsilon_0$

C : Capacité du condensateur (F).

S : Surface des électrodes (m^2).

e : L'épaisseur du diélectrique (m).

ε **:** La permittivité diélectrique ($F.m^{-1}$**).**

ε_r : La permittivité relative.

ε_0 : La permittivité du vide ($F.m^{-1}$)

I.3. La piézoélectricité :

I.3.1. Définition de la piézoélectricité :

Le mot « pièzo », du Grec « piézein » signifie « appuyer » ou « presser ». 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 **[14].**

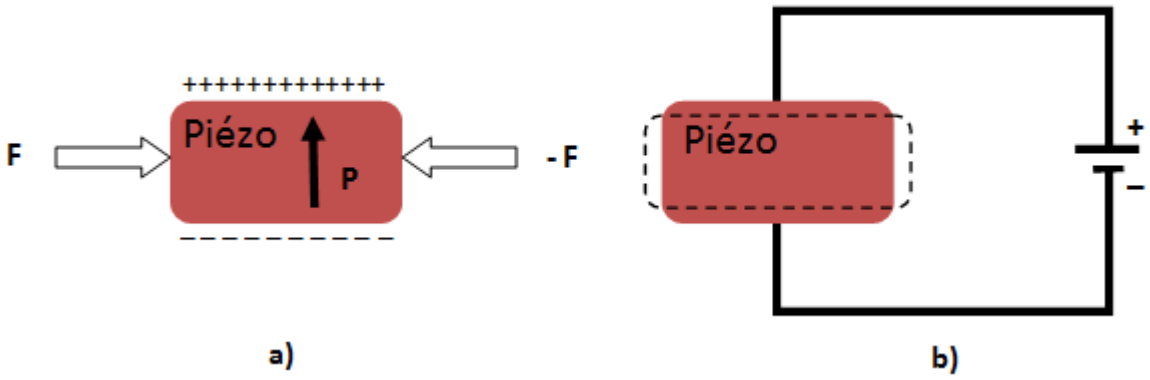


Figure I.3: Illustration de l'effet piézoélectrique : a) Effet piézoélectrique direct.

b) Effet piézoélectrique inverse.

I.3.2. Le principe de la piézoélectricité :

L'effet piézoélectrique traduit le couplage entre les effets mécaniques et les effets électriques. Dans les matériaux non Centro symétriques, l'application d'une contrainte

mécanique sépare les barycentres des charges positives et négatives faisant apparaitre un moment dipolaire. Cette polarisation dépend de l'orientation de la contrainte appliquée comme montre **les figures I.4** et **I.5.**

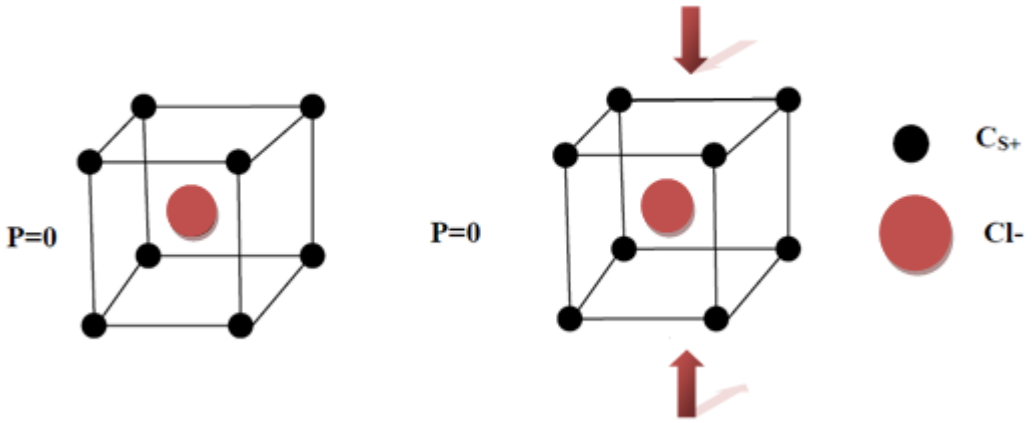


Figure I.4: Comportement du chlorure de césium (Cs Cl) Centro symétriques.

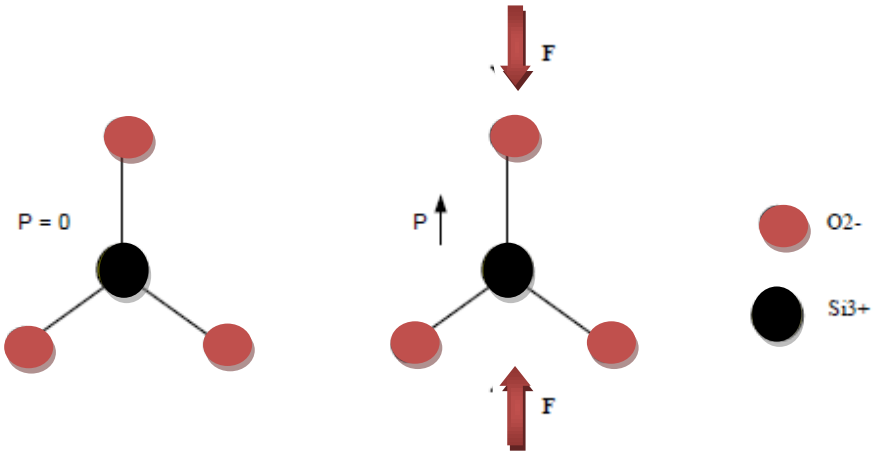


Figure I.5: Comportement du quartz (SiO2) non centrosymétrique [15].

Parmi les 32 classes cristallines existantes, on trouve 11 classes sont centrosymétriques[1] et 21 non centrosymétriques. Parmi les 21 classes non centrosymétriques, 20 permettent un effet piézoélectrique **(figure I.6).** Parmi ces 20 classes dont le point commun est de ne pas posséder de centre de symétrie, 10 se prêtent à la pyroélectricité[2]. Les cristaux de ces dix classes sont polaires, c'est à dire présentent une polarisation électrique naturelle. Cette polarisation électrique, compensée par la répartition des charges libres à l'intérieur ou sur la surface du cristal.

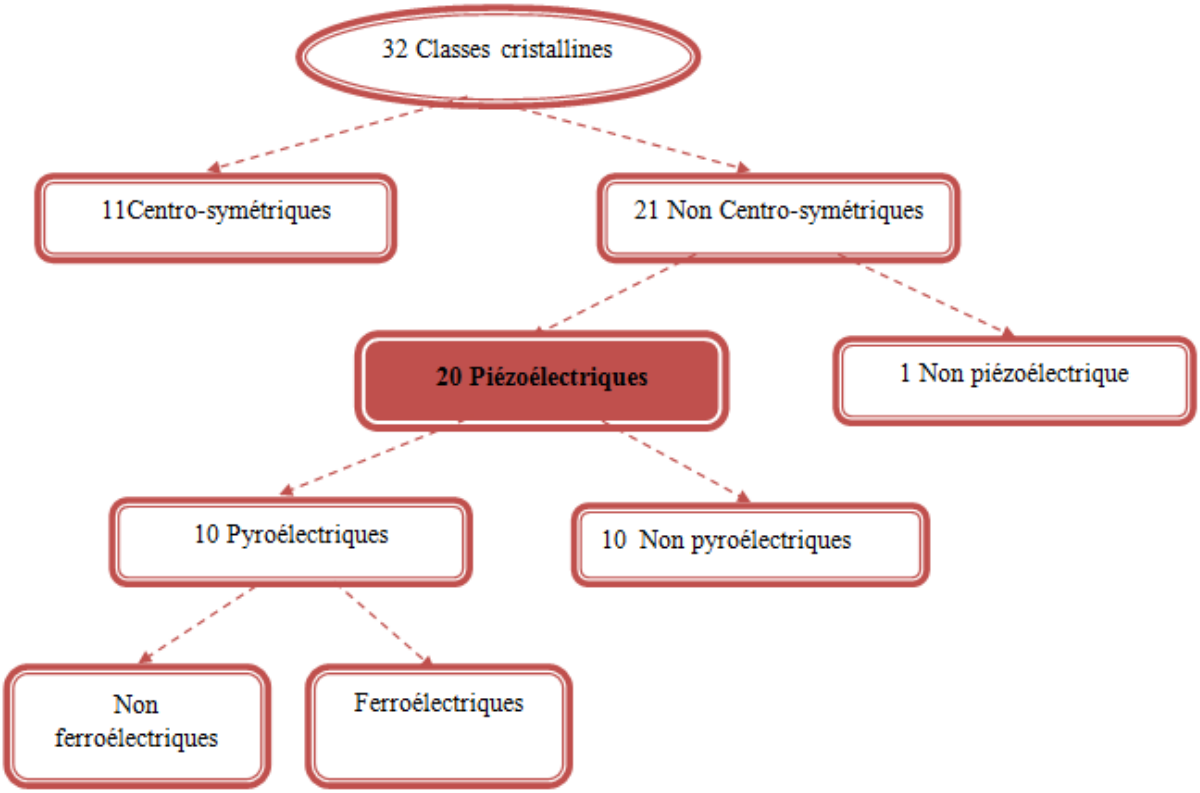


Figure I.6: Diagramme des Classes cristalines.

[1] ***Centrosymétriques:*** *Les cristaux ne peuvent présenter aucune polarisation.*

[2] **la pyroélectricité :** (du grec pyro, feu) c'est la propriété d'un matériau dans lequel un changement de température entraine une variation de polarisation électrique.

I.3.3. Les différents matériaux piézoélectriques :

Les matériaux piézoélectriques sont classés en deux groupes : naturels et artificiels.

I.3.3.a. Les matériaux piézoélectriques naturels :

- **Les cristaux :**

Certains cristaux tel que le quartz sont naturellement piézoélectriques, il est composé d'atomes de silicium portant des charges électriques positives et d'atomes d'oxygène portant des charges électriques négatives. Sur **la figure I.7**, on voit qu'en l'absence de déformation, le barycentre des charges positives et celui des charges négatives sont confondus. Par contre, en appliquant une force sur sa surface, on remarque qu'il y a déformation du matériau de sorte que le barycentre des charges positives et négatives ne se coïncide pas donnant naissance à une tension mesurable entre ces faces (l'effet direct).

Inversement, le cristal se déforme lorsqu'on lui applique une tension électrique on parle alors de l'effet inverse. Le quartz vibre à sa fréquence de résonance qui dépend de sa forme et de sa géométrie, pour plus de précision, le quartz vibre à haute fréquence (32 768Hz).

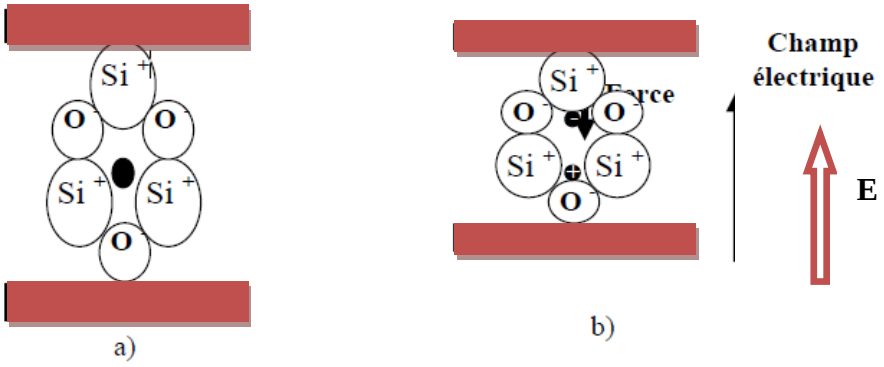


Figure. I.7: a) piézoélectricité du quartz naturel à l'équilibre.
b) avec une force appliquée [16].

I.3.3.b. Les matériaux piézoélectriques artificiels :

Ce sont des matériaux ferroélectriques qui présentent un phénomène piézoélectrique après polarisation. Dans les matériaux PE artificiels on trouve Les céramiques, les polymères et les composites.

- **Les céramiques :**

Le terme céramique décrit souvent des objets traditionnels comme des poteries, des briques et des tuiles. Mais le terme de céramique signifie plus généralement un solide qui n'est ni un métal ni un polymère. Une céramique est un matériau inorganique poly cristallin, présentant une structure complexe de grains et de joints de grains **(Figure I.8).** La plupart des céramiques modernes sont préparées à partir de poudres renforcées (mise en forme) et sont densifiées par un traitement thermique. Les procédés de fabrication des céramiques sont ajustables afin de pouvoir adapter leurs propriétés diélectriques, mécaniques et piézoélectriques à la demande **[17].**

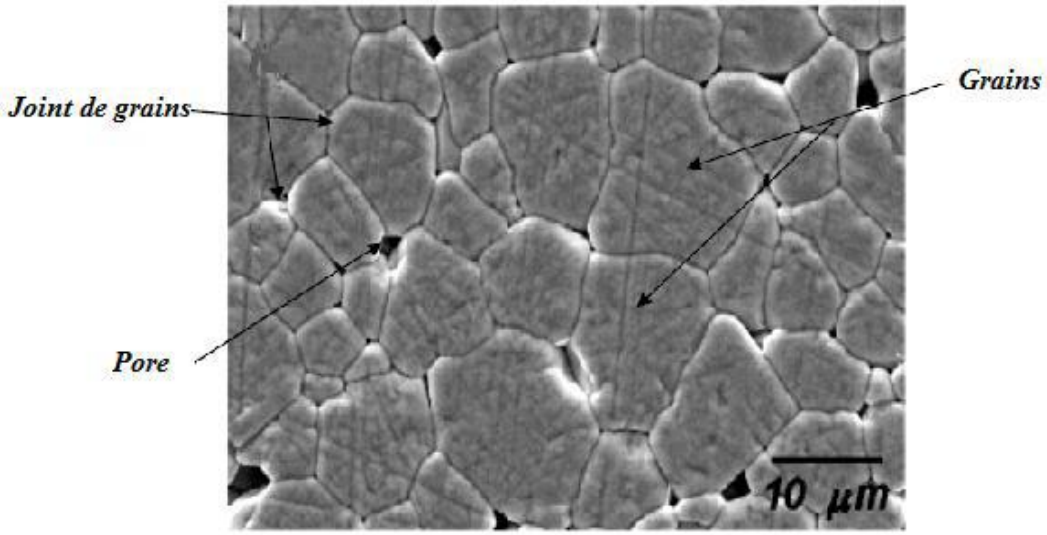


Figure. I.8: Microstructure typique d'une surface céramique polie qui illustre les grains.

Les céramiques piézoélectriques sont apparues dans les années quarante. Par leurs coefficients piézoélectriques bien supérieurs à ceux des cristaux, Les céramiques piézoélectriques sont incontestablement les matériaux les mieux adaptés à l'heure actuelle. La famille des céramiques piézoélectriques comporte de nombreux éléments, citons entre autres, les titanates de baryum (BaTiO3), les Zircono Titanates de Plomb, d'où leur appellation abrégée PZT. Notons que les céramiques sont des polycristaux qui sont fabriqués par frittage d'un mélange d'oxydes et que leur procédé de fabrication peut être modulé comme leur composition, afin d'ajuster leurs performances diélectriques, mécaniques et piézoélectriques. Pour assurer un bon usage des céramiques, le respect de certaines limites du champ et de la contrainte est nécessaire, sans quoi les céramiques risquent une détérioration.

- **Les Polymères piézoélectriques :**

Les polymères piézoélectriques, ou « muscles artificiels », sont définis comme des composés organiques légers, flexibles et capables de répondre à une stimulation électrique par un changement de dimension et de forme. Il existe deux types de polymères :

- Le polymère à base de fibres de caoutchouc, laine, cheveux, bois et soie.
- Le polymère polyvinylidine difluoride (PVDF), $(-CH_2-CF_2-)_n$, a une piézoélectricité dépassant plusieurs fois celle du quartz.

Les plus utilisée sont les PVDF car ils possèdent les caractéristiques suivantes **[18]:**

➔ Une grande flexibilité, ces matériaux peuvent subir de grandes déformations ce qui les rendent adaptables à des surfaces non planes

➔ Les faibles facteurs de couplage électromécanique (0,2 – 0,3).

➔ La tension de claquage est compensée par quelques propriétés remarquables comme le découpage facile en formes complexes.

➔La haute résistance mécanique et la possibilité d'avoir des films minces.

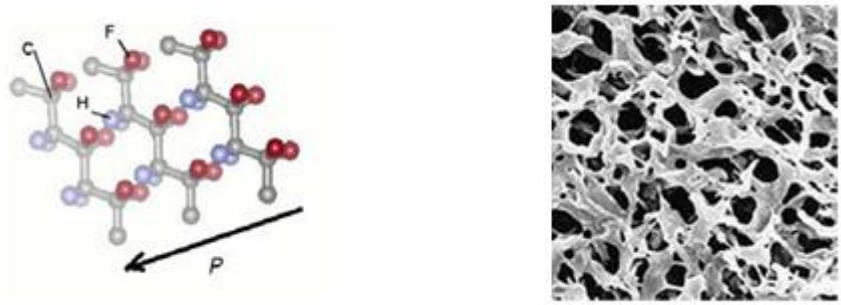


Figure. I.9: Structure du PVDF [15].

- **Les Piézocomposites :**

Le terme « composite» dans le domaine des matériaux signifie que deux ou plusieurs matériaux sont associés à l'échelle macroscopique afin de développer un matériau ayant des nouvelles propriétés.

Les piézocomposites sont caractérisés par des propriétés très intéressantes qui seront détaillés dans le chapitre suivant**.**

I.3.4. Les équations constitutives de la piézoélectricité :

La piézoélectricité étant un phénomène de couplage entre l'énergie électrique et l'énergie mécanique. Les équations linéaires constitutives de la piézoélectricité **[19]**, liantes les grandeurs mécaniques (déformation S ou contrainte T) aux grandeurs électriques (induction électrique D ou champ électrique E) illustrent ce phénomène. Trois types de coefficients interviennent :

- Un coefficient purement mécanique (s^E, s^D, c^E ou c^D).
- Un coefficient purement électrique (ε^T, ε^S, β^T ou β^S).
- Un coefficient mixte traduisant le couplage électromécanique (*d*, *e*, *g* ou *h).*

Selon le choix de ces variables indépendantes (imposées par les conditions aux limites de la sollicitation extérieure sur l'échantillon étudié), les équations peuvent se présenter sous les formes suivantes **:**

$$\left.\begin{array}{ll} D = dT + \varepsilon^T E & S = s^E T + d^t E \\ E = \beta^T D + gt & S = s^D T + g^t D \\ D = \varepsilon^S E + eS & T = C^E S - e^t E \\ E = \beta^S D - hS & T = C^D S - h^t D \end{array}\right\} \quad \textbf{Eq.I.11}$$

$[\ ]^t$ est la transposée de la matrice [ ].

$(\ )^x$ indique que la grandeur est considérée à X constant ou nul.

Les grandeurs et les coefficients utilisés, leurs noms, ainsi que leurs unités sont résumés dans **le Tableau I.2** suivant **:**

Grandeurs	Termes	Définitions	Matrices
Electriques	D	Déplacement électrique ou induction (C/m^2)	(3 * 1)
	E	Champ électrique (V/m)	(3 * 1)
	Ɛ	Permittivité électrique (F/m)	(3 * 3)
	β	Constante d'imperméabilité électrique (m/F)	(3 * 3)
Mécaniques	S	Déformation relative	(6 * 1)
	T	Contrainte (N/m^2)	(6 * 1)
	s	Susceptibilité (m^2/N)	(6 * 6)
	c	Raideur ou constante élastique (N/m^2)	(6 * 6)

Tableau I.2: Grandeurs électriques et mécaniques.

I.3.5. Les coefficients piézoélectriques :

On dénombre quatre coefficients Piézoélectriques différents formant une matrice de 3 lignes et de 6 colonnes qui traduit le couplage entre les grandeurs électriques et les grandeurs mécaniques. A partir des équations précédentes, on détermine les relations suivantes :

$$\left.\begin{aligned} d_{mi} &= \varepsilon^{\sigma}_{mn}\, g_{ni} = e_{mj}\, \varepsilon^{E}_{ji} \\ g_{mi} &= \beta_{mn}{}^{\sigma}\, d_{ni} = h_{mj}\, \varepsilon^{D}_{j} \\ e_{mi} &= \varepsilon^{\varepsilon}_{mn}\, h_{ni} = d_{mj}\, c^{E}_{ji} \\ h_{mi} &= \beta_{mn}{}^{\sigma}\, e_{ni} = g_{mj}\, c^{D}_{ji} \end{aligned}\right\} \quad \textbf{Eq.I.12}$$

Avec m, n = 1 à 3 et i, j = 1 à 6.

