



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE EL-HADJ LAKHDAR BATNA
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE



Mémoire
Présenté en vue d'obtention du titre de :
Magister en Electrotechnique
Option :
Machines électriques

Présenté par :
BOUSSAD Abdelhakim
Ingénieur d'état en électrotechnique de l'université de Batna

Thème :

Analyse du fonctionnement d'un moteur piézo-électrique à onde progressive

Soutenu le : 12/06/2012

Devant le jury composé de :

Président	Pr R. ABDESSEMED	Université de Batna
Rapporteur	Pr S. TAIBI	Université de Batna
Co-Rapporteur	Dr I. HAOUARA	Université de Batna
Examineur	Dr A. BENAKCHA	Université de Biskra
Examineur	Dr M. S. AGGOUNE	Université de Batna

Université de Batna 2012

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier mon encadreur Monsieur S.TAIBI, professeur à l'université de Batna ; de m'avoir proposé ce thème et de m'avoir dirigé avec son savoir et son expérience tout au long de cette étude.

Mes remerciements vont également à mon Co-encadreur Mademoiselle I.HAOUARA, Docteur et maître de conférences à l'université de Batna pour son orientation et son aide au cours de la préparation de ce présent travail.

Je remercie Monsieur R.ABDESSEMED, Professeur à l'université de Batna de m'avoir fait l'honneur d'examiner le présent travail et de présider le jury de ma thèse .

Je remercie Monsieur A.BENAKCHA, Docteur et maître de conférences à l'université de Biskra d'avoir accepté d'examiner mon présent travail et de participer au jury de ma thèse.

Je remercie Monsieur M.S.AGGOUNE, Docteur et maître de conférences à l'université de Batna d'avoir accepté d'examiner mon présent travail et de participer au jury de ma thèse.

Je tiens aussi à remercier tous les professeurs qui ont participé à notre formation au cours de l'année préparatoire de post-graduation.

Résumé

Le principe de fonctionnement piézo-électrique est fondé sur la déformation d'une structure élastique à base de matériaux composites électro-actifs, capable de communiquer par adhérence un mouvement d'entraînement uniforme à une partie mobile. Ce nouveau système subit une déformation sous l'effet d'une tension électrique ou bien l'inverse. Autrement-dit, sous une contrainte mécanique il génère une tension électrique. A partir de cette réversibilité plusieurs applications, qui relèvent du domaine du génie électrique, sont possibles.

Un actionneur peut être obtenu à partir d'un ensemble d'éléments piézo-électriques, disposés d'une façon particulière et judicieusement alimentés. Le mouvement issu de la déformation peut être manipulé pour obtenir le déplacement souhaité : rotatif, oscillatoire ou linéaire.

Dans le présent sujet, nous allons aborder un moteur rotatif piézo-électrique à onde progressive. Ces moteurs sont réputés par une discrétion acoustique et par leur puissance massique très élevée par rapport à leurs homologues électromagnétiques. Ils offrent également un fonctionnement basse vitesse et fort couple. Ces performances permettent de supprimer le réducteur mécanique de vitesse dans les systèmes exigeant une faible vitesse de rotation.

L'objectif visé par le présent sujet est la modélisation hybride de l'actionneur en question qui tient compte de la dynamique du stator, l'interaction du contact stator-rotor, et enfin de la dynamique du rotor dans le but d'analyser son fonctionnement à vide et en charge.

Mots-clés

La céramique piézoélectrique, procédé de fabrication, actionneurs piézo-électriques, modélisation du moteur piézo-électrique, moteurs à onde progressive, piézo-électrique.

Abstract

The operating principle of piezoelectric is based on the deformation of elastic structure-based electro-active composites, capable of imparting a movement by adherence to consistent workout moving part. This new system is subject to deformation under the effect of an electrical voltage or the reverse. In other words, under mechanical stress it generates an electrical voltage. From this reversibility many applications that fall within the field of electrical engineering, are possible.

An actuator can be obtained from a set of piezoelectric, arranged in a particular way and carefully fed. The movement resulting from the deformation can be manipulated to get the desired movement: rotary or linear oscillatory.

In this regard, we will discuss a rotary motor piezoelectric traveling wave. These motors are known by a sound discretion and by their very high power density compared to electromagnetic counterparts. They also offer a low operating speed and high torque. These performances will eliminate the gearbox speed in systems requiring low speed.

The purpose of this subject in the hybrid modeling of the actuator in question taking into account the dynamic of the stator, the interaction of the stator-rotor contact, and finally the dynamic of the rotor in order to analyze its load operation.

Keywords

The piezoelectric ceramique, manufacturing process, piezoelectric actuators, modeling of piezoelectric motor, traveling wave motors, piezoelectric.

Table des matières

Introduction générale	7
CHAPITRE 1	
1-Phénomène de la piézoélectricité	11
1.1-Introduction.	11
1.2-Historique.	11
1.3-La céramique piézoélectrique	13
1.3.1-Procédé de fabrication de la céramique piézoélectrique.	13
1.4-Relations piézoélectriques	16
1.4.1-Couplage électromécanique dans les céramiques PZT	20
1.4.2-Coefficient de pertes mécaniques	20
1.5-Modes de vibration	21
1.5.1- modes de couplage électromécanique dans les céramiques PZT	21
1.5.2- modes typiques de couplage dans les céramiques PZT.	23
1.6-Domaines d'application des céramiques piézoélectriques.	25
1.7-Conclusion	27
CHAPITRE 2	
2-Actionneurs piézoélectriques	28
2.1-Introduction.	28
2.2-Moteur ultrasonique de H.V. Barth.	28
2.3-Moteur de Vasiliev et al.	29
2.4-Moteurs de Sashida	29
2.5-Moteurs piézoélectriques linéaires	31
2.6 -Moteur à double stator	32
2.7-Moteurs piézoélectriques à deux modes de vibration	33
2.8- Brevets de piézomoteurs à onde progressive	34
2.8.1-Brevet Daimler-Benz.	34
2.8.2-Brevet Canon.	35
2.8.3-Brevet Sagem.	36
2.8.4-Brevet Shinsei	37
2.9-Moteur piézoélectrique annulaire à onde progressive	38
2.9.1-Organe d'entraînement.	40
2.9.2-Organe entraîné.	41

2.9.3-Propriétés des moteurs piézoélectriques à onde progressive	42
2.9.4-Bilan de puissance du moteur Shinsei.	43
2.10-Situation du moteur piézoélectrique à onde progressive dans l'ensemble des actionneurs piézoélectriques	44
2.11-Conclusion.	46

CHAPITRE 3

3-Modélisation analytique du moteur piézoélectrique à onde progressive 47

3.1-Introduction	47
3.2-Schéma fonctionnel du moteur piézoélectrique à ondes progressives.	47
3.3-Conversion d'énergie électrique en énergie mécanique	49
3.3.1-Création d'une onde de flexion	49
3.3.2-Création d'une onde progressive.	50
3.3.3-Equation de la masse vibrante.	50
3.4-Modélisation de la dynamique de déformation du stator	52
3.4.1-Conversion électromécanique	52
3.4.2-Schéma équivalent en analogie mécanique du stator	55
3.5-Modélisation du contact mécanique entre le stator et le rotor	58
3.6-Modélisation de la dynamique du rotor.	63
3.7-Calcul des forces de réaction modale	65
3.8-Récapitulation	66
3.8.1-Alimentation	66
3.8.2-Dynamique de déformation du stator.	66
3.8.3-Zone de contact entre le stator et le rotor.	67
3.8.4-Dynamique du rotor	67
3.9-Conclusion	68

CHAPITRE 4

4-Simulation et interprétation des résultats. 70

4.1-Introduction.	70
4.2-Bloc stator	70
4.3-Bloc fonction A	73
4.4-Bloc fonction B du contact stator/rotor	74
4.5-Bloc fonction C	77

4.6-Bloc fonction D	78
4.7-Bloc fonction Rotor	79
4.8-Bloc fonction E.	80
4.9-Résultats de simulation du moteur à vide et interprétations	82
4.9.1-Tensions d'alimentation du stator	82
4.9.2-Amplitudes modales du stator.	83
4.9.3-L'amplitude de crête de l'onde modale résultante	85
4.9.4-Le déplacement vertical relatif du rotor	86
4.9.5-Demi-largeur de la zone de contact	87
4.9.6-Le point de non glissement	88
4.9.7-Couple moteur.	89
4.9.8-Vitesse de rotation.	89
4.9.9 -Comparaison des résultats	90
4.10-Résultats de simulation du moteur en charge et interprétations	93
4.11-Comparaison des résultats	96
4.12-Validation.	97
4.13-Conclusion.	99
Conclusion générale	100
Annexes.	102
Symboles.	104
Bibliographie.	107

Introduction Générale

Les matériaux électroactifs représentent actuellement un axe de recherche attractif pour plusieurs laboratoires de génie électrique dans le monde [1]. Ces matériaux permettent, suite à leurs caractéristiques intrinsèques et lorsqu'ils sont judicieusement exploités, d'arriver à produire des structures pouvant développer une puissance massique très encourageante pour les applications en génie électrique [16]. La céramique piézo-électrique est un matériau électroactif, qui subit une déformation sous l'effet d'une tension électrique. Elle peut être, également, le siège d'une tension électrique lorsqu'elle est soumise à des contraintes mécaniques. En effet, le fonctionnement de cette céramique est réversible. De récentes recherches ont montré que ce dernier peut être exploité pour réaliser des actionneurs [11].

Un actionneur peut être obtenu à partir d'un ensemble de piézo-électriques, disposés d'une façon particulière et judicieusement alimentés. Le mouvement issue de la déformation peut être manipulé pour obtenir le déplacement souhaité: rotatif, oscillatoire ou linéaire.

En 1973, H.V Barth présenta un actionneur rotatif à base de la technologie piézoélectrique [11]; seulement les inconvénients qu'il présentait surtout l'échauffement excessif par frottement du rotor avec les oscillateurs longitudinaux piézoélectriques, étaient suffisants pour stopper son développement.

Quelques années plus tard et exactement en 1982, T. Sashida mit au point un actionneur piézoélectrique plus fiable [19]. Dès 1987, la société japonaise Shinsei valorise cette invention en lui donnant un aspect plus performant et compétitif en lançant une nouvelle et prometteuse série de moteurs : USR30, USR45, USR60 ... [19].

Leur principe de fonctionnement repose sur la conversion par friction d'une vibration mécanique ultrasonore du stator, en un mouvement continu du rotor. La déformation de la structure élastique (substrat) est provoquée par les céramiques piézoélectriques. Ces dernières ont la propriété de subir une déformation lorsqu'elles sont sous l'action d'un champ électrique (effet piézoélectrique inverse).

Grâce à sa discrétion sonore, un encombrement réduit et des performances : fort couple à basse vitesse, le moteur piézoélectrique représente un intérêt certain pour l'industrie. Ainsi, il trouve sa place dans un univers relativement conquis par les moteurs électromagnétiques classiques. En outre, l'absence de bruits audibles de fonctionnement rend l'application des moteurs piézoélectriques très attractive.

Objectifs

Compte tenu du principe de fonctionnement basé sur des oscillations mécaniques à haute fréquence et sur l'exploitation des forces de frottement par friction dans l'interface stator-rotor, le développement d'un modèle analytique fidèle se révèle de plus en plus difficile.

En effet les forces de contact par friction, origine de la création du couple moteur, dépendent de plusieurs paramètres tels que l'état de surface du contact stator-rotor. En plus, l'usure non uniforme, l'élévation de température de la structure substrat-céramique et l'humidité, rendent la quantification de ces paramètres très difficiles.

Le principal objectif de notre travail est la modélisation hybride de l'actionneur piézo-électrique à onde progressive en prenant en compte un certain nombre d'hypothèses simplificatrices.

Dans cette modélisation on tient en compte de la dynamique du stator, de l'interaction du contact stator-rotor et de la dynamique du rotor. La validation du modèle analytique se fera par comparaison des résultats obtenus par simulation en fonctionnement à vide et en charge avec des résultats issus de la documentation.

Le présent travail est organisé comme suit:

Chapitre1

Un aperçu général sur la céramique piézoélectrique, son procédé de fabrication et son domaine d'application.

Par la suite, à travers un aperçu sur la théorie d'élasticité, nous allons aborder les différents modes de fonctionnement des éléments piézoélectriques.

Chapitre 2

Nous allons présenter dans cette partie l'état de l'art sur les actionneurs piézoélectriques les plus populaires, pour chaque cas, on abordera en bref le principe de fonctionnement.

La fin du chapitre sera consacrée pour l'actionneur le plus répondu dans la bibliographie à savoir le moteur annulaire à onde progressive.

Chapitre 3

Dans cette partie nous allons établir l'algorithme de notre travail de thèse, qui consiste dans l'élaboration du schéma fonctionnel analytique de l'actionneur choisi,

Cette étude commencera par :

- La dynamique du stator qui est l'origine de la génération de l'onde progressive,
- Le contact stator-rotor et les phénomènes tribologiques qui se produisent.
- Et enfin l'étude de la dynamique du rotor qui résumera ses différents comportements de rotation et de translation au cours du fonctionnement du moteur.

Chapitre 4

Dans ce dernier chapitre, le modèle théorique ainsi établi sera interprété en langage Matlab en utilisant Simulink pour l'analyse et l'interprétation du comportement de l'actionneur à travers les résultats de simulation pour les différents régimes de son fonctionnement à vide et en charge.

Dans le but de valider ce modèle, nous allons comparer les résultats obtenus avec les données des références bibliographiques.

Chapitre 1

Phénomène de la Piézoélectricité

1.1-Introduction

La piézoélectricité est une propriété basée sur la capacité de certains cristaux de générer un champ électrique lorsqu'ils sont soumis à une pression mécanique externe. On parle alors d'effet piézoélectrique direct.

Par contre, ces mêmes cristaux subissent une déformation sous l'action d'un champ électrique ; c'est l'effet piézoélectrique inverse.

1.2-Historique

En 1880, les frères Curie publièrent les premiers résultats expérimentaux sur l'existence d'un lien entre les phénomènes piézoélectriques macroscopiques et certaines structures cristallographiques [11]. Chaque expérience consistait en la mesure des charges électriques accumulées à la surface du cristal comme par exemple le quartz, lorsqu'il était soumis à un effort mécanique.

Dans les milieux scientifiques de l'époque, cet effet fut considéré presque comme une "découverte", et rapidement nommé "piézoélectricité", afin de le distinguer d'autres phénomènes tels que "l'électricité de contact" (électricité statique due au frottement) et la "pyroélectricité" (électricité générée par les cristaux, due à leur échauffement).

Toutefois, les frères Curie n'ont pas prédit que les cristaux qui exhibaient l'effet piézoélectrique direct (électricité en réponse à l'application d'un effort mécanique) auraient aussi exhibé l'effet piézoélectrique inverse (déformation en réponse à l'application d'un champ électrique).

En 1881 Lippmann a déduit mathématiquement la réversibilité de l'effet piézoélectrique à partir des principes fondamentaux de la thermodynamique [8].

Les frères Curie confirmèrent immédiatement l'existence de l'effet inverse et continuèrent les travaux dans le but d'obtenir une preuve quantitative de la réversibilité complète des déformations dans les cristaux piézoélectriques. Peu de

temps après, un noyau scientifique sur les applications piézoélectriques fut créé dans le but d'identifier des cristaux piézoélectriques basés sur la structure asymétrique du cristal.

En effet, on peut voir sur la figure (1.1) que la structure cristalline symétrique sous l'action d'une contrainte mécanique extérieure n'aboutit pas au déplacement des barycentres des charges positives et négatives, ainsi la polarisation résultante est nulle.

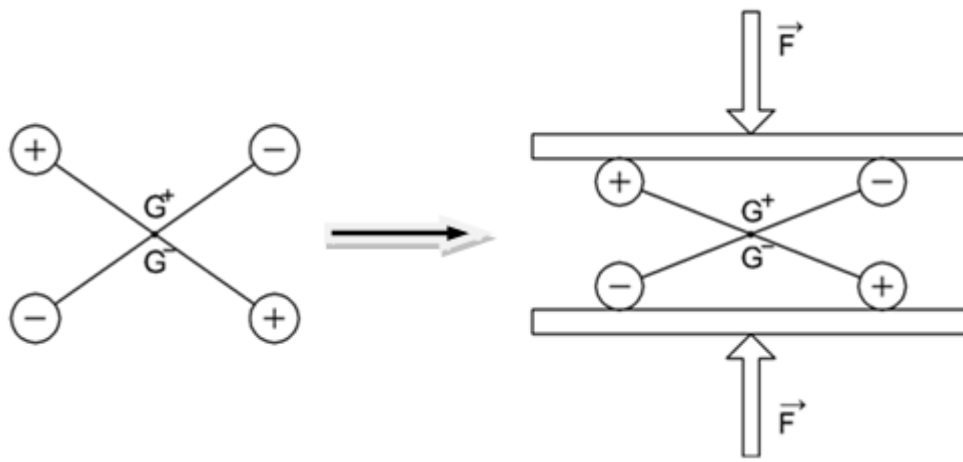


Figure 1.1 –Cristal Centro-symétrique [8].

Dans le cristal de la figure (1.2) la déformation F entraîne un déplacement des barycentres G^+ , G^- des charges donc l'apparition d'une polarisation P_0 .

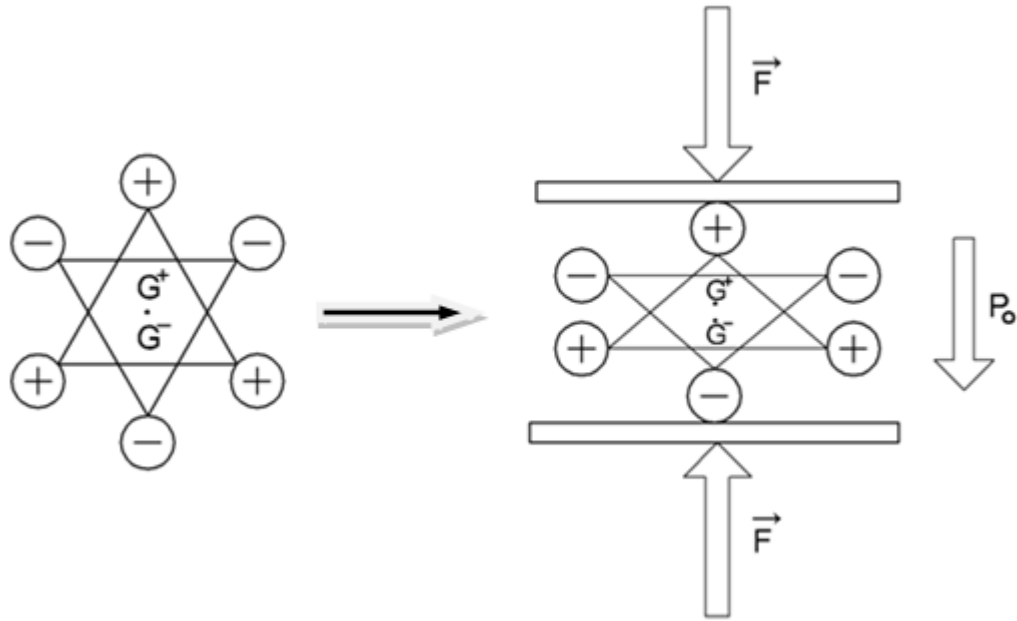


Figure 1.2 – Cristal non Centro-symétrique [8].

Pendant les 25 années suivantes (jusqu'en 1910), le groupe de travail arriva à établir définitivement les 20 catégories de cristaux naturels dans lesquels les phénomènes piézoélectriques sont présents et à définir les 18 coefficients piézoélectriques au niveau macroscopique.

Toutefois, le monde ne donnait pas encore la juste attention à la piézoélectricité mais privilégiait des domaines comme l'électromagnétisme qui à l'époque était en train de générer une nouvelle technologie avec la production de machines extraordinaires.

Les outils mathématiques nécessaires à la compréhension de la piézoélectricité étaient complexes et aucune application visible au grand public n'était encore disponible.

Les premières applications sérieuses des dispositifs piézoélectriques ont été expérimentées pendant la Première Guerre Mondiale : en 1917. P. Langevin et des collègues français ont commencé le perfectionnement d'un dispositif sous-marin à ultrasons dans le but de mesurer la distance entre des objets (sonar) [11].

Leur transducteur était composé d'un empilement de cristaux de quartz collés entre deux plaques d'acier ; la structure avait une fréquence de résonance de 50[kHz].

Grâce à ce mécanisme, ils réussirent à mesurer la profondeur de l'océan. En émettant un signal à haute fréquence et en mesurant l'intervalle de temps entre l'émission et la réception du signal réfléchi par le fond de l'océan on arrive, en connaissant la vitesse de propagation des ondes sonores dans l'eau (qui est cinq fois plus élevée que dans l'air), à déterminer la profondeur de l'océan.

L'importance stratégique du sonar a stimulé les grandes nations industrialisées qui depuis, continuent sans cesse de développer les dispositifs piézoélectriques comme les transducteurs et les matériaux pour le sonar.

Parmi les exemples de cette activité on peut citer le premier oscillateur électronique stabilisé par un cristal de quartz réalisé par Walter G. Cady en 1918 [8]. Ce dernier a établi le schéma électrique équivalent du résonateur piézoélectrique.

De plus, de nouvelles gammes de capteurs de vibrations, d'accélération, etc. ont été commercialisées, permettant ainsi de quantifier des grandeurs précédemment impossibles à mesurer.

Il est toutefois important de se rappeler que les matériaux disponibles à cette époque limitaient la prestation de n'importe quel dispositif et par conséquent aussi son exploitation commerciale.

Pendant la deuxième guerre mondiale les chercheurs ont découvert que certaines céramiques obtenus par synthèse de poudres d'oxydes métalliques présentaient des constantes diélectriques jusqu'à cents fois supérieures à celles des céramiques PZT naturels.

La découverte de la céramique piézoélectrique, qui est facilement réalisable avec des caractéristiques stupéfiantes, a eu comme conséquence la renaissance de la recherche et du développement des dispositifs piézoélectriques jusqu'à nos jours.

1.3-La céramique piézoélectrique

1.3.1- Procédé de fabrication de la céramique piézoélectrique :

Le procédé de fabrication de la céramique piézoélectrique est schématisé sur la figure (1.3),

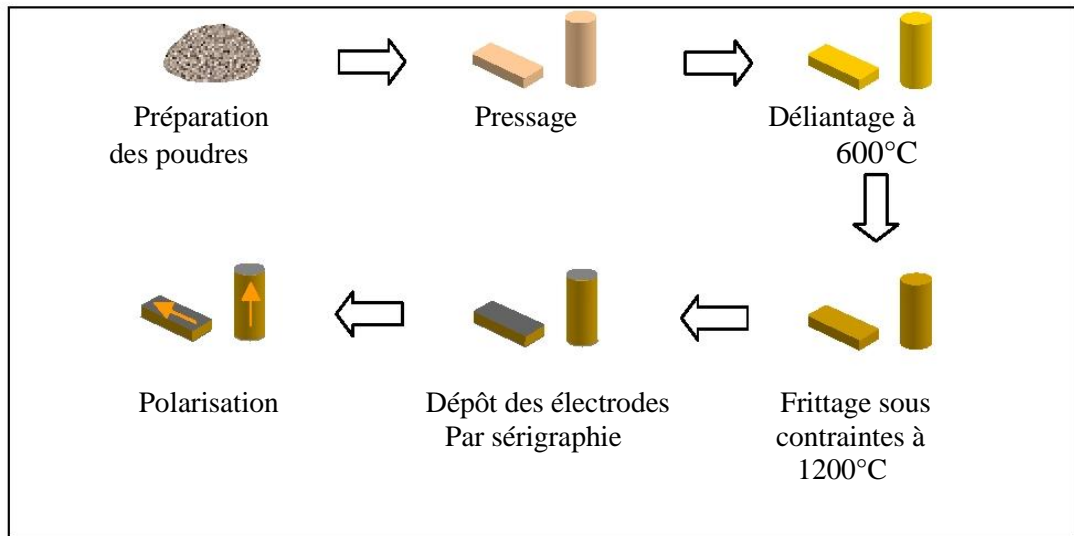


Figure 1.3 – Fabrication des céramiques piézoélectriques [27].

Le granulé de la céramique piézoélectrique est composé d'un très grand nombre de minuscules domaines cristallins qui sont orientés aléatoirement.

Le procédé commence par :

- **La préparation :**

Préparation d'une poudre PZT à partir d'oxydes de titane de zirconium et de plomb Pb (Zr-Ti)O₃ chauffés à 900°C.

- **Le pressage :**

Le contenu obtenu est pressé dans une matrice selon la forme désiré en barres minces, ou sous forme de pastilles circulaires.

- **Le déliantage :**

C'est l'opération qui consiste à éliminer les polymères de moulage à une température approximative de 600°C,

- **Le frittage :**

On passe au frittage à 1200°C sous contrainte axiale afin de souder les grains entre eux et d'en réduire la porosité de la structure en céramique ainsi obtenue.

- **La métallisation :**

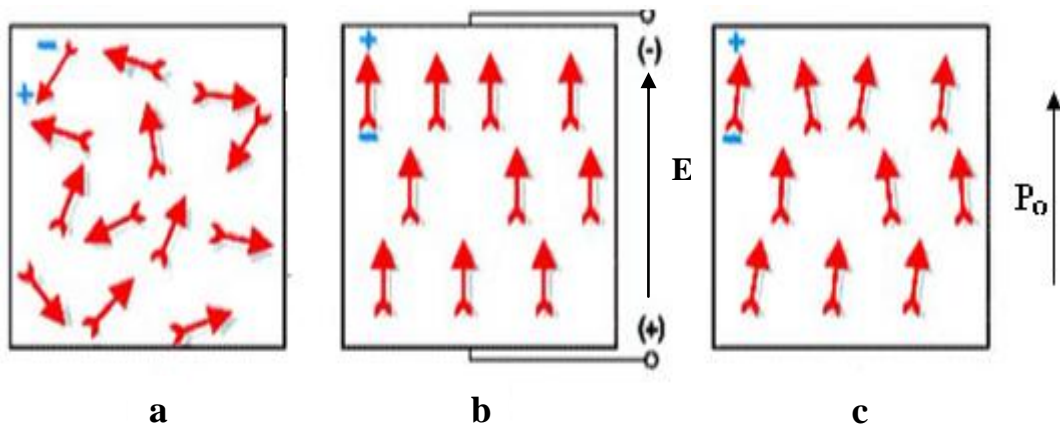
On fixe par sérigraphie, une couche mince en métal conducteur sur la céramique comme futurs électrodes de la pièce obtenue.

- **La polarisation :**

C'est l'étape finale du procédé : par application d'un champ électrique continu suffisamment intense de l'ordre de plusieurs kV/mm à l'élément céramique gardé à une température dans l'intervalle de Curie [150 à 450°C] pour aligner tous les dipôles.

La céramique est ensuite refroidie, toujours en présence du champ électrique. Finalement, lorsque le champ électrique est supprimé, les dipôles conservent leur position dans chaque domaine cristallin, c'est la polarisation rémanente P_0

Cette séquence de polarisation est schématisée dans la figure (1.4) :



a)-Avant polarisation. b)-Phase de polarisation c)-Après polarisation

Figure 1.4 –Dipôles électriques dans une céramique piézoélectrique

Les céramiques piézoélectriques sont fabriquées sous diverses formes figure (1.5).



Figure 1.5-Différentes formes de céramiques piézoélectriques [41].

1.4-Relations piézoélectriques

La caractérisation systématique des propriétés électromécaniques des milieux piézoélectriques est fondée sur une représentation tensorielle du couplage entre les systèmes électrique et mécanique.

Les grandeurs locales macroscopiques, généralement choisies comme variables mécaniques et électriques dans les milieux continus, sont, respectivement, les tenseurs de déformation et de contraintes, de composantes **S** et **T**, et les vecteurs du déplacement électrique **D** et du champ électrique **E** tableau (1.1).

D	[C/m ²]	Déplacement électrique
E	[V/m]	Champ électrique
S	[m /m]	Déformation mécanique relative
T	[N/m ²]	Contrainte

Tableau 1.1 – Variables mécaniques et électriques [11].

Dans un solide élastique soumis à une contrainte T , la déformation S vaut :

$$\mathbf{S} = \mathbf{s} \mathbf{T} \quad (1.1)$$

Où s est la souplesse (inverse du module de Young), exprimée en $[m^2/N]$. D'autre part, dans un diélectrique soumis à un champ électrique, on a l'équation (1.2):

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} \quad (1.2)$$

Où ϵ est la constante diélectrique du milieu en $[Cm/V]$. Dans un milieu piézoélectrique les effets mécaniques et électriques s'influencent mutuellement. Cette situation est résumée grâce aux équations (1.3) et (1.4) Il s'agit respectivement de l'effet piézoélectrique direct et inverse.

$$\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial \mathbf{T}} \neq \mathbf{0} \quad (1.3)$$

$$\frac{\partial \mathbf{S}}{\partial \mathbf{E}} \neq \mathbf{0} \quad (1.4)$$

Avec une bonne approximation, cette interaction peut être décrite par des relations linéaires entre les quatre variables \mathbf{D} , \mathbf{E} , \mathbf{S} et \mathbf{T} , dont deux seulement sont indépendantes.

Le choix des variables indépendantes, l'une mécanique et l'autre électrique, est arbitraire. Ainsi, en choisissant par exemple les variables intensives (\mathbf{T} et \mathbf{E}) comme couple de variables indépendantes, les propriétés piézoélectriques de la matière se traduisent, à température constante, par les équations (1.5) et (1.6)

$$\mathbf{S} = \mathbf{s}^E \mathbf{T} + \mathbf{d}^t \mathbf{E} \quad (1.5)$$

$$\mathbf{D} = \mathbf{d} \mathbf{T} + \epsilon^T \mathbf{E} \quad (1.6)$$

Avec :

\mathbf{s}^E : La souplesse à champ électrique constant (matrice 6*6) $[m^2/N]$;

ϵ^T : La permittivité à contrainte constante (matrice 3*3) en $[F/m]$;

\mathbf{d} : La constante de charge (matrice 3*6) en $[C/N]$;

L'exposant t dans l'équation (1.5) indique qu'il s'agit de la matrice transposée de d .

Les relations (1.5) et (1.6) se réfèrent à une identification des directions qui est donnée à la figure (1.5) Selon ce système d'axes, la direction de polarisation dans le sens positif est définie selon l'axe 3 (axe z dans un système orthogonal).

