



N° d'ordre :...../2016

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

Université Mohamed Boudiaf - M'sila

Faculté des Sciences

Département de Physique

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de :

MASTER

Domaine : **Sciences de la matière**

Filière : **Physique**

Option : **Sciences des Matériaux**

Par

HAMOUCHE Safia

THEME

**Simulation des phénomènes magnétoélectriques dans les
multicouches piézo-magnétiques**

Soutenue le : 08/06/2016

Devant le jury composé de :

| | | | |
|-----------------|-----|-----------------|------------|
| IBRIR Miloud | Dr | Univ. de M'sila | Président |
| BELOUADAH Rabah | Dr | Univ. de M'sila | Rapporteur |
| TORKI Zohir | MCA | Univ. de M'sila | Examineur |

Promotion Juin 2016

Remerciements

Avant tout je remercie tout d'abord "Allah" qui nous a donné le courage et la volonté à fin que je puisse à chever ce mémoire.

Je commence la remercie et tout les respects à mon expert encadreur Dr BELOUADJH. R

Maitre de conférence à l'université de M'sila qui m'avoit dirigé et suivi cette travail, aussi pour sa disponibilité, son aides très efficace et précieux conseils.

Nous également remercions tous les membres du jury des maitre Assistant à l'université de M'sila : Mr IBRAHIM comme président, Mr BELOUADJH. R et Mr TORJI. Z comme examinateur et Mr BACHIR. N comme examinateur qui sont acceptés de participer à la valorisation de ce travail.

Nous remercie également tous nos enseignants du département de physique.

Et à tous ceux qui nous ont aidés de proche ou de loin pour accomplir nous études en master physique.

Le travail présenté dans ce rapport a été réalisé au sein du laboratoire de physique solide.

Dédicaces

À

Mon symbole de don et de sacrifice: mon très cher père **Mohamed**

Ma source de tendresse et d'amour : ma très chère mère **Fatiha DRAHMANI**

Tous mes frères et sœurs : **Zakariya, Oussama et Khawla, Salsabil, Alaa
ferdous**

À tout ma famille **HAMOUCHE et DRAHMANI**

À ceux que j'aime et toutes mes amis

Tous mes professeurs, tous mes collègues de la promotion 2016.

Je dédie ce travail.

SAFIA

Sommaire

| | |
|--|----|
| Introduction générale | 1 |
| Chapitre I : Généralités | |
| I.1.Introduction | 4 |
| I.2.Contrôle du magnétisme par le champ électrique | 4 |
| I.3. Magnétoélectriques | 4 |
| I.3.1.Historique | 4 |
| I.3.2.Composition | 5 |
| I.3.3. Paramètres de coefficient ME dans un matériau multicouche | 5 |
| I.3.4. Quelques effets magnétoélectriques | 8 |
| I.3.5. Effet ME intrinsèque | 9 |
| I.3.6. Effet ME extrinsèque | 10 |
| I.4.Multiferroïques | 11 |
| I.4.1.Le ferromagnétisme | 12 |
| I.4.2.La ferroélectricité | 12 |
| I.4.3.La magnétoélectrique | 12 |
| I.5.Cycle d'hystérésis $P=f(E)$ | 15 |
| I.6. Cycle d'hystérésis $B=f(H)$ | 15 |
| I.7. Composites | 16 |
| I.7.1. Les matériaux composites | 17 |
| I.8. Multicouches | 17 |
| I.8.1. Propriétés EM des matériaux multicouches | 18 |
| I.9.Applications | 19 |
| I.9.1.Capteurs | 19 |
| I.9.1.1.Champ magnétique statique | 19 |
| I.9.1.1.Champ magnétique alternatif | 20 |
| I.9.2.Transducteurs | 20 |
| I.9.3.Mémoires | 21 |
| I.9.4.Récupération d'énergie | 22 |
| I.10.Le matériau piézoélectrique | 23 |
| I.10.1. Définition | 23 |
| I.10.2. Phénomène de la piézoélectricité | 25 |

Sommaire

| | |
|--|----|
| I.10.3. Les équations piézoélectriques | 26 |
| I.10.4. Les matériaux | 27 |
| I.10.5. Des comparaisons | 29 |
| I.11. Conclusion | 30 |
| Chapitre II : Modélisation | |
| II.1. Introduction | 31 |
| II.2. Courant électrique | 31 |
| II.2.1. Le courant de déplacement | 31 |
| II.2.2. Courant de déplacement et courant de conduction | 32 |
| II.3. Tension électrique | 32 |
| II.4. Cas isotrope et Cas uniaxial | 33 |
| II.4.1. Cas isotrope | 33 |
| II.4.2. Cas uniaxial | 34 |
| II.5. Composites macroscopiques magnétoélectriques | 36 |
| II.6. Choix des matériaux | 36 |
| II.7. Couche magnétostrictive | 37 |
| II.7.1. La matrice de polyuréthane (PU) | 37 |
| II.7.2. Les charge de magnétite Fe_3O_4 | 38 |
| II.7.2.1. Composition chimique et structure cristalline de Fe_3O_4 | 39 |
| II.7.2.2. Propriétés magnétiques de Fe_3O_4 | 39 |
| II.8. multicouches modélisation (magnétostrictif/piézoélectrique) | 41 |
| II.8.1. Les équations de la modalisation | 41 |
| II.9. Conclusion | 44 |
| Chapitre III : Simulations | |
| III.1. Introduction | 45 |
| III.2. Les objectifs | 45 |
| III.3. Choix du logiciel | 45 |
| III.4. Simulink par MATLAB | 47 |
| III.5. Choisir les paramètres de simulation | 49 |
| III.6. Le principe de magnétoélectrique d'une structure unimorphe | 49 |
| III.7. Modélisation du courant ME et tension ME d'un échantillon | 50 |

Sommaire

| | |
|--|----|
| multicouche | |
| III.8.Présentation d'étude | 50 |
| III.9.Description du Bance expérimental | 51 |
| III.10.Le principe de mesure | 52 |
| III.11.Propriétés piézomagnétiques sous champ statique | 52 |
| III.12.Influence des paramètres magnétique | 56 |
| III.12.1.le courant magnéto-électrique | 56 |
| III.12.2. la tension magnéto-électrique | 58 |
| III.13.Conclusion | 60 |
| Conclusion générale | 61 |
| Références bibliographiques | 63 |

Introduction général

Introduction général

L'existence d'un effet magnéto-électrique a été pour la première fois évoquée à la fin du 19^{ème} siècle par Curie. À partir d'analyses de symétrie sur les cristaux, il montre qu'une molécule peut se polariser électriquement par l'application d'un champ magnétique, et inversement, qu'elle peut s'aimanter en lui appliquant un champ électrique. Dans son compte rendu de l'académie des sciences en 1926, Bauer évoque également l'existence de ce couplage. À partir de la théorie des milieux diélectriques, il prédit ainsi qu'un champ magnétique parallèle au champ électrique doit augmenter la constante diélectrique dans le cas où le moment électrique et l'axe de la molécule sont confondus. En 1927,

Le magnétisme est un phénomène connu de l'homme depuis des milliers d'années. Déjà 600 avant Jésus-Christ, certains récits de Thalès de Milet faisaient mention de la magnétite. Il s'agit en fait probablement d'un des plus vieux sujets scientifiques qui soit. Néanmoins, ce n'est qu'au 19^{ième} siècle que la science a commencé à fournir des modèles avancés du phénomène avec les travaux de Michael Faraday (1791 – 1867) et de James Clerk Maxwell (1831 – 1879). Les différents types des matériaux magnétoélectriques est composé par deux effet, l'effet intrinsèque. Dans un matériau monophasé, le couplage intrinsèque entre l'état électrique et l'état magnétique est défini comme l'effet magnéto-électrique, et l'effet extrinsèque est l'application d'un champ magnétique génère une déformation mécanique sur les phases magnétostrictives on peut observer cette effet dans les matériaux composites et les matériaux multicouches.

Les matériaux piézoélectriques présentent un couplage électro-mécanique : l'application d'une contrainte conduit à une modification des propriétés diélectriques du matériau. Réciproquement, l'application d'un champ électrique déforme le matériau. Les matériaux magnéto-électriques sont des matériaux actifs qui sont aujourd'hui au cœur de nombreuses thématiques de recherche. La caractéristique principale de ces matériaux est la modification de la polarisation électrique induite par un champ magnétique. Inversement, un champ électrique peut modifier l'aimantation de ces matériaux.

Les matériaux piézoélectriques capables de convertir l'énergie électrique en énergie mécanique (et réciproquement) sont très largement utilisés pour des applications de

Introduction général

transduction ultrasonore (imagerie médicale et contrôle non destructif) ainsi que pour des applications de capteurs et d'actionneurs. La piézoélectricité (du grec « *piezein* » pressé, appuyer) est la propriété possédée par certains corps qui se polarisent électriquement sous l'action d'une contrainte mécanique. Inversement, ces corps peuvent se déformer sous l'action d'un champ électrique. Ce phénomène a été découvert au XIX^{ème} siècle par les frères Pierre et Jacques Curie.

Les matériaux magnétostrictifs peuvent être classés en trois groupes principaux. Le nickel et les alliages métalliques ont été les premiers matériaux à être utilisés. Ensuite, les ferrites magnétostrictives ont été mises au point. Enfin, le groupe de matériaux le plus récemment étudié : est celui des composés de terres rares-fer.

Les domaines magnétiques sont des zones d'aimantation homogène mais de directions moyennes différentes d'un matériau magnétique qui sont liées à ses propriétés microscopiques et macroscopique. La minimisation de l'énergie libre du système est la raison principale pour laquelle les matériaux magnétiques manifestent une structure en domaines. Ce phénomène résulte de la compétition entre les énergies d'anisotropie magnétocristallin, d'échange, magnétostatique et Zeeman du matériau.

Notre travail présentera simulation des phénomènes magnétoélectriques dans les multicouches piézomagnétiques.

On a des multicouches construites d'une couche piézoélectrique de PZT 189 collé sur une couche magnétostrictive d'un polymère Polyuréthane chargé pour des nano particules de Fe_3O_4 . Ils existent plusieurs types de modélisation : il y a modélisation macroscopique, microscopique et semimicroscopique.

Dans ce travail nous allons utiliser un modèle semimicroscopique construit à base d'un modèle masse-ressort-amortisseur.

L'effet d'une sollicitation interne ou externe, qu'elle soit de nature électrique ou mécanique, peut conduire dans ces matériaux soit à une diminution, soit à une amélioration des performances du dispositif. Ainsi, certains transducteurs utilisés en acoustique sous-marine (transducteurs de Tonpilz) sont soumis à l'effet d'une contrainte mécanique afin d'optimiser leurs performances. Inversement, les sondes ultrasonores utilisées dans le domaine biomédical exploitent l'effet d'un champ électrique statique pour améliorer la réponse des sondes

Pour calculer la réponse magnétoélectrique à partir de modèle choisie nous allons utiliser le logiciel de simulink ; ce logiciel travaille sous l'environnement MATLAB.

Introduction général

Ce mémoire est composé de Trois chapitres,

Dans le premier chapitre Nous présenterons les défèrent définitions nécessaire et les terminologies utiliser pour décrire le phénomène magnétoélectrique et les défèrent types des matériaux magnétoélectriques et leur effet et ces applications.

Dans le second chapitre on va défini le courant et la tension électrique et nous présenterons les composites macroscopiques magnétoélectriques et une aperçue sur les matériaux magnétostrictif et piézoélectrique et infini par modélisé l'étude expérimental

Le dernier chapitre consacré à la validation expérimentale de la méthode proposée, et on va simuler le modèle validé par l'utilise le logiciel MATLAB est principalement avec SUMILINK, et on va étudier l'influence des paramètres mécaniques, magnétiques, piézoélectriques, magnétostrictives.

La méthode sera expliquée via un modèle et des simulations. Des résultats expérimentaux viendront prouver les performances de la méthode proposée.

Ce mémoire se terminera par une conclusion générale récapitulant les résultats obtenus et donnant des perspectives

Chapitre I :

Généralité

Chapitre I : Généralités**I.1. Introduction**

Dans ce chapitre on va présenter les différentes définitions nécessaires et les terminologies utilisées pour décrire le phénomène magnétoélectrique.

Par la suite on va présenter les différents types de la magnétoélectricité et les différents types des matériaux magnétoélectrique (multicouches, composite, multiferroïques).

Magnétoélectrique intrinsèque (Cr_2O_3) ou multiferroïques (BiFeO_3) qui présente à la fois un effet ferroélectrique et ferromagnétique

Magnétoélectrique extrinsèque (multicouches, composite) qui présente des constitutions (piézoélectrique et magnétostrictive).

A la fin de ce chapitre on va présenter la différente application de cet effet.

I.2. Contrôle du magnétisme par le champ électrique

Dans ce chapitre, nous essaierons dans un premier temps de donner une vue d'ensemble des matériaux qui présentent un effet magnétoélectrique, en commençant par les matériaux multiferroïques naturels. Ensuite, nous regarderons les différents composites utilisant le couplage mécanique de matériaux piézoélectriques et de matériaux magnétostrictifs.

Enfin, le contrôle du magnétisme par le champ électrique dans les couches ultra-minces sera présenté.

Ce chapitre permettra de situer nos travaux et de définir les spécifications et les Contraintes sur le développement des matériaux dans le but d'utiliser l'effet magnétoélectrique dans des dispositifs tels que les inductances variables, mémoires Magnétiques, capteurs, récupérateurs d'énergie, etc...

I.3. Magnétoélectrique**I.3.1. Historique**

En 1894, P. Curie a imaginé l'existence d'un effet magnéto-électrique intrinsèque et la première démonstration de l'effet piézoélectrique direct est due en 1880 [1], en écrivant : "les conditions de symétrie nous permettant d'imaginer qu'un corps peut se polariser magnétiquement lorsqu'on le place dans un champ électrique". Le terme "magnéto-électrique" doit son origine à Debye en 1926. Cependant, cet effet n'a été observé expérimentalement que

plusieurs années plus tard, par Dzyaloshinskii avec un échantillon d'oxyde de chrome en 1959 [2].

I.3.2. Composition

Nous pouvons distinguer les matériaux diamagnétiques (cuivre, eau...), paramagnétiques (air, aluminium...) et ferromagnétiques (fer, cobalt...). Ils sont habituellement constitués d'atomes, molécules, ou ions qui possèdent un moment magnétique permanent. Généralement, les matériaux utilisés dans le domaine des hyperfréquences sont les ferrimagnétiques, ou plus particulièrement les ferrites (oxydes ferrimagnétiques). Nous définissons la perméabilité magnétique μ d'un matériau comme le rapport entre l'induction magnétique B et le champ magnétique H existants dans le matériau.

$$\mu = \mu_0 \mu_r \quad (\text{eq 1.1})$$

Avec :

μ_0 : perméabilité du vide ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H. m}^{-1}$)

μ_r : perméabilité relative

Le vecteur d'induction magnétique \vec{B} est reliée au vecteur de champ magnétique \vec{H} par :

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H} \quad (\text{eq 1.2})$$

La perméabilité magnétique peut être présentée soit en fonction de la fréquence pour un champ interne donné, soit en fonction du champ interne pour une fréquence donnée.

I.3.3. Paramètres de coefficient ME dans un matériau multicouche

Plusieurs paramètres physiques entrent dans l'identification de coefficient ME dans le cas d'un matériau multicouche :

- Les coefficients de couplage de chaque constituant (Piézoélectrique, Magnétostrictive).
- Le nombre des couches et leur géométrie
- La méthode de couplage.

L'effet magnétoélectrique est le couplage entre les champs électriques et magnétiques dans la matière, permettant le contrôle des propriétés magnétiques par un champ électrique ou inversement celui de la polarisation électrique par un champ magnétique.

Cet effet encore mal connu et peu utilisé, est d'une très grande importance puisqu'il ouvre une perspective au développement de nouveaux types de mémoire, dispositifs micro-onde, capteurs... [3]. Pour s'en convaincre, il suffit de regarder le nombre croissant de publications par an avec le mot clef « magnétoélectrique » (figure I.1) [4].

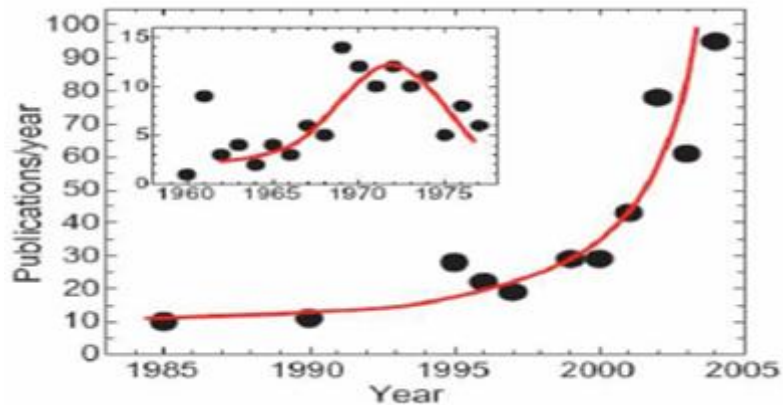


Figure I.1 : Le nombre croissant de publications par an.

Une source possible de magnétoélectricité réside dans des matériaux composites où l'on met à profit la combinaison de propriétés magnétostrictives et piézoélectriques des différents constituants. En effet la propriété principale de ces matériaux réside dans le fort couplage entre d'une part les comportements magnétique et mécanique des matériaux magnétostrictifs, et d'autre part les comportements électrique et mécanique des matériaux piézoélectriques. Même si dans la majorité des cas, ces matériaux sont utilisés séparément, cependant l'utilisation combinée de ces matériaux permet la réalisation de dispositifs innovants (capteurs, actionneurs...) basés sur l'effet magnétoélectrique : l'apparition d'une polarisation électrique par application d'un champ magnétique et réciproquement l'apparition d'une aimantation sous l'effet d'un champ électrique.

Afin de mieux comprendre les interactions, la figure I.2 résume les interactions entre les phénomènes physiques [3] :

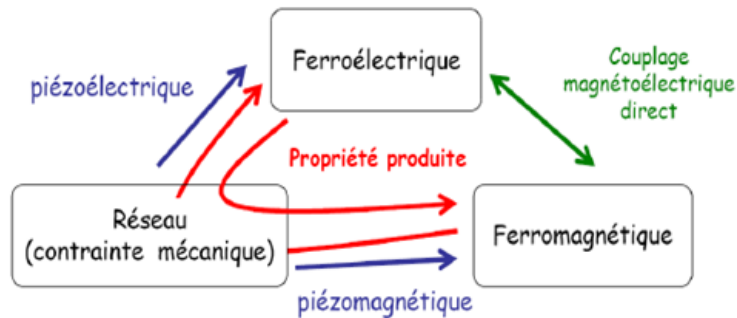


Figure I.2 : Interactions entre les phénomènes physiques

La réalisation de ces matériaux est possible, car il existe une correspondance entre les différents types de matériaux magnétiques et électriques comme l'illustre la figure I.3 [5] :

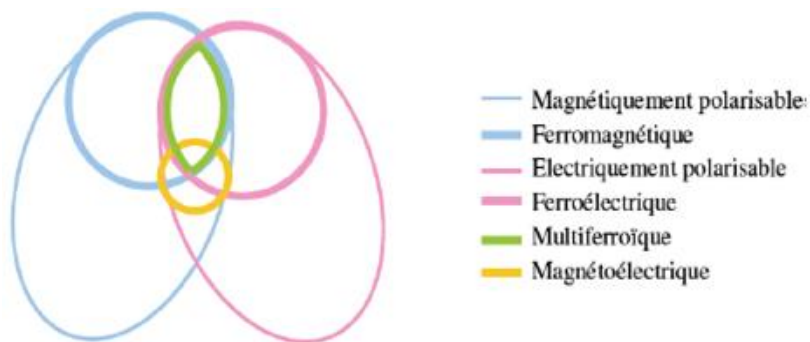


Figure I.3 : les différents types de matériaux magnétiques et électriques

Un matériau ferroélectrique possède une polarisation électrique à l'état spontané, polarisation qui peut être renversée par l'application d'un champ électrique extérieur.

Un matériau ferromagnétique est capable de s'aimanter très fortement sous l'effet d'un champ magnétique extérieur, et pour certains (comme les aimants, matériaux magnétiques durs) de garder une aimantation importante même après la disparition du champ extérieur. Un matériaux multiferroïque doit simultanément être ferromagnétique et ferroélectrique.

I.3.4. Quelques effets magnétoélectriques

L'effet magnétoélectrique est caractérisé par le coefficient ME. Un champ magnétique H appliqué sur un échantillon ME d'épaisseur e crée une polarisation électrique à l'intérieur de l'échantillon et donc un potentiel électrique V_{ME} .

Il y a deux coefficients magnétoélectriques :

➤ Coefficients magnétoélectriques du courant :

$$D = \alpha H$$

$$A = \frac{dD}{dt} = \alpha A \frac{dH}{dt}$$

$$I = \alpha A \frac{dH}{dt} \quad (\text{eq.1.3})$$

Dont le coefficient magnétoélectrique du courant est donné par :

$$\alpha_\rho = \frac{I}{A \left(\frac{dH}{dt} \right)} \quad (\text{eq.1.4})$$

- Effet direct : Modification de l'état électrique induit par le champ magnétique.
- Effet inverse : Modification de l'état magnétique induite par le champ électrique.

