



Université ABBES LAGHROUR Khenchela
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Industriel
جامعة عباس لغرور خنشلة
كلية العلوم والتكنولوجيا
قسم الهندسة الصناعية



N° Série :.....

Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Commande Electrique

Présenté par

RAHALI OUSSAMA

DRAHEM LAKHDAR

THEME

MODELESATION ET COMMANDE D'UN MOTEUR PIEZO-ELECTRIQUE

Soutenu le 29/06/2019 devant la commission d'examen composée de :

Mr. LABDANI RAFIK	MAA à l'Université de Khenchela	Président
Mr. BEDDIAF YASSINE	MCB à l'Université de Khenchela	Encadreur
Mr.SAIDI ABDELKADER	MAA à l'Université de Khenchela	Examineur

Promotion 2018/2019

Tables Des Matières

Remerciement

Je remercie en premier lieu Dieu qui m'a donné ce bien là et pour que je vie ce jour et la force et la patience pour terminer ce travail. Je tiens à exprimer mes remerciements à mon encadreur Dr. BEDDIAF YASSINE qui a proposé et a dirigé ce travail.

Je remercie le président de jury, ainsi que les membres de jury d'avoir accepté de juger ce travail.

Je tiens à remercier les responsables et tout le personnel de département de Génie industriel de l'université de kenchela pour les facilités qu'ils m'ont accordés pour terminer ce travail.

Le travail de mémoire que j'ai effectué doit beaucoup à certaines personnes que je tiens à les remercier sincèrement.

Enfin, je remercie tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à ma formation et à l'élaboration de ce modeste mémoire.

Table des matières

Introduction générale.....	1
Chapitre Un: présentation des moteurs piézo électriques.....	5
1.1 Introduction.....	5
1.2 Historique de la piézo-électriques	5
1.3 Caractéristiques.....	6
1.3.1 Avantages.....	6
1.3.2 Inconvénients	6
1.4 Moteur Piézo-électrique Rotatif A Onde Progressive.....	6
1.4.1. Hypothèses du modèle de conversion d'énergie à l'interface stator/rotor	6
1.4.2 Organe d'entraînement	7
1.4.3 Organe entraîné	8
1.5 Actionneurs Piézoélectriques A Onde Progressive	9
1.5.1 Principe du moteur piézoélectrique à onde progressive annulaire	9
1.5.2 Principe du moteur piézoélectrique linéaire	10
1.5.3 Principe du moteur à rotation de mode	11
1.6 Classification des moteurs piézoélectriques.....	12
1.6.1 Moteurs à un seul mode de vibration	12
1.7 Moteurs Piézoélectriques A Onde Progressive.....	13
1.7.1 Moteurs piézoélectriques à onde progressive périphérique.....	13
1.7.2 Moteurs à double stator	14
1.7.3 Les micromoteurs à onde progressive	14
1.7.4 Moteurs à deux modes de vibration	14
1.7.4.1 Moteurs piézoélectriques à conversion de mode.....	14
1.7.4.2 Moteurs piézoélectriques hybrides.....	15
Chapitre Deux: Piézo- électricité et les différents actionneurs de positionnement	17
2.1 Historiques.....	17
2-2 Piézoélectricité	18
2.2.1 Matériaux piézoélectriques.....	19
2.2.2 Caractéristique piézoélectrique	21
2-2-2-1 Constantes piézoélectrique de charge dij	22
2-2-2-2 Constantes piézoélectrique de tension gij.....	23

2-2-2-3 Coefficients de couplage k	23
2-2-2-4 Relation entre les Coefficients d_{ij} et g_{ij}	24
2-2-3 Schéma équivalent de piézoélectrique.....	24
2-2-3-1 Schéma électrique.....	24
2-3 Différents types de nano positionnement piézoélectrique	28
1-3-1 Les actionneurs à tubes piézoélectriques.....	28
2-3-2 Les actionneurs à empilement piézoélectrique.....	29
2-3-3 Les actionneurs à effet de levier	31
2-3-4 Les actionneurs piézoélectriques de flexion.....	31
2-3-4-1 Les actionneurs de flexion série.....	32
2-3-4-2 Les actionneurs de flexion parallèle.....	32
2-4 Conclusion.....	33
Chapitre Trois: modélisation et commande du moteur piézoélectrique.....	34
3- 1 Introduction.....	34
3-2 Description des frottements.....	34
3-2-1 Modélisation des frottements.....	36
3-2-2 Description du Modèle de LuGre.....	37
3-3 Introduction sur le mécanisme de positionnement piézoélectrique	39
3-4 Modélisation du MPE.....	40
3-5 Commande De L'MPE.....	42
3-5-1 Introduction.....	42
3-5-2 Schéma de simulation.....	45
3-5-3 Résultats de simulation.....	45
3-5-4 : Interprétation des résultats.....	53
3-6 Conclusion.....	54
Conclusion Générale.....	56

Liste Des Figures

The title 'Liste Des Figures' is rendered in a large, bold, sans-serif font. Each letter is filled with a different color from a rainbow spectrum, starting with purple for 'L', transitioning through red, orange, yellow, green, and ending with blue and purple for 's'. The text is positioned on a white background and casts a soft, grey, semi-transparent shadow to its left and slightly forward, giving it a three-dimensional appearance.

Liste Des Figures

Figure - 1.1 Déformation mécanique due à la tension électrique appliquée sur la partie vibrante	7
Figure -1.2 Le stator du moteur SHINSEI USR60.....	8
Figure - 1.3- Rotor du moteur SHINSEI USR60.....	8
Figure -1.4 – Vue éclatée du moteur SHINSEI USR60.....	9
Figure -1.5-Vue éclatée du moteur SHINSEI USR60.....	10
Figure – 1.6 Prototype d’un moteur piézoélectrique linéaire.....	11
Figure – 1.7 Prototype d’un moteur piézoélectrique linéaire utilisant des oscillateurs de Langevin].....	11
Figure – 1.8 Principe de fonctionnement d’un moteur à rotation de mode.....	12
Figure- 1.9 : Moteur piézoélectrique à onde stationnaire : principe de l’entraînement.....	13
Figure. 1.10 – Architecture en "sandwich" pour améliorer les performances mécaniques.	14
Figure 1.11 – Le moteur avec coupleur de Kumada.....	15
Figure 1.12 – exemple d’un moteur piézo-électrique hybride	16
Figure 1.13 – Surface de contact pour différents rapports entre les amplitudes des modes de vibration	16
Figure 2.1 Effet Piézoélectrique.....	18
Figure 2-2 Présentation d'une structure cristalline de quartz.....	19
Figure. 2-3 Polarisation d’un échantillon de piézocéramique.....	21
Figure 2-4 Directions associées aux vectrices déformations et contrainte.....	22
Figure 2-5 Schéma électrique équivalent de piézoélectrique.....	25
Figure 2-6 Système mécanique équivalent.....	27
Figure 2-7.actionneur a tube piézoélectrique.....	29
Figure. 2-8 Les actionneurs à empilement piézoélectrique.....	30
Figure.2-9 Les actionneurs à effet de levier.....	31
Figure 2-10 (a) Les actionneurs de flexion connexion en série.....	32
Figure 2-10 (b) Les actionneurs de flexion connexion en parallèle.....	33
Figure 3-1 Contacts entre deux solides.....	34
Figure 3-2 Effets de lubrification sur le déplacement de deux solides.....	35
Figure 3-3 Différents phénomènes de frottements en fonction de la vitesse.....	35

Figure 3-4 Modèles de frottements statiques.....	36
Figure 3-5 Modèle de ressort des aspérités.....	37
Figure 3-6 Vue microscopique du frottement entre deux surfaces en contact.....	38
Figure 3-7 Bloc fonctionnel de modèle sans pré filtre.....	40
Figure 3.8 Caractéristique de l'effet d'hystérésis avec $f= 0.5$ Hz	41
Figure 3-9 Caractéristique de l'effet d'hystérésis avec $f= 1$ Hz.....	41
Figure 3-10 Résultat de simulation de la position pour $f=0.5$ Hz.....	41
Figure 3-11 résultats de la simulation de la position pour $f =1$ Hz.....	42
Figure 3.12 résultat de simulation de.....	42
Figure-3-13 Schéma de bloc d'un régulateur PI.....	43
Figure 3-14 Schéma fonctionnel de la régulation de déplacement.....	44
Figure.-3.15 Résultats de simulation de la réponse en poursuite.....	45
Figure.-3.16 Erreur en poursuite de la réponse par rapport à la référence.....	46
Figure.-3.17 Erreur en poursuite de la réponse par rapport à la référence(zoom).....	46
Figure.-3.18 Tension d'alimentation.....	47
Figure.-3.19 Tension d'alimentation (zoom).....	47
Figure.-3.20 Résultats de simulation de la réponse en poursuite.....	47
Figure -3.21 Erreur en poursuite de la réponse par rapport al la référence.....	48
Figure.-3.22 Erreur en poursuite de la réponse par rapport à la référence(zoom).....	48
Figure.-3.23 Tension d'alimentation.....	48
Figure.-3.24 Tension d'alimentation (zoom).....	49
Figure.-3.25 Résultats de simulation de la réponse en poursuite.....	49
Figure.-3.26 Erreur en poursuite de la réponse par rapport à la référence.....	50
Figure.-3.27 Erreur en poursuite de la réponse par rapport à la référence (zoom).....	50
Figure.-3.28 Tension d'alimentation.....	50
Figure.-3.29 Tension d'alimentation (zoom).....	51
Figure.-3.30 Résultats de simulation de la réponse en poursuite.....	51
Figure.-3.31 Résultats de simulation de la réponse en poursuite.....	52
Figure 3-32 Erreur en poursuite de la réponse par rapport à la référence (zoom).....	52
Figure 3-33 Tension d'alimentation.....	53
Figure 3-34 Tension d'alimentation (zoom).....	54

Liste des symboles

The title 'Liste des symboles' is rendered in a large, bold, sans-serif font. Each letter is filled with a different color from a rainbow spectrum, starting with purple for 'L', transitioning through red, orange, yellow, green, and blue to purple for 's'. The text is set against a white background and casts a soft, grey, semi-transparent shadow to its left and slightly forward, giving it a three-dimensional appearance.

PZT: Ziconates-titanates de plomb

D_1 : Déplacement diélectrique

G_1 : Energie libre.

S : Déformation mécanique.

T : Contrainte

P : Polarisation

ε : Erreur

ε_0 : Permetivité du vide

ε_r : Permetivité relative

d_{ij} : Coefficients de déformation [m/V] ou coefficients de sortie de charge [C/N]

g_{ij} : Coefficients de tension ou coefficients de sortie de champ [Vm/N].

k : Coefficients de couplage électromécaniques.

K_{33} : Pour la vibration des pièces épaisses suivant la direction de la polarisation.

k_{31} : Pour la vibration transversale(perpendiculaire à la polarisation).

k_p : Pour la vibration radiale d'un disque mince.

k :Pour la vibration des pièces minces suivant la direction de la polarisation.

C_0 : Capacité équivalente du piézoélectrique.

R : Pertes mécaniques dans le matériau.

L : Self est proportionnelle à la masse de la céramique.

C : capacité proportionnelle à la constante élastique (à l'inverse de la raideur du matériau).

Y : admittance globale.

Q : coefficient de surtension de la branche mentionnelle.

f_r : fréquence de résonance.

f_a : fréquence antirésonance.

W_r : pulsation correspondant à la fréquence (f_r) .

x_p : déformation engendrée par le champ électrique.

k : raideur du piézoélectrique.

c : amortissement du piézoélectrique.

ΔL : élongation.

L : La longueur.

e : Epaisseur.

n : Nombre de couches.

r : Coefficient du pied de levier.

V : différence de potentiel.

t_{\min} : Le temps de réponse minimum.

d_{31} : Constantes de charge.

d_{33} : Constantes de charge

v : Vitesse relative de déplacement des solides.

F_c : Force de Colomb.

F_s : Force statique.

v_s : Vitesse de Stribeck.

σ_0 : Rigidité des lames.

σ_1 : Coefficient d'amortissement.

σ_2 Coefficient de viscosité.

k_e : Coefficient de tension à la force de mécanisme de positionnement piézoélectrique (MPE).

F_H : Force d'hystérésis de friction.

U : Tension appliquée au mécanisme de positionnement.

F_L : Charge de perturbation.

D : Coefficient linéaire de friction.

E : Incertitude.

M : Masse équivalente du mécanisme de positionnement piézoélectrique actuateur (APE).

x : Déplacement.

k_p : Constante proportionnelle.

k_i : Constante intégrale.

e : erreur de poursuite.

Les actionneurs piézo-électriques sont très considérés grâce à leurs capacités d'effectuer des déplacements très faibles et de grande précision. On peut citer quelques exemples d'applications Utilisés dans le nano positionnement comme [4]:

a) SPM (Microscopies à sonde locale)

Les microscopies à sonde locale (Scanning probe microscopy SPM) ont connu un développement considérable depuis une dizaine d'année. L'invention en 1982 (Binnig 1982- Prix Nobel en 1986) du microscopie à effet tunnel (STM), suivie par celle de la microscopie à force atomique (1986) AFM.[1]-[2]. Le succès des deux inventions est étroitement lié aux formidables progrès réalisés en électronique, permettant notamment le balayage à des distances très proches de la surface de l'ordre du nanomètre; mais aussi la détection et la régulation de courant électrique d'intensité aussi faible que le nano-ampère. Le mouvement de la pointe est contrôlé par un actionneur piézoélectrique de type tube à empilement qui permet d'ajuster la position de l'échantillon par rapport à la pointe en boucle de contre-réaction [4]. L'obtention d'image topographie de la surface peut se faire en maintenant la force d'interaction pointe-échantillon constante au cours du balayage, [5]. Des images de la topographie d'une surface peuvent être obtenues selon trois modes de fonctionnement. Le mode tapping ou contact intermittent est le mode le plus employé.

Il existe plusieurs nouvelles variantes de SPM permettant la mesure des produits chimiques, mécaniques (frottements), électriques et les propriétés magnétiques d'une surface [3],[4],[6]. Actuellement les SPM souffrent d'atteindre le nano positionnement de la sonde avec une bande passante élevée, [7], [8].

b) Les servo- systèmes à deux étages pour les disques durs L'augmentation continue de la densité des pistes à haut débit lors de l'accès aux données dans les disques durs (HDD), exige que la position de la tête soit maintenue le long du centre de la piste et se déplaçant rapidement d'une piste à une autre. Cependant, seulement le traditionnel moteur à bobine mobile (VCM) est utilisé comme un seul étage d'asservissement; il est difficile de fournir des performances élevées en raison des modes de résonances mécaniques, des perturbations diverses, et le bruit du disque dur. L'utilisation d'une structure à deux étages est proposée comme une solution qui permet à la fois d'augmenter la bande passante d'asservissement et la précision [6],[8]-[9].

c) Les actionneurs et les capteurs piézoélectriques

Le problème important qui se pose dans la désignation des contrôleurs pour le nano positionnement est la disponibilité et le choix des capteurs et des actionneurs. Parmi les capteurs et actionneurs utilisés dans le nano positionnement, on peut citer:

c-1- Les actionneurs piézoélectriques:

Les actionneurs piézoélectriques sont omniprésents dans des applications telles que nano positionnement SPM et micromoteurs,[10],[11]. Ils ont une bande passante de fonctionnement et peuvent générer d'excellentes grandes forces mécaniques dans une désignation compact et pour des petites quantités d'énergie; cependant, ils ont un déplacement relativement faible. Les paramètres principaux de conception qui caractérisent la performance d'un actionneur sont la plage de déplacement, la force, la bande passante (gamme de fréquence), la taille, le poids et la consommation d'énergie.

c-2- Les capteurs piézoélectriques :

La vitesse et la précision du positionnement absolu des divers systèmes de nano positionnement dépendent crucialement de la position de mécanisme de capteur. D'autre part, la génération des informations de la position à l'échelle nanométrique est elle même un défi, en particulier dans la large bande passante et la grande plage dynamique nécessaire pour atteindre un débit raisonnable en matière de nanotechnologie, y compris la lithographie et des données de stockage. Il existe différents types de capteurs [12], comme par exemple les capteurs inductifs [13], les piézorésistif [14], les capteurs capacitifs [17] et les mesures optiques [4],[15],[16]. Ils sont adoptés pour des applications de nano positionnement et des dispositifs optiques à mémoire, l'alignement des fibres optiques, les tests de composants microélectroniques, les micromachines ([18], [20], [24], [25]), la commande de forme d'antennes et les tests biomédicaux.

Les actionneurs piézo-électriques offrent une résolution de l'ordre de nanomètre, une rigidité élevée et une réponse rapide. Cependant, ils souffrent de l'hystérésis ([19], [20], [21], [22]), puisque la forme et l'amplitude de la courbe de la tension en fonction du déplacement sont affectées par la tension contrôlant la fréquence. Celle-ci augmente en même temps que la fréquence. Ceci est dû à une combinaison d'hystérésis, de frottements visqueux et de forces dynamiques provoquées par l'accélération de la masse du moteur piézo-électrique (MPE) lui même.

Les frottements visqueux et les autres effets dynamiques deviennent plus prononcés mesure que la fréquence de la tension qui alimente le moteur augmente. L'effet cumulatif de ces divers facteurs mène à une relation de la tension versus le déplacement dominée par la caractéristique de l'hystérésis ([31], [20], [22]). Celle-ci rend la commande en boucle ouverte inefficace et peut produire des déphasages harmoniques qui affectent même la commande en boucle fermée ([21]-[22], [23]). De plus, les commandes souffrent de leurs limitations et de leurs incapacités à résoudre les problèmes associés à la nature du fonctionnement transitoire de ce moteur. Les problèmes importants sont l'influence de la température, la limitation de la bande passante des vibrations ainsi que d'autres non-linéarités prononcées. Celles-ci causent

d'importantes erreurs de positionnement surtout par la technique de commande classique. Il faut donc faire appel aux techniques de commande avancées (les commandes adaptatives et les commandes robustes) afin de corriger les variations paramétriques et les perturbations tout en réalisant des déplacements de l'ordre de quelques micromètres.

D'autre part, la conception des contrôleurs permet l'optimisation des procédés performants.

A partir de 1980, les champs de recherche sont axés sur certaines commandes linéaires orientées

vers le problème de la robustesse. Plusieurs algorithmes de commande ont démontré théoriquement leurs efficacités et parfois même en pratique. Mais quelques incertitudes peuvent causer de sérieuses pertes de performances ou même d'instabilité. La théorie de commande non linéaire a remplacé la commande linéaire. On prévoit que la commande reste complexe à cause de la nature fortement non-linéaire du modèle du moteur MPE. En effet, les paramètres de moteur varient rapidement dans le temps à cause de la variation de la température et les changements des conditions de fonctionnement du moteur (la fréquence d'entraînement, la source de tension, et la charge). Il faut tout de même souligner qu'à la lumière des recherches effectuées ([21], [22], [23]), la commande robuste ou adaptative reste la plus appropriée pour commander le MPE. D'ailleurs, en concevant un contrôleur adaptatif basé sur le modèle du MPE, l'influence des incertitudes sera minimale ou nulle ce qui va faciliter l'implantation pratique. Une autre alternative à la commande adaptative est l'emploi d'un contrôleur robuste. Il faut croire que la considération d'une stratégie de commande robuste et non-linéaire soutenue par un modèle approprié d'incertitudes et d'informations sur le système va conduire à des résultats très intéressants.

Ces résultats escomptés mèneront à l'évaluation complète des outils déjà développés et à l'identification des lacunes dans la modélisation et le contrôle des processus de haute précision utilisant des moteurs MPE.

Ce mémoire est organisé en trois chapitres :

Le premier chapitre est consacré à la piézoélectricité et les différents types d'actionneurs de nano positionnement. On introduit successivement le principe fondamentale de la piézoélectricité, les différents matériaux, leurs propriétés ainsi que la mise en équations du comportement de céramiques piézoélectriques. Différents types d'actionneurs piézoélectriques sont présentés.

Nous entrons dans le vif du sujet dans le deuxième chapitre en décrivant et modélisant l'actionneur piézoélectrique MPE. Notre objectif est de développer un modèle efficace; pour cela le modèle de lugre est proposé permettant de définir les différents types de frottements.

Nous distinguerons : le frottement statique, le frottement visqueux, le frottement de coulomb et le frottement de stribeck. Nous donnons le modèle proposé le plus souvent dans la

littérature dans le but d'obtenir un modèle correspondant au mieux à son procédé expérimental.

La commande en boucle ouverte est établie et les résultats de simulation sont présentés dans ce même chapitre.

Le troisième chapitre concerne la commande du MPE par deux techniques : - la technique de contrôle proportionnelle et intégrale (PI), qui a l'avantage d'améliorer la stabilité d'un asservissement de positionnement d'un MPE à sa précision. -

Enfin, on clôture le travail de cette thèse par la présentation des suggestions et perspectives.

1.1. INTRODUCTION

Le moteur piézoélectrique est caractérisé par un fort Couple de maintien sans alimentation et à basse vitesse ce qui favorise l'entraînement direct, il est caractérisé aussi par son fonctionnement silencieux cela est due à l'absence de champs magnétiques parasites. [42]. Il est caractérisé aussi par sa Petite taille, ces caractéristiques font de ce moteur un actionneur idéal.

1.2. HISTORIQUE DE LA PIEZOELECTRICITE

L'effet piézoélectrique direct fut signalé pour la première fois par Haüy en 1817. Certains auteurs prétendent qu'il était déjà connu auparavant et parlent également de chimistes hollandais qui auraient écrit un ouvrage à son sujet en 1703 ; quoiqu'il en soit, ce n'est qu'en 1880 que Pierre Curie et son frère Paul Jacques Curie entreprirent l'étude systématique de l'effet piézoélectrique dans les cristaux. C'est pourquoi, on les considère généralement comme les inventeurs de la piézoélectricité.

En 1880, Pierre et Paul Jacques Curie publièrent la première démonstration expérimentale montrant qu'il existait un lien entre le phénomène de piézoélectricité et la structure cristalline de certains matériaux. Durant la Seconde Guerre mondiale, les Américains, les Japonais et les Russes découvrirent que certaines céramiques avaient des constantes diélectriques plus de 100 fois supérieures aux cristaux naturels [43]. Contrairement aux Américains, les Japonais créèrent une association entre entreprises et universités pour promouvoir la recherche en matière de piézoélectricité. Cette politique se montra rapidement payante : développement de nouvelles connaissances, de nouvelles applications et procédés, et même, une nouvelle famille de matériaux piézoélectriques aux performances comparables aux PZT mais dépourvus de tout brevet. Grâce à ces nouvelles piézo-céramiques, les entreprises japonaises développèrent de nombreux filtres dont l'utilisation fut très répandue dans les télévisions et les radios. Le succès commercial du Japon a encouragé les autres pays à accentuer leur recherche sur les composants piézoélectriques. A partir de 1980, le nombre de brevets déposés chaque année et le nombre de parutions (articles scientifiques, ouvrages, etc.) en la matière ont fortement augmenté.