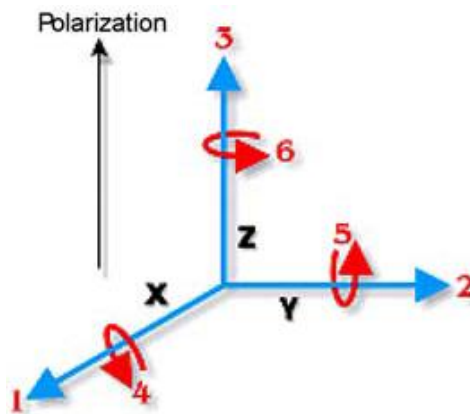


Figure 1.5 –Repère associé aux vecteurs contrainte et déformation [20].

On va définir les différentes matrices présentées dans les équations (1.5) et (1.6).

Matrice de souplesse s^E

La contrainte et la déformation agissent sur les axes définis à la figure 1.5. La souplesse s est définie pour chacun des cas, c'est à dire pour les trois translations (allongements) et les trois rotations (cisaillements).

Comme les PZT sont symétriques par rapport à l'axe de polarisation, la matrice s^E prend une forme simplifiée [11].

Par exemple, s_{13}^E est la souplesse à champ électrique constant pour une contrainte dans la direction 1, avec une composante de déformation dans la direction 3 selon l'axe z .

La matrice de souplesse s^E s'écrit [4]:

$$s^E = \begin{pmatrix} s_{11}^E & s_{11}^E & s_{13}^E & 0 & 0 & 0 \\ s_{11}^E & s_{11}^E & s_{13}^E & 0 & 0 & 0 \\ s_{13}^E & s_{13}^E & s_{33}^E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{44}^E & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{44}^E & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{66}^E \end{pmatrix} \quad (1.7)$$

Matrice de permittivité ϵ^T

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

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

La matrice de permittivité ϵ^T s'écrit [4] :

$$\epsilon^T = \begin{pmatrix} \epsilon_{11}^T & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{11}^T & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{33}^T \end{pmatrix} \quad (1.8)$$

Matrice des constantes de charge \mathbf{d}

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

Comme exemple, \mathbf{d}_{31} est le rapport entre la déformation dans la direction 1 et le champ électrique dans la direction 3 (le rapport entre le déplacement diélectrique dans la direction 1 et la contrainte dans la direction 3).

On peut écrire :

$$d = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (1.9)$$

Ainsi, pour ce qui concerne les céramiques PZT, principalement utilisées dans les actionneurs que nous étudierons, les différentes matrices de souplesse s^E de permittivité ϵ^T et des constantes de charge d prennent les formes données par les relations successives (1.7),(1.8)et (1.9) lorsque la polarisation est dirigée selon l'axe 3 [25] .

1.4.1-Couplage électromécanique dans les céramiques PZT.

Il permet de décrire la conversion relative de l'énergie électrique en mécanique. Il est défini comme étant le facteur k_{em} qui caractérise la qualité de conversion électromécanique dans la céramique piézoélectrique [16] en d'autres termes l'aptitude du matériau à transformer l'énergie électrique en énergie mécanique.

k_{em} est défini comme suit :

$$k_{em} = \sqrt{\frac{W_{EM}^2}{W_E \cdot W_M}} \quad (1.10)$$

- W_E : C'est la densité d'énergie électrique.
- W_M : La densité d'énergie mécanique.
- W_{EM} : La densité d'énergie électromécanique.

A l'aide de ce paramètre on peut évaluer le rendement du matériau piézoélectrique utilisé. C'est l'un des paramètres spécifiques pour choisir un matériau piézoélectrique.

1.4.2-Coefficient de pertes mécaniques Q_m

C'est le rapport de l'énergie électrique qui est convertie en énergie mécanique par rapport à celle qui est dissipée en chaleur [11].

Q_m permet donc de quantifier les pertes mécaniques et il est proportionnel au rapport entre la fréquence de résonance et la largeur de bande.

Les matériaux piézoélectriques avec un coefficient de pertes mécaniques Q_m aux valeurs élevées sont caractérisés par des pics de résonance étroits, tandis que ceux avec des facteurs Q_m bas ont des largeurs de bande plus grandes [11].

1.5-Modes de vibrations

Chaque céramique piézoélectrique possède une fréquence élastique de vibration spécifique, en fonction du matériau et de sa forme.

Lorsqu'une tension alternative est appliquée à une céramique piézoélectrique avec une fréquence égale à sa propre fréquence de vibration élastique, la céramique résonne.

Ce phénomène est exploité dans plusieurs dispositifs piézoélectriques, car à la résonance le coefficient d'accouplement électromécanique k_{em} est maximum.

Les céramiques piézoélectriques peuvent exhiber plusieurs modes de vibrations (modes résonants), qui dépendent de leur forme, de la direction de polarisation et de la direction du champ électrique.

1.5.1-Modes de couplage électromécanique dans les céramiques PZT

Les modes fondamentaux utilisés dans les actionneurs les plus courants sont principalement [6] :

- **Mode longitudinal (33)** : se traduit par une variation de longueur suivant l'axe **3** lorsqu'un champ électrique est appliqué suivant le même axe (**3**) au moyen des électrodes placées sur les faces perpendiculaires à cet axe (figure (1.6.a)) [4].
- **Mode transversal (31)** : se traduit par la variation de longueur suivant l'axe **1** lorsqu'un champ électrique est appliqué suivant l'axe **3** (figure (1.6.b)) [4].
- **Mode de cisaillement (15)** : conduit à une déformation de l'élément en céramique PZT autour de l'axe **2** lorsqu'un champ électrique est appliqué suivant l'axe **1** (figure (1.6.c)) [4].

- **Mode de couplage : longitudinal (33)**

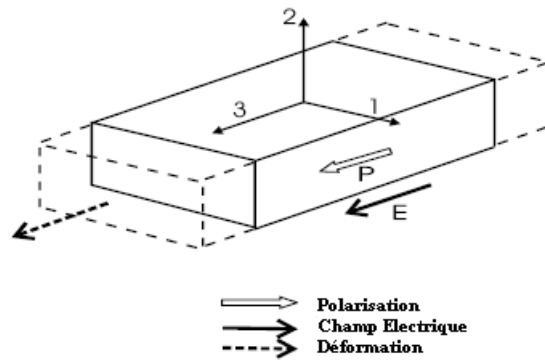


Figure1.6.a-Mode de couplage : longitudinal (33) [6].

Le facteur de couplage electromécanique correspondant pour ce mode est calculé suivant la relation :

$$k_{em} = k_{33} = \sqrt{\frac{d_{33}^2}{\epsilon_{33}^T S_{33}^E}}$$

- **Mode de couplage : transversal (31).**

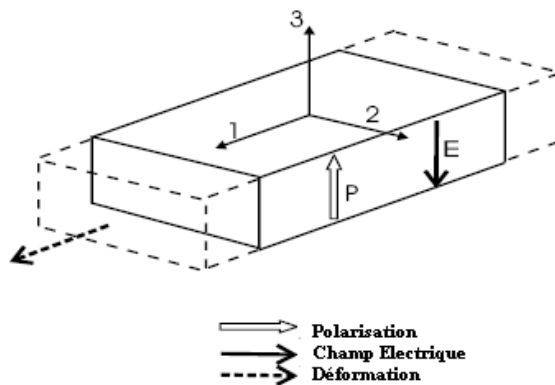


Figure1.6.b-Mode de couplage : transversal (31) [6].

Le facteur de couplage electromécanique correspondant pour ce mode est calculé suivant la relation :

$$k_{em} = k_{31} = \sqrt{\frac{d_{31}^2}{\epsilon_{33}^T S_{11}^E}}$$

- **Mode de couplage : de cisaillement (15).**

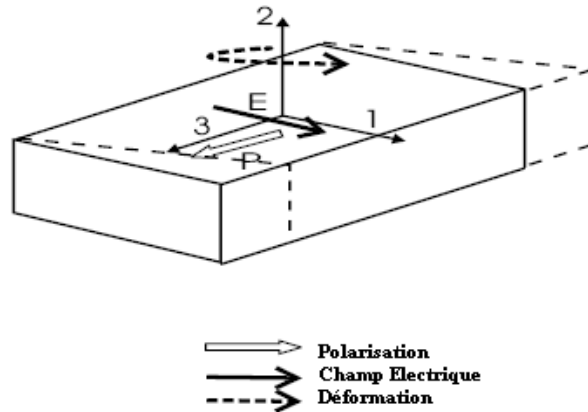


Figure1.6.c-Mode de couplage : de cisaillement (15) [6].

Le facteur de couplage electromécanique correspondant pour ce mode est calculé suivant la relation :

$$k_{em} = k_{15} = \sqrt{\frac{d_{15}^2}{\epsilon_{11}^T S_{44}^E}}$$

1.5.2-Modes typiques de couplage électromécanique dans les céramiques PZT

Le tableau (1.2) montre les modes de vibration typiques relatifs à la géométrie des matériaux piézoélectriques sous forme de : barreaux; disques et cylindres et qui sont les formes les plus utilisées dans la conception et la construction des transducteurs électromécaniques.

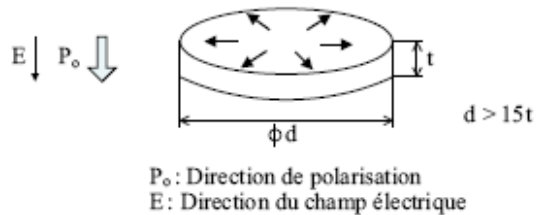
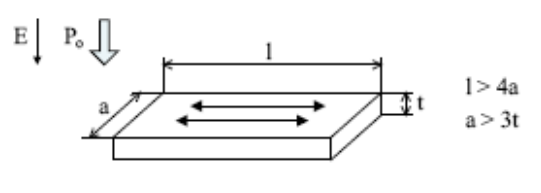
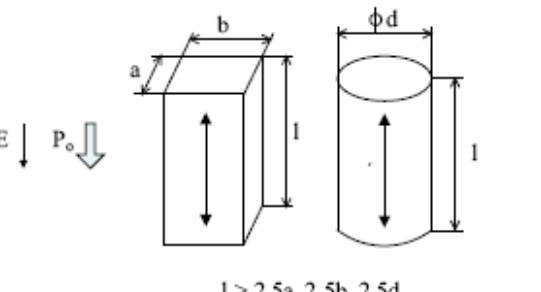
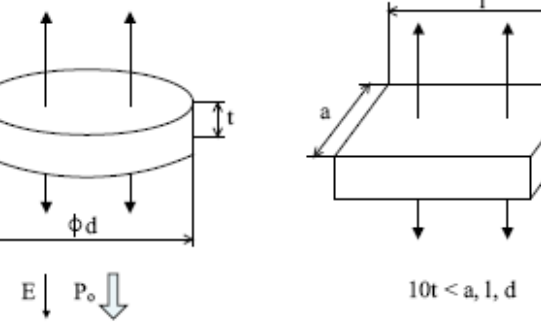
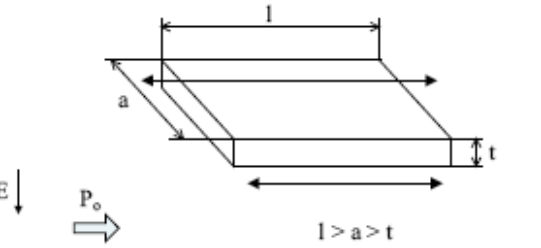
Mode de Vibration	Mode de Vibration associé à la forme
<p style="text-align: center;">Radial</p>	 <p style="text-align: center;">$d > 15t$</p> <p style="text-align: center;">P_0: Direction de polarisation E: Direction du champ électrique</p>
<p style="text-align: center;">Transverse</p>	 <p style="text-align: center;">$l > 4a$ $a > 3t$</p>
<p style="text-align: center;">Longitudinal</p>	 <p style="text-align: center;">$l > 2.5a, 2.5b, 2.5d$</p>
<p style="text-align: center;">Epaisseur</p>	 <p style="text-align: center;">$10t < a, l, d$</p>
<p style="text-align: center;">Cisaillement</p>	 <p style="text-align: center;">$l > a > t$</p>

Tableau1.2 – Modes de vibration typiques associés à la forme de la céramique piézoélectrique [11].

1.6-Domains d'applications des céramiques piézoélectriques

Le tableau (1.3) illustre quelques domaines des applications les plus courantes

Consommateur	Commercial	Médical
Briquets. Instruments musicaux. Buzzer. Interrupteur PZT. L'allume-gaz.	Soudeuse ultrasonique. Perceuse ultrasonique. Indicateur de niveau. Détecteur de défaut. Décapants ultrasonique. Capteurs sismiques. Microphones. Géophones. Systèmes d'alarmes. Tête d'impression des imprimantes à jet d'encre.	Thérapie ultrasonique. Capteurs ultrasoniques. Pompes d'insuline. Détection du battement cardiaque du fœtus. Acquisition d'image ultrasonique. Débitmètres. Soins dentaires. Pulvérisation des calculs rénaux. Bistouri piézoélectrique.
Automobile	Ordinateur	Militaire
Capteurs d'objets. Capteurs pour Airbag. Contrôle de vibrations. Injecteurs.	Micro-actionneur pour disque dur. Transformateur pour Notebook.	Capteur de profondeur (sonar). Les amorces. Les déclencheurs de lance-roquettes. Gyroscope.

Tableau 1.3 –Domaines d'application des céramiques piézoélectriques [4] [7], [11].

Un premier exemple venant de la vie quotidienne est représenté par le briquet, où l'utilisateur exerce une pression, à travers un mécanisme particulier, sur une céramique piézoélectrique générant ainsi un champ électrique assez fort pour provoquer une étincelle.

Dans l'industrie automobile on retrouve beaucoup d'actionneurs basés sur le phénomène piézoélectrique ; On pense par exemple aux capteurs permettant de détecter la présence d'objets durant l'opération de parking, à l'injecteur

piézoélectrique, ce dernier équipé d'un actionneur PZT ce qui lui permet de produire une pulvérisation plus rapide et plus précise du carburant dans la chambre de combustion du moteur Diesel, donc un abaissement de rejets de gaz et une économie dans la consommation du carburant jusqu'à 30%. L'injecteur piézoélectrique va permettre aux constructeurs automobiles de répondre aux exigences sévères des normes Européennes et Américaines concernant la limitation de rejet des gaz polluants.

Dans les applications sous-marines les "sonar" varient des petits émetteurs pour bateaux aux systèmes professionnels utilisés dans les grandes traversées transatlantiques pour détecter la profondeur de l'eau.

Dans les moteurs aéronautiques, les capteurs à ultrasons installés dans les turbines de puissance pour le contrôle dynamique ;
Ces capteurs sont capables de détecter d'éventuelles charges mécaniques asymétriques dans le rotor, permettant ainsi d'implémenter des mesures correctives.

Dans les systèmes à ultrasons, les dispositifs piézoélectriques peuvent générer des ondes ultrasoniques très puissantes utilisées pour nettoyer, percer, souder et aussi pour stimuler des processus chimiques.

De plus, ils fonctionnent aussi comme émetteurs et récepteurs d'ondes ultrasoniques dans des appareils de diagnostics médicaux et de contrôle non destructif des matériaux.

Pendant un contrôle non destructif, une céramique piézoélectrique est excitée de manière à générer un signal acoustique à une fréquence ultrasonique, qui est ensuite transmis à travers l'échantillon à analyser, si l'onde transmise rencontre un défaut structurel, une partie du signal est réfléchi et rejoint le récepteur avant le signal original permettant ainsi de détecter le défaut.

L'effet piézoélectrique inverse est utilisé dans le positionnement de précision : un champ électrique est alors appliqué à la céramique pour produire le déplacement désiré.

Les céramiques piézoélectriques sont également utilisées dans l'alignement des fibres optiques, l'alignement des machines outils, l'amortissement actif des vibrations dans des structures mécaniques, l'amélioration de l'image par correction de l'inclinaison de miroirs, les soupapes hydrauliques et pneumatiques et dans des dispositifs médicaux tels les couteaux chirurgicaux à ultrasons. Selon le principe de fonctionnement utilisé, nous pouvons distinguer deux types de dispositifs piézoélectriques :

- Capteurs ;
- Actionneurs ;

Les capteurs utilisent l'effet piézoélectrique direct, les actionneurs l'effet inverse.

1.7-Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons essayé de présenter progressivement l'historique de la piézoélectricité, à la fois comme phénomène découvert depuis plus d'un siècle, et comme composant révolutionnaire dans la fabrication et la conception des micro-actionneurs contemporains.

Des relations mathématiques décrivant les propriétés électromécaniques des milieux piézoélectriques ont ensuite été introduites. Ces dernières seront nécessaires à la modélisation de l'actionneur.

Chapitre 2 Actionneurs piézoélectriques

2.1 –Introduction

Dans ce qui suit nous allons présenter les actionneurs piézo-électriques les plus répandus dans la bibliographie.

Nous donnons pour chacun, de ces actionneurs, brièvement, le principe de fonctionnement.

2.2-Moteur ultrasonique de H.V. Barth

En 1973, H.V. Barth propose un moteur tournant à base des vibrations ultrasoniques. Ce moteur [19] est illustré par la figure (2.1).

Pour faire tourner le rotor dans le sens horaire on actionne l'oscillateur longitudinal 1.

Pour le sens inverse de rotation on actionne le deuxième oscillateur.

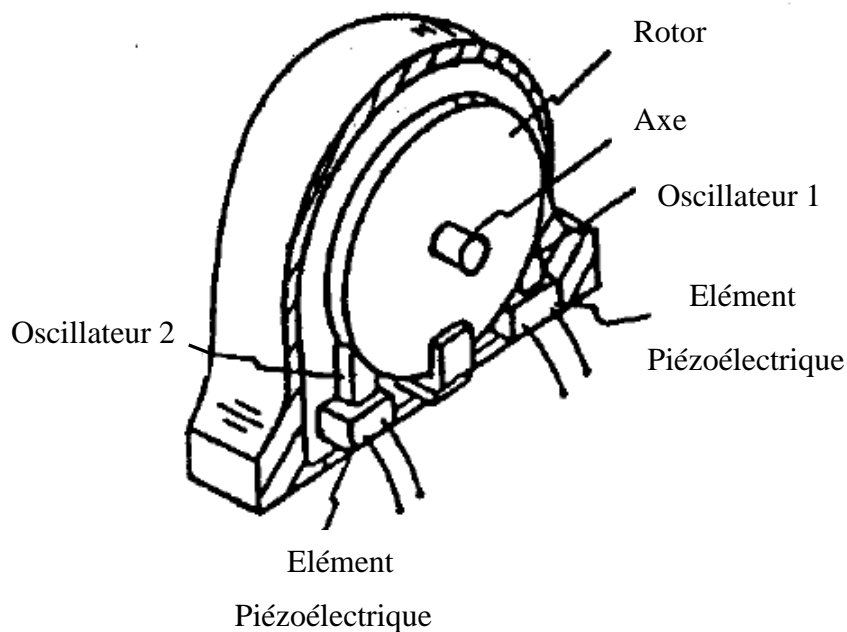


Figure 2.1-Moteur ultrasonique de H.V. Barth, [19].

Divers prototypes similaires ont été présentés, on peut citer principalement celui proposé par V.V. Lavrinenko et al. [19].

2.3-Moteur de Vasiliev et al.

En 1978, Vasiliev et al. en ex-URSS propose un actionneur figure (2.2) à base d'un transducteur à ultrasons composé d'un élément piézo-électrique monté entre deux blocs métalliques [19].

IL a non seulement réduit la fréquence de résonance, mais a également amplifié l'amplitude des vibrations. Dans ce moteur les vibrations longitudinales de l'oscillateur sont transmises à la tige vibrante en contact avec le rotor en forme de disque, ce dernier est entraîné par friction.

Le transducteur vibre aussi en flexion, ce qui posait un problème à maintenir stable la transmission de l'effort de friction. Il y avait aussi d'autres problèmes dans ce moteur: l'échauffement et l'usure rapide du système.

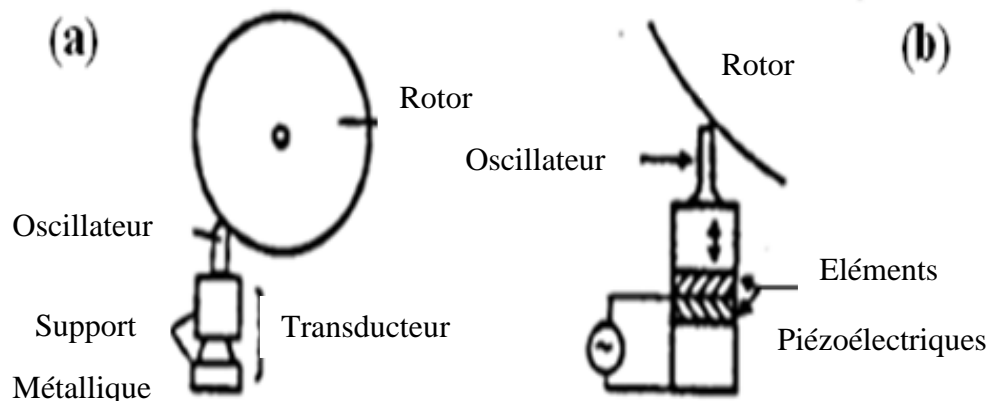


Figure 2.2-Moteur de Vasiliev et al. à base des vibrations ultrasoniques, [19]
(a) Schéma général, (b) Détails.

2.4-Moteurs de Sashida

En 1980, Sashida a proposé un type d'actionneur piézoélectrique basé sur deux éléments :

- Le stator en forme d'un transducteur électro actif linéaire,

- le rotor est un disque fin, libre en rotation dont on peut ajuster l'angle d'incidence θ avec l'extrémité P de l'oscillateur, qui au cours du fonctionnement va décrire une trajectoire elliptique sur la surface du rotor (figure (2.3)).

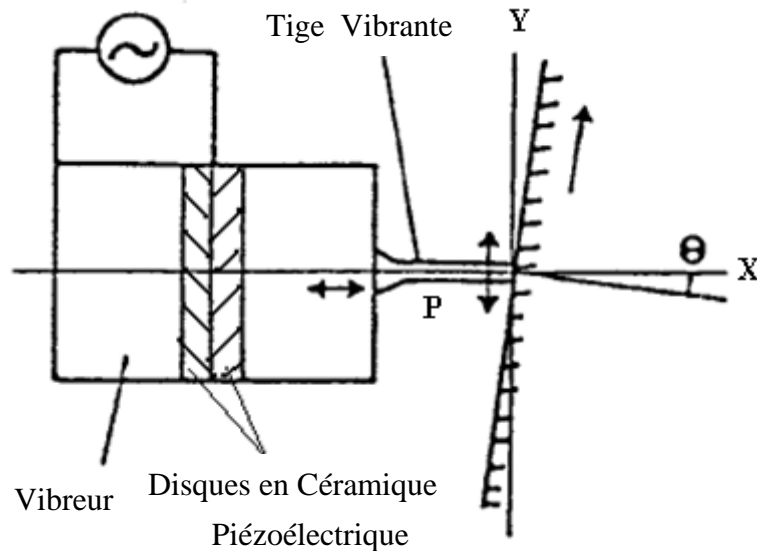


Figure 2.3—Principe de fonctionnement du moteur de Sashida [34].

Sous l'effet de la force résistante, lorsque le rotor entre en contact avec l'extrémité de la tige vibrante P, celle-ci est forcée de se plier dans le sens et à la vitesse de rotation du rotor.

Malgré que ce prototype présente des caractéristiques plus performantes que ses prédécesseurs décrits précédemment.

Son plus grand inconvénient est l'usure rapide provoquée par les frottements de surface dues au contact entre l'oscillateur et le rotor, pour cette raison le moteur a une durée de vie relativement courte.

Cet oscillateur vibre à une fréquence de 27.8 khz.

A cause surtout des problèmes d'usure qui influent directement sur le fonctionnement du moteur, Sashida a proposé un autre prototype figure (2.4).

Ce moteur utilise le mouvement elliptique de l'onde se propageant le long d'un anneau élastique.

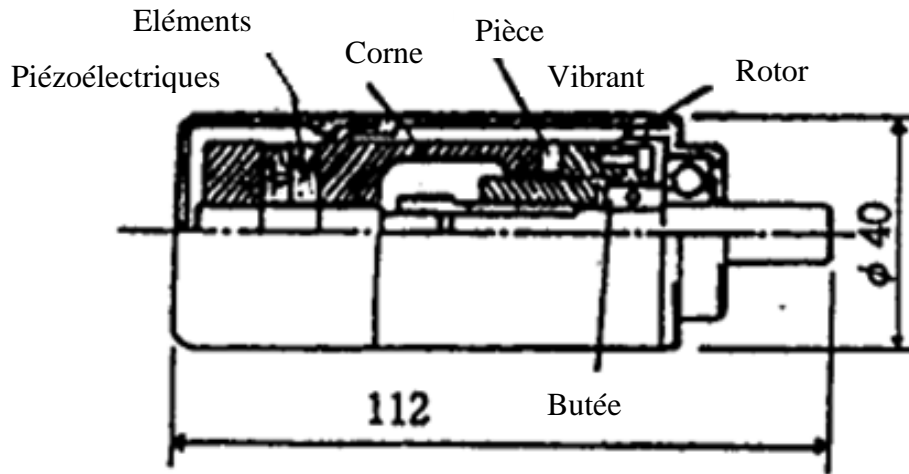


Figure 2.4-Moteur de Sashida annulaire à onde progressive [19].

2.5-Moteurs piézoélectriques linéaires

Le stator une longue barre métallique soudée sous forme de rail de guidage en boucle, représenté à la figure (2.5).

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 c'est l'encombrement du système de manière non négligeable, bien qu'inutile.

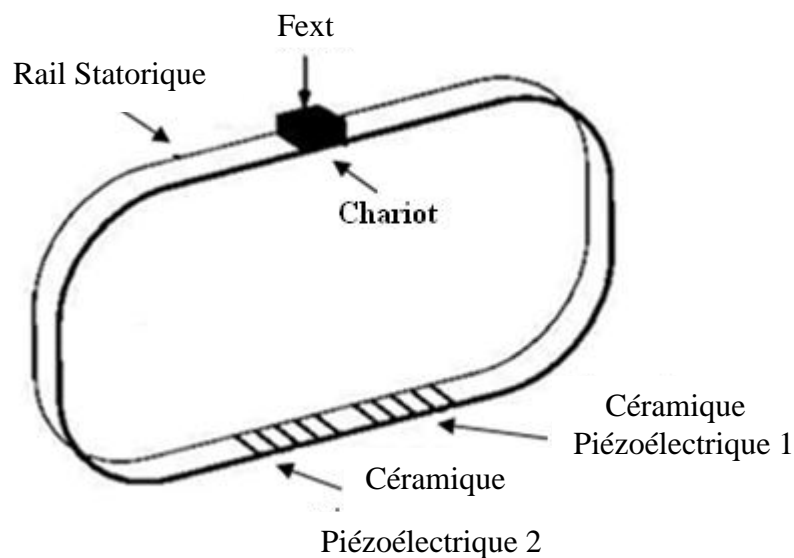


Figure 2.5–Prototype d'un moteur piézoélectrique linéaire, [20].

En partant de ces considérations on peut, dans le cas du deuxième prototype représenté à la figure (2.6), parler effectivement d'un moteur linéaire.

Deux oscillateurs sont installés aux extrémités du rail pour créer une onde progressive.

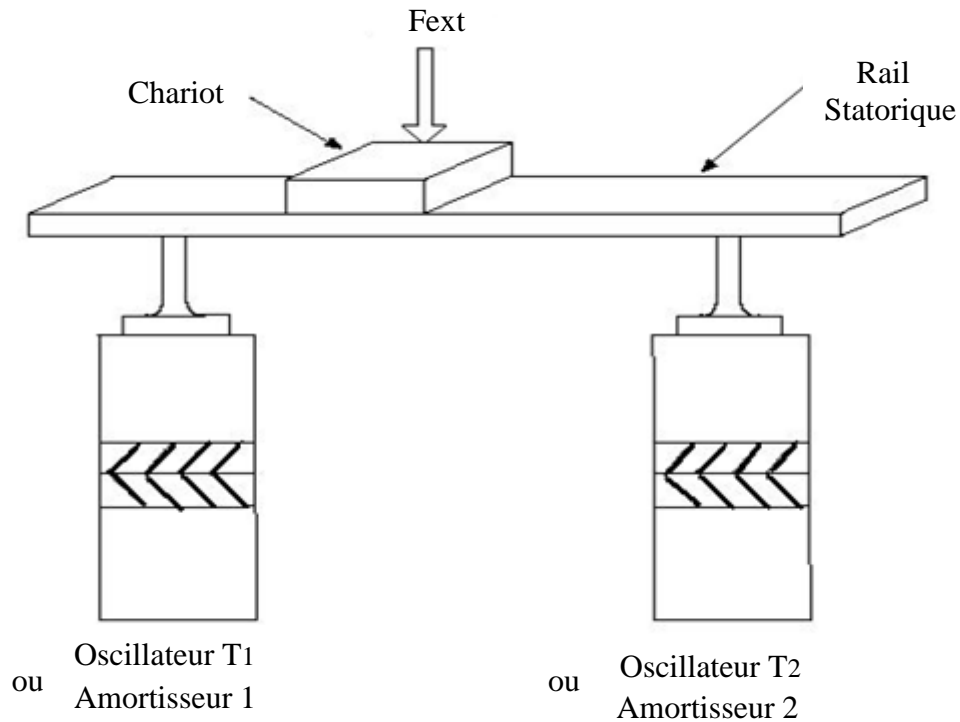


Figure 2.6–Prototype d'un moteur piézoélectrique linéaire utilisant des oscillateurs de Langevin, [11].

Si l'oscillateur T1 est choisi pour générer l'onde stationnaire, alors l'oscillateur T2 est ajusté pour travailler en amortisseur ; afin de synchroniser le système c'est à dire obtenir un mouvement orienté à onde progressive et même d'éviter au mécanisme les ondulations destructives.

Avec cette configuration, l'onde se propage de T1 vers T2 et le chariot dans la direction opposé. 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 $1[m/s]$.

2.6-Moteur à double stator :

Le moteur comporte deux stators identiques reliés entre eux par des éléments piézo-actifs normaux figure (2.7). Le rotor comporte deux disques pincés entre chaque paire de galettes statoriques au moyen des ressorts de précontrainte.

L'idée consiste à entraîner un disque en rotation grâce à un double stator vibrant constitué de pétales métalliques oscillant circulairement et longitudinalement. La combinaison des deux vibrations pilotées au synchronisme produit un mouvement elliptique assurant l'entraînement du rotor.