Les deux indices des coefficients piézoélectriques désignent respectivement la direction de l'axe de polarisation et celui de la déformation de l'échantillon. Les indices i, j, m et n respectent la notation tensorielle de la figure I.10 **[20].**

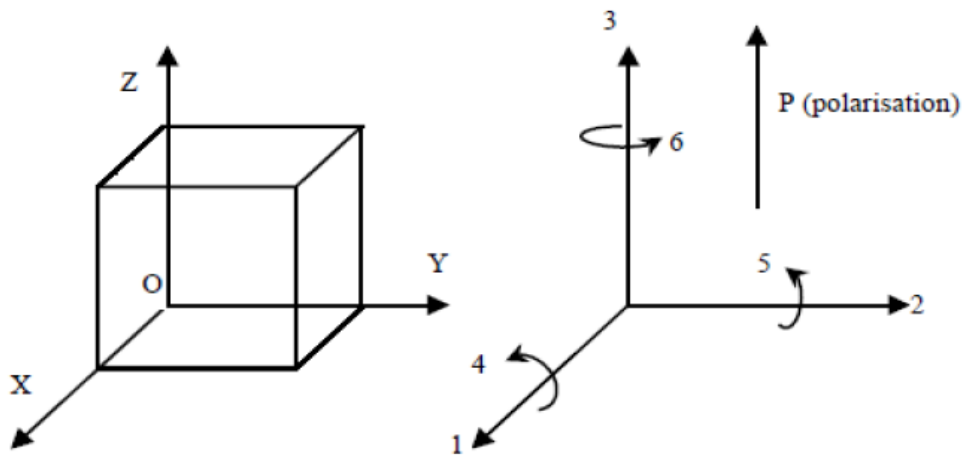


Figure I.10: Définition des directions dans un milieu piézoélectrique.

➔La constante de charge d :

Elle traduit la proportionnalité entre la contrainte et l'induction électrique à champ nul ou constant (en C/N ou m/V).

➔La constante de tension g :

Elle traduit la proportionnalité entre la contrainte mécanique et le champ électrique à induction nulle ou constante (en V m/N ou m2/C).

➔La constante piézoélectrique e :

Elle traduit la proportionnalité entre la déformation et l'induction électrique à champ nul ou constant(en C/m2 ou N/V m).

➔La constante piézoélectrique h :

C'est le coefficient piézoélectrique traduisant la proportionnalité entre la déformation et le champ électrique à induction nulle ou constante (en V/m ou N/C).

I.3.6. Le coefficient de couplage électromécanique :

Les équations de la piézoélectricité permettent de déterminer l'importance du couplage électrostatique. Cependant du fait de leur caractère tensoriel, elles sont très lourdes et difficiles à utiliser. En pratique, on préfère caractériser le couplage par scalaire que l'on appelle un coefficient de couplage. Ce coefficient définit la capacité d'un matériau piézoélectrique à transformer l'énergie électrique en énergie mécanique et vice versa.

Il est obtenu à partir d'une étude thermodynamique du système considéré linéaire, en négligeant les effets thermiques, on peut notamment écrire **[21]** :

$$K^2 = \frac{\text{énergie transform ée}}{\text{énergie fournie}} = \frac{\Delta W_{\text{électrique}}}{\Delta W_{\text{mécanique}}} \qquad \textbf{Eq.I.13}$$

- **Les méthodes de résonance-antirésonance :**

C'est la méthode standard de caractérisation des céramiques piézoélectriques. En mesurant l'impédance complexe de différents échantillons de formes et de dimensions différentes en fonction de la fréquence.

Les éléments piézoélectriques soumis à un courant alternatif entrent en vibration. Chaque matériau piézoélectrique possède une fréquence propre; il est donc possible de déterminer une fréquence vibratoire de résonance, pour laquelle les compressions et extensions du cristal sont synchrones avec la fréquence du courant appliqué. La particularité de cette fréquence est une libération d'énergie maximale. C'est de cette façon que l'on peut atteindre des pics de puissance, nécessaires dans certaines applications. La composition de la matière céramique, la forme et le volume de l'élément déterminent la fréquence de résonance - généralement, un élément plus épais présente une fréquence de résonance inférieure à celle d'un élément plus mince de la même forme.

Il existe aussi la fréquence d'antirésonance qui est la fréquence de signal d'excitation qui correspond à la fréquence d'impédance maximale comme illustré dans la **Figure I.11** et aussi à une amplitude minimale du signal de sortie.

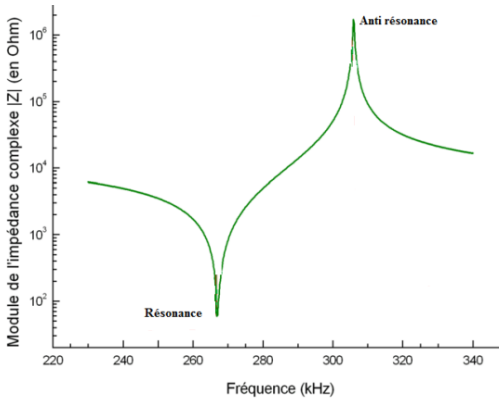


Figure I.11 : Représentation des fréquences de résonance et anti résonance

I.3.7. Les matrices piézoélectriques:

Les matériaux piézoélectriques sont anisotropes, il est donc nécessaire de définir des tenseurs (souplesse,...). Il existe 6 mouvements possibles dans l'espace, qui sont représentés par le trièdre suivant, 3 mouvements de translation et 3 mouvements de rotation. La direction de polarisation est toujours choisie selon l'axe 3.

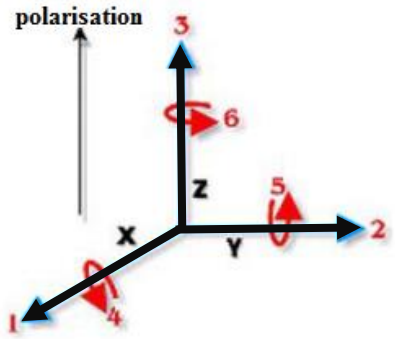


Figure I.12: Repère associé aux vecteurs contrainte et déformation[11].

Le champ électrique «E et l'induction électrique D sont des vecteurs à 3 composantes. La contrainte T et la déformation S sont des tenseurs à 6 composantes : les 3 axes du repère, et les axes croisés correspondant aux rotations. De ce fait, la souplesse « s » s'exprime sous la forme d'un tenseur (6 * 6), les coefficients piézoélectriques d sous la forme d'un tenseur (6 * 3), et la permittivité électrique sous la forme d'un tenseur (3 * 3).

On va définir quelques matrices présentées dans les équations (**Eq.I.8**) :

➔La matrice de souplesse $\mathbf{s}^{E}$:

La contrainte et la déformation agissent sur les axes définis à la **Figure I.12.** la souplesse « s » est définie pour chacun des cas, c'est à dire pour les trois translations (allongements) et les trois rotations (cisaillements).

Par exemple, S_{31}^{E} est la souplesse à champ électrique constant pour une contrainte dans la direction 1, avec une composante de déformation dans la direction 3 selon l'axe z.

La matrice de souplesse s^E s'écrit **[22]**:

$$s^E = \begin{pmatrix} S_{11}^E & S_{11}^E & S_{13}^E & 0 & 0 & 0 \\ S_{11}^E & S_{11}^E & S_{11}^E & 0 & 0 & 0 \\ S_{13}^E & S_{13}^E & S_{33}^E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44}^E & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{44}^E & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66}^E \end{pmatrix}$$

➔La matrice de permittivité ε^T :

Le champ et le déplacement électrique sont définis uniquement dans les trois directions principales (pas de rotations).

De plus, il n'y a pas d'interaction entre différents axes et ε^T est donc une matrice diagonale. Ainsi, à contrainte constante, ε_{33}^T est la permittivité pour un déplacement et un champ dans la direction de polarisation.

La matrice de permittivité ε^T s'écrit **[22]** :

$$\varepsilon^T = \begin{pmatrix} \varepsilon_{11}^T & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{11}^T & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{33}^T \end{pmatrix}$$

➔La matrice des constantes de charge d :

Le premier indice correspond à la direction de la grandeur électrique (champ ou déplacement) et le deuxième à la direction de la grandeur mécanique (contrainte ou déformation).

Comme exemple, $\mathbf{d_{31}}$ est le rapport entre la déformation dans la direction 1 et le champ électrique dans la direction 3 et on peut écrire :

$$d = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{31} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

I.3.8. Les modes de vibrations :

A chacune des fréquences de résonance d'une céramique piézoélectrique est associé un mode de vibration. La nature de ces modes, autrement dit la distribution spatiale de la géométrie considérée, dépend de ses dimensions, de la direction du champ d'excitation E et du vecteur de polarisation. Les principaux modes sont illustrés dans **la figure I.13.**

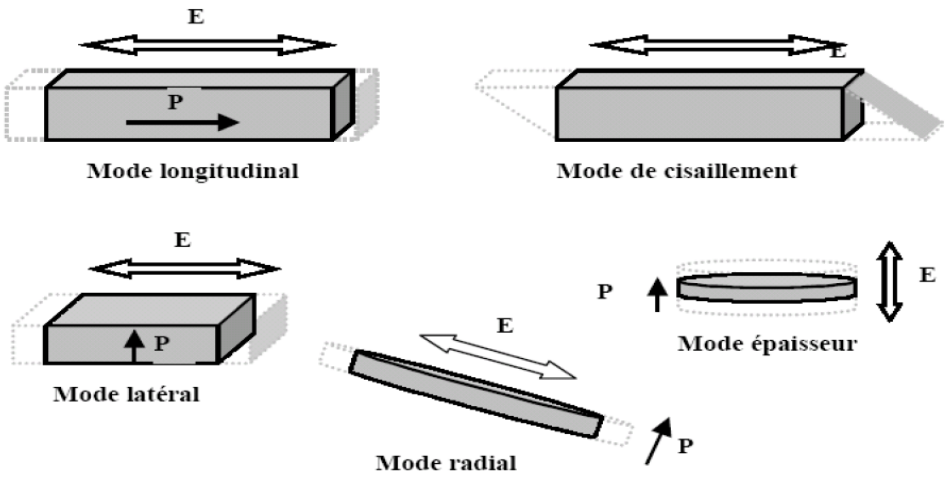


Figure I.13: Modes de vibrations fondamentaux d'une céramique piézoélectrique.

Les deux modes de couplage qui sont classiquement exploités sont :

➔Le mode 33 ou la déformation est de même sens que la polarisation.

➔Le mode 31 ou la déformation est perpendiculaire à la polarisation.

Un système d'axe 1, 2, 3 est habituellement utilisé pour identifier les directions. L'axe 3 est l'axe de polarisation du matériau.

a) b)

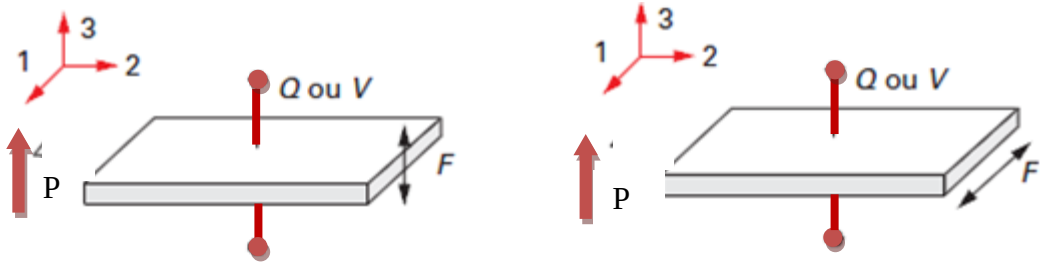


Figure I.14: Illustration des modes de couplages : a) le mode 33 et b) le mode 31.

Le coefficient de couplage dépend de la forme du matériau, de mode de vibration et de la distribution des lignes de champ permettant d'exciter et de détecter ces vibrations. **Le tableau I.3**, présente suivant le mode de vibration, les expressions qu'il peut prendre et les constant mesurées.

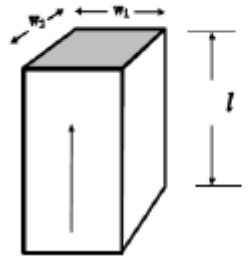
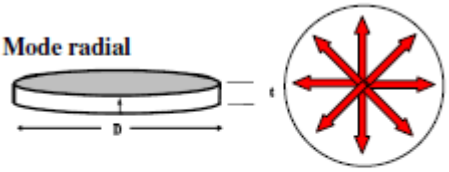
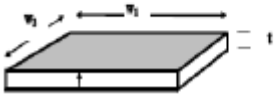
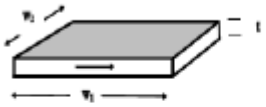
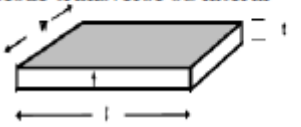
Mode de vibration	Dimensions	Constantes mesurées
Mode longitudinal **Déformation** 	$l > 5w_1$, $l > 5w_2$	k_{33}, d_{33}, g_{33}, ε_{33}^T, ε_{33}^S s_{33}^D, s_{33}^E , Q_{33}
Mode radial 	20 t < D	k_p, d_{31}, , ε_{33}^T, s_{11}^E, s_{12}^E
Mode en épaisseur 	$10\,t < w_1$, $10\,t < w_2$ pour un disque (20 t < D)	k_t , e_{33}, h_{33}, ε_{33}^S c_{33}^D, c_{33}^E, Q_t
Mode de cisaillement 	w_1 et $w_2 > 10\,t$	k_{15}, d_{15}, g_{15}, ε_{11}^T, ε_{11}^S s_{55}^D, s_{55}^E , c_{55}^D, c_{55}^E, Q_{15}
Mode transverse ou latéral 	$l > 10\,t$, $w > 3t$ et $l > 3w$ pour un disque (20 t < D)	k_{31}, d_{31}, g_{31}, ε_{33}^T s_{11}^D, s_{11}^E , Q_{31}

Tableau I.3: Formes d'échantillons pour caractérisation des modes fondamentaux.

I.4. La ferroélectricité :

I.4.1. Définition de la ferroélectricité :

La ferroélectricité est l'aptitude de certains cristaux à posséder une polarisation spontanée même en absence d'un champ électrique. Cette polarisation est susceptible d'être réorientée ou même renversée sous l'action du champ électrique extérieur.

Les matériaux ferroélectriques forment un sous-groupe des matériaux piézoélectriques qui ont la propriété particulière d'avoir une polarisation modifiable dans certaines conditions et sous un champ électrique excitateur**.** Le matériau ferroélectrique le plus connu est titanate du baryum (Ba TiO3).Sa très grande permittivité a été mise en évidence en 1941 par Thurnauer et il a été reconnu comme étant ferroélectrique en 1945.

I.4.2. La Polarisation des materiaux ferroelectriques et le cycle d'hystérésis :

Le plus souvent, les matériaux sont élaborés sous forme de céramiques polycristallines qui sont des ensembles de grains soudés entre eux après l'étape de frittage. Pour des raisons énergétiques chaque grain est devisé en domaines au sein desquels les dipôles sont orientés dans la même direction, deux domaines adjacents possèdent des directions de polarisations différentes, et sont séparés par une frontière appelée « mur de domaine » **[13].** Lorsqu'on applique un champ externe intense qui aligne dans sa direction la polarisation des domaines, les murs de domaines vont alors se déplacer, certains domaines vont croitre en volume et d'autres disparaitre avec l'augmentation du champ. Ce processus s'appelle la polarisation du matériau.

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.15.**

La polarisation existant pour un champ électrique nul, est dite polarisation rémanente.

Le champ coercitif « Ec », champ électrique externe nécessaire pour la réorientation des dipôles du matériau ferroélectrique.

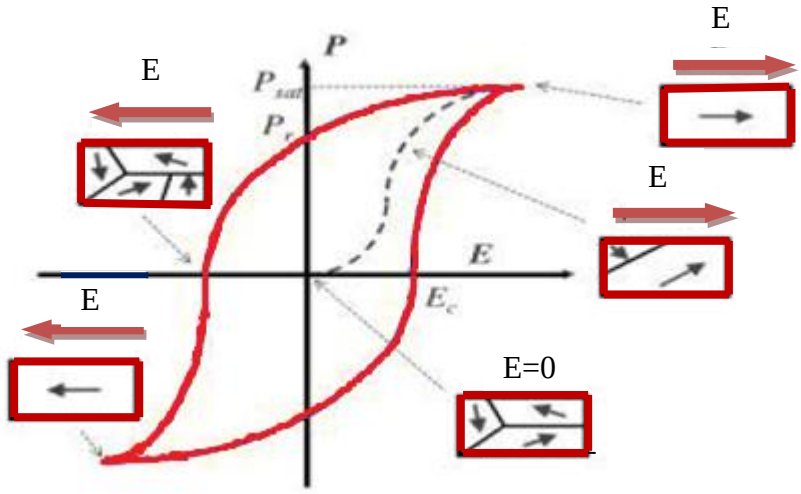


Figure I.15: Cycle d'hystérésis caractéristique d'un matériau ferroélectrique [20].

- **Le point de Curie :**

La température de Curie Tc est la température à laquelle un matériau ferroélectrique subit une transition de phase vers un état où la polarisation spontanée disparaît. La transition de phase correspond à un changement dans la structure cristalline.

Au point de Curie, la permittivité diélectrique relative ε_r atteint une valeur maximale. Au delà de la température de Curie, le matériau ferroélectrique devient paraélectrique.

I.2.3. Les céramiques ferroélectriques de type pérovskite :

Les pérovskites forment une large famille de matériaux cristallins dont le nom dérive d'un minéral naturel: le titanate de calcium (CaTiO3) identifié par le minéralogiste russe L.A.Perovski **[23].** La formule générale d'une pérovskite est ABO_3. Dans la forme la plus simple, l'arrangement atomique est représenté par une maille cubique. Les sommets du cube sont occupés par le cation A de coordinence 12, le centre de la maille est occupé par le cation B de coordinence 6 et les oxygènes sont situés au centre des faces. **La figure I.16** est une représentation de la maille pérovskite cubique de $BaTiO_3$ **[25].**

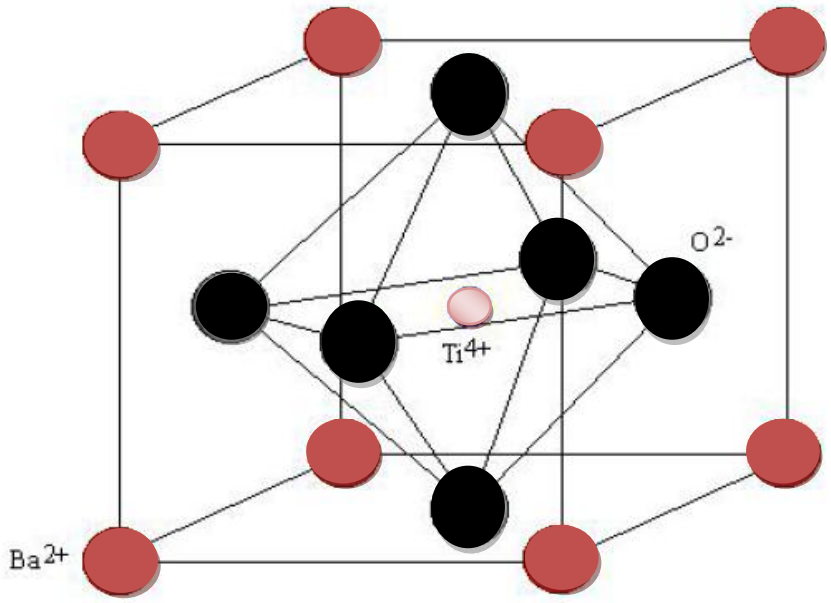


Figure I.16: Structure pérovskite cubique de $BaTiO_3$.

En fonction des types d'atomes qui occupent les sites a et b, on distingue deux catégories de structure pérovskite :

➔**Structures pérovskites simples :** Ce sont les structures $AB0_3$ dont les sites A et B sont occupés par un seul type d'atome : $PbTiO_3$, $BaTiO_3$, $SrTiO_3$, $KNbO_3$, …

➔**Structures pérovskites complexes** : Ce sont des structures ABO_3 dont l'un des sites A ou B est occupé par deux types d'atomes : $Na_{0.5}Bi_{0.5}TiO_3$, $Ka_{0.5}Bi_{0.5}TiO_3$, $Pb(Zr_{0.5}Ti_{0.5})\ O_3$,…

Il est important de noter qu'au dessous de la température de Curie, la structure pérovskite se déforme légèrement, passant de cubique à tétragonale **(figure. I.14).** Les déplacements sont de l'ordre de 10^{-11} m, le côté du cube valant environ 4 10^{-10} m. Ils confèrent à la structure déformée un moment dipolaire qui, par raison de symétrie, peut posséder six orientations différentes. L'interaction entre dipôles voisins provoque l'alignement responsable de l'apparition des domaines ferroélectriques.