L'objectif actuel est de concevoir des petits actionneurs utiles et bon marché qui nécessitent de faibles puissances et consomment peu d'énergie, tout en étant fiables même dans des environnements hostiles. La recherche en vue d'un perfectionnement de produits piézoélectriques progresse. Et la perspective d'un important développement économique et technologique autour de la piézoélectricité semble certaine.

1.3. CARACTERISTIQUES

1.3.1. Avantages

On peut citer les avantages suivants :

- ✓ La puissance plus élevée par rapport à un moteur classique de même taille.
- ✓ La vitesse de sortie est faible et le couple élevé, plus besoin de réducteur.
- ✓ Le niveau de bruit est très faible voire nul (vibrations ultrasonores).
- ✓ La réactivité (réponse) est de l'ordre de la milliseconde (au lieu de quelques centaines de ms).
- ✓ A l'arrêt, le moteur est naturellement bloqué sans consommer d'énergie grâce à la Pression du rotor sur le stator.
- ✓ Il n'y a aucun risque de perturbation électromagnétique.
- ✓ Le moteur est de fabrication simple.
- ✓ Sa conception est très flexible, il peut s'intégrer au cœur même du mécanisme.

1.3.2. Inconvénients

- ✓ La faible durée de vie due à l'usure de l'interface de friction.
- ✓ Le coût élevé (développement, fabrication des céramiques, nouvelle technologie).
- ✓ L'alimentation électrique complexe (contrôle et concordance des deux voies).
- ✓ Le rendement énergétique faible (10-25%) dû aux pertes dans la céramique piézo et lors de l'entraînement par friction.
- ✓ Le besoin d'une source électrique à haute fréquence [42].

1.4. MOTEUR PIEZO-ELECTRIQUE ROTATIF A ONDE PROGRESSIVE

1.4.1. Hypothèses du modèle de conversion d'énergie à l'interface stator/rotor

La modélisation des moteurs piézo-électriques à onde progressive (voir figure 1.1) intéresse aujourd'hui de nombreux laboratoires et industries. La diversité des phénomènes physique mis en jeu a conduit au développement de nombreux modèles, reposant notamment sur l'identification et exploitation de schémas électromécaniques équivalents [2,3] ces modèles phénoménologique permettent d'accéder l'ensemble des caractéristiques électromécaniques des vibro-moteurs. Ils nécessitent toutefois l'acquisition expérimentale de paramètres fondamentaux (facteur de force) sur des prototypes de laboratoire réalisés au préalable.

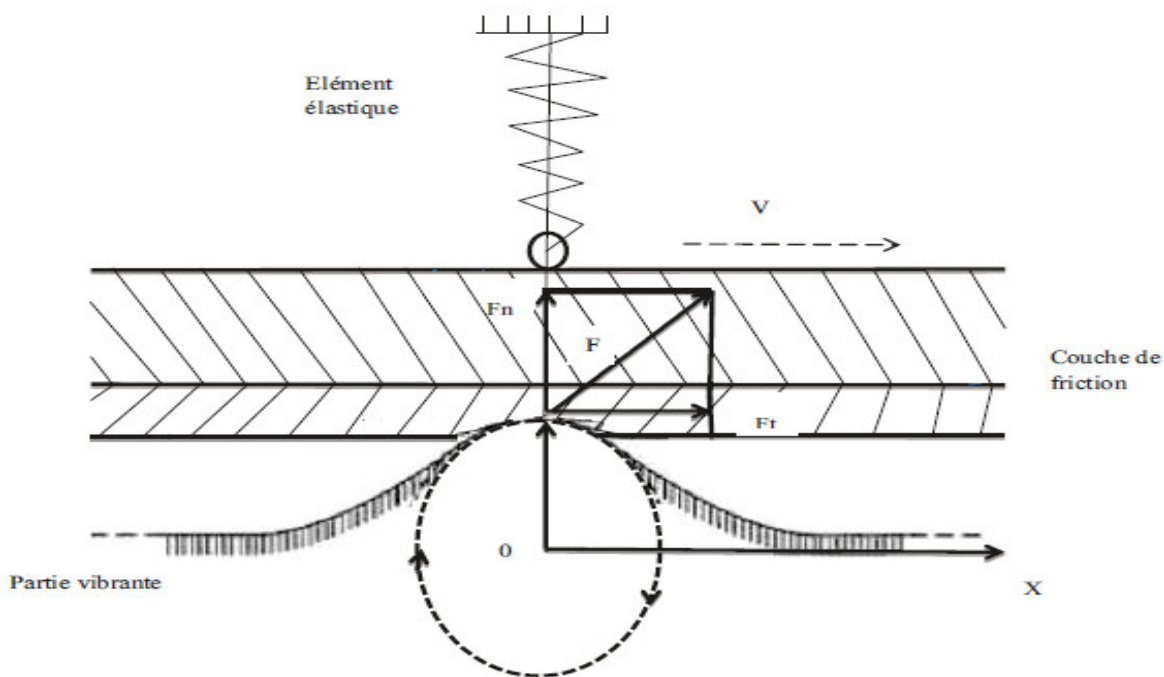


Figure - 1.1 Déformation mécanique due à la tension électrique appliquée sur la partie vibrante.

Ils s'avèrent peu prédictifs dès qu'une modification sensible des paramètres nominaux est introduite. Les modèles théoriques basés sur des approches numériques de type éléments finis constituent par conséquent une alternative intéressante.

Les modèles purement analytiques (explicites ou implicites) sont alors un prolongement naturel des développements numériques initialement entrepris et sont encore cependant pratiquement inexistant dans la littérature actuelle consacrée aux vibro moteurs, en raison sans doute des mécanismes fortement non linéaires, impliqués dans la conversion d'énergie mécanique aux interfaces stator-rotor.

1.4.2. Organe d'entraînement

Un anneau de céramique piézoélectrique est collé sur le stator (voir Figure 1.2) de façon à induire dans ce dernier des oscillations à la fréquence de résonance. L'anneau est divisé en deux systèmes d'excitation (phases du moteur).

Chaque système est alimenté idéalement par une tension sinusoïdale dans le domaine Ultrasonique, générant ainsi deux ondes stationnaires dans le stator. Un déphasage spatial égal à un quart de la longueur d'onde est alors introduit entre les deux systèmes d'excitation de façon à générer une onde progressive par la superposition des deux ondes stationnaires. Grâce à l'onde progressive, les points à la surface du stator décrivent une trajectoire elliptique [43].



Figure -1.2 Le stator du moteur SHINSEI USR60. [44]

Générer une onde progressive par la superposition des deux ondes stationnaires. Cela est réalisé par l'imposition d'amplitudes et déphasages temporels adéquats. Les points à la surface du stator décrivent une trajectoire elliptique qui permet de combiner des déplacements verticaux et horizontaux. Il faut également relever que l'organe d'entraînement doit être fixé sur un support (socle de fixation). Ceci implique l'introduction, dans la géométrie de l'anneau statorique, d'un voile de découplage, afin d'éviter certaines perturbations dues à la fixation du stator sur le support. Ceci pourra avoir des répercussions sur la forme et l'amplitude de l'onde statorique générée.

1.4.3. Organe entraîné

La partie mobile, ou l'organe entraîné, est constituée du rotor (voir figure 1.3) et d'une couche de friction qui est collée sur la partie inférieure du rotor. Ce dernier est pressé au moyen d'une force de précontrainte, symbolisée avec la force F_{ext} contre le stator.

Grâce à la pression générée dans la zone de contact entre le stator et le rotor, une force de frottement existe permettant ainsi au mouvement horizontal des points à la surface du stator (due au mouvement elliptique) de transmettre une force de traction au rotor. La force de précontrainte



Figure 1.3- Rotor du moteur SHINSEI USR60. [44]

Permet aussi de fixer le couple de maintien sans alimentation du moteur selon la loi du frottement.

1.5. ACTIONNEURS PIEZOELECTRIQUES A ONDE PROGRESSIVE

Dans cette famille des actionneurs piézoélectriques à onde progressive, on peut distinguer trois

Principaux types de moteurs :

- ✓ les moteurs annulaires
- ✓ les moteurs piézoélectriques linéaires
- ✓ les moteurs à rotation de mode

1.5.1. Principe du moteur piézoélectrique à onde progressive annulaire

L'architecture type d'un moteur à onde progressive est représentée sur la figure 1.5 dans le cas D'une configuration annulaire. Le stator est excité en vibrations de volume forcées par L'intermédiaire d'un transducteur piézo-électrique collé à sa partie inférieure. La sectorisation du Transducteur détermine le rang du mode de flexion entretenu sur le stator. Le rang du mode est Par ailleurs choisi en fonction des paramètres dimensionnels du moteur, pour garantir l'absence De bruits audibles de fonctionnement (moteurs dits à ultrasons). Le rotor est en contact avec la Partie supérieure du stator par l'intermédiaire d'un matériau interface. Il est entrainé par Frottement en exploitant les déplacements et rotations des sections droites du stator.

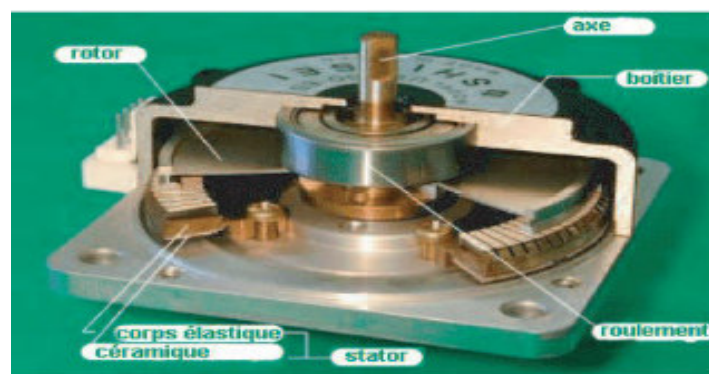


Figure -1.4 – Vue éclatée du moteur SHINSEI USR60 [46].

Le transfert de puissance mécanique à l'arbre moteur nécessite une double transduction D'énergie :

- ✓ La première est réalisée à l'interface transducteur-stator par l'intermédiaire d'un joint de Colle. Elle exploite l'effet piézo-électrique inverse pour transformer l'énergie électrique Provenant de l'alimentation, en énergie mécanique de vibration du stator.
- ✓ La seconde s'opère sur l'interface stator-rotor par l'intermédiaire du matériau de friction.

Les propriétés mécaniques et tribologiques de ce matériau doivent satisfaire la conversion efficace des vibrations de volume du stator en déplacement de corps rigide du rotor. Elles déterminent pour une large part les performances du moteur.

L'onde progressive générée sur le stator résulte de la superposition de deux vibrations forcées stationnaires, à une même pulsation ω voisine d'une pulsation de résonance mécanique associée au mode propre de flexion hors plan de rang (k,n) et de multiplicité du stator. Les deux formes propres associées à la fréquence propre de pulsation présentent par définition un déphasage circonférentiel de $\lambda/4$, où λ désigne la longueur d'onde de la vibration mécanique. L'une des formes propres est excitée par une électrode alimentée par la tension électrique $(t) = \sin(\omega t)$.

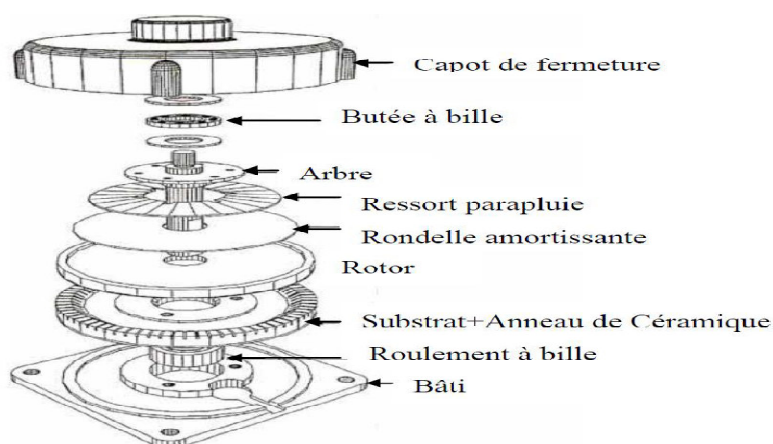


Figure -1.5-Vue éclatée du moteur SHINSEI USR60 [45]

L'autre forme propre est excitée par la deuxième électrode alimentée par le signal $(t) = \sin(\omega t + \pi/2)$ et désigne respectivement les amplitudes crêtes des signaux (t) et (t) fonction de la variable temps (t) . Les polarisations initiales des céramiques permettent de satisfaire la forme propre choisie.

La quadrature de phase dans l'espace des deux formes propres (déphasage de $\lambda/4$) implique la symétrie mécanique circulaire du stator. Elle suppose également l'asymétrie du dispositif de raccordement stator-bâti et du chargement extérieur imposé par l'intermédiaire de la récontrainte axiale exercée sur le rotor. C'est la raison pour laquelle les moteurs à l'onde progressive sont par définition des moteurs rotatifs.

1.5.2. Principe du moteur piézoélectrique linéaire

Le stator est une longue barre métallique soudée sous forme de rail de guidage en boucle, représenté à la figure (1.6). Le rotor est constitué d'un chariot libre en mouvement et qui est pressé en permanence par une force verticale uniforme contre les rails. Le fait de renfermer les extrémités du rail de manière à créer la condition d'un milieu continu nécessaire à la propagation de l'onde, limite la partie active du moteur utilisable pour réaliser des

déplacements linéaires. Le prototype proposé présente un inconvénient majeur : l'encombrement du système de manière non négligeable, bien qu'inutile.

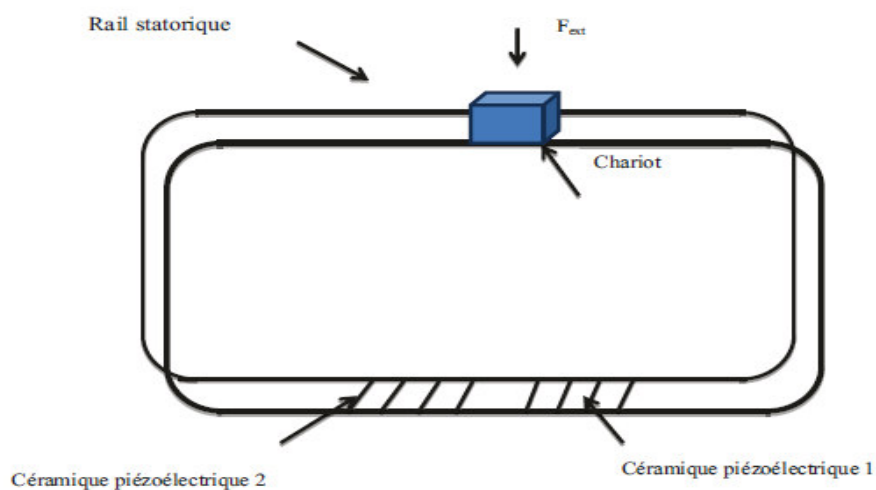


Figure – 1.6 Prototype d'un moteur piézoélectrique linéaire. [47]

En partante ces considérations, on peut, dans le cas du deuxième prototype représenté à la figure (1.7) parler effectivement d'un moteur linéaire. Deux oscillateurs sont installés aux extrémités du rail pour créer une onde progressive. Si l'oscillateur T_1 est choisi pour générer l'onde stationnaire, alors l'oscillateur T_2 est ajouté pour travailler en amortisseur afin de synchroniser le système c.-à-d. obtenir un mouvement orienté à onde progressive et même d'éviter au mécanisme les ondulations destructives. Avec cette configuration, l'onde se propage de T_1 vers T_2 et le chariot dans la direction opposée. Le déplacement du chariot peut être inversé en changeant le rôle des deux oscillateurs. Le chariot peut atteindre dans cette configuration une vitesse d'environ 1m/s.

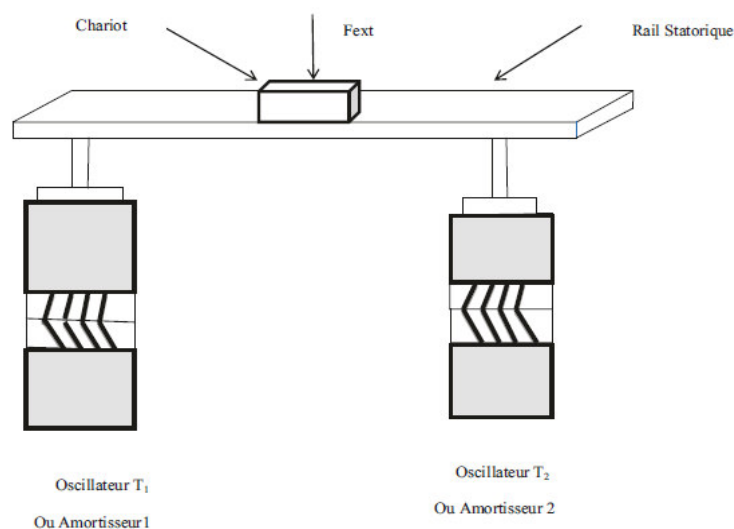


Figure – 1.7 Prototype d'un moteur piézoélectrique linéaire utilisant des oscillateurs de Langevin [48]

1.5.3. Principe du moteur à rotation de mode

Un moteur à rotation de mode (voir figure 1.8) utilise deux modes de déformation orthogonaux. Il est constitué d'une poutre cylindrique associant des céramiques piézoélectriques encadrées par des contre-masses.

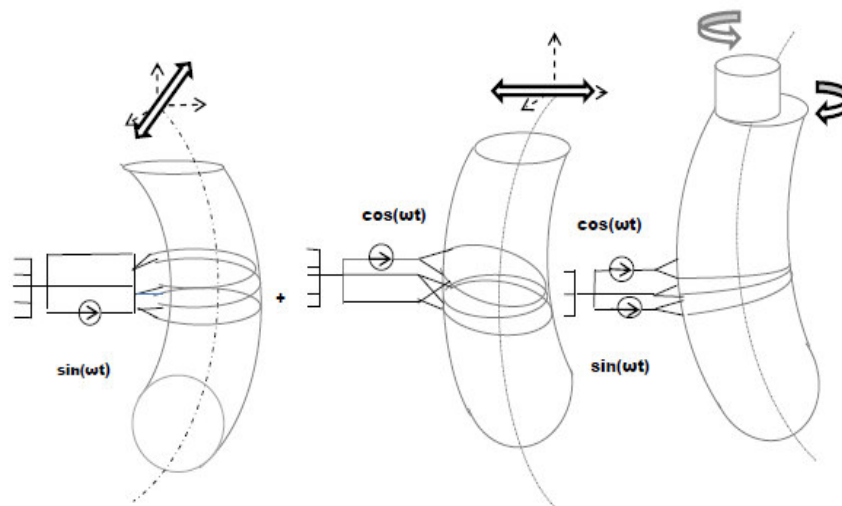


Figure – 1.8 Principe de fonctionnement d'un moteur à rotation de mode

La combinaison de ces modes provoque une rotation de la structure généralement de révolution autour de son axe de symétrie. L'ensemble est précontraint par une ou plusieurs vis. La partie mobile est maintenue contre le stator par une pression extérieure assurée par une raideur rapportée entre le rotor et le bâti.

Contrairement aux structures annulaires, le contact entre rotor et stator se fait sur une seule zone.

La génération des deux modes de flexion nécessite une subdivision des céramiques utilisées en deux secteurs de 180° avec des polarisations opposées sur chaque moitié.

1.6 CLASSIFICATION DES MOTEURS PIEZOELECTRIQUES

La manière dont le mouvement elliptique est généré à la surface du stator en contact avec le rotor est utilisé comme méthode de classification des différents types de moteurs piézoélectriques. Fondamentalement on peut les séparer en deux groupes : un premier, avec les moteurs à un seul mode d'excitation et le deuxième, avec les moteurs à deux modes de vibrations.

1.6.1 Moteurs à un seul mode de vibration

Les moteurs employant un mode simple de vibration peuvent être encore subdivisés en deux groupes :

- moteurs à onde stationnaire et moteurs à onde progressive.
- Moteurs piézoélectriques à onde stationnaire

Cette catégorie de moteurs utilise une onde stationnaire pour communiquer soit un déplacement, soit une rotation à la partie mobile. Comme son nom l'indique, l'onde est immobile dans le plan du stator ; la position des nœuds et des ventres étant déterminée par la position des électrodes. Le stator comporte des surépaisseurs qui sont en contact avec la partie mobile. Lorsque le stator est excité à sa fréquence de résonance, l'extrémité de chaque surépaisseur décrit une trajectoire qui permet d'entraîner la partie mobile (figure 1.9). La position des surépaisseurs par rapport aux nœuds de l'onde stationnaire détermine le sens du mouvement. La vitesse de la partie mobile est proportionnelle à la fréquence du mode propre et à la longueur des surépaisseurs. Ce type de moteur est plutôt utilisé comme actionneur linéaire.

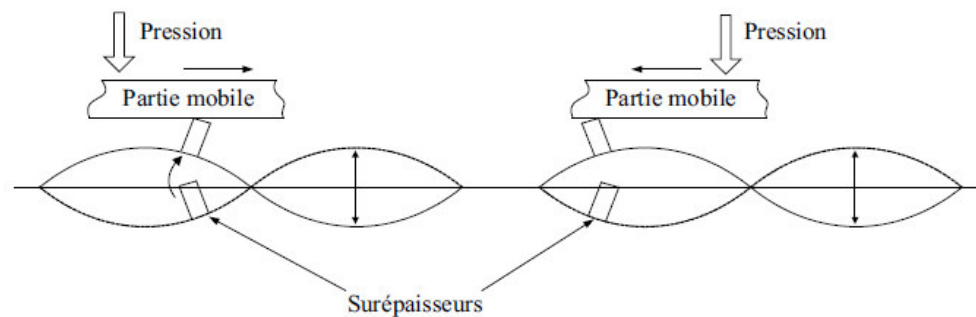


Figure- 1.9 : Moteur piézoélectrique à onde stationnaire : principe de l'entraînement.

1.7. MOTEURS PIEZOELECTRIQUES A ONDE PROGRESSIVE

La différence essentielle par rapport au moteur à onde stationnaire réside dans le type de contact qui, au lieu d'être cyclique et donc comportant des chocs, est continu, avec tous les avantages qui en découlent au niveau de l'usure et donc de la durée de vie de l'actionneur.

La vitesse, comme on le verra dans le chapitre suivant entièrement dédié à la modélisation de ce moteur, est proportionnelle à l'amplitude de déformation de l'onde, à l'épaisseur du stator et à la vitesse de propagation de l'onde progressive dans le stator. Évidemment le seul paramètre utilisable pour régler la vitesse est l'amplitude de l'onde qui dépend-elle même de la fréquence d'excitation (autour du pic de résonance), de l'amplitude de la tension et du déphasage entre les deux phases d'alimentation. On a donc à disposition trois degrés de liberté pour commander le moteur en vitesse.

Le développement d'une électronique de commande modulaire et l'étude des caractéristiques mécaniques par rapport à ces trois variables nous permettra de choisir l'algorithme de réglage optimal. Outre la structure du moteur à onde progressive de surface, traitée à la Section 3.2, il existe d'autres types d'actionneurs à onde progressive :

1.7.1. Moteurs piézoélectriques à onde progressive périphérique:

Ce moteur est caractérisé par une déformation dans le plan du stator et par un contact radial entre le stator et le rotor. Deux ondes stationnaires sont générées dans le plan du stator qui se combine pour former une onde progressive.