L'effet ME est caractérisé par le coefficient ME. Un champ magnétique H appliqué sur un échantillon ME d'épaisseur e crée une polarisation électrique à l'intérieur de l'échantillon et donc un potentiel électrique V_{ME} (Figure I.4)

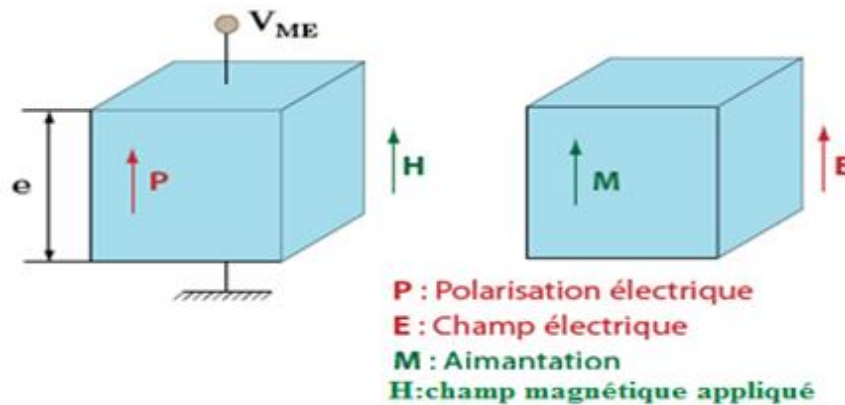


Figure I.4 : Effet magnéto-électrique direct et inverse.

➤ Le coefficient magnétoélectrique de la tension :

- En régime statique, le coefficient magnétoélectrique est défini par :

$$\alpha_{ME} = \frac{V_{ME}}{(e \times \|H\|)} \quad (\text{eq 1.5})$$

- En régime dynamique : $H = H_0 + h$; où H_0 est la composante statique, et h est la composante harmonique. On définit alors :

$$\alpha_{ME} = \frac{\Delta V_{ME}}{(e \times \|\tilde{h}\|)} \quad (\text{eq 1.6})$$

Dans cette étude il y a deux effets essentiels où l'un définit de l'autre :

I.3.5. Effet ME intrinsèque

La figure I.5 illustre l'effet ME intrinsèque. Dans un matériau monophasé, le couplage intrinsèque entre l'état électrique et l'état magnétique est défini comme l'effet magnéto-électrique.

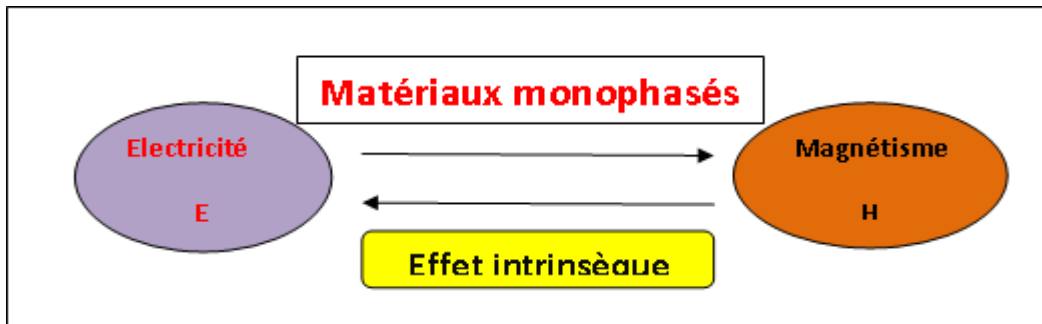


Figure I.5 : Effet magnéto-électrique intrinsèque.

Suite à la découverte du phénomène ME intrinsèque, la recherche s'est concentrée dans les années suivantes à découvrir d'autres matériaux présentant ce couplage. Cependant, les coefficients ME intrinsèques obtenus jusqu'à aujourd'hui restent faibles.

En calculant la variation de l'énergie libre lorsque les champs magnétiques et électriques sont appliqués simultanément à un milieu ME, Brown et al [6,7] ont montré que le coefficient ME reste inférieur à la racine du produit de la susceptibilité magnétique et la susceptibilité électrique ($\alpha_{ME} < \sqrt{\chi_m \chi_e}$).

Cette étude a montré la nécessité d'utiliser un matériau présentant simultanément une forte perméabilité et une forte permittivité.

I.3.6. Effet ME extrinsèque

L'idée d'utiliser un effet ME extrinsèque apparaît une décennie avant la découverte expérimentale de l'effet intrinsèque [7,8]. La combinaison de matériaux piézoélectriques et magnétostrictifs permet d'obtenir un coefficient ME extrinsèque plus important que celui des matériaux monophasés [9]. Cet effet ME est illustré par la figure I.6 : l'application d'un champ magnétique génère une déformation mécanique sur les phases magnétostrictives. Cette déformation est transmise aux couches piézoélectriques dans lesquelles apparaît alors une polarisation électrique. Dans la figure I.6, les contraintes sont notées T.

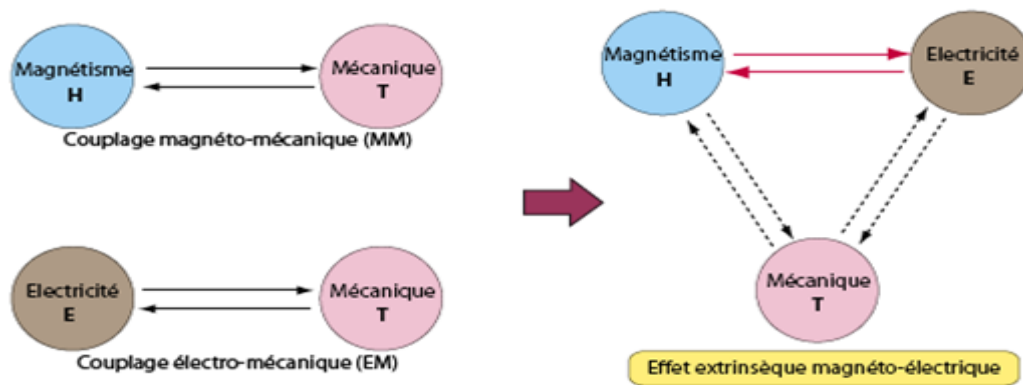


Figure 1.6 : Effet magnéto-électrique extrinsèque [10].

Van Suchtelen et al [11] sont les premiers à avoir observé l'effet ME extrinsèque dans des matériaux composites. L'échantillon considéré est un matériau piézoélectrique contenant des inclusions magnétostrictives (Figure I.7). Malgré les efforts pour combiner des matériaux piézoélectriques et magnétostrictifs possédant des coefficients de couplage élevés, le coefficient ME reste faible à température ambiante ($0.13 \text{ V.cm}^{-1}.\text{Oe}^{-1}$). La figure I.4 présente également une autre configuration possible sous forme de multicouche. La multicouche permet d'atteindre des coefficients ME plus élevés que la structure à base d'inclusions. Il est aussi plus facile à fabriquer avec un coût de fabrication moindre [7]. Cependant, l'anisotropie de cette structure multicouche peut poser problème pour certaines applications.

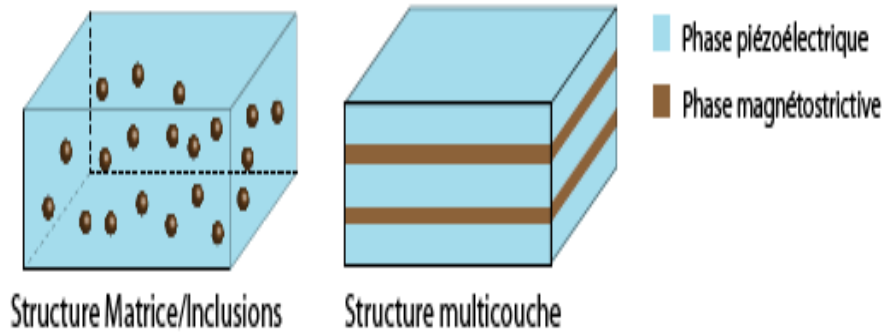


Figure I.7 : Structures ME composites et multicouche.

Afin d'améliorer le coefficient ME, différentes associations de matériaux piézoélectriques et magnétostrictifs ont été envisagées et différentes méthodes de fabrication ont été mises en place. Les premières multicouches PZT/pu + 2 % Fe₃O₄ ont permis d'atteindre un coefficient ME de 0.1 V.cm⁻¹Oe⁻¹ en régime statique. Les multicouches PZT/Fe₃O₄ possèdent un coefficient ME allant jusqu'à 1.5 V cm⁻¹ Oe⁻¹ [12].

I.4. Matériaux multiferroïques

Le terme 'multiferroïque' est utilisé pour définir une classe de matériaux qui possède simultanément plusieurs propriétés dites ferroïques (ferromagnétisme, ferroélectricité et/ou ferroélasticité) et dont le couplage dépend de la mise en forme, de la structure cristallographique et de l'arrangement des spins magnétiques [13]. Il n'existe que de très rares matériaux comportant spontanément les propriétés de ferromagnétisme et de ferroélectricité. Cette rareté est liée aux différentes origines d'apparition des mécanismes induisant la ferroélectricité et l'aimantation à l'échelle microscopique [13, 14, 15]. En terme d'applications, les matériaux composites réalisés à l'aide des phases magnétiques et électriques sont préférés [16,17,18,19-27]. Généralement, ces deux phases (ferromagnétique et ferroélectrique) sont combinées par diverses techniques (e.g. frittage, collage, 'hot-pressing', etc...) [17,28,23,29-31]. Ainsi, le couplage magnétique/électrique est engendré par des contraintes induites dans les matériaux et correspond à une déformation moyenne des phases constitutives.

I.4.1. Le ferromagnétisme

Le magnétisme est une des propriétés fondamentales des matériaux. En appliquant un champ magnétique extérieur, tous les matériaux portent un effet magnétique. Parmi ces effets, le ‘ferromagnétisme’ ou ‘ferrimagnétisme’ caractérise la propriété qu'ont certains corps de s'aimanter très fortement sous l'effet d'un champ magnétique extérieur. Les matériaux ferromagnétiques ont donc intrinsèquement une forte perméabilité. Il est à noter qu'il est possible de saturer le matériau par l'application d'un champ magnétique de faible amplitude. La signature d'un matériau ferromagnétique est donnée par son cycle d'hystérésis magnétique. Il traduit la variation de son aimantation en fonction du champ magnétique appliqué.

I.4.2. La ferroélectricité

La ferroélectricité est la propriété qu'ont certains matériaux de posséder une polarisation électrique à l'état spontané, polarisation qui peut être renversée par l'application d'un champ électrique extérieur. La signature d'un matériau ferroélectrique est donnée par son cycle d'hystérésis. Il traduit la variation de sa polarisation en fonction du champ électrique appliqué. Le déplacement des éléments qui portent les charges électriques dans les matériaux diélectriques induit cette polarisation [32, 33]. Il est à noter que certains cristaux diélectriques se polarisent via des effets mécaniques [34, 35]. Ainsi, des charges électriques apparaissent à la surface du matériau. La densité de charges induite est proportionnelle à la contrainte extérieure. Ce phénomène classique est appelé l'effet piézoélectrique [36]. Il n'existe qu'une dizaine de cristaux possédant un effet piézoélectricité important [25, 29-31, 34, 37-40], tels le BTO, PZT, PMN, etc... Les semi-conducteurs présentent également des effets piézoélectriques, tel le ZnO. Parmi ces matériaux.

I.4.3 La magnétoélectricité

Au sens large, le terme ‘magnétoélectricité’ est défini par la coexistence des effets ferromagnétique et ferroélectrique dans un matériau [41], les ordres magnétiques et électriques dépendant alors du champ électrique ou magnétique externe. Pour les matériaux multiferroïques [42, 41], une définition plus simple peut être donnée : une polarisation électrique est induite dans le matériau par l'application d'un champ magnétique (effet ME direct) ou inversement une aimantation est induite par un champ électrique externe (effet ME opposé). Elle rappelle pour ces matériaux qu'un couplage existe entre l'aimantation et la polarisation. Il existe une polarisation électrique pour un champ magnétique extérieur appliqué ou une valeur d'aimantation pour un champ électrique extérieur appliqué. Malheureusement, cet effet dans

les matériaux monophasés est généralement trop faible et ne permet pas d'envisager le développement de dispositif ou capteur.

Les matériaux dit multiferroïques, c'est-à-dire qui possèdent des paramètres d'ordre multiple (soit ferroélectrique, (anti-) ferromagnétique, ou ferro-élastique etc.) (Figure I.8) ont suscité l'intérêt de nombreux chercheurs jusqu'à présent.

La coexistence de la ferroélectricité et du ferromagnétisme dans un même matériau, qui se traduit par l'apparition de l'effet magnétoélectrique, est une des propriétés les plus recherchées actuellement. L'utilisation extensive des matériaux magnétiques et ferroélectriques dans des applications diverses et variées suppose logiquement de combiner ferromagnétisme et ferroélectricité dans un même matériau, ce qui n'est pas trivial.

En 1888, Röntgen observa pour la première fois un état d'aimantation dans un oxyde sensible au champ électrique [43]. Plus tard, l'effet inverse, c'est-à-dire le changement d'état de la polarisation diélectrique avec le champ magnétique fut mis en évidence par Wilson [44]. En 1894, Curie prédit de la magnéto-électricité intrinsèque dans certains cristaux en se basant sur la théorie des symétries (la notion de « l'effet magnétoélectrique » fut introduite par Debye) [45]. Cet effet a été observé pour la première fois dans l'oxyde de chrome Cr_2O_3 [46]. Un coefficient de couplage magnétoélectrique α de 4.13 ps/m ($\alpha = dM/dE$) a été alors obtenu dans ce matériau [47].

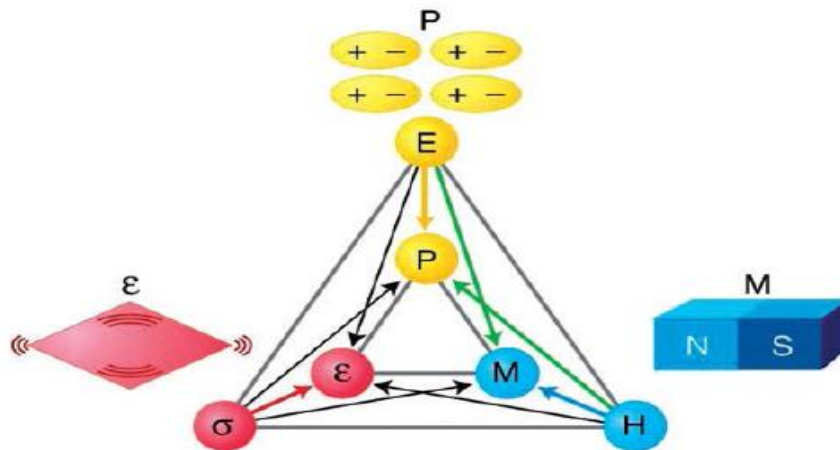


Figure I.8 : Diagramme d'interaction entre la ferroélectricité (la polarisation P et le champ électrique E), le ferromagnétisme (l'aimantation M et le champ magnétique H) et la ferroélasticité (la déformation ϵ et la contrainte σ). Le couplage et le contrôle réciproque entre ces propriétés définissent le multiferroïsme.

Les multiferroïques les plus étudiés sont répertoriés dans la plupart des matériaux, la coexistence des ordres ferroélectrique et ferromagnétique n'apparaît qu'à basse température, ce qui rend difficile leur utilisation. Le seul matériau possédant un couplage magnétoélectrique à température ambiante est le BiFeO_3 (BFO) [56]. Cette ferrite de bismuth appartient à la famille des pérovskites et présente une polarisation électrique très importante (d'autant plus importante lorsqu'elle est en couche mince [57]). Malheureusement, le BFO massif est un ferromagnétique faible (son moment magnétique n'est que de $\sim 0.01 \mu_B / m\mu$ {maille unitaire}). Néanmoins, une augmentation du moment magnétique a pu être observée pour le BFO en couche mince épitaxiée et contrainte ($1 \mu_B / m\mu$. [57]). Aujourd'hui, le BFO est considéré comme un multiferroïque naturel envisagé pour les dispositifs spintroniques (mémoires). Gardons cependant à l'esprit que l'effet magnétoélectrique reste faible pour cette famille de multiferroïques.

La raison principale pour laquelle les multiferroïques naturels sont rares et possèdent un couplage assez faible est l'incompatibilité intrinsèque entre la ferroélectricité et le ferromagnétisme. En effet, du point de vue de la symétrie, la ferroélectricité exige une brisure de symétrie d'inversion spatiale figée tout en ayant une symétrie d'inversion temporelle variable.

L'apparition d'une polarisation électrique spontanée est impossible jusqu'à ce que les distorsions de la phase hautement symétrique para-électrique soient suffisantes pour briser cette symétrie. La direction de la polarisation doit être différente des directions cristallographiques.

I.5. Le cycle d'hystérésis $P=f(E)$:

Un matériau polarisé sous champ électrique possède un moment dipolaire rémanent qui se traduit par une polarisation rémanente à champ nul. L'évolution de la polarisation en fonction du champ apparaît sous la forme d'un cycle d'hystérésis (Figure. I.9). Le champ coercitif noté E_c est le champ électrique nécessaire pour réorienter les dipôles du matériau ferroélectrique. La polarisation rémanente P_r correspond à la valeur de la polarisation à champ nul. Sous des valeurs de champ très élevées,

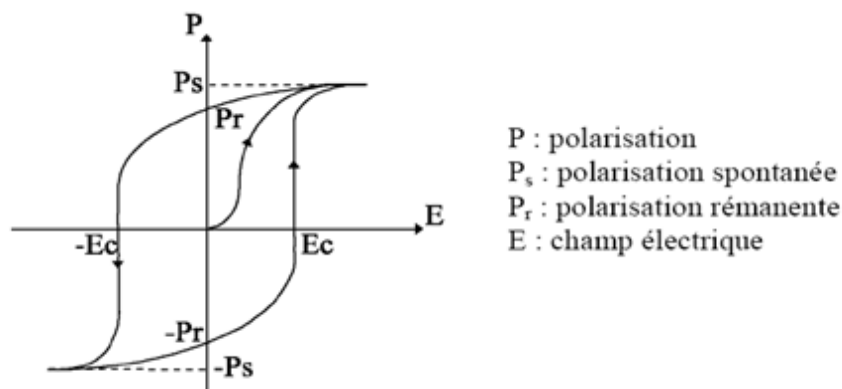


Figure. I.9 : Cycle d'hystérésis $P = f(E)$ d'un matériau ferroélectrique

I.6. Le cycle d'hystérésis $B=f(H)$

C'est le dédoublement de la caractéristique $B(H)$ du matériau magnétique. Donc B dépend non seulement de H , mais aussi de l'aimantation antérieure. Les substances ferromagnétiques sont douées de mémoire.

Ces courbes montrent comment un corps ferromagnétique réagit à l'excitation magnétique H (figure. I.10) :

- **Courbe de première aimantation** : courbe $B = f(H)$ lorsque le corps ferromagnétique ne possède aucune aimantation.
- **Cycle d'hystérésis** : courbe $B = f(H)$ lorsque le corps ferromagnétique possède une déjà une aimantation

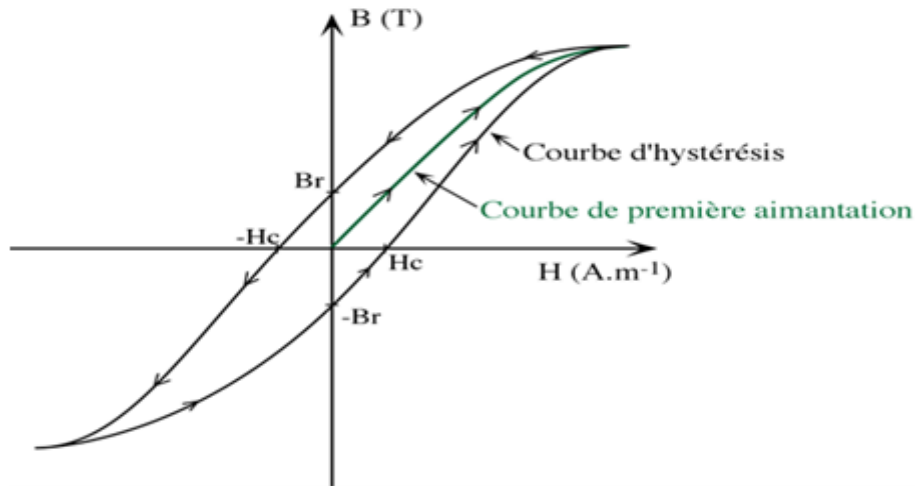


Figure. I.10: Cycle d'hystérésis $B = f(H)$ d'un matériau ferroélectrique

I.7. Les composites

Dans les composites magnétoélectriques, ce ne sont pas les propriétés de la phase intrinsèque du matériau qui régissent l'effet magnétoélectrique, mais l'interaction et le couplage entre deux phases extrinsèques, respectivement ferroélectrique et ferromagnétique.

En 1972, van Suchtelen décrit la magnétoélectricité comme une propriété résultante de la multiplication des effets relatifs à chaque phase [58]. Par exemple, l'effet magnétoélectrique peut être le résultat d'une combinaison additive de l'effet magnétostrictif (effet magnétique/mécanique) de la phase magnétique et de l'effet piézoélectrique (effet mécanique/électrique) de la phase ferroélectrique :

$$\text{➤ Effet magnéto-élasto-électrique direct} = \frac{\text{magnétique}}{\text{mécanique}} \times \frac{\text{mécanique}}{\text{électrique}}$$

$$\text{➤ Effet magnéto-élasto-électrique inverse} = \frac{\text{électrique}}{\text{mécanique}} \times \frac{\text{mécanique}}{\text{magnétique}}$$

Le couplage s'effectue à travers des interactions élastiques. Une multitude de composites magnétoélectriques fut développé depuis, présentant un effet magnétoélectrique de plusieurs ordres de grandeur supérieurs à ceux des multiferroïques naturels [55].

I.7.1. Les matériaux composites

D'une manière générale, les propriétés d'un polymère seul sont insuffisantes pour conférer à l'objet que l'on veut fabriquer toutes les propriétés souhaitées en terme de rigidité, résistance mécanique, légèreté ou autre propriété physico-chimique, électrique, optique... C'est pourquoi on s'oriente de plus en plus vers les matériaux composites.