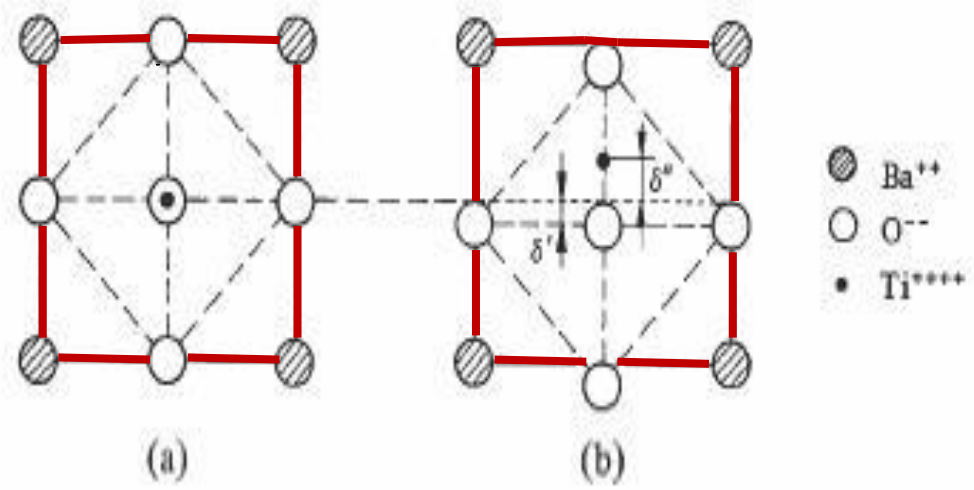


Figure I.17: a) Structure originale de $BaTiO_3$ (T<Tc).

b) Structure déformée (T>Tc).

Les Zircono-Titanate de Plomb (PZT) constituent maintenant la première source de ferroélectriques à structure pérovskite. Ils sont élaborés à partir d'un mélange binaire de $PbTiO_3$ et de $PbZrO_3$ formant des solutions solides de PZT ($PbZr_{1-x}\ Ti_xO_3$) dont les caractéristiques piézoélectriques et diélectriques sont nettement supérieures à celles des composés initiaux.

La majorité des travaux concerne des pérovskites sont à base de plomb qui est considéré depuis longtemps comme dangereux pour l'homme et l'environnement. Les symptômes les plus

courants dus à une intoxication au plomb (également appelé saturnisme) sont la fatigue ainsi que des douleurs abdominales, musculaires et articulaires. Pour cela, ces vingt dernières années, une activité de recherches très importante a été dédiée à l'étude de composé sans plan.

Les symptômes et les signes d'intoxication au plomb sont résumés dans **le tableau I.4 [26]** en fonction de leur gravité.

Faibles	Modérés	Important
Léthargie	Anémie	Convulsions
Anorexie	Mal de tête	Coma
Gène abdominale	Crampe abdominale	Encéphalopathie
Arthrose	problème de gencives (apparition d'une ligne bleue)	Disfonctionnement rénaux
	Problèmes neurologiques liés à la zone périphérique (motricité)	

Tableau I.4: Symptômes et conséquences classés par degré de gravité d'une intoxication au plomb.

CONCLUSION :

La piézoélectricité est une propriété exploitée dans de nombreux dispositifs utilisant la conversion d'une énergie électrique en énergie mécanique ou vice-versa. Citons par exemple les jauges de contraintes, certains microphones et cellules de tourne-disque, les émetteurs d'ultrasons, les capteurs etc. Comme tous les corps élastiques, les cristaux piézoélectriques présentent des fréquences de résonance mécanique. En raison de la polarisation qui leur est

associée, les vibrations peuvent être captées et entretenues très facilement au moyen d'un circuit amplificateur. Des étalons de fréquence très précis sont ainsi réalisés.

Dans ce chapitre, nous avons vu les généralités et les définitions associées au diélectrique, la piézoélectricité et la ferroélectricité. Nous présentons également une description plus détaillée des matériaux piézoélectriques. Puis après avoir rappelé les équations régissant la piézoélectricité, pour pouvoir effectuer le bon choix du matériau utilisé dans l'application qui sera présenté dans le troisième chapitre.

Chapitre II : les composites piézoélectriques céramique/polymère

INTRODUCTION :

Le développement des matériaux composites est né de la volonté d'allier les qualités techniques au besoin d'allégement dans un même matériau, qui par la suite doit s'adapter aux solutions technologiques des problèmes à résoudre.

Au cours de ces dernières années, les industries de la transformation des matériaux composites ont bénéficié d'une croissance rapide et régulière, soutenue en particulier par la diversité des applications. L'utilisation des matériaux composites s'est imposée depuis ces dernières années dans différents secteurs industriels. Leurs principales applications se trouvent dans le transport aérien, maritime, le médical … etc.

II.1. Les matériaux composites :

II.1.1. Définition :

Un matériau composite est un matériau hétérogène, anisotrope formé d'au moins deux constituants non miscibles, disposés selon une organisation géométrique particulière. Pratiquement, tous les composites sont constitués :

- De renforts, prenant généralement la forme de fibres ou de particules, assurant la tenue mécanique du composite.
- D'une matrice, qui est généralement une matière plastique qui assure la retransmission des efforts vers le renfort.

Cette association conduit à un matériau dont les performances sont supérieures à celles d'un matériau à un seul constituant **[27].**

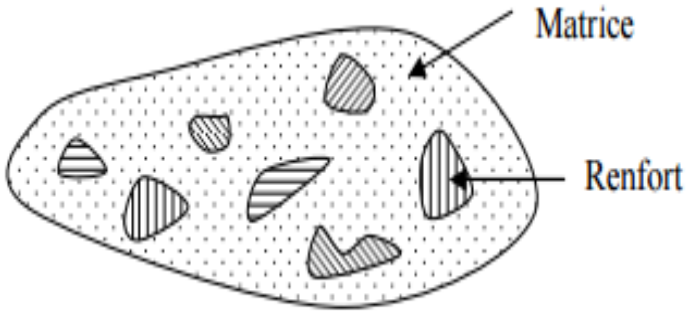


Figure II.1: Schéma d'un matériau composite.

II.1.2. Classification des composites :

Les composites peuvent être classifiés suivant la forme de leurs composants. Ainsi, on distingue:

- **Les composites fibreux,** qui sont constitués par des fibres enrobées dans une matrice.
- **Les composites à structure lamellaire,** constitués par un empilement de couches de différents matériaux.
- **Les composites fabriqués à partir de grains noyés dans une matrice.**
- **Les composites hybrides**, qui peuvent être une combinaison des structures précédentes.

Les premiers composites fabriqués par l'homme ont été le torchis (terre renforcée de paille) et le papier, puis bien après sont apparus le béton et le contreplaqué qui peuvent être considérés comme les premiers matériaux composites industriels. Les composites les plus utilisés actuellement sont réalisés à partir d'agents de renfort (fibre de verre, polyamide, carbone...) noyés dans une résine synthétique (époxy, polyester, silicone...).

Enfin, plus récemment, des matériaux composites à matrice métallique (aluminium, titane) ou céramique (silice, alumine) ont vu le jour. Chaque propriété globale d'un matériau composite peut être le résultat de l'un des trois effets suivants **[28]**:

- **Effet de somme:** les deux phases ont une grandeur physique de valeur différente A et B. La grandeur physique C du composite est une combinaison de A et B seulement, qui est la valeur moyenne géométrique ou arithmétique de ces deux grandeurs.

Exemple: la raideur ou la permittivité.

- **Effet de produit:** les deux phases ont une grandeur C en commun, qui est en relation avec une grandeur A dans une phase, et une grandeur B différente dans l'autre. Toute variation de A va influer sur B (et réciproquement) par l'intermédiaire de C. Ainsi le composite aura un paramètre C qui va être en fonction de deux grandeurs physiques qui peuvent être totalement différentes.

On peut citer à titre d'exemple le cas du composite magnétoélectrique réalisé à partir d'une phase piézo-électrique (BaTiO3) et d'une phase magnétostrictive $(CoTiFe)_3 O_4$.

Les grains de $(CoTiFe)_3 O_4$, en changeant de forme sous l'effet d'un champ magnétique transmettent leur déformation aux grains de BaTiO3 voisins, d'où l'apparition d'une

polarisation électrique. Cet effet permet d'obtenir des propriétés pour le composite totalement absentes dans chacune des deux phases.

- **Effet de combinaison:** une propriété du composite est en relation avec plusieurs grandeurs physiques dans les deux phases. Ce type d'effet permet d'observer des propriétés globales beaucoup plus importantes que dans chacune des deux phases prise séparément.

Exemple: Coefficient de Poisson[3].

II.2. Les matériaux composites piézoélectriques :

II.2.1. Définition:

Un composite piézo-électrique résulte de l'association d'au moins un matériau piézo-électrique (céramique) avec une ou plusieurs phases non piézo-électriques (polymère ou même air). En général, un piézocomposite est défini par l'arrangement géométrique entre les deux phases. Pour définir la façon dont les phases sont associées entre elles, Newnham et Al **[29]** ont introduit la notion de connectivité. Pour expliquer ce terme, il faut considérer un cube de matériau composite dont les dimensions sont grandes comparées aux inhomogénéités **(Figure II.2).**

Le concept de connectivité est un moyen pratique pour décrire la manière dont les différentes phases sont autonome connectés (en continu). Autrement dit elle représente le nombre de directions selon lesquelles il est possible de traverser le cube de part en part sans quitter la phase considérée. Par conséquent ce chiffre est compris entre 0 et 3, le « 0 » signifie que la phase est fabriquée sous la forme des particules. Un composite est alors classé suivant la connectivité de chacune de ses phases (un numéro par phase), où le premier nombre dans la notation représente la connectivité de la phase active et le second chiffre se réfère à la connectivité de la phase passive. Pour les composites piézoélectriques, différentes connectivités ont été étudié notamment: 0-3, 1-3, 2-2, 2-3, 3-0, 3-1, 3-2 et 3-3.

[3]**Coefficient de Poisson (υ)** : Il fait partie des constantes élastiques, Il permet de caractériser la contraction de la matière perpendiculairement à la direction de l'effort appliqué ($-1 \leq \upsilon \leq 0.5$).

Pour un composite biphasé, la **Figure II.2** représente les différentes connectivités possibles :

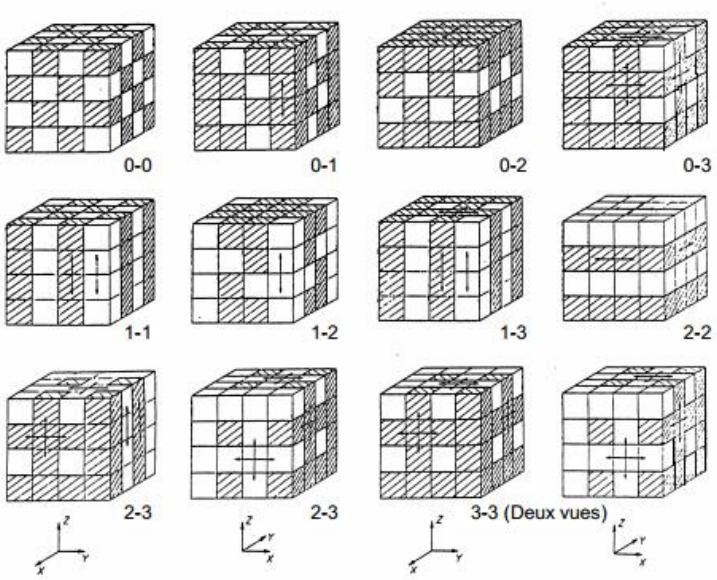


Figure II.2: Les différentes connectivités pour un composite biphasé [29].

Sur la base de connectivités, une multitude de configuration composite céramique / polymère a été réalisée et étudiée. La plupart sont illustrés dans **la figure II.3 [30]** :

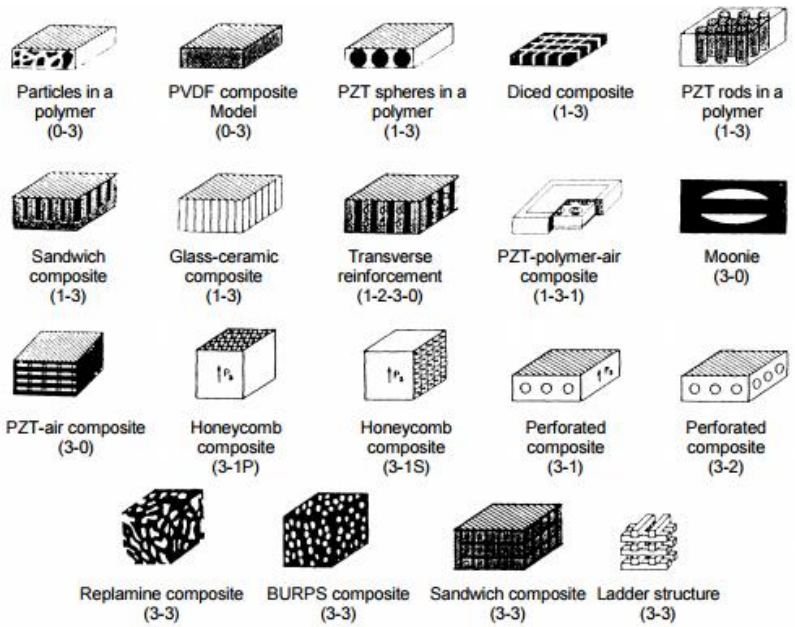


Figure II.3: Les principales réalisations de composites piézo-électriques [30].

Remarque : Tous ces matériaux composites ont montrés l'amélioration des propriétés piézoélectriques.

Parmi toutes les structures réalisées, on peut citer les plus couramment utilisées:

- **Les composites de connectivité 0.3 :**

Le composite de connectivité 0.3 est constitué de grains de poudre ferroélectrique noyés au hasard dans une matrice de polymère 3D. Son principal avantage est la grande flexibilité, ce qui permet de faciliter la réalisation des formes complexes telles que des surfaces incurvées. En revanche ses propriétés dépendent non seulement des constituants mais également de la méthode de fabrication. Il est en effet difficile de réaliser une distribution des grains de PZT uniforme dans toute la matrice polymère. De plus, la polarisation de ce type de composite est très délicate. En effet, étant donnée la grande différence de permittivité diélectrique entre le polymère (ε_r<10) et la céramique piézoélectrique (ε_r>1000), le champ électrique appliqué sur ces derniers est très faible.

- **Le composite de connectivité 3.3 :**

Le composite 3.3 est le premier composite biphasé à avoir été étudié. Chaque phase est connectée à 3 dimensions. Ce type du composite a été initialement fabriqué par une technique de moulage à la cire perdue (liant) en utilisant une réplique en cire d'un squelette de corail. Un autre composite 3.3 (BURPS composite) a été développé. Dans cette technique, une structure de céramique poreuse interconnectée suivant 3 dimensions est obtenue par le frittage d'un mélange compacté entre les sphères de polymère et la poudre de céramique. Ce type de composite offre des activités piézoélectriques plus élevés par rapport à 0.3. Parmi les propriétés de ce composite on donne :

- Haute sensibilité hydrostatique.
- Faible constante diélectrique.
- Faible densité qui a pour effet d'améliorer l'adaptation d'impédance acoustique avec l'eau.
- La flexibilité mécanique nécessaire pour développer des transducteurs compatibles.

- **Le composite de connectivité 1.3 :**

Ce type est constitué des barreaux de PZT enrobés dans une matrice polymère est l'objectif de cette étude sera donc détaillé par la suite.

- **Le composite de connectivité 2.2 :**

Le composite de connectivité 2.2 est composé de lamelles des deux phases PZT et polymère alternées et collées les unes aux autres, ce modèle a été utilisés pour les différents

capteurs, actionneurs, telles que les actionneurs multicouches et dimorphe actionneurs ou capteurs, ce type de composite est la base de nombreuses théories, car il constitue une simplification du composite 1.3.

La figure suivante représente les connectivités les plus couramment utilisées : 2-2, 1-3, 0-3 et 3-3.

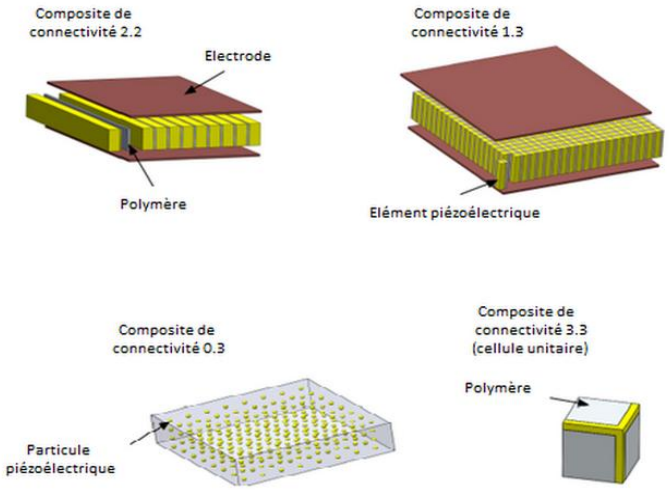


Figure II.4: Représentation des piézocomosites de connectivité 2-2, 1-3, 0-3 et 3-3[31].

La connectivité des composites la plus largement utilisée est la 1-3, d'ailleurs, elle peut utiliser efficacement les avantages géométriques des matériaux piézoélectrique offrant des facteurs de couplage électromécanique plus élevés.

Exemple de propriété électromécanique en fonction de la connectivité et la fraction volumique est donné dans **la figure. II.5**.

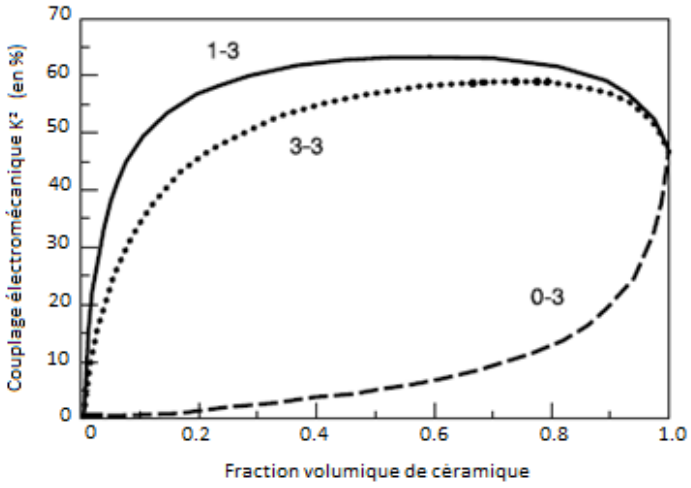


Figure II.5: Représentation du coefficient de couplage électromécanique pour les connectivité 1-3, 3-3 et 0-3 en fonction de la fraction volumique de céramique piézoélectrique [31].

II.2.2. Les Composite piézoélectrique 1.3 :

Un piézocomposite 1.3 se compose des barreaux ou fibres d'un matériau piézoélectrique (par exemple, le PZT) qui sont arrangés en parallèle suivant la direction de polarisation et d'un polymère constituant la matrice **(Figure II.6).**

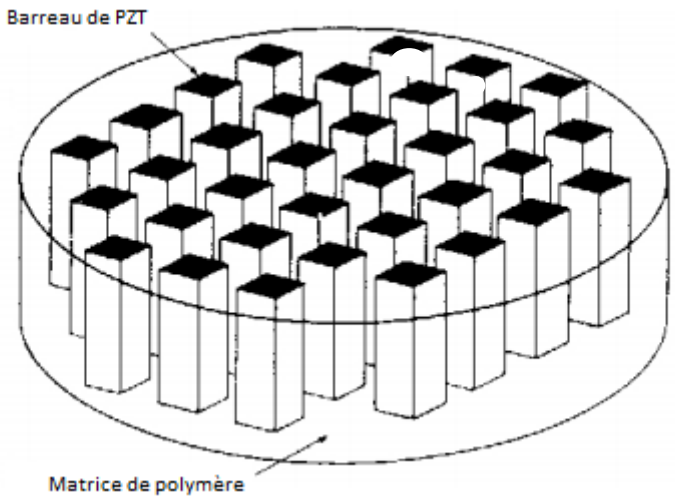


Figure II.6: Vue schématique d'un composite piézoélectrique de connectivité 1-3 [32].

II.2.3. Mécanisme de transfert d'une contrainte :

Lorsqu'un matériau composite est sollicité de l'extérieur d'une pression par exemple, sachant qu'il y a une grande différence de souplesse entre les deux matériaux associés, il existe à cette interface de fortes contraintes de cisaillement limitant la différence de déformation.

Inversement, lorsque les barreaux de PZT sont excités électriquement, ces contraintes vont permettre à la matrice de polymère de se déformer. Celle-ci prend alors une part active dans la vibration de la structure. Ou bien encore, une onde acoustique excitant le composite dans sa direction axiale par exemple, provoque une déformation plus importante du polymère que du PZT.