La différence réside dans le fait que, dans cette configuration, l'onde progressive n'est pas générée sur la surface plane du stator mais sur la tranche de l'anneau (périphérie). De tels moteurs présentent des performances mécaniques comparables à celle des moteurs à onde progressive de surface. Leur principal handicap reste cependant une intégration du rotor plus délicate à réaliser. L'effort de précontrainte étant appliqué dans la direction radiale, il faut nécessairement un rotor possédant une certaine élasticité dans cette direction.

1.7.2. Moteurs à double stator:

Dans le but d'augmenter les performances mécaniques des moteurs, l'idée de serrer un seul rotor entre deux stator, dans une structure dite en "sandwich", est venue naturellement. Cette configuration est représentée à la (figure 1.10).

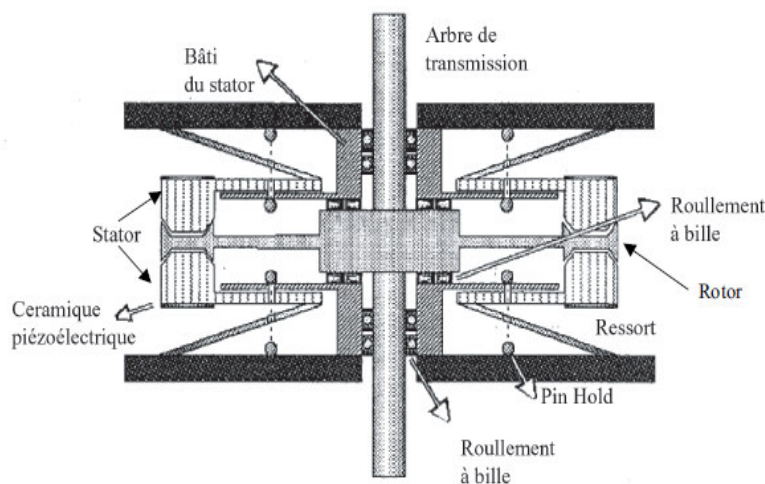


Figure. 1.10 – Architecture en "sandwich" pour améliorer les performances mécaniques[49]

1.7.3. Les micromoteurs à onde progressive :

La miniaturisation des moteurs à onde progressive est envisageable. Deux exemples parmi les plus significatifs sont cités ci-après :

- Le CETEHOR (Centre Technique de l'Industrie Horlogère) a réalisé un moteur de 5[mm] de Diamètre.
- L'Université de Tokyo a construit un moteur tubulaire à double rotor, en utilisant des couches minces de matériau piézoélectrique, de 10[mm] de longueur et de 2,4[mm] de diamètre.

1.7.4 Moteurs à deux modes de vibration

Si deux modes de vibration aux composantes de déplacement perpendiculaires entre eux sont combinés, la trajectoire résultante décrite par les points à la surface peut être rendue elliptique si les fréquences d'excitation des deux modes sont les mêmes. Les moteurs piézoélectriques utilisant deux modes de vibration peuvent être divisés en deux catégories : les moteurs à conversion de mode et les moteurs hybrides.

1.7.4.1. Moteurs piézoélectriques à conversion de mode

Ce groupe de moteurs se sert d'une conversion de mode pour obtenir deux modes de vibration à partir d'un élément piézoélectrique simple. Un exemple de ce principe de fonctionnement est donné par le "Wedge Type Motor" l'élément piézoélectrique permet d'exciter le mode longitudinal qui, combiné à la flexion induite au niveau de l'adaptateur (ou coupleur) mécanique, permet de générer le mouvement elliptique à la surface en contact avec le rotor.

Un autre exemple est l'actionneur de la (figure 1.11), où les vibrations longitudinales produites par des céramiques piézoélectriques provoquent la torsion d'un adaptateur mécanique spécial, dit coupleur de Kumada. La superposition de ces deux modes (longitudinal-torsion) génère la trajectoire elliptique permettant d'entraîner le rotor. Différentes autres structures sont facilement imaginables. Cette classe de moteur permet généralement le changement du sens de rotation. Le mécanisme de contact est discontinu contrairement au moteur à onde progressive.

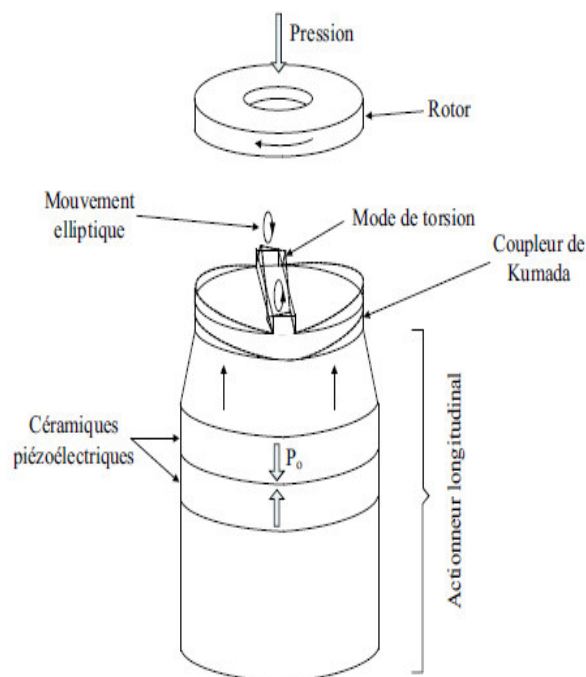


Figure 1.11 – Le moteur avec coupleur de Kumada[56]

1.7.4.2. Moteurs piézoélectriques hybrides

Ces actionneurs utilisent deux modes de vibration totalement découplés, excités par deux éléments Piézoélectriques indépendants. L'architecture de ce type de moteur est illustrée stator Se compose d'un vibreur en torsion et d'un actionneur piézoélectrique multicouches longitudinal. Ce Dernier est collé sur la surface plate du vibreur. Les deux éléments piézoélectriques, qui permettent D'exciter les deux modes de vibration (torsion-longitudinal), sont alimentés avec la même fréquence Et avec un déphasage contrôlé spécifiquement. L'avantage de ce type de moteur dérive du fait qu'on a deux éléments piézoélectriques indépendants l'un de l'autre ; de cette manière, la vitesse du moteur Peut être ajustée en agissant uniquement sur un seul élément piézoélectrique.

Nous montre comment la vitesse peut être modifiée en variant uniquement l'amplitude de l'excitation du mode en torsion.

L'organigramme de la figure 1.12 permet de résumer de manière globale la classification des moteurs piézoélectriques.

On peut ainsi situer le moteur piézoélectrique à onde progressive rotatif, qui Fait l'objet de notre étude, dans le vaste domaine des actionneurs piézoélectriques.

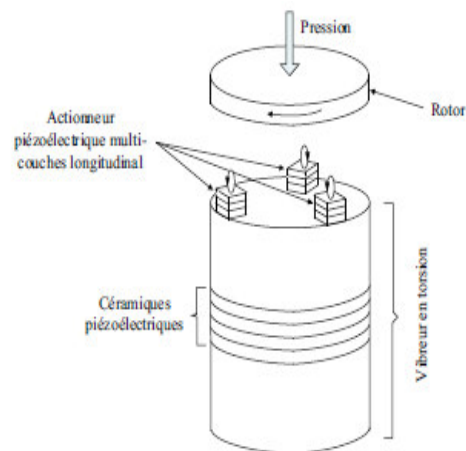


Figure 1.12 – exemple d'un moteur piézo-électrique hybride [50]

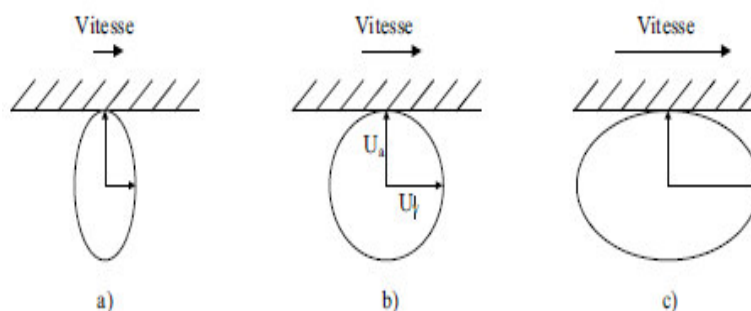


Figure 1.13 – Surface de contact pour différents rapports entre les amplitudes des modes de vibration [56].

U_v : l'amplitude du mode en torsion et U_a celle du mode longitudinal de l'actionneur multicouches.

- a) basse vitesse.
- b) vitesse moyenne.
- c) haute vitesse

2-1 Historique

L'effet piézoélectrique direct a été de tout le temps connu (30000 ans), puisque les indiens de Ceylan connaissaient déjà les propriétés des sels de tourmaline. L'observation quantitative du Phénomène rapportée par R. Haüy en 1817 a été renforcée et attribuée aux frères Pierre et Jacques Curie en 1880, tout en publiant l'étude systématique de l'état cristallin en annonçant des lois et en effectuant des travaux sur le quartz, le topaze, la tourmaline, le sel de rochelle.

En 1881 G Lippmann suggère l'effet inverse à partir des principes fondamentaux de la thermodynamique.

En vingt cinq ans, les vingt classes cristallins et les dix huit coefficients piézoélectriques ont permis l'analyse complète et bien définie. L'étude mathématique des milieux anisotropes est due à Voigt (travaux publiés en 1910) : l'ouvrage de référence ; Lehr-buch der kristallographie en introduisant la notation de tenseur et donna la première théorie de l'électricité des matériaux. Les applications industrielles importantes n'apparaissent que plus tard. C'est en 1917 que Paul Langevin, construit un générateur d'onde ultrasonore pour la mesure et la détection sous marine.

Par la suite W. Cady propose l'utilisation du quartz pour contrôler les fréquences dans les Oscillateurs radioélectriques [24]. Durant la deuxième guerre mondiale, des groupes isolés, Découvrent que certaines céramiques préparées par frittage des poudres d'oxydes métalliques Présentent des constantes piézoélectriques plus de 100 fois supérieures à celles des cristaux. En 1965, les recherches portèrent sur le développement de la famille des titanates de baryum, puis Des ziconates-titanates de plomb (PZT), l'étude des structures des cristaux de perovskite, et les Dopages possibles pour l'optimisation des propriétés. Les premières exploitations commerciales De matériaux piézoélectriques sont japonaises après la présentation en 1951 d'un appareil de Détection des bancs de poissons. Depuis, les industriels de nombreuses autres nations se sont Lancés dans l'aventure. La piézoélectricité est présente partout aujourd'hui du satellite au Laboratoire de recherche. Elle est utilisée dans les domaines suivants: mesure de la pression, Mesure des vibrations, jauge de contrainte, la mesure de l'accélération, détecteur d'impact, des Capteurs de position jusqu' à la cuisine familiale en passant par les filtres électronique et la Télévision, et enfin au téléphone portable et à la fameuse « cale piezo » que tous les Microscopistes connaissent. Aujourd'hui, grâce aux progrès de la recherche de nouveaux matériaux sous forme de monocristaux apparaissent pour leur excellente propriété Piézoélectrique qui peut être utilisée comme capteur ou bien comme actionneur.

2-2 Piézoélectricité

L'origine du mot piézoélectricité dérive du grec « Piézo » qui signifie pression. Un matériau possède des propriétés piézoélectriques si une déformation mécanique sur ce matériau se traduit par l'apparition de charges, créant un champ électrique entre les faces polarisées. Ces phénomènes étant réversibles, une déformation apparaît dans le matériau lorsqu'il est soumis à un champ électrique. Dans le premier cas on parle d'effet piézoélectrique direct, dans le second cas il s'agit de l'effet piézoélectrique inverse (figure 2-1). Ce phénomène est observé uniquement dans des matériaux non conducteurs. Le déplacement des charges se fait dans la direction privilégiée sous les efforts de traction ou de compression dans la structure cristalline de la céramique, [25].

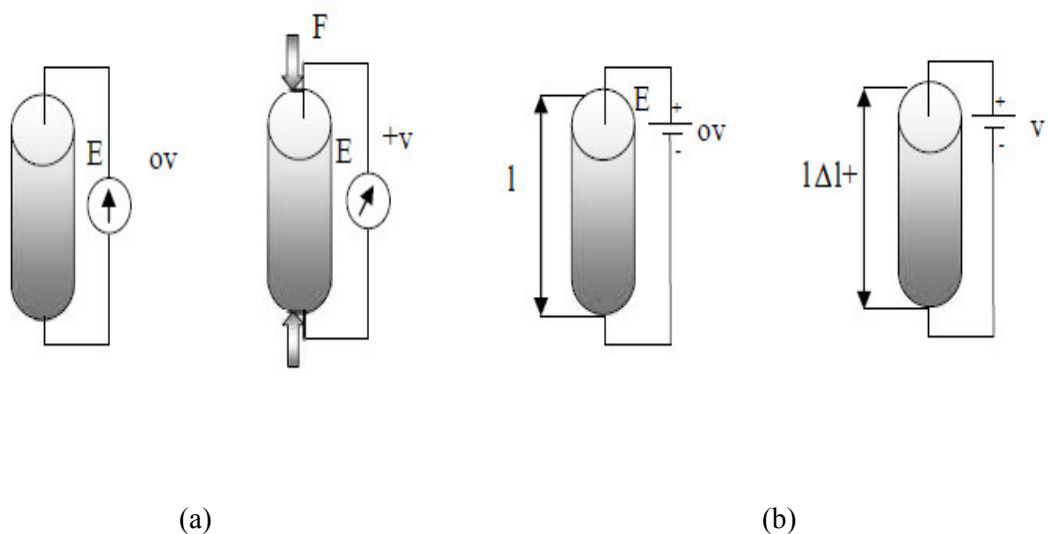


Figure 2.1 Effet Piézoélectrique

- a) Effet direct.
- b) Effet inverse.

2-2-1 Matériaux piézoélectriques

Parmi les matériaux qui présentent un effet piézoélectrique, on trouve des monocristaux, comme par exemple la tourmaline et le quartz et les céramiques qui ont des caractéristiques remarquables pour les applications électroniques ainsi que pour les applications en instrumentation (capteur, actionneur) : son facteur de couplage (mesure du rendement) est élevé, donc les pertes d'énergie dans le cristal sont faibles; sa fréquence de résonance est très bien définie et l'oscillation ne s'amortit pas beaucoup et dont le coût est plus faible. Ces céramiques sont fabriquées par frittage de microcristaux piézo-électriques sous un champ électrique pour axer les domaines de polarisation des divers cristaux. La famille utilisée est celle obtenue par frittage décomposé de plomb, de titane et de zirconium, désigne PZT. Ces céramiques présentent les avantages suivants [26] [27]:

- Modules piézoélectriques élevés;
- Grandes possibilités d'usinage (frittage) ;
- Robustesse.

Quant aux inconvénients, on peut citer :

- Forte dépendance des modules en température;
- Grande hystérésis de la température.

Tout corps présentant un centre de symétrie ne peut pas être piézoélectrique alors que les Cristaux ne possédant pas de centre de symétrie peuvent l'être. La figure 2-2 présente une Structure cristalline de l'apparition de la piézoélectricité [28].

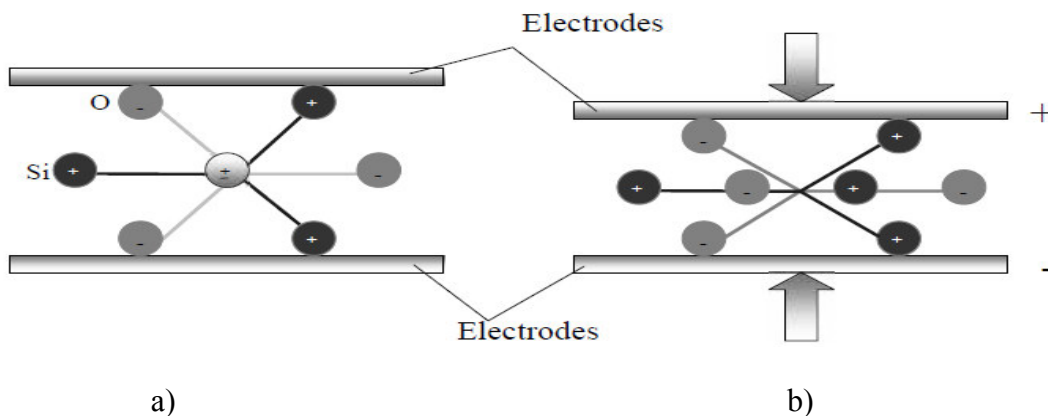


Figure 2-2 Présentation d'une structure cristalline de quartz

- a) Possédant un centre de symétrie.
- b) ne possédant pas centre de symétrie.

En l'absence de force appliquée:

- Les centres des charges négatives et positives de chaque molécule coïncidentes;
- La structure cristalline est Centro symétrique.
- Par conséquent, la molécule est électriquement neutre, pas de dipôle dans le matériau.

Exercer une pression sur le matériau :

- La structure interne est déformée.
- Modification de la distance entre les sites des ions positifs et négatifs.
- Création d'un dipôle électrique.

Finalement:

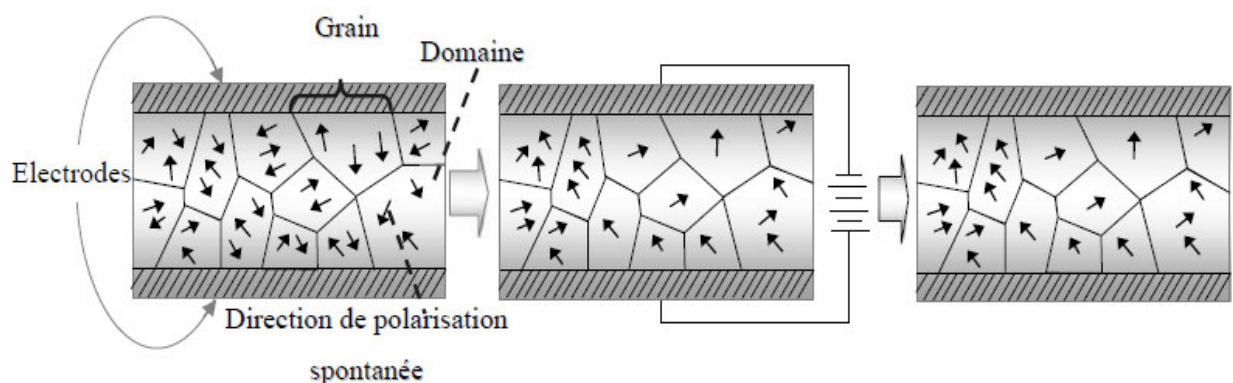
- La structure cristallographique de matériau est assistée à une polarisation spontanée non nulle.
- La polarisation électrique génère un champ électrique qui transforme l'énergie mécanique du matériau déformation en énergie électrique.
- Apparition des charges de signes opposés sur les deux électrodes.

La céramique piézoélectrique est composée d'un grand nombre de minuscule domaine cristallin qui sont axés aléatoirement. A ce stade, l'effet piézoélectrique est peu présent puisque la somme des moments dipolaires s'annule. Cette opération (rendue piézoélectrique) s'appelle polarisation, elle consiste à soumettre la céramique à un champ électrique assez intense pour aligner tous les dipôles, à une température proche de celle de curie. Elle est ensuite refroidie, en présence du champ électrique. Enfin, lorsque le champ électrique est supprimé, les dipôles conservent leur position dans chaque domaine cristallin. Cette séquence de polarisation est schématisée sur la (figure2-3).

La structure cristalline fait que l'angle entre la polarisation microscopique de chaque domaine ne peut prendre que les valeurs suivantes:

- Quadratique: 90° et 180° .
- Rhomboédrique: 71° et 109° .
- Orthorhombique : 60° , 90° et 120° .

Dans les domaines à 180° , le matériau bascule complètement car le réseau ne subit pas de Déformation structurale, tandis que les domaines à 60° , 71° , 90° , 109° et 120° induisent des Déformations importantes qui se traduisent par une réorientation partielle de ces domaines.



a) Orientation aléatoire des Domaines cristallins avant Polarisation

b) Phase de polarisation sous un champ électrique continu E.

c) Polarisation rémanente après avoir supprimée Champ électrique.

Figure. 2-3 Polarisation d'un échantillon de piézocéramique[29]

- a) avant polarisation.
- b) durant la phase de polarisation.
- c) après polarisation.

2-2-2 Caractéristique piézoélectrique :

Dans la théorie de la piézo-électricité, on introduit des coefficients piézo-électriques qui relient la polarisation aux contraintes mécaniques. Ces coefficients forment ce qu'on appelle un tenseur.

Donc, on a besoin de définir un repère pour exprimer les équations constitutives de la Piézoélectricité. Comme les matériaux piézoélectriques sont anisotropes, l'axe 3 du repère est Choisi colinéaire à la direction de polarisation. Les deux autres axes (1 et 2) sont choisis de manière à ce que le trièdre formé par 1, 2 et 3 soit direct (Figure. 2-4). Dans ce repère, il y a 6 mouvements différents qui peuvent avoir lieu: un mouvement de translation qui suit chacun des trois axes et trois mouvements de rotation autour de ces mêmes trois axes (notés 4, 5 et 6 respectivement). Les grandeurs électriques, champ et induction et les grandeurs mécaniques, contrainte et déformation, sont reliées entre elles par des coefficients piézo-électriques. L'intensité des effets piézoélectriques sont caractérisés par les constantes piézoélectriques [23][24].

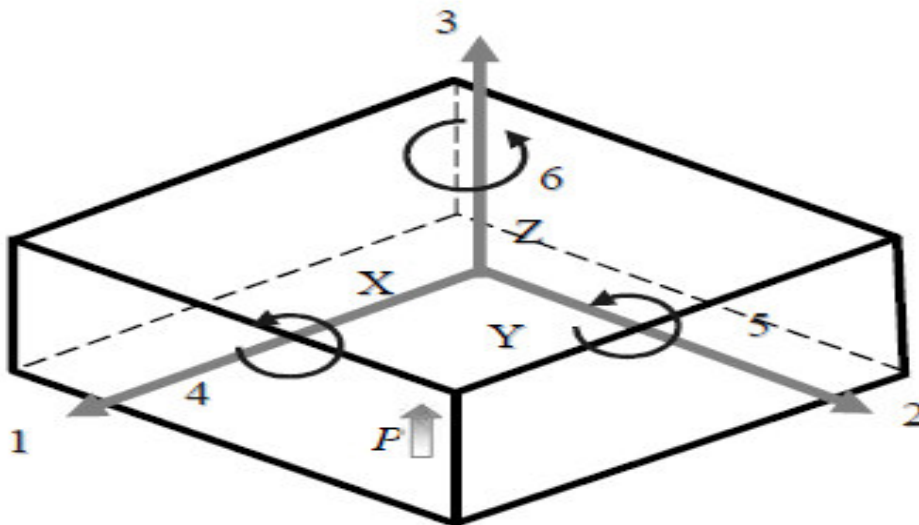


Figure 2-4 Directions associées aux vectrices déformations et contrainte.