Un matériau composite peut être défini comme l'assemblage de deux ou plusieurs matériaux, l'assemblage final ayant des propriétés supérieures aux propriétés de chacun des matériaux constitutifs. On appelle maintenant de façon courante matériaux composites des arrangements de renforts (appelés aussi charges) qui sont noyés dans une matrice. La matrice assure la cohésion et l'orientation de la charge. Elle permet également de transmettre à la charge les sollicitations auxquelles est soumis le composite. Les matériaux ainsi obtenus sont très hétérogènes et souvent anisotropes. La nature de la matrice et de la charge, la forme et la proportion de charge, la qualité de l'interface et le procédé de production utilisé sont autant de paramètres qui peuvent influencer les propriétés du matériau composite. La matrice et le renfort peuvent être métalliques, céramiques ou plastiques, ce qui permet d'envisager une multitude de combinaisons. Nous ne présenterons pas ici une revue exhaustive sur les matériaux composites mais nous nous concentrerons sur ceux dont la matrice est constituée d'un polymère [59].

I.8. Les multicouches

Un matériau multicouche est un empilement constitué de N couches disposées les unes sur les autres afin d'avoir un nouveau matériau présentant des propriétés uniques. Le choix précis des propriétés et de l'épaisseur des couches permet de synthétiser des milieux que nous ne pourrions pas obtenir avec l'une des couches seules.

Ces matériaux ont une importance particulière dans les domaines liés aux radiocommunications et notamment dans les circuits imprimés, les multicouches [60] et les surfaces sélectives en fréquence [61]. La figure I.11 donne l'exemple d'un substrat multicouche.

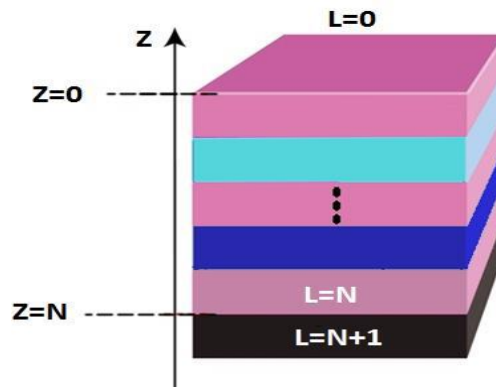


Figure I.11: Exemple d'un substrat de N couches.

I.8.1. Propriétés électromagnétiques des matériaux multicouches

Les propriétés électromagnétiques (ϵ , μ) d'un milieu composite ou hétérogène sont généralement liées aux propriétés et aux fractions volumiques de ses constituants [62].

La mise en relation de ces propriétés avec celles des différents constituants est dépendante du degré de complexité de la structure du composite. Toutefois, lorsque la taille des hétérogénéités est petite par rapport à la longueur d'onde du rayonnement électromagnétique, les propriétés électromagnétiques peuvent être représentées par des grandeurs dites effectives. Dans certains cas, ces grandeurs sont déterminées selon les lois de mélanges. Dans d'autres cas où la structure des matériaux est désordonnée, la solution devient de plus en plus compliquée. Une discussion détaillée sur la théorie de milieu effectif peut être trouvée dans [62, 63]. Pour une structure multicouche constituée de matériaux homogènes, l'accès aux propriétés électromagnétiques effectives (ou moyennes) est moins compliqué. Elles dépendent essentiellement des propriétés des couches constituantes et de leur épaisseurs respectives (ou de leur volumes). Par contre, nous verrons dans le chapitre 3 qu'il est préférable dans les milieux multicouches d'utiliser l'appellation « propriétés moyennes » à la place de « propriétés effectives » dans notre configuration de mesure.

I.9. Applications

Les performances des composites magnétoélectriques ouvrent une multitude de possibilités pour des applications technologiques. Parmi lesquelles, il faut lister : les capteurs de champs magnétiques (magnétomètres, capteurs de courant ...), les composants RF agiles (filtres, antennes, oscillateurs ...), les transducteurs (moteurs sans courant, récupération d'énergie ...), etc. Les composites magnétoélectriques peuvent être utilisés en tant que détecteur du champ magnétique statique ou alternatif.

Ils peuvent convertir un signal magnétique en signal électrique et vice versa. A la fréquence de résonance, on peut convertir un signal magnétique RF en signal électrique RF.

Grâce au décalage de la fréquence de résonance ferromagnétique sous l'effet du champ statique électrique (et non plus magnétique), il est possible de réaliser des composants RF fortement agiles (tels que des inductances variables) et pilotables en tension électrique, c'est-à-dire ne consommant aucune puissance.

La nature hystérétique de l'effet magnétoélectrique permet aussi de réaliser des mémoires magnétiques (MRAM) contrôlables en tension (écriture électrique/lecture magnétique), sans avoir besoin d'appliquer un champ magnétique. Dans cette partie nous allons citer quelques exemples de réalisations pour différents types d'applications.

I.9.1. Capteurs

Le principe de la détection magnétique par un composite magnétoélectrique est simple. Le champ magnétique extérieur provoque des contraintes dans la phase magnétostrictive du composite. Ces contraintes sont transférées vers la phase piézoélectrique par le couplage mécanique, ce qui résulte en la génération des charges électriques et donc en une tension électrique aux bornes du composite. Plus le coefficient magnétoélectrique est grand pour le composite, meilleure est la sensibilité du capteur.

I.9.1.1. Champ magnétique statique

Les champs magnétiques statiques faibles, comme le champ magnétique terrestre (~0.5 Oe), peuvent être détectés grâce à l'effet magnétoélectrique inverse [64]. Dans cet exemple, le composite laminaire Pu 2 % Fe₃O₄/PZT/ Pu 2 % Fe₃O₄ est sensible aux variations faibles d'un champ magnétique statique (Bdc) sous excitation alternative (Bac). La sensibilité d'un tel composite peut atteindre quelques 100 nT à basse fréquence et même 10 nT dans le mode résonant.

La limite de sensibilité de ce composite. On voit qu'il est possible de détecter des variations de l'ordre de 1 nT ou 0.1 mOe avec une réponse électrique mesurable de l'ordre du μV .

I.9.1.2. Champ magnétique alternatif

Il est également possible de réaliser des capteurs de champ magnétique alternatif très sensible un utilisant des composite à grand coefficient magnétoélectrique. En 2006, un groupe de chercheur de Virginia Tech a présenté la détection d'un champ magnétique de l'ordre du pico-Tesla (10^{-12} T) faite grâce à un composite trimorphe $\text{Pu}+2\% \text{Fe}_2\text{O}_4/\text{PZT}/ \text{Pu}+2\% \text{Fe}_2\text{O}_4$ dans une configuration push-pull [65]. Le spectre de bruit de ce composite est présenté dans la Figure I.4. Une sensibilité autour de $2 \cdot 10^{-12} \text{T/Hz}^{1/2}$ à 1 Hz est meilleure par rapport aux capteurs GMR (magnétorésistance géante) mais n'atteint pas la sensibilité des SQUID (Superconducting Quantum Interference Device). Dans tous les cas, ce genre de capteur offre l'avantage unique d'être entièrement passif, c'est-à-dire autonome en énergie, (pas besoin d'alimentation en courant).

En utilisant la forte anisotropie de la réponse des composites magnétoélectriques laminaires (grande dans le plan et petite hors du plan), il est possible de réduire le plancher de bruit thermique. Pour cela, il suffit de connecter en série deux composites laminaires travaillant dans des modes opposés (transverse/perpendiculaire). Cette méthode a été utilisée par Israel et al. Pour soustraire l'effet des fluctuations thermiques sur la réponse magnétoélectrique de leur capteur [66]. Le dispositif final était capable de détecter les champs magnétiques inférieurs à 200 pT.

I.9.2. Transducteurs

Les transducteurs magnétoélectriques sont applications importantes dans la conversion de puissance. Un gain de tension élevé a été obtenu dans un composite laminaire à base de $\text{Pu}+2\% \text{Fe}_2\text{O}_4$ et PZT [67]. En appliquant une tension alternative aux bornes d'une bobine qui entoure le composite (cela génère un courant et donc un champ magnétique), il a été possible d'augmenter fortement la tension de sortie V_{out} à proximité de la résonance électromécanique dans un rapport supérieur à 100. La Figure I. 5 montre le gain en tension du composite proposé dans [68] en fonction de la fréquence d'excitation pour deux champs magnétiques de bias appliqués. Un gain maximal de 260 a été trouvé à la fréquence de résonance 21.3 kHz. Le

Terfenol-D ne manifestant un coefficient magnétoélectrique élevé que pour des champs magnétiques relativement forts, on observe une forte dépendance de ce gain avec le champ de polarisation statique (bias).

De manière analogique, les composites magnétoélectriques agissent comme des gyrateurs I-V avec un coefficient de gyration G élevé [64]. En 2006 Dong et al. ont présenté un gyrateur magnétoélectrique qui possède un coefficient G autour de 2500 V/A. Un gyrateur inversé (V-I) est également envisageable : la sollicitation électrique du piézoélectrique crée une tension en sortie sur la bobine grâce aux variations d'aimantation induites dans le matériau magnétique.

I.9.3. Mémoires

Très récemment, des concepts de mémoires magnétiques exploitant l'effet magnétoélectrique ont été proposés [69-72]. Les mémoires magnétiques actuelles sont basées sur des jonctions tunnel magnétiques (JTM) dont on exploite la magnétorésistance géante (GMR) : deux couches ferromagnétiques séparées par une barrière diélectrique. La résistance de la structure dépend fortement de l'orientation relative de l'aimantation des couches ferromagnétiques ce qui détermine les états «0» et «1» de la mémoire. Cependant, l'écriture de ces états, c'est-à-dire le renversement de l'aimantation, nécessite de consommer beaucoup de puissance afin de faire passer un courant électrique dans les lignes d'adressage pour générer le champ magnétique d'écriture [73]. Une solution pour diminuer cette consommation est d'utiliser l'effet de « spin-torque » pour faire basculer l'aimantation de la couche libre par injection d'un courant direct dans la jonction, ce qui permet de s'affranchir du champ magnétique d'écriture. Des mémoires utilisant cet effet sont actuellement en développement [74] et pour le moment, la densité de courant critique reste encore très élevée dans les prototypes réalisés [75]. Une alternative prometteuse qui pourrait diminuer considérablement la consommation des mémoires magnétiques est la manipulation de la direction de l'aimantation par le champ électrique. Ce concept de mémoire magnétoélectrique à accès aléatoire repose sur les propriétés exceptionnelles à température ambiante des couches minces de BiFeO₃ (BFO) qui est un multiferroïque monophasique simultanément ferroélectrique et antiferromagnétique. Il a été démontré qu'il peut générer un couplage d'échange à l'interface avec une couche ferromagnétique. Ce dispositif permettrait d'effectuer un basculement direct (switching) de l'aimantation en appliquant un champ électrique à travers le BFO [76]. Une autre étude montre qu'il est possible de faire tourner l'aimantation de 90° dans une couche de Co_{0.9}Fe_{0.1} couplée antiferromagnétiquement avec la tension appliquée sur une sous-couche de BFO [77].

I.9.4. Récupération d'énergie

Les composites magnétoélectriques peuvent être également utilisés dans le but de récupérer de l'énergie de nature magnétique dissipée dans l'environnement. Traditionnellement les matériaux piézoélectriques sont utilisés pour convertir l'énergie de mouvements en énergie électrique [81]. Récemment, les composites laminaires magnétoélectriques ont été évaluées en tant que récupérateur d'énergie bimodal car ils peuvent convertir l'énergie provenant de sources à la fois magnétique et mécanique. Les mouvements (vibrations, déformations mécaniques ...) sont convertis en charges électriques grâce à l'effet piézoélectrique et les variations du champ magnétique ambiant sont converties également en charges électriques à travers le couplage magnétoélastique.

En utilisant une composite laminaire magnétoélectrique attachée à un cantilever avec une masse sismique Dai et al. ont testé un récupérateur d'énergie multimodale [82]. Dans un champ magnétique alternatif de 2 Oe d'amplitude et avec des vibrations de 50 mg d'accélération (les deux à la fréquence de 20 Hz), ce système a été capable de générer 8 V en circuit ouvert.

I.10. Le matériau piézoélectrique

De façon analogue, nous comparons ici les matériaux piézoélectriques les plus courants pour trouver une solution optimale afin de réaliser notre composite. Sachant que nous cherchons à obtenir des contraintes uniaxiales planaires, il est naturel de rechercher un matériau piézoélectrique avec un coefficient d_{31} le plus élevé possible.

De ce point de vue, les matériaux de type PZN-PT et PMN-PT sont très attractifs.

Cependant, ce sont des matériaux nouveaux qui se développent principalement dans des laboratoires. De plus, ils ne sont exploités que sous forme de monocristaux ce qui les rend coûteux et difficilement intégrables.

La piézoélectricité peut être définie comme le couplage entre les phénomènes mécaniques (déformation ou contrainte) et électriques (champ électrique, charge électrique).

Les coefficients d_{33} sont dominants devant d_{31} . Or, habituellement l'utilisation de ce mode de déformation est limitée aux structures mécaniques se déformant verticalement (cantilevers).

Par exemple, le Macro Fiber Composite (MFC) de la société américaine Smart Materials sous licence de la NASA [83], est composé de fibres de PZT monocristallines enrobées dans une matrice polymère (Kapton). Ce type de MFC atteint des taux records de déformation jusqu'à 1 ppm/V en mode planaire. Cela est possible grâce aux électrodes interdigitées qui génèrent un fort champ électrique planaire le long des fibres et donc permettent de profiter pleinement du coefficient d_{33} . L'utilisation d'une matrice polymère spécifique améliore également les propriétés mécaniques du composite. Pour finir, ce concept d'électrodes interdigitées pour la réalisation du mode d_{33} dans le plan peut être appliqué aux couches minces piézoélectriques mais les conditions de croissances, notamment du PZT, dans ces conditions restent peu maîtrisées [84].

I.10.1. Définition

Les matériaux sur lesquels nos efforts se sont concentrés sont les matériaux piézoélectriques qui ont la capacité de transformer une énergie mécanique en énergie électrique et vice-versa. L'effet piézoélectrique a été découvert la première fois par les frères Curie en 1880.

Les matériaux piézoélectriques produisent une tension électrique lorsqu'ils subissent une contrainte mécanique. Soumis à un courant électrique, ils peuvent aussi se déformer mécaniquement.

La fréquence du signal électrique et son amplitude varient directement en fonction de la déformation mécanique qu'ils subissent. Pour cela, les matériaux piézoélectriques sont utilisés pour contrôler la déformation et l'endommagement des matériaux composites. Contrairement aux capteurs optiques, les capteurs piézoélectriques n'ont pas besoin a priori de signaux extérieurs en entrée [85].

Les piézoélectriques ont trouvé leurs applications dans plusieurs domaines, tels que la suppression du bruit, l'amortissement des vibrations ou des micro-positionnements, etc. On utilise aussi des polymères piézoélectriques pour des applications médicales ou pour capter des ultrasons.

Une application intéressante des matériaux piézoélectriques est le contrôle de santé de certains matériaux intervenant dans la construction des carlingues d'avions ou les bâtiments en ciment. Un capteur piézoélectrique pourra détecter des défauts localisés, comme des fissures, des trous ou des impacts [86,87].

Dans les années soixante, de nouvelles variétés de piézoélectriques à base de céramique et de polymères ont été développées. Aujourd'hui, pour des raisons de réduction de taille des transducteurs, les céramiques minces ont la possibilité d'être intégrées à l'intérieur du matériau susceptible de se dégrader. Les piézoélectriques sont disponibles sous différentes formes, telles que les films [88], poudre [89], peins [90], multicouches [91] ou fibres simples [92].

Ils sont disponibles en plusieurs types, tels que le fluorure de vinylidène, (PVDF) [93], les lanthanides modifiés au piézo-céramique, PLZT [89], ou la classe populaire des piézocéramiques titanate-zirconate (PZT) [94,95,96]. Cette liste n'est pas complète, car la composition des matériaux piézoélectriques comporte une grande variété de piézoélectricité et de nouvelles classes piézoélectriques devraient être mises au point dans un proche avenir.

Tableau I.1 : Principes du PZT

| Performances | Matériaux piézoélectriques (PZT) |
|--------------|--|
| Mécaniques | Module de Young : 100 GPa Densité : 7600 Kg.m ⁻³ Déformations relatives : 0.16 % Pression maximale : 80 MPa en traction , 600 en compression Bande passante : 0-1 GHz Hystérésis : 10 % Résistance : 800 Ω max |
| Electriques | Densité d'énergie : 100 Kj.m ⁻³ Champ électrique maximale Admissible : 2 KV.mm ⁻¹ Facteur de couplage : 0.5 Résistivité : 10 ¹⁰ Ω.m Permittivité relative : 1500 Capacité : 50 pF |
| Thermiques | Température de curie : 300° C Température d'utilisation : -20° C/+200° C Conductivité thermique : 1.2 W.m ⁻¹ .K ⁻¹ |

I.10.2. Phénomène de la piézoélectricité

On appelle piézoélectricité, la propriété que possèdent certains matériaux (cristaux, céramiques, et 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 des matériaux. Ce sont les frères Curie qui ont observé et expliqué l'effet direct en 1880. Mais c'est Lippmann qui suggéra théoriquement l'effet inverse qui fut confirmé expérimentalement par les frères Curie.

La piézoélectricité peut se définir comme un phénomène de couplage entre énergie élastique et énergie électrique (relation entre deux variables : électrique et mécanique et vice versa).

Ces effets piézoélectriques ne peuvent être observés que sur isolants. (Figure I.13)

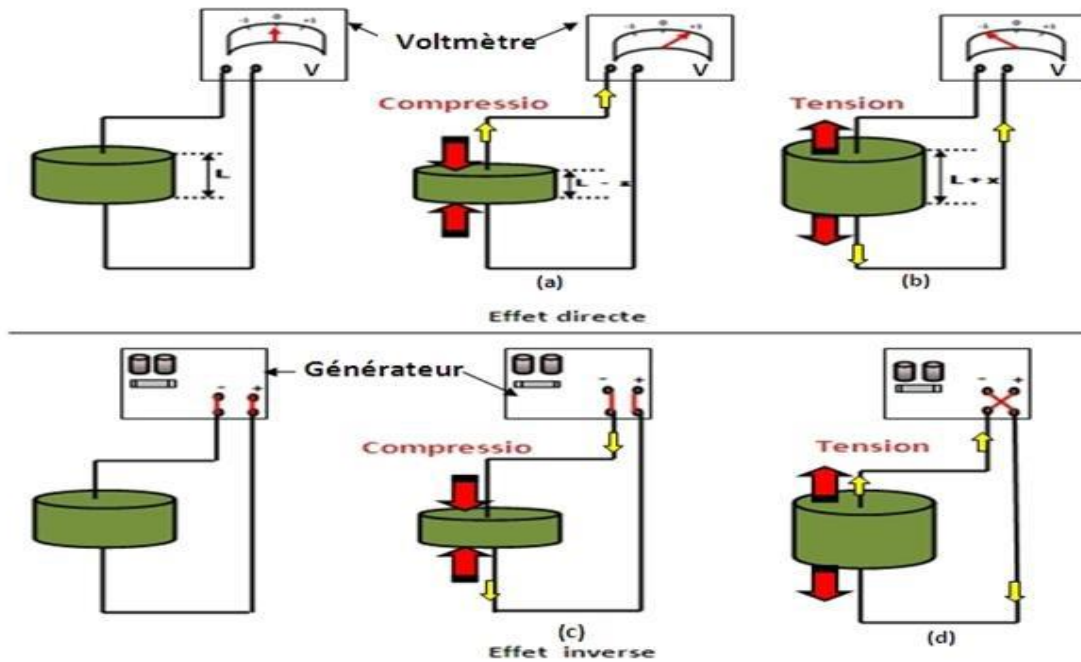


Figure I.13: L'effet piézoélectrique (direct et inverse).

I.10.3. Les équations piézoélectriques

La réalisation d'actionneurs repose sur l'utilisation de céramiques synthétiques polycristallines, fréquemment constituées d'un alliage de plomb, de zirconium et de titanate, les céramiques PZT. Les niveaux de déformation maxima sont obtenus pour des valeurs de champ électrique de l'ordre de 1.5 à 2 MV.m⁻¹.

Le comportement du matériau piézoélectrique peut être décrit par le système d'équations linéaires suivant :

$$D = d.T + \epsilon^T.E \tag{eq 1.7}$$

$$S = s^E.T + d.E \tag{eq 1.8}$$

Ou :

D : Déplacement électrique

S : Déformation relative

T : Contrainte mécanique

E : Champ électrique

ϵ^T : Permittivité électrique

d : Constantes piézoélectriques

s^E : Souplesse du matériau

L'application d'un champ électrique plus élevé se traduirait par un claquage conduisant à la destruction de la céramique. Par ailleurs, l'application d'un champ d'intensité élevée en inverse conduirait à la dépoliarisation de la céramique [97].

I.10.4. Les matériaux

Rapidement après la découverte de la piézoélectricité, plusieurs matériaux ayant cette caractéristique ont été trouvés. Néanmoins des nouveaux matériaux continuent à apparaître, toujours avec des meilleures caractéristiques et performances.

Maintenant les matériaux, leurs présentations, leurs tailles, peuvent s'adapter à leurs applications pratiques et non l'inverse comme on le faisait il y a quelques années.

C'est pour cela que les innovations dans le domaine de la piézoélectricité sont à l'ordre du jour.

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

- ❖ Cristaux naturels

- Berlinite.
- Quartz
- Topaze.

- ❖ D'autres matériaux

- L'os
- L'émail dentaire.

- ❖ Ceramiques et cristaux fabriquées par l'homme

- Phosphate de gallium,
- Titanate de barium.
- Sodium tungstane.
- Lithium niobate.
- Titanate zirconate de plomb nommé **PZT** par ses sigles en anglais. Ses propriétés piézoélectriques sont efficaces pour fabriquer des outils de type capteurs ou actionneurs.