La faisabilité de ce montage a été testée, on est arrivé à soulever une charge de 15Kg en utilisant une poulie de rayon de 2.5cm.

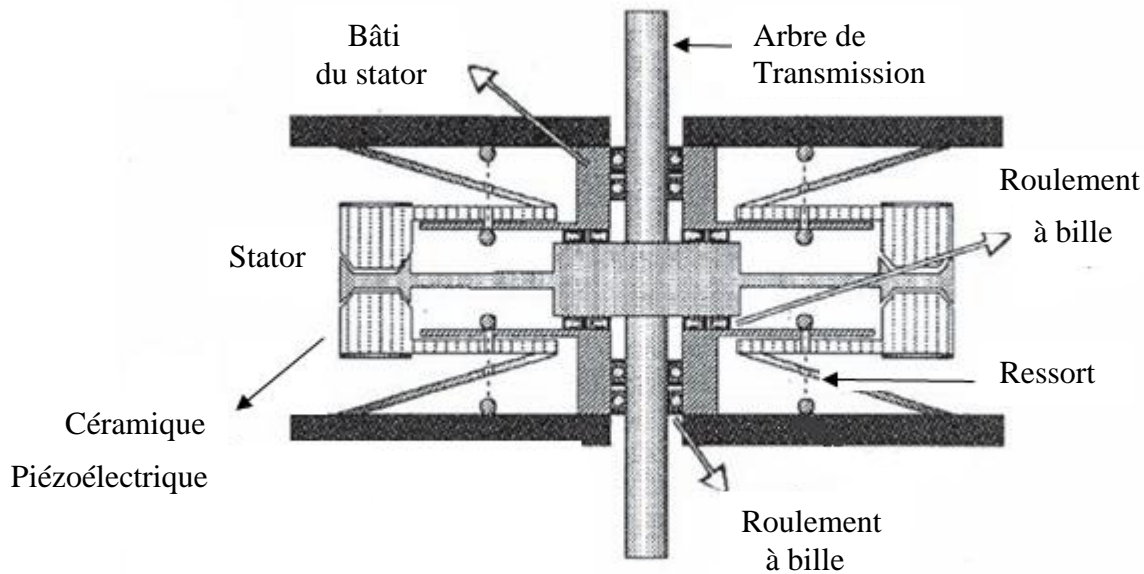


Figure 2.7–Architecture du moteur à double stator [33].

2.7-Moteurs piézoélectriques à deux modes de vibration

Comme il est présenté sur la figure (2.8.a),
Ce type d'actionneur se compose :

- Du stator composé d'un vibreur en torsion ;
- De trois actionneurs piézoélectriques longitudinaux multicouches collés sur la surface plate du vibreur.

Les deux groupes d'actionneurs pzt sont alimentés avec la même fréquence et à alimentation en tension biphasé réglée en déphasage pour ajuster la vitesse (figure (2.8.b)).

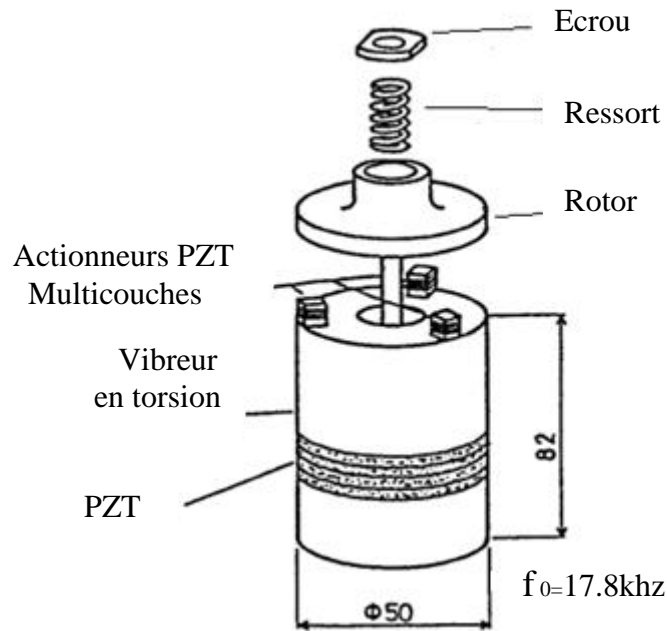
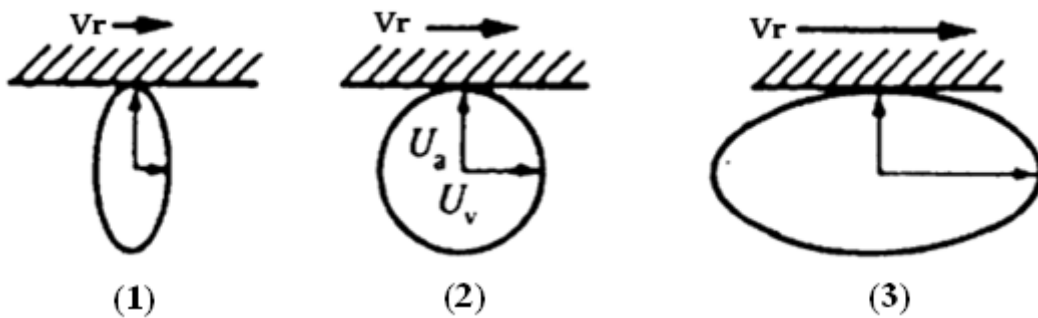


Figure 2.8.a–Moteur piézoélectrique hybride [19].



V_r : vitesse de rotation du rotor

U_v : l'amplitude du mode en torsion

U_a : l'amplitude du mode longitudinal de l'actionneur multicouche.

- 1) basse vitesse.
- 2) vitesse moyenne.
- 3) haute vitesse.

Figure 2.8.b –Surface de contact pour différents rapports entre les amplitudes des modes de vibration [19].

2.8-Brevets de piézomoteurs à onde progressive

2.8.1-Brevet Daimler-Benz

La firme Daimler-Benz propose un autre modèle [21], les éléments piézoélectriques sont montés entre les dentures rétractables du stator.

Le plus populaire de ses moteurs c'est le AWM90 [18].

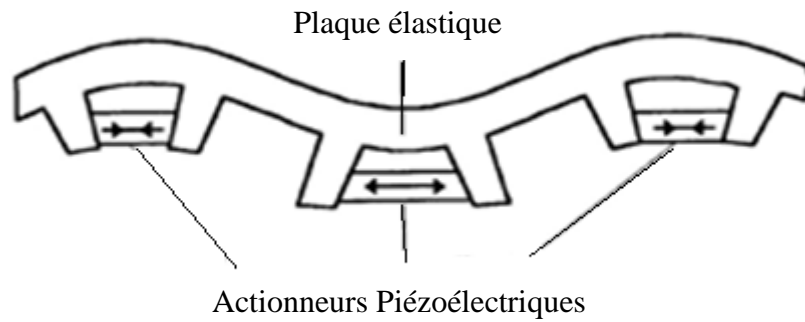


Figure 2.9-Brevet Daimler-Benz [21].

2.8.2-Brevet Canon

La firme Canon intègre pour la première fois en 1987 une technologie révolutionnaire dans la motorisation des focus des appareils photographiques haut de gamme en remplaçant le micro moteur à réducteur mécanique avec un actionneur annulaire à onde progressive figure (2.10),

Ainsi depuis les objectifs Canon figure (2.11), ont acquis des performances très avancées dans la prise d'images à haute définition.

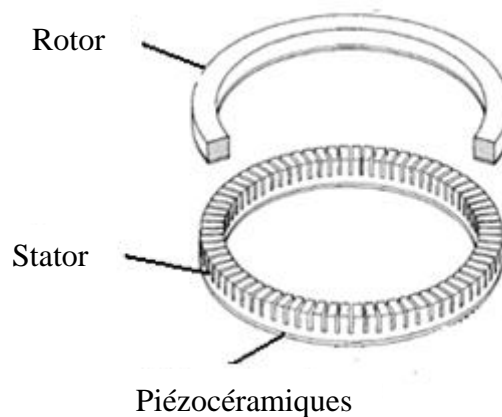


Figure 2.10–Actionneur pzt pour mécanisme d'autofocus pour objectif des appareils photos CANON.

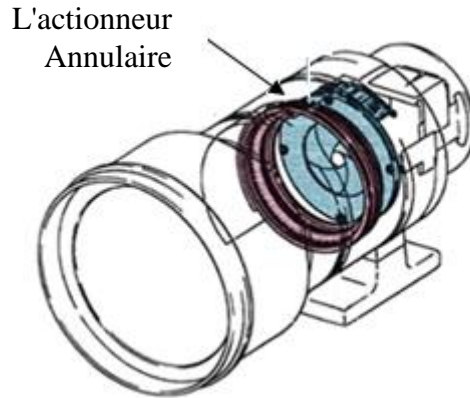


Figure 2.11-Application pour mécanisme d'autofocus pour objectif CANON.

2.8.3-Moteur SAGEM

L'objectif du Moteur Haute Puissance piézoélectrique, présenté dans [11], [30], est de fournir 5 kW de puissance mécanique en sortie d'arbre, utilisable en aéronautique pour actionner des volets, bords d'attaque, etc.

Une vue schématique du système est donnée ci-dessous figure (2.12).

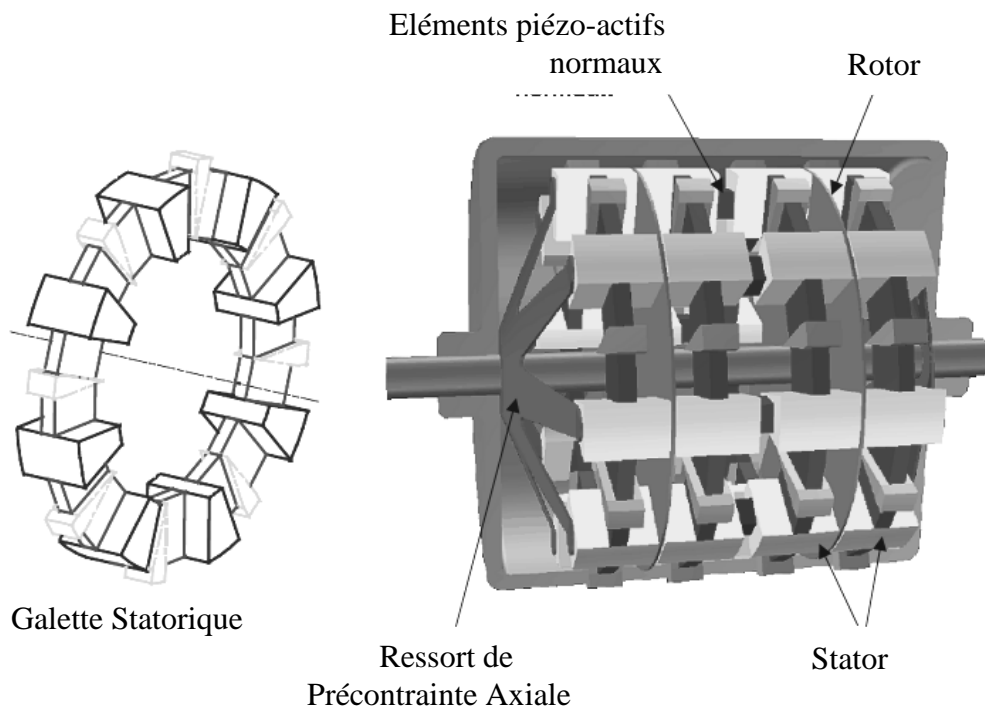


Figure 2.12-Galette statorique et schéma du Moteur SAGEM Haute Puissance [16].

Les spécifications techniques sont présentées dans le Tableau 2.1 ci-dessous :

Propriétés	Spécifications
Puissance mécanique délivrée	5 kW
Puissance active	10 kW
Masse de la partie active	2,5 kg
Masse évaluée du moteur complet	5 kg
Puissance massique	1 kW/kg
Couple à l'arrêt	1392 N.m
Couple maximum	886 N.m
Vitesse maximum	17 rad/s
Rendement du moteur max.	50 %
Fréquence	20 kHz

Tableau 2.1-Spécifications techniques du moteur SAGEM,[16].

La caractéristique prometteuse de ce moteur c'est son bon rapport puissance/volume massique (1kW/kg) permettrait son application potentielle dans des mécanismes de type aéronautique.

Enfin, le rendement du Moteur Haute Puissance est faible de l'ordre de 50 % en comparaison avec le moteur électrique classique de 90 %,

Ce moteur est au stade expérimental et on ignore à ce jour ces performances finales.

2.8.4-Brevet Shinsei

L'industriel japonais SHINSEI commercialise depuis 1987 une gamme de moteurs piézoélectriques à onde progressive.

Leur premier succès commercial dans la fourniture de 1500 moteurs pour les stores motorisés du New Tokyo Municipal Building remonte à 1990.

A partir de 1991, le constructeur automobile TOYOTA utilise sur certaines de ses modèles haut de gamme ce type de moteur pour le réglage des appuis-tête.

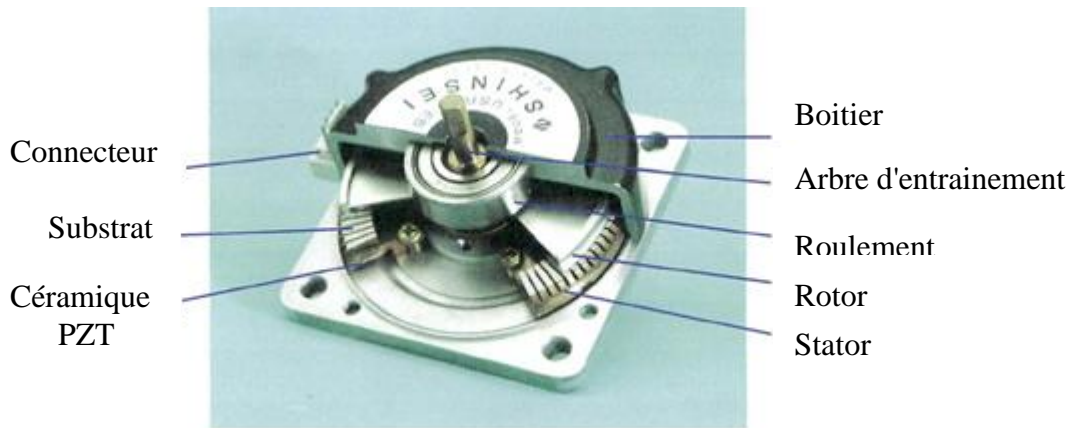


Figure 2.13- Moteur piézoélectrique à onde progressive Shinsei USR60 [17].

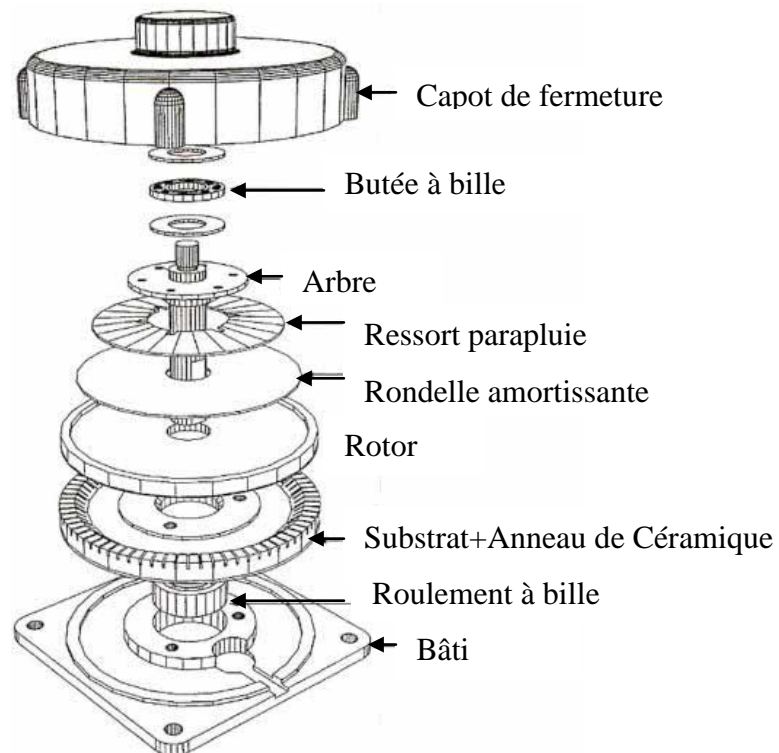


Figure 2.14- Vue éclatée du moteur SHINSEI USR60 [4].

2.9-Moteur piézoélectrique annulaire à onde progressive

L'architecture de ce type d'actionneur est représentée à la figure (2.14) et figure (2.15) dans le cas d'une configuration annulaire.

Le stator est excité en vibrations de volume forcées par l'intermédiaire d'un transducteur piézoélectrique collé à sa partie inférieure.

La sectorisation du transducteur détermine le rang du mode de flexion entretenue sur le stator.

Le rang du mode est par ailleurs choisi en fonction des paramètres dimensionnels du moteur, afin de garantir l'absence de bruits audibles de fonctionnement. Le rotor est en contact avec la partie supérieure du stator par l'intermédiaire d'un matériau d'interface (épaisseur élastique).

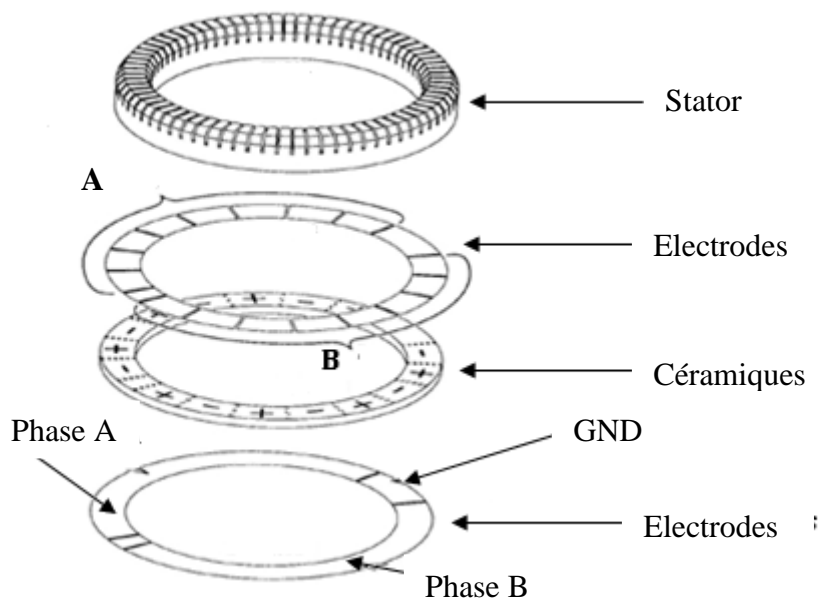


Figure 2.15-Le stator en forme éclatée du moteur SHINSEI USR60 [6].

Il est entraîné par frottement en exploitant les trajectoires elliptiques décrites par les points à la surface du stator figure (2.18).

Le transfert de puissance à l'arbre moteur nécessite une double conversion d'énergie :

- La première a lieu au sein du stator où le matériau actif (anneau de céramiques piézoélectriques), convertit l'énergie électrique qu'il absorbe en énergie mécanique par génération de vibrations mécaniques ultrasoniques : c'est la conversion électromécanique.

- La deuxième c'est le transfert de l'énergie mécanique produite par le stator vers le rotor par adhérence : c'est la conversion mécano-mécanique.

2.9.1-Organe d'entraînement

Un anneau en éléments céramiques piézoélectriques est collé sur le stator de façon à induire dans ce dernier des oscillations à la fréquence de résonance figure (2.16) et figure (2.18).

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 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 [2].



Figure 2.16-Le stator du moteur SHINSEI USR60 [8].

Le principal avantage de l'utilisation de l'onde progressive pour transmettre le mouvement au rotor réside dans le fait que le contact entre rotor et stator s'effectue de manière continue.

Ainsi, l'usure des matériaux en contact se répartit sur toute la circonférence active du moteur augmentant la durée de vie de ce type de moteur comparé aux précédents.

2.9.2-Organe entraîné

La partie mobile, ou l'organe entraîné, est constituée du rotor 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, contre le stator figure (2.17) et (2.18).



Figure 2.17- Rotor du moteur SHINSEI USR60 [8].

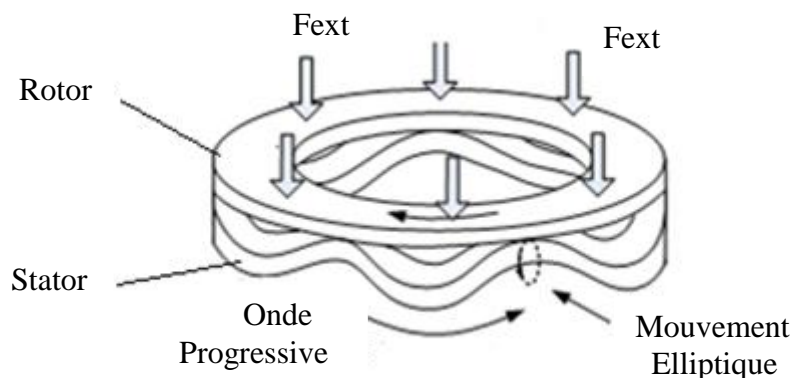


Figure 2.18-L'entraînement du rotor par les crêtes de l'onde progressive.

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

La force de précontrainte permet aussi de fixer le couple de maintien sans alimentation du moteur et c'est l'un des avantages du moteur.

Le fonctionnement de ce type de moteur repose sur deux conversions d'énergie :

- **la conversion électromécanique**

Généralement piézoélectrique, conduisant à la déformation ou au déplacement du stator par excitation des céramiques.

L'énergie électrique absorbée par le matériau actif est convertit en énergie mécanique par génération de vibrations mécaniques basses ou haute fréquence.

- **la conversion mécano-mécanique**

Les vibrations de la surface élastique du stator entraînent en mouvement de translation (cas du moteur linéaire) ou de rotation (moteur annulaire) le rotor maintenu en contact permanent par l'intermédiaire d'une force extérieure de précontrainte.

2.9.3-Propriétés des moteurs piézoélectriques à onde progressive

Les avantages des actionneurs piézoélectriques sont résumés dans le Tableau (2.2) ci-dessous :

Avantages
• Densité de puissance mécanique élevée.
• Possibilités de miniaturisation.
• Flexibilité dans la forme géométrique du moteur
• Couple de maintien important hors alimentation électrique
• Pas d'interférences électromagnétiques
• Couple élevé à basse vitesse (Entraînement direct sans réducteur).
• Fonctionnement silencieux.
• Précision de positionnement possible due à l'absence de jeu.
• Faible inertie favorise un court temps de réponse (dynamique de positionnement élevée).
• Grande souplesse d'intégration.

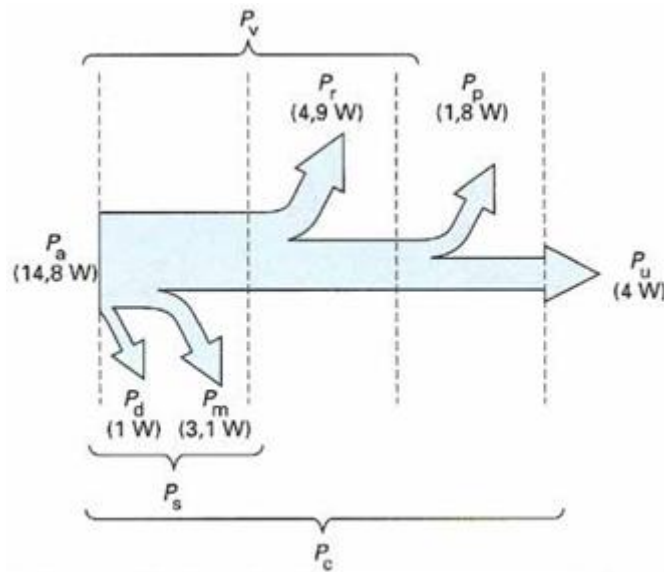
Tableau 2.2-Avantages des actionneurs piézoélectriques [1] [11] [16].

Les majeurs inconvénients de ce type d'actionneurs PZT peuvent être résumés dans le tableau (2.3) qui suit :

inconvénients
• Nécessite une source d'alimentation à haute fréquence.
• Caractéristiques non-linéaires qui requièrent des algorithmes de contrôle spécifiques.
• Non approprié au fonctionnement continu à cause du vieillissement par usure dû à la friction.
• Coût de fabrication élevé.

Tableau 2.3- Inconvénients des actionneurs piézoélectriques [1] [11] [16].

2.9.4-Bilan de puissance du moteur Shinsei USR 60



P_a	puissance électrique absorbée	P_u	puissance mécanique utile
P_v	pertes à vide ($=P_s + P_r$)	P_c	pertes en charge ($=P_v + P_p$)
P_s	pertes statoriques	P_r	pertes par roulement
P_d	pertes diélectriques	P_p	pertes par patinage
P_m	pertes par déformation		

Figure 2.19–Bilan de puissance du moteur Shinsei *USR 60* dans des conditions nominales de fonctionnement [25].

2.10-Situation du moteur piézoélectrique à onde progressive dans l'ensemble des actionneurs piézoélectriques.

Le schéma de la figure (2.20) permet de situer le moteur piézoélectrique à onde progressive par rapport à l'ensemble des actionneurs piézoélectriques.

On note que ce schéma est obtenu à partir d'un certain nombre de critères de classification qui sont :

- La méthode d'excitation.
- La méthode de construction.
- La fonction du moteur.

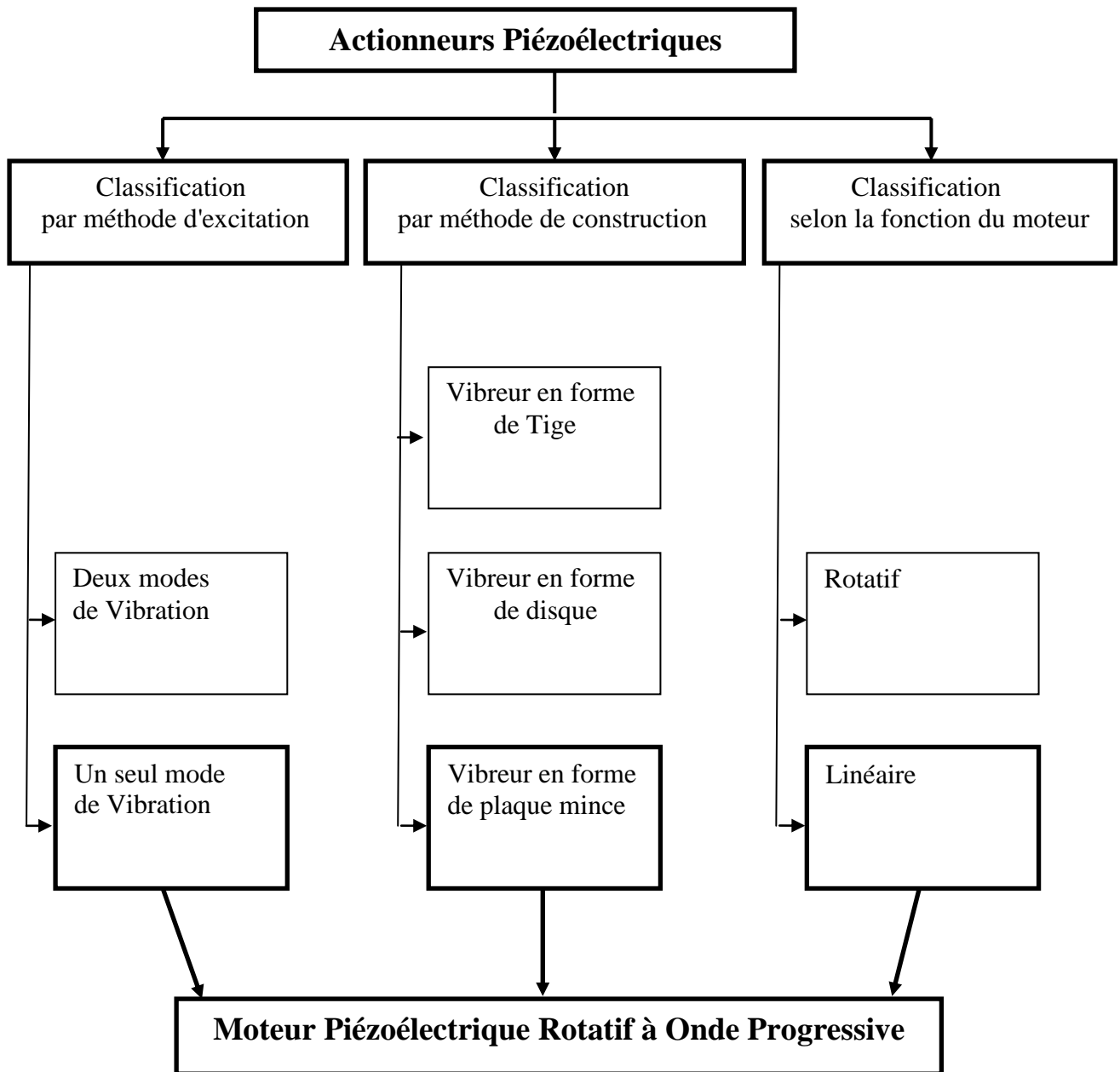


Figure 2.20-Classification des Actionneurs Piézoélectriques.

2.11-Conclusion :

Nous avons présenté autant que possible les prototypes d'actionneurs à céramique piézoélectrique dont on a pu collecter des différentes sources bibliographiques.

Les moteurs à onde progressive représentent le meilleur compromis actuel. La technologie employée reste relativement simple et les performances mécaniques sont parmi les plus intéressantes.

Dans la suite de cette étude notre choix s'est fixé sur le moteur Shinsei USR60 qui a eu un grand succès ces dernières années, Vu les caractéristiques techniques et les performances qu'il présente.

Le chapitre suivant sera consacré à l'étude théorique des phénomènes physiques qui régissent le fonctionnement du moteur. Ceci est dans le but d'élaborer un modèle analytique qui décrit son fonctionnement.

Chapitre 3

Modélisation Analytique du Moteur Piézoélectrique à Onde Progressive

3.1-Introduction

Dans le présent chapitre nous allons nous intéresser au moteur à onde progressive Shinsei USR60. Nous allons traiter plus particulièrement les points suivants :

- Les différents éléments constituant le moteur,
- Le principe de fonctionnement,
- Les avantages et les inconvénients,
- Les différents domaines d'application.