2-2-2-1 Constantes piézoélectrique de charge d_{ij} :

La constante piézoélectrique de charge d_{ij} est exprimée par le rapport entre le déplacement Diélectrique à la contraintes ou encore de la déformation au champ électrique. La constante la plus utilisée est d_{31} , donc :

$$d_{ij} = \left(\frac{\partial D_i}{\partial T} \right)_E = \frac{\partial^2 G_1}{\partial E \partial T} = \left(\frac{\partial S}{\partial E} \right)_T \quad (2-1)$$

Où

D_1 : est le déplacement diélectrique.

G_1 : énergie libre.

S : déformation mécanique.

T : contrainte.

P : la polarisation est définie en fonction de la partie variable du déplacement et du champ par

$$D_1 = \varepsilon_0 \varepsilon_r E + P \quad (2-2)$$

$\varepsilon_0 \varepsilon_r$: sont respectivement la permittivité du vide et la permittivité relative du matériau.

d_{ij} : coefficients de déformation [m/V] ou coefficients de sortie de charge [C/N]: Déformation Développée [m/m] par unité d'intensité de champ électrique appliquée [V/m] ou densité de Charge développée [C/m²] pour une contrainte donnée [N/m²]. Par exemple d_{31} est le rapport entre la déformation dans la direction 1 et le champ électrique dans la direction 3, ou encore le rapport entre le déplacement dans la direction 1 et la contrainte dans la direction 3. La constante d_{ij} est importante pour les systèmes devant produire un mouvement ou des vibrations par application d'une tension électrique.

2-2-2-2 Constantes piézoélectrique de tension g_{ij} .

Les coefficients g_{ij} sont importants pour les matériaux devant fournir de la tension en réponse à Une contrainte mécanique. La constante g_{ij} est définie par:

$$g_{ij} = \frac{E}{T} = \frac{d}{\varepsilon_0 \varepsilon_r} \quad (2-3)$$

g_{ij} : coefficients de tension ou coefficients de sortie de champ [Vm/N]:La constante piézoélectrique de tension est définie par le champ électrique à circuit ouvert développé [V/m] pour une contrainte mécanique appliquée [N/m²] ou déformation développée [m/m] par une densité de charge appliquée [C/m²].Par exemple l'indice "33" de la constante g_{33} indique que le champ électrique et les contraintes mécaniques sont à la fois le long de l'axe de polarisation. L'indice"31" de la constante signifie que la pression est appliquée perpendiculairement à l'axe de polarisation, L'indice"15" de la constante g_{15} implique que la contrainte appliquée est de cisaillement et que le champ électrique résultant est perpendiculaire à l'axe de polarisation.

2-2-2-3 Coefficients de couplage k :

Les coefficients de couplage électromécaniques k (k_{33} , k_{31} , k_{15} , k_p , k_t) caractérisent l'efficacité de la transformation d'énergie entre énergie électrique et énergie mécanique de déformation dans un piézo-électrique. Il n'est absolument pas relié aux pertes ni au rendement, il traduit plutôt une adaptation entre la partie mécanique et la partie électrique du matériau. Il est exprimé en pourcent:

$$k^2 = \frac{\text{énergie transformée}}{\text{énergie apportée}} \quad (2-4)$$

Les indices désignent les directions relatives des grandeurs électriques et mécaniques et suivantes :

la forme de l'éprouvette et le mode de vibration de celle-ci. Ce coefficient peut prendre différentes valeurs:

k_{33} : pour la vibration des pièces épaisses suivant la direction de la polarisation.

k_{31} : pour la vibration transversale (perpendiculaire à la polarisation) .

k_p : pour la vibration radiale d'un disque mince.

k_t : pour la vibration des pièces minces suivant la direction de la polarisation.

2-2-2-4 Relation entre les Coefficients d_{ij} et g_{ij}

Le coefficient de tension g_{ij} est lié au coefficient de charge d_{ij} par la constante de diélectrique

$$d_{33} = \epsilon_0 \epsilon_r g_{33} \quad (2-5)$$

$$d_{31} = \epsilon_0 \epsilon_r g_{31} \quad (2-6)$$

2-2-3 Schéma équivalent de piézoélectrique

On peut envisager le comportement d'un actionneur piézo-électrique dans les différentes conditions de fonctionnement. On souhaite donc avoir un modèle adapté à l'étude de son comportement, aussi bien du point de vue électrique que du point de vue mécanique.

2-2-3-1 Schéma électrique

Il est possible de représenter l'impédance électrique d'une céramique vibrante au voisinage d'une fréquence de résonance par un schéma électrique équivalent. La céramique est reliée grâce à deux électrodes de connexion. Les connexions notées A et B vont constituer une capacité appelée capacité de connexion. La forme la plus couramment.

D'optée est Indiquée par la figure 2-5, et un système mécanique masse-ressort équivalent figure (2-6) [24] [25].

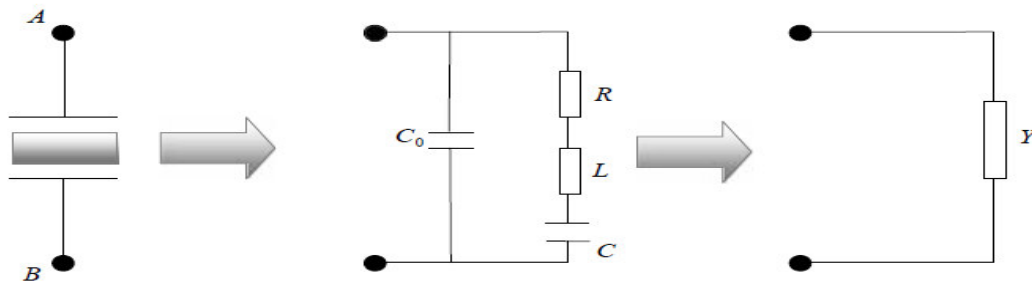


Figure 2-5 Schéma électrique équivalent de piézoélectrique.

Le schéma électrique équivalent est un circuit série shunté par la capacité de connexion. Les valeurs de L, R et C sont dictées par la nature et les caractéristiques de la céramique. Ce sont des équivalents électriques d'éléments mécaniques.

C_0 : représente la capacité équivalente du piézoélectrique.

La branche R.L.C est appelée branche motion, elle représente l'effet d'inertie et de rigidité de la masse à haute fréquence.

R : représente les pertes mécaniques dans le matériau ;

La self L est proportionnelle à la masse de la céramique;

La capacité C est proportionnelle au constant élastique (à l'inverse de la raideur du matériau).Ce modèle peut être complété par une résistance R_0 , en parallèle à C_0 , qui rend compte Des pertes diélectriques statiques, la valeur très élevée de R_0 permet dans la plupart des cas de Négliger. La permittivité du diélectrique sera égale à celle de la céramique :

$$C_0 = \epsilon_0 \frac{A}{e} \tag{2-7}$$

L'admittance de la céramique étant infinie à la fréquence de résonance (f_r) , et nulle à la Fréquence antirésonance (f_a). En réalité, la représentation de l'admittance en fonction de la fréquence présente un minimum et un maximum plus ou moins accentués, traduisant un amortissement interne.L'admittance globale est définie par la somme de l'admittance de la branche statique et de celle de la branche dynamique ou motion elle telle que [30] :

$$Y = Y_0 + Y_M \tag{2-8}$$

Avec

$$Y_0 = \frac{1}{R_0} + jC_0 \omega \tag{2-9}$$

j : nombre complexe tel que $j^2 = -1$

Et

$$Y_M = \frac{R}{R^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)^2} + j \frac{\left(\frac{1}{C\omega} - L\omega\right)}{R^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)^2} \quad (2-10)$$

En prenant $p = j\omega$, on obtient la fonction de transfert correspondante :

$$Y(p) = \frac{1}{R_0} + pC_0 + \frac{1}{R + pL + \frac{1}{pC}} \quad (2-11)$$

Le circuit équivalent permet enfin d'introduire une quantité intéressante, le coefficient de surtension de la branche mention elle :

$$Q = 2\pi \frac{\text{énergie emmagasinée pendant une période (dans L et C)}}{\text{énergie dissipée pendant une période (dans R)}} \quad (2-12)$$

$$Q = \frac{1}{RC\omega} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2-13)$$

13)

ω : est la pulsation correspondant à la fréquence (fr).

Les céramiques actuelles peuvent atteindre des valeurs de Q de 200, et d'autre part-on définit le coefficient de couplage en fonction des capacités, C_0 et f_r f_a .

$$k^2 = \frac{c}{c + c_0} = \frac{f_0^2 - f_r^2}{f_a^2} \quad (2-14)$$

Le comportement dynamique d'un actionneur piézo-électrique peut être modélisé, du point de vue mécanique, par un système masse- ressort. (fig.2-6).

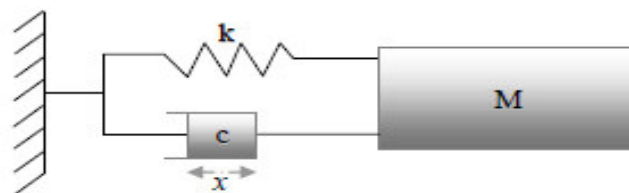


Figure 2-6 Système mécanique équivalent.

x : représente la déformation engendrée par le champ électrique :

$$x = d_{ij} \cdot V \quad (2-15)$$

k et c : représente la raideur et l'amortissement du piézoélectrique.

Il possède une fréquence propre. La fréquence de résonance, en générale, dépend des propriétés élastiques et de la masse du système.

$$f_r^0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{M}} \quad (2-16)$$

f_r^0 La fréquence de résonance sans charge.

Si l'actionneur est soumis à une charge de masse M_0 . Dans ce cas, la fréquence de résonance du montage est liée à celle de l'actionneur tout seul par la relation suivante :

$$f_r^1 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{M+M_0}} = f_r^0 \sqrt{\frac{k}{M+M_0}} \quad (2-17)$$

f_r^1 La fréquence de résonance avec charge.

Le temps de réponse minimum est borné par des contraintes physiques à 1/3 de la période de résonance.

$$t_{min} \approx \frac{1}{f_r} \quad (2-18)$$

2-3 Différents types de nano positionnement piézoélectrique :

Il existe une limite élastique à leur déformation comme à tous les matériaux:

Il y a donc plusieurs méthodes pour palier cet allongement. La majorité fonctionne à l'aide de Piezoceramique, et dont la déformation est amplifiée par tube, empilement, effet de levier ou Flexion.

1-3-1 Les actionneurs à tubes piézoélectriques

C'est le moyen le plus répandu qui assure les déplacements dans les trois directions de façon Simple, efficace et précise. Le principe consiste à :

- Métalliser à l'intérieur et à l'extérieur un tube piézoélectrique généralement en PZT. C'est de l'aluminium, du chrome, du nickel ou de l'argent.

- Découper l'électrode extérieure en quatre segments de surface égale soit par voie chimique à l'acide nitrique dilué (procède répandu mais par abrasion mécanique au moyen d'une meule Très fine).

- Appliquer une tension à une des quatre électrodes externes, tandis que les autres sont à la terre.

L'application des champs électriques implique une déformation du matériau (figure 2-7). Le résultat est une légère courbure du tube qui permet d'induire des déplacements contrôlés suivant x et y. Il est donc possible de générer facilement des allongements qui vont du nanomètre aux microns. Le déplacement selon z (le long de l'axe du cylindre) est obtenu en ajoutant sur l'électrode interne (ou les quatre électrodes externes), une tension déterminée qui se traduira par un allongement ou une contraction global du tube. La géométrie habituelle d'un tube est de quelques centimètres de long d'une épaisseur de 0.6 à 0.1 mm et un diamètre compris entre 5mm et quelques centimètres [31].

L'allongement du tube est lié au coefficient de charge d_{31} et la relation entre l'élongation ΔL la Longueur L et l'épaisseur e quand il est soumis à une différence de potentiel V , s'écrit :

$$\Delta L = d_{31} V \frac{L}{d} \quad (2-19)$$

La déformation peut donc être élevée si le rapport hauteur/épaisseur est grand. Ces nano positionneurs se retrouvent dans les systèmes de positionnement ultra précis comme des miroirs de déviation optique et la microscopie AFM (microscopie à force atomique) et aussi dans les disques durs pour orienter la tête de lecture [32]. Pour diminuer les niveaux de tensions mis en jeu, on fait appel à des céramiques multicouches (empilements).

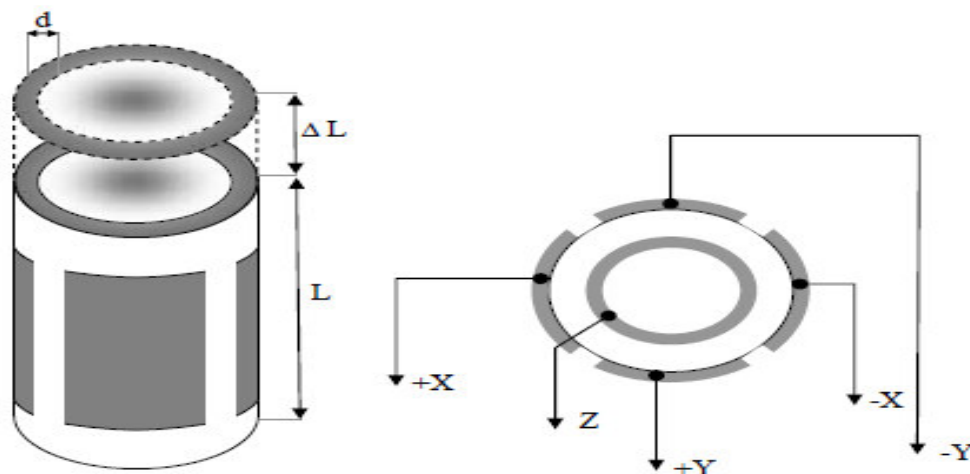


Figure 2-7.actionneur à tube piézoélectrique

2-3-2 Les actionneurs à empilement piézoélectrique

Afin d'améliorer leur comportement comme actionneurs, de techniques nouvelles de mises en forme sont apparus: les actionneurs à empilement piézoélectrique. On peut empiler des disques en céramique montés, mécaniquement en série et électriquement en parallèle de (0.2 à

1mm), de tel sorte qu'une seule céramique génère une déformation de 0.1% et un réseau multicouche avec un déplacement de $10\mu\text{m}$. Les électrodes sont comprises entre deux surfaces métalliques, l'une connectée à la tension de contrôle et l'autre à la terre [33]. Leur déformation vaut :

$$\Delta L = d_{33} \cdot n \cdot V \quad (2-20)$$

Où

n - le nombre de couches.

Des allongements de 0.15% sont possibles pour des tensions de 100V. En outre, plus les disques sont minces, plus les champs électriques appliqués et les déformations obtenues pour une tension donnée sont importants. Ces structures sont délicates à réaliser, elles sont chères. La mise en parallèle du nombre de céramiques fait que la capacité totale est élevée, limitant la bande passante et impose l'utilisation d'amplificateurs qui peuvent fournir plus de courants.

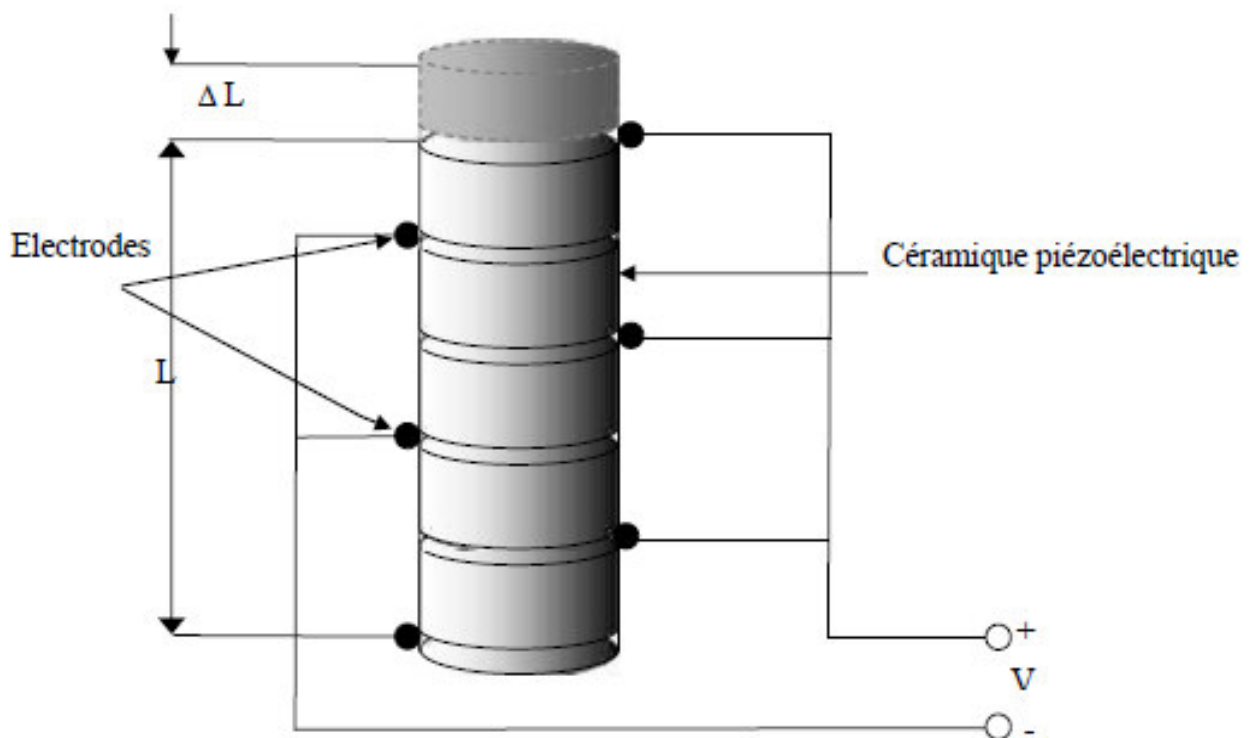


Figure. 2-8 Les actionneurs à empilement piézoélectrique.

2-3-3 Les actionneurs à effet de levier :

IL existe de nombreuses techniques d'amplification telles que des leviers. Dans les systèmes d'évier, l'amplification est réalisée avec des bras de levier qui amplifient le déplacement.

La force de sortie de la manette système est nettement plus petite que la force de l'actionneur. On profite de la grande force générée par les piézoélectriques, par effet de levier on amplifie le déplacement.

$$\Delta L = r\Delta L_0 \quad (2-21)$$

Où

r :est le coefficient du pied de levier.

On peut mettre plusieurs leviers en cascade pour obtenir une amplification de mouvement élevée. De préférence, on utilise des systèmes à structure flexible afin de supprimer les frottements et les jeux [34].

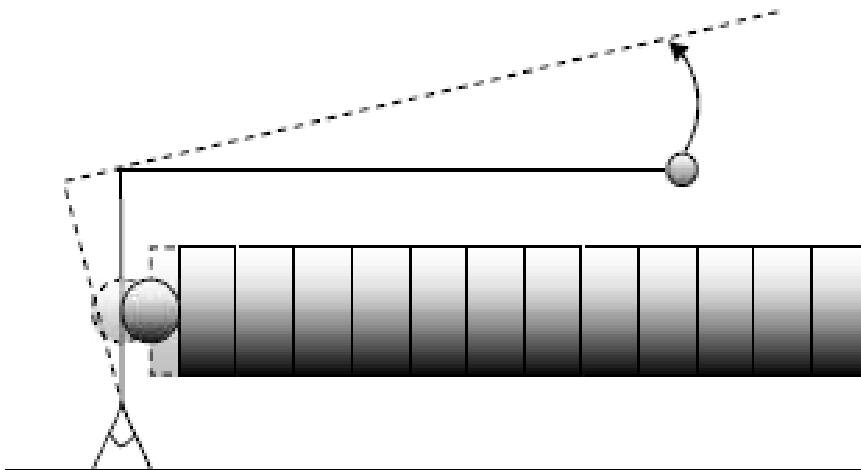


Figure.2-9 Les actionneurs à effet de levier.

2-3-4 Les actionneurs piézoélectriques de flexion.

Les actionneurs piézoélectriques de flexion développée des déformations relativement importante. Ces éléments sont fabriqués à partir de deux plaques minces en céramique piézoélectriques collées et soumises à une différence de potentiel à leurs bornes. Ils subissent une expansion transversale, de la même manière selon le coefficient, d_{31} mais de valeur opposée.

Le premier subit une dilatation sur la face collée, le second, une contraction. Les deux vont alors fléchir. Cette déformation sera d'autant plus importante que le rapport entre la longueur et l'épaisseur est grande. L'inversement de la polarité de tension de commande se traduit par l'inversement de la direction de la déformation. On distingue deux types piézoélectriques de flexion série et parallèle [34] (figure 2-10, a.b).

2-3-4-1 Les actionneurs de flexion série :

Les deux plaques piézoélectriques sont polarisées dans des directions opposées (figure 2-10, a). Lorsque ces dernières sont soumises à une tension, l'une des plaques subit une contraction tandis que l'autre subit une expansion. La déformation est donnée par l'expression suivante:

$$\Delta L = \frac{2L^2}{T^2} d_{31} V \quad (2-22)$$

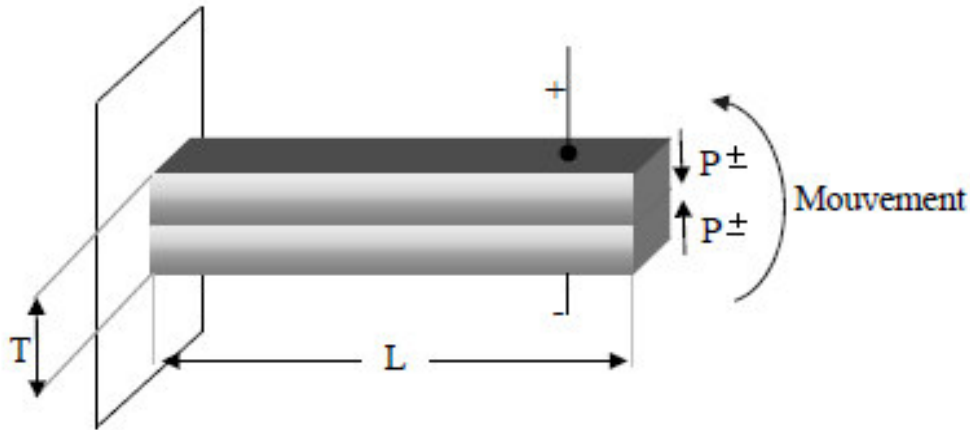


Figure 2-10 (a) Les actionneurs de flexion connexion en série.