L'impédance acoustique globale des composites 1.3 peut être modifiée en jouant sur la fraction de PZT. Cela permet un meilleur couplage, en diminuant le coefficient de réflexion des ondes entre les deux milieux. Ceci augmente par conséquent la bande passante. On retiendra également que la faible masse volumique du polymère comparée à celle du PZT diminue fortement le poids des structures utilisant la technologie composite.

II.2.4. Les technologies utilisées pour la fabrication des composites 1.3:

Pour une application donnée, la possibilité de réaliser un matériau sur mesure est une caractéristique essentielle des composites piézoélectriques, dépend de la fraction volumique de PZT, des propriétés des constituants, taille des barreaux, espacement inter-barreaux, … etc.

Dans un composite piézoélectrique de connectivité 1.3, des paramètres jouent un rôle très important dans le matériau, comme le choix des constituants et de leur fraction volumique. Toutes les propriétés électromécaniques du composite telle que le coefficient de couplage K, permittivité ε sont sensibles aux propriétés des deux constituants.

Afin de réaliser la structure des composites 1.3, plusieurs méthodes de fabrication ont été développées. Dans cette section, nous allons énumérer les méthodes courantes avec leurs avantages et inconvénients.

II.2.4.a. La méthode "Dice and Fill" :

La technique la plus utilisée actuellement est appelée " Dice and Fill " **[33].** Elle consiste à isoler les barreaux de PZT par deux découpes transversales dans une céramique

massive, sans les désolidariser de la base céramique restante. L'ensemble est alors noyé dans le polymère puis découpé en tranche afin d'obtenir le disque composite **(figure II.7).**

La simplicité de la technique de dés et de remplissage (Dice and Fill) a fait la méthode commerciale standard de fabrication de composite 1.3 pour l'imagerie médicale. La taille et la hauteur minimale des barreaux de PZT dépendent de la précision de la scie de découpage et la capacité de la céramique à survivre le processus.

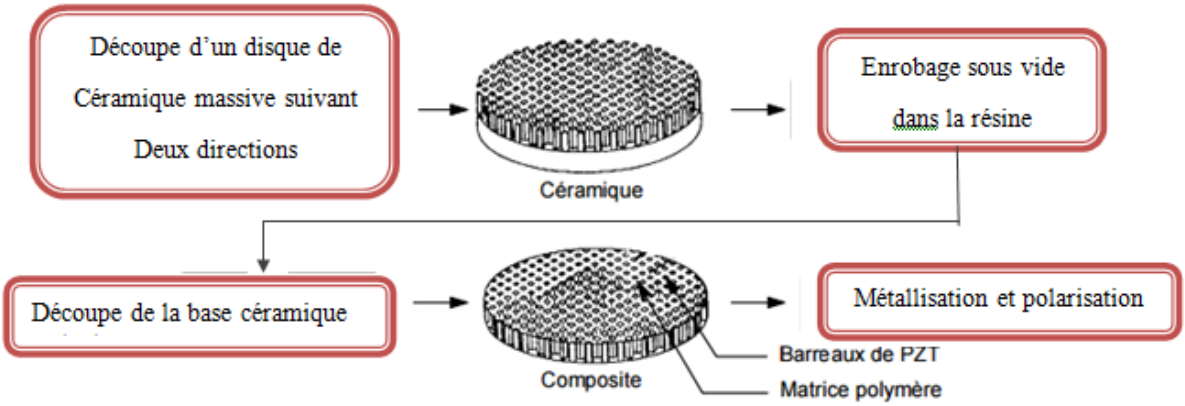


Figure II.7: Méthode de fabrication des composites 1.3 "Dice and Fill" [28].

Cependant pour des applications à plus hautes fréquences, la taille des barreaux devient trop faible pour être réalisée par découpe mécanique d'une céramique. De nombreuses techniques ont alors été développées. Ces techniques consistent à synthétiser directement le PZT à la forme souhaitée.

II.2.4.b. La méthode de moulage par injection :

Les Piézocomposites de petites échelles avec des connectivités 1.3 et 2.2 ont également été formés par l'intermédiaire de la méthode de moulage par injection **[34].** Le mélange de poudres de PZT et de liant organique est injecté dans un moule à une température telle que le mélange puisse avoir une viscosité suffisamment basse pour couler **(figure II.8).** Ce corps préformé est traité thermiquement pour enlever le liant organique puis fritté. L'espace entre les barreaux de PZT est ensuite comblé par le polymère et polarisé.

Tous les paramètres dimensionnels des barreaux de PZT sont déterminés par le moule. Le procédé de moulage par injection est simple et rapide, Cette technique permet d'obtenir des barreaux de diamètre compris entre 0.5 et 1mm. L'inconvénient majeur de ce procédé est le coût élevé de l'outillage. Elle sera donc réservée à la réalisation de formes complexes de

grandes dimensions. De plus, l'opération de démoulage est une opération très délicate et limite la taille minimale des barreaux.

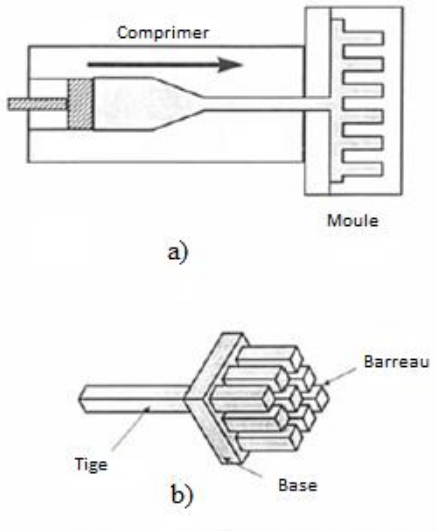


Figure II.8: Moulage par injection pour un composite 1-3 [35].

a. Remplissage de moule. b. Retirer la préforme en céramique de moule.

II.2.4.c. La méthode "Soft molding" [36]:

Dans cette méthode, un moule "master" en silicium est obtenu par micro-usinage. Il a la même structure (taille des barreaux, espacement inter-barreaux etc.) que celle qui sera réalisée avec la phase active désirée. A partir de ce moule, un autre moule en silicone caoutchoutique est obtenu, il constitue le négatif du moule "master". Ensuite une suspension de céramique est introduite par gravité dans le moule en silicone. Après séchage, le corps préformé en céramique est démoulé puis fritté. Comme la méthode de moulage par injection, tous les paramètres dimensionnels des barreaux de céramique sont déterminés par le moule, mais un moindre coût est possible grâce à la simplicité de préparation du moule **(figure II.9).**

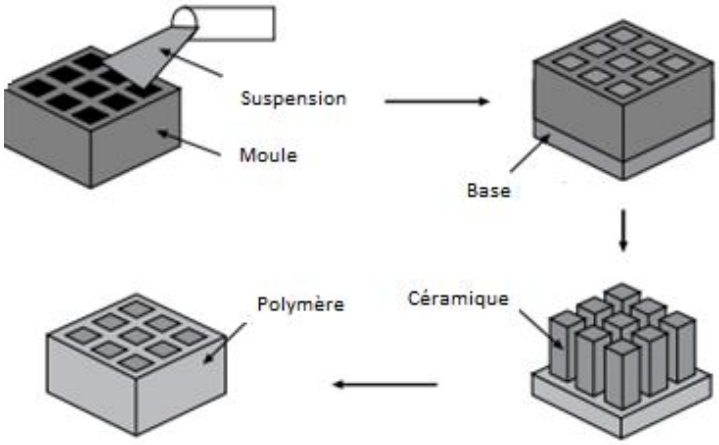


Figure II.9: Illustration de la méthode "Soft molding".

II.2.4.d. La méthode de Composite de PZT à fibres :

La motivation pour le développement des fibres de PZT piézoélectriques sont associées à leur fort facteur de forme (~15 cm de longueur et 20-300 µm de diamètre), on peut réaliser à partir de ces fibres plusieurs types de composites 1.3. Par exemple, sous la forme d'une plaque de très grande surface, ce qui ne peut pas être fabriqué facilement par les méthodes existantes. De plus, parce que le composite peut être configuré pour que les fibres piézoélectriques fonctionnent en longitudinal sous l'action d'une sollicitation mécanique ou électrique ce qui se traduit par des facteurs de couplage électromécaniques supérieurs même pour une faible fraction volumique de fibres.

L'avantage de cette méthode, sans compter que les fibres de petites échelle, est la capacité de distribuer au hasard les éléments piézoélectriques, qui peuvent contribuer à la suppression des modes parasites causés par les vagues de l'agneau. Cette technique de composite de PZT à fibres a été mise au point et mise en œuvre par Smart Material Corporation, ou l'infiltration d'époxy de faisceaux de fibres sont lignés régulièrement ou de façon aléatoire, suivie de durcissement et de découpage pour une épaisseur désirée **[37].** Le processus de production est indiqué dans **la Figure II.10 [38].**

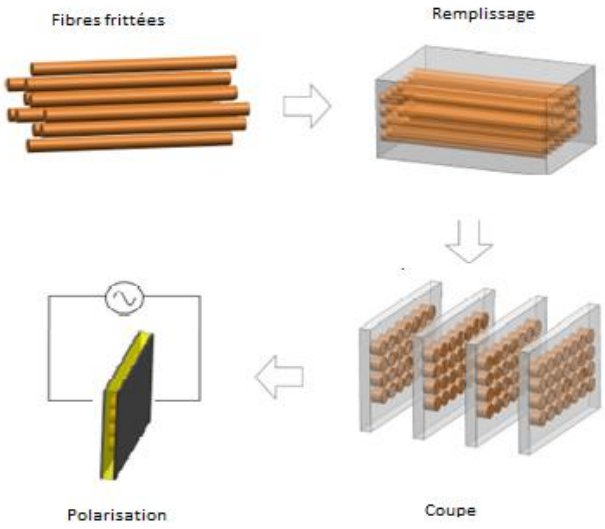


Figure II.10: Diagramme du processus de fabrication de composites 1.3 à fibres PZT.

Cette dernière, montre clairement que la méthode de fabrication de composites 1.3 à fibres PZT permet d'obtenir des grandes épaisseurs de la couche avec un processus plus rapide et seulement deux dépôts de revêtement par immersion. Les fibres revêtues ont été coupées à la taille appropriée de la longueur (18 mm), bien sûr emballé dans un moule (4x4x20mm) et finalement versé L'époxy pour remplir les vides restants.

II.3. Les secteurs d'applications des matériaux piézocomposites :

Actuellement, les matériaux piézocomposites sont principalement utilisés dans différents domaines qui sont la détection sous marine, le médical, et le contrôle actif de vibration.

II.3.1. La détection sous marine:

Depuis les années 60, les sous-marins ont été équipés d'éléments de structure en matériaux composites. Modeste au début, la part de ceux-ci ne cesse de croître, chaque nouveau type de sous marin faisant appel plus largement aux matériaux composites. Les qualités essentielles qui ont motivé ce développement sont la bonne adaptation acoustique dans l'eau, le bon comportement en milieu marin, la flexibilité et les hautes caractéristiques mécaniques spécifiques.

En basse fréquence tout d'abord, les composites sont utilisés en tant qu'hydrophones. Etant données les dimensions des antennes acoustiques, ils permettent en effet un gain de poids considérable.

Plus récemment, sont apparues sur le marché les premières antennes acoustiques fonctionnant à des fréquences élevées (100kHz - 1MHz) utilisées en imagerie sous marine et notamment pour la chasse aux mines (commercialisées par la société anglaise UDI). La meilleure adaptation acoustique avec l'eau et la plus large bande passante que les céramiques massives sont faites de composites 1.3 des candidats naturels pour ce type d'application **[28].**

II.3.1. Le domaine médical :

Après l'aéronautique, l'automobile ou bien encore la construction, les composites trouvent leur place dans... le domaine médical. Si les applications sont encore peu répandues, l'innovation permet d'accélérer leur développement **[39].**

L'utilité des composites 1.3 dans le domaine médical est apparue principalement dans les sondes échographiques ou en lithotritie pour la destruction des calculs rénaux (fréquences supérieures au Mhz). Son utilisation a été motivée par sa faible impédance acoustique qui se rapproche de celle des tissus humains. Comme mentionné précédemment, l'une des applications de transducteurs piézoélectriques est en imagerie médicale à ultrasons (échographie) qui est un outil de diagnostic largement utilisé par les médecins. La popularité de cet outil de diagnostic réside dans sa capacité à produire en temps réel des images de haute résolution en trois dimensions des tissus mous internes sans utiliser de rayonnements ionisants potentiellement dangereux.

Ce type de connectivité, réduit l'effet de serrage transversal dans l'élément actif et présente une constante diélectrique plus élevée dans le mode épaisseur. Ces composites montrent la sensibilité la plus élevée dans le mode impulsion -écho et une basse impédance acoustique requise pour une bonne adaptation au corps humain.

II.3.1. Le contrôle actif :

Dans de nombreuses applications industrielles ou de défense, le bruit ou les vibrations constituent un problème majeur. Les méthodes conventionnelles d'atténuation consistant à amortir la perturbation par des techniques passives s'avèrent peu efficaces en basses fréquences. Les méthodes de contrôle actif apparaissent à priori plus adaptées **[40]**. Le principe de ces techniques dites actives est de générer un champ interférant avec le champ de

la perturbation. Le champ superposé doit donc être identique à celui de la perturbation en termes d'amplitude mais de phase opposée pour chacune des fréquences concernées. Si quelques applications de cette technologie existent, beaucoup sont en développement, notamment dans le secteur spatial, l'avionique et l'automobile. Ces dernières années, les composites 1.3 commencent à être utilisés pour le contrôle actif de vibration. L'impédance acoustique, le poids et le moindre coût sont autant de facteurs qui ont permis aux composites 1.3 de se développer dans ce domaine

II.4. Avantages et inconvénients des matériaux composites :

Un certain nombre de matériaux monolithiques présentent un comportement piézoélectrique. Ceux-ci comprennent des céramiques et des polymères, ainsi que des composites de la céramique avec des polymères.

La céramique avec le zirconate titanate de plomb (PZT) est le plus largement utilisée, elle est moins couteuse et plus facile à fabriquer. Elle a aussi relativement une constante diélectrique élevée, une haute impédance acoustique et un bon couplage électromécanique. En outre, étant donné qu'elle est rigide et cassante, les céramiques ne peuvent pas être formées sur des surfaces courbées, ce qui limite la flexibilité. Enfin, elles ont un degré élevé de bruit associé à leurs modes de résonance.

Les polymères piézoélectriques tels que le PVDF sont acoustiquement bien adaptés à l'eau, ils sont très flexibles et ont peu de modes de parasites. Cependant, les applications des polymères piézoélectriques sont limitées par leur faible coefficient de couplage électromécanique, la faible constante diélectrique et le haut cout de fabrication.

Toutes ces propriétés électromécaniques ont conduit les chercheurs à utiliser les matériaux piézocomposites qui sont constitués d'une phase active céramique piézoélectrique et d'un polymère inactif. Ces composites ont montrés des propriétés supérieures par rapport aux matériaux monophasés. **Le tableau II.1** résume les avantages et les inconvénients de chaque type de matériau :

Paramètres	Céramiques	Polymères	Composites Céramiques /Polymères
Impédance acoustique	Haute (-)	Basse (+)	Basse (+)
Facteur de Couplage électromécanique	Elevé (+)	Faible (-)	Elevé (+)
Les modes de parasites	Beaucoup (-)	Peu (+)	Peu (+)
La constante diélectrique	Haute (+)	Faible (-)	Moyenne (+)
La flexibilité	Rigide (-)	Flexible (+)	Flexible (+)
Le prix	Moins cher (+)	Cher (-)	Moyen (+)

Tableau II.1: Avantages (+) et inconvénients (-) des matériaux piézoélectriques céramiques, polymères et composites [38].

Conclusion :

Ces dernières années, les matériaux composites sont utilisés dans nombreux domaines d'applications, les raisons d'un tel succès sont attribuées à leurs qualités de réduction des coûts d'exploitation, leur faible masse qui permet un allégement conséquent des structures et leurs caractéristiques mécaniques spécifiques élevées ainsi que leur grande souplesse de mise en œuvre, ce qui permet de réaliser des structures de grandes dimensions et de géométries complexes.

Dans tous les secteurs, les impératifs de légèreté, rigidité et résistance rendent les composites indispensables.

Chapitre III : Applications de la piézoélectricité

Introduction :

L'effet de la piézoélectricité décrit l'interaction entre la pression mécanique et la tension électrique dans les solides. Il repose sur le phénomène selon lequel des charges électriques apparaissent à la surface de certains matériaux lorsqu'ils sont déformés.

De nombreux êtres vivants utilisent la piézoélectricité de façon très intéressante : les os agissent comme un capteur de force. Sous l'effet de forces, ils produisent des charges électriques proportionnelles aux contraintes internes. Ces charges stimulent et entraînent la constitution de nouvelles cellules osseuses, ce qui conduit au renforcement de la structure osseuse aux endroits où les déplacements internes sont les plus importants.

L'effet piézoélectrique trouve un très grand nombre d'applications dans la vie quotidienne et dans l'industrie. Selon que l'on privilégie l'effet direct, l'effet inverse et/ou les deux effets. Quelques applications sont illustrées dans **le tableau III.1 :**

Applications basées Sur l'effet Piézoélectrique direct	**Applications basées Sur l'effet Piézoélectrique inverse**	**Applications basées Sur les deux effets**
Microphones	Haut-parleurs	Transducteurs d'ultrasons pour diagnostic (échographie)
Hydrophones	Buzzers	Détecteurs de proximité ou de présence
Capteurs de choc	Transducteurs sonars	Gyroscopes
Accéléromètres	Actionneurs	transformateurs piézoélectriques
Boutons poussoirs	Pompes piézoélectriques	Lignes à retard
Capteurs de pression Ou de contraintes	Les moteurs piézoélectriques	Mesure de distances ou de débits
	Imprimantes à jet d'encre	Filtres fréquentiels

Tableau III.1: Quelques applications des matériaux piézoélectriques.

III.1. Quelques applications de l'effet piézoélectrique dans le domaine médical:

La piézoélectricité représente un axe de recherches attractif pour plusieurs laboratoires de recherches. Les matériaux piézoélectriques sont judicieusement exploités dans plusieurs domaines suite à leurs propriétés exceptionnelles et leur optimisation, à savoir le médical.

Parmi les applications qui utilisent l'effet piézoélectrique on cite :

III.1.1. L'accéléromètre piézoélectrique:

Les accéléromètres utilisant l'effet piézoélectrique ne sont pas réservés aux seules applications aéronautiques et automobiles. On compte de nombreuses utilisations en médecine. Une des applications les plus importantes est le contrôle actif des pacemakers **[39].**

Un pacemaker est un régulateur du rythme cardiaque implanté dans le corps du patient qui doit fonctionner sans cesse, que le patient soit au repos ou en phase s'exercices physiques. Il se compose d'une pile, sonde, capteur (accéléromètre) et partie électronique. Le système étant implanté, les exigences en termes de faible consommation, faibles dimensions, masse et durée de vie des batteries très fortes.

Un tel accéléromètre détecte tout changement d'activité physique. Ainsi, quand le patient commence à courir, le pacemaker modifié les impulsions électriques envoyées au cœur pour les adapter à l'intensité de l'effort physique. Ce capteur ayant besoin d'une excitation en courant est présenté sur **la figure III.1** ci-dessous :

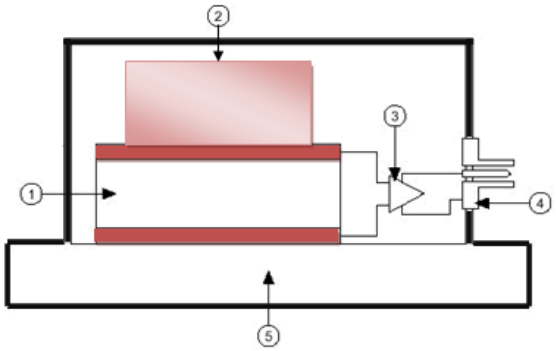


Figure III.1 : Représentation typique d'un accéléromètre

Avec :

1. Crystal piézoélectrique
2. Masse sismique
3. Amplificateur sensible aux charges
4. Signal connexion
5. Boitier de l'accéléromètre

III.1.1.a. Le principe de fonctionnement :

Le capteur est constitué essentiellement d'une masse sismique, d'un élément piézoélectrique et d'électrodes. La masse sismique est placée en contact direct avec l'élément piézo ou sur un pont flexible lorsque le capteur fonctionne en flexion. En sortie, nous disposons de charges électriques qui peuvent être mesurée directement ou converties en tension par une unité électronique intégrée.

Quand le système subit une accélération, l'élément piézo est étiré ou comprimé. Cette contrainte sur le cristal induit une différence de charge entre ses surfaces. Cette différence de charge est détectée par un amplificateur sensible aux charges et est convertie en signal de tension.