Le fonctionnement de ce moteur est fondé sur des interactions mutuelles de phénomènes variables et complexes comme : l'usure par friction et l'élévation de température ainsi que son alimentation en tension à haute fréquence,

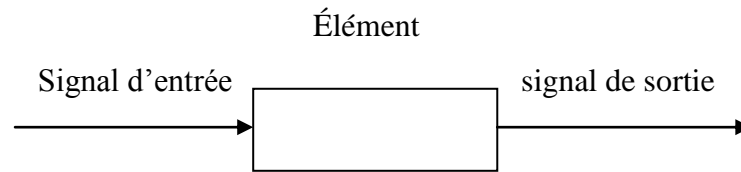
La compréhension et la description d'un système faisant intervenir et interagir plusieurs phénomènes de la physique s'avèrent en général très complexes, ce qui nous amène à subdiviser Le système global en plusieurs sous-systèmes. Ceci nous permet de mieux maîtriser le comportement. Ensuite chaque sous-système sera étudié séparément pour être exploitable dans l'environnement Matlab/Simulink. L'interaction de ces derniers permettra enfin de simuler le système global.

3.2-Schéma fonctionnel du moteur piézoélectrique à onde progressive

Un schéma fonctionnel consiste en une représentation graphique abrégée :

- des relations de cause à effet entre le signal d'entrée et le signal de sortie d'un système physique.
- de caractériser les relations fonctionnelles existant entre les différents organes d'un système.

Le schéma fonctionnel le plus simple est constitué d'un seul élément avec un signal d'entrée et un signal de sortie :



Dans le but de suivre cette approche méthodique de modélisation, le fonctionnement du moteur piézoélectrique à onde progressive est représenté par le schéma fonctionnel de la figure (3.1).

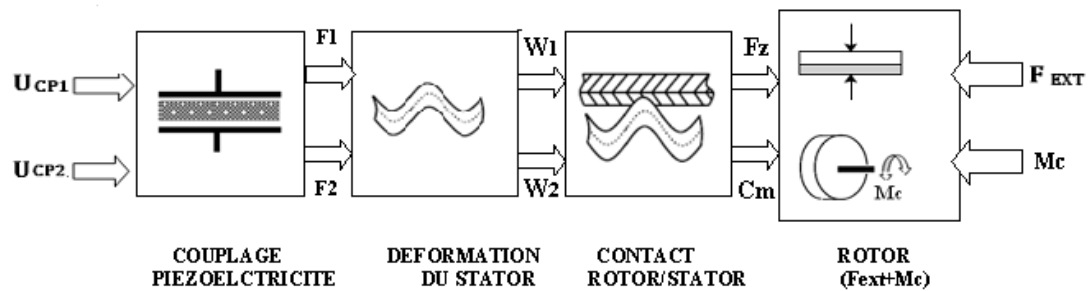


Figure 3.1-Schéma fonctionnel du moteur piézoélectrique à onde progressive [11], [15].

3.3 -Conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique

3.3.1-Création d'une onde de flexion

L'effet inverse de la piézoélectricité repose sur l'excitation en énergie électrique d'un élément piézoélectrique constitué de deux électrodes et d'un céramique piézoélectrique ;

- Si les deux électrodes (figure 3.2) sont de même épaisseur, la déformation obtenue est symétrique.

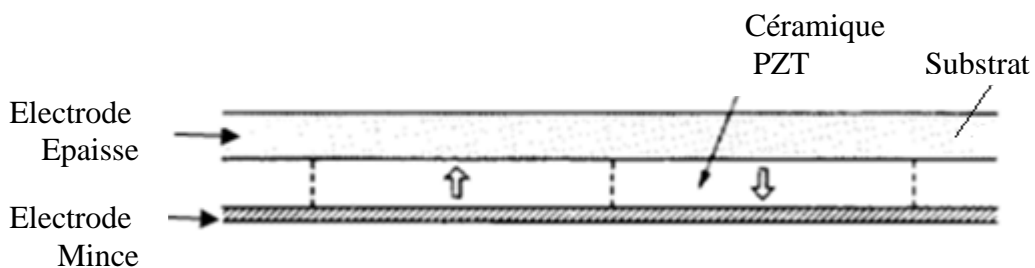


Figure 3.2- Céramiques en piézoélectricité entre deux électrodes [19].

- Par contre, si elles sont d'épaisseurs différentes, l'effet transversal déforme l'ensemble à cause de la différence des raideurs des électrodes, Si on généralise cette dissymétrie comme montré sur la figure (3.3) en assemblant alternativement plusieurs éléments piézoélectriques l'un à coté de l'autre et si on alimente les différents éléments judicieusement, on arrive à générer une onde de flexion stationnaire.

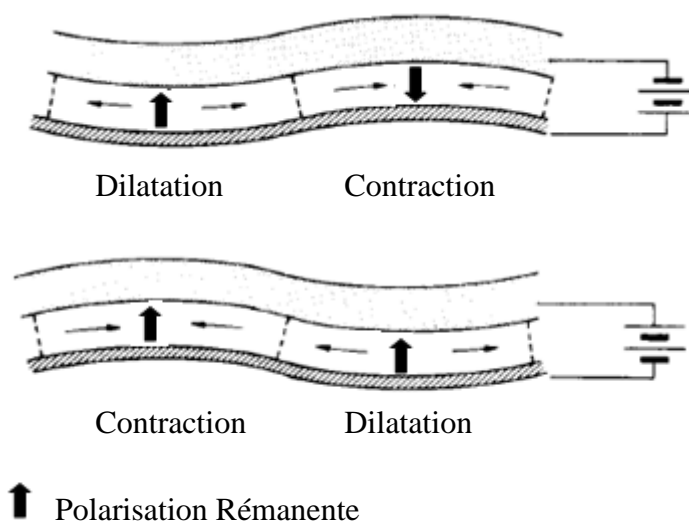


Figure 3.3-Déformation des céramiques en piézoélectricité [19].

3.3.2-Création d'une onde progressive

Un ensemble de pastilles en céramique piézoélectrique positives et négatives sont réparties alternativement afin qu'elles se déforment et donnent naissance à une ondulation variable de la structure qui change suivant la tension et la fréquence d'alimentation figure (3.4).

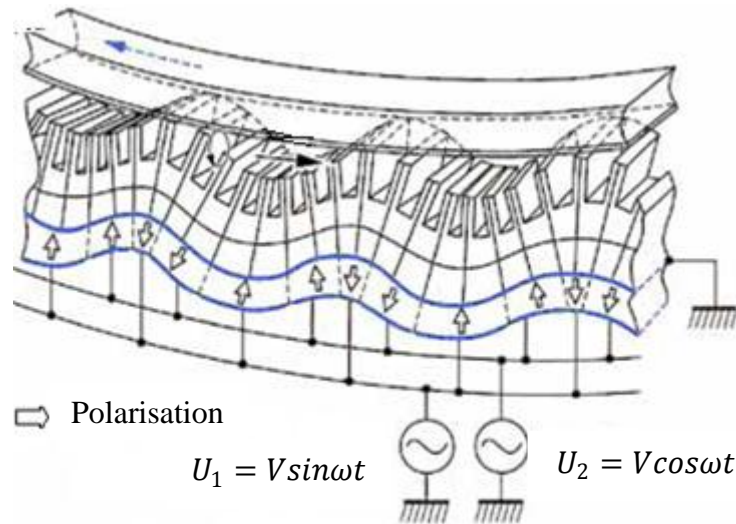


Figure 3.4- Génération de l'onde progressive [25].

3.3.3-Equation de la masse vibrante

Le potentiel électrique φ à la surface libre de l'anneau statorique est défini comme suit [6] :

$$\varphi = \Phi_e v$$

Avec :

v : représente le vecteur des tensions appliquées au stator suivant la relation :

$$v = \begin{pmatrix} U_{cp1}(t) \\ U_{cp2}(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V \sin \omega t \\ V \cos \omega t \end{pmatrix}$$

$U_{cp1,2}$: tensions d'alimentation du moteur.

Et la fonction Φ_e définie par la relation :

$$\Phi_e(\theta) = (\Phi_A(\theta) \quad \Phi_B(\theta))$$

La fonction $\Phi_e(\theta)$, est définie comme suit :

$\Phi_e(\theta) > 0$, dans le cas du champ électrique $\mathbf{E} > 0$.

$\Phi_e(\theta) < 0$, dans le cas contraire $\mathbf{E} < 0$.

$\Phi_e(\theta) = \Phi_A(\theta)$, pour désigner la fonction de la phase A.

et $\Phi_e(\theta) = \Phi_B(\theta)$, pour désigner la fonction de la phase B.

Avant d'entamer le reste de l'étude théorique, On tient à rappeler certaines données [8], concernant l'architecture mécanique de l'anneau statorique figure (3.5) qui est formé principalement de deux domaines :

Le domaine passif, généralement en bronze appelé substrat. Le domaine électroactif en céramique piézoélectrique qui à son tours divisé en trois groupes de pastilles en céramique distinctes réparties selon leurs fonctions :

- premier groupe de deux phases $\Phi_A(\theta)$, $\Phi_B(\theta)$ pour la création de l'onde progressive.

- L'électrode auxiliaire.

- L'électrode reliée à la terre (GND).

Le mode des céramiques choisies pour cet actionneur est le mode transversal d_{31} .

$\Phi_A(\theta)$, $\Phi_B(\theta)$ sont définies comme suit [6],[8] :

$$\Phi_A(\theta) = \begin{cases} 1 & \text{si } \frac{\pi}{18} + i\lambda < \theta < \frac{3\pi}{18} + i\lambda \\ -1 & \text{si } \frac{3\pi}{18} + i\lambda < \theta < \frac{5\pi}{18} + i\lambda \end{cases}$$

$$\Phi_B(\theta) = \begin{cases} 1 & \text{si } \pi + i\lambda < \theta < \frac{10\pi}{9} + i\lambda \\ -1 & \text{si } \frac{10\pi}{9} + i\lambda < \theta < \frac{11\pi}{9} + i\lambda \end{cases}$$

Pour $i \in \{0,1,2,3\}$

Avec :

λ : Longueur d'onde,

Chaque phase comporte quatre paires de pastilles ;

θ_A est limitée entre 10° et 170° .

θ_B est limitée entre 180° et 340° .

- La pastille de longueur $\frac{\lambda}{4}$ située entre 170° et 180° est utilisée comme capteur d'informations.
- La pastille de longueur $\frac{3\lambda}{4}$ située entre 340° et 10° est reliée à la masse.

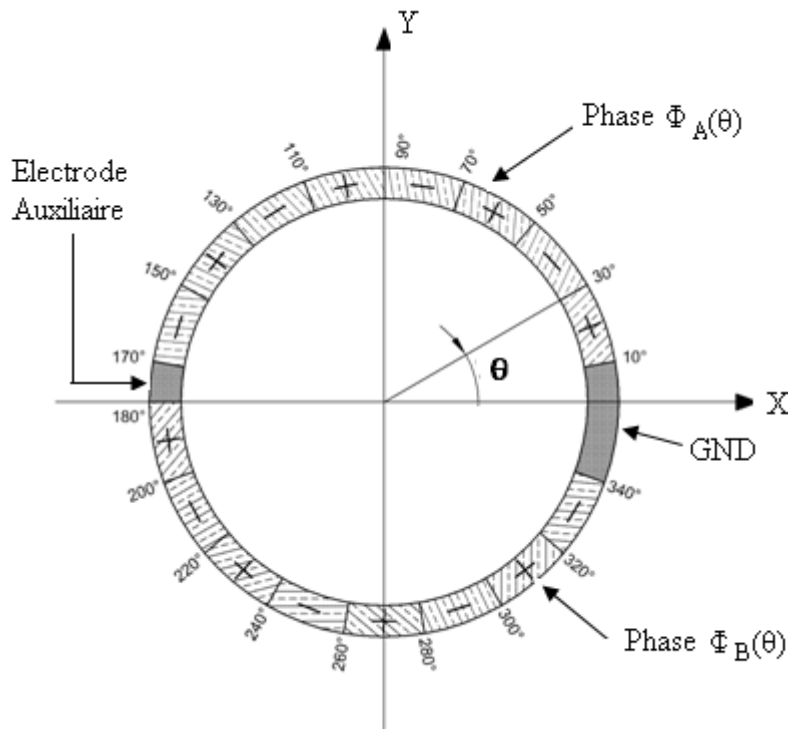


Figure 3.5-Anneau bloc du moteur piézoélectrique à onde progressive [6] [8].

3.4-Modélisation de la dynamique de déformation du stator

3.4.1-Conversion électromécanique

Le but de cette section est de développer un modèle qui permettra de lier l'amplitude de déformation de l'onde progressive à la tension appliquée aux bornes des céramiques.

Les forces F_{v1}, F_{v2} qui créent les déformations dans les structures céramiques sont proportionnelles aux tensions d'alimentation U_{cp1}, U_{cp2} .

On peut donc écrire :

$$F_{v1} = \eta U_{cp1} \quad (3.1)$$

$$F_{v2} = \eta U_{cp2} \quad (3.2)$$

- η : facteur de force des céramiques piézoélectriques associé à une phase.

C'est au niveau de l'anneau mince multicouche du stator que s'effectue la conversion d'énergie électromécanique.

Les portions en céramique piézoélectrique collées au dessous du stator créent deux modes orthogonaux de vibration, leur superposition produit l'onde progressive.

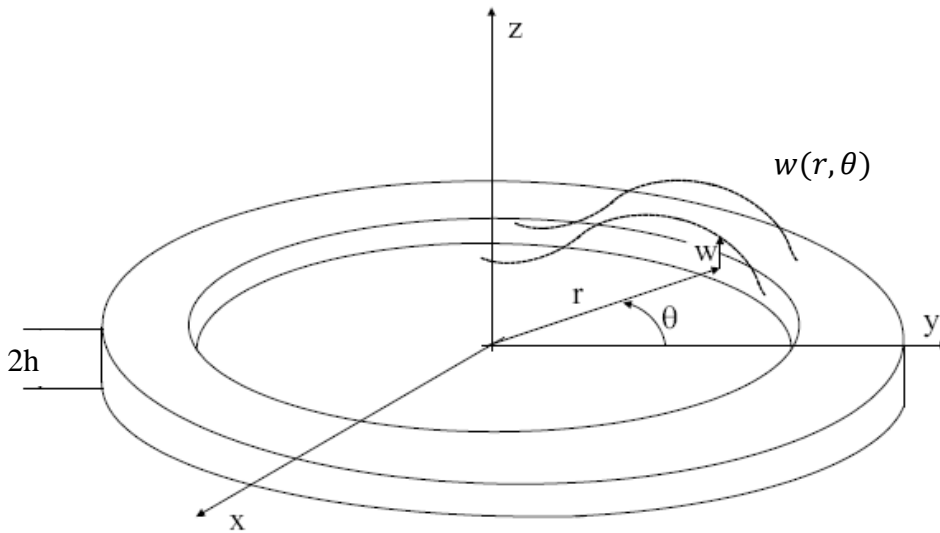


Figure 3.6-Déformation de l'anneau du stator décrit en coordonnées polaires [11].

L'équation aux dérivées partielles en coordonnées polaires des vibrations du stator s'écrit, conformément à la théorie classique des plaques circulaires [14], [6] :

$$\frac{E_s h^2}{3(1 - \nu_s^2)} \nabla^4 w(r, \theta, t) + \rho_s h \frac{\partial^2 w(r, \theta, t)}{\partial t^2} = 0 \quad (3.3)$$

Avec :

$w(r, \theta, t)$: La fonction décrivant les vibrations du stator en coordonnées polaires (r, θ) .

E_s : Le module de Young.

ν_s : Le coefficient de Poisson.

ρ_s : La masse volumique du matériau de l'anneau statorique.

h : La moitié de l'épaisseur de la plaque (figure 3.6).

∇ : L'opérateur de Laplace exprimé en coordonnées polaires :

$$\nabla^4 = \left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \right)^2$$

Dans notre cas, la symétrie circulaire de l'anneau est satisfaite,

L'équation (3.3) admet des solutions de la forme [11] :

$$w(r, \theta, t) = \xi(r) \cos k\theta \sin(\omega t)$$

$\xi(r)$: Représente la fonction de Bessel qui modélise l'amplitude des vibrations dans la direction radiale.

Il existe deux fonctions propres linéairement indépendantes :

$$w_1(r, \theta) = \xi(r) \cos k\theta \quad (3.4)$$

$$w_2(r, \theta) = \xi(r) \cos \left(k\theta + \frac{\pi}{2} \right) \quad (3.5)$$

On peut ainsi superposer deux vibrations libres d'équation [11] :

$$w_1(r, \theta, t) = W_{1max}(t) \xi_1(r) \cos(\omega t) \cos k\theta \quad (3.6)$$

$$w_2(r, \theta, t) = -W_{2max}(t) \xi_2(r) \cos(\omega t + \varphi) \sin k\theta \quad (3.7)$$

Comme la structure du moteur est symétrique, donc les amplitudes des deux ondes libres ont la même amplitude ($W_{1max} = W_{2max} = W_{max}$) et sont en quadrature de phase dans le temps ($\varphi = \frac{\pi}{2}$).

La combinaison des deux modes propres génère une onde progressive d'équation :

$$w(r, \theta, t) = W_{max}(t) \xi(r) \cos(k\theta - \omega t) \quad (3.8)$$

La fonction de Bessel $\xi(r)$ permet de modéliser l'amplitude de l'onde dans la direction radiale.

Dans le cas du moteur USR60 la largeur de la plaque du stator est beaucoup plus petite par rapport au diamètre moyen R_0 du moteur, par conséquent on fait l'hypothèse [11] que l'amplitude de déformation de l'onde dans la direction radiale est constante.

L'équation (3.8) devient :

$$w(\theta, t) = W_{max}(t) \cos(k\theta - \omega t) \quad (3.9)$$

La vitesse tangentielle des points à la surface du stator entraîne le rotor grâce aux forces de friction agissant dans la zone de contact entre le stator et le rotor.

La vitesse de rotation tangentielle du rotor est exprimée par la relation (3.10) [2],

$$V_r = R_0 \dot{\theta} \quad (3.10)$$

R_0 : étant le rayon moyen de l'anneau statorique.

$\dot{\theta}$: vitesse angulaire du rotor.

3.4.2-Schéma équivalent en analogie mécanique du stator

Il s'agit de modéliser la dynamique de la déformation du stator. C'est à dire la description du phénomène de contact entre stator et rotor et la détermination des

amplitudes de déformation en fonction de la tension appliquée aux bornes des céramiques piézoélectriques.

Pour réaliser cette analogie mécanique du stator et mettre en évidence un schéma équivalent, une approche basée sur la méthode du bilan énergétique est appliquée [8] [11].

faire une approche possible est la méthode du bilan énergétique.

En effet, on applique la méthode du bilan énergétique modifié pour les systèmes électromécaniques pour faire une approche suivant l'équation (3.11) [6] :

$$\delta \int_{t_1}^{t_2} \mathcal{L} dt + \int_{t_1}^{t_2} \delta \mathcal{W} dt = 0 \quad (3.11)$$

Avec:

δ : Opérateur de variation infinitésimale.

\mathcal{L} : Le Lagrangien du système.

$\delta \mathcal{W}$: La variation de travail infinitésimal donnée par les forces extérieures.

Le Lagrangien du système est donné par la relation 3.12 :

$$\mathcal{L} = E_K - E_p + E_e \quad (3.12)$$

Avec :

- E_K L'énergie cinétique contenue dans le substrat du stator.
- E_p L'énergie potentielle élastique contenue dans la couche de céramique piézoélectrique.
- E_e L'énergie électrique des différentes composantes du stator.

La dynamique du stator est résumée dans les deux équations différentielles (3.13) et (3.14) [11],[9] :

$$m_s \ddot{w}_1(t) + d_s \dot{w}_1(t) + c_s w_1(t) = F_{v1} - F_{C1}(t) \quad (3.13)$$

$$m_s \ddot{w}_2(t) + d_s \dot{w}_2(t) + c_s w_2(t) = F_{v2} - F_{C2}(t) \quad (3.14)$$

Avec :

- F_{v1}, F_{v2} les forces générées par effet piézoélectrique dans chaque phase du système (relations 3.1 et 3.2).
- F_{c1} et F_{c2} les forces de réaction modales dues au chargement axial (force de précontrainte) entre le stator et le rotor.
- m_s la masse du stator.
- $w_1(t)$ et $w_2(t)$ représentent l'amplitude de déformation des deux ondes stationnaires.
- d_s coefficient d'amortissement représentant l'élasticité de la structure.
- c_s la rigidité de la céramique.

Ainsi la dynamique du stator décrite par les deux équations peut être schématisée suivant le modèle du schéma de la figure 3.7 [11], [8].

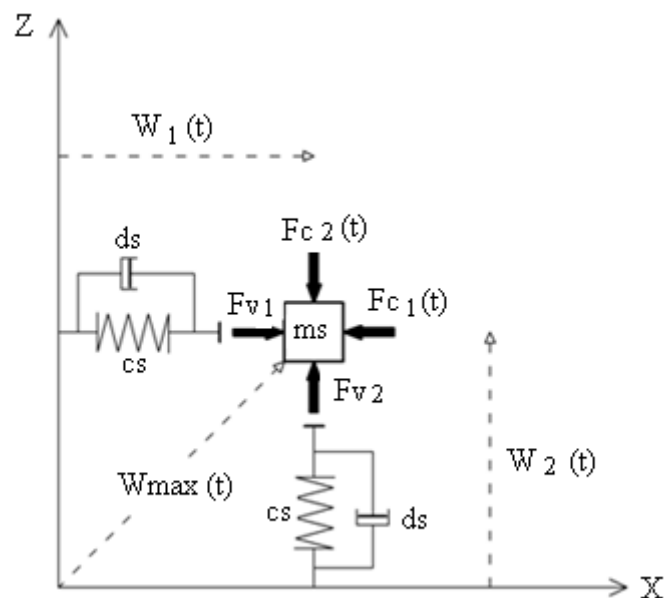


Figure 3.7-Schéma équivalent de la dynamique de la déformation du stator [11].

Comme les deux ondes stationnaires sont en quadrature de phase dans l'espace, l'amplitude de crête de l'onde progressive résultante est donnée par l'équation :

$$w_{max}(t) = \sqrt{w_1^2(t) + w_2^2(t)} \quad (3.15)$$

3.5-Modélisation du contact mécanique entre stator et rotor

Chaque point du contact stator/rotor figure (3.9) appartenant à la surface de l'onde progressive du stator décrit une trajectoire elliptique.

Une force extérieure F_{ext} applique une contrainte extérieure uniformément répartie.

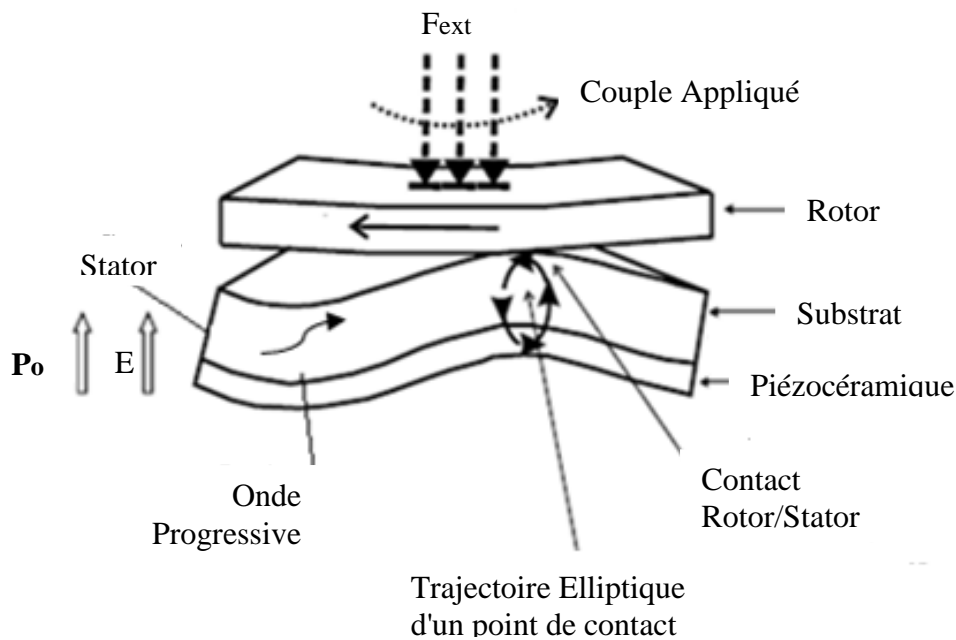


Figure 3.9-Entrainement par friction par mouvement vibratoire elliptique [2].

L'étude des phénomènes liés au contact mécanique entre stator et rotor est abordée en faisant les hypothèses suivantes :

- Les modes d'excitation sont parfaitement sinusoïdaux et à amplitudes égales.
- La géométrie du contact est admise symétrique par rapport à la crête de l'onde progressive figure (3.9) [11].
- Les déphasage temporel et spatial entre les modes égal à $\frac{\pi}{2}$.

Ainsi, la vitesse tangentielle des points de la surface du stator appartenant à l'onde progressive résultante obéit à l'équation 3.16 [11], [2]:

$$V_t(x, t) = v_{tmax}(t) \cos(kx - \omega t) \quad (3.16)$$

Dont v_{tmax} est représentée par l'équation [2] :

$$v_{tmax}(t) = -\frac{2\pi\omega h}{\lambda} W_{max}(t) \quad (3.17)$$

Avec :

$$\lambda = \frac{2\pi R_o}{n}, \quad R_o : \text{étant le rayon moyen de l'anneau statorique.}$$

n : nombre d'ondes contenues dans l'anneau statorique.

$$\omega = 2\pi f, \quad \text{avec } f : \text{la fréquence d'alimentation.}$$

Le signe (-) dans (3.17) montre que la vitesse tangentielle $v_{tmax}(t)$ de l'onde progressive est opposée à la vitesse rotationnelle du rotor V_r .

En remplaçant : $x = \theta - \frac{\omega}{k} t$ dans (3.9) on obtient:

$$w(x, t) = W_{max}(t) \cos kx \quad (3.18)$$

Le schéma de la figure (3.10) montre le mécanisme de contact entre le stator et le rotor pour une crête de l'onde progressive.

Le rotor est modélisé avec un substrat élastique (épaisseur élastique) de rigidité équivalente K_e .

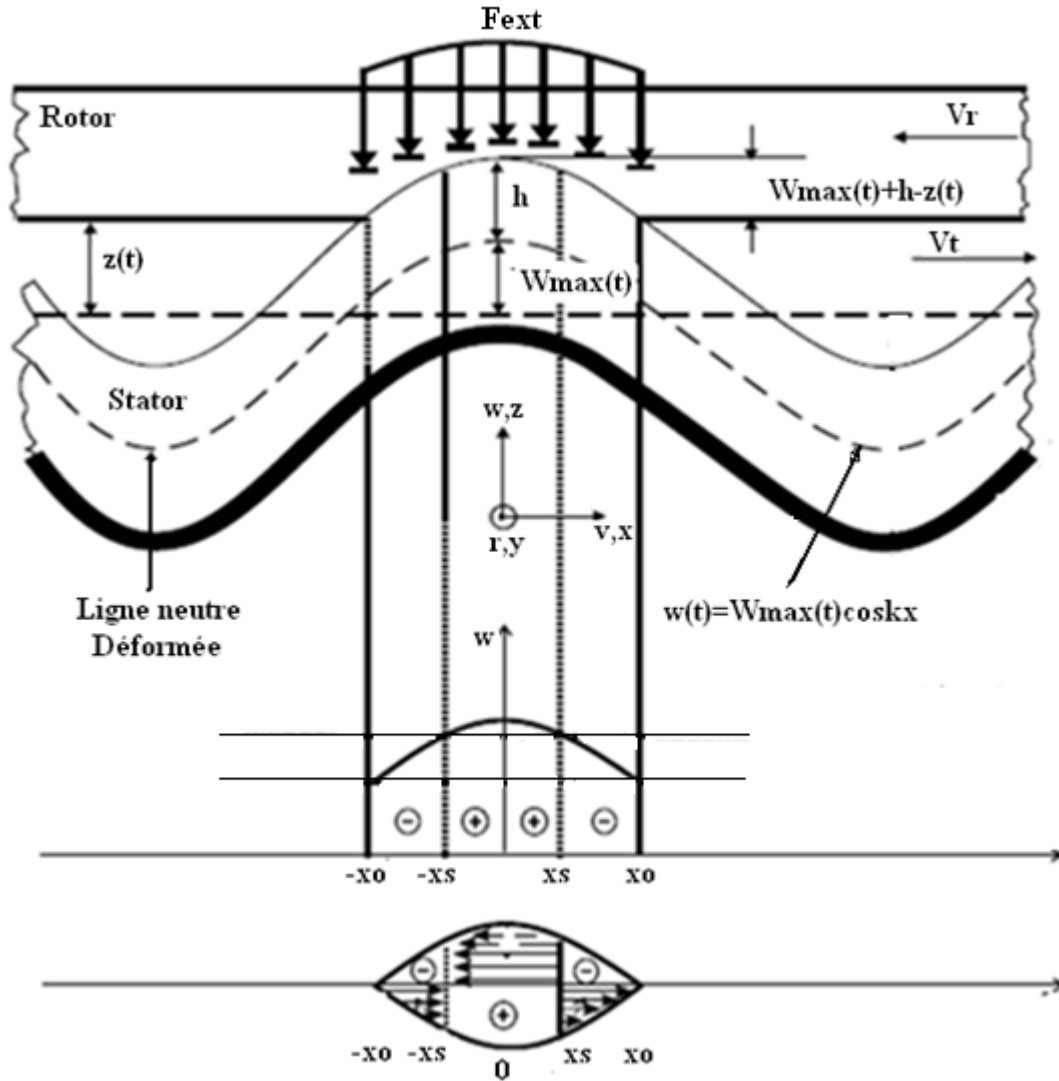


Figure 3.10–Schéma du contact mécanique stator/rotor [6].

- x_0 est la demi-largeur de la zone de contact entre le rotor et le stator.
- $z(t)$ est le déplacement vertical relatif du rotor par rapport à la ligne neutre du stator ; voir figure (3.10).

