

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE FERHAT ABBAS -SETIF

Faculté de Technologie

Département
d'électrotechnique



جامعة فرحات عباس سطيف

كلية التكنولوجيا

قسم : الالكتروتقنية

Mémoire de Master

No. Réf. :/...../2012

Présenté au Département d'électrotechnique

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : automatique

Spécialité : Commande des processus industriels

Réalisé par :

Melle HARCHE Asma

Thème

Commande De Vitesse D'un Actionneur Piézoélectrique Par une Technique Intelligente

Soutenu le **01/07/2012** devant la commission d'examen composée de :

M KHABER Farid

Dr à l'Université de Sétif

Président

M^{elle} KEBBAB F. Zohra

MAA à l'Université de Sétif

Directeur du Mémoire

M BELKHIR kamel

Dr à l'Université de Sétif

Examineur

Mme KRAGLE Fatiha

MAA à l'Université de Sétif

Examineur

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail qui est le fruit de leur patience et de leur éducation.

À mes chers parents.

À ma sœur :Hadjer,

À mon frère :Houssem

Je le dédie aussi à toute ma famille.

À tous mes collègues

Et à tous mes enseignants. Tous ceux qui m'ont soutenu, encouragé et donné l'envie de mener à terme ce travail

Remerciements

Je tiens à remercier, en tout premier lieu M^{elle} F. Zohra Kebbab Directeur de ce mémoire. Du département d'électrotechnique à l'université de Sétif qui m'a honoré d'accepter mon encadrement dans ce thème et pour ses conseils et suggestions pendant tout le déroulement de mon travail .

Je remercie également tous les membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail :

- Dr. khaber Farid
- Dr. Belkhir kamel
- Mme KRAGLE Fatiha

Je remercie aussi tous ceux qui ont participé de loin ou de près pour réaliser ce travail, l'ensemble des enseignants du département d'électrotechnique.

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE	XII
<i>Chapitre 01</i>	<i>1</i>
DESCRIPTION DES MOTEURS PIEZOELECTRIQUES.....	1
1.1. Introduction :	1
1.2. Le phénomène de la piézoélectricité :	1
1.2.1. Définition :	1
1.2.2. Céramique piézoélectrique:.....	2
1.2.3. L'application de la piézoélectricité :	3
1.3. Les Caractéristiques des moteurs piézoélectriques :	6
1.3.1. Les avantages :	6
1.3.2. Les inconvénients :	6
1.4. Moteur piézoélectrique à onde progressive :	6
1.4.1. Organe d'entraînement :	8
1.4.2. Organe entraîné :	8
1.5. Les types de moteur piézoélectrique à onde progressive :	9
1.5.1. Principe du moteur annulaire :	9
1.5.2. Principe du moteur à rotation de mode :	10
1.6. Conclusion :	11
<i>Chapitre 02</i>	<i>12</i>
MODELISATION DES MOTEURS PIEZOELECTRIQUES	12
2.1. Introduction :	12
2.2. Modèle mathématique d'un moteur piézoélectrique à onde progressive :	12
2.2.1. Modèle du stator :	13
2.2.2. Modèle de l'interface Stator-rotor :	16
2.2.3. Zone de contact :	17
2.2.4. Modèle de rotor :	28
2.3. Conclusion	29

<i>Chapitre 03.....</i>	<i>30</i>
-------------------------	-----------

COMMANDE DES MOTEURS PIEZOELECTRIQUES PAR RESEAU DENEURONE.....	30
--	----

3.1. Introduction :	30
3.2. Historique :	30
3.3. Le neurone biologique :	30
3.4. Communication entre neurones :	31
3.5. Le neurone Artificiel :	31
3.6. Analogie entre le neurone biologique et le neurone formel :	32
3.6.1. Entrées :	32
3.6.2. Fonction d'activation	32
3.6.3. Fonction de sortie :	33
3.7. Réseaux de Neurones Artificiels :	33
3.7.1. Définition :	33
3.7.2. Propriétés des réseaux de neurones :	33
3.7.3. Topologie des réseaux de neurones :	34
3.7.4. Perceptron Multicouche.....	35
3.7.5. L'apprentissage des réseaux de neurones :	36
3.7.6. Règles d'apprentissage :	37
3.7.7. La règle de rétro-propagation :	38
3.8. Domaine d'application des réseaux de neurones :	38
3.8.1. Classification des signaux:	38
3.8.2. Identification des processus:	38
3.8.3. CONTROLE DE SYSTEME:	38
3.8.4. Problèmes de diagnostic :	39
3.9. Choix de la grandeur de commande :	39
3.10. Commande de processus :	39
3.1. Conclusion :	40

<i>Chapitre 04.....</i>	<i>41</i>
-------------------------	-----------

RESULTATS DE SIMULATION.....	41
------------------------------	----

4.1. Introduction :	41
4.2. Résultats de simulation :	41
4.2.1. Fonctionnement à vide :	41
4.2.2. Fonctionnement en charge :	42
4.3. Commande par fréquence :	44

4.4. Choix du réseau de neurone appliqué :	44
4.5. Résultat de la commande par réseau de neurone :	44
4.6. Conclusion :	45
CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES	46