L'amplificateur est activé par une source constante de courant. Pendant que l'accélération du cristal change, l'impédance de sortie varie pour créer le signal de tension. Par conséquent, l'accéléromètre est excité et une simple lecture sur les deux fils de sortie permet de connaître le résultat.

En dehors du domaine médical, les grandes familles d'applications des accéléromètres piézoélectriques sont la mesure de **[40] :**

- **Chocs :** Excitation haute fréquence / haut niveau d'accélération (plusieurs KHz avec des niveaux > 100 g).
- **Vibration :** Excitation moyenne fréquence (de quelques Hz à quelques KHz).
- **Mouvement :** Excitation basse fréquence (jusqu'à quelques Hz).

III.1.1.b. Les données métrologiques [41] :

Sensibilité :	1.9 Pc / g
Réponse en fréquence :	10 à 2000 Hz
Résonance propre :	9 KHz
Masse :	0.085 g
Température d'utilisation :	- 60 °C à 150 °C

III.1.1.c. Les points forts :

Les principaux avantages sont :

- La grande bande passante de 0.2 Hz à 30 KHz.
- La plage de température disponible de – 200 °C à 600 °C.
- Taille très variable, adaptée à la configuration d'essai (O.2 g pour le plus petit).
- Technologie robuste, mature.

III.1.1.d. Les limitation :

- Le point faible de ces accéléromètres est leur faible précision.
- La limitation en basse fréquence est de 0.1 Hz.

III.1.2. Les générateurs piézoélectriques :

Les générateurs piézoélectriques sont classiquement constitués d'une poutre encastrée à une extrémité sur laquelle sont fixées une ou plusieurs céramiques piézoélectriques **[42]** et d'une masse sismique afin d'avoir des déplacements plus importants, et donc des contrainte plus fortes, et au final de récupérer plus d'énergie. L'utilisation de cette poutre permet l'amélioration du couplage mécanique de la structure, entrainant une contrainte élevée sur le matériau piézoélectrique.

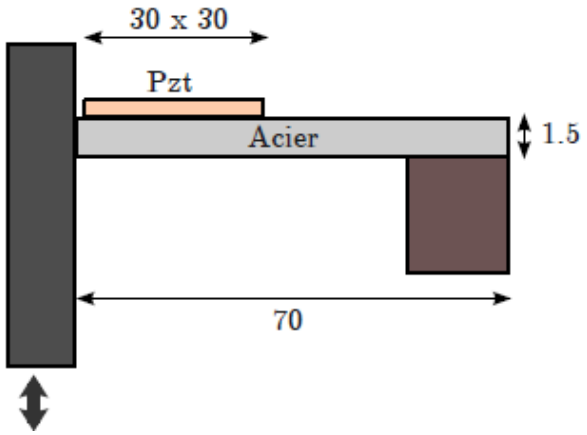


Figure III.2: Prototype d'un générateur piézoélectrique.

III.1.2.a. Le principe de fonctionnement :

Le principe d'un générateur piézoélectrique est la déformation du matériau piézoélectrique de façon à transformer l'énergie mécanique en énergie électrique. Les vibrations mécaniques sont présentées à certaines fréquences et certaines accélérations. Pour récupérer le maximum d'énergie de ces vibrations **[42]**, il sera nécessaire de créer un système mécanique résonant, qui a comme fréquence de résonance la fréquence des vibrations.

Il est important de s'intéresser à l'optimisation des dimensions de la couche piézoélectrique, pour ensuite pouvoir faire des choix sur les dimensions de la poutre et de la masse sismique.

L'exemple le plus marquant est le prototype d'une chaussure générant de l'énergie pendant la marche, par une équipe du Media Laboratory (MIT) illustré dans **la figure III.3** suivante :

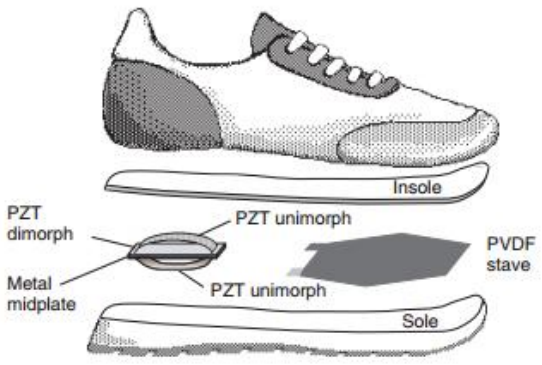


Figure III.3: Chaussure piézoélectrique de MIT [43].

Le prototype de chaussure développé par Shenck et al. **[43]** contient deux générateurs piézoélectriques : une plaque de PVDF et un bimorphe en PZT. La puissance obtenue pour ce système fut de 1.3mW à 0.8Hz pour la plaque de PVDF et de 8.4mW à 1.1Hz pour le bimorphe en PZT.

Un autre dispositif intéressant pour récupérer de l'énergie lors de la marche est un prototype d'implant dans le genou proposé par S.R. Platt et al **[44]:**

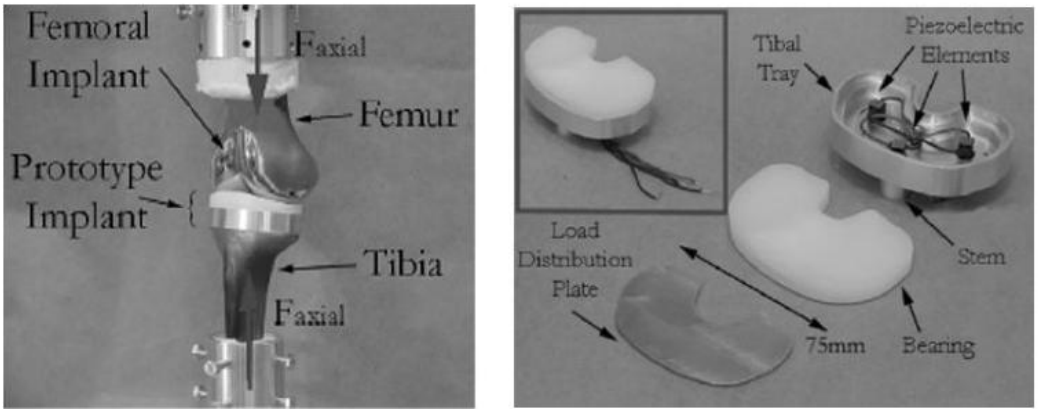


Figure III.4: Prototype d'implant dans le genou [44].

Dans ce dispositif, les éléments piézoélectriques sont du PZT. Ce prototype a produit seulement 4mW pour une force appliquée de 2600N. Cette force est beaucoup trop importante pour des conditions réelles, car elle correspond à 260kg. En conditions réelles, la puissance récupérée sera beaucoup moins importante. Récupérer de l'énergie sur des implants dans le genou permet d'alimenter des capteurs placés dans l'implant, pour repérer par exemple une éventuelle asymétrie. L'utilisation des batteries est difficilement envisageable puisque l'implant doit durer 20 ans.

Un dernier exemple de récupération d'énergie en régime quasi-statique est l'utilisation de polymères diélectriques. Cette méthode de récupération d'énergie utilise une transduction électrostatique pour créer de l'énergie. Nous pouvons citer l'exemple du système de C. Jean-Mistral **[45]**, qui a développé une structure placée derrière le genou, qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique. Le mouvement de la jambe étire ou compresse le polymère diélectrique, ce qui change sa capacité, et ce qui permet de générer de l'énergie avec le même principe que les générateurs électrostatiques. Pour une marche cadencée à 1 Hz, la structure récupère 100 μW sous une tension de polarisation de 200V, et 1.74 mW sous une tension de polarisation de 1000V.

Figure III.6 : Jambe et genouillère génératrice d'énergie pour les tests en situation [45].

Ces dispositifs quasi-statiques nécessitent de fortes contraintes et sont difficiles à miniaturiser, et pourront donc difficilement être utilisés pour alimenter un nœud de capteurs.

III.1.3. Micropompe pour contrôler le taux d'insuline délivré a base d'un actionneur piézo-électrique

Les maladies chroniques font appel aux systèmes implantables miniaturisés. Une de ces méthodes du traitement consiste à utiliser une micropompe pour injecter les médicaments. Cette micropompe à insuline fait partie de ces systèmes d'injection**.**

Il s'agit d'un petit boîtier gros comme un téléphone portable que l'on garde sur soi en permanence, dans le but de délivrer de l'insuline sans qu'on ait à se faire des injections. Un réservoir rempli d'une quantité d'insuline rapide valable pour plusieurs jours est incorporé à ce boîtier. Grace à un piston motorisé, l'insuline est poussée en permanence dans un tuyau en plastique d'une longueur d'environ 60 cm à 1 mètre. On appelle ce tuyau une "tubulure". La tubulure est reliée à une petite canule sous cutanée. Cette canule est un micro-tuyau très fin, souple, sans aiguille, qui est installé sous la peau et changé tous les trois jours.

Une micropompe est divisée en quatre parties **[46] (Figure III.7):**

- La chambre de transition des médicaments;
- Les microvalves unidirectionnelles, telle que la valve d'entrée (reliée à un réservoir extérieur des médicaments).
- Le circuit de contrôle.
- L'actionneur.

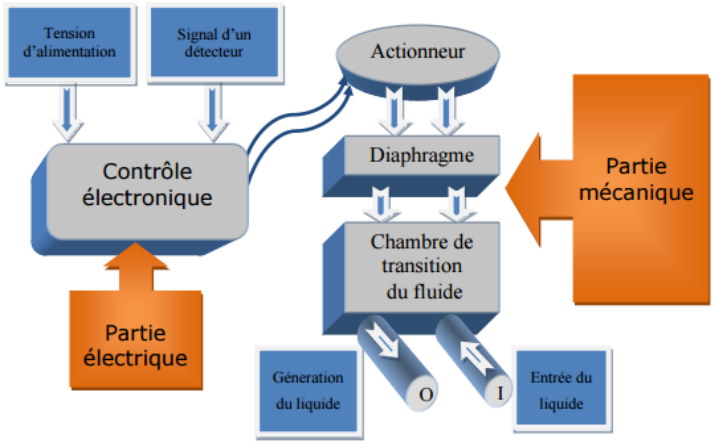


Figure III.7: Description simplifiée du fonctionnement d'une micropompe.

L'élément principal qui relie la partie électrique de la pompe de la partie mécanique est un actionneur piézoélectrique. Dans le concept de cet actionneur, l'idée de base est de convertir l'effort transversal piézoélectrique à un déplacement perpendiculaire.

L'actionneur est un disque piézoélectrique collé à surface extérieure de la membrane. Sous l'application d'une tension électrique V, le moment de la flexion du disque force la membrane à se courber et change ainsi le volume de la chambre. L'actionnement est bidirectionnel à fin de maximiser la plage de déflexion en appliquant ±V.

La figure III.8 illustre le principe de fonctionnement de micropompe avec actionneur piézoélectrique dans une configuration de contrainte axiale qui est la plus utilisée.

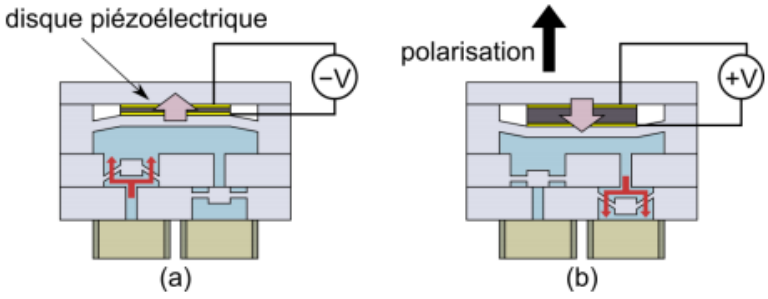


Figure III.8: Figure 8: Principe de fonctionnement d'une micropompe avec actionneur piézoélectrique en contraintes axiales [47]
(a) à l'aspiration (b) au refoulement

La réponse de ces microactionneurs est très rapide, ils opèrent avec une force et une vitesse élevées. La déflexion dépend de la tension électrique appliquée.

Les critères de telle pompe sont :

- Les petites dimensions.
- La biocompatibilité.
- Un déplacement suffisant pour atteindre les débits souhaités et précis
- Une pression de pompage suffisante pour déplacer les médicaments.
- Une faible consommation d'énergie.
- Un fonctionnement sûr pendant une période prolongée.
- Ces dispositifs permettent de réduire les douleurs et assurent l'injection des médicaments vers la cible avec une grande précision et fiabilité.

III.1.4. L'échographie :

L'échographie est un examen peu couteux qui peut être répété sans problème. L'appareil (l'échographe) est transportable et très simple d'utilisation. La technique utilisée est la même que celle du sonar, découverte en 1915, mais elle ne sera importée dans le domaine médicale qu'en 1955. Sa première utilisation, la plus connue, est l'observation du bébé dans le ventre de sa mère.

L'échographie, comme son nom l'indique, fonctionne à partir des échos. L'élément de base dans l'échographe est généralement une céramique piézoélectrique (PZT), située dans la sonde qui soumise à des impulsions électriques.

Les ultrasons sont des ondes sonores à très hautes fréquences (> à 20 KHz). Lorsque ces ondes atteignent un organe ou un tissu, une partie traverse, l'autre est réfléchie sous forme d'échos. Ces échos sont captés par la céramique qui joue le rôle de récepteur, on parle alors de transducteur ultrasonore.

III.1.4.a. Le principe de fonctionnement :

Un générateur de courant délivre des impulsions électriques de haute fréquence qui sont appliquées à la surface d'une céramique : cette dernière voit son épaisseur variée si la fréquence des impulsions est de l'ordre de grandeur de sa fréquence de résonance (effet piézoélectrique indirect). Ces vibrations mécaniques se transmettent de proche en proche ; il y a production d'ultrasons si la fréquence est comprise entre 2 et 10 MHz. L'excitation de la céramique avec ce courant de haute fréquence se fait par courtes impulsions de 1 à 2 ms répétées à intervalles réguliers à fréquence de récurrence de 2 KHz **[48]**.

Les contraintes mécaniques dues aux variations de pression des ondes réfléchies dans l'organisme font apparaître à la surface de la céramique de la sonde des différences de potentiel dont la fréquence correspond à celle de l'onde réfléchie et dont l'intensité dépend de l'intensité de l'écho **[48]**.

Comme illustré dans **la Figure III.9 [36]**, le processus d'un transducteur électromécanique, comme un émetteur d'ondes ultrasonores et un récepteur d'écho à des fréquences comprises entre 1 et 30 Mhz.

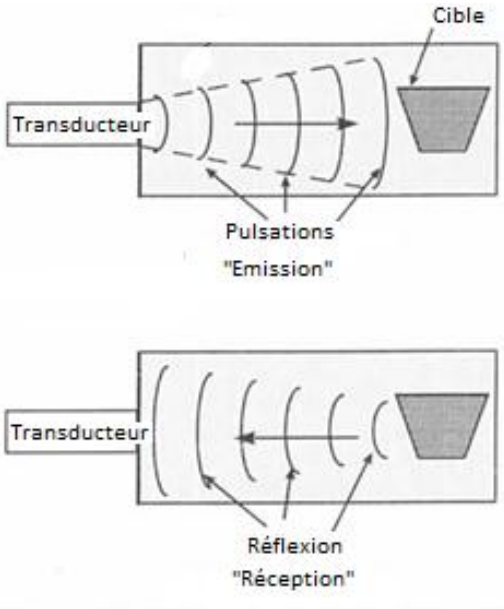


Figure III.9: Fonctionnement des transducteurs à ultrasons en imagerie médicale.

A l'intérieur d'un transducteur ultrasonore :

Le transducteur ultrasonore est constitué d'un empilement de couches dont chacune possède un rôle bien spécifique **(figure III.10).**

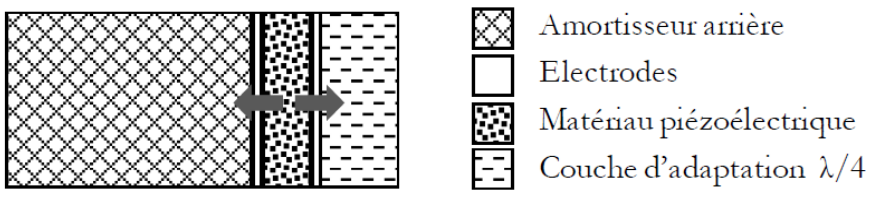


Figure III.10: Structure d'un transducteur piézoélectrique.

La partie active du transducteur est la couche piézoélectrique dont les faces sont couvertes d'électrodes. Celles-ci permettent d'exciter le transducteur pour générer des ondes ultrasonores vers l'avant et l'arrière et/ou réceptionner les informations électriques collectées

des échos réfléchis, après conversion des vibrations mécaniques en signaux électriques. Ces couches aident d'une part, à optimiser la transmission de l'énergie mécanique et donc à améliorer la bande passante du transducteur et, d'autre part, à protéger l'élément actif du milieu de propagation **[48].** En face arrière, le transducteur est chargé par un amortisseur (« Backing » en anglais). Il absorbe les ondes émises par la face arrière de l'élément actif, ce qui permet d'améliorer la résolution axiale et d'élargir la bande passante du transducteur.

Le choix d'une sonde est déterminé par sa fréquence de résonance et sa bande passante. Il faut utiliser une sonde avec une fréquence de résonance et une bande passante adaptées. Par exemple, pour explorer le sein ou le cœur, la fréquence de résonance du transducteur est respectivement de 7,5 MHz et de 3,5 MHz.

III.2. Autres applications :

III.2.1. Les moteurs piézoélectriques à onde progressive :

L'intérêt des moteurs piézoélectrique est essentiellement centré sur la miniaturisation, le silence de fonctionnement et sa simplicité de fabrication. Ils sont constitués de pièces uniquement mécaniques. Pour fabriquer un moteur piézoélectrique à onde progressive, Un anneau de céramique piézoélectrique est collé sur le stator (**figure III.11**) de façon à induire dans ce dernier des oscillations à la fréquence de résonance **[49]**.

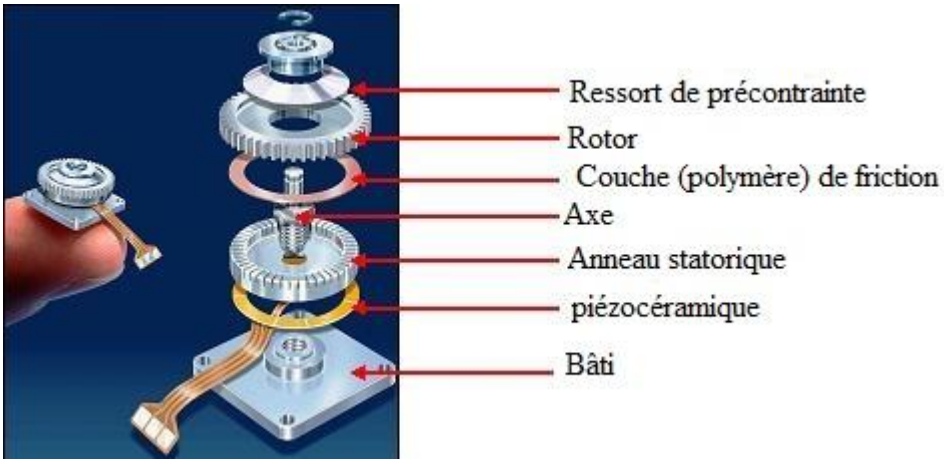


Figure III.11: Vue détaillé des différents composants d'un moteur à onde

III.2.1.a. Principe de Fonctionnement :

L'anneau est divisé en deux systèmes d'excitation (phases du moteur), Chaque système est alimenté idéalement par une tension sinusoïdale dans le domaine ultrasonique. En combinant correctement 2 vibrations sinusoïdales déphasées de 90° dans le temps et d'un

quart de longueur d'onde dans l'espace (au niveau de l'excitation des céramiques), on arrive à créer une onde progressive au sein de ce stator **[49]**. Physiquement, cette onde est comparable à la propagation d'une vague. Cette onde progressive, se propageant dans l'anneau statorique, impose à chaque point de celui-ci une trajectoire elliptique comme illustré dans **la figure III.12**. En posant un disque libre en rotation sur le stator vibrant, il est entraîné dans un mouvement de rotation opposé à la propagation de l'onde grâce au contact avec les crêtes des "vagues" du stator. On obtient finalement un mouvement de rotation continu à partir d'une vibration piézoélectrique à haute fréquence.

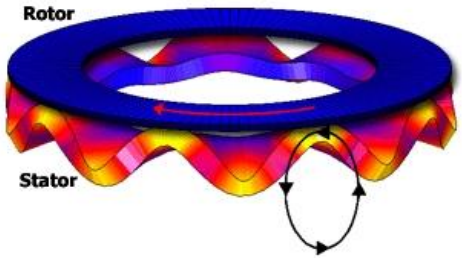


Figure III.12: Représentation de l'entraînement du rotor par les crêtes de l'onde progressive.