Les plaques piézoélectriques qu'on a achetées aux États Unis sont en PZT

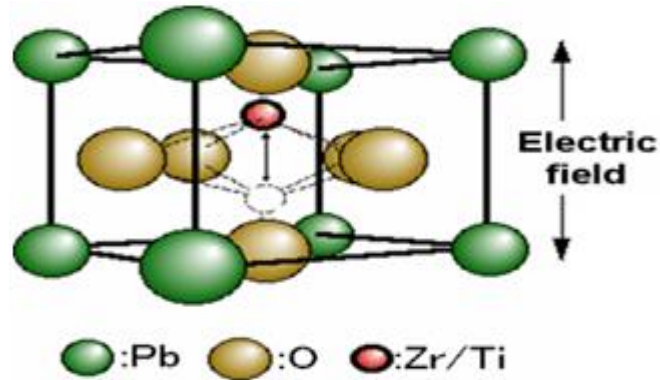


Figure I.14: Structure de PZT.

- ❖ Céramiques sans plomb fabriquées par l'homme
 - Sodium potassium niobate.
 - Ferrite de bismuth.
 - Titanate de bismuth.
- ❖ Polymères (Substance composée de macromolécules)
 - Polyvinylide fluoride

La performance des différents matériaux est différente, leur prix et leur accessibilité sont tout à fait inégaux.

I.10.5. Comparaisons entre matériaux piézoélectriques

La plupart des matériaux sont encore très rares, et par conséquent, trop chers. Il n'y a que quelques entreprises qui les fabriquent et distribuent.

La piézoélectricité reste encore un domaine qui se renouvelle chaque jour mais qui manque de recherche et d'investissement.

Tableau I.2 : Comparaison des matériaux piézoélectriques

| Propriétés | Unités | PVDF Film | PZT | BaTiO ₃ |
|--------------------------------|-----------------------------------|-----------|-------|--------------------|
| Densité | 10 ³ Kg/m ³ | 1.78 | 7.5 | 5.7 |
| Permittivité Relative | ϵ/ϵ_0 | 12 | 1.200 | 1.700 |
| d₃₁ constant | (10 ⁻¹²)C/N | 23 | 110 | 78 |
| g₃₁ constant | (10 ⁻³)Vm/N | 216 | 10 | 5 |
| k₃₁ constant | % at 1 KHz | 12 | 30 | 21 |

Tableau I.3: Les caractéristiques des PZT comparées à celles d'autres matériaux piézoélectriques.

| | PZT | Quartz | LiNbO ₃ | BaTiO ₃ | PZT |
|--|-----|--------|--------------------|--------------------|------------|
| Caractéristiques | | | | | |
| Densité (g.cm ⁻³) | | 2.5 | 4.4 | 5.7 | 7.5 |
| Constante diélectrique | | 4.5 | 29 | 1200 | 200 – 4000 |
| d₃₃ (C.N⁻¹).10⁻¹² | | 2 | 6 | 180 | 40 – 750 |
| g₃₃ (V.m.N⁻¹).10⁻³ | | 50 | 20 | 17 | 15 – 40 |
| Température de curie | | 573 | 1210 | 130 | < 350 |
| Coefficient de couplage k | | 10 | 10 | 40 | 40 – 70 |

I.11. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les différentes définitions nécessaires et les terminologies utilisées pour décrire le phénomène magnétoélectrique.

Par la suite on a présenté les différents types de la magnétoélectricité et les différents types de matériaux magnétoélectrique (multicouches, composite, multiferroïques), à savoir :

- Magnétoélectrique intrinsèque (Cr_2O_3) ou multiferroïques (BiFeO_3) qui présente à la fois un effet ferroélectrique et ferromagnétique
- Magnétoélectrique extrinsèque (multicouches, composite) qui présente des constitutions (piézoélectrique et magnétostrictive).

A la fin de ce chapitre, on a présenté les différentes applications possibles de cet effet.

Chapitre II :

Modélisation

Chapitre II : Modélisation

II.1. Introduction

Ce chapitre a pour but de baliser l'étude de modélisation. On a défini le courant électrique et la tension électrique aussi bien dans le cas isotrope que dans le cas uniaxial. Les matériaux choisis sont les matériaux magnétostrictifs et les matériaux piézoélectriques.

De même, on a modélisé les équations pour les préparer pour la simulation sur SIMULINK.

II.2. Courant électrique

On distingue dans notre travail deux types de courant soit :

- Un courant électrique résistive qui vient d'un déplacement des électrons dans le matériau :

$$I = \frac{dQ}{dt} \quad (\text{eq 2.1})$$

Où I : Intensité du courant électrique en ampères (A)

dQ : La quantité d'électricité traversant la section en coulombs (C)

dt : Le temps pendant lequel les charges circulent en secondes (s)

La relation entre le courant et la tension est la suivante :

$$V = RI \quad (\text{eq 2.2})$$

- Un courant vient de déplacement du dipôle électrique :

$$I = A \frac{dD}{dt} \quad (\text{eq 2.3})$$

II.2.1. Le courant de déplacement :

Le courant de déplacement correspondant est donné par :

$$I_{Me} = A \frac{dD}{dt} = j.A. [\beta_p \cdot (H_{dc} + h_{ac}) + \alpha_p] \omega h_{ac} \quad (\text{eq 2.4})$$

A : la région de la surface totale des électrodes.

D : le déplacement électrique

Dans régime fréquentiel on a

$$I = I_0 e^{j\omega t} \quad (\text{eq 2.5})$$

$$H_{ac} = H_0 e^{j\omega t} \quad (\text{eq 2.6})$$

Nous allons chercher la solution de ces équations différentielles dans le régime temporel.

L'effet magnéto-électrique est seulement prédominant à la fréquence de résonance électromécanique de la matière. La fréquence active est de 1 kHz et est assez lointaine de la fréquence de résonance électromécanique des composés magnétoélectriques étudiés. L'influence des courants du remous sur la réponse magnétoélectrique peut être négligée, donc la production totale que le courant magnétoélectrique inclus. Les magnétostrictives ont induit le courant électrique et le courant diélectrique qui sont directement proportionnel à l'ac champ magnétique et indépendant sur le parti pris champ magnétique. Finalement le déplacement électrique peut être écrit comme :

$$D = \frac{1}{2} \beta_p . H^2 + \alpha_p . H \quad (\text{eq 2.7})$$

α_p est la polarisation linéaire : coefficient magnéto-électrique dû au tension de "Lenz"

β_p est la polarisation bilinéaire : coefficient Magnéto-électrique dû à la magnétostriction.

II.2.2. Courant de déplacement et courant de conduction

$$\vec{i} = \gamma \vec{E} \quad \text{Courant de conduction (eq 2.6)}$$

Et

$$\begin{aligned} \vec{i}_D &= \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \\ \vec{i}_D &= A \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \end{aligned} \quad \text{Courant de déplacement (eq 2.7)}$$

Evaluons l'amplitude respective des courants de conduction et de déplacement, pour des variations temporelles du champ sur une échelle de temps typique ω^{-1} .

II.3. Tension électrique

Il existe deux méthodes pour mesurer le coefficient magnétoélectrique soit par circuit fermé (court-circuit) avec mesure du courant électrique ou en circuit ouvert avec mesure de la tension.

Pour le deuxième cas on a :

$$\begin{aligned} V &= f(H) \\ V &= \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} \frac{d^n V}{dH^n} H^n \end{aligned}$$

$$V = V(H)\Big|_{H=0} + \frac{dV}{dH}\Big|_{H=0} + \dots \quad (\text{eq 2.8})$$

$$V = \text{const} + \alpha_E H + \beta_E H^2 + \dots$$

$$\text{Où } V(H)\Big|_{H=0} = \text{const} , \quad \alpha_E = \frac{dV}{dH}\Big|_{H=0} \quad \text{et} \quad \beta_E = \frac{1}{2} \frac{d^2V}{dH^2}$$

II.4. Cas isotrope et cas uniaxial

Les propriétés électromagnétiques du matériau isotrope sont supposées les mêmes dans toutes les directions de l'espace et peuvent être représentées par des grandeurs scalaires ou complexes. Ce n'est plus le cas dans un milieu anisotrope.

Les propriétés électromagnétiques sont alors représentées par des grandeurs tensorielles.

II.4.1. Cas isotrope

Un milieu isotrope est un milieu dont les propriétés sont identiques quelle que soit la direction d'observation, et homogène si à une certaine échelle ses propriétés sont identiques d'un point à un autre [98].

Pour permettre un calcul du champ associé, dans un milieu donné à une situation électromagnétique donnée, il convient d'ajouter des relations qui préciseront les propriétés spécifiques du milieu étudié.

Ces relations entre les différents champs des vecteurs impliqués dans les équations de Maxwell constituent ce qu'on appelle «les relations constitutives» du milieu étudié, nous nous limiterons ici au cas où ces relations sont linéaires: on dit alors que le milieu est lui-même linéaire :

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (\text{eq 2.9})$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (\text{eq 2.10})$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (\text{eq 2.11})$$

Où : \vec{D} : le vecteur d'induction (déplacement électrique) (C/m²).

\vec{B} : L'induction magnétique (tesla).

\vec{J} : La densité de courant (A/m²).

ε : La permittivité diélectrique absolue du milieu.

μ : La perméabilité magnétique absolue du milieu.

σ : la conductivité.

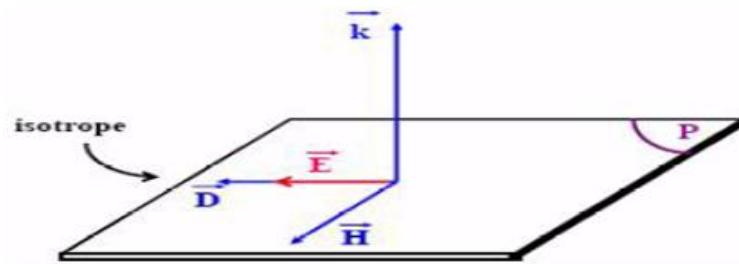


Figure II.1: Cas isotrope.

Dans le cas le plus simple, nous regardons l'impact de l'application d'une contrainte uniaxiale sur l'état d'aimantation d'une couche magnétique au préalable isotrope.

II.4.2. Cas uniaxial

Un milieu uniaxial se produisant sur un seul axe et est différent des deux autres axes.

- Ici, nous rajoutons le terme d'anisotropie induite existant au préalable dans le matériau qui va définir la position initiale de l'axe facile (dans ce cas, parallèle à l'axe x sur la Figure II.2

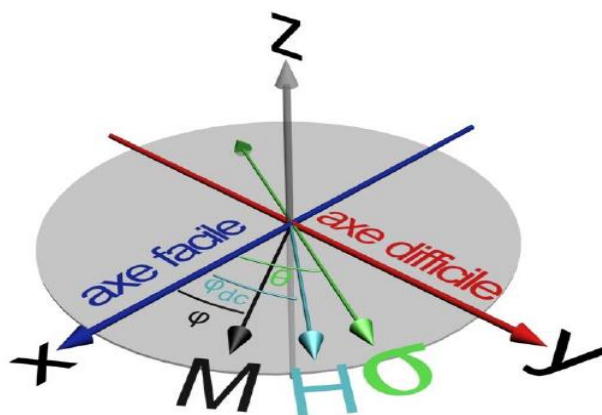


Figure II.2. Système de coordonnées pour un matériau magnétique possédant une anisotropie planaire.

- Une des principales difficultés rencontrée dans cette démarche expérimentale est de pouvoir créer des sollicitations, magnétique et mécanique, homogènes dans un volume de matériau donné. Par ailleurs, ce volume doit être d'une taille suffisante pour être accessible à la mesure. La mesure des différentes grandeurs physiques impose

L'existence d'une zone où les états homogènes magnétique et mécanique coïncident, ou se chevauchent.

On doit connaître le tenseur des contraintes σ et des déformations S dans la zone excitée magnétiquement ainsi que les valeurs prises par les champs d'excitation magnétique H et d'induction magnétique B .

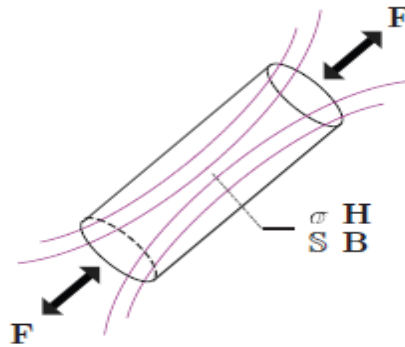


Figure II.3. Principe de la caractérisation magnéto-mécanique uniaxiale : des efforts uniaxiaux, un flux magnétique et des grandeurs homogènes et mesurables

- Initialement, les moments magnétiques d'un matériau magnétique sont distribués aléatoirement et de manière isotrope.

L'application d'une contrainte mécanique sur un matériau magnétique déforme le matériau et modifie également sa perméabilité magnétique.

Suivant son orientation, la contrainte appliquée favorise certaines directions de facile aimantation. La distribution des moments magnétiques devient alors anisotrope.

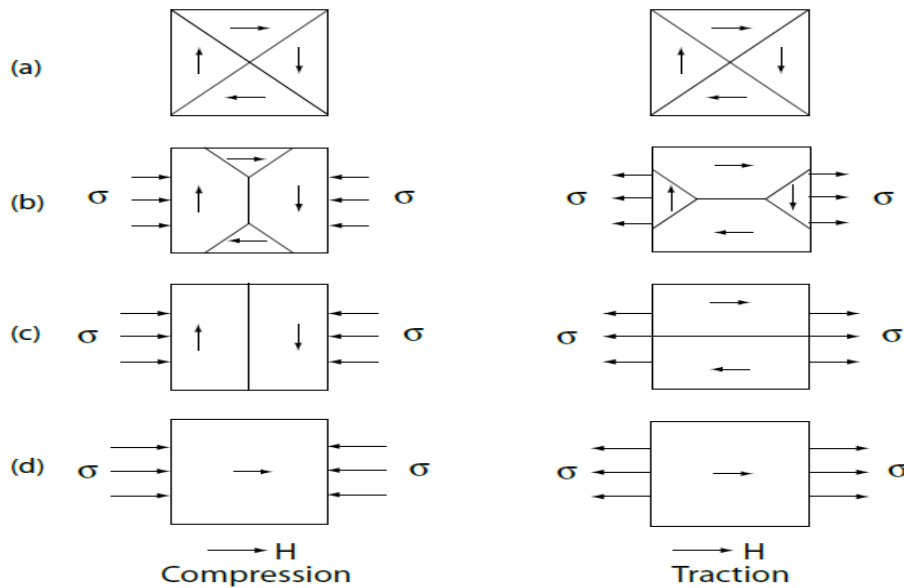


Figure II.4. Aimantation avec magnétostriction positive sous une contrainte mécanique uniaxiale.

II.5. Les Composites macroscopiques magnétoélectriques

Dans cette partie nous allons étudier l'effet magnétoélectrique inverse dans une composite laminaire constituée d'une couche magnétostrictive douce déposée directement sur un substrat piézoélectrique.

Dans un premier temps, la question du choix des matériaux sera évoquée. Ensuite, le cas du composite à anisotropie magnétique uniaxiale sera présenté. Nous étudierons plus en détails l'influence de la composition du matériau magnétostrictif doux.

II.6. Choix des matériaux

Le choix des phases magnétostrictive et piézoélectrique est une question cruciale pour la réalisation de multicouches magnétoélectriques. Il est nécessaire de choisir des propriétés de chaque phase pour obtenir un couplage magnétoélectrique élevé. Ici nous allons justifier le choix des matériaux pour la réalisation de notre composite en multicouches.

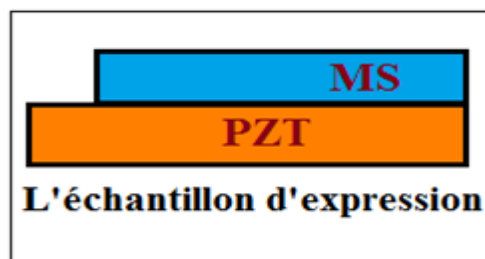


Figure II.5 : Représentation du modèle multicouches.

II.7. Couche magnétostrictive :

La couche magnétostrictive se compose de deux matériaux, le premier est la matrice et le deuxième est la charge.

II.7.1. La matrice de polyuréthane (PU)

C'est un polymère d'uréthane, une molécule organique. Le mot polyuréthane fait référence aux macromolécules comportant le motif constitutif de la fonction chimique uréthane (Figure II.6).

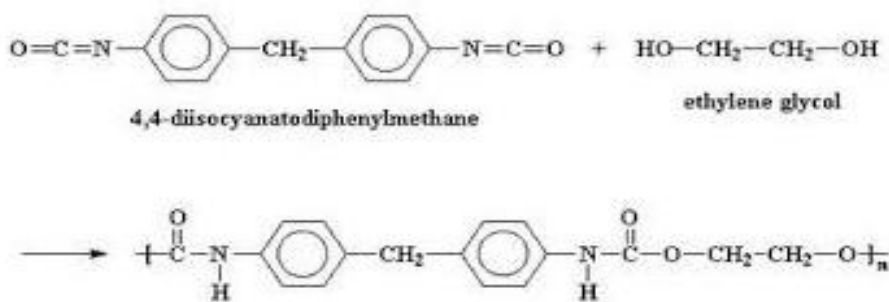


Figure II.6 : Synthèse du polyuréthane, dans lequel les groupes uréthane — NH-(C=O)-O- lient les unités moléculaires.

Les technologies de l'uréthane ont été amenées aux Etats-Unis en 1953 par Jean-Pierre Abbat (en) et Fritz Hartmann.

Tableau II.1: Propriétés du polyuréthane

| Propriétés | Valeurs |
|--|--|
| Densité | 1.25 g/cm ³ |
| Module de Young | Variable |
| Point de fusion | 80 C° |
| Coefficient de dilatation linéaire thermique entre 23° C et 100° C | 200x10 ⁻⁶ m/(m.K) 1 à 2x10 ⁻⁴ K ⁻¹ |
| Coefficient de dilatation thermique ε _r | 7.4 |
| Constant diélectrique à 50 Hz | tan δ = 0.05 |
| Facteur de dissipation à 50 Hz | 3x10 ¹⁰ |
| -Résistance superficielle | |

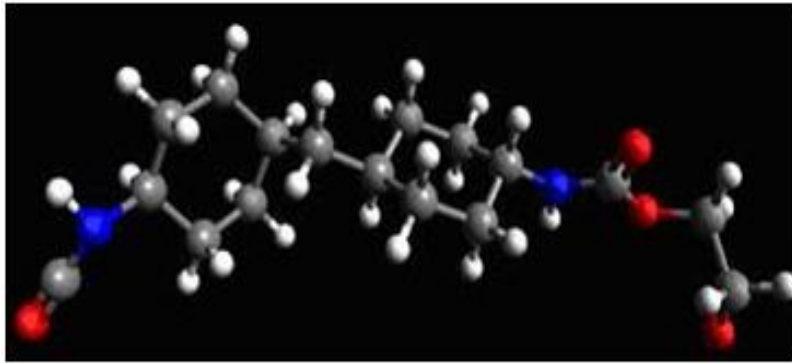


Figure II.7 : Structure moléculaire d'une Partie du polyuréthane.

Les polyuréthanes peuvent être fabriqués dans une large variété de texture et de dureté en faisant varier le monomère ou aux moyens d'additifs. Ils sont employés pour les adhésifs, dans les peintures, les élastomères, les élastomères cellulaires (type caoutchouc), les fibres textiles, etc.

Ainsi, ces plastiques ont une large palette d'applications et sont utilisés dans un grand nombre d'industries. Dans les années 70, l'utilisation du polyuréthane pour les bandages de roues a révolutionné le sport (roller skate) et a apporté un "plus" dans la durée de vie des roues industrielles.

Le polyuréthane possède des qualités exceptionnelles avec une large gamme d'utilisation, d'où l'intérêt qu'on lui porte :

- Excellente résistance à l'usure Matériau très résilient (haut rebond) même dans des duretés élevées,
- Bonne résistance à la propagation des chocs "Compression set" intéressant car peu élevé
- Bonne stabilité chimique vis à vis des huiles minérales, graisses, essence et différents.

Pour la simulation, nous allons utiliser le résultat de l'expérience de l'échantillon de pourcentage de Fer : PU+2%Fe₃O₄.

II.7.2. Les charges de magnétite Fe₃O₄ :

La magnétite, minéral naturel, de formule chimique **Fe₃O₄** est l'un des matériaux magnétiques le plus anciennement connu. La structure spinelle à laquelle elle appartient a été établie pour la première fois par W. H. Bragg [99] et S. Nishikawa [100] par diffraction des rayons X. Ces conclusions ont été largement confirmées par des études de diffraction des neutrons par Shull et al [101] qui ont montré que **Fe₃O₄** était une spinelle inverse.

II.7.2.1. Composition chimique et structure cristalline de Fe_3O_4

La formule chimique générale des ferrites de structure spinelle est $\text{Me}^n \text{Fe}_3\text{O}_4$, où Me^{II} désigne un ion métallique bivalent. Dans le cas de la magnétite, cet ion bivalent est un ion de l'un des éléments de transition : Fe^{+2} .

La maille du spinelle Fe_3O_4 est cubique [102] et contient huit groupements atomiques. Dans cette structure, les ions oxygène, plus gros que les ions métalliques, forment sensiblement un empilement cubique à faces centrées (cfc). Ce réseau possède deux sortes de sites interstitiels (figure II.4 a et b) :

- ✓ des sites tétraédriques (ou sites A) entourés de quatre atomes d'oxygène.
- ✓ des sites octaédriques (ou sites B) entourés de six atomes d'oxygène.

La maille primitive cubique du réseau spinelle contient 64 sites tétraédriques dont 8 seulement sont occupés par des ions métalliques, et 32 sites octaédriques dont 16 seulement sont occupés. La formule ionique de la magnétite s'écrira donc : $\text{Fe}_8^{\text{II}} \text{Fe}_{16}^{\text{III}} \text{O}_{32}$.