2-3-4-2 Les actionneurs de flexion parallèle

Dans ce type, l'électrode est située entre les deux plaques céramiques. La polarisation de ces deux plaques piézoélectriques est dans la même direction figure 2-10-b. L'expression de la déformation en fonction de la tension appliquée est :

$$\Delta L = \frac{4L^2}{T^2} d_{31} V \quad (2-23)$$

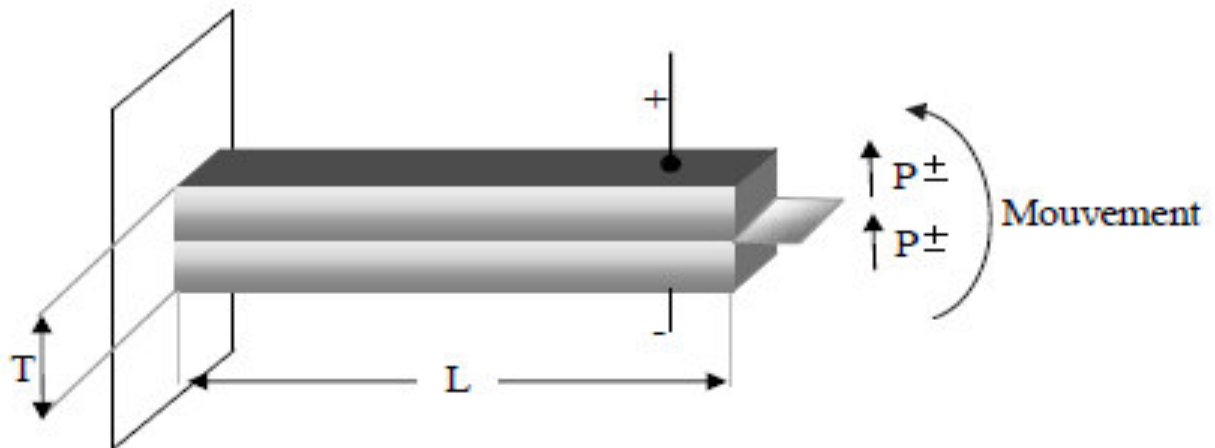


Figure 2-10 (b) Les actionneurs de flexion connexion en parallèle.

Remarque

La déformation obtenue par les actionneurs de flexion de connexion parallèle par la même tension est supérieure d'un facteur deux par rapport au type série car la tension de commande n'est pas totalement appliquée à chaque plaque, mais la capacité est quatre fois plus grande que le type série. Ces actionneurs ont une rigidité faible car ils sont longs et minces (environ 0.5mm d'épaisseur).

2-4 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons rappelé les définitions et les propriétés associées à la Piézoélectricité. Nous avons présenté également les matériaux piézoélectriques. Cette famille des matériaux comportent en leur sein un couplage électro-élastique fort. Ce couplage, qui n'a lieu que dans certains réseaux cristallins non axo-symétriques, est décrit par une série d'équations locales, appelées équations constitutives de la piézo-électricité. Le processus de fabrication de ces matériaux doit faire apparaître une phase de polarisation. Pour cela, ces matériaux nécessitent l'application d'un champ électrique intense (de l'ordre du kV/mm) pour leur polarisation.

3-1 Introduction

Les frottements dans un système constituent un phénomène important car il se produit entre deux systèmes matériels en contact, immobiles ou animés de mouvements. Les frottements sont un phénomène inhérent à tous les systèmes mécaniques. Pour étudier la précision du modèle, les frottements du système mécanique doivent être correctement modélisés et identifiés. Plusieurs auteurs ont proposés des modèles physiques et mathématiques dans le but d'étudier le maximum de phénomènes (frottements de coulomb, frottements visqueux, pré-déplacement, hystérésis avec mémoire non locale.....). L'existence d'une erreur statique due aux frottements est l'un des problèmes pénalisant à la pénétration industrielle des actionneurs piézoélectriques. Il existe différents phénomènes physiques à l'origine de ces frottements, Dans cette optique, il est important de bien comprendre les phénomènes physiques qui sont à l'origine de ces frottements. Dans notre cas, on a va proposer le modèle de LuGre .C'est l'un des modèles de frottements le plus complet et les plus proches de la réalité, car il prend en compte les phénomènes physiques.

3-2 Description des frottements

Certaines théories sont basées sur un modèle géométrique qui suppose que chaque corps n'est pas lisse mais possède des aspérités qui sont enchevêtrées les unes dans les autres. La figure 3-1 illustre les microrugosités de deux surfaces en contact.

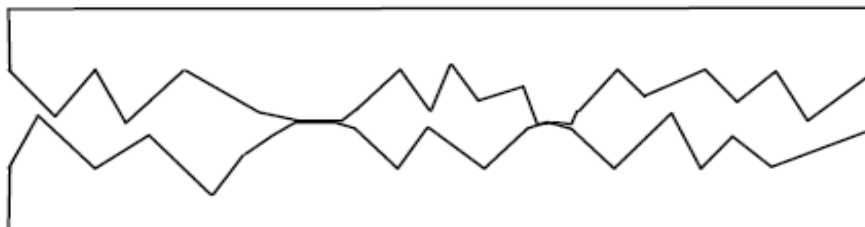


Figure 3-1 Contacts entre deux solides[55]

Comme le montre la figure 3-1, la surface est rugueuse, comportant des irrégularités. Lorsque deux pièces mécaniques en contact se déplacent l'une par rapport à l'autre, ces aspérités varient et se déforment. Pour limiter ces frottements secs, on lubrifie les systèmes mécaniques pour obtenir des frottements humides. Ainsi une pellicule de liquide s'interpose entre les deux pièces en mouvement,(figure 3-2).

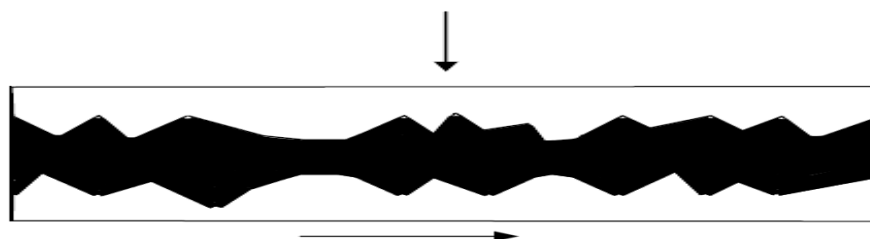


Figure 3-2 Effets de lubrification sur le déplacement de deux solides[55]

La figure 3-3 montre les différents types de frottements dominants en fonction de la vitesse [56] frottement.

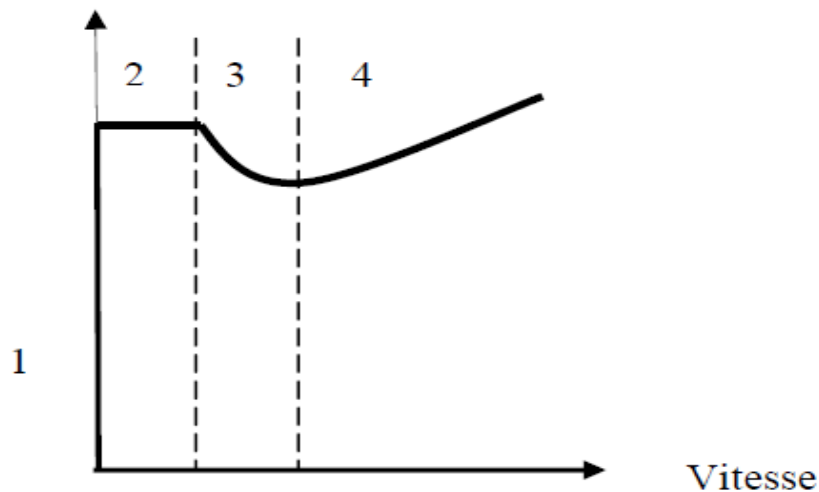


Figure 3-3 Différents phénomènes de frottements en fonction de la vitesse [55]

Régime 1: Frottement statique

La vitesse du solide est nulle, sa surface est collée à celle du support. La force n'est pas assez élevée pour engendrer un déplacement, il n'y a que des déformations plastiques.

Régime 2: Lubrification limite Pour ce régime

La vitesse n'est pas assez élevée pour qu'un film de lubrification se forme pour soulever des surfaces en contact. Ce type de frottements est indépendant de la vitesse.

Régime 3: Lubrification partielle

La vitesse de glissement augmente, le lubrifiant devient important, ce qui provoque la diminutions de la force de frottement. Cet effet est appelée effet Stribeck, son allure dépend des propriétés du fluide.

Régime 4: Lubrification totale

Il y a lubrification totale au delà du minimum. La force de frottement devient la force de viscosité proportionnelle à la vitesse de déplacement.

3-2-1 Modélisation des frottements

De nombreux modèles de frottements sont proposés dans la littérature. Ces modèles peuvent être très simples à très complexes, jusqu'à la tribologie. La prise en compte des frottements secs et lubrifiés a donné naissance au modèle le plus couramment utilisé en ingénierie le modèle.

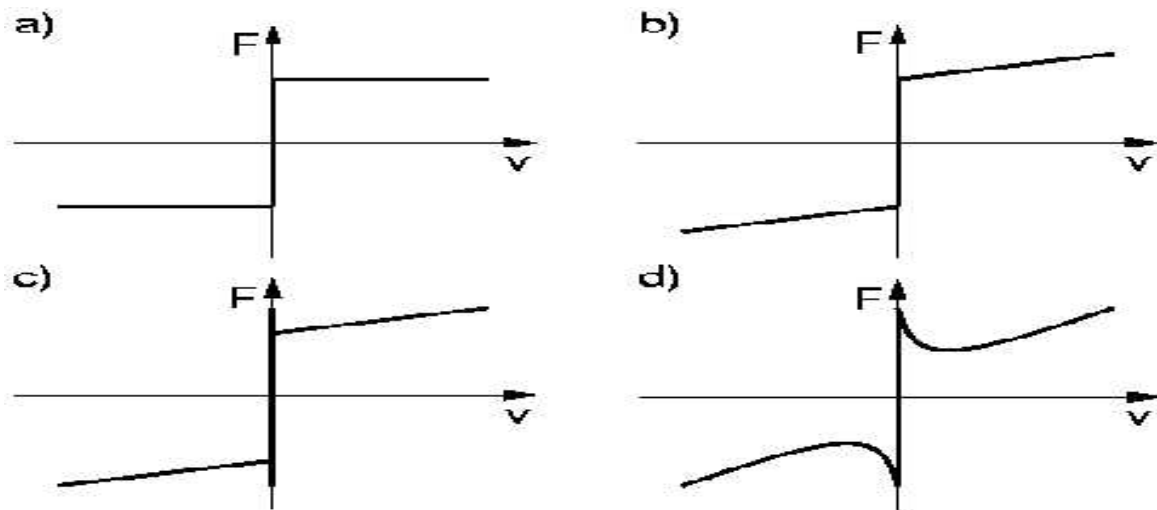


Figure 3-4 Modèles de frottements statiques [55].

a) Modèle de coulomb

b) Modèle coulomb+visqueux

c) Modèle coulomb +visqueux +statique

d) Modèle complet avec effet Stribeck. Coulomb + Statique +Visqueux frottements mixte.

tribeck, par ces travaux, a montré que le coefficient de frottement mixte décroît dans un premier temps lorsque la vitesse de déplacement augmente jusqu'au minimum pour ensuite croître en fonction de la vitesse. La figure 3-4 montre quelques modèles de frottements statiques.

Les modèles statiques ne considèrent que les forces de frottements à une vitesse constante.

Alors qu'en réalité des phénomènes dynamiques existent. En les introduisant physiquement, les liaisons entre les aspérités peuvent être comparées à des ressorts (figure 3-5). Cette comparaison permet d'expliquer plusieurs phénomènes physiques [35].

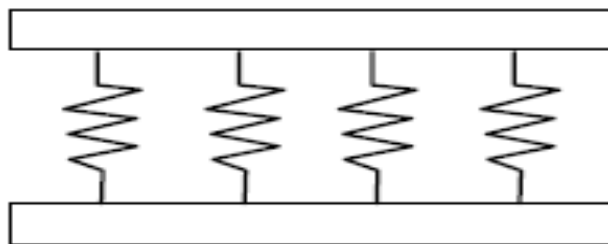


Figure 3-5 Modèle de ressort des aspérités.[55]

3-2-2 Description du Modèle de LuGre

Le modèle de LuGre est issu d'une collaboration entre les universités du Lund (suède) et de Grenoble (France) apparait comme le plus complet et le plus proche de la réalité. Ce modèle est Dans cette hypothèse, chaque lame représente une aspérité de surface en contact avec une autre aspérité de l'autre surface. Ainsi, par la flexion des lames, on peut aussi modéliser la déformation plastique des surfaces avant leur déplacement. En effet ce modèle est identique à celui des ressorts.

Nous avons introduit une nouvelle description du phénomène de frottement, il s'agit d'un modèle dynamique nommé LuGre décrit par les équations suivantes [35] :

$$\frac{dZ}{dt} = V - \frac{\sigma_0}{g(v)} Z|V| \quad (3-1)$$

Où

La variable Z décrit la déflexion moyenne pendant la phase de collage (striction);

v - la vitesse relative de déplacement des solides.

Le premier terme donne une déviation qui est proportionnelle à la vitesse relative.

Le second terme affirme que la déviation de Z s'approche de la valeur Z_S à l'état d'équilibre (Stable), c'est-à-dire quand V_S est constant.

$$Z_S = \frac{v}{|v|} g(v) \quad (3-2)$$

Avec :

$$g(v) = F_C + (F_S - F_C)e^{-(v/v_s)^2} \quad (3-3)$$

F_C : la force de Colomb.

F_S - la force statique,

V_s -la vitesse de Stribeck;

$g(v)$ - est une fonction continu dépendant de la vitesse v qui permet de décrire de façon arbitraire la caractéristique du frottement F_H en état stationnaire, et dépend aussi de nombreux facteurs tels que les propriétés des matériaux, la lubrification, la température. La force de frottement générée par la déviation des lames est donnée comme suit:

$$F_H = \sigma_0 Z + \sigma_1 \frac{dZ}{dt} \quad (3-4)$$

σ_0 : La rigidité des lames.

σ_1 : Le coefficient d'amortissement.

Un terme proportionnel à la vitesse pourrait être ajouté à la force de frottement pour tenir compte de frottement visqueux de sorte que la force de frottement résultant du modèle de LuGre soit

donc donnée par :

$$F_H = \sigma_0 Z + \sigma_1 \frac{dZ}{dt} + \sigma_2 V \quad (3-5)$$

Ou σ_2 : le coefficient de viscosité.

Le modèle donné par les équations (3-1) et (3-5) est caractérisé par la fonction $g(v)$ et les paramètres, σ_0 , σ_1 , et σ_2 .

La figure ci-dessous montre en vue microscopique le frottement entre deux surfaces en contact.

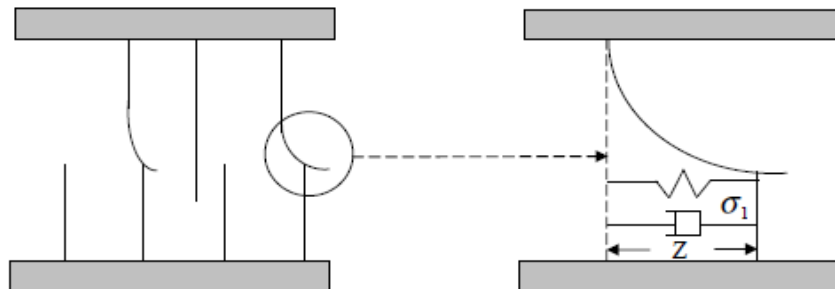


Figure 3-6 Vue microscopique du frottement entre deux surfaces en contact.[55]

3-3 Introduction sur le mécanisme de positionnement piézoélectrique :

L'actionneur piézoélectrique est un dispositif bien connu pour générer d'extrêmes petits déplacements dans la gamme de 10 pico mètre (pm) ($1\text{pm}=10^{-12}\text{ m}$) à 100 micron mètre. Ces dernières années, ces actionneurs sont utilisés dans les applications de positionnement de haute précision, cela grâce à leurs propriétés spécifiques : résolution à l'échelle du nanomètre (précision très élevée) ; une bonne rigidité, une réponse rapide. Le comportement des MPE est fortement non linéaire, il représente les variations des paramètres physiques du matériau (coefficients diélectriques, mécaniques et piézoélectriques) en fonction des grandeurs telles que le champ électrique, la contrainte, la température ou même l'humidité[36], la dérive lente de la déformation en fonction du temps et l'hystérésis entre la tension appliquée aux bornes de l'actionneur et la déformation du matériau. Ces non linéarités mènent à l'inexactitude et l'instabilité quand le MPE est en boucle ouverte [37]. De plus, les caractéristiques de l'hystérésis de MPE sont habituellement inconnues et il est difficile d'établir un modèle dynamique du système avec un effet de l'hystérésis. Les techniques de la modélisation de MPE ont été présentées par plusieurs études, cependant celles-ci utilisent toujours un argument mécanique avec des équations différentielles partielles complexes et difficiles à résoudre. Le modèle de Preisach a été appliqué pour la désignation du contrôle pour un système avec hystérésis [38] [39]. Dans ces études, la fonction de Preisach a été utilisée pour décrire la dynamique de non linéarité de système avec hystérésis, tels que les systèmes électromagnétiques et les MPE. La fonction de Preisach a prouvé qu'elle peut être un outil pour décrire approximativement l'hystérésis; cependant les équations mathématiques doivent permettre la détermination de la forme entre le déplacement à la sortie et le champ électrique

appliqué avec des fréquences variables. L'intégration de l'hystérésis de frottement dans la dynamique de mouvement autorise une fonction spécifique qui contient l'hystérésis de frottement, la charge externe (perturbation) et des variations des paramètres. Dans cette étude, le modèle choisi est celui de LuGre car c'est un modèle dynamique qui prend en compte un maximum de phénomènes. L'étude de ces phénomènes a permis d'établir des modèles toujours plus performants [40] [41].

3-4 Modélisation du MPE

D'après l'équation de la dynamique standard de Newton, le mouvement du mécanisme de positionnement unidimensionnel de MPE peut être exprimé par l'équation suivante [22]

$$M\ddot{x} + D\dot{x} + F_H + F_L = k_e U \quad (3-6)$$

Tel que :

M - la masse équivalente du MPE.

x- le déplacement.

k_e - le coefficient de tension à la force de MPE.

F_H - la force d'hystérésis de friction.

U - la tension appliquée au mécanisme de positionnement.

F_L - la charge de perturbation et D - le coefficient linéaire de friction.

E - nommée incertitude, définie par:

$$E = \frac{F_H + F_L}{M} \quad (3-7)$$

La dynamique du système obtenue par l'équation (3-6), peut être réécrite comme suit :

$$\ddot{x} = \frac{k_e}{M} U - \frac{1}{M} [D\dot{x} + F_H + F_L] \quad (3-8)$$

Le schéma fonctionnel décrit par l'équation (3-8) est donné par la figure 3-7

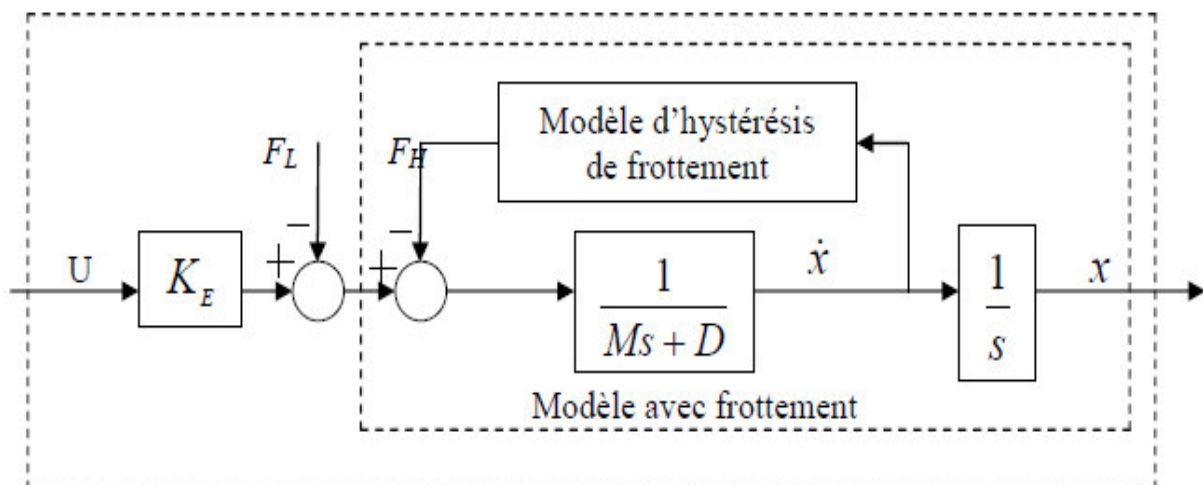
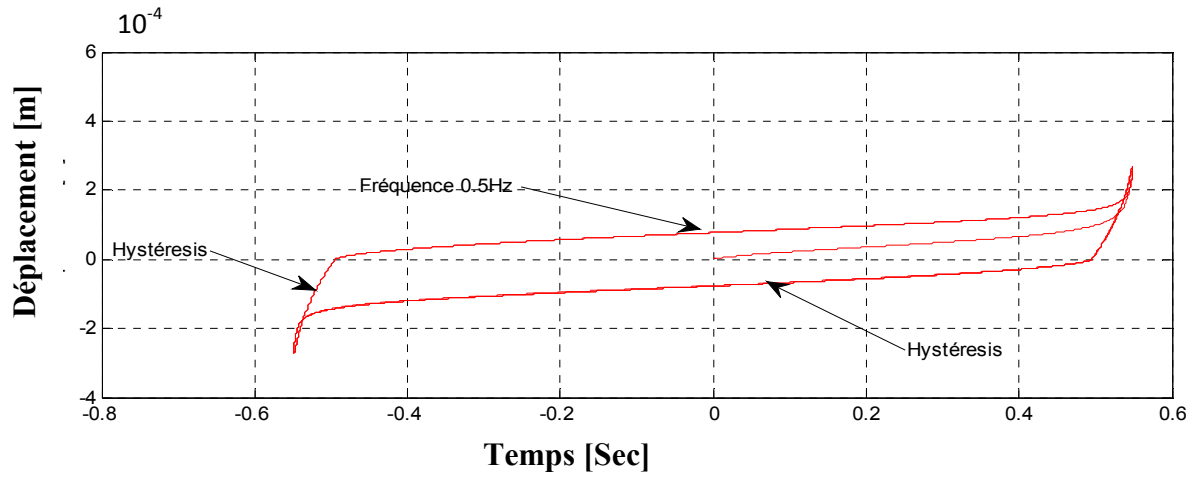
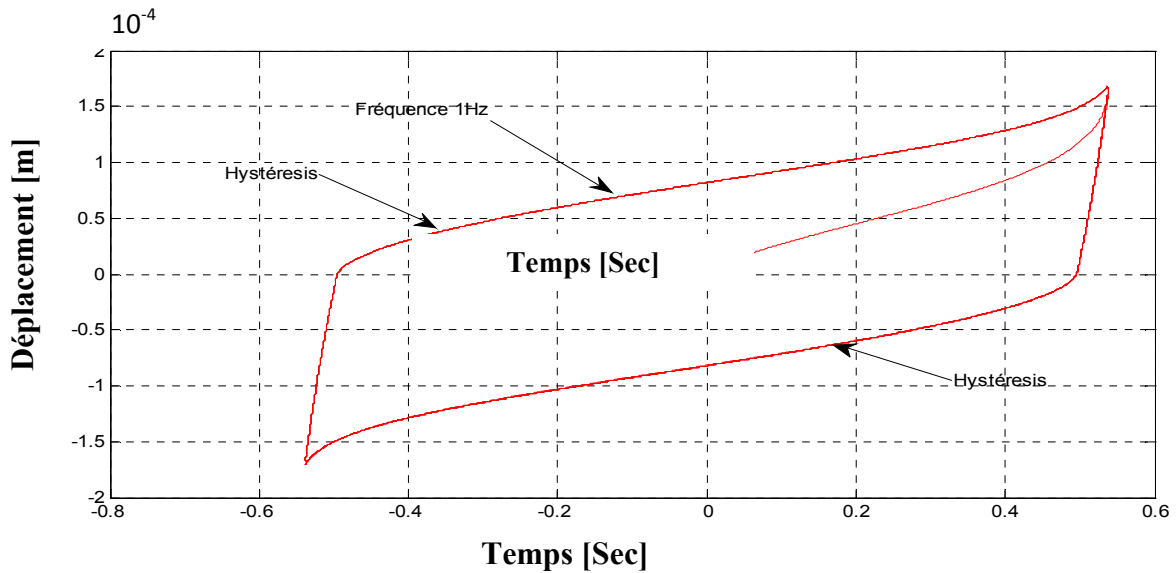
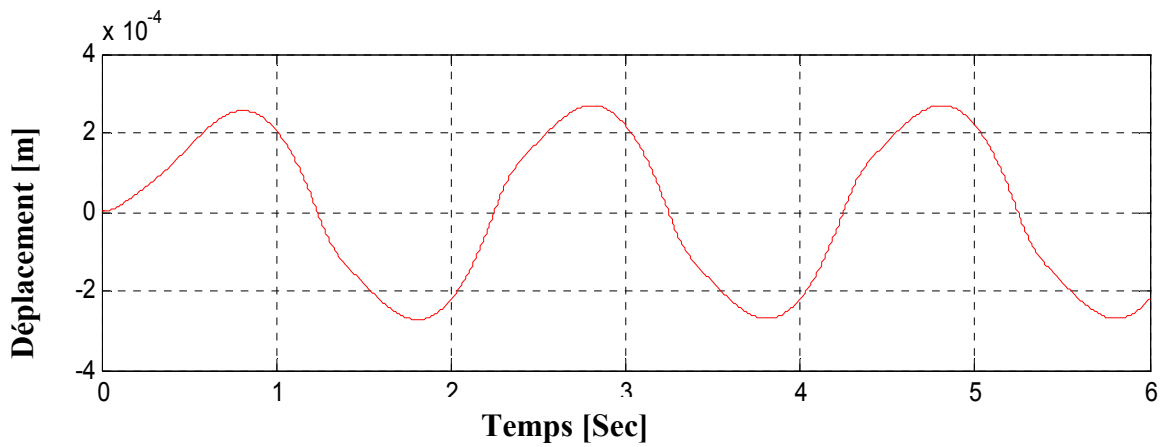


Figure 3-7 Bloc fonctionnel de modèle sans pré filtre.