III.2.1.b. Les caractéristiques :

- Avantages :

Par rapport à un moteur classique de même taille (DC, quelques watts):

- La puissance massique est potentiellement plus élevée.
- Le niveau de bruit est très faible voir nul (vibrations ultrasonores).
- Il n'y a aucun risque de perturbation électromagnétique.
- Le moteur est de fabrication simple.

- Inconvénients :

- La faible durée de vie (2000h) due à l'usure de l'interface de friction.
- Le coût élevé (développement, fabrication des céramiques, nouvelle technologie).
- Le rendement énergétique faible (10-25%) dû aux pertes dans la céramique piézo et lors de l'entraînement par friction.
- Le besoin d'une source électrique à haute fréquence.

Les principales applications des moteurs piezo à onde progressive sont **[50]** :

Les microrobotiques: De petits moteurs et actionneurs peuvent être conçus pour des applications de robotique ne nécessitant pas une grande puissance mais une grande précision et un poids limité.

Les montres: Un micromoteur pour date a été développé par la firme Seiko. Ce système permet d'actionner l'affichage de la date et donc de gérer le nombre de jours dans le mois en cours (28, 29, 30 ou 31). Il s'agit d'un des plus petits moteurs intégrés actuellement. Son diamètre est de 4mm.

Et bientôt… Un nombre très important d'applications nécessitent des mouvements précis, rapides, "propres" (pas de pollutions électromagnétiques) et silencieux tout en limitant l'encombrement et le poids. Les moteurs piézoélectriques sont une réponse possible à ces besoins. Voici quelques exemples supplémentaires d'applications potentielles: Motorisation de matériel médical; Positionneurs de précision pour microscope; Manipulateur de cartes à puce;...et tous les petits moteurs se trouvant dans nos appareils quotidiens (PC, voiture, électroménager,…).

III.2.2. Le télémètre:

Lorsque l'on veut mesurer des distances, on utilise en général une règle ou un ruban mètre. Mais comment faire pour avoir une distance numérique en temps réel ?

Une réponse : utiliser la technologie des ultrasons à base d'un transducteur piézoélectrique pour réaliser un télémètre.

Le télémètre est doté d'un bouton afin de lancer une acquisition et essentiellement de quatre modules:

➔ Module d'émission et de réception qui ont souvent la forme d'une paire d'yeux car ils ont deux parties essentielles :

- L'émetteur
- Le récepteur

➔ Module d'affichage et un module de commande, comme le montre **la figure III.13[51]:**

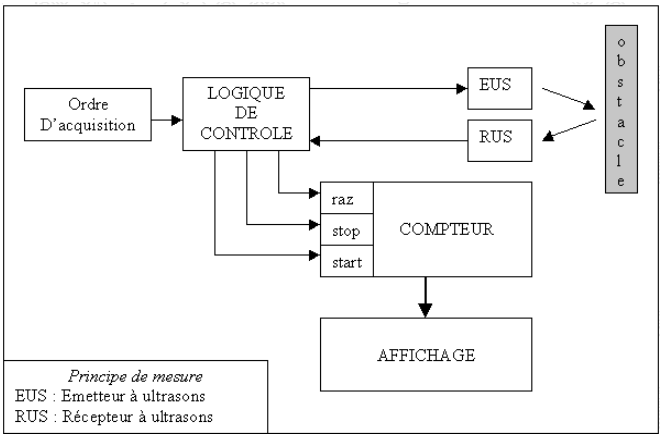


Figure III.13: Représentation des blocs constitutifs d'un télémètre.

Avant de passer au fonctionnement du signal, on présentera les constitutions de chaque module :

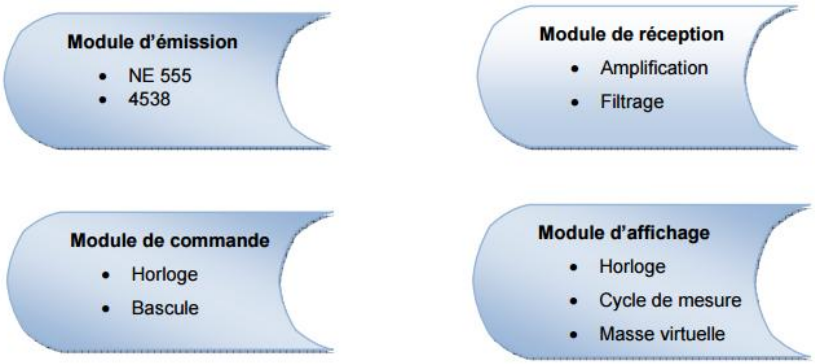


Figure III.14: Les différents modules du télémètre.

III.2.2.a. Le principe de fonctionnement :

Il est basé sur la mesure du temps écoulé entre l'émission et le retour de l'écho **figure III.14** un appuie sur le BP, le système de contrôle remet le chronomètre à zéro puis commence l'émission ultrasonique. L'onde ultrasonore est mise par les petites cellules piézo-électriques qui vont soit vibrer lorsqu'une tension est appliquée (émetteur), soit au contraire produire une tension lorsque une vibration est reçue (récepteur) **[52]**. L'onde se propage à la vitesse du son dans l'air environnant 342 m/sec à 25 degrés Celsius à une fréquence de 40 KHz. Dès qu'un obstacle est rencontré, l'écho revient vers le transducteur avec la même fréquence mais affaiblie en amplitude, ce dernier stop le chronomètre dès réception du signal. Le résultat sortant du chronomètre ne subit aucune modification avant affichage. En effet, ils ont opté pour qu'une impulsion d'horloge corresponde à 1 cm effectué par l'onde sonore. Sachant que le son met 1s pour parcourir 343 m, et que nous voulons 1 cm, cette distance sera donc parcourue en T = 29.23 µs. Etant donné que ce signal effectue l'aller-retour, il faut donc multiplier ce temps par 2 d'où T = 58.47 µs. donc il faut générer une fréquence d'horloge de 17.1 KHz.

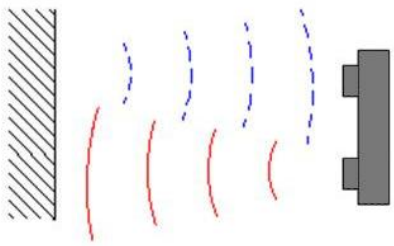


Figure III.15: Emission de l'onde ultrasonore et réception de l écho refléter par l'objet.

III.2.2.b. Les caractéristiques :

- La portée : Quelques mètres en général pour les systèmes ultrasons, même si en théorie il n'y a pas de limite. Il y a aussi en général une distance minimale.
- La précision dépend de la mesure précise du temps de parcours de l'onde sonore. Ce dernier peut aussi varier suivant les conditions de température, de pression ...
- Les transducteurs ultrasons peuvent être assez petits. Mais les cartes réalisant la télémesure comme prennent de la place.
- La consommation : 100 mA en veille et jusqu'à plusieurs Ampères en émission.

Les télémètres à ultrasons peuvent détecter des obstacles se situant dans un cône relativement large d'environ 30 degré.

III.2.3. Système commercialisé pour la récupération d'énergie :

La réussite de la conception d'un système de capteur sans fil totalement auto alimenté nécessite des microcontrôleurs économisant l'énergie et des capteurs qui consomment une énergie minimale dans des environnements différents. Maintenant que tous les deux sont facilement disponibles, le schéma manquant est le circuit de conversion d'énergie à haut rendement pouvant convertir la sortie du capteur en une tension utilisable. Un système de collecte comprend le capteur source d'énergie, un élément de stockage et le moyen de convertir cette dernière stockée en une tension régulée utilisable. Il peut aussi y avoir besoin d'un réseau redresseur de tension entre le capteur et l'élément de stockage, pour redresser un signal alternatif dans le cas d'un capteur piézoélectrique.

Le circuit LTC3588-1 de Linear Technology **(figure III.16)** constitue une solution complète de collecte d'énergie optimisée pour des sources dehaute impédance comme des capteurs piézoélectriques. Il réunit toutes les fonctions essentielles de gestion de l'alimentation. Il comporte un redresseur double alternance en pont à faible perte et un convertisseur abaisseur synchrone à haut rendement **(figure III.17)**, qui transfère l'énergie d'un composant de stockage d'entrée vers une sortie à une tension régulée pouvant accepter des charges jusqu'à 100 mA (microcontrôleurs, de capteurs, d'émetteurs…).

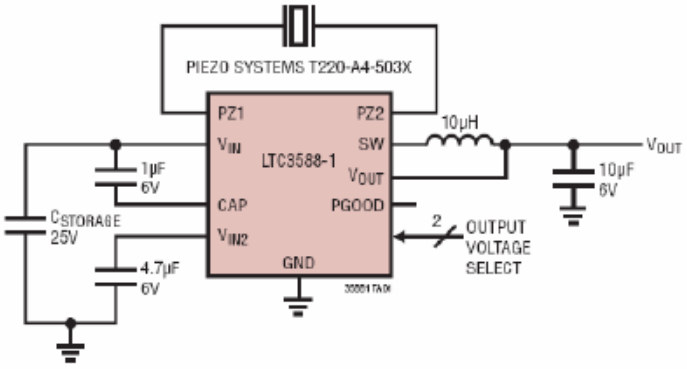


Figure III.16: le système de récupération d'énergie a base d'un circuit LTC3588-1

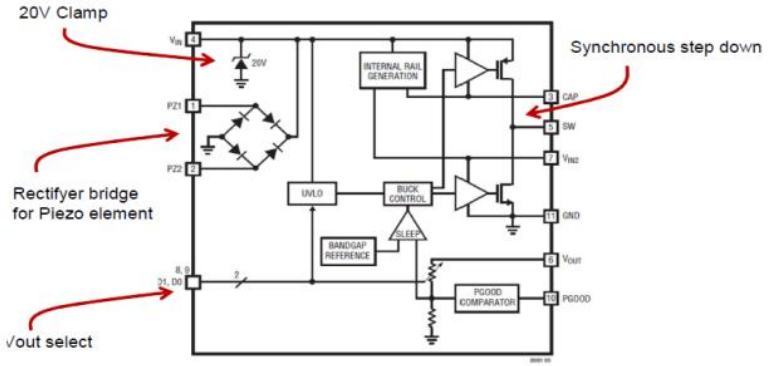


Figure III.17 : Schéma interne de LTC3588

III.2.4. Capteurs de vibrations et choc piézoélectriques :

La piézoélectricité est basée sur le concept simpliste de l'éponge. Une éponge sèche ne présente aucune prédisposition particulière, dès lors que l'eau la touche, l'éponge tend à prendre du volume et lorsqu'elle est pressée elle restitue l'eau dont elle est gorgée.

Les capteurs de choc ou de force piézoélectriques actuels utilisent l'effet piézoélectrique direct. Ils sont robustes, bien intégrés dans un dispositif et ils sont très sensibles aux vibrations. Une application dans le quatrième chapitre sera réalisée à base d'un capteur piézoélectrique synthétisé dans le laboratoire de recherche de chimie appliqué et génie chimie de l'UMMTO.

Conclusion :

Aujourd'hui les matériaux piézoélectriques sont présents dans un très grand nombre d'applications capteurs, actuateurs, transducteurs. Elles couvrent aussi un très grand nombre

de domaines d'activités : des microsystèmes à la microélectronique en passant par la médecine et l'industrie nucléaire ou aéronautique.

Dans ce chapitre nous avons présenté quelques applications utilisant la technologie de la piézoélectricité dans déférents domaines en particulier dans le médical, ainsi que leurs caractéristiques et leurs principe de fonctionnement.

Chapitre IV : synthèse et réalisation

IV.1. Synthèse, élaboration et caractérisation de la céramique :

IV.1.1. Introduction :

L'objectif de ce chapitre est d'étudier les procédés d'élaboration et de caractérisation des céramiques $((Na_{0.535}, K_{0.48})_{0.966}\ Li_{0.058}\ Nb_{0.9}\ Ta_{0.1}\ O_3)$. Ce chapitre décrit tout d'abord la méthode de synthèse de poudre par voie solide, choisie pour ce travail, ensuite d'étudier les propriétés diélectriques et piézoélectriques de pastilles issues de cette synthèse.

Le but final est d'élaborer des pastilles piézoélectriques qui seront par la suite utilisées comme capteurs de vibrations.

IV.1.2. Préparation des poudres par voie solide :

La préparation de poudre est également une étape importante pour la mise en œuvre d'une céramique massive. Il existe différentes techniques d'élaboration de poudre peuvent être séparées en deux catégories:

1 - Synthèse par voie liquide (voie chimique).

2 - Synthèse par voie solide .

Pour cette présente étude, nous avons utilisé la synthèse par voie solide qui est un procède facile à mettre en œuvre et moins couteux, elle consiste à faire réagir, à l'état solide des réactifs sous forme de carbonates et d'oxydes. Cette technique est la plus utilisée dans l'industrie car c'est la méthode la plus directe pour la préparation des poudres céramiques. La fabrication de ces dernières fait intervenir de nombreuses étapes qui peuvent être regroupées en cinq blocs **(Figure IV.1) :**

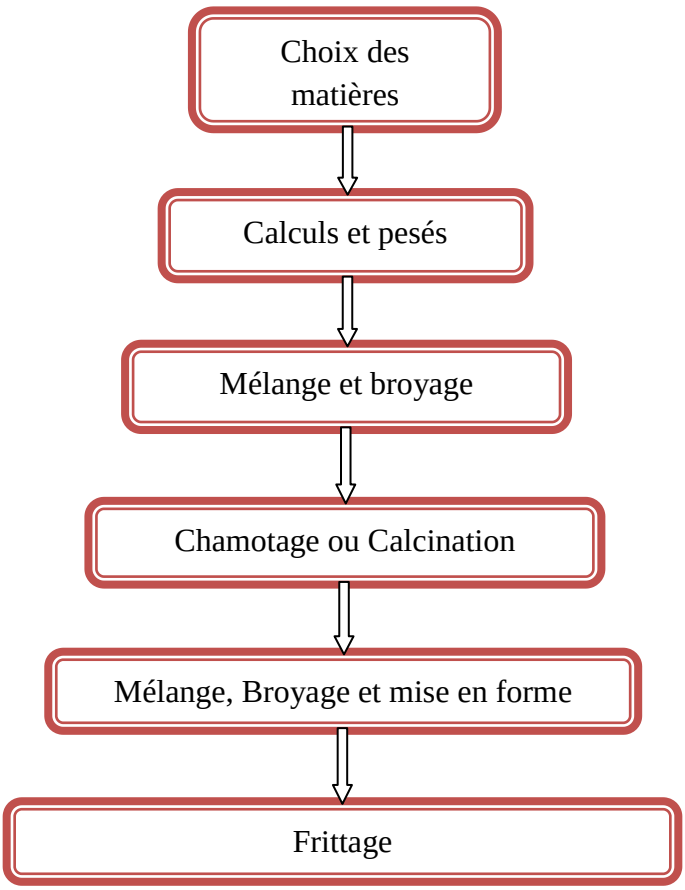


Figure IV.1: Principales étapes de fabrication d'une céramique.

IV.1.2.a. Choix et pesés :

Les produits de départ qui sont utilisés pour la synthèse sont : Na_2CO_3 (carbonate de sodium), K_2CO_3 (carbonate de potassium), Li_2CO_3 (carbonate de lithium), TaO_5 (Penta-oxyde de tantale) et Nb_2O_5 (Penta-oxyde de niobium). Les quantités de produits nécessaires à la synthèse d'un mélange d'environ 20 grammes pour chaque composition sont calculées, pesées et mélangées.

IV.1.2.b. Mélange et broyage des poudres (Broyage par attrition) :

Il s'agit d'une des phases essentielles du cycle de fabrication d'une céramique. C'est également au cours de cette opération que l'on obtient une répartition uniforme des précurseurs. En ajoutant de l'éthanol et des billes en Zircon (ZrSiO4) de diamètre 1.5 mm et

d'un volume égale 6 fois la masse des précurseurs au bêcher cylindrique en téflon dans lequel mélange est broyé à l'aide d'un moteur électrique (broyage par attrition, **Figure IV.2**).

Le mélange (précurseurs, éthanol et les billes) mis en rotation par les pales du bras d'attritor. Le mouvement de l'ensemble se fait dans le même sens que l'axe, avec une vitesse angulaire de 200 tours /minute pendant deux heures.

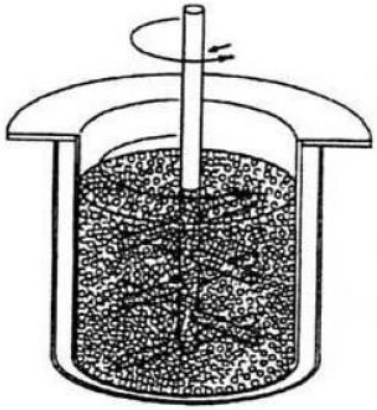


Figure IV.2 : Dispositif d'attrition.

Après deux heures d'agitation, avec l'utilisation de l'éthanol pour le rinçage, la solution est filtrée (récupération des billes dans un tamis) et le précipité obtenu est lavé plusieurs fois avec l'éthanol. Le précipité est alors séché à 100°C dans une étuve pendant douze heures. Après le séchage de la poudre, cette dernière est alors désagglomérée par un broyage manuel dans un mortier en agate **(figure IV.3)**.Afin d'avoir une composition et une structure bien définie.

Figure IV.3: Mortier en agate.

IV.1.2.c. Calcination ou chamottage :

Cette opération a pour but de transformer le mélange en une poudre de composition et de structure cristalline bien définies. Dans ce but, la poudre est soumise à un cycle thermique **(figure IV.4)** permettant la décomposition des carbonates, avoir la phase cristallographique et la réaction des précurseurs par des phénomènes de diffusion en phase solide**.** Le mélange a été porté à haute température dans une barquette d'alumine, elle-même disposée au centre du four à régulation programmables qui permet d'ajuster les principaux paramètres du traitement qui sont : la vitesse de montée en température, la température, la durée du palier thermique et la rampe de refroidissement ainsi que la composition de l'atmosphère du four afin de dégager l'éthanol et l'humidité du mélange.

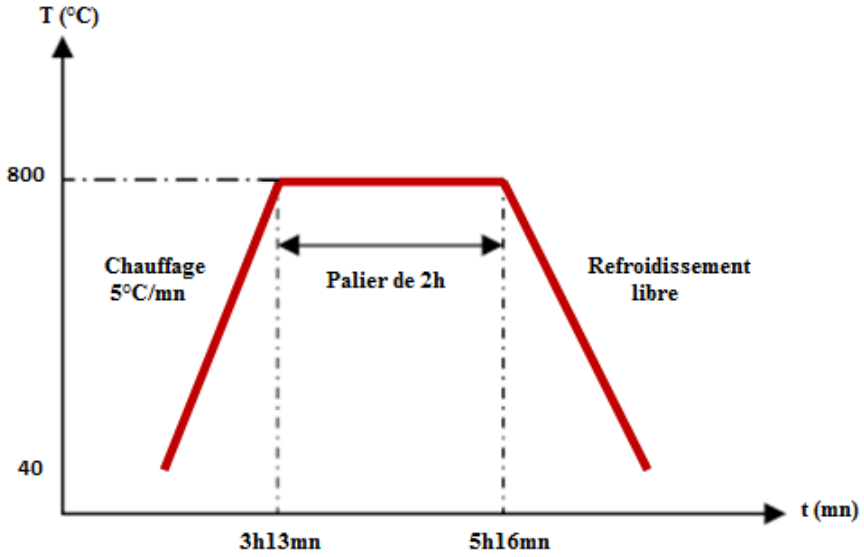


Figure IV.4 : Le cycle thermique de la calcination.

Cependant, un certain nombre de problèmes liés a cette technique, énumérés dans **le tableau IV.1** peuvent survenir lors de cette phase **[53]** :

Problèmes possibles	Causes
Défauts d'homogénéité.	Mélange mal préparé, particules de trop grande taille, mauvaise diffusion.
Taille de grains trop élevée dans la chamotte.	Apparition d'une phase liquide (température trop élevée), cristallisation des grains avec grossissement
Nombreuses phases parasites (impuretés).	Défaut de précision des pesées, réaction incomplète (maintien en température trop bref ou température trop basse)
Mauvaise distribution des constituants.	Mauvaise homogénéité du mélange, broyage inefficace.
Impuretés extrinsèques.	Pollution du broyeur ou la nacelle, four pollué par des oxydes volatils (Pb, Li, Bi etc.) ou réaction avec l'humidité atmosphérique.

Tableau IV.1: Les problèmes possibles liés au chamottage.