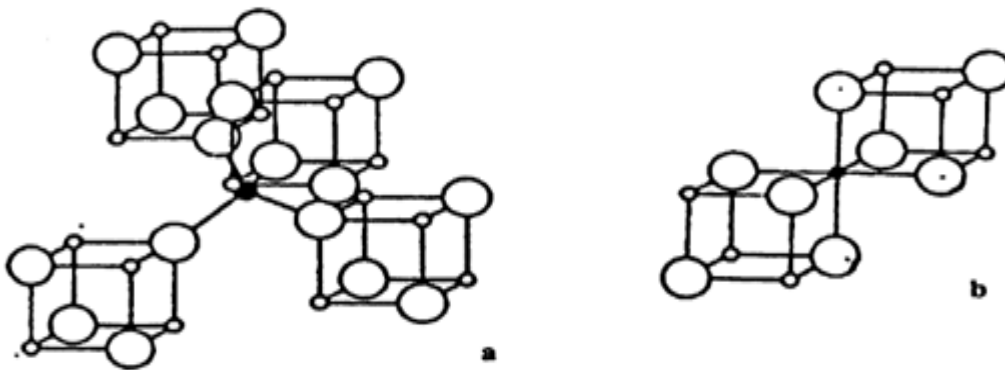


Figure II.8 : Représentation des interstices définis par l'empilement des ions oxygène :

- a) interstices tétraédriques (en noir) définis par quatre ions oxygène ; b) interstices octaédriques (en noir) définis par six ions oxygène.

II.7.2.2. Propriétés magnétiques de Fe_3O_4

Une telle structure a suscité de nombreuses études sur le plan du magnétisme. Curie fut le premier à découvrir la transformation de l'état ferromagnétique en l'état paramagnétique à une température dite "de Curie" [103]. Cette température, trouvée à 845K pour la magnétite, correspond à la disparition de l'aimantation spontanée [104], ce qui entraîne l'existence d'anomalies de propriétés physiques notamment de la chaleur spécifique et de la dilatation.

En dessous de cette température ($T = 845\text{K}$), les ions A et B se couplent antiparallèlement [105]. Cet ordre magnétique s'établit parce que les interactions A-O-B sont antiferromagnétiques et fortes

(couplage de superéchange) alors que les interactions A-O-A et B-O-B sont ferromagnétiques mais plus faibles.

L'aimantation à saturation est maximale pour la composition stoechiométrique [106]. Weiss et Forrer [107] ont trouvé une valeur de l'aimantation à saturation d'environ 98,23 uem/g à 300K la valeur de l'aimantation à saturation est de $4,07\mu_B$ à 4K).

Historiquement, la description théorique des propriétés magnétiques des ferrites est due en grande partie aux travaux de L. Néel [108]. Ce dernier a proposé une configuration des spins en sous-réseaux. En ce qui concerne la magnétite, la valeur de l'aimantation à saturation a pu être prédite. Rappelons que dans Fe_3O_4 , l'ion ferreux est placé dans le sous-réseau B et les ions ferriques sont placés pour moitié dans le sous-réseau A, pour moitié dans le sous-réseau B. Les ions ferriques (Fe^{3+}) sont dans un état de spin $S = 5/2$ et de moment orbital nul. Donc, chaque ion doit apporter une contribution de $5\mu_B$ au moment à saturation. Les ions ferreux (Fe^{2+}) ont un spin de 2 et contribuent pour $4\mu_B$ sans compter la contribution résiduelle due au moment orbital. Donc, le moment effectif en magnétons de Bohr par "molécule" de Fe_3O_4 devrait être de 14 si tous les spins étaient parallèles, puisque la valeur de l'aimantation résultante du matériau est obtenue par la somme des vectrices aimantations des sous-réseaux magnétiques. La valeur expérimentale [107] est de $4,07\mu_B$. Le désaccord s'explique si les moments des ions ferriques Fe^{3+} sont antiparallèles entre eux.

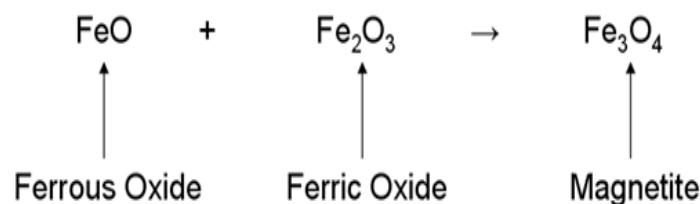


Figure II.9 : Equation de la Magnétite.

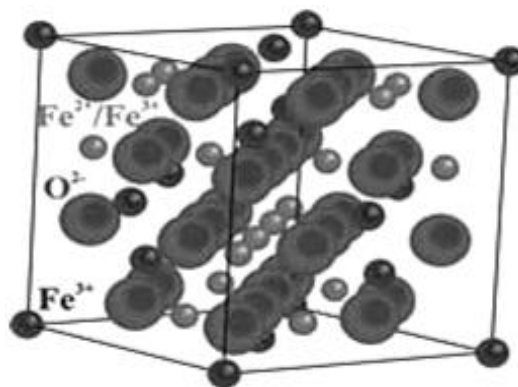


Figure II.10 : Structure et cellule de la Magnétite.

II.8. Multicouches modélisation (Magnétostrictif/piézoélectrique) :

Modélisation du courant magnéto-électrique d'un échantillon en couches :

Pour interpréter les deux l'évolution du courant total et contre changement de phase B_{dc} , et distinguer le α_p linéaire et le coefficient magnéto-électrique β_p de polarisation bilinéaire, le comportement de l'effet magnéto-électrique dans un échantillon multicouche est modélisé. Le schéma de la structure en multicouches du composite a été montré dans la figure (II.11).

Les vecteurs T_1 et T_2 indiquent la force de l'accouplement mécanique entre les couches du matériau composite :

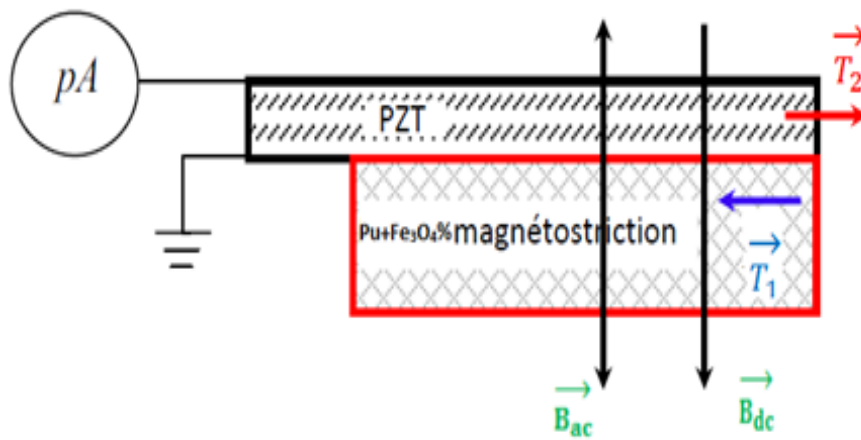


Figure II.11 : schématique de la structure des composites en multicouche

II.8.1. Les équations de la modélisation :

L'application d'un champ magnétique (continu plus alternatif) conduit la déformation de la couche magnétostrictive

La relation entre la déformation S et le champ magnétique H est sous la forme :

$$S = f(H) = \lambda_5 B^5 + \lambda_4 B^4 + \lambda_3 B^3 + \lambda_2 B^2 + \lambda_1 B + s_0 \quad (\text{eq. II.12})$$

La déformation de cette couche conduit à une contrainte $T=c*S$ appliqué sur la couche piézoélectrique par la suit une vecteur de déplacement $D=d_{31}*T$ conduit à génération d'un courant électrique $I = A \frac{dD}{dT}$

, on peut le mesurer en court circuit, et une tenson égal à $V=Z*I$.

On commence par l'équation de déformation d'un côté magnétoélectrique et piézoélectrique. Le schéma suivant, figure (II.12), montre les différentes étapes de calcul :

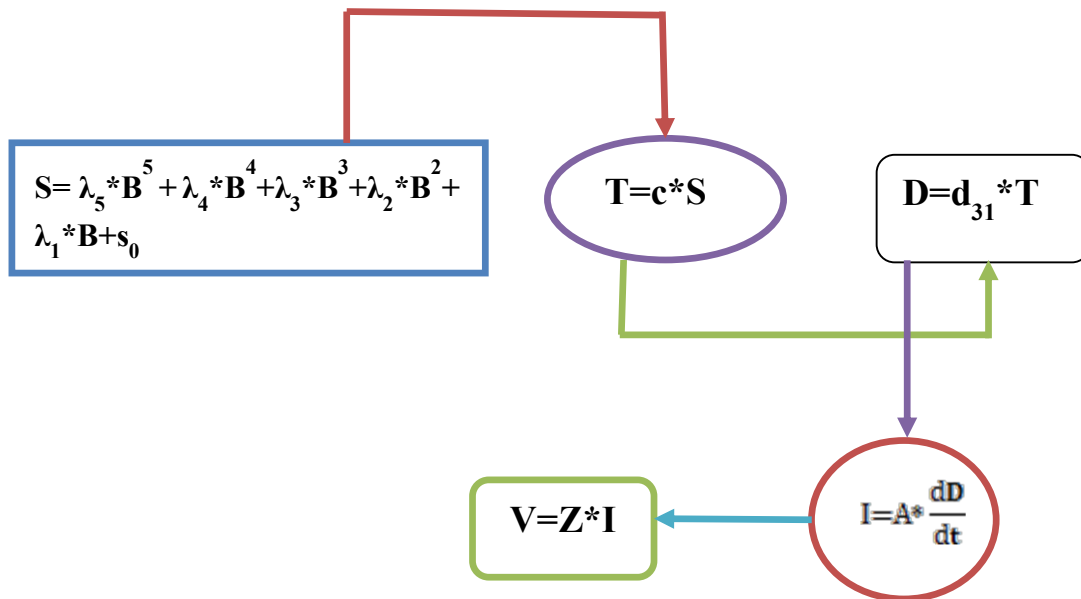


Figure II.12 : la tension de sortie du matériau piézoélectrique.

Puis on trouve une équation différentielle :

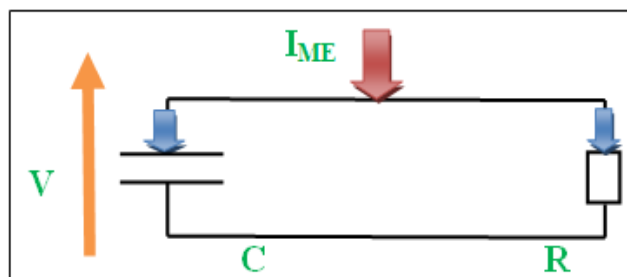


Figure II.13 : Schéma électrique représente la lecture de I_{ME} .

Les expressions suivantes présentent la solution des équations différentielles :

$$I = A \frac{dD}{dt} \quad (\text{eq 2.13})$$

et

$$Q = C * V \text{ donc } \frac{dQ}{dt} = C \frac{dV}{dt} = I_c \text{ et } I_R = \frac{V}{R}$$

$$\text{Donc : } dV = \frac{1}{C} I_c \times dt \quad (\text{eq 2.14})$$

$$V = \int \frac{1}{C} I_c \times dt \quad (\text{eq 2.15})$$

$$I_{ME} = I_C + I_R \quad (\text{eq 2.16})$$

$$I_C = I_{ME} - I_R \quad (\text{eq 2.17})$$

Donc :

$$I_c = I_{ME} - \frac{V}{R} \quad (\text{eq 2.18})$$

$$I_c = I_{ME} - \frac{1}{RC} \int I_c \quad (\text{eq 2.19})$$

$$\left[I_c + \frac{1}{CR} \int I_c dt = I_{ME} \right]' \quad (\text{eq 2.20})$$

Solution de l'équation différentielle :

$$\frac{dI_c}{dt} + \frac{1}{CR} I_c = (I_{ME})' \quad (\text{eq 2.21})$$

$$\frac{dI_c}{dt} + \frac{1}{CR} I_c = 0' \Rightarrow \frac{dI_c}{dt} = -\frac{1}{RC} I_c dt \quad (\text{eq 2.22})$$

$$\frac{dI_c}{I_c} = \frac{dt}{RC} \Rightarrow \log I_c = -\frac{t}{RC} + k$$

$$I_c = k \cdot \exp\left(-\frac{t}{RC}\right)$$

On pose k=k(t)

$$\frac{d}{dt} \left(k \cdot \exp\left(-\frac{t}{RC}\right) \right) + \frac{1}{RC} k \cdot \exp\left(-\frac{t}{RC}\right) = I_{ME}'$$

$$\left(\frac{dk}{dt} \right) \exp\left(-\frac{t}{RC}\right) - k \frac{1}{RC} \exp\left(-\frac{t}{RC}\right) + k \frac{1}{RC} \exp\left(-\frac{t}{RC}\right) = I_{ME}'$$

$$\frac{dk}{dt} = I_{ME}' \cdot \exp\left(\frac{t}{RC}\right)$$

$$k = \int I_{ME}' \cdot \exp\left(\frac{t}{RC}\right) dt$$

On décrit ces équations par simulink et les blocs sur MATLAB

II.9. Conclusion

L'objectif de ce travail est la modélisation et la caractérisation du couplage magnétoélectrique dans un multicouches piézo composites.

Après avoir rappelé les propriétés magnétiques de la magnétite Fe_3O_4 , et les différentes relations existantes entre les oxydes de fer, on a décrit la structure cristalline ainsi que l'effet piézoélectrique direct et inverse. Nous avons ensuite dépeint les différents types de matériaux piézoélectriques et l'importance de la température de Curie.

Chapitre III :

Simulations

Chapitre III : Simulations**III.1. Introduction**

Dans ce chapitre nous avons établi un programme à l'aide du logiciel de simulink sous l'environnement de MATLAB.

A l'aide de ce programme, on va calculer l'influence de paramètres physiques (électrique, magnétique, mécanique) sur la réponse magnétoélectrique de la structure proposée.

Et enfin, on a validé le modèle de simulation par des résultats expérimentaux.

III.2. Les objectifs

- Modélisation du phénomène magnétoélectrique dans les multicouches piézomagnétiques.
- Simulation des phénomènes magnétoélectriques à partir du modèle établi.
- Discussion des résultats obtenus pour valider le modèle.

III.3. Choix du logiciel

Après réflexion et comparaison entre plusieurs logiciels de simulation tels que mathematica, statistica, Maple et Matlab nous avons choisi Matlab pour les raisons suivantes :

- ✓ MATLAB est un logiciel de calcul matriciel à syntaxe simple. Avec ses fonctions spécialisées,
- ✓ MATLAB peut être aussi considéré comme un logiciel de programmation adapté pour les problèmes scientifiques.
- ✓ MATLAB est un interpréteur : les instructions sont interprétées et exécutées ligne par ligne.
- ✓ MATLAB fonctionne dans plusieurs environnements tels que X-Windows, Windows, Macintosh.

Il existe plusieurs modes de fonctionnement :

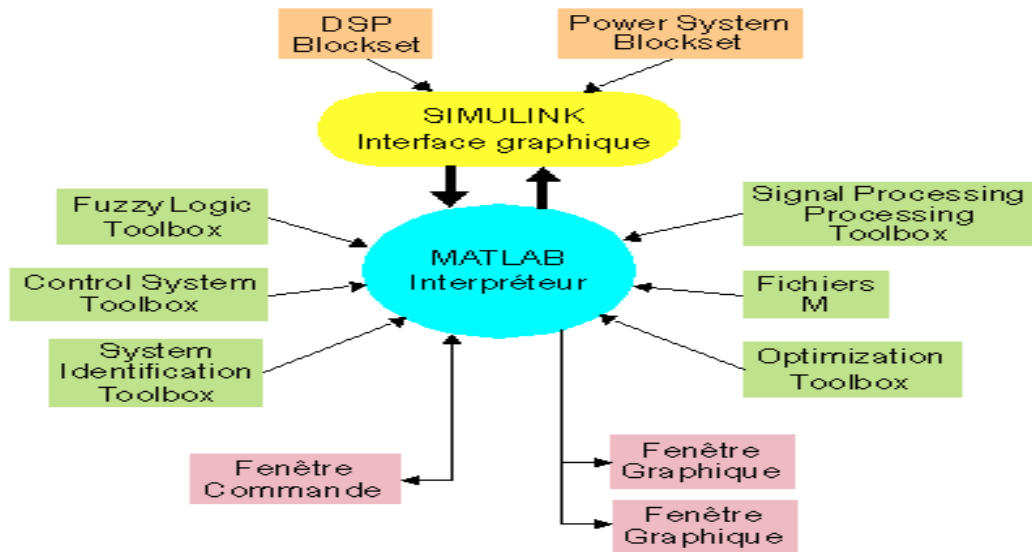


Figure III.1 : Environnement MATLAB

- ❖ Mode interactif : MATLAB exécute les instructions au fur et à mesure qu'elles sont données par l'utilisateur.
- ❖ Mode exécutif : MATLAB exécute ligne par ligne un "fichier M" (programme en langage MATLAB).
- ❖ Fenêtre Commande : Dans cette fenêtre, l'utilisateur donne les instructions et MATLAB retourne les résultats.
- ❖ Fenêtres Graphique : MATLAB trace les graphiques dans ces fenêtres.
- ❖ Fichiers M : Ce sont des programmes en langage MATLAB (écrits par l'utilisateur).
- ❖ Toolboxes: Ce sont des collections de fichiers M développés pour des domaines d'application spécifiques (Signal Processing Toolbox, System Identification Toolbox, Control System Toolbox, u-Synthesis and Analysis Toolbox, Robust Control Toolbox, Optimization Toolbox, Neural Network Toolbox, Spline Toolbox, Chemometrics Toolbox, Fuzzy Logic Toolbox, etc.) [109]

III.4. Simulink par MATLAB

Simulink est l'extension graphique de MATLAB permettant de représenter les fonctions mathématiques et les systèmes sous forme de diagramme en blocs, et de simuler le fonctionnement de ces systèmes.

Matlab Simulink est une plate-forme de simulation multi-domaine et de modélisation des systèmes dynamiques. Il fournit un environnement graphique et un ensemble de bibliothèques contenant des blocs de modélisation.

Il est intégré à MATLAB, fournissant ainsi un accès immédiat aux nombreux outils de développement algorithmique, de visualisation et d'analyse de données de MATLAB.

Dans la fenêtre Commande de MATLAB, taper simulink. La fenêtre Simulink va s'ouvrir

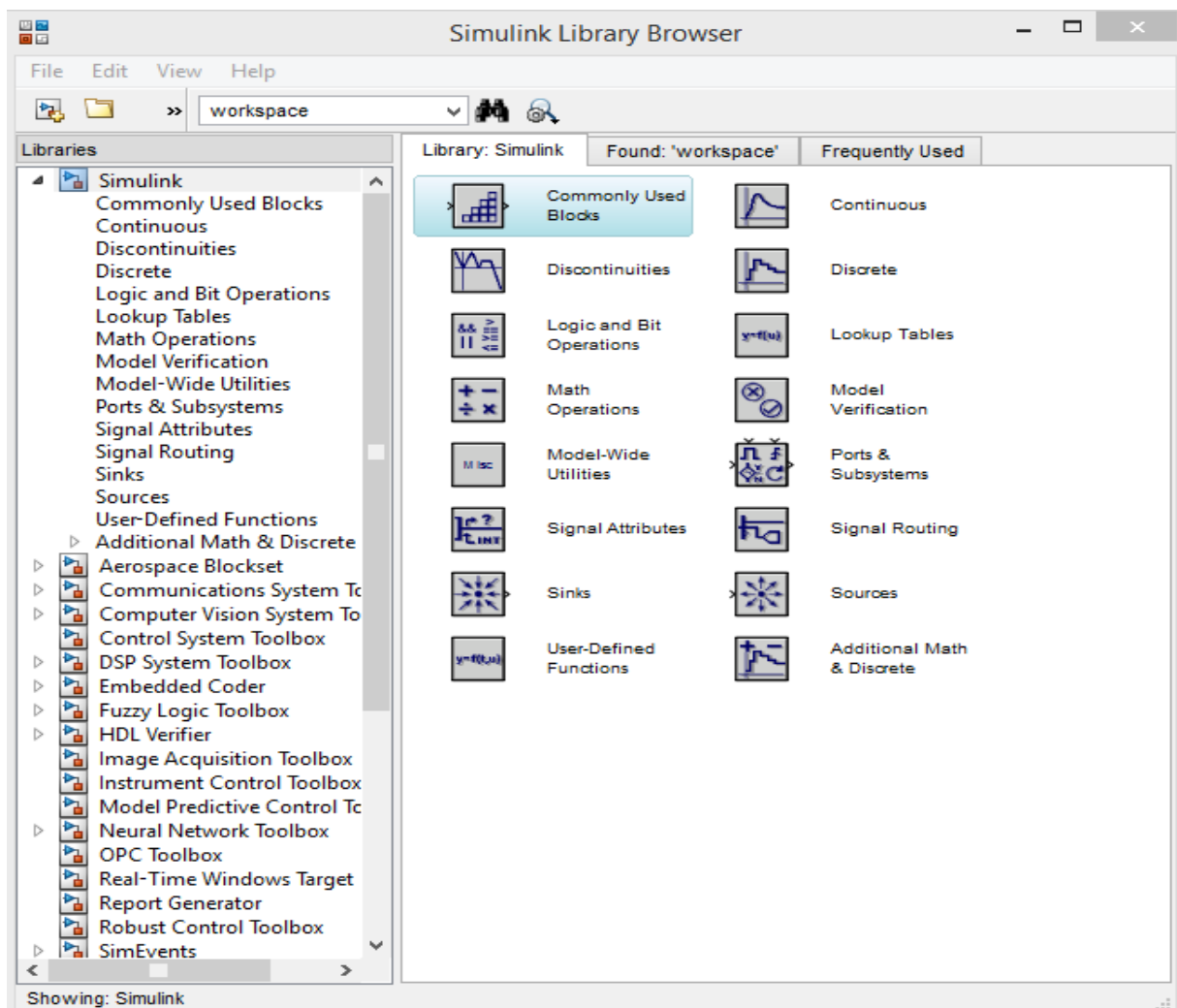


Figure III.2 : bibliothèque d'outil du simulink

Cette fenêtre contient des collections de blocs que l'on peut ouvrir en double cliquant dessus :

- Sources
- Sources de signaux
- Discrete
- Blocs discrets
- Linear
- Blocs linéaires
- Nonlinear
- Blocs nonlinéaires
- Connections
- Entrée/sortie, multiplexeur/démultiplexeur, etc.
- Demos
- Blocksets & Toolboxes

III.5. Choisir les paramètres de simulation

Avant de lancer une simulation, on doit choisir les paramètres appropriés au modèle du système. Dans le menu Simulation, lorsqu'on choisit Paramètres, une fenêtre Simulation Paramètres s'ouvrira. On doit alors choisir les paramètres pour Solver, Workspace I/O et Diagnostics [82]

III.6. Le principe de magnétoélectrique d'une structure unimorphe

La structure unimorphe est réalisée à l'aide d'une couche piézoélectrique, sur lequel est collé (Araldite D (82%) et triéthylène tétramine (18%)) un film de polymère magnétostrictif. Pour une bonne adhésion entre les différentes couches une masse est positionnée sur l'ensemble, que cette technique bloquait la déformation du film de polymère, mais cette méthode permet d'appliquer des tensions plus grandes. La figure III.3 ;4 résume le principe de fabrication d'un unimorph

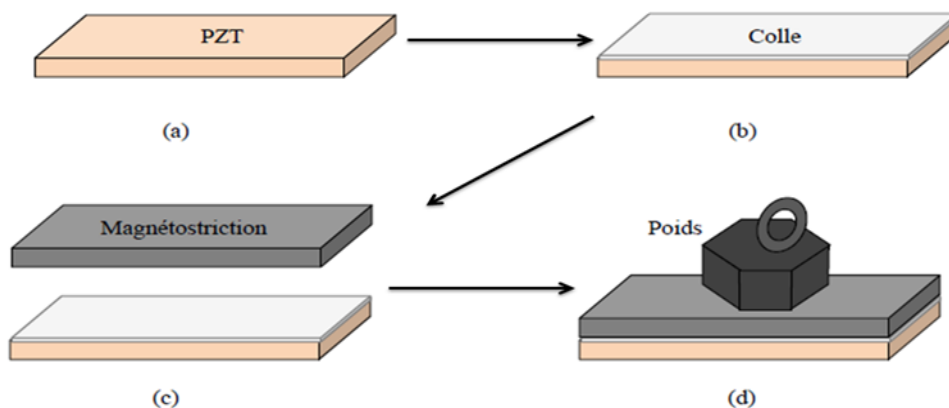


Figure III.3: Processus de fabrication d'une structure unimorphe.