1. Résultats de simulation en boucle ouverte

Figure 3.8 Caractéristique de l'effet d'hystérésis avec $f= 0.5$ Hz.Figure 3-9 Caractéristique de l'effet d'hystérésis avec $f= 1$ Hz.Figure 3-10 Résultat de simulation de la position pour $f=0.5$ Hz.

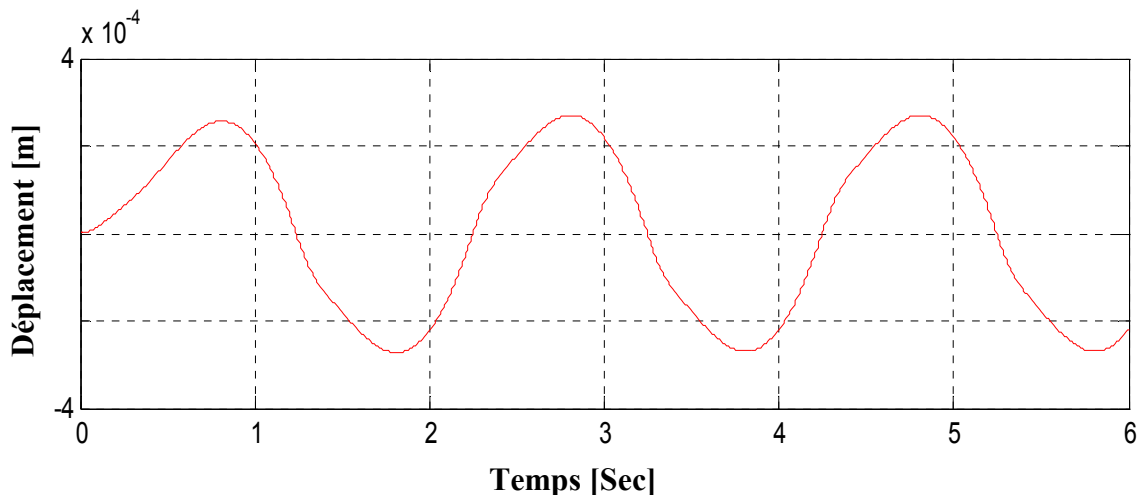


Figure 3-11 résultats de la simulation de la position pour $f=1\text{Hz}$

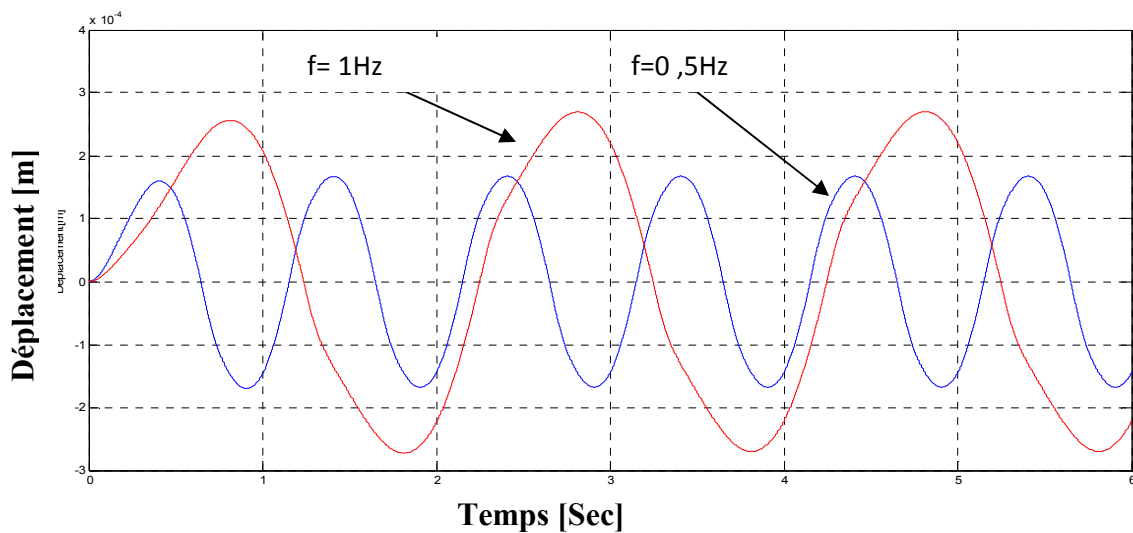


Figure 3.12 résultats de la simulation de la position pour les deux fréquences.

3-5 COMMANDE DE L'MPE

3-5-1 Introduction

L'objectif est de contrôler un système physique donné à travers une loi de commande de retour afin que le système en boucle fermée suive le comportement désiré. Quand les dynamiques souhaitées en boucle fermée sont importantes, les effets non linéaires dus à l'hystérésis se font sentir et la commande non linéaire est souvent nécessaire pour obtenir les performances souhaitées. Les MPE sont aujourd'hui couramment utilisés dans les applications de positionnement de haute précision. Cela est dû à leurs propriétés: haute raideur, réponse rapide, résolution de l'échelle nanométrique. L'inconvénient principal des MPE est la présence d'une hystérésis ; celui-ci peut atteindre 10 à 15% de la tension appliquée aux bornes de MPE. Le régulateur (PI) est un organe de contrôle permettant d'effectuer une régulation en boucle fermée. C'est le régulateur le plus utilisé dans l'industrie et permet de contrôler la

grande majorité des procédés. Cette commande a été réalisée à partir de la connaissance d'un modèle du système, établie à partir de son identification. Le but d'utilisation des régulateurs est d'assurer une meilleure robustesse vis-à-vis des perturbations internes ou externes. La boucle de régulation de déplacement est présentée par la figure-3-13.

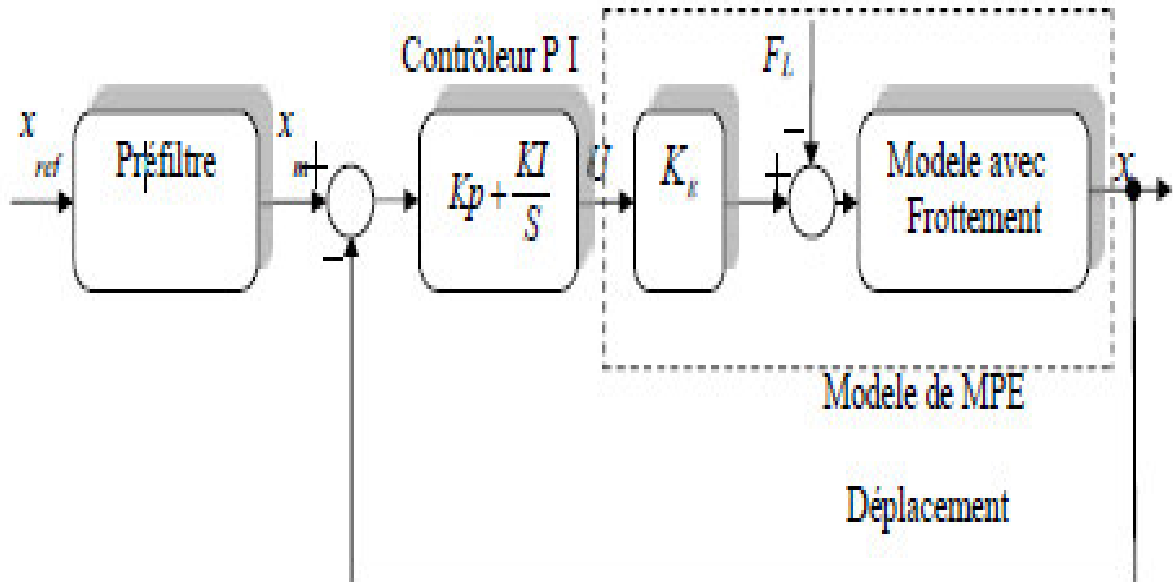


Figure-3-13 Schéma de bloc d'un régulateur PI

On a vu précédemment que le modèle de l'MPE est assimilé à un système de deuxième ordre, donc le schéma de commande de la figure (3-13) peut être représenté par la figure (3-14) suivante :

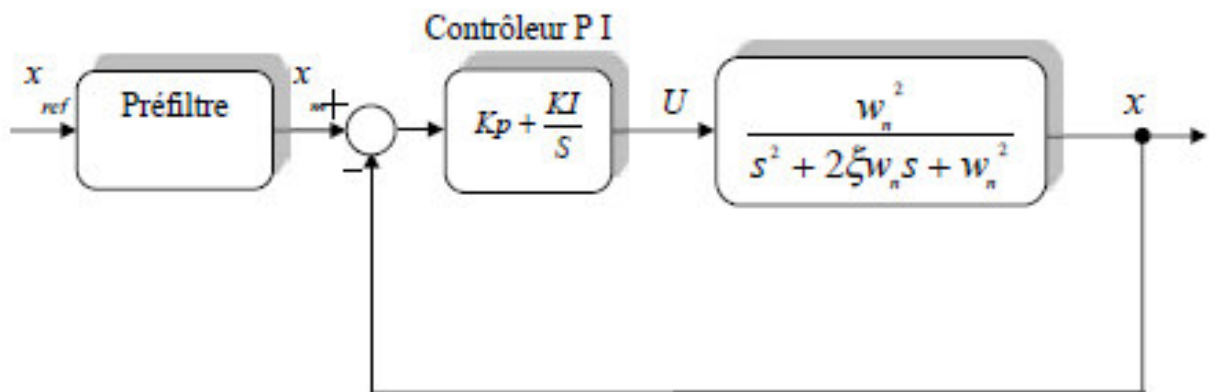


Figure 3-14 Schéma fonctionnel de la régulation de déplacement.

La fonction de transfert en boucle fermée de la (Figure.3-13.) est donnée par:

$$\frac{x_{ref}}{x} = \frac{(SK_p + K_I)w_n^2}{s^3 + 2\xi w_n s^2 + s_n^2 (1 + k_p) + k_i w_n^2} \quad (3-9)$$

L'équation caractéristique $D(S)$ est :

$$D(S) = S^3 + 2\varepsilon w_n S^2 + S_n^2 (1 + k_p) + k_i w_n^2 \quad (3-10)$$

En imposant une paire de pôles complexes conjuguées $S_{1,2} = \rho(-1 \pm j)$, en boucle fermée, par Identification, nous obtenons les paramètres du régulateur PI.

$$k_p = \frac{4\varepsilon w_n \rho - 2\rho^2 - w_n^2}{w_n^2} \quad \text{et} \quad k_i = \frac{4\varepsilon w_n \rho - 4\rho^3}{w_n^2}$$

La technique basée sur l'introduction d'un pré-filtre, est ainsi appliquée pour lutter de manière efficace contre les variations paramétriques. Ainsi, la trajectoire de sortie peut être spécifiée au moyen d'un pré filtre On utilise comme pré filtre du deuxième ordre donné par [39]:

$$G(S) = \frac{940}{S^2 + 42.92S + 940} \quad (3-11)$$

Avec $\varepsilon = 0.7$ et $\varepsilon w_n = 30.66 \text{ rad/s}$.

Le pré-filtre reflète les performances que l'on désire obtenir du mécanisme à contrôler.

3-5-2 Schéma de simulation

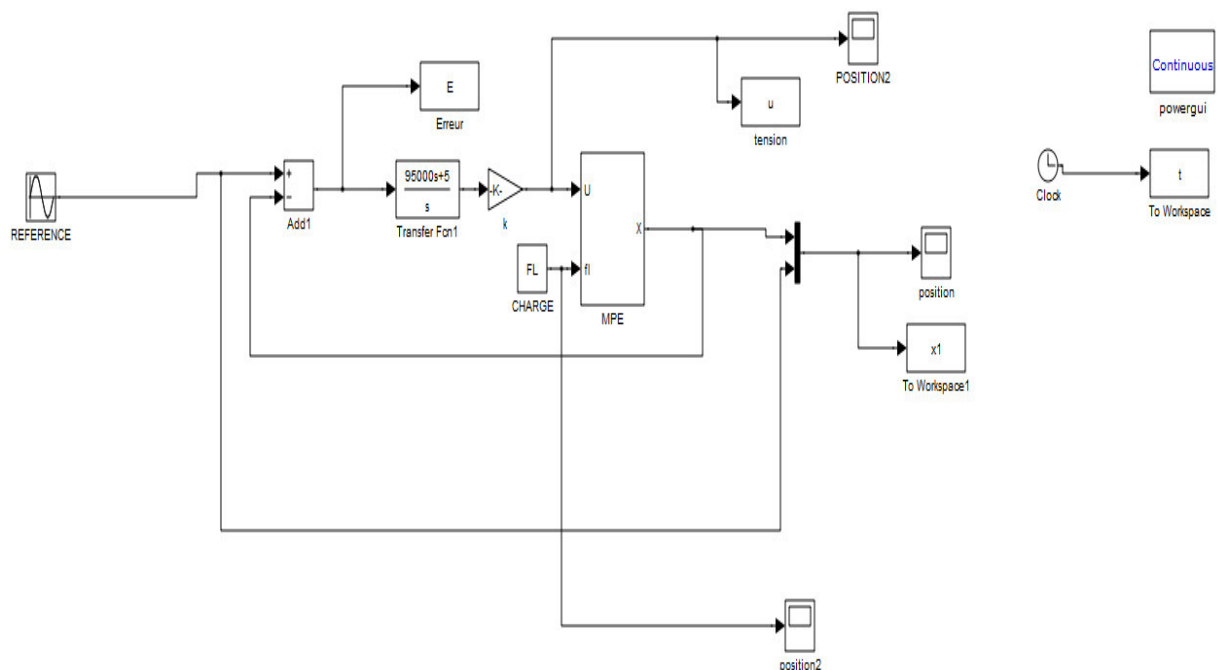


Figure 3-15 Schéma de simulation sous Matlab/Simulink.

3-5-3 Résultats de simulation

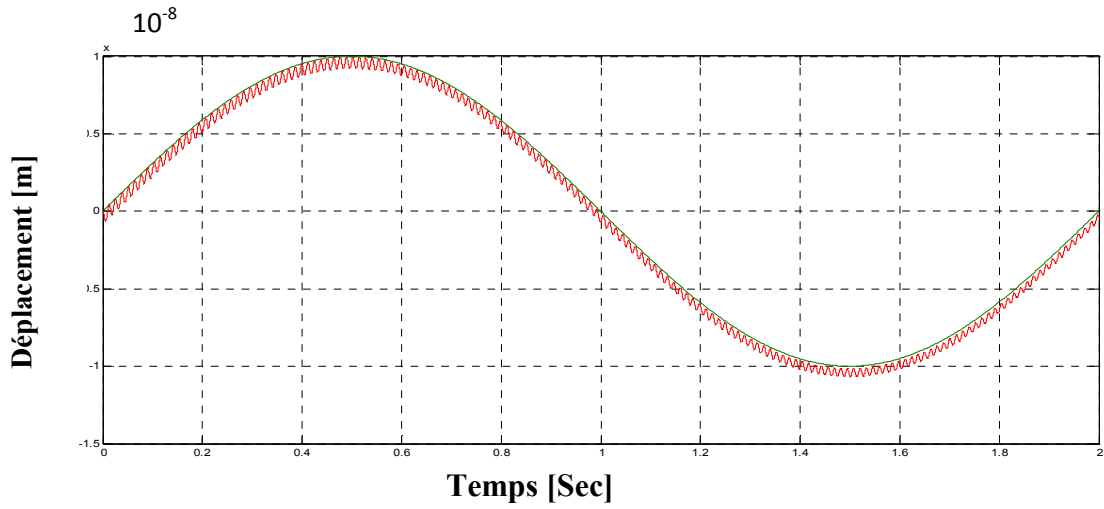
Résultats à vide $f=0.5$ Hz

Figure.-3.16: Résultats de simulation de la réponse en poursuite

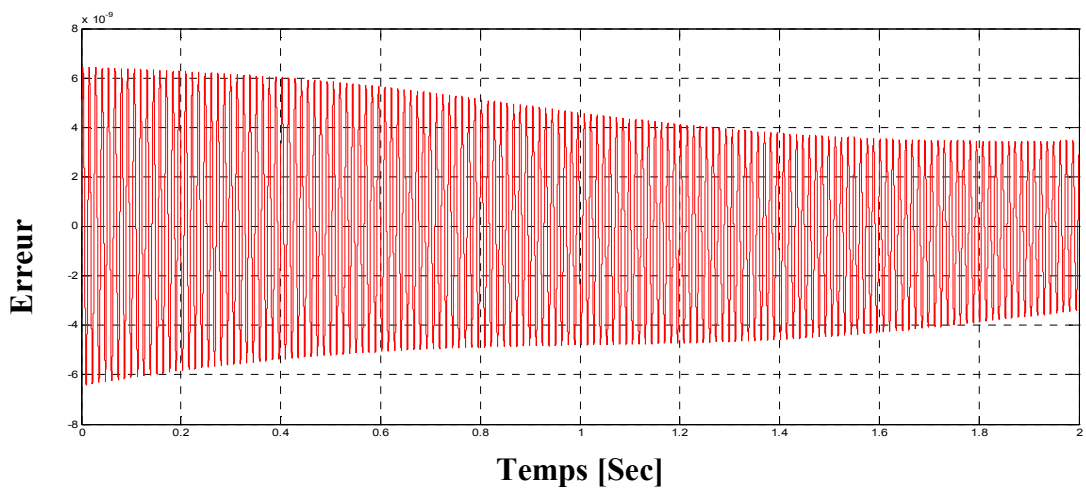


Figure.-3.17 Erreur en poursuite de la réponse par rapport à la référence.

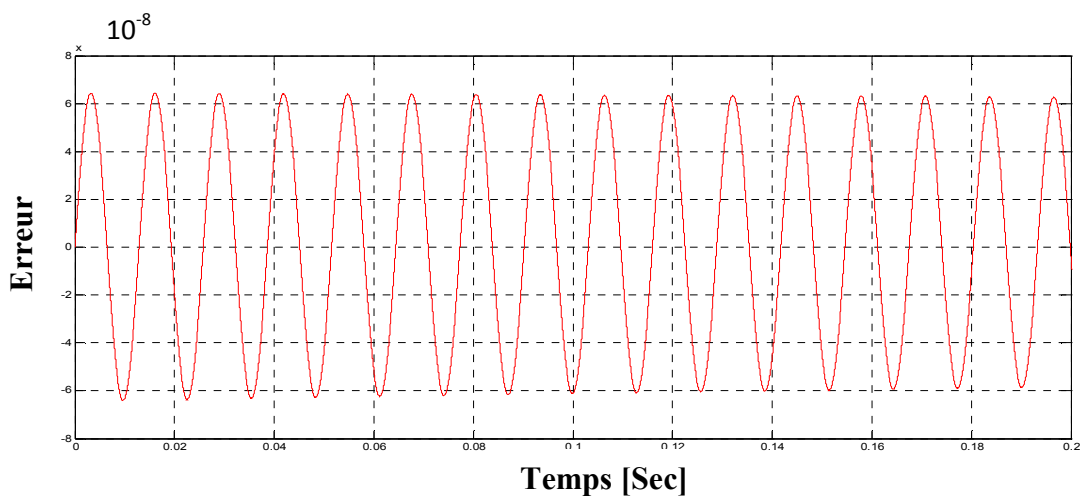


Figure.-3.18 Erreur en poursuite de la réponse par rapport à la référence (zoom).

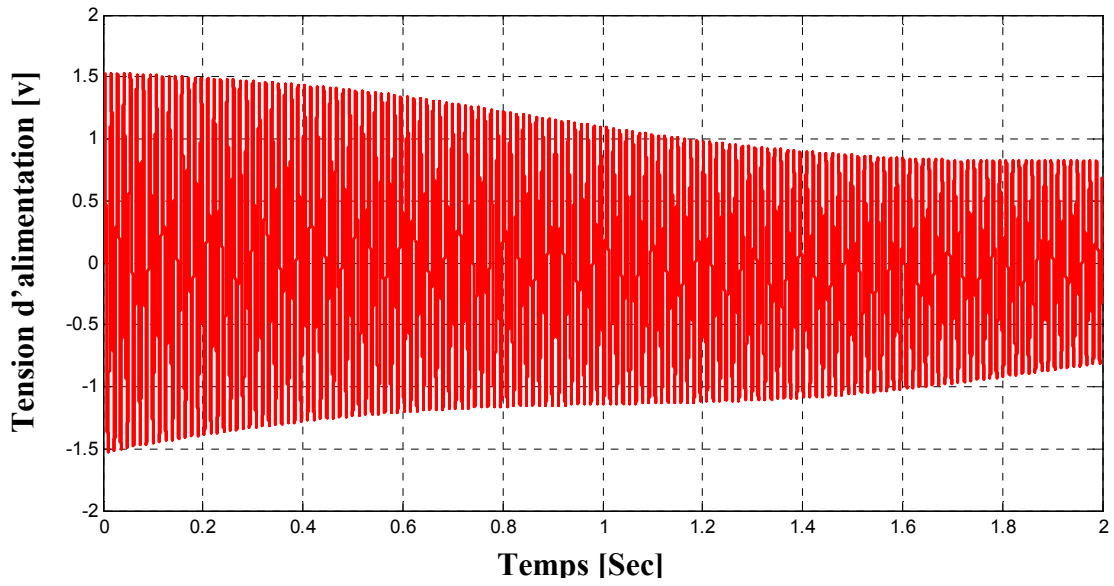


Figure -3.19 Tension d'alimentation.