IV.1.2.d. Le rebroyage :

Après le traitement thermique, le matériau alors appelé chamotte est rebroyé manuellement afin de réduire la taille des agglomérats, d'homogénéiser la poudre et d'augmenter sa réactivité. La taille des particules diminue avec la durée de broyage pour atteindre une taille de l'ordre de nanomètres**.**

IV.1.3. Elaboration des céramiques :

Pour l'élaboration de la céramique, il faut passer par différentes étapes principales :

IV.1.3.a. Mise en forme par pressage :

Après la calcination de la poudre, l'étape qui suit est le compactage ou la mise en forme. Cette étape s'effectue après l'ajout d'un liant organique (solution aqueuse d'alcool polyvinylique(PVA)) à la poudre synthétisée par voie solide qui enrobe les grains pour former une fine couche plastique qui entraine la formation d'agglomérats. Ce liant est ajouté à lapoudre dans un mortier afin d'avoir une pâte. Cette dernière, est séchée à 100°C dans une étuve puis désagglomérée au mortier. La poudre est ensuite compactée sous forme de pastilles de masse de 0.8g à une pression de 30 KN, pour augmenter la densité de la céramique. Le

compactage a donc pour rôle de donner la forme désirée à la céramique et d'éliminer les pores inter-granulaires de la poudre initiale **[12].**

Pour notre synthèse, nous avons utilisé la méthode de pressage uni-axiale à froid qui correspond à la technique la plus utilisée, car les outils nécessaires, pour la mise en application, sont extrêmement simples et économiques. Dans cette méthode, il suffit d'introduire la poudre, fortement broyée, dans un moule (cylindrique) en acier inoxydable, qu'on place dans une presse hydraulique à axe de pression vertical pour engendrer l'effort de pressage. Cet effort est appliqué suivant un seul axe qui est celui de la presse **(figure IV.5).**

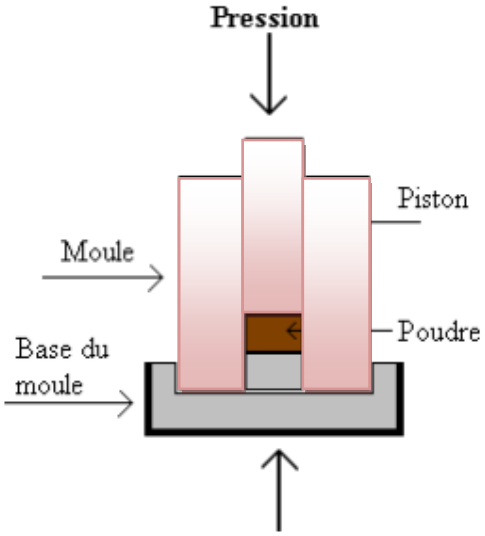


Figure IV.5: Illustration et image de la presse uni-axiale à froid utilisée pour le compactage de la poudre.

IV.1.3.b. Frittage de la poudre compactée (pastilles) :

Le frittage peut être défini comme la consolidation par action de la chaleur d'une agglomération granulaire plus ou moins compacte, avec ou sans fusion d'un ou plusieurs constituants. C'est une opération qui dépend essentiellement de deux paramètres, la température et l'atmosphère de frittage, ces deux derniers influents directement sur la densité, la taille des grains et l'homogénéité en composition du matériau **[20].**

La température de frittage choisie est de 1100°C pendant deux heures, avec une vitesse de monté de 5°C/min et un refroidissement naturel jusqu'à la température ambiante à l'intérieur du four.

Le cycle de frittage est illustré sur **la figure IV.6 :**

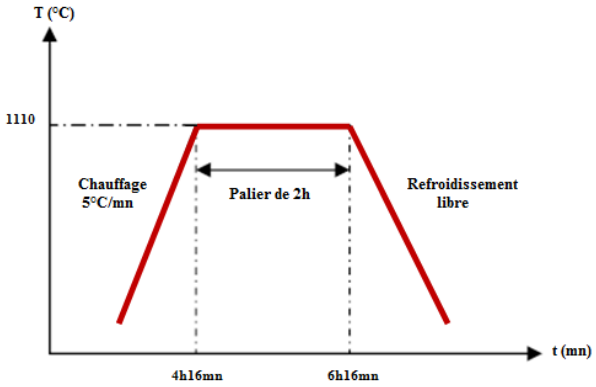


Figure IV.6 : Cycle thermique du frittage.

IV.1.3.c. Rectification (polissage des pastilles frittées) :

Les pastilles après le frittage, n'ont pas la même épaisseur. Elles présentent par ailleurs, de légères déformations. Pour cela, un lissage a été effectué dans le but de rendre les surfaces des pastilles aussi planes que possible et enlever toute porosité apparente en surface ce qui nous permet de diminuer les pertes diélectriques.

IV.1.4. Polarisation de la céramique :

Les échantillons céramiques obtenus après frittage sont rectifiés sous forme de pastilles de dimensions précises (d=11.01, e=1.16) **(figure IV.7)**. Les deux surfaces sont recouvertes d'une couche mince de la laque d'argent (métallisation) puis séchées à 100°C pendant 30 minutes pour obtenir des condensateurs plans. Ces pastilles sont ensuite soumises à un traitement thermique à 600°C pendant 15 minutes pour former les électrodes.

figure IV.7.les pastilles préparés.

Pour étudier les propriétés diélectriques, ferroélectriques et piézoélectriques de la céramique, nous avons utilisé la polarisation par un champ continue. La polarisation des pastilles est réalisée dans un bain d'huile silicone sous un champ électrique externe d'environ 4KV/mm pendant 15 minutes.

Après l'opération de la polarisation, la poudre obtenue est caractérisée par la méthode de diffraction des rayons X en utilisant un diffractomètre, afin de déterminer la nature de la phase obtenue et de s'assurer de sa pureté.

IV.1.5. Caractérisation diélectrique, ferroélectrique et piézoélectrique:

IV.1.5.a. Mesure des constantes diélectriques :

La mesure des facteurs diélectriques tels que la capacité C et les pertes diélectriques tan(δ) a été faite à l'aide d'un impédance-mètre HP4284A sous tension (environ 1V) , à différentes fréquences (1KHz, 10KHz, 100KHz et 1MHz) et à différentes températures (refroidissement de 500°C à28°C).

La permittivité relative est donnée par la relation suivante :

$$\varepsilon_r = (e \times C) / (S \times \varepsilon 0) \qquad \textbf{Eq.IV.1}$$

Avec:

- C : est la capacité mesurée (F)
- e : est la distance entre les deux électrodes (m)
- S : est la surface de l'électrode (m^2)
- ε_0 : est la permittivité du vide, $\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ (F / m)

Figure IV.8 : Photo de l'appareil de mesures des propriétés diélectriques.

L'objectif d'étude de l'effet de la température sur les constantes diélectriques d'un échantillon est de connaitre la température de transition entre les deux phases ferroélectrique et paraélectrique, aussi déduire et prévenir les défauts du l'échantillon.
L'évolution de différents facteurs diélectriques sont représentées sur les figures suivantes :

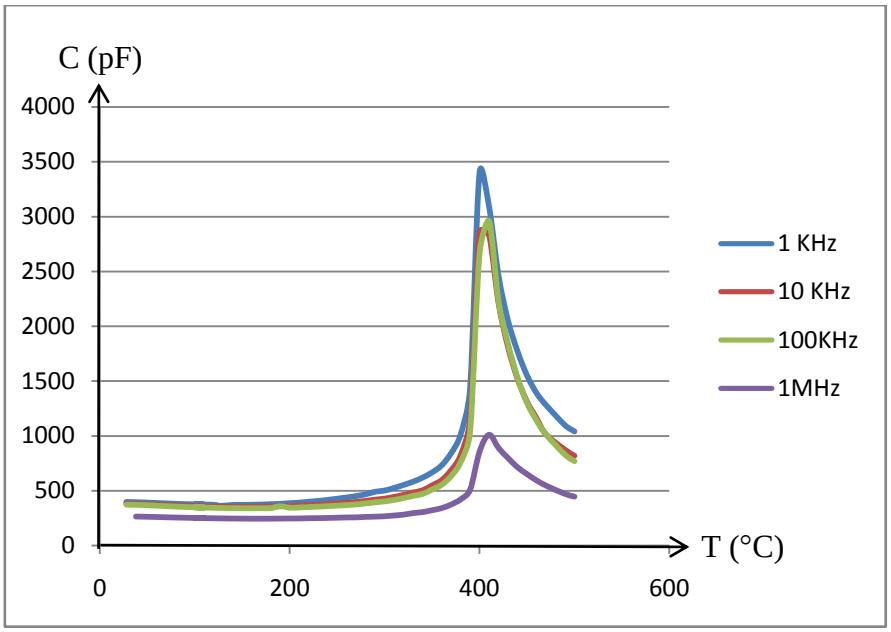


Figure IV.9 : Evolution de la capacité en fonction de la température à différentes fréquences.

En augmentant la température, la capacité de l'échantillon augmente. A 400 °C, il atteint la valeur maximum. Au-delà de cette température, on remarque la diminution de la capacité.

La capacité diminue en augmentant la fréquence

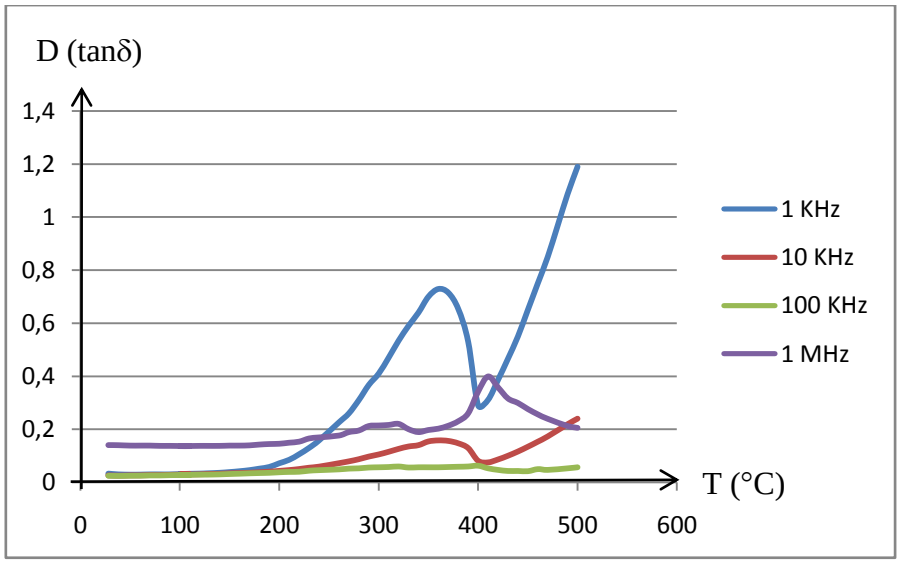


Figure IV.10: Evolution des pertes diélectriques en fonction de la température à différentes fréquences.

Le facteur de dissipation croit continuellement avec l'augmentation de la température jusqu'à où il prend une valeur maximale (350 °C) qui indique un maximum des pertes diélectriques de l'échantillon puis il décroit. Cette décroissance est causée par l'augmentation de la température qui entraine une détérioration des propriétés du matériau qui sont liées au mouvement des murs de domaines.

On constate qu'aux basses fréquences les pertes diélectriques sont très importantes qu'aux hautes fréquences.

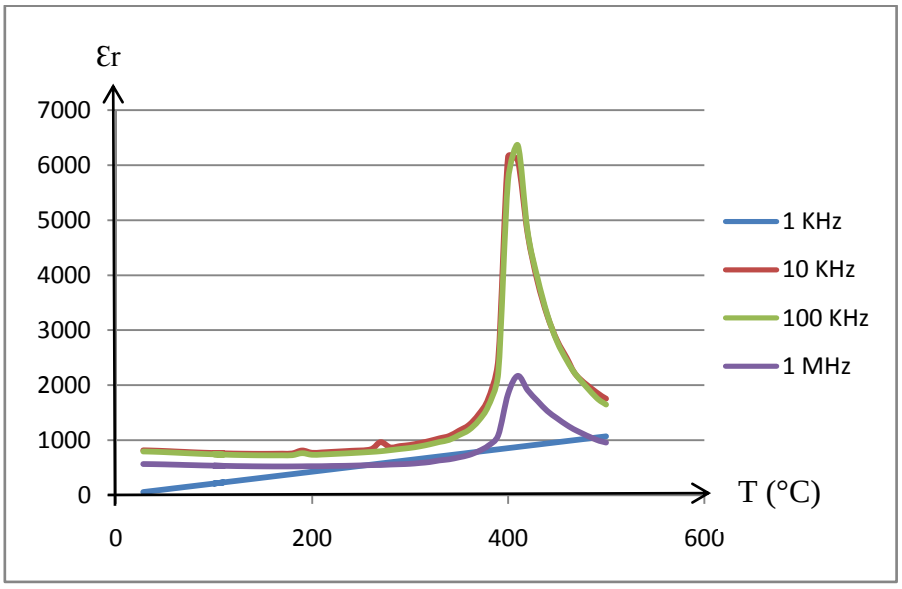


Figure IV.11 : Evolution de la permittivité relative en fonction de la température à différente fréquences.

On constate que l'évolution de εr en fonction de température augmente avec la croissance de température dans le domaine de la ferroélectricité jusqu'à un maximum correspond à la température de curie (transition ferroélectrique- para électrique), puis elle décroit c'est-à-dire que les échantillons perdent leurs propriétés ferroélectriques.

L'augmentation de la fréquence cause une décroissance de la constante diélectrique. Cela peut être expliqué par l'existence des différents types de polarisation

IV.1.5.b. Mesure des constantes piézoélectriques :

Le coefficient piézoélectrique d_{33} a été mesuré en France à l'aide d'un piézoélectrique mètre (Piezotest PM 200) suivant le principe direct de la piézoélectricité. Le principe de mesure consiste à appliquer une force F de 1N à une fréquence de 100 Hz sur l'échantillon et

à mesurer la variation de charge Q résultante. Ce coefficient est déterminé selon la relation suivante :

$$d_{33} = Q / F \qquad \textbf{Eq.IV.2}$$

Avec :

Q : est la charge en pC

F : est la force en N

La valeur mesurée du coefficient piézoélectrique d_{33} est de: 147 PC/N.

Figure IV.12: Piézomètre (Piezotest PM 200).

Les constantes piézoélectriques sont rassemblées dans le tableau suivant :

Constantes PE	d33 (Pc/N)	f_r (Hz)	f_{ra} (Hz)	K^2 ()	Z (Ω)
Les mesures à 1100°C	147	279125	268250	31.12%	161.33

Tableau IV.2: Les différentes constantes piézoélectrique

La mesure des propriétés d'un matériau piézoélectrique permet de choisir des applications appropriées afin d'exploiter ses performances.

IV.1.5.c. Mesure des propriétés ferroélectriques :

La figure IV.13 suivante présente le cycle d'hystérésis de la composition NKLNT :

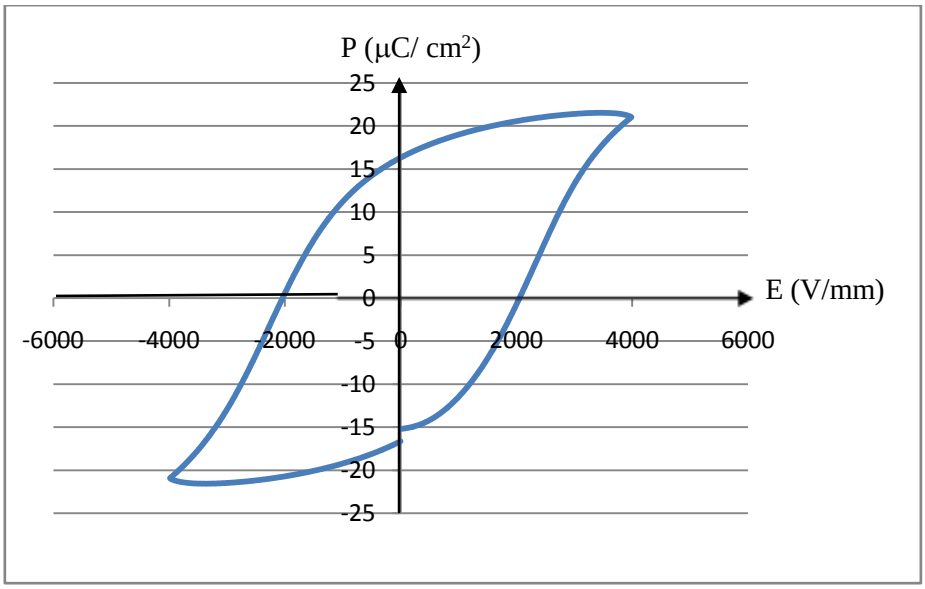


Figure IV.13: Représentation du cycle d'hystérésis à température ambiante sous 4 KV.

Le cycle d'hystérésis ci-dessus est un signe d'un caractère ferroélectrique, les caractéristiques ferroélectriques déterminées sont :

➔ La polarisation rémanente Pr = 16 µC/ cm^2.

➔ Le champ coercitif Ec = 4KV/mm.

IV.2. Montage de conditionnement de la céramique :

Après la synthèse et la polarisation de la céramique, cette dernière s'est acquis les propriétés de la piézoélectricité, donc sous l'action d'une contrainte mécanique (vibration), il y'aura apparition des charges (effet direct de la piézoélectricité) alors la sortie sera lisible en charges. Pour les exploiter il faut faire un circuit de conditionnement pour adapter le signal à la chaîne de mesure.

Pour cela, le circuit de conditionnement choisi est le suivant :

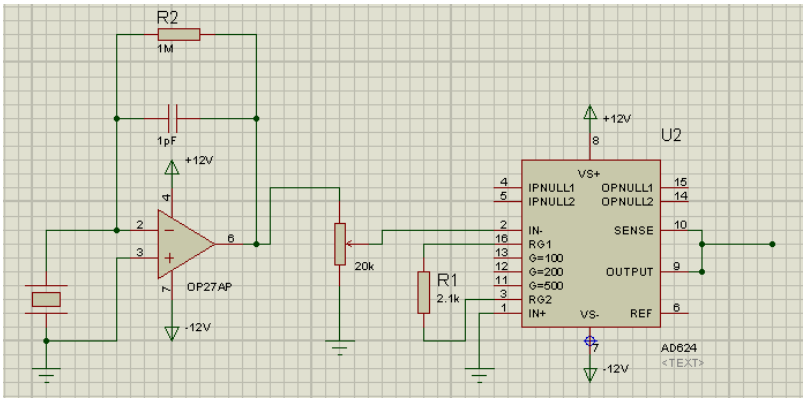


Figure IV.14: Schéma du conditionnement utilisé.

Il est composé essentiellement d'un :

➔ Convertisseur charge/tension.

➔ Etage d'amplification.

IV.2.1. Le convertisseur de charge/tension :

Les amplificateurs de charge convertissent la charge délivrée par un capteur piézoélectrique en une tension proportionnelle, laquelle sert de grandeur d'entrée pour les processus de régulation.

L'amplificateur opérationnel possédant une borne d'entrée inverseuse reliée à une borne du capteur piézo-électrique, possédant une seconde borne mise à la masse. Un condensateur de contre réaction est utilisé pour relier la borne d'entrée inverseuse à la sortie, dont l'amplificateur est commandé par une source d'alimentation symétrique **Figure IV.15**.

L'amplificateur joue le rôle d'intégrateur, il compense en continu la charge électrique produite par le capteur. La tension mesurée aux bornes du condensateur est proportionnelle à la charge produite par le capteur et donc également proportionnelle à la grandeur physique mesurée. L'amplificateur de charge convertit donc une charge électrique Q (entrée) en une tension proportionnelle V (V= – Q/C) (sortie) qui peut être facilement traitée.

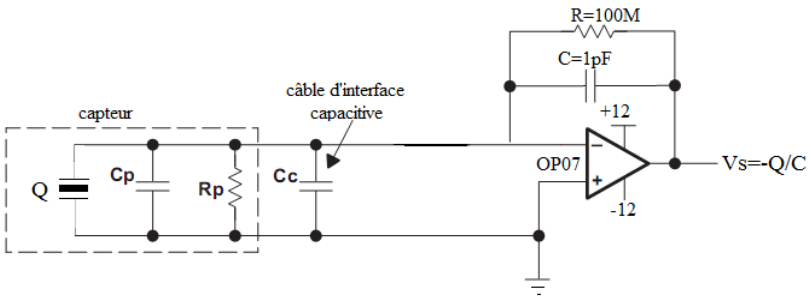


Figure IV.15: Convertisseur de charge/tension.

Avec :

Cp : capacité du capteur.

Rp : résistance interne de capteur.

Cc: capacité du câble.

C : condensateur de plage ou de contre-réaction.

R : résistance de constante de temps.

Q: charge électrique générée par l'élément piézoélectrique.

Vs: tension de sortie.

IV.2.1. La partie amplification :

Quand on fait vibrer le capteur piézo (pastille), le signal de sortie est très faible. Pour cela, il est nécessaire d'utiliser un amplificateur pour l'amplifier et l'adapter à la chaine de traitement.