Au point $x = x_0$, l'équation (3.18) devient [6] :

$$w(x_0, t) = h - z(t) = W_{max}(t) \cos kx_0 \Rightarrow x_0(t) = \frac{1}{k} \arccos \left(\frac{h - z(t)}{W_{max}} \right)$$

$$x_0(t) = \frac{1}{k} \arccos \left(\frac{h - z(t)}{W_{max}} \right) \quad (3.19)$$

- $-x_s$ et $+x_s$ sont les points où la vitesse tangentielle du stator V_t est égale à celle du rotor V_r ,

x_s est appelé le point de non glissement [39], (x_s est nommé en anglo-saxon stick-point qu'on traduit par point d'adhérence ou point de non glissement) et est calculé par la relation (3.20) [6].

$$x_s(t) = \frac{1}{k} \arccos \left(\frac{R_o^2 \dot{\theta}}{\omega k h W_{max}} \right) \quad (3.20)$$

Le long de la zone de contact ($-x_0 \leq x \leq x_0$), la contraction de l'épaisseur élastique Δw est donnée par l'équation 3.21.

$$\Delta w(x, t) = W_{max}(t) (\cos kx - \cos kx_0(t)) \quad (3.21)$$

La force verticale par unité de longueur $F_v(x, t)$ agissant dans la zone de contact est aisément déduite en connaissant la rigidité équivalente K_e de l'épaisseur élastique. On trouve :

$$F_v(x, t) = K_e W_{max}(t) (\cos kx - \cos kx_0(t)) \quad (3.22)$$

En appliquant la loi du frottement à l'équation 3.22 on obtient la force de traction par unité de longueur $\tau(x, t)$.

$$\tau(x, t) = \text{sgn}(V_t(x, t) - V_r(t)) \mu_d F_v(x, t) \quad (3.23)$$

- μ_d Le coefficient de frottement dynamique entre stator et rotor.

La fonction signe(sgn), appliquée au champ des vitesses de glissement ($V_t(x, t) - V_r(t)$) nous permet de déterminer les zones de traction et celles de freinage selon le schéma de contact stator/rotor représenté à la (figure 3.10).

La force de traction $F_t(t)$ associée à une crête de l'onde progressive est obtenue en intégrant l'équation (3.24) le long de la zone de contact :

$$F_t(t) = \int_{-x_0}^{x_0} \tau(x, t) dx \quad (3.24)$$

Le couple moteur C_m sera calculé par la relation :

$$C_m(t) = nR_o F_t(t) \quad (3.25)$$

Avec :

R_o Rayon moyen du stator.

n Le nombre de crêtes d'ondes dans l'anneau statorique.

$F_t(t)$ La force de traction associée à une crête de l'onde progressive.

La relation (3.24) permet de définir les différents cas possibles de fonctionnement du moteur en localisant les zones de freinage et de traction pour les différentes positions relatives des points $|x_o|$, et $|x_s|$.

On commence par :

cas 1 : $|x_s| \leq x_0$.

$$F_t(t) = \frac{2W_{max}(t)\mu_d K_e}{k} (2(\sin kx_s - kx_s \cos kx_0) - (\sin kx_o - kx_o \cos kx_0)) \quad (3.26)$$

Si on pose :

$$\phi_r(x_s) = \sin kx_s - kx_s \cos kx_0 \quad (3.27)$$

Et

$$\phi_r(x_o) = \sin kx_o - kx_o \cos kx_0 \quad (3.28)$$

Alors l'équation (3.26) devient :

$$F_t(t) = \frac{2W_{max}(t)\mu_d K_e}{k} (2\phi_r(x_s) - \phi_r(x_o)) \quad (3.29)$$

On obtient deux zones de freinage intercalées par une de traction (figure 3.10)

cas 2 : $|-x_s| > x_0$ et $+x_s \leq x_0$

On a une zone de freinage et une zone de traction.

$$F_t(t) = \frac{2W_{max}(t)\mu_d K_e}{k} \phi_r(x_s) \quad (3.30)$$

cas 3 : $|-x_s| \leq x_0$ et $+x_s > x_0$

$$F_t(t) = \frac{2W_{max}(t)\mu_d K_e}{k} \phi_r(x_s) \quad (3.31)$$

C'est le même résultat que celui obtenu dans le cas précédent(3.30).

cas 4 : $|-x_s| > x_0$ et $+x_s > x_0$

$$F_t(t) = \frac{2W_{max}(t)\mu_d K_e}{k} \phi_r(x_0) \quad (3.32)$$

La friction est entièrement convertie en traction sur toute la zone de contact.

C'est le cas idéal du fonctionnement du moteur.

cas 5 : $|V_r| > |v_{tmax}|$;

$$F_t(t) = -\frac{2W_{max}(t)\mu_d K_e}{k} \phi_r(x_0) \quad (3.33)$$

Dans ce cas il y a seulement un effet de freinage, le moteur est non fonctionnel.

3.6-Modélisation de la dynamique du rotor

Le rotor du moteur a deux degrés de liberté :

- Mouvement de translation vertical figure (3.11).

En appliquant les lois de la dynamique au rotor on aboutit aux deux équations relatives à la vitesse de translation \dot{w}_r [8] :

$$m_r \ddot{w}_r + d_r \dot{w}_r = F_z - F_{ext} \quad (3.34)$$

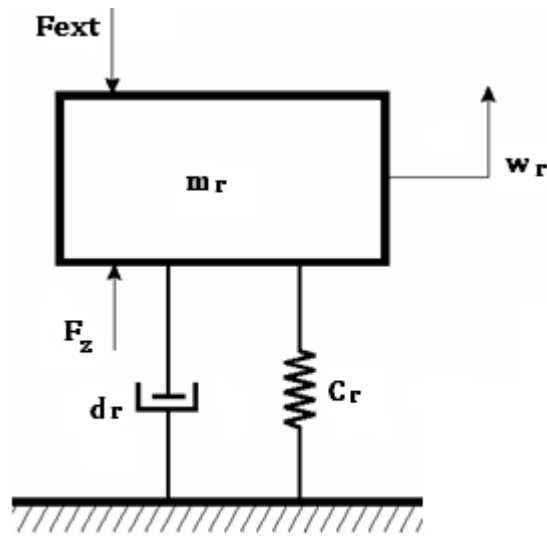


Figure 3.11-Schéma fonctionnel du mouvement de translation vertical du rotor [39].

- Mouvement de rotation figure (3.12).

Et la vitesse angulaire $\dot{\theta}$ dont le mouvement de rotation est définie par l'équation (3.35) :

$$J_r \frac{d}{dt} \dot{\theta} = C_m - M_c \quad (3.35)$$

Avec :

- m_r Masse du rotor ;
- J_r Inertie du rotor ;
- $\dot{\theta}$ vitesse angulaire du rotor ;
- C_m Couple moteur ;
- M_c Couple de charge ;
- F_{ext} Force de précontrainte ;
- F_z Force de réaction axiale due à la contraction de l'épaisseur élastique ;
- d_r Coefficient d'amortissement dans la direction axiale ;
- \dot{w}_r Vitesse de translation du rotor suivant l'axe Z.

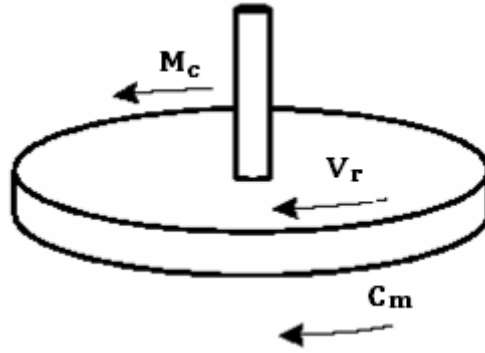


Figure 3.12-Schéma fonctionnel du mouvement de rotation du rotor [39].

La force de réaction totale dans la direction axiale F_Z due à la contraction de l'épaisseur élastique, est calculée par intégration de l'équation 3.22,

Nous obtenons :

$$F_Z(t) = n \int_{-x_0}^{x_0} F_v(x, t) dx \quad (3.36)$$

Avec :

n : nombre de crête d'onde contenue dans l'anneau statorique.

En développant l'équation (3.36) [10] ,

$$F_Z(t) = 2n \frac{K_e}{k} W_{max} \phi_r(x_0) \quad (3.37)$$

avec $\phi_r(x_0)$ Définie dans l'équation (3.28)

L'équation (3.36) devient :

$$F_Z(t) = 2n \frac{K_e}{k} W_{max} (\sin kx_0 - kx_0 \cos kx_0) \quad (3.38)$$

3.7-Calcul des forces de réaction modales

La contraction de l'épaisseur élastique due à la force de précontrainte provoque par la troisième loi de Newton d'action et réaction une force qui aura tendance à réduire l'amplitude de l'onde progressive du stator.

Comme l'onde progressive résulte de la superposition de deux modes de vibrations en quadrature de phase spatiale, F_{c1} et F_{c2} sont calculées en utilisant le vecteur ϕ_x^T pour décomposer séparément l'effet de la force globale sur les deux modes séparément :

$$\phi_x^T = (\sin kx \quad \cos kx)$$

$$\begin{pmatrix} F_{c1} \\ F_{c2} \end{pmatrix} = \phi_x^T N \int_{-x_0}^{x_0} F_v(x, t) dx \quad (3.39)$$

Par intégration de l'équation 3.39 on obtient pour F_{c1} et F_{c2} :

$$F_{c1}(t) = \frac{nK_e w_1(t)}{k} \left(kx_0 - \frac{1}{2} \sin 2kx_0 \right) \quad (3.40)$$

$$F_{c2}(t) = \frac{nK_e w_2(t)}{k} \left(kx_0 - \frac{1}{2} \sin 2kx_0 \right) \quad (3.41)$$

3.8-Récapitulation

Cette section résume les développements effectués dans ce chapitre en récapitulant les équations fondamentales qui nous ont permis de construire un modèle de simulation pour le moteur piézoélectrique à onde progressive dans l'environnement Matlab/Simulink.

3.8.1-Alimentation

Le moteur étudié est un récepteur biphasé alimenté en tension alternative à haute fréquence ;

L'une des phases est alimentée par une tension U_{cp1} .

L'autre est alimentée par une tension U_{cp2} , décalée de U_{cp1} par un déphasage $\left(\frac{\pi}{2}\right)$.

U_{cp1} et U_{cp2} sont à même fréquence.

3.8.2-Dynamique de déformation du stator

L'amplitude $w_1(t)$ et $w_2(t)$ des deux ondes stationnaires est obtenue grâce aux équations 3.13 et 3.14.

$$m_s \ddot{w}_1(t) + d_s \dot{w}_1(t) + c_s w_1(t) = \eta U_{cp1} - F_{C1}(t).$$

$$m_s \ddot{w}_2(t) + d_s \dot{w}_2(t) + c_s w_2(t) = \eta U_{cp2} - F_{C2}(t).$$

3.8.3-Zone de contact entre le stator et le rotor

La largeur de la zone de contact x_o et les points $-x_s ; +x_s$ où la vitesse tangentielle des points à la surface du stator est la même que la vitesse périphérique du rotor, sont définis respectivement à l'aide des équations (3.19) et (3.20).

On rappelle que ces points nous permettent de distinguer les zones de freinage des zones de traction.

$$x_o(t) = \frac{1}{k} \arccos\left(\frac{h-z(t)}{W_{max}}\right)$$

$$x_s(t) = \frac{1}{k} \arccos\left(\frac{R_o^2 \dot{\theta}}{\omega k h W_{max}}\right)$$

Les relations 3.27 et 3.28 nous donnent la force de traction par unité de longueur $\tau(x, t)$ et la force de traction totale F_t ; le couple moteur C_m est ensuite obtenu avec l'équation 3.30.

$$\tau(x, t) = \text{sgn}(V_t(x, t) - V_r(t)) \mu_d F_v(x, t)$$

$$F_t(t) = \int_{-x_o}^{x_o} \tau(x, t) dx$$

$$C_m(t) = n R_o F_t(t)$$

3.8.4-Dynamique du rotor

Le comportement du rotor par rapport à ces deux degrés de liberté, en rotation et en translation selon l'axe du moteur, est décrit respectivement à l'aide des équations 3.34 et 3.35.

$$m_r \ddot{w}_r + dr \dot{w}_r = F_z - F_{ext}$$

$$J_r \frac{d}{dt} \dot{\theta} = C_m - M_c$$

La force de réaction axiale F_z , due à la contraction de l'épaisseur élastique, calculé à partir de (3.38).

$$F_z(t) = 2n \frac{K_e}{k} W_{max} (\sin kx_0 - kx_0 \cos kx_0)$$

L'effet de la force de précontrainte sur les deux ondes stationnaires est modélisé avec les forces F_{c1} et F_{c2} données par 3.40 et 3.41.

$$F_{c1}(t) = \frac{nK_e w_1(t)}{k} \left(kx_0 - \frac{1}{2} \sin 2kx_0 \right)$$

$$F_{c2}(t) = \frac{nK_e w_2(t)}{k} \left(kx_0 - \frac{1}{2} \sin 2kx_0 \right)$$

3.9-Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté une synthèse des différentes relations mathématiques et physiques qui décrivent les phénomènes qui apparaissent dans le fonctionnement du moteur piézoélectrique à onde progressive .

La diversité et la complexité des phénomènes électroactifs mis en jeu a conduit à une subdivision en parties relativement simples pour réduire la complexité du système.

Ainsi on a structuré le schéma fonctionnel de figure (3.1) qui résume les différentes étapes de transformation qui se manifeste dans l'actionneur.

- La première consiste dans l'étude des phénomènes de conversion électromécaniques dans les céramiques piézoélectriques pour la modélisation de la dynamique du stator.
- La deuxième étape et la plus complexe à cause de l'interaction entre plusieurs phénomènes ; c'est l'étude de la dynamique du contact stator/rotor. En effet, on a

résumé les différents cas possibles de traction et de freinage qui peuvent se présenter .

- En dernière étape, on a traité la dynamique du rotor à travers deux équations principales qui résument le mouvement composé du rotor :
une translation verticale et une rotation.

Dans le chapitre qui suit nous allons simuler sous Matlab/Simulink le comportement du moteur piézoélectrique à onde progressive et ceci en fonctionnement à vide et en charge.

Chapitre 4

Simulation et interprétation des résultats

4.1-Introduction

A l'aide du modèle théorique établi dans le chapitre précédent, décrivant le comportement du moteur piézoélectrique à onde progressive nous allons dans ce qui suit simuler son fonctionnement.

Cette simulation va permettre de juger les performances du moteur en question dans les deux modes opératoires possibles : à vide et en charge.

L'outil de simulation le plus adéquat pour cette modélisation est l'environnement Matlab/Simulink.

En résumé, le schéma bloc figure (4.1) représente le moteur avec ses variables d'entrée et de sortie.

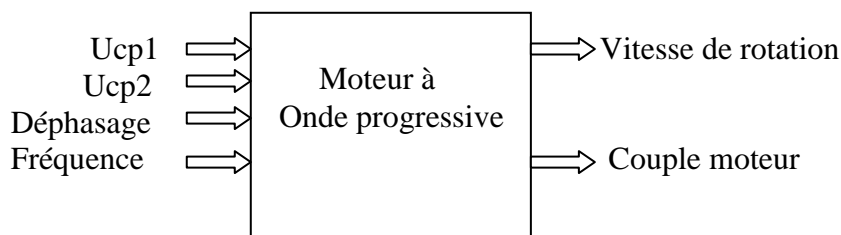


Figure 4.1-Schéma block du moteur.

Dans l'environnement Matlab/Simulink, nous pouvons donc piloter indépendamment les trois variables de commande du moteur (fréquence, déphasage et amplitude des deux tensions de phase).

4.2-Bloc stator

Le bloc stator sera alimenté par un système biphasé constitué principalement des deux équations fondamentales (4.1) et (4.2) :

$$U_{cp1}(t) = V \sin \omega t \quad (4.1)$$

$$U_{cp2}(t) = V \sin(\omega t + \varphi) \quad (4.2)$$

Les deux signaux U_{cp1} et U_{cp2} sont en quadrature. Le déphasage φ entre ces deux signaux vaut $\frac{\pi}{2}$.

V représente la tension maximale d'alimentation et ω la pulsation des tensions d'alimentation ($\omega = 2\pi f$). f désigne la fréquence d'alimentation.

Au cours de la simulation on peut changer ces paramètres selon les limites du moteur. La figure 4.2.1 représente le bloc d'alimentation.

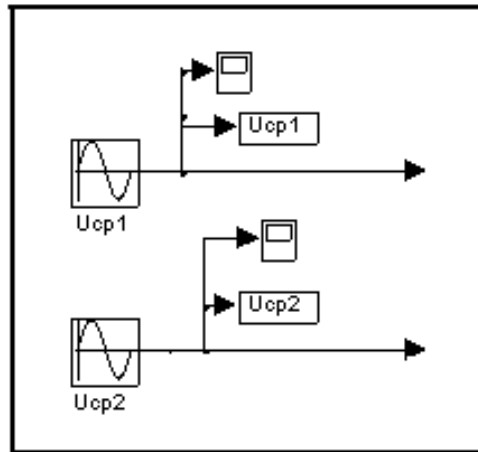


Figure 4.2.1-Alimentation biphasée U_{cp1} et U_{cp2} sous Matlab/Simulink.

Par application de la transformation de Laplace aux deux équations (3.13) et (3.14), on obtient :

$$w_1(s) = \frac{1}{m_s s^2 + d_s s + C_s} F_{v1}(s) - \frac{1}{m_s s^2 + d_s s + C_s} F_{c1}(s) \quad (4.3)$$

$$w_2(s) = \frac{1}{m_s s^2 + d_s s + C_s} F_{v2}(s) - \frac{1}{m_s s^2 + d_s s + C_s} F_{c2}(s) \quad (4.4)$$

Et en remplaçant les équations (3.1) et (3.2) respectivement dans (4.3) et (4.4), on obtient :

$$w_1(s) = \frac{\eta}{m_s s^2 + d_s s + C_s} U_{cp1}(s) - \frac{1}{m_s s^2 + d_s s + C_s} F_{c1}(s) \quad (4.5)$$

$$w_2(s) = \frac{\eta}{m_s s^2 + d_s s + C_s} U_{cp2}(s) - \frac{1}{m_s s^2 + d_s s + C_s} F_{c2}(s) \quad (4.6)$$

Pour faciliter l'écriture des équations dans l'environnement Matlab/Simulink, nous avons adopté les symboles suivants:

m_s La masse totale du stator est représentée dans l'environnement Matlab par M.

d_s Coefficient d'amortissement de déformation du stator est représenté par D.

C_s Rigidité équivalente du stator est représentée par K.

η Facteur de force associé aux céramiques de chaque phase est représentée par eta.

A partir des équations ((4.3) et (4.4)), ((3.40) et (3.41)); on construit le bloc stator illustré par la figure (4.2.2) qui suit:

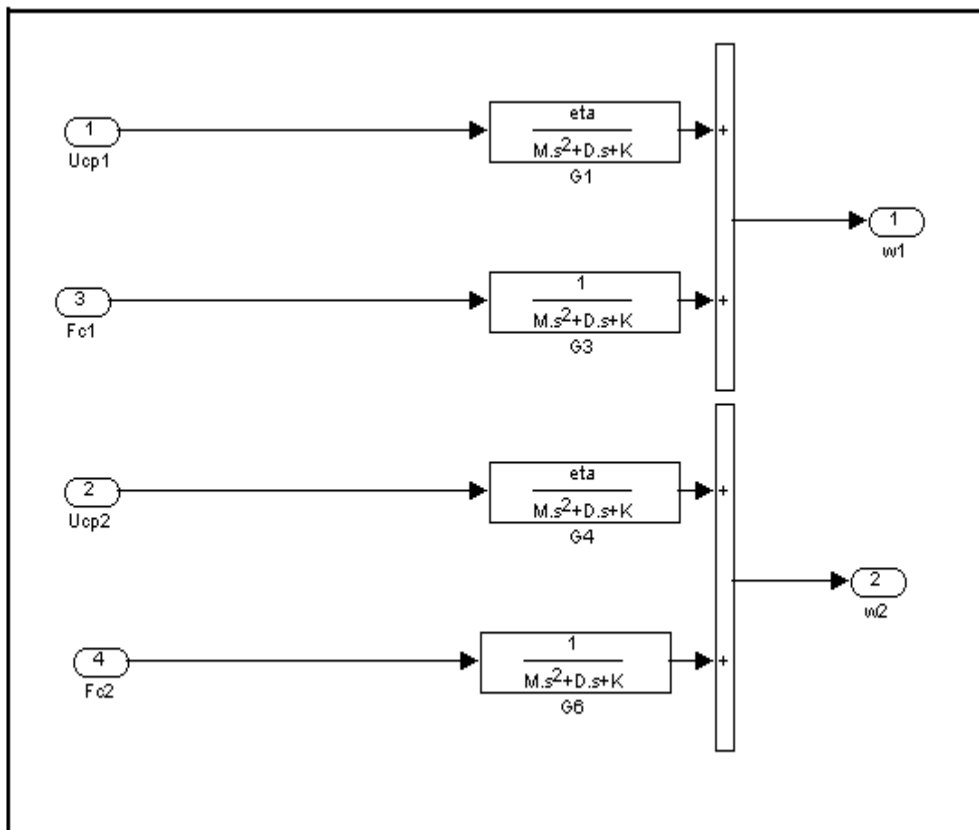


Figure 4.2.2-Détails du bloc fonction stator dans l'environnement Matlab/Simulink.

L'ensemble des blocs de la figure (4.2.2) seront contenus dans la fonction stator illustrée par la figure (4.2.3) qui suit :

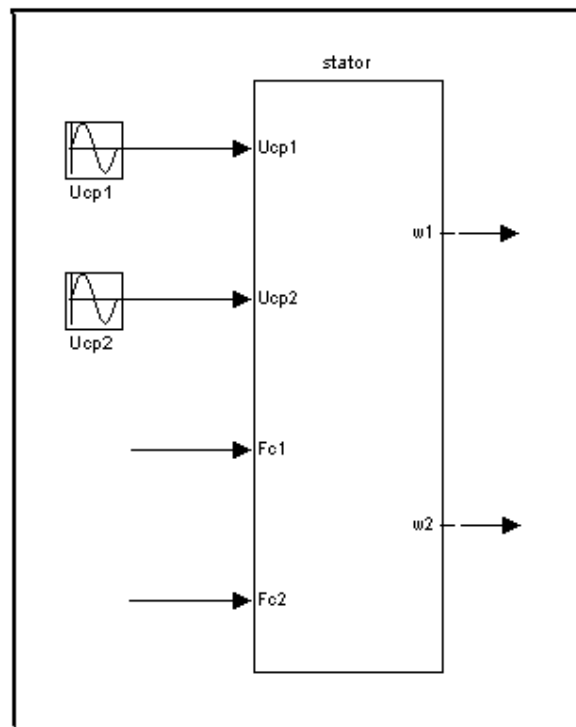


Figure 4.2.3-Bloc fonction stator sous Matlab/Simulink.

4.3-Bloc fonction A

Les sorties $w_1(t)$ et $w_2(t)$ seront injectées dans le bloc (fonction A) qui représente l'amplitude de crête de l'onde progressive résultante $w_{max}(t)$ qui s'exprime par l'équation (3.15).

Cette équation sera reformulée en langage Matlab dans le bloc fonction A qui suit, figure (4.3) :

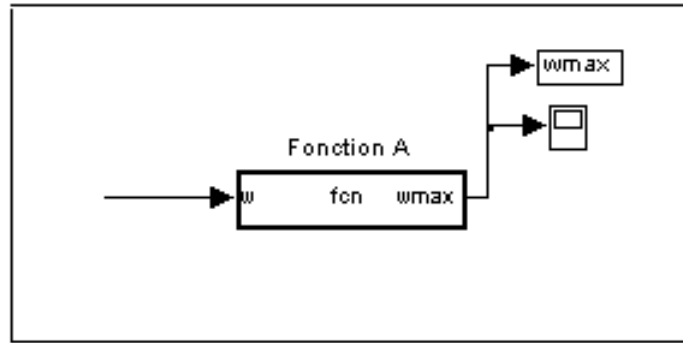


Figure 4.3-Bloc fonction A dans l'environnement Matlab/Simulink.

4.4-Bloc fonction B du contact Stator/Rotor

Dans ce bloc on récupère deux sorties essentielles qui sont le couple moteur C_m et le point de non glissement x_s ,

En substituant (3.28) dans (3.25), on obtient :

$$C_m(t) = \frac{2nR_o W_{max}(t) \mu_d K_e}{k} (2\phi_r(x_s) - \phi_r(x_0)) \quad (4.5)$$

Ce couple englobe le cas le plus général qui prend en considération la présence de la traction et le freinage.

Les équations qui constituent ce bloc sont : (3.20) ; (3.27) ; (3.28) ; (4.5) ; dont la structure sera comme suit figure (4.4.2) :

Ce bloc a plusieurs variables d'entrées qui sont comme suit :

- Theta D : la vitesse angulaire $\dot{\theta}$ dont l'expression est déduite de l'équation (3.34) comme suit :

$$J_r \frac{d}{dt} \dot{\theta} = C_m - M_c$$

$$\dot{\theta} = \frac{1}{J_r} \int (C_m - M_c) dt \quad (4.6)$$

- W_{max_act} : la sortie directe de la fonction A.
- μ : μ_d le coefficient de frottement dynamique entre stator et rotor.
- ω : la pulsation de l'alimentation électrique du moteur : $\omega = 2\pi f$.

- L : la longueur d'onde $\lambda = 2\pi R_o/n$
- A_{\min} : l'ondulation minimale limite de la surface du stator aux conditions aux limites (figure (4.4.1)) qui sont :

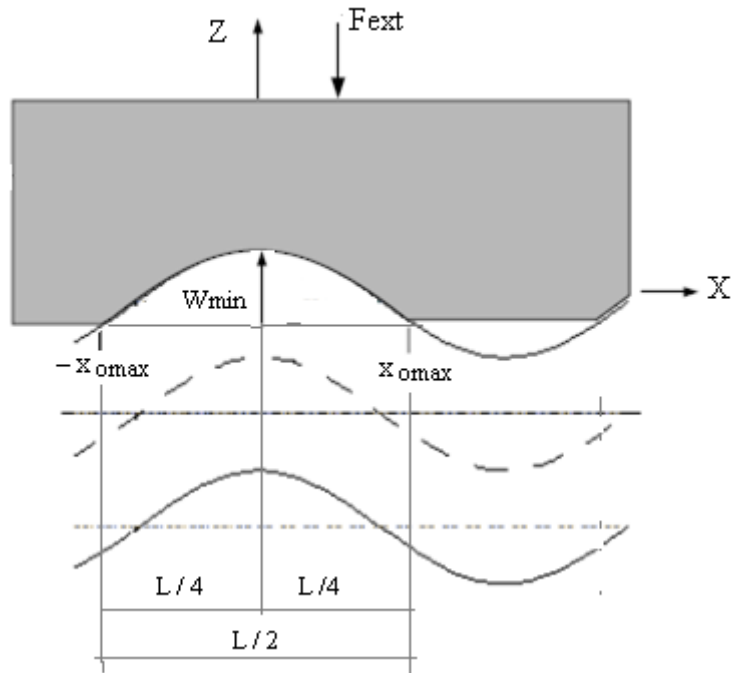


Figure 4.4.1-Contact Stator/Rotor[14].

- x_{omax} : la demi-largeur de la zone de contact maximale limite, (figure (4.4.1)) entre le rotor et le stator de l'équation (3.19),

$$x_{omax} = \frac{L}{4} \quad (4.7)$$

Pour calculer A_{\min} , à partir de l'équation (3.34) et pour ces conditions on peut écrire l'égalité :

$$F_z = F_{ext} \quad (4.8)$$

Et en remplaçant x_o par x_{omax} dans l'équation (3.38), on obtient :

$$F_{ext} = 2n \frac{K_e}{k} W_{max} \min (\sin k x_{0max} - k x_{0max} \cos k x_{0max}) \quad (4.9)$$

Ainsi la valeur minimale nécessaire pour éviter le décrochage du moteur est définie par la relation :

$$W_{max\ min} = \frac{F_{ext}}{2n \frac{K_e}{k} (\sin k x_{0max} - k x_{0max} \cos k x_{0max})} \quad (4.10)$$

donc $A_{\min} = W_{max\ min} = \frac{F_{ext}}{2n \frac{K_e}{k} (\sin k x_{0max} - k x_{0max} \cos k x_{0max})}$ (voir Annexe B)

- Ph-xo La fonction représente l'équation (3.28).
- Phi-xs La fonction représente l'équation (3.27).

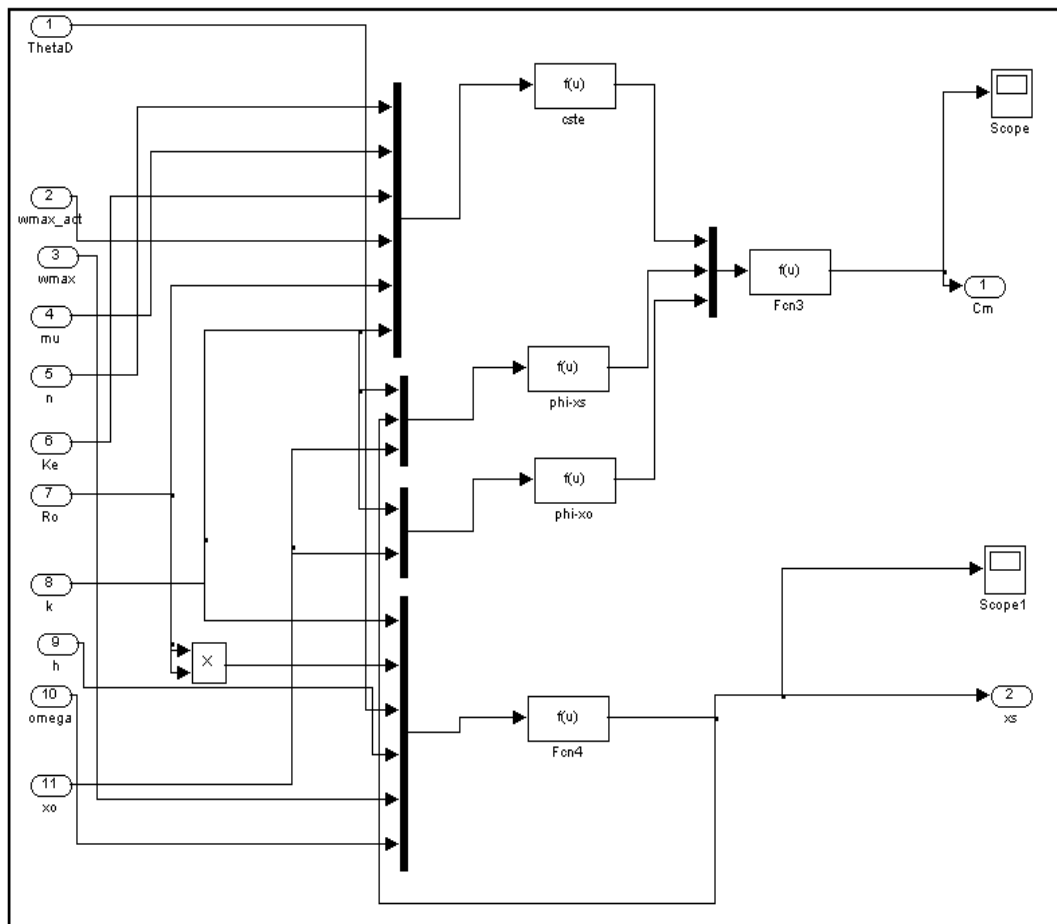


Figure 4.4.2-Détails du bloc fonction B dans l'environnement Matlab/Simulink.