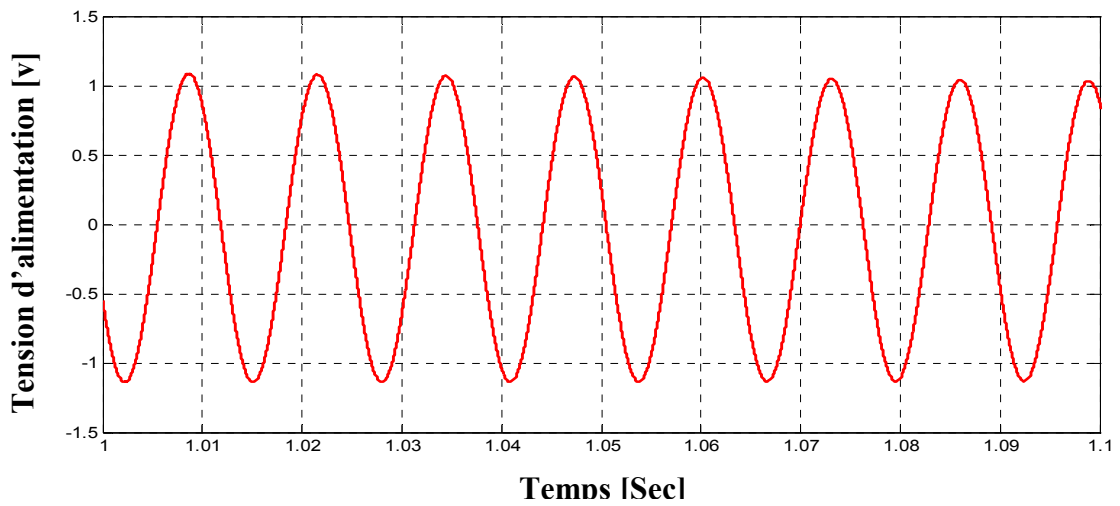


Figure 3.20 Tension d'alimentation (zoom).

En charge $f=0.5$ Hz

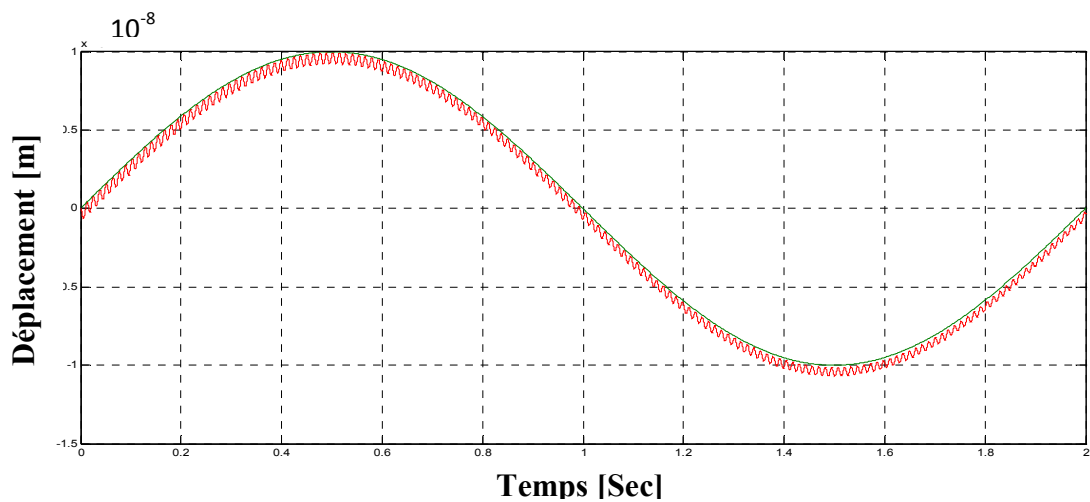


Figure -3.21 Résultats de simulation de la réponse en poursuite

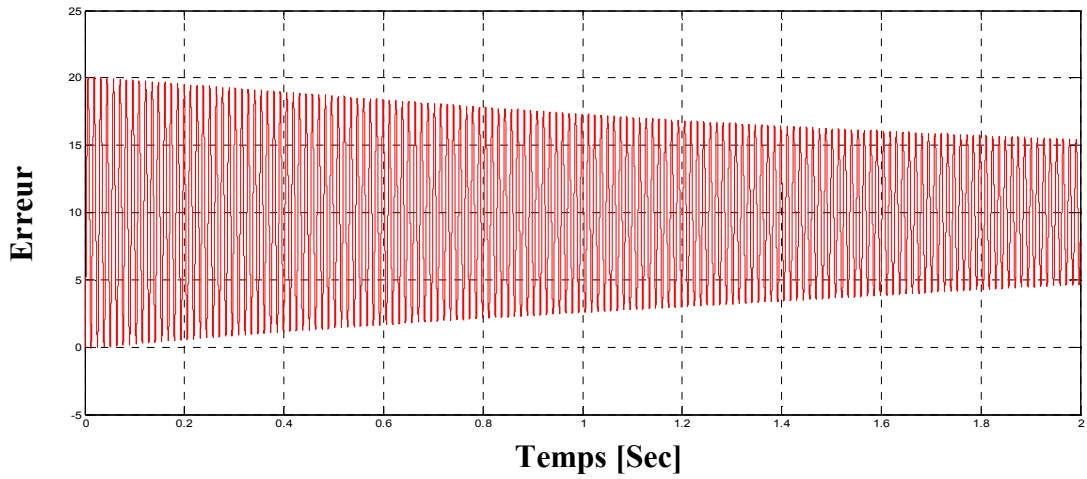


Figure -3.22 Erreur en poursuite de la réponse par rapport à la référence

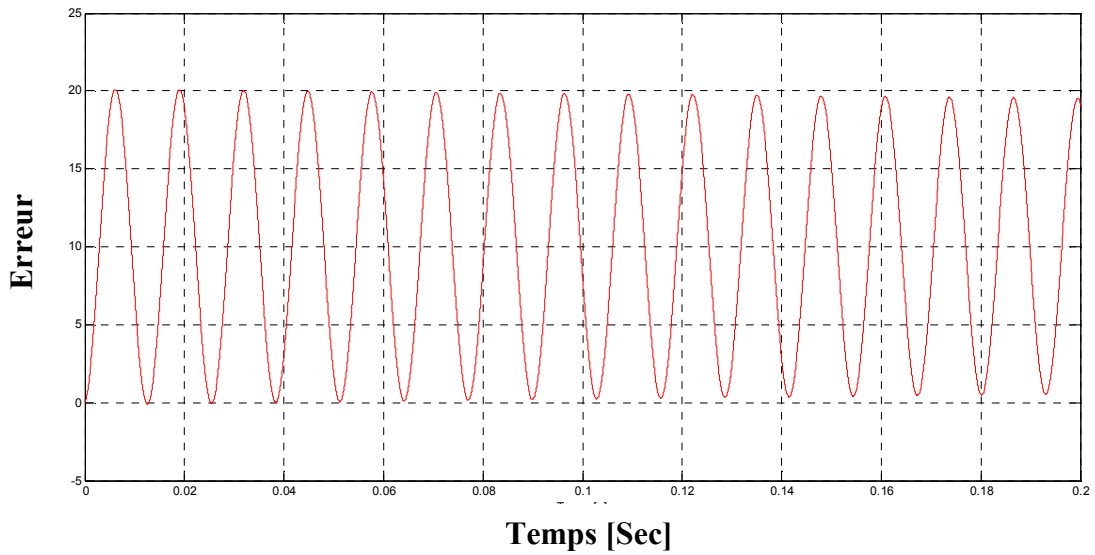


Figure 3.23 Erreur en poursuite de la réponse par rapport à la référence (zoom).

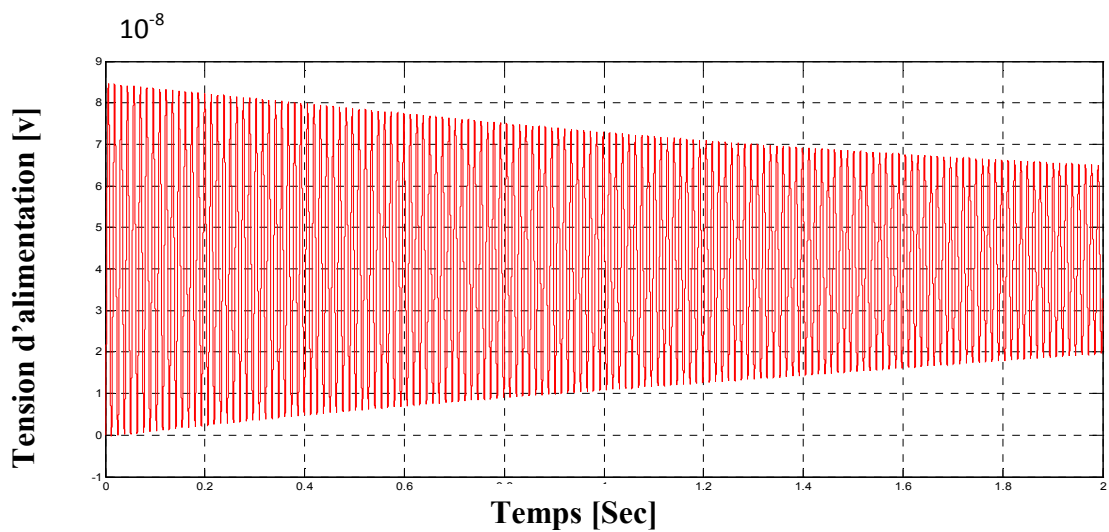


Figure 3.24 Tension d'alimentation.

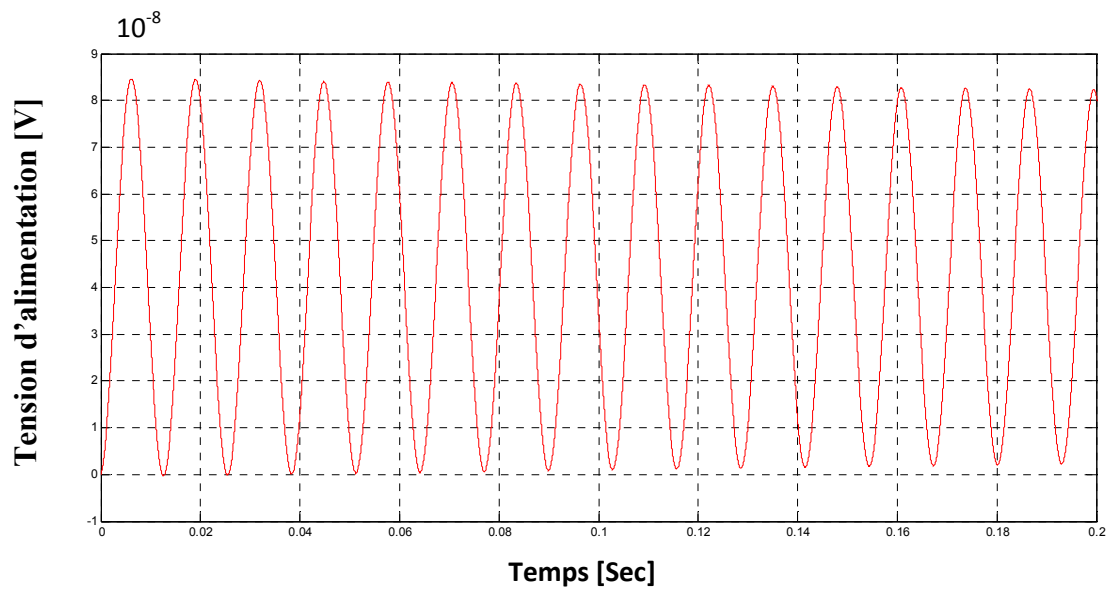


Figure-3.25 Tension d'alimentation (zoom)

à vide $f=1$ Hz

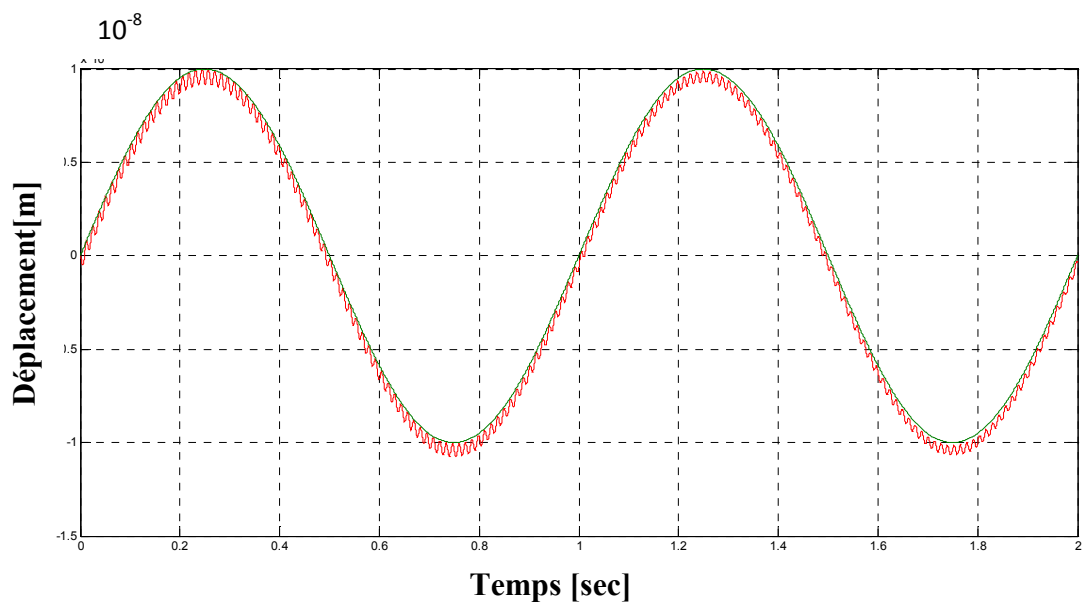


Figure -3.26 Résultats de simulation de la réponse en poursuite

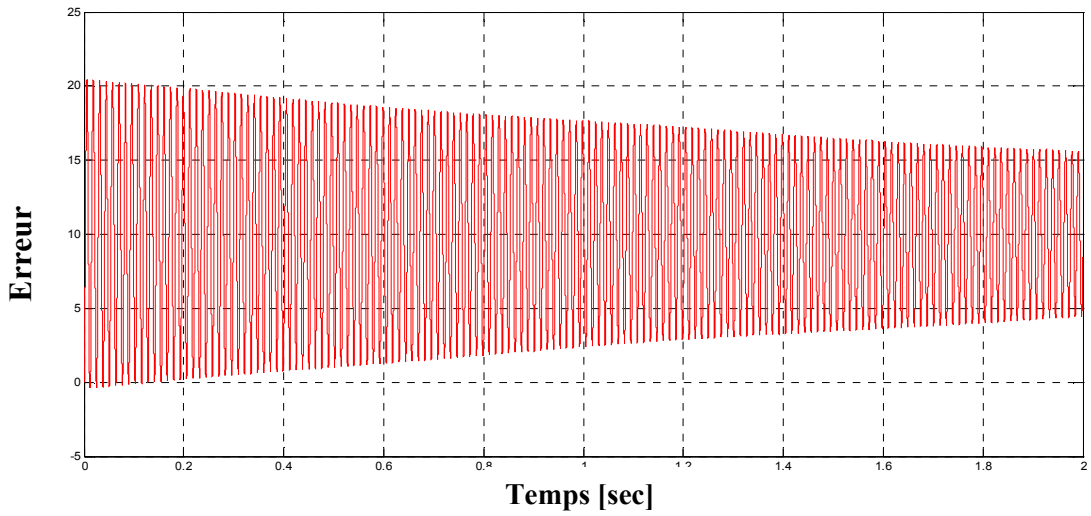


Figure -3.27 Erreur en poursuite de la réponse par rapport à la référence

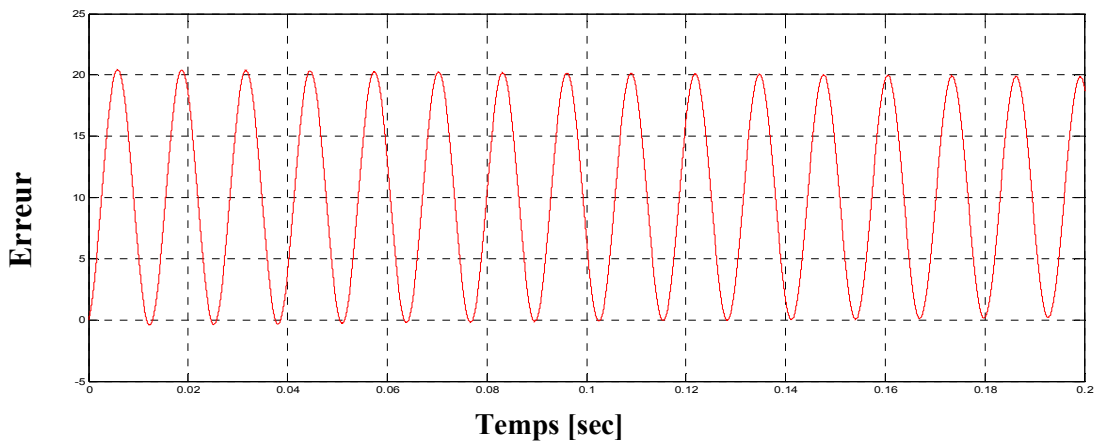


Figure -3.28 Erreur en poursuite de la réponse par rapport à la référence (zoom).

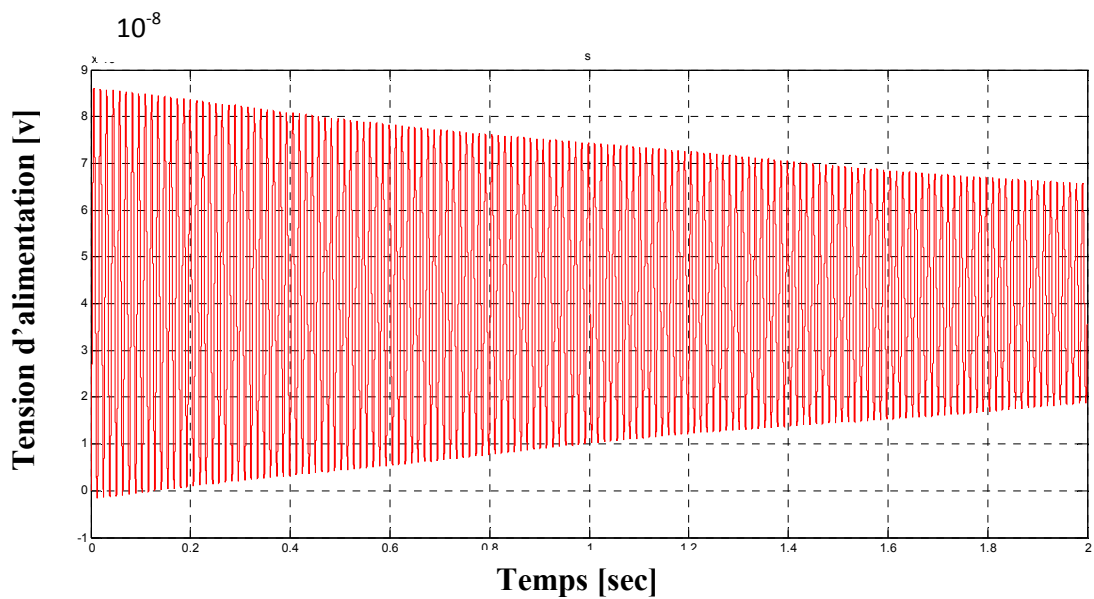


Figure -3.29 Tension d'alimentation.

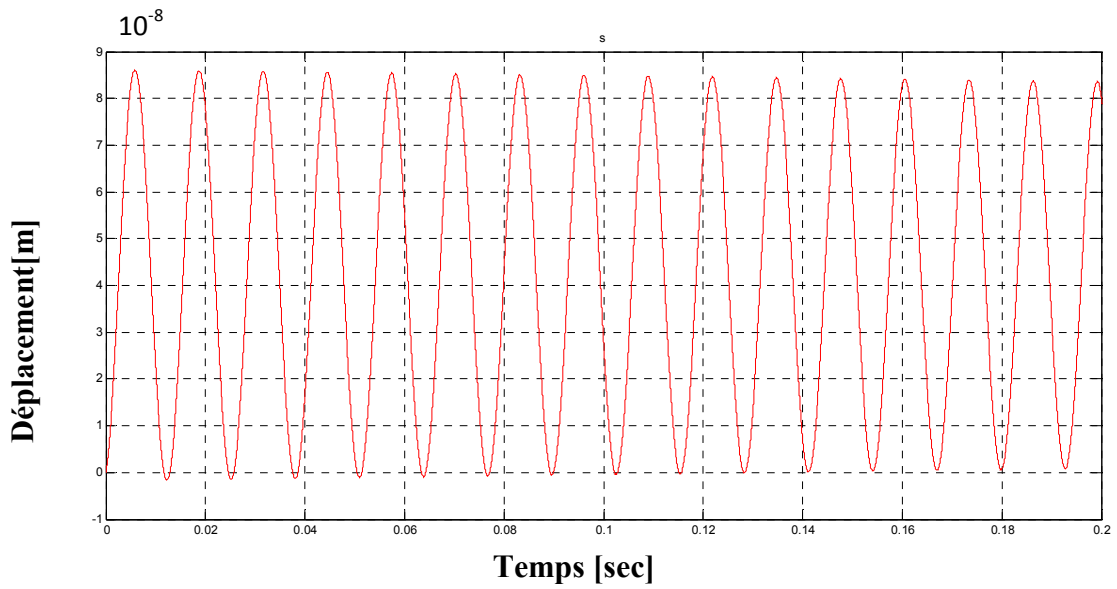


Figure -3.30 Tension d'alimentation (zoom).