Le signal électrique issu du capteur est un phénomène bruyant, pour cela les amplificateurs d'instrumentation (exp INA118, AD624…) sont conçus de manière à optimiser les bruits. Dans notre application on a utilisé un AD624 avec un gain de 20 qui est choisi en reliant la patte 13 à la 16 à travers une résistance de 2.1 kΩ. Le schéma d'AD624 est illustré dans la **Figure IV.16:**

(a) (b)

Figure IV.16: a) le schéma interne d'un AD624, b) l'AD624 avec un Gain de 20.

De manière à exploiter les propriétés vues précédemment de notre pastille, on se propose de développer une simple application qui sert à varier la fréquence de sortie d'un oscillateur commandé en tension (VCO) **(figure IV.17)** selon les vibrations appliquées à différentes fréquences.

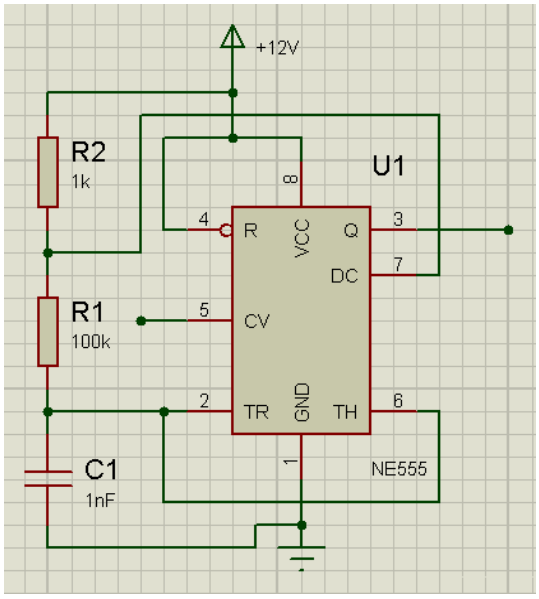


Figure IV.17: Schéma d'un NE555 monté en VCO.

Voici un schéma global de l'application proposée :

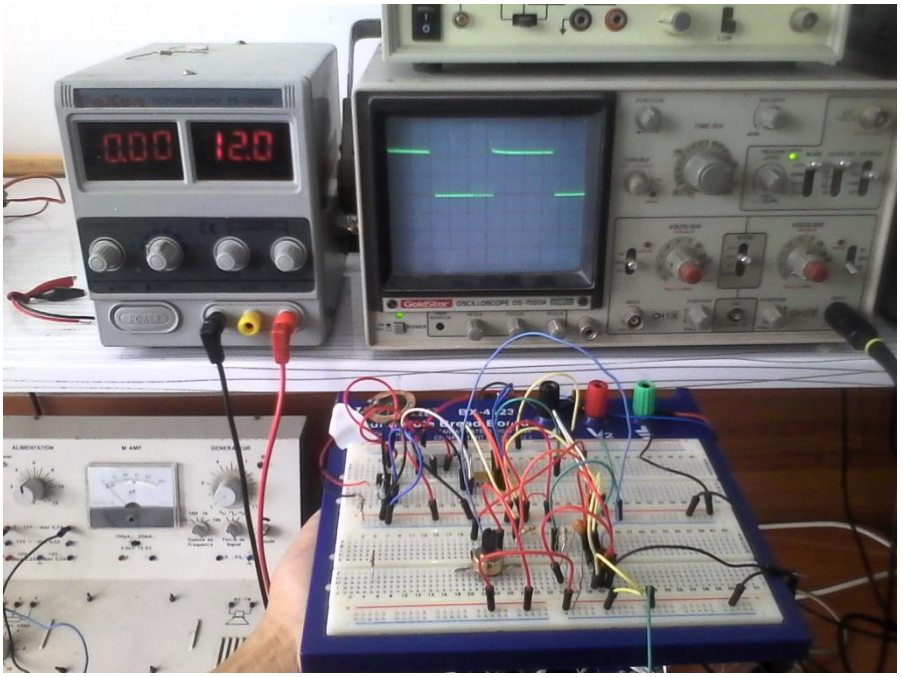


Figure IV.18: Schéma global de notre application.

Initialement, on a calculé les valeurs du condensateur et des résistances utilisées dans le VCO pour avoir une fréquence à vide de 4 KHz.

La fréquence du signal de sortie est calculée en utilisant la loi suivante:

$$F = \frac{1.44}{(R1+2R2)*C} \qquad \textbf{Eq.1}$$

Avec :

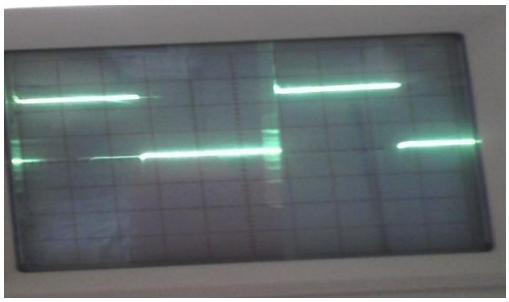
R1 = 1 KΩ

R2 = 1MΩ

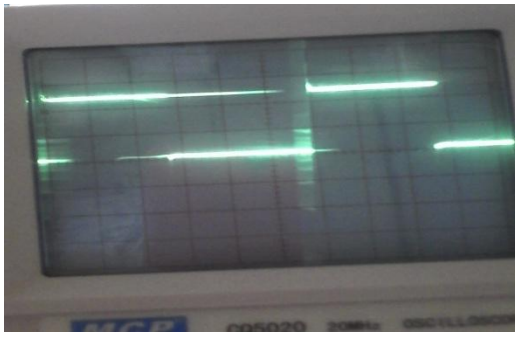
C = 0.1 nF

En appliquant des vibrations à trois différentes fréquences f1, f2 et f3 sur la pastille piézoélectrique, on a visualisé la fréquence de sortie du VCO comme suit :

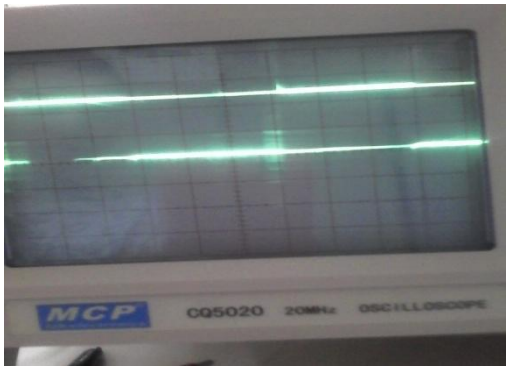
- Pour f1 ➔ Fs = 2.5 KHz



- Pour f2 ➔ Fs = 2 KHz



- Pour f3 ➔Fs = 1,5 KHz



Conclusion :

Les pastilles élaborées frittées à 1100 °C et polarisés à 4 KV, présentent des propriétés diélectriques, ferroélectriques et piézoélectriques très importantes : des pertes diélectriques minimisées, une permittivité diélectrique élevée, un bon cycle d'hystérésis et un meilleur coefficient piézoélectrique d33.

Ce chapitre a montré que la pastille piézoélectrique est une technologie susceptible de remplir le rôle de capteur de vibration notamment au regard des performances appropriées. On peut néanmoins noter que les variations de fréquences en sortie est proportionnelle aux fréquences des vibrations appliquées.

Conclusion Générale

La découverte des matériaux piézo-électriques faite apparaitre de nouveaux systèmes technologiques intéressants dans tous les domaines, l'échographie dans la médecine, les sonars dans la marine, les condensateurs haute capacité… etc. La piézoélectricité est peut être la technique de production d'électricité de demain, sans impact sur l'environnement, sans contrainte pour l'utilisateur, utilisable à différentes échelles et production d'énergie gratuite. Néanmoins, les recherches et le développement de cette technique est loin d'être terminé.

Ce présent travail, effectué au laboratoire de Chimie Appliquée et Génie Chimie (LCAGC) à l'université de Mouloud Mammeri (UMMTO), s'inscrit dans le cadre d'élaboration, caractérisation et application des pastilles piézoélectriques. Tout au long de notre étude, nous nous sommes intéressées à synthétiser la céramique de type $((Na_{0.535}, K_{0.48})_{0.966}\ Li_{0.058}\ Nb_{0.9}\ Ta_{0.1}\ O_3)$ en utilisant la technique de synthèse par voie solide, ainsi qu'à l'étude de leurs propriétés diélectriques, ferroélectriques et piézoélectriques.

Les mesures des propriétés diélectriques (permittivité diélectrique, capacité et pertes diélectriques) ont été effectuées après métallisation des deux faces des échantillons céramiques par la laque d'argent Ag. L'évolution en fonction de la température a été effectuée entre 28 °C et 500°C à différentes fréquences (1KHz, 1OKHz, 100 KHz et 1MHz). Par ailleurs, ces échantillons présentent des propriétés piézoélectriques intéressantes. En particulier, les fortes valeurs de la constante piézoélectrique d_{33} et le facteur de couplage K^2.

Les variations de fréquences obtenues dans notre application en appliquant des vibrations sur la pastille piézoélectrique à différentes fréquences, confirment les bonnes propriétés de cette dernière.

Comme perspectives pour ce travail nous pouvons envisager :

➔ L'optimisation et caractérisation des matériaux piézoélectriques sans plomb utilisables dans une plus large gamme de température.

➔ L'approfondissement des déterminations des caractéristiques électriques par des mesures complémentaires dans un plus large domaine de température (jusqu'à 700 °C) et de fréquence (jusqu'aux hyperfréquences).

➔ Des améliorations peuvent également être apportées pour ce qui concerne le substrat et la métallisation dans le souci de caractériser plus aisément les pastilles épaisses, il serait utile de

métalliser encore plus finement le substrat par d'autres techniques plus simples pour remonter plus facilement aux coefficients piézoélectriques.

Les demandes concernant les nouveaux matériaux piézoélectriques devenant pressantes, il semble naturel de se diriger également vers leur croissance sous forme monocristalline ou de dépôt en couches minces.

Références bibliographies

[1]M. BENAISSA Alaeddine, « Analyse de la modélisation et le contrôle d'une pompe piézoélectrique », mémoire de magister, université ferhat abbas _ setif, 2011.

[2] ARNAUD PARENT, « Apport des nouveaux matériaux piézoélectriques dans le domaine des micro-gyromètres vibrants », thèse de doctorat, l'université de paris-sud, 11 juillet 2008.

[3] JULIEN YONG, « Contribution à l'étude d'un capteur de force piézoélectrique résonant à forte raideur pour interfaces haptiques aéronautiques », thèse de doctorat, université de Toulouse, 11 avril 2013.

[4] ABDULRAHMAN HAMED, « Conception, simulation et implantation sur SOPC d'un analyseur d'impédance rapide dédié aux capteurs et transducteurs piézoélectriques », Thèse de doctorat, université de lorraine ,24 Mai 2012.

[5] B. JAFFE, R.S. ROTH, S. MAZULLO, «Piezoelectric properties of lead zirconate lead titanate solid solution ceramics, J. Applied physics», 1954, Vol. 25, pp. 809-810.

[6] http://publilgep.geeps.centralesupelec.fr/papers/001233.pdf

[7] http://euromin.w3sites.net/Nouveau_site/mineralogiste/biographies/Hauy2f.htm

[8] http://plasmasfroids.cnrs.fr/IMG/pdf/Pigache.pdf

[9]http://www.upmc.fr/fr/universite/histoire_et_personnalites/les_prix_nobel/gabriel_lippmann_physique_1908.html

[10] http://www.universalis.fr/encyclopedie/piezo-electricite

[11] http://fr.wikipedia.org/wiki/Paul_Langevin

[12] B.GUIFFARD, « Elaboration caractérisation de la céramique ferroélectrique de type PZT fluoré », thèse de doctorat, l'institut national des sciences appliquées de Lyon (1999).

[13] Mme BABA AHMED (née OURRAD) MERIEM, « Etude de l'Effet de la Température de Transition de Phase sur le Mode de Fonctionnement des FeRAM Application du Modèle de Landau »thèse de doctorat, l'université ABOU-BAKR BELKAÏD – TLEMCEN,2013.

[14] ABBA MALIKA, « Synthèse, caractérisation et étude des propriétés Piézo-électriques des céramiques de type PZT: Pb1-y Lay [Zrx Tiz (Mo1/3 In2/3)1-(x +z)] 1-y/4 O3 »,thèse de doctorat, université de BISKRA,2012.

[15] P, MASON, « Piezoelectric crystals and their application to ultrasonics » New York Van Nostrand., 1950 .

[16] SAHRAOUI LAILA, « Génération et détection des ondes de volume dans les structures piezoelectriques et modélisation d'un échographe a ultrasons », mémoire de magister, université de BATNA.

[17] MRRCIN MARZENCKI, « Conception de micro-générateurs intégrés pour systèmes sur puce autonomes », thèse de doctorat, université JOSEPH FOURIER, 30 mars 2007.

[18] HICHEM NOUIRA, « Contribution a la conception d'un micrconvertisseur d'énergie mécanique vibratoire en énergie électrique », thèse de doctorat, université de FRANCHE – COMTE, 2008.

[19] GHALMI.Z. «Contribution au développement d'un capteur ultrasonique pour mesurer l'épaisseur de la glace» Thèse en doctorat présenté à l'université du Québec à Chicoutimi, Mars 2006.

[20] SAIDI MALIKA, « L'effet de dopage d'éléments sur les propriétés diélectriques et piézoélectriques de la composition $(Na_{0.5}Bi_{0.5})_{0.94}Ba_{0.06}TiO_3$ synthétisé par technique Sol-Gel »,mémoire de magister, UMMTO, 12/09/2012.

[21] Robert, Matériaux pour l'Électrotechnique, Chapitre 4, P.225, Dunod.

[22] MATTEO BULLO, « Modélisation et commande de moteur piézoélectrique à onde progressive », 2005.

[23] MENASRA HAYET, « Influence de la température de frittage sur les propriétés structurales, diélectriques et piézoélectriques dans le système ternaire: $Pb_{0.95}$ (La1-z, Biz)$_{0.05}$ [($Zr_{0.6}$, $Ti_{0.4}$)$_{0.95}$(Mn1/3, Sb2/3)$_{0.05}$]O_3 ».

[24] KENNOUR SADIA, « Synthèse par technique sol gel et caractérisation diélectriques de formulation (1-x)$Na_{0,5}$ $Bi_{0,5}$ TiO_3-x $BaTiO_3$ » , mémoire magister, UMMTO, 19/11/2011.

[25] SEBASTIEN QUIGNON, « Synthèse et caractérisations de couches minces de matériaux piézoélectriques sans plomb», thèse de doctorat, université de VALENCIENNES ET DU HAINAUT-CAMBRESIS, 21/11/2013.

[26] SAHIR MASMOUDI, « Comportement mécanique et caractérisation par implant piézoélectrique ultrasonore intégré d'un matériau composite », thèse de doctorat, université DU MAINE ET DE SFAX, 27/09/2013, p 2-14.

[27] LAURENT GOUJON, « étude des composites piézo-électriques 1.3, pour applications électroacoustiques sous-marines », thèse de doctorat, INSA de Lyon, 9 décembre 1999.

[28] NEWNHAM, R.E., BOWEN, L.J., KLICKER, K.A., CROSS, L.E. Composite piezoelectric transducers, Materials in engineering, 1980, vol. 2, p93-106.

[29] SAFARI, A. Development of piezoelectric composites for transducers, J. Phys, 1994, vol4, p1129 1149.

[30] LEVASSORT, F. LETHIEQ, M. MILLER, C. POURCELOT, L. «Modeling of highly loades 0-3 piezoelectric composites using a matrix method. IEEE Trans ». Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control 1998, 45, 1497 – 1505.

[31] ZOUHAIR SADOUNE, « Modélisation et simulation des matériaux composites Piézoélectriques Cas du SiO2 », thèse de doctorat, université MOHAMMED V – AGDAL le 30 Novembre 2013, p66, 75.

[32] LYNCH C.S. «The effect of uniaxial stress on the electro-mechanical response of 8/65/35 PLZT». Acta. Mater. 1996, vol.44, n° 10, pp. 4137-4148.

[33] BOWEN, L.J., FRENCH, K.W. «Fabrication of piezoelectric ceramic/polymer composites by injection molding», Proc. of the 8th IEEE International Symposium on Applications of Ferroelectrics, Greenville, August 31 - September 2, 1992, p160-163.

[34] Safari, A; Janas, V.F.; Bandyopadhyay, A. «Development of fine-scale piezoelectric composites for transducers». *AIChE J.* 1997, *43*, 2849–2856.

[35] GEBHARDT S., SCHÖNECKER A., STEINHAUSEN R., SEIFERT W., BEIGE H. «Quasistatic and dynamic properties of 1-3 composites made by soft molding». J. Eur. Ceram. Soc, 2003, vol.23, n° 1, pp. 153-159.

[36] Smart Material Corp.Available Online: http://www. Smart-material.com

[37] *Review*, High Temperature, High Power Piezoelectric, Composite Transducers.

[38] Les Composites Se Greffent Sur L'homme, par Olivier James - Publié le 24 mars 2011 | L'Usine Nouvelle n° 3232.

[39] NICOLAS RIZET, «Contrôle actif de vibrations utilisant des matériaux piézo-électriques», thèse de doctorat, INSA de LYON, année 1999, p13, 17.

[40] http://www.ni.com/white-paper/12823/fr/

[41] http://www.alliantech.com

[42] Maxime DEFOSSEUX, «Conception et caractérisation de microgénérateurs piézoélectriques pour microsystèmes autonomes », thèse de doctorat, université DE GRENOBLE, 4 octobre 2011.

[43] N. Shenck and J. Paradiso, «Energy scavenging with shoe-mounted piezoelectrics », *IEEE Micro*, vol. 21, no. 3, pp. 30–42, May/Jun 2001.

[44] S. Platt, S. Farritor, and H. Haider, «On low-frequency electric power generation with pzt ceramics», *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 10, no. 2, pp. 240–252, April 2005.

[45] M. Renaud, K. Karakaya, T. Sterken, P. Fiorini, C. V. Hoof, and R. Puers, «Fabrication, modelling and characterization of mems piezoelectric vibration harvesters», *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 145-146, pp. 380 – 386, 2008.

[46] BEDRANE ASMAA, «Etude de l'actionnement électrostatique d'une membrane en Silicium-Contrôle du volume injecté par une micro pompe», Décembre 2013.

[47] Rémy LEFEVRE, «Conception, Développement et Optimisation d'une Micropompe MEMS à Membrane pour Dispositif Médical d'Injection», 15 Juillet 2013.

[48] Abdelmajid Bybi, «Contribution à l'étude et à la correction de la diaphonie dans les réseaux de transducteurs piézoélectriques pour l'imagerie médicale», 06/12/2012.

[49]BOUSSAD Abdelhakim, « Analyse du fonctionnement d'un moteur piézo-électrique à onde progressive», mémoire magister, université EL-HADJ LAKHDAR BATNA ,12 juin 2012.

[50] http://www.geniemeca.fpms.ac.be/Recherche/recherche_piezoelectrique.htm

[51] https://zestedesavoir.com/tutoriels/343/realiser-un-telemetre-a-ultrasons

[52] http://l.lefebvre.free.fr/tele/tele_01.html

[53] N. ABDESSALEM, La frontière morphotropique de phase (FMP) dans le système ternaire: xPbZrO3-yPbTiO3-zPb (Cr1/5Zn1/5Sb3/5) O3, Mémoire de magister, Université de Biskra, 2001.

Résumé

A l'heure actuelle, l'avancé technologique des capteurs et transducteurs piézoélectriques ne cesse d'évoluer dans tout les domaines d'applications, d'un point de vue dispositifs, cette évolution permet l'apparition de nouvelles fonctionnalités qui marient plusieurs domaines tels que la mécanique et l'électronique.

L'objectif principal se repose sur l'élaboration d'une pastille piézoélectrique pour une application médicale. Nous nous sommes intéressés à l'étude des propriétés diélectriques, ferroélectriques et piézoélectriques.

Les matériaux piézoélectriques classiquement utilisées comme capteurs, sont des céramiques qui présentent plusieurs inconvénients : la rigidité (non flexible), les modes de vibrations générant des parasites et la haute impédance, ces dernières années ont poussées les chercheurs à s'intéresser aux matériaux piézocomposites qui possèdent des propriétés supérieures à ceux des matériaux monophasés (céramiques, polymères ou cristallins) compensant ainsi la majorité des inconvénients, c'est ce qui nous a motivés a approfondir notre étude et réaliser notre capteur à base d'un des matériaux composites : céramique-polymère.

Les échantillons choisis pour notre réalisation sont : Na_2CO_3, K_2CO_3, Li_2CO_3, Ta_2O_5 et Nb_2O_5, ils ont été préparés par la méthode de synthèse par voie solide, on finira notre étude par une conclusion générale suivi de quelques perspectives à apporter dans un avenir proche.

Mots clés : Ferroélectricité / Diélectrique / Piézoélectricité / Pastille piézoélectrique / Céramique / Polymère / PZT / Composite / Polarisation / Matériaux piézoélectriques.