Toute cette structure sera contenue dans une apparence réduite dans le bloc fonction B sous la forme figure (4.4.3) :

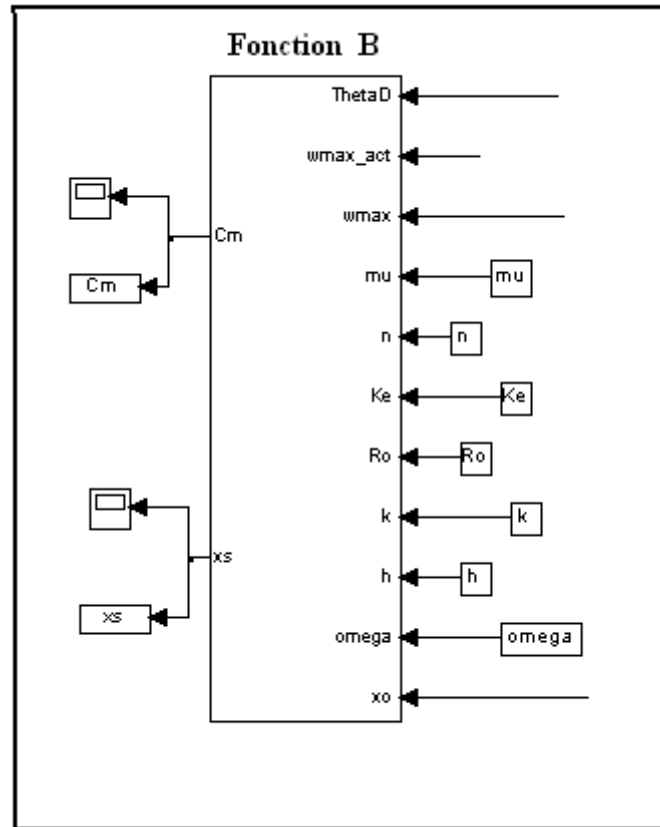


Figure 4.4.3-Bloc fonction B de l'interface stator/rotor sous Matlab/Simulink.

4.5 -Bloc fonction C

La fonction x_o est représentée par le bloc fonction C (fig.4.5.1) :

$$x_o(t) = \frac{1}{k} \arccos\left(\frac{h - z(t)}{W_{max}}\right)$$

- L'entrée W_{max} et la sortie $W_{max-out}$ sont égales puisqu'elles représentent le même signal.

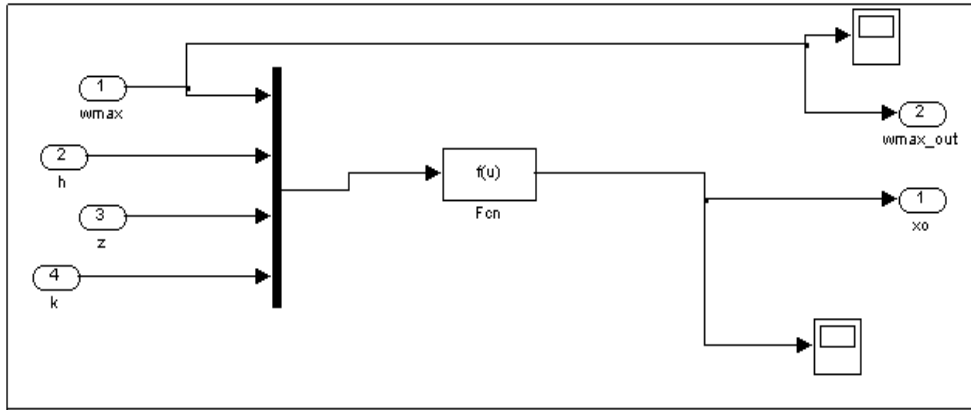


Figure 4.5.1–Détails de la fonction C sous Matlab/Simulink.

Le bloc fonction C sera sous la forme figure (4.5.2) :

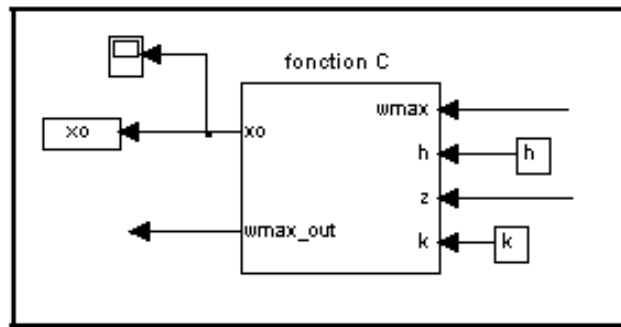


Figure 4.5.2-Bloc fonction C dans l'environnement Matlab/Simulink.

4.6-Bloc fonction D

La fonction D est construite à partir de l'équation (3.38). Cette équation est mise sous forme de bloc fonction D (fig.4.6) :

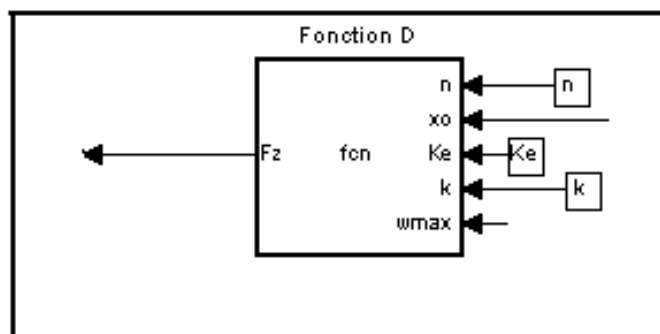


Figure 4.6-Bloc fonction D sous Matlab/Simulink.

4.7-Bloc fonction Rotor

La vitesse angulaire du moteur $\omega_R = R_o \dot{\theta}$ en [rd/s] est représentée par le symbole [rds] à la sortie du bloc de la fonction rotor ;

Pour obtenir la vitesse V_r en [tr/mn], on multiplie la sortie [rds] par $[30/\pi]$,

Les deux équations de ce bloc présentent la vitesse de rotation du moteur V_r en [tr/mn] et la vitesse angulaire ω_R en [rd/s] :

- La charge utilisée dans notre fonction est la fonction step dont le symbole est le suivant:



La sortie theta D est déjà traitée au paragraphe 4.4.

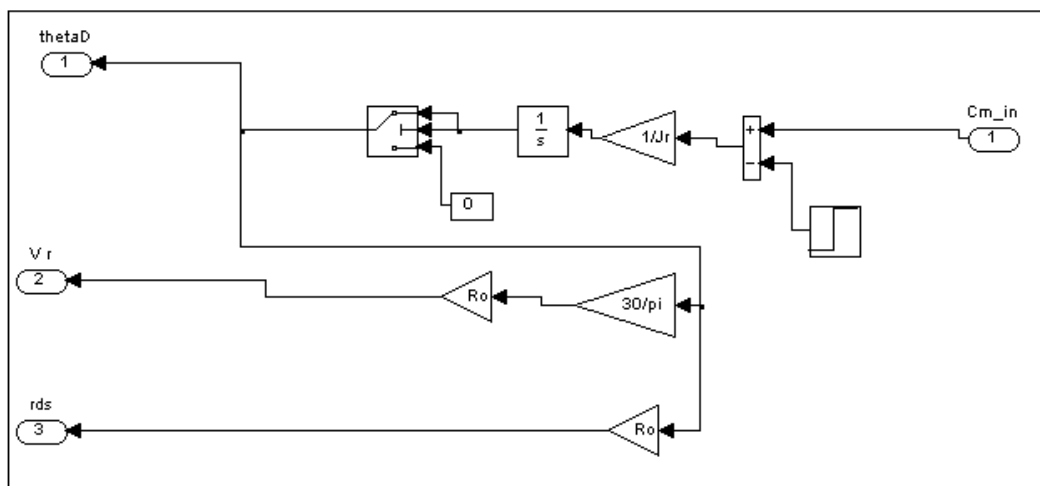


Figure 4.7.1- Détails de la fonction Rotor sous Matlab/Simulink.

La fonction Rotor sera convertie en bloc fonction rotor figure (4.6.2) :

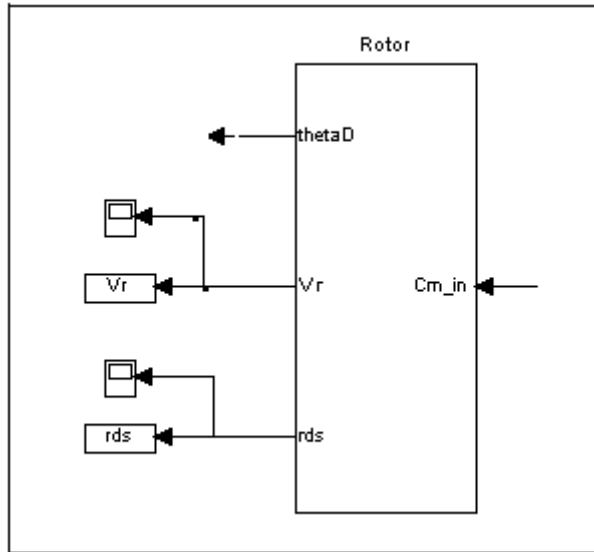


Figure 4.7.2-Bloc fonction Rotor sous Matlab/Simulink.

4.8-Bloc fonction E

Le bloc fonction E voir figure (4.8) destiné pour les forces de réaction modales dont les équations définies par (3.40) et (3.41) :

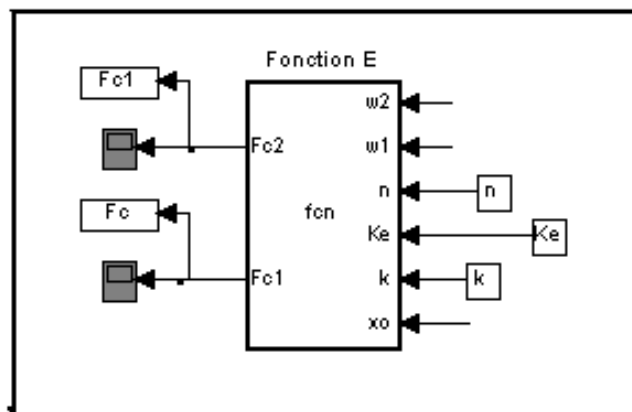


Figure 4.8-Bloc fonction E sous Matlab/Simulink.

Après conversion du schéma fonctionnel hybride de la figure (3.1) en modèle numérique sous Matlab/Simulink ; par interconnexion des différents blocs fonctions, on obtient le schéma complet présenté à la figure (4.9) :

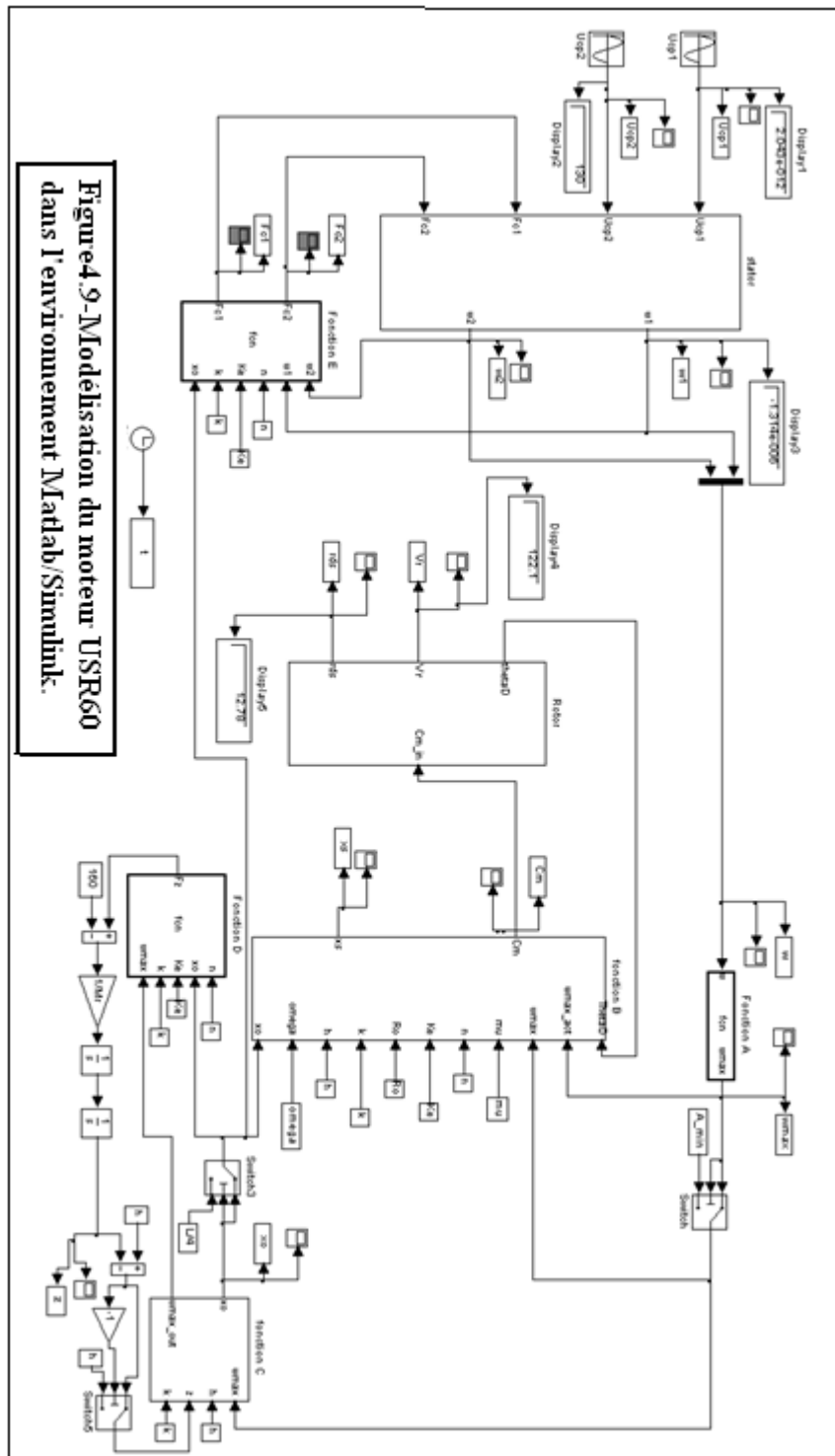


Figure 4.9-Modélisation du moteur USR60 dans l'environnement Matlab/Simulink.

Figure 4.9-Modélisation du moteur USR60 dans l'environnement Matlab/Simulink

[2]

Le modèle hybride ainsi obtenu de figure ci-dessus nous permet d'étudier l'actionneur USR60 à travers l'essai à vide et les essais en charge pour différentes charges.

Pour les différents cas d'interaction traités dans le chapitre précédent, on va étudier le cas général ($|x_s| \leq x_0$) qui prend en considération la présence de la traction et le freinage.

4.9-Résultats de simulation du moteur à vide et interprétations

Les paramètres utilisés [2] sont résumés dans le tableau (4.1) :

- Déphasage = $\pi/2$ rad

Paramètre	description	Valeur numérique
$\eta(eta)$	Facteur de force des céramiques	0.2263 [N/V]
$m_s (M)$	Masse totale du stator	$10 \cdot 10^{-3}$ [Kg]
$\omega = 2\pi f(omega)$	Fréquence d'alimentation	$40.000 \cdot 2\pi$ [rad/s]
$d_s(D)$	Coefficient d'amortissement des deux ondes stationnaires dans le stator	15.4 [Ns/m]
V	Tension d'alimentation	130 [V]
$\mu_d(mu)$	Coefficient de frottement entre stator et rotor	0.3 [-]
$c_s(K)$	Rigidité équivalente du stator	$5.9524 \cdot 10^8$ [N/m]
R_o	Rayon moyen du stator	$26.75 \cdot 10^{-3}$ [m]
$m_r (M_r)$	Masse totale du rotor	$30 \cdot 10^{-3}$ [kg]
Jr	Inertie du rotor	$7.2 \cdot 10^{-6}$ [kgm ²]
H	Moitié de l'épaisseur du stator	$1.5 \cdot 10^{-3}$ [m]
N	Nombre de crêtes de l'onde progressive	9
Fext	Force axiale de précontrainte	160 [N]
Kr	-	$5.4 \cdot 10^{11}$ [N/m ³]
Mc (Load)	Charge	0.00 [Nm]

Tableau 4.1-Paramètres du moteur USR 60 [2].

4.9.1-Tensions d'alimentation du stator U_{cp1} et U_{cp2}

Le moteur est alimenté en biphasé avec deux tensions U_{cp1} et U_{cp2} qui sont en quadrature de $\frac{\pi}{2}$, les courbes obtenues sont représentées dans la figure (4.9.1) :

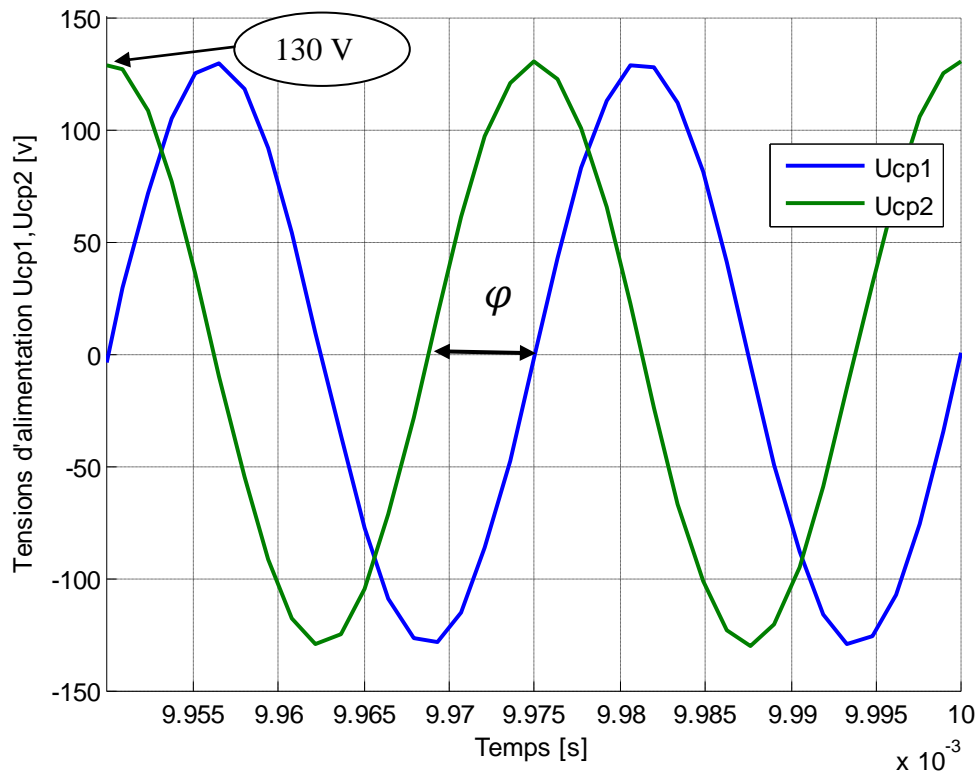


Figure 4.9.1-Tension d'alimentation $U_{cp1,2}(t)$ à vide.

4.9.2-Amplitudes modales du stator $w_1(t)$ et $w_2(t)$

Les deux ondes progressives du stator $w_1(t)$ et $w_2(t)$ sont représentées dans un même repère de la figure (4.9.2)

La courbe représentative de $w_1(t)$ et $w_2(t)$ les amplitudes sont très faibles de l'ordre de (3×10^{-6}) m en régime permanent.

- Dans l'intervalle $[0, 10^{-4}]$ s, les amplitudes modales en régime transitoires ont l'allure suivant les courbes de la figure (4.9.2a).
- Dans l'intervalle $[0.007, 0.009]$ s, les amplitudes modales en régime permanent ont l'allure des courbes de la figure (4.9.2b).

La hauteur maximale atteinte par chaque amplitude est de $1.7 \mu\text{m}$.

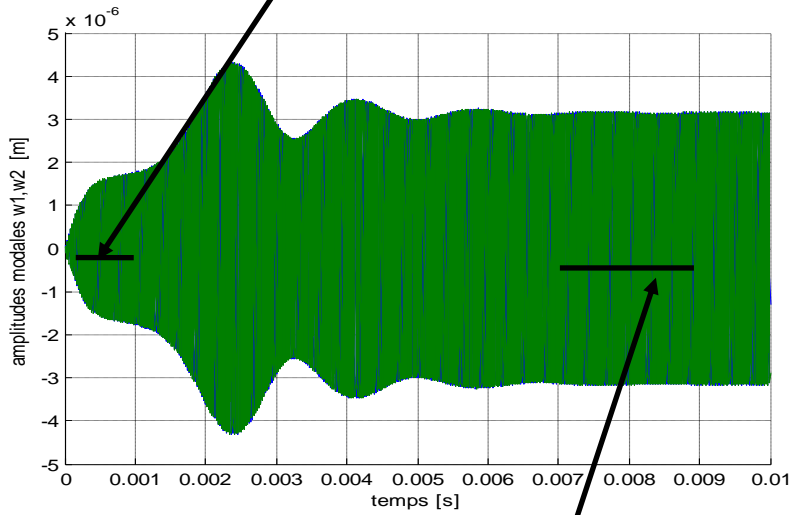
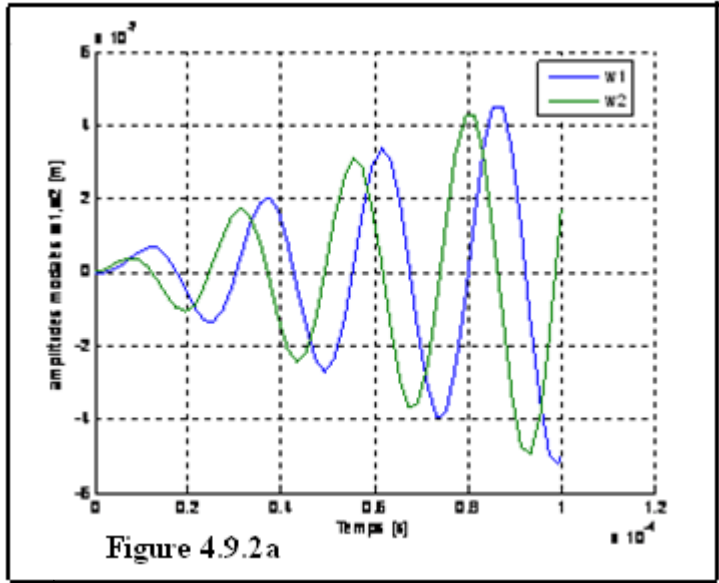
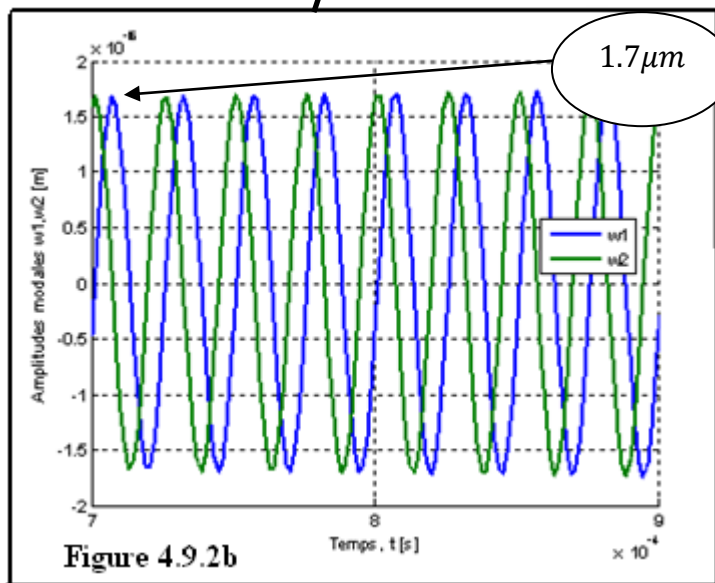


Figure 4.9.2-Amplitudes modales du stator $w_{1,2}(t)$ à vide.



4.9.3-L'amplitude de crête de l'onde modale résultante $w_{max}(t)$.

L'amplitude de crête de l'onde modale résultante atteint $3.2\mu m$ en régime permanent (figure (4.9.3a)).

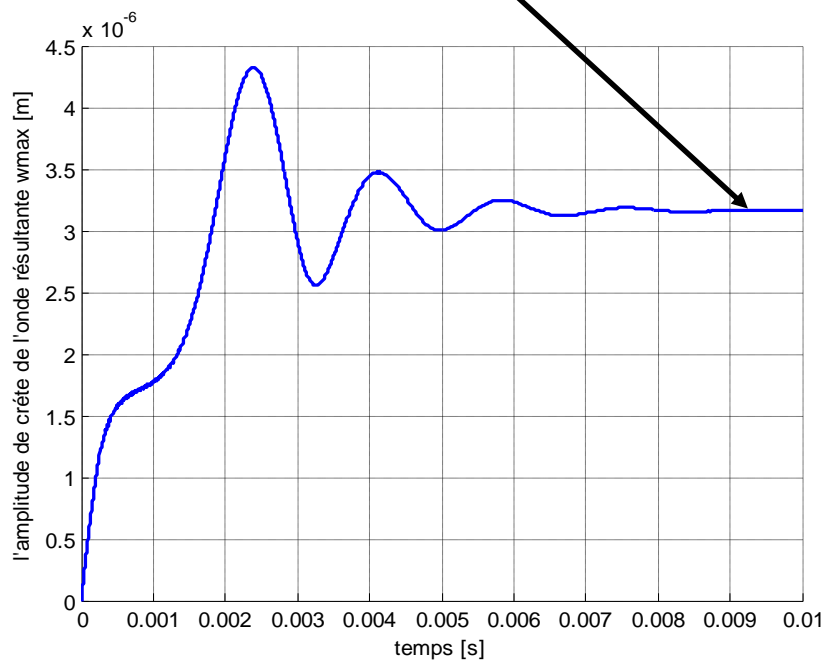
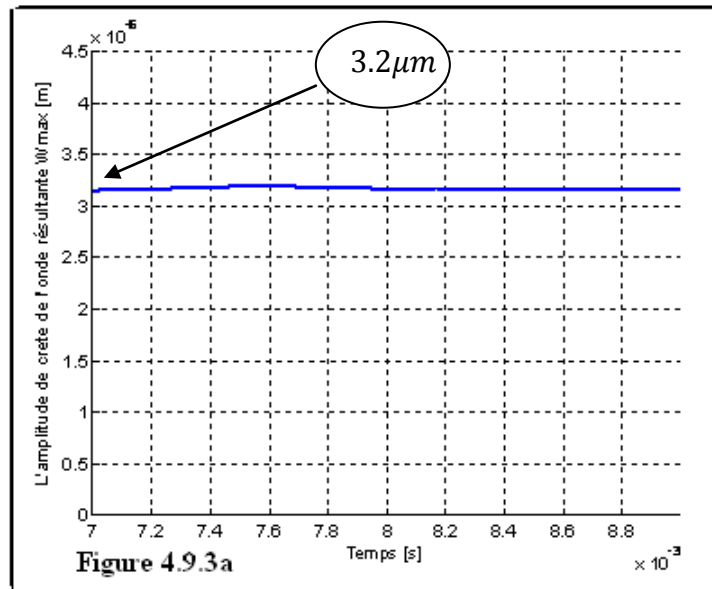


Figure 4.9.3b-L'amplitude de crête de l'onde modale résultante $w_{max}(t)$.

Le régime transitoire est de très courte durée environ 0.008s, au cours duquel l'amplitude w_{max} atteint un pic de $4,3\mu m$.

4.9.4-Le déplacement vertical relatif du rotor $z(t)$

Le déplacement relatif du rotor $z(t)$ (voir figure 3.10) se stabilise aux environs de $1.45 \mu\text{m}$ (voir figure (4.9.4a)) :

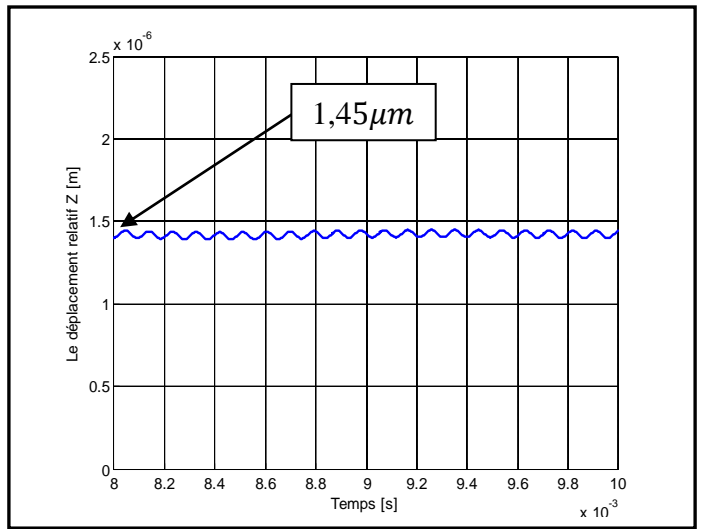


Figure 4.9.4a

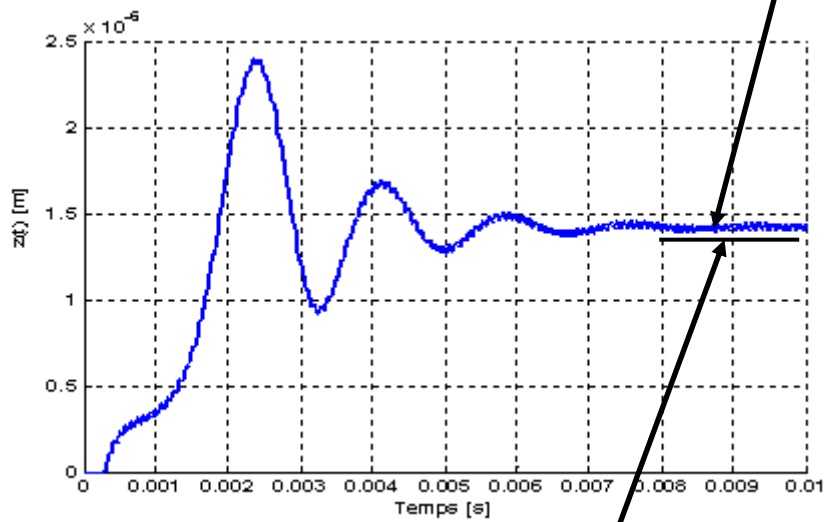


Figure 4.9.4-Le déplacement relatif $Z(t)$ à vide.