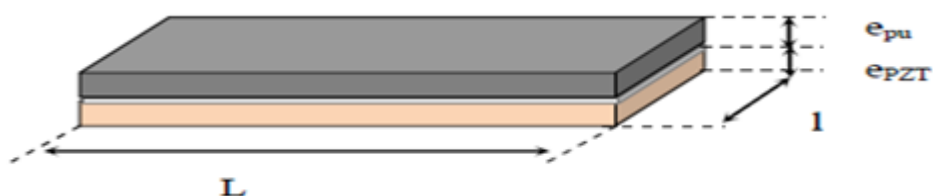


Figure III.4 : Dimension géométrique de l'unimorphe

III.7. Modélisation du courant ME et de la tension ME d'un échantillon multicouche

Modélisation du courant magnéto-électrique d'un échantillon en couches :

Pour interpréter les deux l'évolution du courant total et contre changement de phase B_{dc} , et distinguer le α_p linéaire et le coefficient magnéto-électrique β_p de polarisation bilinéaire, le comportement de l'effet magnéto-électrique dans un échantillon multicouche est modélisé. Le schéma de la structure en multicouches du composite a été montré dans la figure (III.5).

Les vecteurs T_1 et T_2 indiquent la force de l'accouplement mécanique entre les couches du matériau composite :

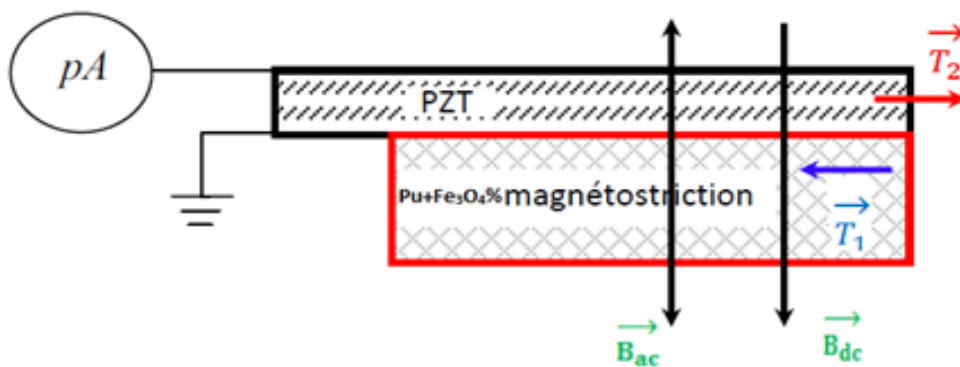


Figure III.5 : schématique de la structure des composites en multicouche

III.8. Présentation de l'étude

La composite consiste en la juxtaposition de deux couches :

- Une couche de PZT d'épaisseur $500\mu\text{m}$, métallisé en argent et polarisé selon l'épaisseur sous un champ électrique de 2MV/m .
- Une couche polymère polyuréthane d'épaisseur $200\mu\text{m}$, dans laquelle sont incorporées des particules de terfenol, d'où l'oxyde de fer.
- Une face du PU est collée
- ❖ Cette liaison entre les couches modifie la capacité comme le présente le tableau qui donne la capacité des échantillons à 1kHz .

| Multi-couches PZT/Pu chargé | |
|-----------------------------|-------------------------------------|
| PZT | Pu+2%Fe ₃ O ₄ |
| 10nF | 35 pF |

Tableau III.1 : Multi-couches PZT/PU chargé

III.9. Description du banc expérimental

Le but de cette partie consiste à présenter les bancs d'essais pour les deux configurations. La mesure de la tension est basée sur la structure par couplage direct réalisé pour la déformation, L'ensemble est présenté sur la figure III.6.

Le champ magnétique alternatif, est obtenu à l'aide d'un amplificateur de tension, entraîné par un générateur de fonction bobine-électroaimant. On applique un champ magnétique sur le polymère magnétostrictif excité mécaniquement et déplacement piézoélectrique.

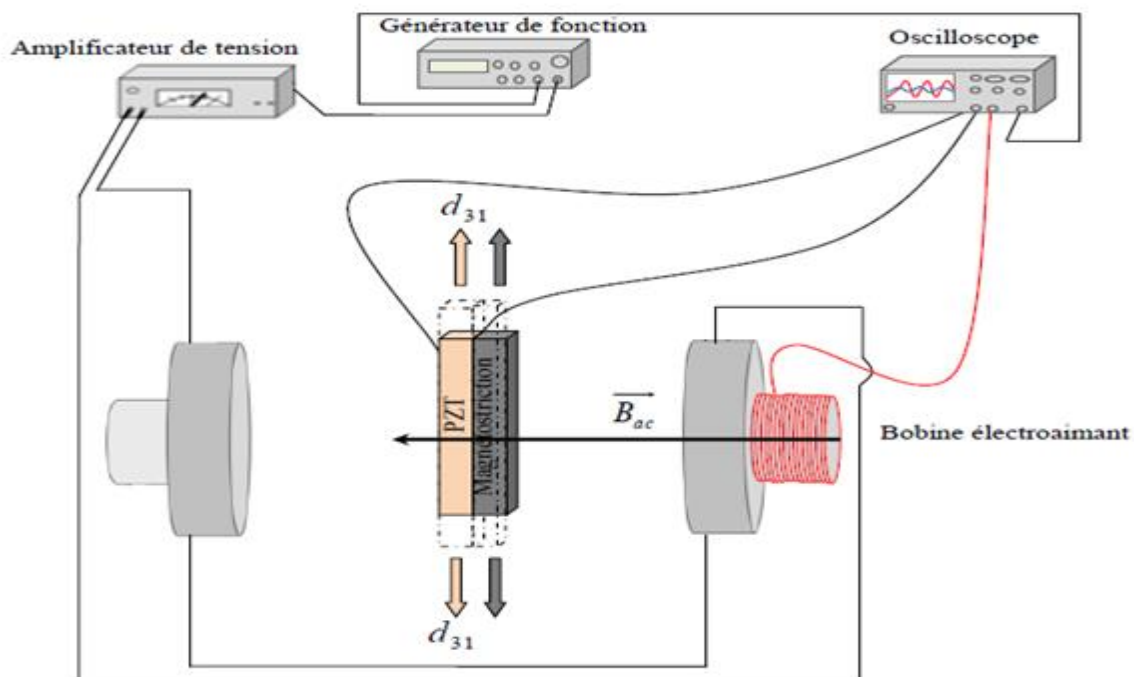


Figure III.6 : Le montage expérimental

III.10. Le principe de mesure

Le principe de mesure est le même que celui utilisé pour la caractérisation des monocouches comme l'illustre la figure ci-contre. L'échantillon est soumis simultanément à un faible champ magnétique alternative hac et à un champ statique qui peut monter jusqu'à 2kOe.

Ces deux sources indépendantes sont perpendiculaires à la surface de l'échantillon (mode transversal T).

Dans la structure des multi-couches, l'effet ME est dû à la déformation des particules dans la matrice de Pu sous l'action du champ magnétique (l'effet piézomagnétique), qui provoque une contrainte dans le PZT. Sous l'effet piézoélectrique cette contrainte se transforme en champ électrique (tension aux bornes du PZT ou un courant ME si le circuit est fermé).

III.11. Propriétés piézomagnétiques sous champ statique

Le principe de fonctionnement du vibromètre est basé sur la détection du décalage de fréquence du laser réfléchi sous l'effet Doppler. Le faisceau laser est focalisé sur la surface de mesure et réfléchi en sens opposé.

La vitesse et l'amplitude de vibration de la surface génèrent ainsi une variation de la fréquence du rayon réfléchi. La fréquence est fonction de la vitesse de la structure dans la direction du rayon laser et de la longueur d'onde (Figure III.7).

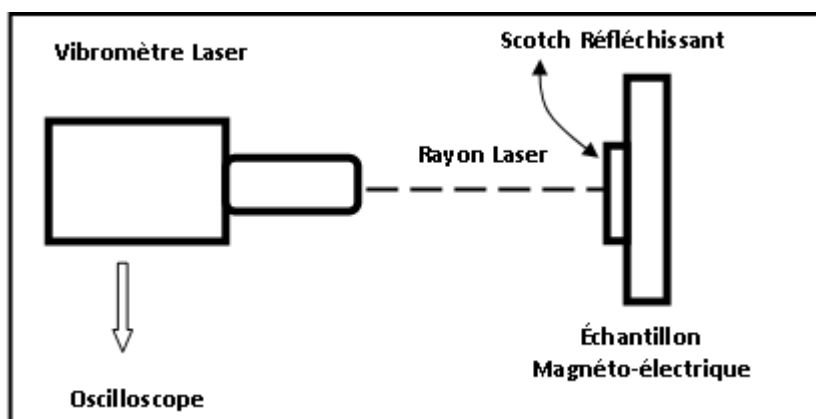


Figure III.7 : Illustration schématique du dispositif de mesure.

Dans le but d'analyser les couplages au sein de la multicouche et l'influence du champ statique, une analyse des propriétés piézomagnétiques va être réalisée. Le principe de mesure est le même que celle présenté dans le chapitre III (vibromètre laser), (figure III.8)

La déformation des échantillons en en fonction du champ statique, est observé pour un faible champ alternatif 10e, à la fréquence de 1kHz. [110]

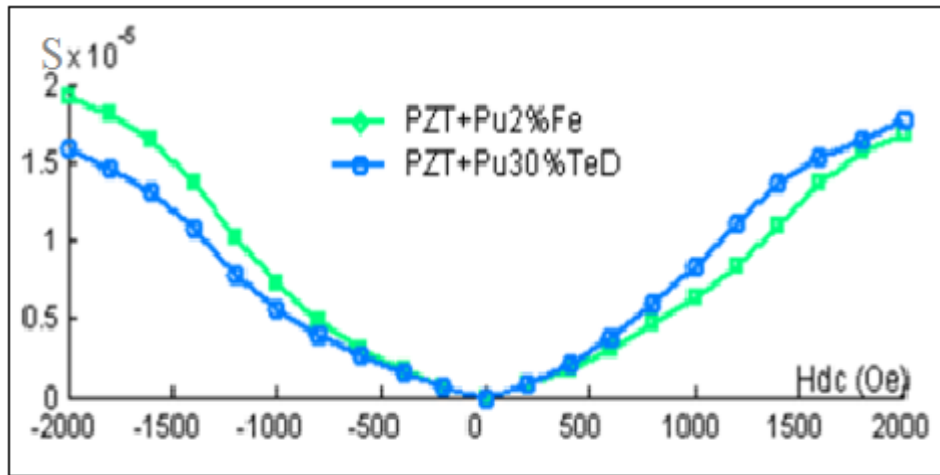


Figure III.8 : La déformation S en fonction le champ H_{dc} (Oe) à 1 KHz [110].

On dessine ces tableaux comme une figure sur Matlab

Cette figure représente la tension de sortie du matériau piézoélectrique :

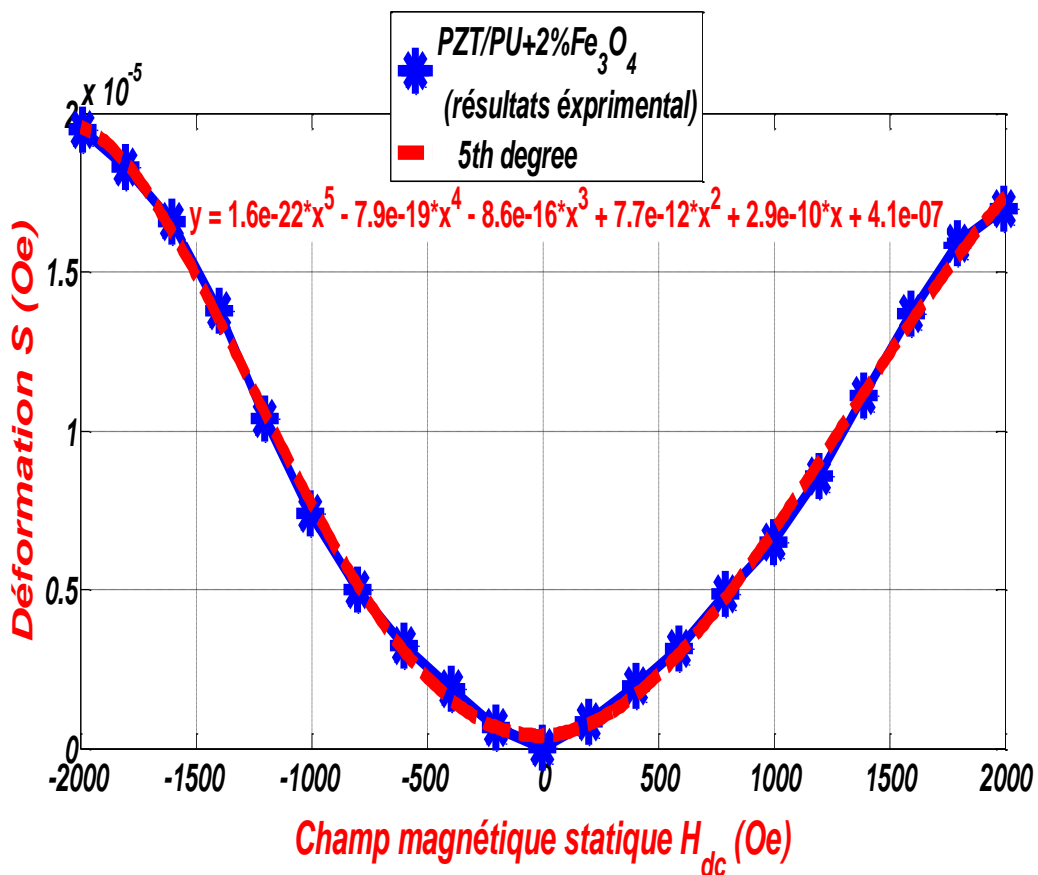
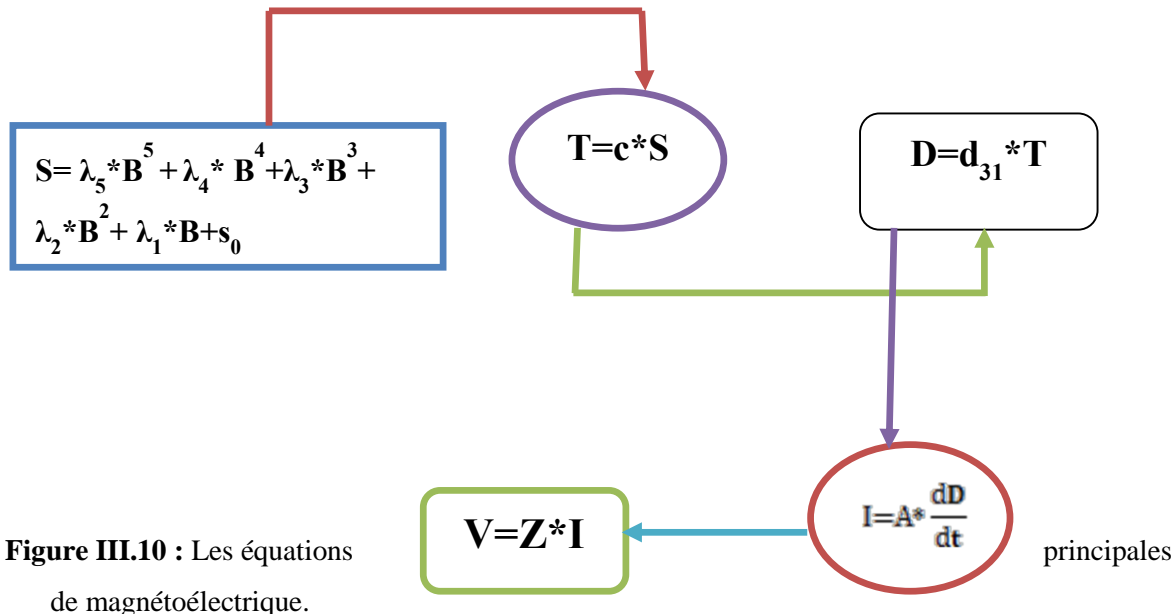


Figure III.9 : la variation de la déformation (S) en fonction du champ statique appliqué (à 1 KHz) après avoir utilisé le logiciel MATLAB



La tendance du résultat expérimentale mesuré, donne l'équation de comportement de la couche magnétostrictive $S = \lambda_1 B_{dc} + \lambda_2 B_{dc}^2 + \lambda_3 B_{dc}^3 + \lambda_4 B_{dc}^4 + \lambda_5 B_{dc}^5 + S_0$

Avec :

- $S_0 = 4.1 \cdot 10^{-7} \text{ T}$
- $\lambda_1 = 2.9 \cdot 10^{-6} \text{ T}$
- $\lambda_2 = 7.7 \cdot 10^{-4} \text{ T}$
- $\lambda_3 = -8.6 \cdot 10^{-4} \text{ T}$
- $\lambda_4 = -7.9 \cdot 10^{-3} \text{ T}$
- $\lambda_5 = 1.6 \cdot 10^{-2} \text{ T}$

Donc il y a quatre coefficients magnétostrictifs, ce qui rend le programme comme suit :

- ❖ Modèle magnéto-électrique avec le Simulink
- ❖ Schéma de block pour le phénomène magnétostrictif.

La figure III.11 montre le schéma de bloc de la déformation S pour le matériau MS.

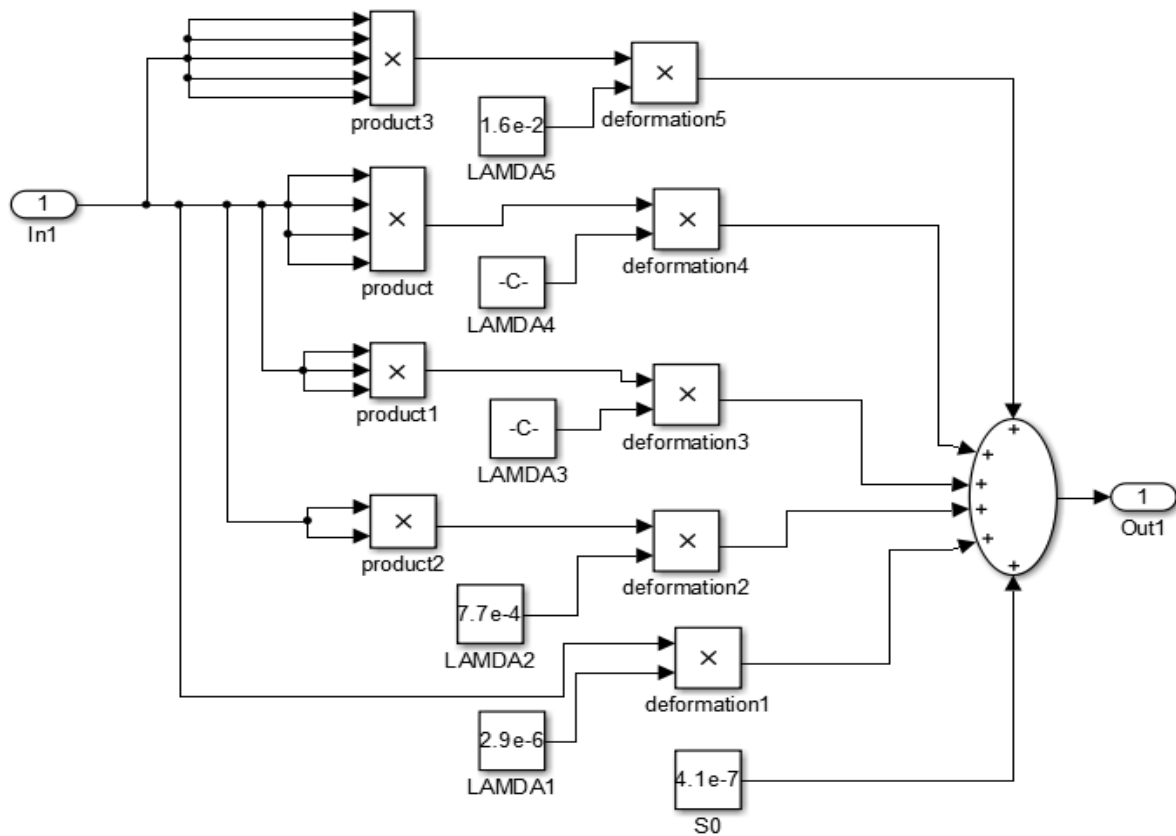


Figure III.11: Schéma de block magnétostrictive.