En Charge $f=1\text{Hz}$

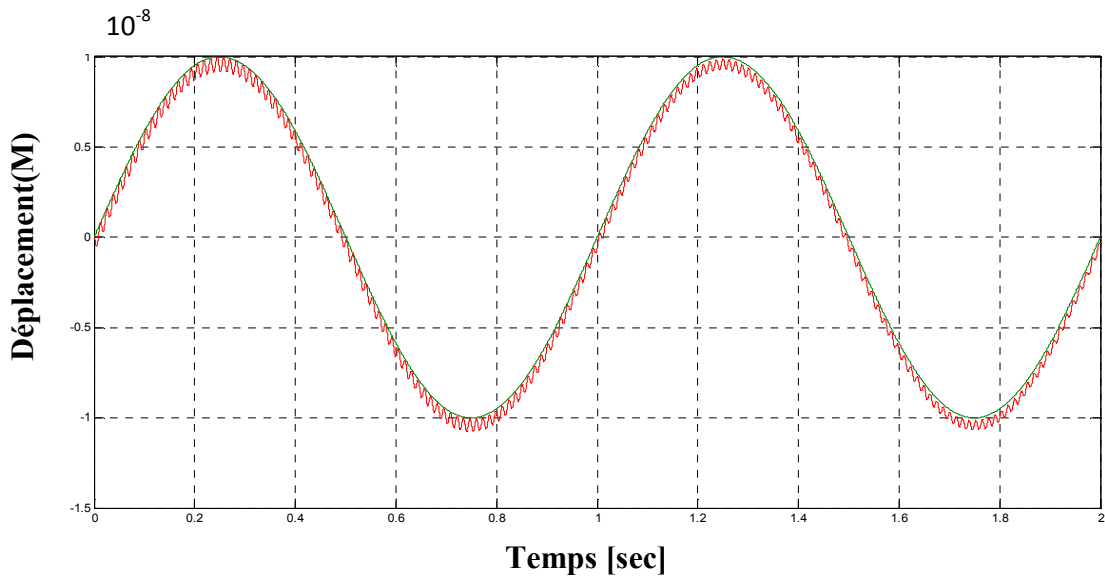


Figure -3.31 Résultats de simulation de la réponse en poursuite:

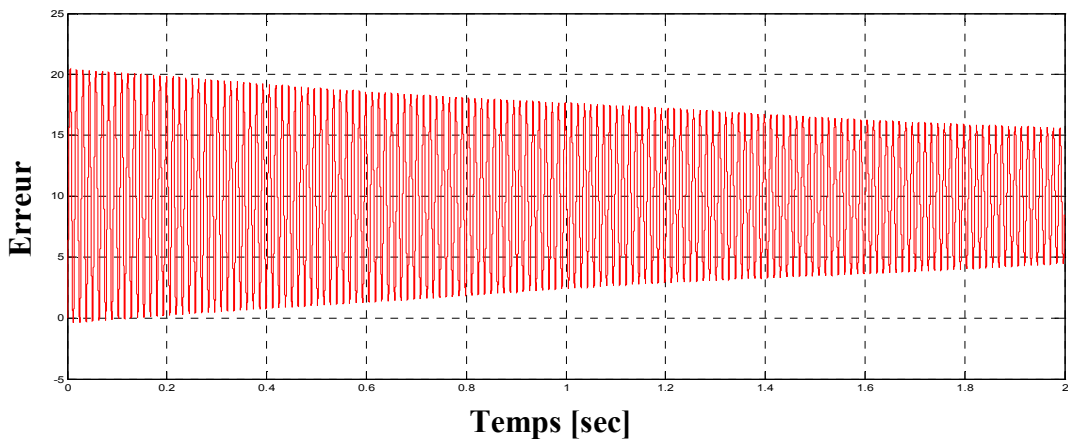


Figure -3.32 Résultats de simulation de la réponse en poursuite:

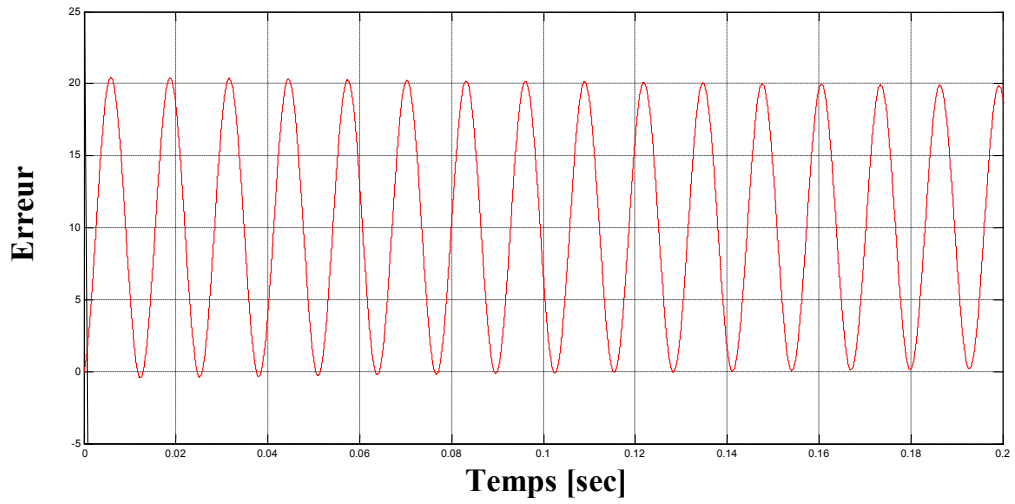


Figure 3-33 Erreur en poursuite de la réponse par rapport à la référence (zoom).

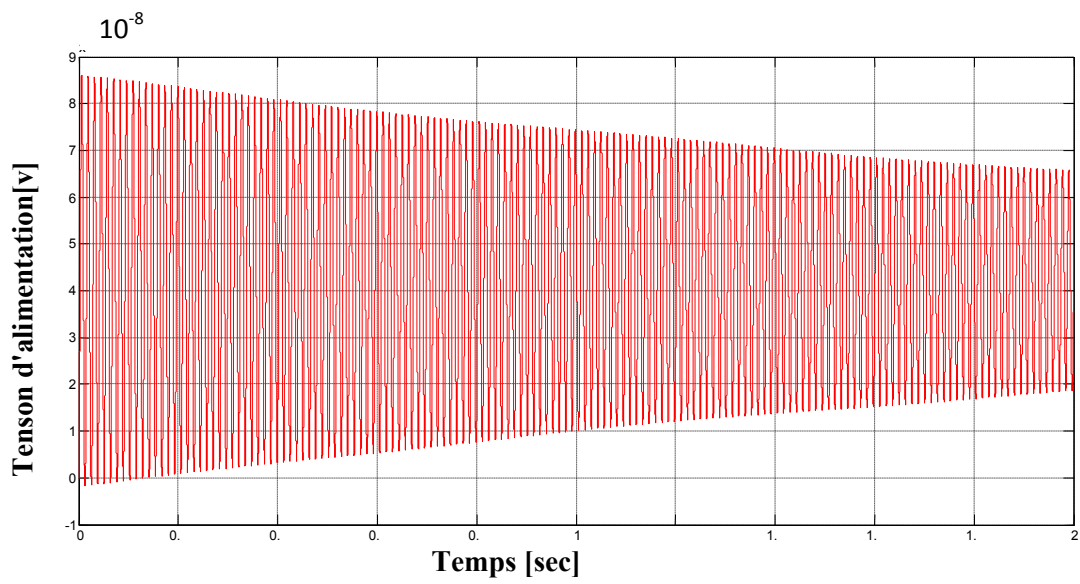


Figure 3-34 Tension d'alimentation.

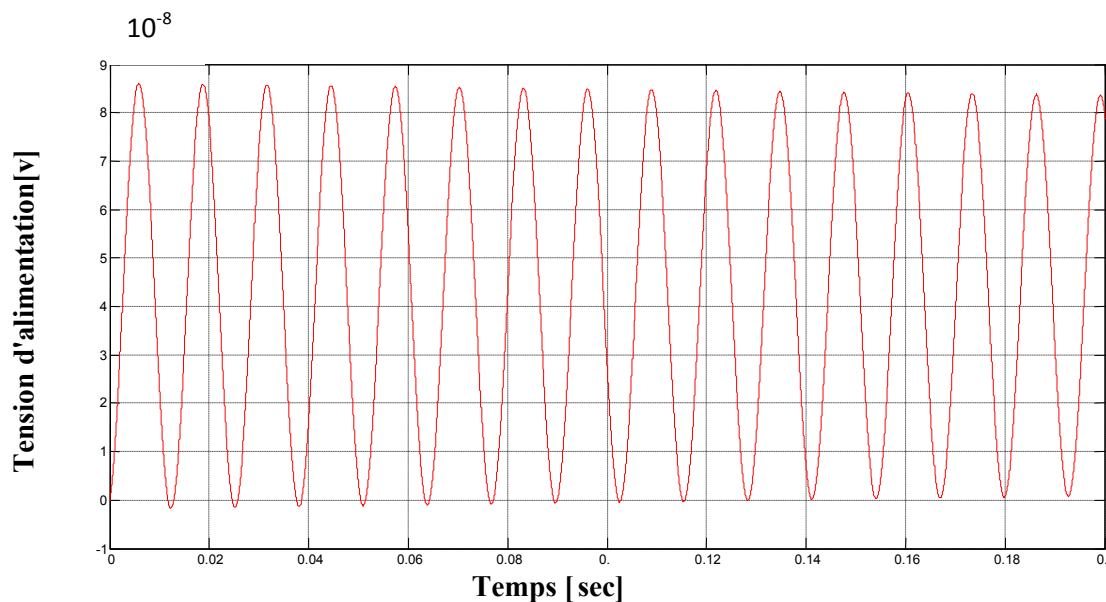


Figure 3-35 Tension d'alimentation (zoom).

3-5-4 : Interprétation des résultats

Il est à signaler qu'on a simulé le système global avec hystérésis par le régulateur PI, à l'aide du schéma bloc donné par la (figure 3.15). Les résultats de simulation ont été obtenus sous Matlab/Simulink, en appliquant à l'entrée un échelon sinusoïdal d'amplitude $10\mu\text{ m}$ avec des fréquences 0.5 Hz et 1Hz pour les cas suivants :

- a) La réponse en poursuite.
- b) Erreur en poursuite.
- c) La tension de commande.
- d) L'incertitude.

On a procédé aux essais suivants:

- Réponse en poursuite de déplacements;
- Application d'une charge (perturbation) de 10 N;
- Variations paramétriques de k_e .

Les figures 3.13 et 3.14 présentent les performances de la commande PI. La réponse suit celle générée par le modèle de référence. Ceci n'est pas une surprise puisque le modèle de LuGre est utilisé à la fois pour modéliser le MPE et pour générer la tension de commande en prenant en compte l'hystérésis. On voit que celle-ci est de l'ordre 1 volt. L'erreur reste bornée entre -10nm et +10nm.

Les figures 3.16 et 3.21 montrent que pour une variation d'une charge de 10 N, la grandeur de déplacement suit sa référence sans dépassement, ils se rétablissent à leurs valeurs permanentes. On en déduit que le système est parfaitement commandé avec rejet de la perturbation. Les figures (3.15) et(3.18) mettent en évidence l'influence de la variation du paramètre k_e ($k_e = 200\% k_e$). On remarque que le déplacement garde toujours sa forme sans dépassement.

3-6 Conclusion

Cette étude par simulation a permis d'aborder la conception d'un asservissement ou commande de positionnement du mécanisme MPE. Les résultats montrent la faisabilité de la technique. une réponse rapide et sans dépassement. Les régulateurs PI seraient suffisants pour la régulation de déplacement du MPE.

Conclusion Générale

Parmi les différentes solutions qui permettent de contourner les problèmes rencontrés par les moteurs piézo-électriques, on a appliqué une commande simple basée sur un régulateur classique PI. Les résultats de simulations obtenues sont satisfaisants, cela nous permet de confirmer la simplicité du modèle de la machine. La position microscopique du rotor nécessite un choix judicieux des paramètres du contrôleur (K_p et K_i), d'après les résultats obtenus, on peut conclure que ce genre de moteurs procèdent un couple fort sous des tensions d'alimentation faibles, ce qui nous permet de les utilisés dans des domaines industriels et médicaux (exploration médicale comme l'échographie ,véhicules, avions usines , domaines spécial)

Pour donner de l'ampleur à notre travail, on suggère une étude des techniques de commande dans les trois directions (X,Y,Z) avec plusieurs degrés de liberté, et d'appliquer des nouvelles techniques de commandes comme la commande adaptative , par mode glissant, commande intelligente, et d'autres

Références

- [1] d. Croft and s. Devasia, “vibration compensation for high speed scanning tunneling Microscopy,” *rev. Sci. Instrum.*, vol. 70, no. 12, pp. 4600–4605, dec. 1999.
- [2] a. Stemmer, g. Schitter, j. M. Rieber, and f. Allgoewer, “control strategies towards Faster quantitative imaging in atomic microscopy,” *eur. J. Control*, vol. 11, pp. 384–395, 2005.
- [3] r. Wiesendanger, ed, “scanning probe microscopy and spectroscopy. “ cambridge, U.k.: cambridge univ. Press, 1994.
- [4] s. Alexander, l. Hellemans, o. Marti, j. Schneir, v. Elings, p. K. Hansma, m. Longmire, and j. Gurley, “an atomic-resolution atomicforce microscope implemented Using an optical lever,” *j. Appl. Phys.*, vol. 65, no. 1, pp. 164–167, 1989.
- [5] d. Rugar and p. Hansma, “atomic force microscopy,” *phys. Today*, vol. 43, no. 10, Pp. 23–30, oct. 1990.
- [6] h. G. Hansma, “varieties of imaging with scanning probe microscopy,” in *proc. Nat. Academy usa*, 1999, vol. 96, no. 26, pp. 14678–14680.
- [7] h. T. Ho, “fast servo bang-bang seek control,” *iee trans. Magn.*, vol. 33, no. 6, Pp. 4522–4527, apr. 1997.
- [8] s. K. Aggarwal, d. A. Horsley, r. Horowitz, and a. P. Pisano, “micro-actuators for High density disk drives,” in *proc. Acc*, 1997, pp. 3979–3984.
- [9] m. Tokuyama, t. Shimizu, h. Masuda, s. Nakamura, m. Hanya, o. Iriuchijima, and J. Soga, “development of a π -shaped actuated suspension for 100-k tpi hard disk Drives,” *iee trans. Magn.*, vol. 37, no. 4, pp. 1884–1886, jul. 2001.
- [10] w. P. Mason, “piezoelectricity, its history an applications,” *j. Acoust. Soc. Amer.*, Vol. 70, no. 6, pp. 1561–1566, 1981.
- [11] a. Ballato, “piezoelectricity: history and new thrusts,” in *proc. Ieee ultrason. Symp.*, 1996, no. 1, pp. 575–583.
- [12] e. O. Doebelin, *measurement systems application and design*, 5th ed. New york: McGraw-hill, 2004.
- [13] r. Brinkerhoff and s. Devasia, “output tracking for actuator deficient/redundant Systems: multiple piezoactuator example,” *aiaa j. Guid., control, dyn.*, vol. 23, no. 2, pp. 370–373, mar./apr. 2000.
- [14] r. Pedrak, t. Ivanov, k. Ivanova, t. Gotszalk, n. Abedinov, i. W. Rangelowa, k. Edinger,

e. Tomerov, t. Schenkel, and p. Hudek, “micromachined atomic force Microscopy sensor with integrated piezoresistive, sensor and thermal bimorph actuator for highspeed tappingmode atomic force microscopy phase-imaging in higher eigenmodes,” *j. Vacuum sci. Technol. B*, vol. 21, no. 6, pp. 3102–3107, nov./dec. 2003.

[15] c. H. Chien, y. D. Wu, y. T. Chiou, c. C. Hsieh, y. C. Chen, t. P. chen, m. L. Tsai, and c. T. Wang, “nanoscale deformation measurement by using the hybrid Method of gray-level and holographic interferometry,” *opt. Lasers eng.*, vol. 44, no. 1, pp. 80–91, jan. 2006.

[16] j. Schneir, t. H. Mcwaid, j. Alexander, and b. P. Wilfley, “design of an atomic-force Microscope with interferometric position control,” *j. vacuum sci. Technol. B*, vol. 12, no. 6, pp. 3561–3566, nov./dec. 1994.

[17] r. Horowitz et al., “microactuators for dual-stage servo systems in magnetic disk Files,” in *springer handbook of nanotechnology*, b. Bhushan, ed. Berlin, germany: Springer-verlag, 2004, ch. 31, pp. 921–950.

[18] k. Pechrach, j. w. McBride and p. m. Weaver, “arc root mobility on piezo-actuated contacts in miniature circuit breakers,” *proceedings of the forty-ninth IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*, sept. 2003, pp. 76 – 83.

[19] faa-jeng lin, shieh, h.-j., po-kai huang, “adaptive wavelet neural network control with hysteresis estimation for piezo-positioning mechanism,” *IEEE Transactions on Neural Networks*, volume: 17, issue: 2, march 2006, pp. 432 – 444.

[20] cloosterman, m. Goossens, h. Steinbuch, m. Schneiders, m., “compensation of mode Shapes with a piezo electric actuator for an optical drive,” *proceedings of the 2003 American Control Conference*, vol. 1, 2003, pp. 725 – 730.

[21] ying wu, qingze zou, “iterative control approach to compensate for the hysteresis and the vibrational dynamics effects of piezo actuators,” *2006 American Control Conference*, june 2006.

[22] faa-jeng lin, hsin-jang shieh, po-kai huang, li-tao teng, “adaptive control with Hysteresis estimation and compensation using rfnn for piezo-actuator,” *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, 2006, vol. 53-9, pp. 1649 – 1661

[23] shieh, h.-j., lin, f.-j., huang, p.-k., teng, l.-t., “adaptive tracking control solely using displacement feedback for a piezo-positioning mechanism,” *IEEE Proceedings on Control Theory and Applications*, vol. 151, issue: 5, sept. 2004, pp. 653 – 660.

[24] y. soeno, ichikawa, t. tsuna, y. Sato, i. sato. “piezoelectric piggy-pack microactuator for Hard disk drive.” *IEEE Transactions on Magnetics*, 25(2), march 1999.

[25] ANSI/IEEE Standard 176–1987: IEEE Standard on Piezoelectricity. 38

- [26] standard for relaxor-based single crystals for transducer and actuator applications
Chair: s. Rhee, co-chair: l. Ewart-paine draft version 8 – as of may 9, 2006.
- [27] "ieee standard of piezoelectricity", ansi/ieee standard 176-178; also iee Trans.sonics and ultrasonics, su-31, part 2, march 1984.
- [28] e. A. Gerber and a ballato ed."precision frequency control", academic press, newyork (1985), vol. 1.
- [29] burinova l.,sulc m. And prokopova m. 2001 "determination of piezoelectric coefficients dij of pzt ceramics and composites by laser interferometry. J.european ceramic society" vol., 21 p 1387-1790.
- [30] y.soeno, ichikawa, t.tsuna, y. Sato, i.sato. "piezoelectric piggy-pack microactuator for Hard disk drive". Ieee transactions on magnetics, 25(2), march 1999.
- [31] sumeet s. Aphale, bharath bhikkaji, and s. O. Reza moheimani, senior member, Ieee "minimizing" scanning errors in piezoelectric stack-actuated nanopositioning Platforms" iee transactions on nanotechnology, vol. 7, no.pp79-90 1, january 2008.
- [32] "ieee standard of piezoelectricity", ansi/ieee standard 176-178; also iee Trans.sonics and ultrasonics, su-31, part 2, march 1984.
- [33] e. A. Gerber and a ballato ed."precision frequency control", academic press, newyork (1985), vol. 1.
- [34] e. Piecourt, "caracterisation electromecanique et alimentation electronique des moteurs Piezo-electriques" phd thesis, leei de toulouse, enseeiht, juillet 1995, n 1037.
- [35] radu zglimbea, virginia finca, emilian greaban, marin constantin 'research on Parameter identification of modified friction lugre model based distributions Theory'. Issue 8, volume 8, august 2009.
- [36] p. Ge, m. Jouaneh, "modeling hysteresis in piezoceramics actuators", precision Engineering, 17, 211-221 (1995).
- [37] laleh ravanbod shirazi' contribution `a la representation et a l'identification Des systemes avec nonlinearite non differentiables' these doctorat le 12 juillet 2002.
- [38] y. Bernard, e. Mendes, and f. Bouillault, 'dynamic hysteresis modeling based on Preisach model,' iee trans. Magn., vol. 38, no. 2, pp. 885–888, mar. 2002.
- [39] hong hu and huanshui zhang, ridha ben mrad 'preisach based dynamic hysteresis

Model'proceedings of the 2004 international conference pp825-830.2004.

[40] c. Canudas de wit and s.s. Ge, “ adaptive friction compensation for systems with Generalized velocity/position friction dependency”. Proc. Of the 36th iee Conference on decision and control,pp.2465–2470, 1997.

[41]canudas de wit, c., horowitz, r. And tsiotras, p., “model-based observers For tire/road contact friction prediction,” in new directions in nonlinear Observer design, nijmeijer, h. And t.i fossen (eds), springer verlag, lectures Notes in control and information science, may 1999.

[42] C. Péclat, “Conception et réalisation d’un micromoteur piézoélectrique”,Thèse de Doctorat No. 1434, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 1995.

[43] Devon Patrick Murphy, “Analysis of a Rotary Ultrasonic Motor for Application in Force- Feel Systems”, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2008.

[44] F. Giraud, “Modélisation causale et commande d’un actionneur piézo-électrique à onde progressive”, Thèse de Doctorat, Université de Lille I, Laboratoire d’Electrotechnique et d’Electronique de Puissance, 2002.

[45] B. Nogarède, “Moteurs piézoélectriques ”, Techniques de l’ingénieur D3765.

[46] USM Ultrasonic Motor General Catalogue, USR60 SHINSEI.

[47] José FERNANDEZ LOPEZ, “modeling and optimization of ultrasonic linear motors”, EPFL, THÈSE NO 3665 (2006). 109

[48] Matteo BULLO, “Modélisation et commande du moteur piézoélectrique à onde progressive”, EPFL, Thèse no3348 (2005). 108

[49] R. Rajkumar, T. Nogai : “A New Method of Improving the Torque of a Travelling Wave Ultrasonic Motor ”, in Proceedings of the IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, Atlanta USA, September 1999.

[50] LIM CHEE KIAN, “Systematic Design of a Disc-Typed Traveling Wave Ultrasonic Motor,Nanyang Technological University .thesis submitted in fulfillment of the requirement for the degree of Master of Engineering 2001.

[51] B. Nogarède : “ Moteurs piézoélectriques ” Techniques de l’ingénieur, traité Génie électrique.

[52] Yuji Akiyama, “The torque free phenomenon of Ultrasonic Motors”,Electrical & Electronic Engineering, Kanagawa Institute of Technology, Atsugi city, 243-0292, Japan

[53] Nicolas Rizet, “contrôle actif des vibrations utilisant des matériaux piézo-électriques”, INSA, Lyon, 1999.

[54] H.V.Barth, “Ultrasonic driven motor”, IBM Technical Disclosure Bulletin, pag. 57, Vol.16, 1973.

[55] Thèse doctorat en science en titre de commande robuste d’un moteur piézo électrique du 07/01/2013 , .D .OUNISSI AMOR Université hadj lakhdar batna page 26.

[56] Mémoire magister en électrotechnique en titre de analyse du fonction d’un moteur piézo électrique a onde progressive , .Mr boussad abdelkrim Université hadj lakhdar batna page 33-40T. 2012