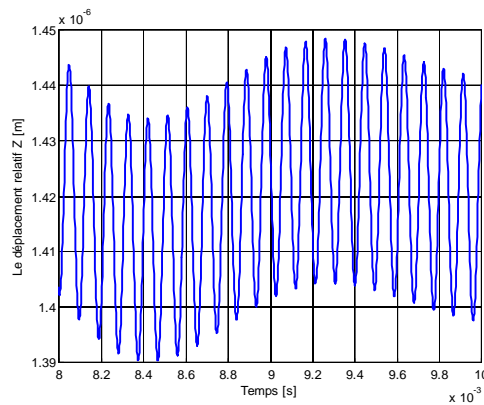


Figure 4.9.4b

En régime permanent, $z(t)$ d'après la figure (4.9.4b) varie dans un intervalle infinitésimal compris entre $1.39 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ et $1.45 \cdot 10^{-6} \text{ m}$.

4.9.5-Demi-largeur de la zone de contact $x_o(t)$ (équation (3.19))

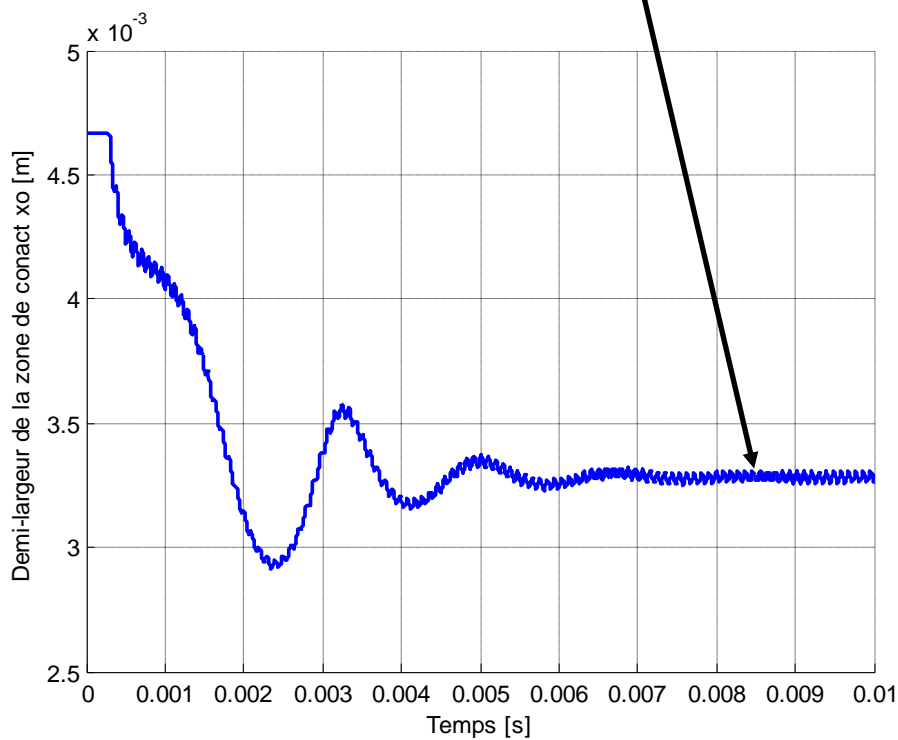
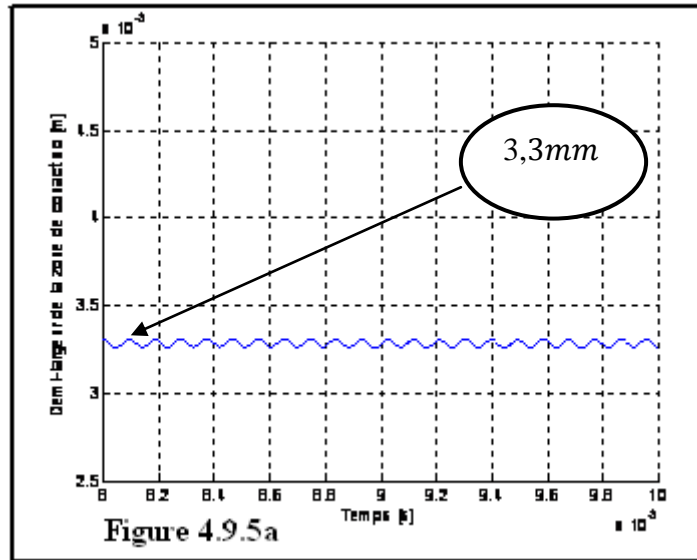


Figure 4.9.5b-Demi-largeur de la zone de contact $x_o(t)$ à vide.

Sur la figure (4.9.5a), la valeur maximale en régime permanent de x_o à vide est approximativement 3.3mm.

4.9.6- Le point de non glissement $x_s(t)$ (équation (3.20))

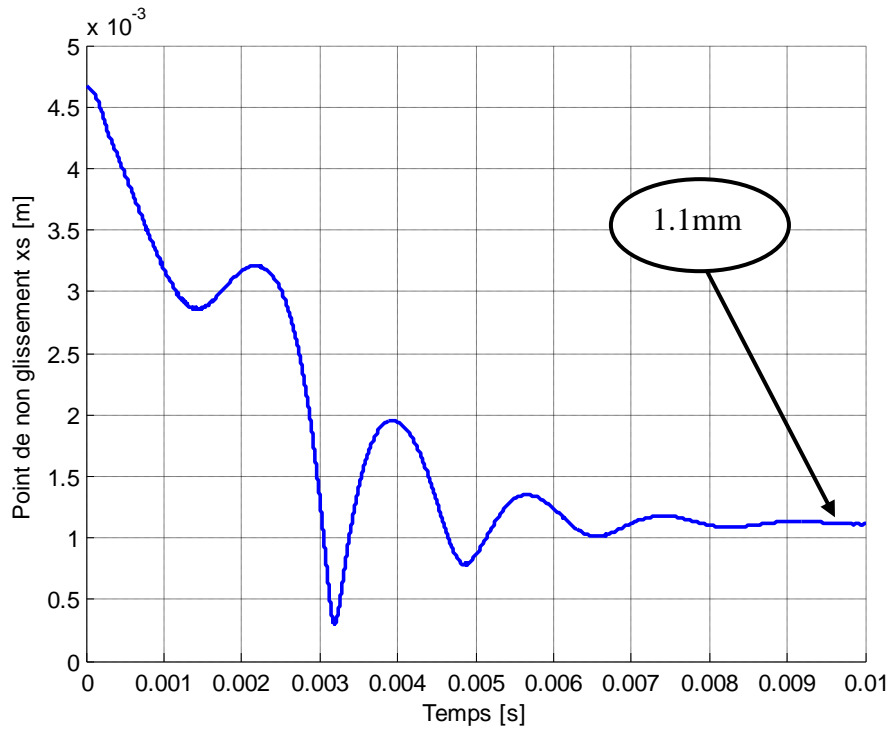


Figure 4.9.6a-Le point de non glissement $x_s(t)$ à vide.

Dans la figure (4.9.6b), les deux courbes de x_s et x_o sont représentées dans un même repère ;

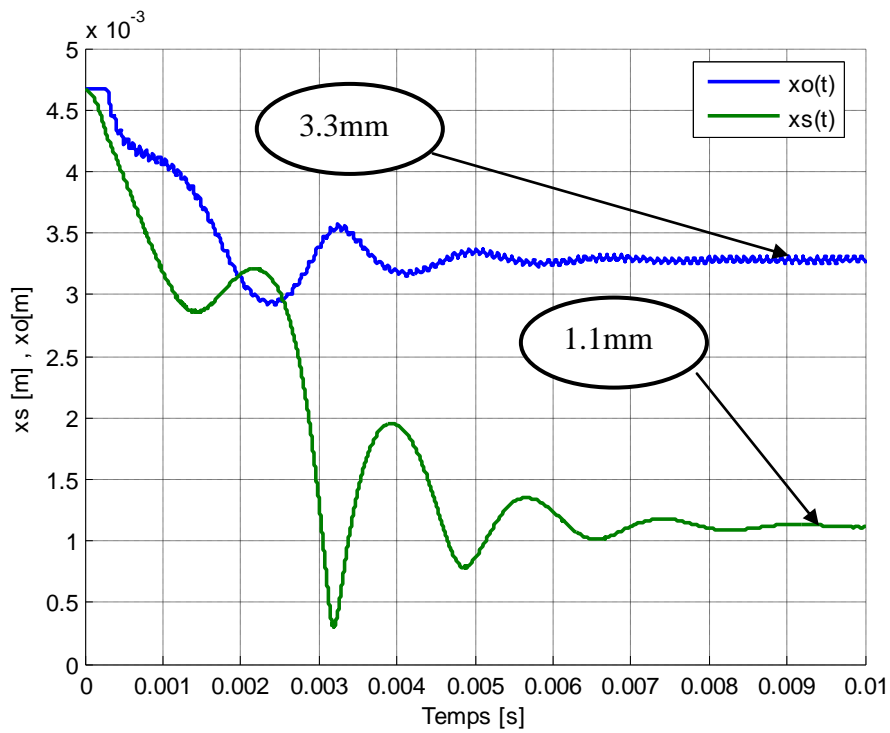


Figure 4.9.6b-Demi-largeur de la zone de contact $x_o(t)$ et le point de non glissement $x_s(t)$ à vide.

4.9.7-Couple moteur $C_m(t)$ en fonctionnement à vide.

Le couple moteur à vide est nul (figure (4.9.7)).

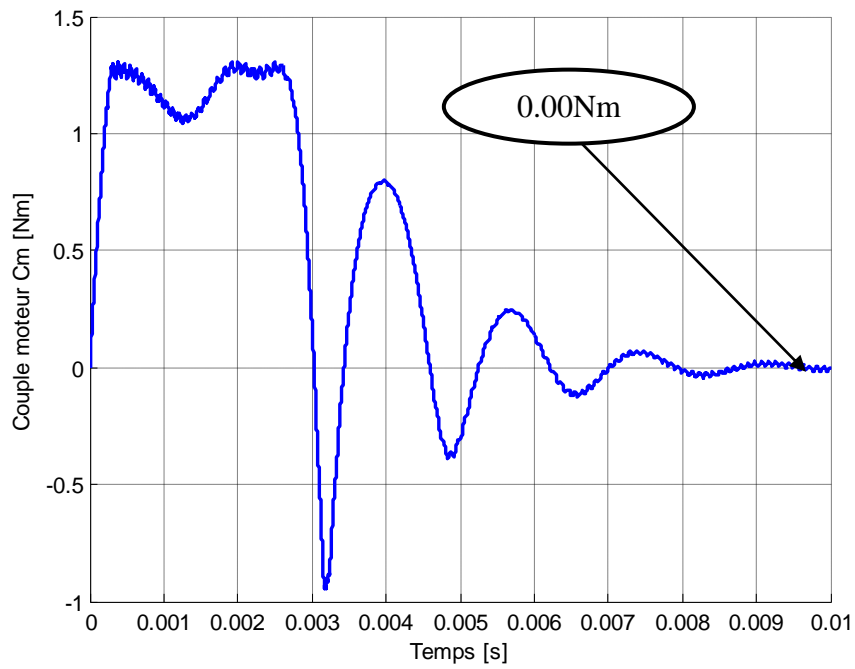


Figure 4.9.7-Couple moteur $C_m(t)$ à vide.

4.9.8-Vitesse de rotation du rotor $V_r(t)$

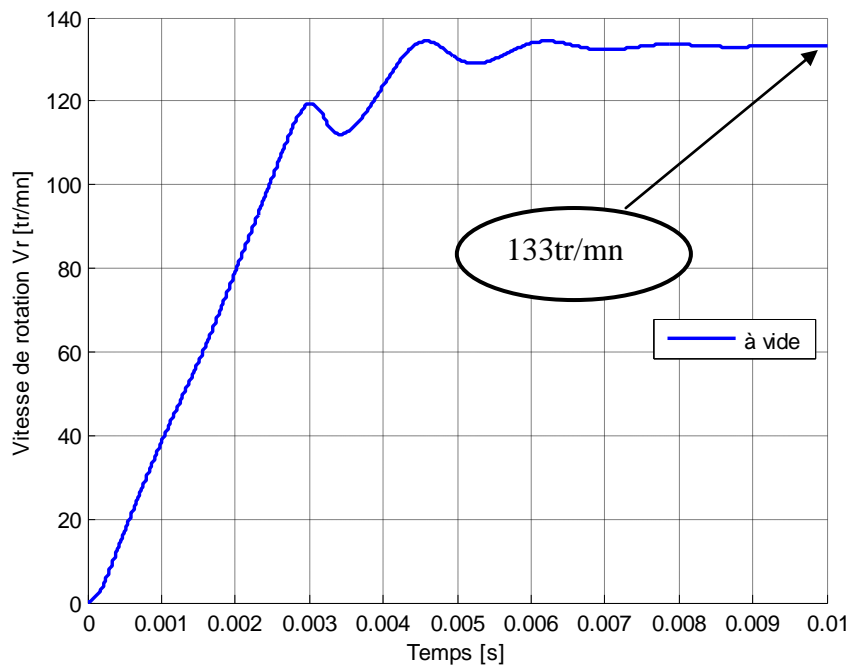


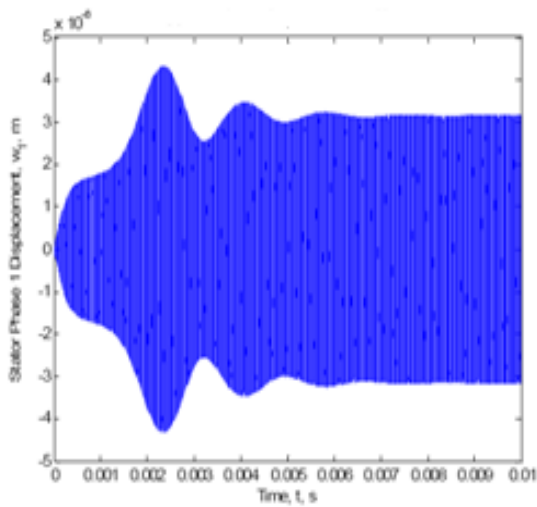
Figure 4.9.8-Vitesse de rotation $V_r(t)$ à vide.

En régime permanent, la vitesse de rotation du moteur à vide est stable aux environs de 133tr/mn.

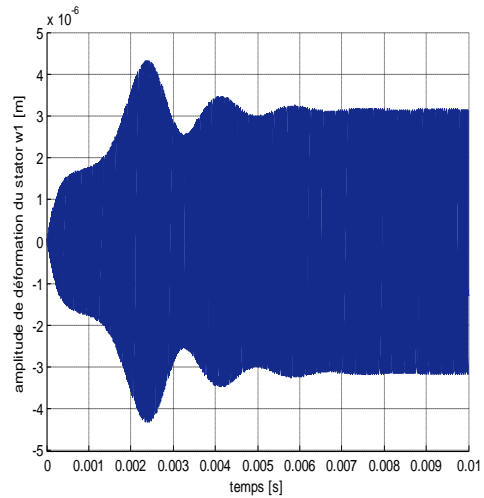
4.9.9 -Comparaison des résultats

Les résultats de simulation à vide obtenus sous forme de courbes sont comparés avec celles de la documentation de référence [2],

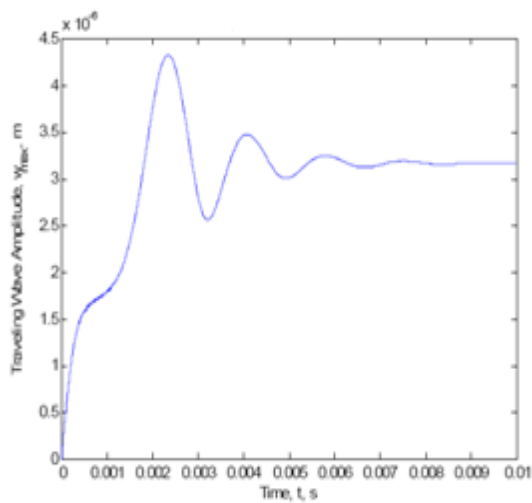
La comparaison est comme suit :



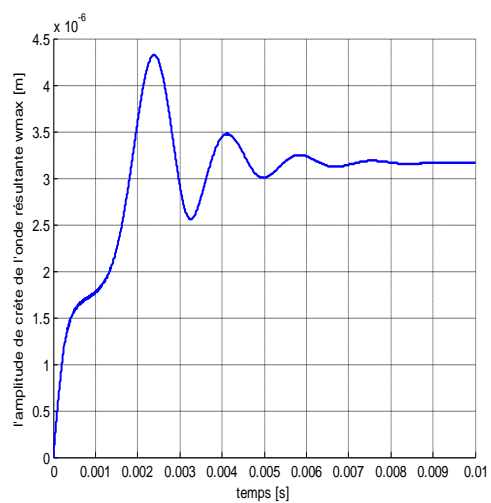
Amplitude modale $w_1(t)$ [2]



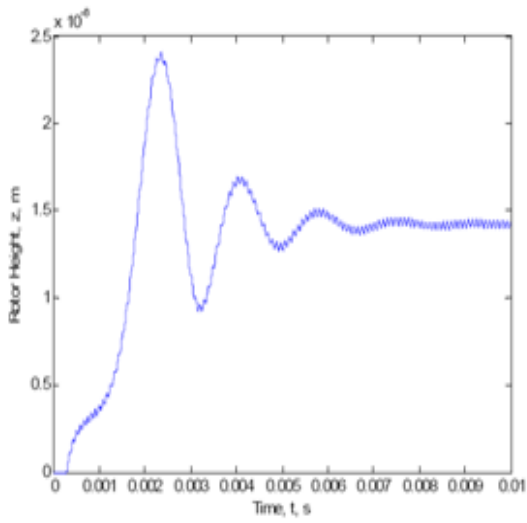
Amplitude modale $w_1(t)$ figure 4.9.2



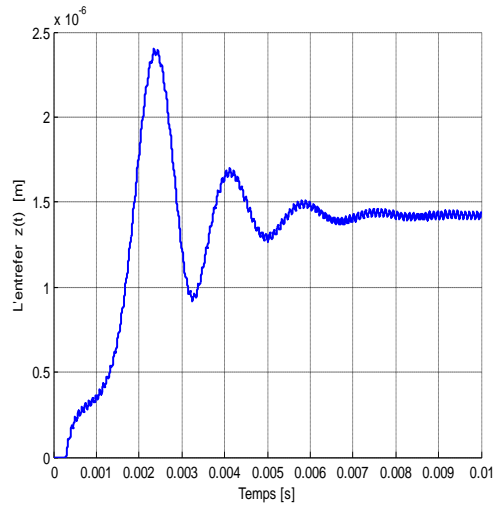
L'amplitude de crête $w_{max}(t)$ [2]



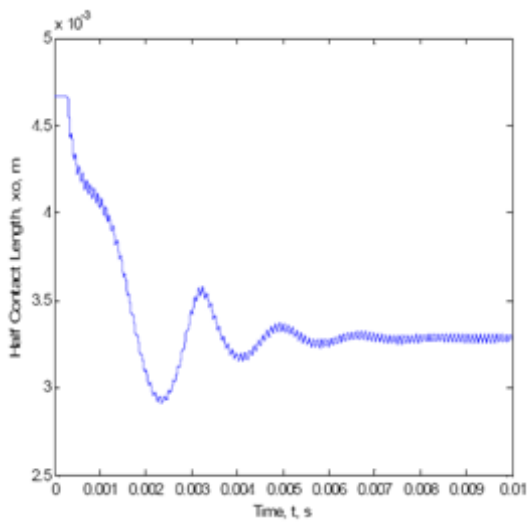
L'amplitude de crête $w_{max}(t)$ figure 4.9.3b



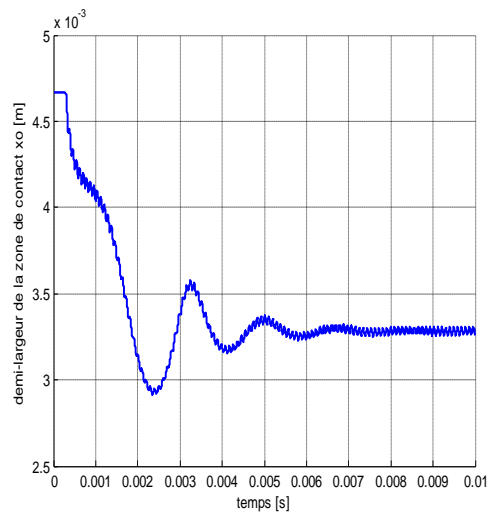
Variation de $z(t)$ [2]



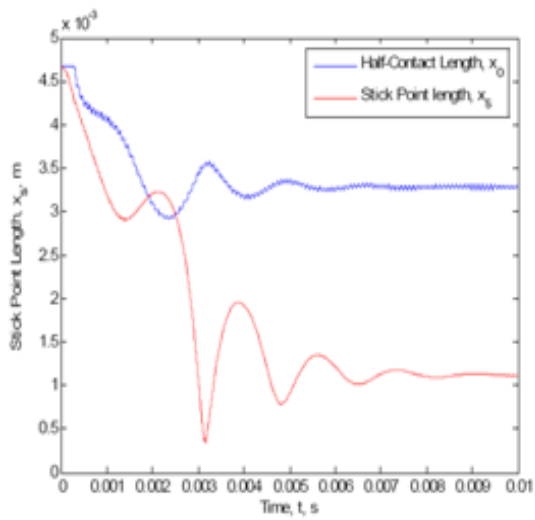
Variation de $z(t)$ **figure 4.9.4**



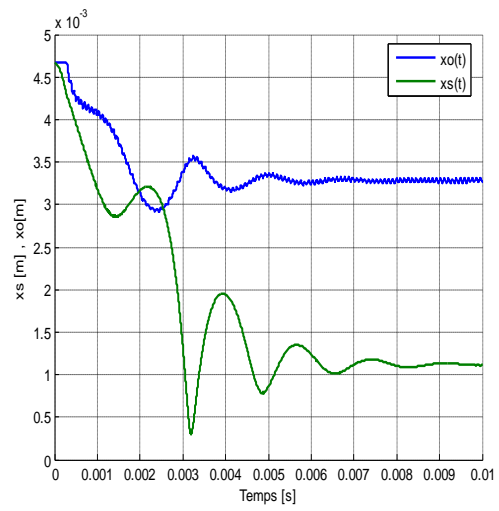
Demi-largeur de la zone de contact $x_o(t)$ [2]



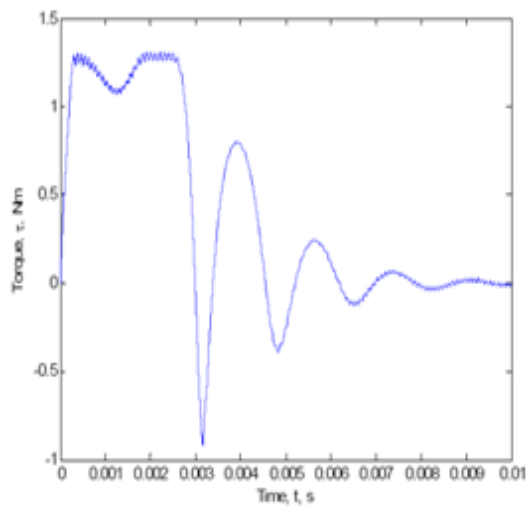
$x_o(t)$ **figure 4.9.5b**



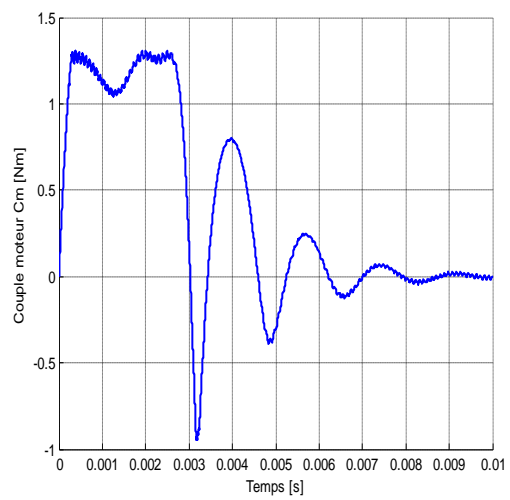
Variation de $x_0(t)$ et $x_s(t)$ [2]



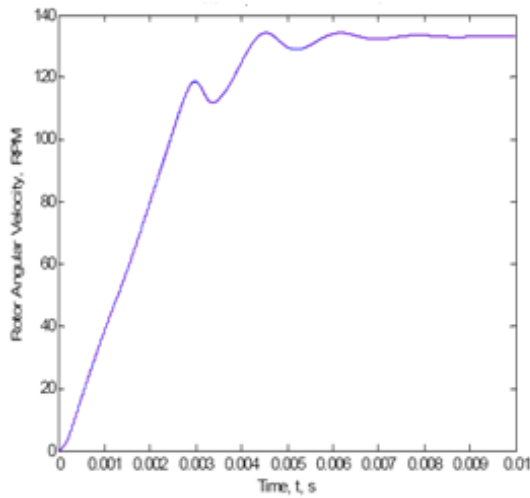
Variation de $x_0(t)$ et $x_s(t)$ **figure 4.9.6b**



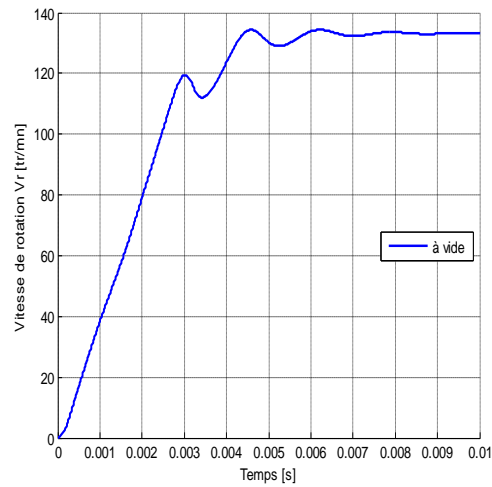
Variation de $C_m(t)$ [2]



Variation de $C_m(t)$ **figure 4.9.7**



Variation de $V_r(t)$ [2]



Variation de $V_r(t)$ **figure 4.9.8**

En comparant les courbes de l'essai à vide de la documentation de référence [2] et celles obtenues à partir de notre modèle d'essai virtuel, on conclut qu'il y a une grande similitude entre les deux résultats.

4.10-Résultats de simulation du moteur en charge et interprétations

Les paramètres utilisés pour l'essai en charge sont les mêmes que ceux du tableau (4.1), seulement la valeur de la charge imposée au moteur est variée dans l'intervalle du fonctionnement normal indiqué par le constructeur suivant les différentes valeurs de la fréquence.

L'essai suivant se fera avec les valeurs nominales principales qui sont :

- $F=40\text{kHz}$.
- Charge $M_c=0.5\text{Nm}$.
- La tension $V=130\text{V}$.
- Le déphasage $\varphi = \pi/2$ rad.

La courbe de la vitesse de rotation obtenue $V_r(t)$ est représentée dans la figure (4.10.1) comme suit :

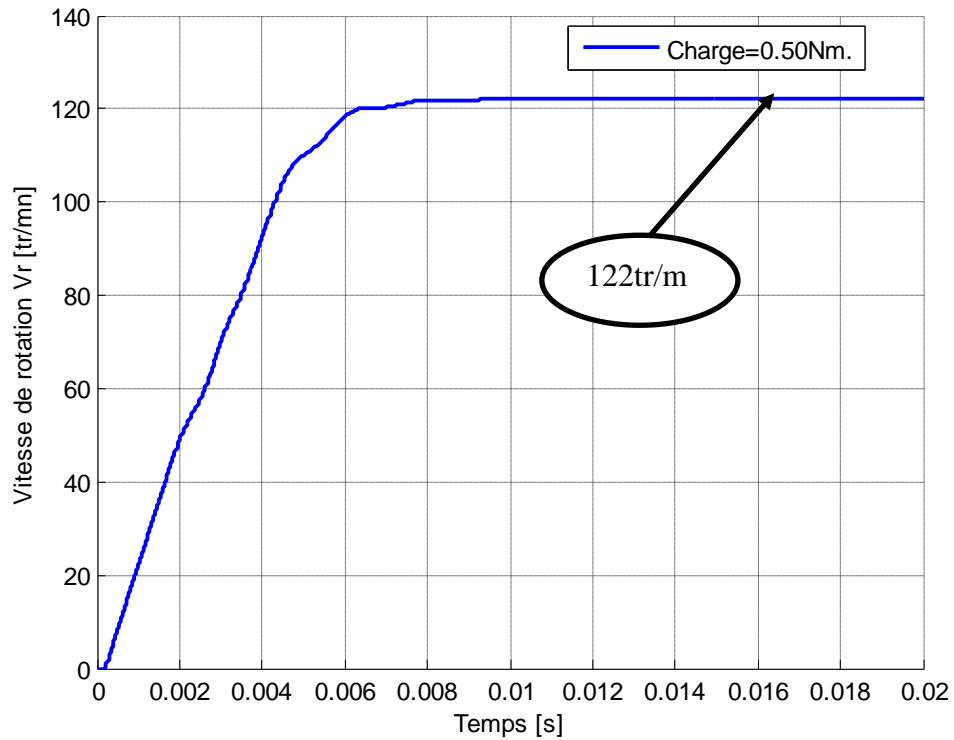


Figure 4.10.1-La caractéristique $V_r(t)$ du moteur en charge [$M_c=0.5Nm$].

La vitesse de rotation se stabilise à 122 tr/mn, elle est proche de la valeur nominale qui est : 100tr/mn.