❖ Block de modèle piézo-électrique

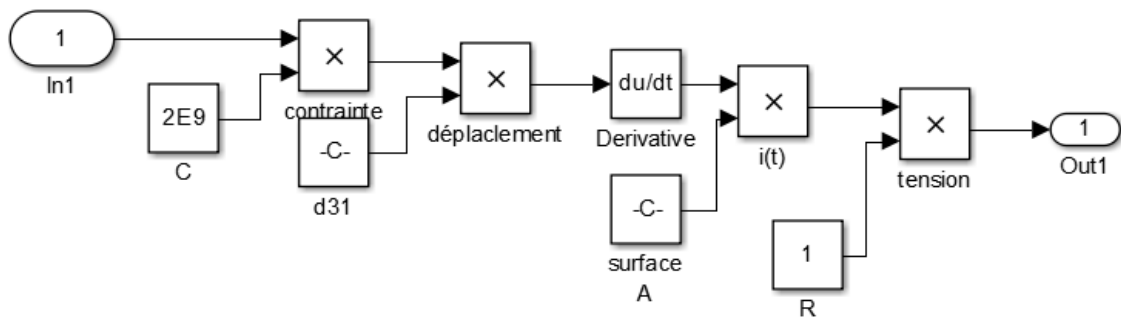


Figure III.12 : illustre le modèle de simulation du comportement physique du matériau PZT

III.12. Influence des paramètres magnétiques

III.12.1. Le courant magnéto-électrique

On commence par le simulink pour trouver le courant et on va comparer entre le résultat de simulation et le résultat expérimental.

On modélise sur MATLAB le modèle suivant :

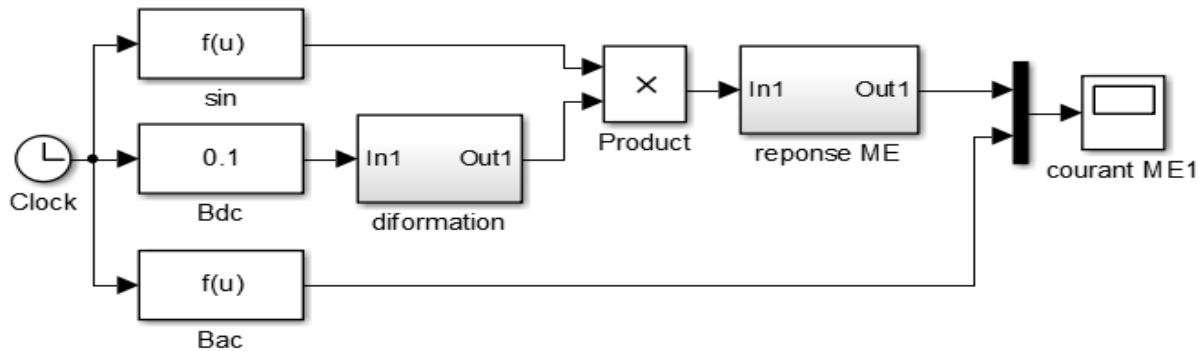


Figure III.13 : Modèle représentant le courant (I_{ME})

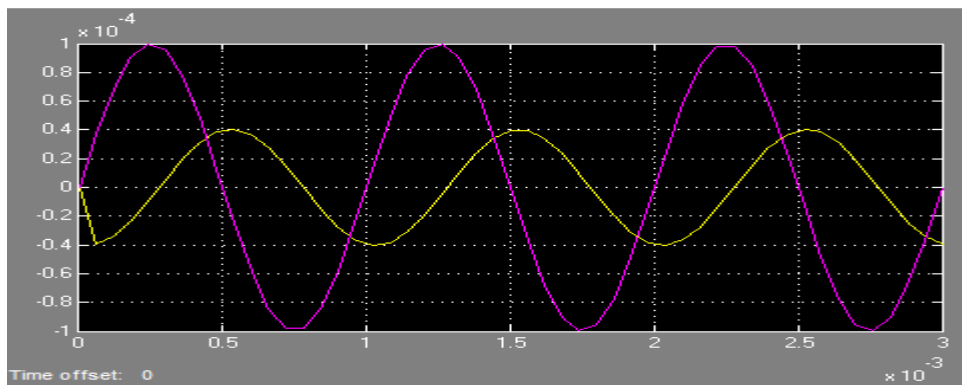


Figure III.14 : Courant en fonction du temps.

Pour tracer la courbe qui représente le courant en fonction de B_{dc} , on doit varier B_{dc} pour chaque valeur, on extrait le courant à l'aide du résultat de simulation (le courant en fonction du temps), les résultats après le simulink sont montrés sur le tableau suivant :

Tableau III.2 : les valeurs du courant (I_{ME}) à 1KHz :

| B_{dc} | -0,2 | -0,15 | -0,1 | -0,05 | 0 | 0,05 | 0,1 | 0,15 | 0,2 |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Courant | 1,89E-05 | 1,43E-05 | 7,40E-06 | 2,15E-06 | 3,92E-07 | 2,23E-06 | 6,61E-06 | 1,19E-05 | 1,67E-05 |

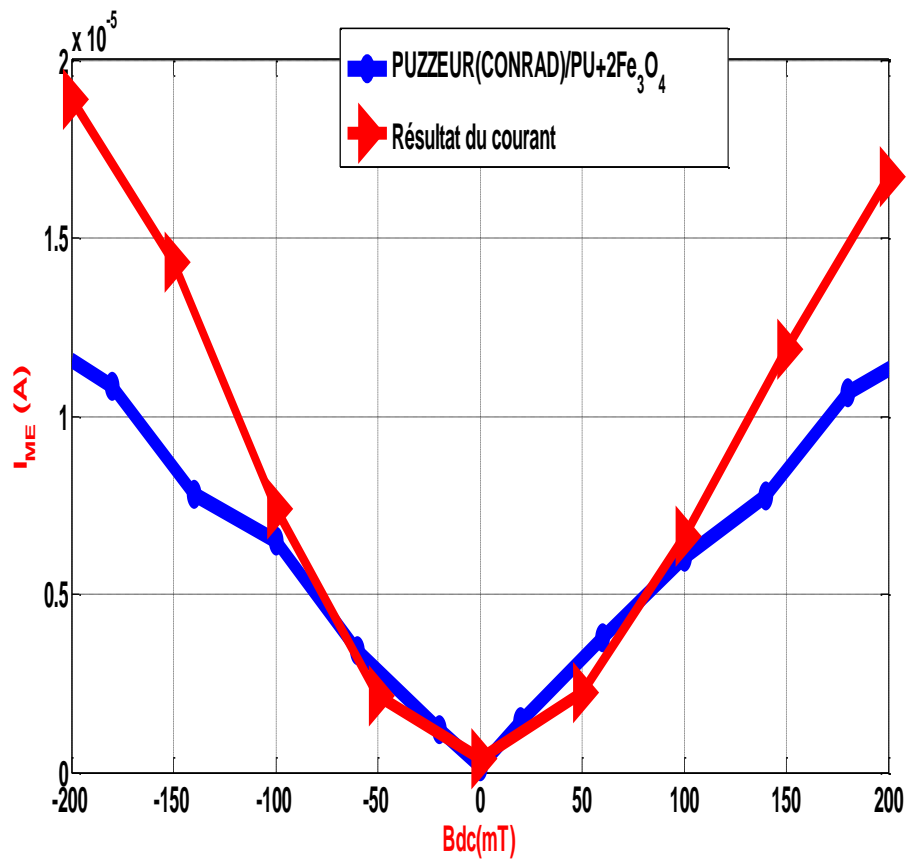


Figure III.15 : Comparaison entre I_{ME} expérimental et résultat de simulation en fonction du champ magnétique continu.

III.12.2. La tension magnéto-électrique

On va modéliser un modèle sur MATLAB pour déterminé la tension (V_{ME}) à 1KHz

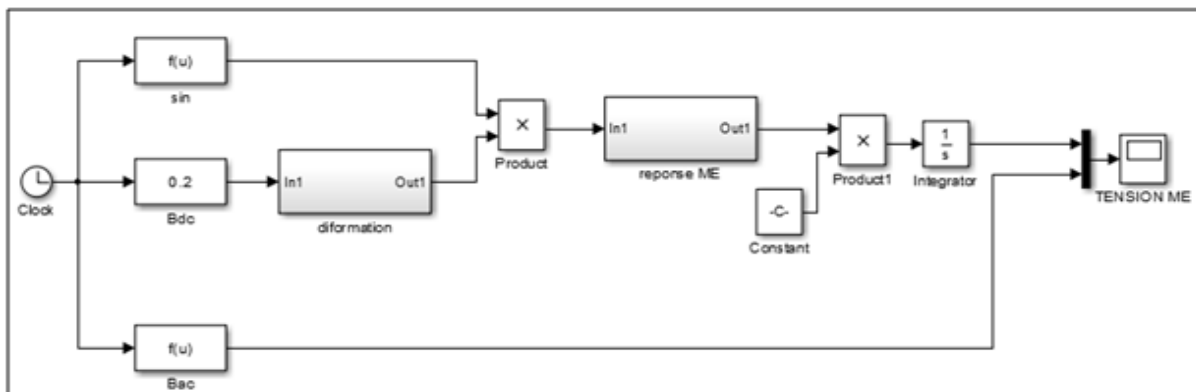


Figure III.16 : Premier modèle essai de simulink pour déterminer la tension.

Après avoir déterminé les équations, on appliqué le principe de la tension sur simulink de MATLAB nous donne cette figure finale :

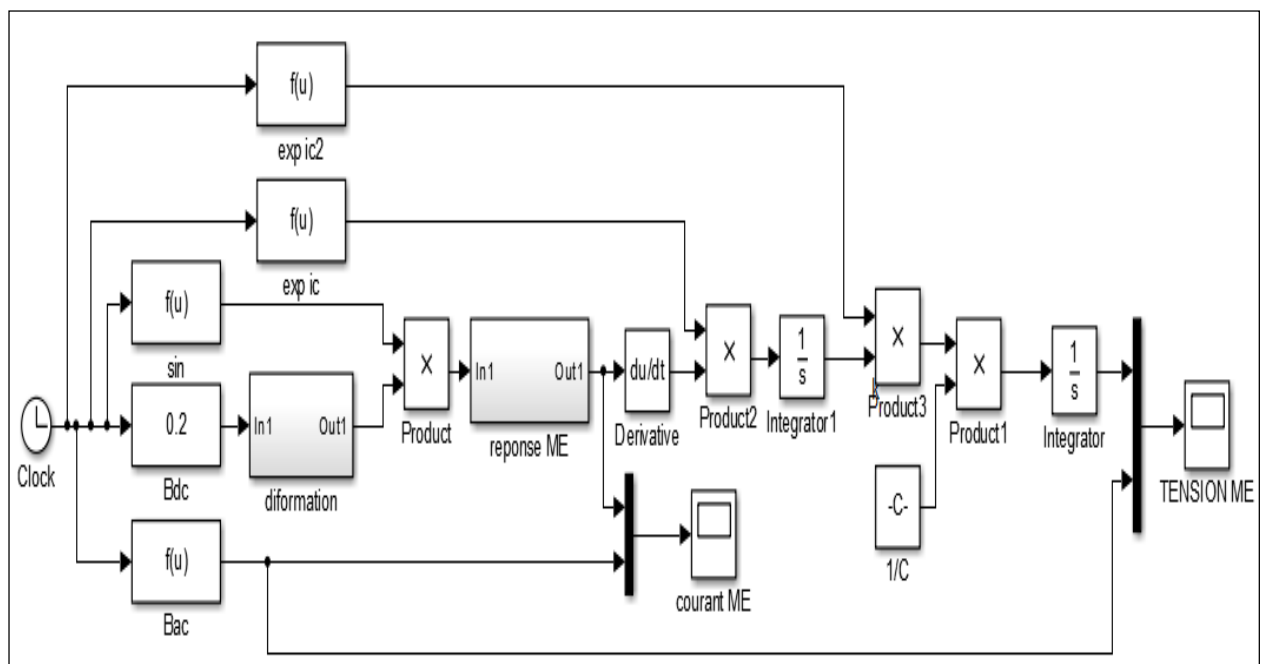


Tableau III.3 : Les valeurs de la tension (V_{ME}) à 1KHz

| Bdc | -0,2 | -0,15 | -0,1 | -0,05 | 0 | 0,05 | 0,1 | 0,15 | 0,2 |
|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Tension | 9,72E-04 | 7,40E-04 | 3,82E-04 | 1,11E-04 | 2,03E-05 | 1,15E-04 | 3,41E-04 | 6,16E-04 | 8,59E-04 |

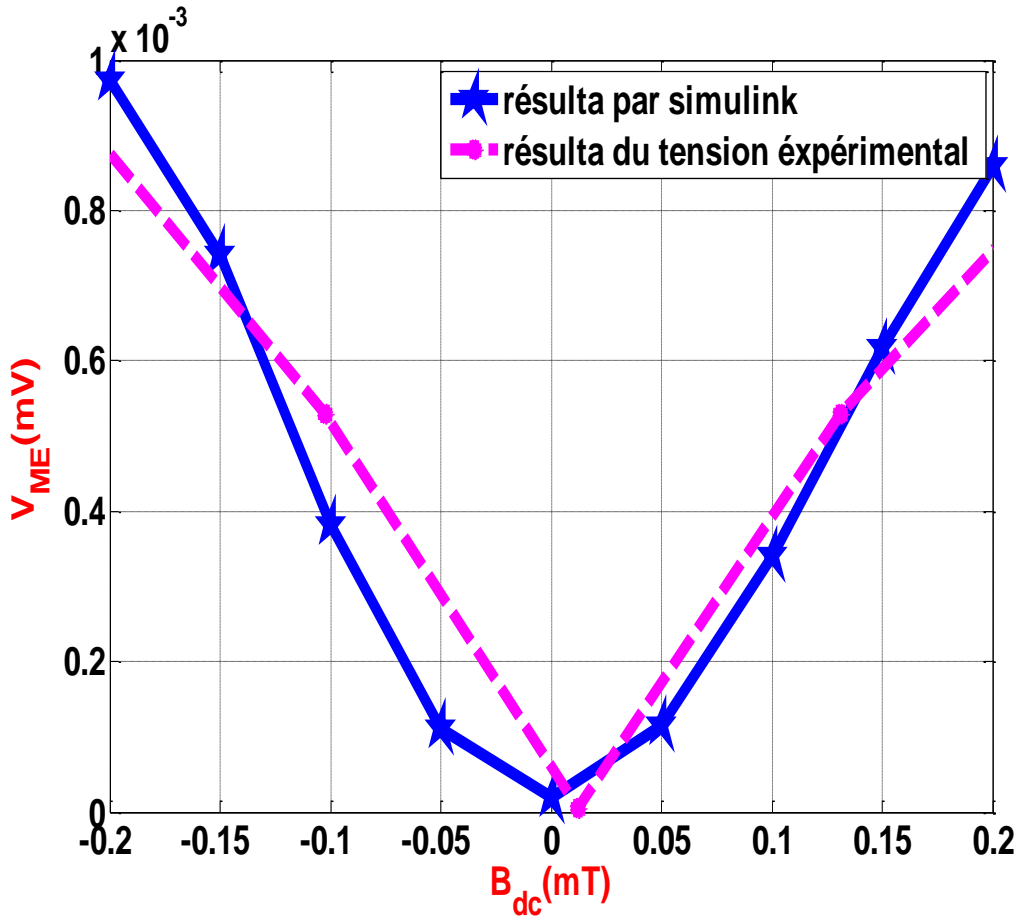


Figure III.17 : La tension V_{ME} en fonction du champ magnétique (B_{dc})

On remarqué que le résultat de simulation est proche du résultat expérimental.

III.13. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons Simulé avec le logiciel MATLB la réponse magnétoélectrique dans les multicouches.

De même, l'influence des paramètres mécanique, électrique et magnétique fut aussi traitée. Ainsi, la variation de la déformation (S) en fonction du champ statique appliqué (à 1 KHz) après avoir utilisé le logiciel MATLAB a donné des résultats satisfaisants.

La comparaison entre les valeurs calculées par simulation du courant IME et de la tension V_{ME} magnétoélectrique en fonction du champ magnétique continu a donné des valeurs assez proches des résultats expérimentaux pour la structure multicouche étudiée.

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce mémoire présente une étude par simulation le phénomène magnétoélectrique dans le multicouches piézomagnétiques PZT/Pu+2%Fe₃O₄

Pour cela nous avons présenté les différentes définitions.

❖ Les matériaux piézoélectriques :

Les matériaux piézoélectriques produisent une tension électrique lorsqu'ils subissent une contrainte mécanique. Soumis à un courant électrique, ils peuvent aussi se déformer mécaniquement.

Dans ce travail nous avons utilisé le PZT189.

❖ La matrice de polyuréthane PU :

Est un polymère d'uréthane, une molécule organique, Le mot polyuréthane fait référence aux macromolécules comportant le motif constitutif de la fonction chimique uréthane.

❖ Les charges de magnétite Fe₃O₄ :

La magnétite, minéral naturel, de formule chimique **Fe₃O₄** est l'un des matériaux magnétiques le plus anciennement connu. La structure spinelle à laquelle elle appartient a été établie pour la première fois par W. H. Bragg [57] et S. Nishikawa [58] par diffraction des rayons X. Ces conclusions ont été largement confirmées par des études de diffraction des neutrons : Shull et al [59] ont montré que **Fe₃O₄** était un spinelle inverse.

❖ Multicouches :

Un matériau multicouche est un empilement constitué de N couches disposées les unes sur les autres afin d'avoir un nouveau matériau présentant des propriétés uniques. Le choix précis des propriétés et de l'épaisseur des couches permet de synthétiser des milieux que nous ne pourrions pas obtenir avec l'une des couches seules dans se travaille on a multicouches PZT/Pu+2%Fe₃O₄ (multicouches construisrai d'une couche piézoélectrique de PZT 189 collé sur une couche magnétostrictive d'un polymère Polyuréthane chargé pour des nano particules de Fe₃O₄).

❖ Simulink :

Est l'extension graphique de MATLAB permettant de représenter les fonctions mathématiques et les systèmes sous forme de diagramme en blocs, et de simuler le fonctionnement de ces systèmes.

On va choisir les paramètres appropriés au modèle du système Matlab après nous avons lancé la simulation

Conclusion générale

❖ Modèle :

Ils existent plusieurs types de modélisation : il y a modélisation macroscopique, microscopique et semimicroscopique.

Dans ce travail nous allons utiliser une modèle semi microscopique construite à base d'un modèle masse-ressort-amortisseur.

La comparaison avec les résultats expérimentale montre que les résultats obtenus des résultats on accorde avec les résultats expérimentaux publiés dans les littératures [101].

La simulation des phénomènes magnétoélectriques dans les multicouches piézo-magnétiques est basé sur un modèle semi-microscopique construite à base d'un modèle masse-ressort-amortisseur.

Références bibliographiques

- [1] Curie, P. Sur la symétrie dans les phénomènes physiques. symétrie d'un champ électrique et d'un champ magnétique. *Journal de Physique*,3:393. (1894).
- [2] Dzyaloshinskii, I. E. On the magneto-electrical effects in antiferromagnets. *Soviet Physics-JETP*, 10:628–629. (1959).
- [3] Présentation de W. Prellier sur les films minces multiferroïques.
- [4] H.Schmid : Materials being simultaneously ferroelectric, ferromagnetic, ferrotoroidic and ferroelastic.
- [5] Thèse de Delphine LEBEUGLE : Etude de la coexistence du magnétisme et de la ferroélectricité dans les composés multiferroïques BiFeO₃ et Bi_{0.45}Dy_{0.55}FeO₃. Multiferro-composit
- [6] Brown, W., Hornreich, R., S. et Shtrikman. Upper bound on the magnetoelectric susceptibility. *Phys. Rev.*, 168(2):574–577. (1968).
- [7] Fiebig, M. Revival of the magnetoelectric effect. *Journal Physics D : Applied Physics*, 38:123–152. (2005).
- [8] Tellegen, B. D. H. The gyrator, a new electric network element. *Philips Research reports*, 3:81–101. (1948).
- [9] Nan, C., Bichurin, M., Dong, S., Viehland, D. et Srinivasan, G. Multiferroic magnetoelectric composites : Historical perspective, status, and future directions. *Applied Physics Reviews : Focused Review*,103(031101). (2008).
- [10] Nan, C. Magnetoelectric effect in composites of piezoelectric and piezomagnetic phases. *Physical Review B*, 50:6082–6088. (1994).
- [11] Suchtelen, J. V. Product properties : a new application of composite materials. *Philips Research Reports*, 27(1):28–37. (1972).
- [12] Srinivasan, G., Rasmussen, E., Gallegos, J., Srinivasan, R., Bokhan, Y. et Laletin, V. Magnetoelectric bilayer and multilayer structures of magnetostrictive and piezoelectric oxides. *Physical Review B*, 64(214408). (2001).
- [13] D. Khomskii, «Classifying multiferroics: Mechanisms and effects», *Physics*, vol. 2, p. 20, 2009.