L'allure de la caractéristique du couple moteur obtenue $C_m(t)$ est représentée dans la figure (4.10.2) comme suit :

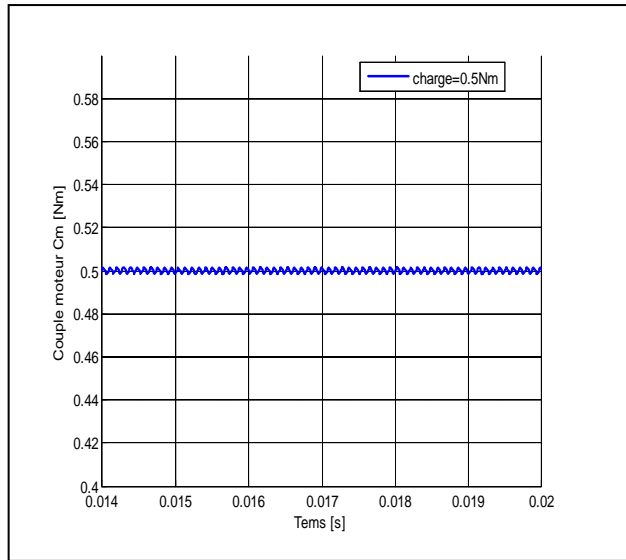


Figure 4.10.2a

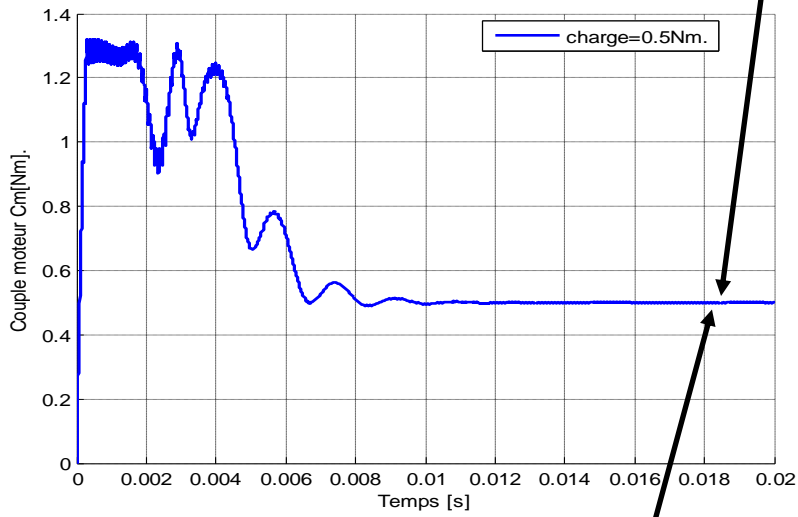


Figure 4.10.2-La caractéristique $C_m(t)$ du couple moteur en charge

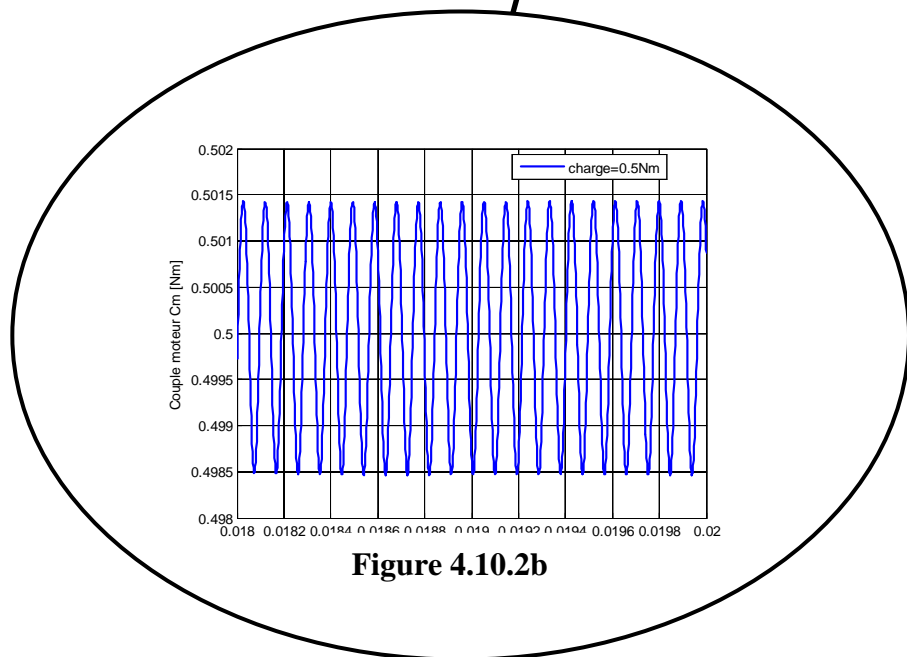


Figure 4.10.2b

Le couple moteur C_m se stabilise au niveau de 0.5Nm (figure (4.10.2a)).
 Si on essaye d'affiner beaucoup plus le résultat, de la figure (4.10.2) on déduit que le couple en fait oscille à grande fréquence (40kHz) dans un intervalle compris entre 0.4985Nm et 0.5015Nm.

Nous avons simulé plusieurs essais pour différentes charges : 0.1Nm, 0.2Nm, 0.3Nm, 0.4Nm, 0.5Nm, 0.6Nm, 0.7Nm et 0.8Nm.

A signaler qu'à partir de 0.9Nm pour la fréquence nominale de 40000Hz, le moteur simulé décroche.

L'ensemble des résultats obtenus sont représentés par un faisceau de caractéristiques : vitesses de rotation en fonction de la fréquence d'alimentation dans la figure (4.10.3) :

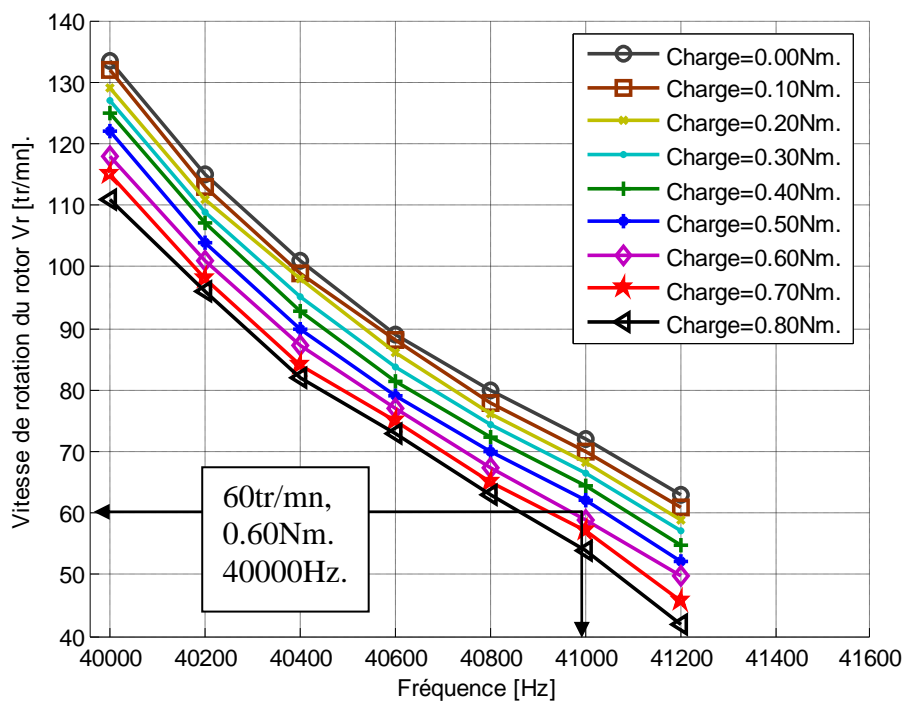


Figure 4.10.3-Caractéristiques de la vitesse de rotation en régime permanent V_r en fonction de la fréquence f pour différentes charges.

4.11-Comparaison des résultats

La figure (4.11) montre l'ensemble des caractéristiques vitesses en tr/mn en fonction de la fréquence d'alimentation donnée par la documentation de référence [2],

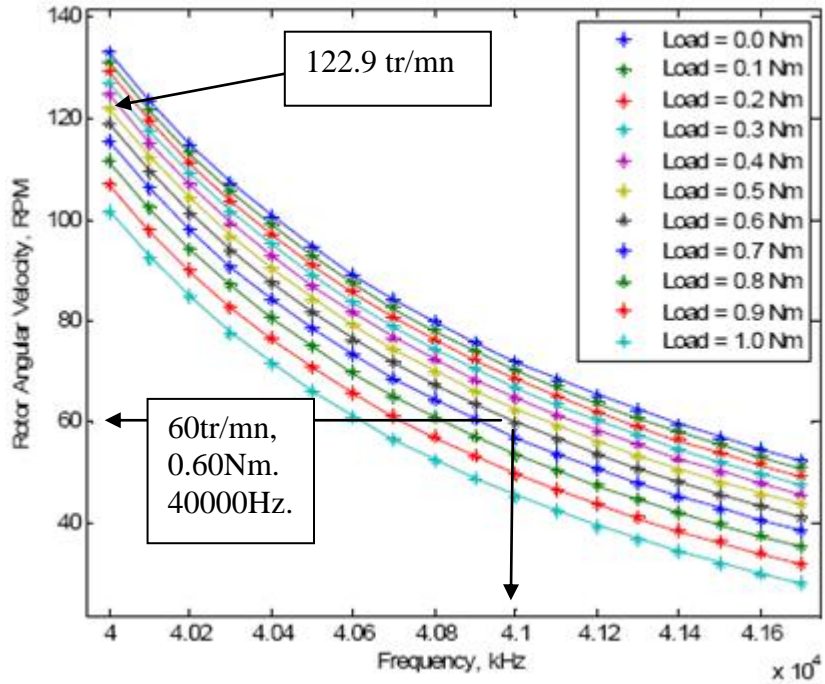


Figure 4.11-Caractéristiques en charge de la vitesse V_r en fonction de la fréquence f pour différentes charges [2].

Par comparaison entre les deux résultats, on constate une similitude entre les deux figures : (4.11) et (4.10.3).

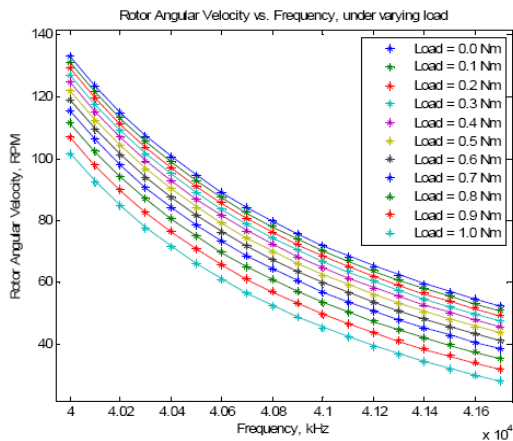


Figure 4.11 [2].

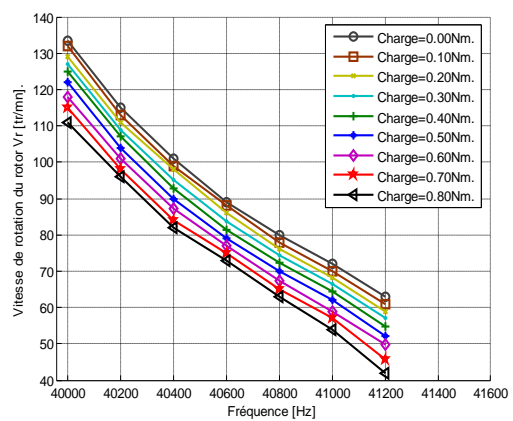


Figure 4.10.3

4.12-Validation

Par exemple, pour la charge de 0.5Nm, la vitesse de rotation V_r dans le cas de la courbe de référence (figure (4.11)) est égale à 122.9tr/mn et dans le cas de notre résultat de simulation (figure (4.10.3)), $V_r=123$ tr/mn.

Pour la charge de 0.60 Nm, la vitesse de rotation est la même pour les deux résultats.

A travers les comparaisons pour différents régimes à vide et en charge, on remarque une similitude dans l'allure des caractéristiques prélevées de la simulation réalisée et celles fournies par la documentation de référence [2].

On donne à titre de comparaison dans le tableau (4.2), les différentes puissances massiques.

Référence du moteur	Puissance Utile [w]	Vitesse De rotation [tr/mn]	Poids [kg]	Puissance Massique [w/kg]
USR60 [17]	5	100	0.260	19.23
USR30 [17]	1.3	250	0.045	28.88
C827380 [35]	6.8	130	0.600	11.33
C82524D [35]	0.98	53.33	0.140	7
Aeroflex[37]	4.19	4000	0.256	16.35
RS120[38]	16	3000	0.290	55.17
Maxon[37]	12.56	6000	0.038	330.53
Astro[37]	84.25	11500	0.340	247.81
Panasonic[37]	6.70	800	0.070	95.70
Kumada[37]	16.58	120	0.150	110.53
Canon[37]	0.84	80	0.045	18.61
Moteur (1985) à induction [36]	15000	-	-	0.15
SAGEM [16]	5000	649	5.000	1000

Tableau 4.2-Comparaison des puissances massiques.

Les moteurs :

- USR30, USR60 et SAGEM sont à base des céramiques piézoélectriques.
- C827380 est un moteur direct à courant continu à balais.
- C82524D est un moteur synchrone avec réducteur à deux sens de rotation.
- RS120 [38] est un servomoteur utilisé dans l'asservissement.

- Canon [37] est un moteur annulaire à onde progressive utilisé pour mécanismes d'autofocus pour objectif CANON.
- Pour le moteur (1985) à induction malgré qu'il ne soit pas de la même catégorie de l'actionneur USR60, on constate qu'il y a une très grande différence (de l'ordre de 130 fois) entre les puissances massiques des deux moteurs.

On peut déduire que les actionneurs annulaire à onde progressives à base de la céramique piézoélectrique en basse vitesse sont très prometteurs par la qualité de la puissance massique élevée qui a encouragé les constructeurs en aéronautiques à les utiliser comme actionneurs embarqués pour économiser le poids total des avions.

4.13-Conclusion

Les équations du modèle analytique du moteur piézoélectrique ont été converties dans l'environnement Matlab/Simulink, ainsi on a obtenu une plate-forme d'essai virtuel et avec les paramètres du moteur fourni par la documentation de référence [2], on a pu prélever de l'essai à vide et l'essai en charge les caractéristiques principales de l'actionneur qui sont la vitesse et le couple en fonction du temps.

On a validé le modèle choisi en comparant nos résultats obtenus avec ceux de la bibliographie.

Ce modèle hybride est sous sa forme de base. En effet, nous avons traité uniquement le cas général du contact stator-rotor (**cas 1** : $|x_s| \leq x_0$) qui représente le cas du fonctionnement réel de l'actionneur.

On peut utiliser ce modèle hybride comme application de base à laquelle on peut ajouter d'autres fonctions pour traiter les comportements de l'actionneur en modes de fonctionnement les plus complexes.

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire comme son titre l'indique c'est l'analyse de fonctionnement d'un actionneur piézoélectrique à onde progressive.

Le début de notre travail est un résumé sur les principes physiques liés aux phénomènes piézoélectriques.

Afin de pouvoir entamer le reste des thèmes, on a rédigé à partir de notre recherche bibliographique, le parcours des inventions les plus populaires pendant la décennie passée liées aux conversions par effet inverse de la piézoélectricité et on a retenu le plus populaire qui est le moteur piézoélectrique à onde progressive USR 60.

A travers l'étude théorique présentée au troisième chapitre, on a essayé de traiter les différents phénomènes complexes rencontrés: de la dynamique du stator, en passant par les phénomènes complexes liés au contact stator-rotor jusqu'à enfin la dynamique du rotor pour mettre en forme le schéma fonctionnel de l'actionneur USR60.

La dernière partie dans notre travail consistait dans la conversion des équations qui régissaient le schéma fonctionnel dans l'environnement de simulation sous Matlab/Simulink;

Le modèle hybride du moteur ainsi obtenu nous a permis d'accéder à l'étude des caractéristiques du moteur USR 60 à vide et en charge.

Les résultats obtenus de la simulation, ont été comparés avec les résultats donnés dans la référence [2].

Après ces comparaisons qui présentaient une grande similitude, on a pu valider le modèle.

En perspective, ce modèle hybride peut être complété pour étudier l'influence d'autres paramètres comme la température et l'usure non uniforme du contact stator/rotor par friction qui rendent le modèle non linéaire.

Notre approche simplificatrice par ce modèle hybride au moteur USR60 nous a permis avec un certain écart d'erreurs près de collecter les performances

essentielles décrivant le comportement du moteur par l'étude de ses caractéristiques à vide et en charge .

Ces actionneurs piézocéramiques envahissent de plus en plus les domaines de la technologie de pointe. Ainsi, une concurrence rude et prometteuse pour ce type d'actionneurs est entamée avec les autres catégories similaires des micromoteurs et cela depuis un bon moment.

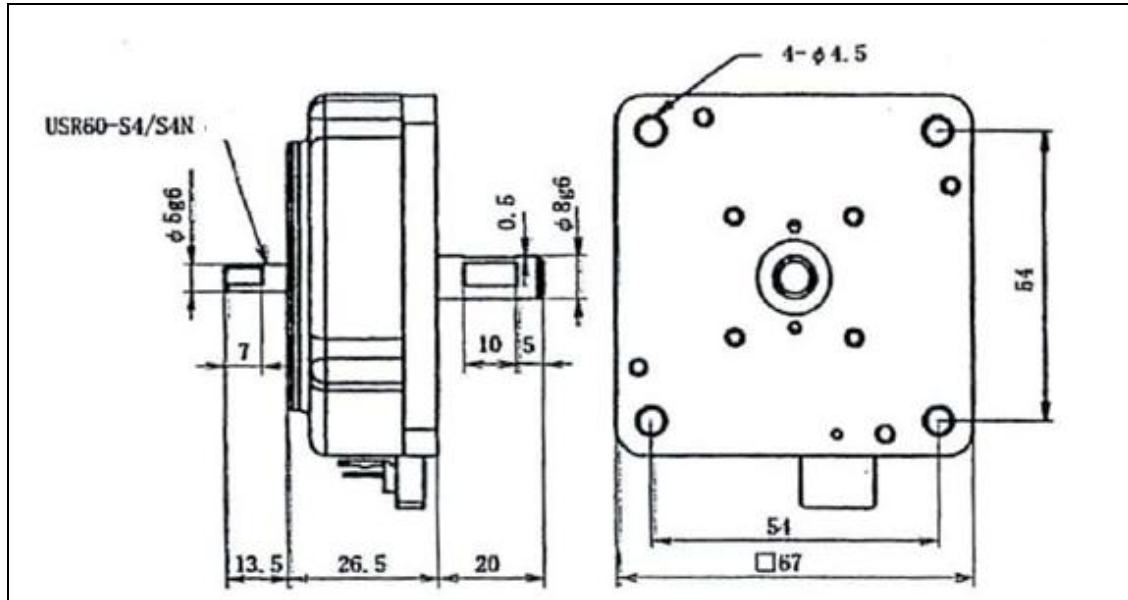
Annexe A

Constitution du moteur SHINSEI USR60

Fiche technique du moteur USR60 [17].

	USR60 series			USR30 series					
	Standard and non-magnetic			Standard	Non-magnetic				
Rated output	5.0 W			1.3 W	1.0 W				
Rated rpm	100 r/min			250 r/min	200 r/min				
Durability	1,000 Hrs			2,000 Hrs	500 Hrs				
Driving frequency	40 KHz			50 KHz					
Driving voltage	130 Vrms			110 Vrms					
Rated torque	0.5 N · m (5.0 Kg · cm)			0.05 N · m (0.5 Kg · cm)					
Maximum torque	1.0 N · m			0.1 N · m					
Retentive torque	1.0 N · m (10.0 Kg · cm)			0.1 N · m (1.0 Kg · cm)					
W e i g h t	S3 · S4/S3N · S4N	E3	E3N	B3 · B4	S3 · S4	E3a	S3N · S4N	E3N	
	260g	275g		20g	45g	65g	45g	65g	
Responsiveness	Under 1 msec (no inertia load or driver sweeper)								
Rotational direction	CW, C CW								
Operational temperature range	-10°C ~ +55°C								
Operational temperature rise	70°C at stator surface / 55°C at case surface								

Dimensions et encombrement du moteur USR60 [17].



Annexe B

Fichier éditeur contenant les différents paramètres utilisés dans l'environnement Matlab/Simulink pour la simulation.

Pour l'essai en charge, les valeurs des paramètres qui sont couramment changées sont celles de la charge et la fréquence.

```
close all, clear all
%Properties of electrical system forcing function
eta = 0.2263; %(N/V) - Force/Voltage coupling factor
V = 130; %(V)
omega = 40.000e3*2*pi; %(rad/s)
Phase = pi/2; %(rad)
%Properties of stator:
%Equation of motion Constants and property calculations
M = 10.1e-3; %(kg)
D = 15.4; %(Ns/m)
K = 5.9524e8; %(N/m)
wn0 = (K./M).^(1/2); %natural frequency of system prior
to feedback forces (rad/s)
%Stator Dimensions
Ro = 26.75e-3; %Effective radius of contact (m)
b = 4.41e-3; %Width of traveling wave in radial
direction, (m)
n = 9; %Number of wave peaks
h = 1.5e-3; %half thickness of stator, (m)
epsil = 0; %Coupling factor (Simulated IDEAL... i.e.
%epsi = 0)
epsi2 = epsil;
%Properties of rotor:
%Vertical System
Mr = 30e-3; %(kg)
%Rotary System
Jr = 7.2e-6; %(kg*m^2)
%Load
Load = 0;
%Contact Mechanics
mu = 0.3; %friction coefficient
Fext = 160; %Stator/Rotor external pressing force, (N)
```


Symboles

C_m	Couple généré par le moteur	[Nm]
c_s	Rigidité équivalente du stator	[N/m]
D	Déplacement électrique	[C/m ²]
ds	Coefficient d'amortissement déformation du stator	[Ns/m]
\mathbf{d}	Matrice des constantes de charge	[C/N]
\mathbf{dr}	Coefficient d'amortissement du rotor dans la direction axiale	[Ns/m]
E	Champ électrique	[V/m]
E_s	Module de Young de la structure déformable du stator	[N/m ²]
Ek	Energie cinétique	[J]
Ep	Energie potentielle	[J]
Ee	Energie électrique	[J]
$F_{v1,2}$	Forces générées par effet piézoélectrique dans chaque phase	[N]
F_{ext}	Force de précontrainte	[N]
F_z	Force de réaction axiale totale due à la contraction de l'épaisseur élastique	[N]
$F_{c1,2}$	Forces de réaction modale dues au chargement axiale	[N]
F_t	Force de traction associée à une crête de l'onde progressive	[N]
$F_{v1,2}$	Force axiale par unité de longueur agissant dans la zone de contact	[N/m]
f	Fréquence d'alimentation	[Hz]
h	moitié de l'épaisseur de la plaque du stator	[m]
J_r	Inertie du rotor	[Kgm ²]
kem	Coefficient d'accouplement électromécanique	[-]
k	Nombre d'onde	[rad/m]
Ke	Rigidité équivalent du rotor	[N/m ²]
\mathcal{L}	Lagrangien	[J]
M_c	Couple de charge	[Nm]
ms	Masse totale du stator	[Kg]
mr	Masse totale du rotor	[Kg]
n	Nombre de crête d'ondes contenues dans l'anneau statorique	[-]

Q_m	Coefficient de pertes mécaniques	[-]
R_o	Rayon moyen de l'anneau statorique	[m]
S	Déformation mécanique relative	[m/m]
s	Souplesse	[m ² /N]
\mathbf{s}^E	Matrice de souplesse d'un milieu piézoélectrique	[m ² /N]
sgn	Fonction signe	[-]
T	Contrainte mécanique	[N/m ²]
$U_{cp1,2}$	Tensions de phase du moteur	[V]
V_t	Vitesse tangentielle des points à la surface du stator	[m/s]
v_{tmax}	Vitesse tangentielle maximale des points à la surface du stator	[m/s]
V_r	Vitesse de rotation du rotor	[tr/mn]
$w_{1,2}$	Amplitude de déformation des deux ondes stationnaires	[m]
Wr	Position relative entre le stator et le rotor	[m]
W_E	Densité d'énergie électrique	[J]
W_M	Densité d'énergie mécanique	[J]
W_{EM}	Densité d'énergie électromécanique	[J]
W_{max}	L'amplitude de crête de la résultante des ondes progressives	[m]
δw	La variation de travail infinitésimal donnée par les forces extérieures	[J]
w	Amplitude de l'onde progressive dans le stator	[m]
w_r	Vitesse de translation du rotor	[rad/s]
x_o	Demi-largeur de la zone de contact entre le stator et le rotor	[m]
x_s	Localise les points de non glissement	[m]
z	Déplacement vertical relatif du rotor	[m]
ρ_s	Masse volumique du stator	[Kg/m ³]
λ	Longueur d'onde	[m]
η	Facteur de force associé aux céramiques de chaque phase	[N/V]
Δw	Contraction du rotor le long de la zone de contact	[m]
τ	Force de traction par unité de longueur agissant dans la zone de contact	[N/m]
μ_d	Coefficient de frottement dynamique	[-]

ω	Pulsation propre électrique	[rad/s]
ϕ	Déphasage entre les tensions d'alimentation électrique	[rad]
θ	Position angulaire d'un point du stator	[rad]
ε	Constante diélectrique	[Cm/V]
ϵ^T	Matrice de permittivité d'un milieu piézoélectrique	[F/m]
ω_r	Vitesse angulaire du rotor	[rad/s]
$\xi_{1,2}$	Amplitude modale dans la direction radiale	[m]
$\dot{\theta}$	vitesse angulaire du rotor	[rad/s]
ν_s	Coefficient de Poisson de la structure déformable du stator	[-]

Bibliographie

- [1] **C. Péclat**, “Conception et réalisation d’un micromoteur piézoélectrique”, Thèse de Doctorat No. 1434, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 1995.
- [2] **Devon Patrick Murphy**, “Analysis of a Rotary Ultrasonic Motor for Application in Force- Feel Systems”, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2008.
- [3] **N. Rizet**, “Contrôle actif de vibrations utilisant des matériaux piézo-actifs, PhD Thesis, INSA. Lyon, 1999.
- [4] **B. Nogarède**, “Moteurs piézoélectriques ”, Techniques de l’ingénieur D3765.
- [5] **R. Le Letty**, “Conception de moteurs piézo-Actifs à l’aide de la modélisation ”, Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées, Lyon, 1994.
- [6] **N. El Ghouti**, “Hybrid modeling of a travelling wave piezoelectric motor”, PhD Thesis, Department Of Control Engineering, Aalborg University, Denmark, 2000.
- [7] **Nishant Venkatesan**, “An Evaluation of the Traveling Wave Ultrasonic Motor for Force Feedback Applications”, University of Kentucky, 2009.
- [8] **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.
- [9] **J. Maas, P. Ide, N. Frohleke, H. Grotstollen**, “Simulation Model for Ultrasonic Motors powered by Resonant Converters ”, Institute for Power Electronics and Electrical Drives, University of Paderborn, FB 14-LEA 33098 Paderborn, Germany 1995 IEEE.
- [10] **M.T. EL Hagry, A. A. Mahfouz, H. S. Ahmed**, “Experimental investigation of a mathematical model for traveling wave ultrasonic motors”, Electronic Research Institute El Tahrir Str.-Dokki, Cairo, Egypt.
- [11] **Matteo BULLO**, “Modélisation et commande du moteur piézoélectrique à onde progressive”, EPFL, Thèse no3348 (2005).

[12] **WHDuan, S T Quek and Q Wang**, “A novel ring type ultrasonic motor with multiple design, wavenumbers: fabrication and characterization”, Monash University, Clayton, VIC, 3800, Australia Published 10 November 2009.

[13] **Gungor BAL**, “A Digitally Controlled Drive System for Travelling-wave Ultrasonic Motor”, Gazi University, Turk J Elec Engin, VOL.11, NO.3 2003.

[14] **A.M. Flynn**: “Piezoelectric Ultrasonic Micromotors”, Massachusetts Institute of Technology, december 1997.

[15] **J. Maas, P. Ide, N. Frohleke, H. Grotstollen**, “Simulation Model for Ultrasonic Motors powered by Resonant Converters ”, University of Paderborn, 1995 IEEE.

[16] **Wojciech SZLABOWICZ**, “Contribution au dimensionnement et à la réalisation d'actionneur piézoélectrique à rotation de mode fort couple pour applications aéronautiques”, ENSEEIHT, phd thesis 2006.

[17] **USM Ultrasonic Motor General Catalogue**, USR60 SHINSEI.

[18] **G. Kandare and J. Wallaschek**, “Derivation and validation of a mathematical model for traveling wave ultrasonic motors” Smart Mater. Struct., vol.11, pp. 565-574, 2002.

[19] **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.

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

[21] **Hervé Frayssignes**, “ étude des effets non linéaires et les pertes dans les moteurs ultra-sonores introduction au problème de couplage mécanique entre les voies”, INSA Lyon ,2001.

[22] **Scott L. Sharp**, “design of a linear ultrasonic piezoelectric motor”, Brigham Young University, August 2006.

[23] **Timothy Scott Glenn**, “Mixed-Domain Performance Model of the Piezoelectric Traveling-Wave Motor and the Development of a Two Sided Device” , Massachusetts Institute of Technology June 2002.

[24] **Z. Boumous**, “ simulation of ultrasonic piezoelectric motor”, Département d’electrotechnique, université Ferhat Abbas,Setif,Algerie 2007.

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

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

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

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

[29] **J.T. Audren, F. Hodar, E. Merlet** : “Moteurs piézoélectriques pour l’aéronautique”., SAGEM SA, Paris.

[30] **C. Giraud-Audine**. “Contribution à la modélisation analytique d’actionneurs piézoélectriques en vue de leur conception et dimensionnement”, Phd thesis, INP Toulouse ,1998. n°1501.

- [31] **Physik Instrumente**, « <http://www.physikinstrumente.com> », 2006.
- [32] **A.W. Leissa** : “Vibration of plates ”, National Aeronautics and Space Administration, Washington 1969, pp.231.
- [33] **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.
- [34] **J. Wallaschek**, “piézoélectrique ultrasonic motor”, journal of intelligent material Systems and structures, 1995.
- [35] **www.crouzet.fr**.
- [36] **E. L.F. de ALMEIDA**, “Une analyse évolutionniste du changement dans la technologie des moteurs électriques”, U.P.M.F de Grenoble (1992).
- [37] **Yoseph Bar-Cohen, Mike Lih, Nesbitt W. Hagood**, “Miniature ultrasonic rotary motor”, 2nd Micromachining Workshop, Anaheim, CA, September 27 and 28, 1995,
- [38] **www.parvex.com**
- [39] **Z.E.KHERIBECHE, M.DJAGHLOUL**, “Modélisation d'un Moteur Ultrasonique à Onde Progressive”, thèse d'ingénieur, Juin 2006. Université de Sétif.
- [40] **MICHEL BRISSAUD**, “Matériaux Piézoélectriques: Caractérisation, Modélisation et Vibrations”, U.P.M.F de Grenoble (1992).
- [41] **www.cnjude.com**