- [14] W. Eerenstein, N. D. Mathur and J. F. Scott, «Multiferroic and magnetoelectric materials», *Nature*, vol. 442, p. 759, 2006.
- [16] J. Das, M. Li, S. S. Kalarickal, S. Altmannshofer, K. S. Buchanan, J. F. Li and D. Viehland, «Control of magnetic and electric responses with electric and magnetic fields in magnetoelectric heterostructures», *Appl. Phys. Lett.*, vol. 96, p. 222508, 2010.
- [17] J. Zhai, Z. Xing, S. Dong, J. Li and D. Viehland, «Detection of pico-Tesla magnetic fields using magneto-electric sensors at room temperature», *Appl. Phys. Lett.*, vol. 88, p. 062510, 2006.
- [18] C.-W. Nan, G. Liu, Y. Lin and H. Chen, «Magnetic-Field-Induced Electric Polarization in Multiferroic Nanostructures», *Phys. Rev. Lett.*, vol. 94, p. 197203, 2005.
- [19] Y. Zhang, J. Liu, Y. Lin and C.-W. Nan, «Domain structures of BaTiO₃ in epitaxial BaTiO₃/(NiFe₂O₄/BaTiO₃)_m/SrTiO₃ multilayer films», *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 42, p. 135413, 2009.
- [20] A. D. Sheikh and V. L. Mathe, «Effect of the piezomagnetic NiFe₂O₄ phase on the piezoelectric Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})_{0.67}Ti_{0.33}O₃ phase in magnetoelectric composites», *Smart Mater. Struct.*, vol. 18, p. 065014, 2009.
- [21] Y. Chen, T. Fitchorov, Z. Cai, K. S. Ziemer, C. Vittoria and V. G. Harris, «Electric field controlled magnetic hysteresis loops in a Metglas®/PMN–PT heterostructure», *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 43, p. 155001, 2010.
- [22] Y. Chen, T. Fitchorov, C. Vittoria and V. G. Harris, «Electrically controlled magnetization switching in a multiferroic heterostructure», *Appl. Phys. Lett.*, vol. 97, p. 052502, 2010.
- [23] S. K. Mandal, G. Sreenivasulu, V. M. Petrov and G. Srinivasan, «Flexural deformation in a compositionally stepped ferrite and magnetoelectric effects in a composite with piezoelectrics», *Appl. Phys. Lett.*, vol. 96, p. 192502, 2010.
- [24] C.-S. Park, K.-H. Cho, A. M. Arat, J. Evey and S. Priya, «High magnetic field sensitivity in Pb(Zr,Ti)O₃–Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O₃ single crystal/Terfenol-D/Metglas magnetoelectric laminate composites», *J. Appl. Phys.*, vol. 107, p. 094109, 2010.
- [25] H.-C. He, J. Ma, Y. Lin and C. W. Nan, «Influence of relative thickness on multiferroic properties of bilayered Pb(Zr_{0.52}Ti_{0.48})O₃–CoFe₂O₄ thin films», *J. Appl. Phys.*, vol. 104, p. 114114, 2008.
- [26] G. Lawes and G. Srinivasan, «Introduction to magnetoelectric coupling and multiferroic films», *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 44, p. 243001, 2011.

- [27] D. A. Fillippov, V. M. Laletin and G. Srinivasan, «Low Frequency and Resonance Magnetoelectric Effects in Nickel Ferrite–PZT Bulk Composites», *Technical Physics*, vol. 57, pp. 44-47, 2012.
- [28] S. Dong, J. Zhai, Z. Xing, J. Li and D. Viehland, «Giant magnetoelectric effect (under a dc magnetic bias of 2 Oe) in laminate composites of FeBSiC alloy ribbons and $\text{Pb}(\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ –7% PbTiO_3 fibers», *Appl. Phys. Lett.*, vol. 91, p. 022915, 2007.
- [29] Z. Wang, L. Yan, Y. Yang, J.-F. Li, J. Das, A. L. Geiler, A. Yang, Y. Chen, V. G. Harris and D. Viehland, «Magnetoelectric effect in crystallographically textured BaTiO_3 films deposited on ferromagnetic metallic glass foils», *J. Appl. Lett.*, vol. 109, p. 034102, 2011.
- [30] J. G. Wan, J.-M. Liu, G. H. Wang and C. W. Nan, «Electric-field-induced magnetization in $\text{Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3/\text{Terfenol-D}$ composite structure», *Appl. Phys. Lett.*, vol. 88, p. 182502, 2006.
- [31] J. Gao, L. Shen, Y. Wang, D. Grey, J. Li and D. Viehland, «Enhanced sensitivity to direct current magnetic field changes in $\text{Metglas}/\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ – PbTiO_3 laminates», *J. Appl. Lett.*, vol. 109, p. 07457, 2011.
- [32] V. D. Kugel and L. E. Cross, «Behavior of soft piezoelectric ceramics under high sinusoidal electric fields», *J. Appl. Phys.*, vol. 84, p. 2815, 1998.
- [33] F. Xu, S. Trolier-McKinstry, W. Ren, B. Xu, Z.-L. Xie and K. J. Hemker, «Domain wall motion and its contribution to the dielectric and piezoelectric properties of lead zirconate titanate films», *J. Appl. Phys.*, vol. 89, p. 1336, 2001.
- [34] F. Wang, L. Luo, Z. Dan, X. Zhao and H. Luo, «Complete set of elastic, dielectric, and piezoelectric constants of orthorhombic $0.71\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ – 0.29PbTiO_3 single crystal», *Appl. Phys. Lett.*, vol. 90, p. 212903, 2007.
- [35] E. Sun, S. Zhang, J. Luo, T. R. Shrout and W. Cao, «Elastic, dielectric, and piezoelectric constants of $\text{Pb}(\text{In}_{1/2}\text{Nb}_{1/2})\text{O}_3$ – $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ – PbTiO_3 single crystal poled along [011]c», *Appl. Phys. Lett.*, vol. 97, p. 032902, 2010.
- [36] <http://en.wikipedia.org/wiki/Piezoelectricity>
- [37] C.-S. Park, C.-W. Ahn, J. Ryu, W.-H. Yoon, D.-s. Park, H.-E. Kim and S. Priya, «Design and characterization of broadband magnetoelectric sensor», *J. Appl. Phys.*, vol. 105, p. 094111, 2009.
- [38] C. Deng, Y. Zhang, J. Ma, Y. Lin and C.-W. Nan, «Magnetic-electric properties of epitaxial multiferroic NiFe_2O_4 – BaTiO_3 heterostructure», *J. Appl. Phys.*, vol. 102, p. 074114, 2007.

- [39] K. H. Lam, C. Y. Lo, J. Y. Dai, H. L. W. Chan and H. S. Luo, «Enhanced magnetoelectric effect in a stress-biased lead magnesium niobate-lead titanate single crystal/Terfenol-D alloy magnetoelectric sensor», J. Appl. Phys. , vol. 109, p. 024505, 2011.
- [40] S. Dong, J. Zhai, F. Bai, J.-F. Li and D. Viehland, «Push-pull mode magnetostrictive/piezoelectric laminate composite with an enhanced magnetoelectric voltage coefficient», vol. 87, p. 062502, 2005.
- [41] C. Nan, M. I. Bichurin, S. Dong, D. Viehland and G. Srinivasan, «Multiferroic magnetoelectric composites Historical perspective, status, and future directions», J. Appl. Phys., vol. 103, p. 031101, 2008.
- [42] M. Fiebig, «Revival of the magnetoelectric effect», J. Phys. D: Appl. Phys., vol. 38, pp. R123-R152, 2005.
- [43] Röntgen W.C. "Ueber die durch Bewegung eines im homogenen elektrischen Felde befindlichen Dielectricums hergerufene electrodynamische Kraft." Ann. Phys. 35: 264-270. (1888).
- [44] Wilson A.H. "On the electric effect rotating a dielectric in a magnetic field" Phil. Trans. R. Soc. A 204: 121-137. (1905).
- [45] Curie P. "Sur la symétrie dans les phénomènes physiques, symétrie d'un champ électrique et d'un champ magnétique" J. Phys. Theor. Appl. 3: 393-415. (1894).
- [46] Astrov N.D. "The magnetoelectric effect in antiferromagnetics" Sov. Phys. JETP 11: 708. (1960).
- [47] Rado G.T., and Folen V.J. "Observation of the magnetically induced magnetoelectric effect and evidence for antiferromagnetic domains" Phys. Rev. Lett. 7: 310-311. (1961) .[48] Tokura Yoshinori "Multiferroics as Quantum Electromagnets" Science 312:1481-1482. (2006).
- [49] Wang K.F., Liu J.-M. and Y. Wang. Chin. Sci. Bull. 53 (2008): 1098.
- [50] Spaldin A. Nicola, and Fiebig Manfred "The Renaissance of Magnetoelectric Multiferroics" Science 309: 391-392. (2005).
- [51] Khomskii D.I. "Multiferroics: Different ways to combine magnetism and ferroelectricity" J. Magn. Magn. Mater. 306: 1-8. (2006).
- [52] Eerenstein W., Mathur N.D. and Scott J.F. "Multiferroic and magnetoelectric materials" Nature 442: 759-765. (2006).
- [53] Cheong Sang-Wook and Mostovoy Maxim "Multiferroics: a magnetic twist for ferroelectricity" Nature Mater. 6: 13-20. (2007).
- [54] Ramesh R., Spaldin A. Nicola "Multiferroics: progress and prospects in thin films" Nature Mater. 6: 21-29. (2007).

- [55] Fiebig Manfred "Revival of the magnetoelectric effect" J. Phys. D: Appl. Phys. 38: R123. (2005)
- [56] Teague R. James, Gerson Robert and James W.J. "Dielectric hysteresis in single crystal BiFeO₃" Solid State Communications 8: 1073-1074. (1970).
- [57] Wang J., Neaton J.B., Zheng H., Nagarajan V., Ogale S.B., Liu B., Viehland D., Vaithyanathan V., Schlom D.G., Waghmare U.V., Spaldin N.A., Rabe K.M., Wuttig M. and Ramesh R. "Epitaxial BiFeO₃ Multiferroic Thin Film Heterostructures" Science 299: 1719-1722. (2003).
- [58] Van Suchtelen J. "Product properties: a new application of composite materials" Philips Res. Rep. 27:28 (1972).
- [59] L'institut National Polytechnique de Toulouse, Abdoulaye SEYNI Le 11 décembre 2008.
- [60] L. Chen, C. Ong, C. Neo, V. Varadan, and V. Varadan, "Microwave electronics: measurement and material characterization, ," ed: John Wiley & Sons England. 2004.
- [61] X. H. Wu, A. A. Kishk, and A. W. Glisson, "A transmission line method to compute the far-field radiation of arbitrarily directed Hertzian dipoles in a multilayer dielectric structure: theory and applications," Antennas and Propagation, IEEE Transactions on, vol. 54, pp. 2731-2741, 2006.
- [62] J. Crisostomo, W. Costa, and A. Giarola, "Electromagnetic wave propagation in multilayer dielectric periodic structures," Antennas and Propagation, IEEE Transactions on, vol. 41, pp. 1432-1438, 1993.
- [63] W. Tinga, "Mixture laws and microwave-material interactions," Dielectric properties of heterogeneous materials. Progress in Electromagnetics Research, pp. 1-34, 1992. app
- [64] Dong S. X., Zhai J., Li J.-F. and Viehland D. "Small dc magnetic field response of magnetoelectric laminate composite" Appl. Phys. Lett. 88 :082907. (2006).
- [65] Zhai Junyi, Xing Zengping, Dong Shuxiang, Li Jiefang and Viehland D. "Detection of pico-Tesla magnetic fields using magneto-electric sensors at room temperature" Appl. Phys. Lett. 88 : 062510. (2006).
- [66] Israel Casey, Kar-Narayan Sohini and Mathur D. Neil "Eliminating the Temperature Dependence of the Response of Magnetoelectric Magnetic-Field Sensors" IEEE Sens. J. 10 ;914-917. (2010).
- [67] Dong S. X., Li J. F. and Viehland D. "Voltage gain effect in ring-type magnetoelectric composite" Appl. Phys. Lett. 84 :4188. (2004).
- [68] Dong S. X., Li J. F. and Viehland D. "A strong magnetoelectric voltage gain effect in magnetostrictive-piezoelectric composite" Appl. Phys. Lett. 85 :3534. memoir(2004).

- [69] Novosad V., Otani Y., Ohsawa A., Kim S. G., Fukamichi K., Koike J. and Maruyama K. “Novel magnetostrictive memory device” J. Appl. Phys. 87: 6400. (2000).
- [70] Scott J. F. “Multiferroics might hold the future for the ultimate memory device. The demonstration of a four-state resistive memory element in a tunnel junction with multiferroic barriers represents a major step in this direction” Nature Mater. 6: 256-257. (2007).
- [71] Bibes Manuel and Barthélémy Agnès “Towards a magnetoelectric memory” Nature Mater. 7: 425-426. (2008).
- [72] D’Souza Noel, Atulasimha Jayasimha and Bandyopadhyay Supriyo “Four-state nanomagnetic logic using multiferroics” J. Phys. D: Appl. Phys. 44: 265001. (2011).
- [73] Tehrani S., Slaughter J.M., Chen E., Durlam M., Shi J. and DeHerrera M. “Progress and Outlook for MRAM Technology” IEEE Trans. Magn. 35: 2814-2819. (1999).
- [74] Huai Yiming “Spin-Transfer Torque MRAM (STT-MRAM): Challenges and Prospects” AAPS Bulletin 18: 33-40. (2008).
- [75] Katine J.A. and Fullerton E. Eric “Device implications of spin-transfer torques” J. Magn. Mater. 320 : 1217-1226.(2008).
- [76] Binek Ch. and Doudin B. “Magnetoelectronics with magnetoelectrics” J. Phys.: Condens. Matter 17 : L39–L44.(2005).
- [77] Hu Jia-Mian, Li Zheng, Wang Jing and Nan C.-W. “Electric-field control of strainmediated magnetoelectric random access memory” J. Appl. Phys. 107 : 093912.(2010).
- [78] Zhang Yi, Liu Jing, Xiao X.H., Peng T.C., Jiang C.Z., Lin Y.H. and Nan C.-W. “Large reversible electric-voltage manipulation of magnetism in NiFe/BaTiO₃ heterostructures at room temperature” J. Phys. D: Appl. Phys. 43 : 082002.(2010).
- [79] Tiercelin Nicolas, Dusch Yannick, Preobrazhensky Vladimir and Pernod Philippe “Magnetoelectric memory using orthogonal magnetization states and magnetoelastic switching” Appl. Phys. Lett. 109 : 07D726.(2011).
- [80] Wu Tao, Bur Alexandre, Wong Kin, Zhao Ping, Lynch S. Christopher, Amiri Khalili Pedram, Wang L. Kang and Carman P. Gregory “Electrical control of reversible and permanent magnetization reorientation for magnetoelectric memory devices” Appl. Phys. Lett. 98 : 262504.(2011).
- [81] Shad Roundy “On the Effectiveness of Vibration-based Energy Harvesting” J. Intell. Mater. Syst. Struct. 16 : 809-823.(2005).
- [82] Dai Xianzhi, Wena Yumei, Li Ping, Yang Jin and Zhanga Gaoyong “Modeling, characterization and fabrication of vibration energy harvester using Terfenol-D/PZT/Terfenol-D composite transducer” Sens. Actuators A 156 : 350-358.(2009).

- [83] Smart Material MFC technical data sheet, <http://www.smart-material.com>.(2010).
- [84] Zhang Q.Q., Gross S.J., Tadigadapa S., Jackson T.N., Djuth F.T., Trolier-McKinstry S. “Lead zirconate titanate films for d33 mode cantilever actuators” *Sens. Actuators A* 105 : 91–97.(2003).
- [85] Y. Meyer, Contrôle actif de micro-composants électroniques, Thèse de doctorat, Université de Franche- Comté, Besançon-France, 2005.
- [86] S.S. Kessler, Piezoelectric-Based In-Situ Damage Detection of Composite Materials for Structural Health Monitoring Systems, Thèse de doctorat, Aeronautics and Astronautics Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts-États-Unis, 2002.
- [87] H. Matt, Structural Diagnostics of CFRP Composite Aircraft Components by Ultrasonic Guided Waves and Built-In Piezoelectric Transducers, Thèse de doctorat, University of California, San Diego, États-Unis.
- [88] E.-Gu Lee, J.-K. Lee, W.-Y. Jang, J.-G. Lee, Ji-Y. Kim, Domain switching characteristics of preferentially oriented lead zirconate titanate thin films. *Journal of Materials Science Letters*, 2000; 19 (21): 1917-1919.
- [89] H.-B. Park, C.-Y. Park, Y.-S. Hong, K. Kim, S.-J. Kim, Structural and dielectric properties of PLZT ceramics modified with lanthanide ions. *Journal of the American Ceramic Society*; 82 (1): 94–102.1999.
- [90] S. Egusa, N. Iwasawa, Piezoelectric paints as one approach to smart structural materials with health-monitoring capabilities, *Smart Materials and Structures*; 7 (4): 438–45.1998.
- [91] B.L. Wang, J.C. Han and S.Y. Du, Electroelastic fracture dynamics for multilayered piezoelectric materials under dynamic anti-plane shearing. *International Journal of Solids and Structures*; 37 (38): 5219–31.2000.
- [92] S. S. Livneh, V. F. Janas, A. Safari, Development of fine scale PZT ceramic fiber/polymer shell composite transducers. *Journal of the American Ceramic Society*; 78 (7): 1900–06.1995.
- [93] H.N. Bar, M.R. Bhat, C.R.L. Murthy, Identification of failure modes in GFRP using PVDF sensors: ANN approach. *Composite Structures*, 65: 231–37.2004.
- [94] E. Moulin, J. Assaad, C. Delebarre, Piezoelectric transducer embedded in composite plate: Application to Lamb wave generation. *Journal of Applied Physics*, 82 (5): 2049 55.
- [95] T. Monnier, Y. Jayet, P. Guy, J.C. Baboux, The piezoelectric implant method: implementation and practical applications. *Smart Materials and Structures*, 2000; 9:267–72.1997.
- [96] M. Lam, Formalisme d’octet appliqué à la propagation d’ondes dans des milieux piézoélectriques inhomogènes, Université de Tours, France, 2008.

- [97] www.wikipedia.org/wiki/piezoelectricity
- [98] N.Sabri , Etude du phénomène de polarisation rotatoire: Effet Faraday. Thèse de magister Tlemcen.2001.
- [99] W. H. Bragg, Nature 95, 561, 1915 ; Phil. Mag. 30, 305-315, 1915
- [100] S. Nishikawa, Proc. Tokio Math. Phys. Soc. 8, 199-209, 1915
- [101] C. G. Shull et J. S. Smart, Phys. Rev. 76, 1256-1257, 1949
- [102] C. G. Shull, E. O. Wollan et W. C. Koehler, Phys. Rev. 84, 912-921, 1951
- [103] Kruckenber, Ark. Mat. Ast. Fys. 2, 5, 1905-1906
- [104] Weiss, Piccard et Callard, Arch. Sc. Phys. Nat.43, 117,1917
- [105] R. Pauthenet, C. R. Acad. Sc. 230, 1842, 1950
- [106] Kopp, Thèse , Université de Zurich, 1919
- [107] Weiss et Forrer, Ann. Phys. 10, 12, 279, 1929
- [108] L. Neel, Ann. de Phys. 3, 137-138, 1948
- [109] Hoang Le-Huy, Introduction à MATLAB et Simulink, Université Laval Québec, CANADA, Septembre 1998
- [110] Minh-Quyen LE, Mémoire Master en génie électrique, L'étude du couplage magnétoélectrique dans les polymères chargés, 2008

ملخص:

في هذه المذكرة قمنا بمحاكاة ظاهرة مغناطوكهربائية بمساعدة برمجية Simulink التي يؤدي تأثيرها إلى إمكانية إحداث مغنطة عند تطبيق مجال كهربائي (تأثير مباشر) أو تحفيز استقطاب كهربائي عند تطبيق مجال مغناطيسي (تأثير غير مباشر) اخترنا في هذا العمل نمذجة الظاهرة بجمع طبقتين الأولى مغناطومرونية المفعول المتكونة من مركب من البوليمار (البولييريتان) مع أكسيد الحديد الثلاثي Fe_3O_4 نظرا لخصائصهما المتميزة و الطبقة الثانية عبارة عن طبقة كهروإجهادية. إن الطبقة المغناطومرونية عند تأثرها بالحقل المغناطيسي (عند تطبيق مجال مغناطيسي علي الطبقة المغناطومرونية) يحدث لها تشوه تؤثر به على الطبقة الكهروإجهادية التي تستقطب و تنتج مجال كهربائي (V) أو تغير في الاستقطاب (I) . مقارنة النتائج التجريبية بنظيرتها المتحصل عليها يظهر تطابق في النتائج.

Résumé :

Dans ce mémoire, nous avons simulé phénomène magnétoélectrique l'aide de logiciel SIMULINK qui conduit donne la possibilité de calculer l'aimantation lors de l'application d'un champ électrique (effet direct) ou polarisation électrique lors de l'application d'un champ magnétique (effet indirect). Le matériau choisi est un multicouche réaliser parle collage de deux couches, la première est magnétoélastive (composite : polyuréthane+x% Fe_3O_4) la seconde couche est une couche piézoélectrique (PZT).

La couche magnétoélastique génère une contrainte appliquée sur la couche piézoélectrique lors l'application d'un champ magnétique.se qui induit un champ électrique (V) ou un changement de polarisation (I).

Les résultats calculés par le modèle via Simulink est proches aux résultats expérimentales

Abstract:

In this work we simulated Magnatoelectric phenomenon with Simulink software that leads its impact on the possibility of causing magnetization when applying an electric field (direct effect) or stimulating polarization electric during the application of a magnetic field (indirect effect). The sample consist of two layers; the first layer is a Magnatoelastic (polyurethaneloaded by Fe_3O_4) hever the second layer is piezoelectric (PZT)

The layer manetoeleastic applied a stess to the piezozlectric layer haw produce an electric field (V) or a change of polarization (I).

Compared to the experimental results we obtained a good result.