Liste des figures

Figure 1.1 Illustration des effets piézoélectriques: à gauche l'effet direct, à droite l'effet inverse	2
Figure 1.2 Fabrication des céramiques piézoélectriques	3
Figure 1.3 Polarisation d'un morceau de céramique. Le champ E intense force les domaines à s'orienter selon une direction privilégiée	3
Figure 1.4 Application des moteurs piézoélectriques en micro robotiques	4
Figure 1.5 Application des moteurs piézoélectriques en montres	4
Figure 1.6 Application des moteurs piézoélectriques en auto focus	4
Figure 1.7 Application des moteurs piézoélectriques en automobile	5
Figure 1.8 Application des moteurs piézoélectriques en MEM's	5
Figure 1.9 a), b) Schéma de construction du moteur piézoélectrique à onde progressive	7
Figure 1.10 Double conversion d'énergie au sein des structures piézoélectrique	8
Figure 1.11 Principe d'entraînement du moteur piézoélectrique à onde progressive	9
Figure 1.12 Vue éclatée du moteur USR60 SHINSEI et la simulation numérique par FEM du stator en déformation	10
Figure 1.13 Principe de fonctionnement d'un moteur à rotation de mode	10
Figure 1.14 Vue éclatée et assemblée d'un moteur à rotation de mode	11
Figure 2.1 Schéma fonctionnelle du moteur piézoélectrique à onde progressive	13
Figure 2.2 Schéma block du moteur piézoélectrique à onde progressive	13
Figure 2.3 le circuit électrique équivalent du stator	14
Figure 2.4 Le modèle mécanique équivalent de stator du moteur piézoélectrique	14
Figure 2.5 Modèle mécanique équivalent complet du stator	15
Figure 2.6 La forme elliptique de la trajectoire des points de la surface du stator	17
Figure 2.7 Schéma du contact mécanique stator/rotor	18
Figure 2.8 Les forces de freinage et de traction dans la zone de contact	19
Figure 2.9 Diagramme vectoriel de l'onde progressive	21
Figure 2.10 Diagramme vectoriel des dérivés par rapport au temps des déplacements modaux	21
Figure 2.11 Position des points de non glissement Cas1	24
Figure 2.12 Position des points non glissement Cas2	25
Figure 2.13 Position des points non glissement Cas3	26
Figure 2.14 Position des points de non glissement Cas 4	26
Figure 2.15 Position des points de non glissement en fonction du déphasage φ_c	27

Figure 2.16 Le modèle équivalent pour le mouvement vertical de l'équation de rotor.....	28
Figure 2.17 Le modèle équivalent pour le mouvement de rotation	29
Figure 3.1Le neurone biologique	31
Figure 3.2 Le modèle de neurone formel.....	31
Figure 3.3 Différentes fonctions d'activation.....	32
Figure 3.4 Forme d'un réseau de neurones statique.....	34
Figure 3.5 Forme d'un réseau dynamique.....	35
Figure 3.6 Architecture du réseau multicouche.....	36
Figure 3.7 Principe de l'entraînement du réseau par rétro-propagation de l'erreur.....	38
Figure 3.8 Schéma fonctionnel de la commande	40
Figure 4.1 couple moteur à vide	41
Figure 4.2 la vitesse rotorique	42
Figure 4.3 Couple moteur avec différentes charges	43
Figure 4.4 vitesse du moteur avec différentes charges.....	43
Figure 4.5 la vitesse rotorique d'un moteur avec différentes valeurs de fréquences	44
Figure 4.6 Vitesse rotorique commandée par réseau de neurone.....	45

Liste des tableaux

Tableau 3.1 analogie entre le neurone biologique et le neurone formel.....	32
Tableau 4.2 Tableau des paramètres du moteur Daimler-Benz (AMW90-X)	47

Listes des Acronymes et Symboles

Symboles

R_p	Résistance modélisant les pertes diélectriques dans les céramiques[Ω]
F	Fréquence d'alimentation [Hz]
$A_{1,2}$	Rapport de transfert [$(KgFs^{-2})^{1/2}$]
F_{res}	Fréquence de résonance [Hz]
E	Module de Young [N/m^2]
S_m	Direction de mouvement réel
C_p	Capacité équivalente des céramiques[m]
C_s	Rigidité équivalente du stator [N/m]
a	Distance entre les points de surface de stator[m]
K	Nombre d'onde [rad/m]
C_N	la rigidité de la zone de contact [N/m^2]
φ_m	temporel entre les tensions de phase [rad]
X_k	Demi-largeur de la zone de contact entre le stator et le rotor[m]
$X_{sl, sr}$	Les points de non glissement[m]
n	Nombre d'onde contenu e dans l'anneau statorique
F_{ant}	Force de traction par unité de longueur agissant dans la zone de contact [N/m]
F_{ftbg}	Force de traction associée à une crête de l'onde progressive
M_c	Couple de charge [$[N / m]$]
V_{hor}	vitesse horizontale des points à la surface du stator[m/s]
$\varepsilon_{1,2}$	Facteur de perturbation
$U_{p1,2}$	Tension d'excitation[v]
μ	Frottement de Coulomb
M	Couple généré par le moteur [$[N / m]$]
d_s	Coefficient d'amortissement [Ns/m]
d_{rot}	Atténuation
C_{rot}	Rigidité équivalente
M_{antr}	Couple électromagnétique [$[N / m]$]

ω	Pulsation [rad/s]
λ	Longueur d'onde[m]
ε	L'erreur de vitesse [tr / min]
U_d	tension de la source principale [volt]
$W_{1,2}$	Amplitude de déformation des deux ondes stationnaires[m]
w_{rot}	vitesse angulaire du rotor[rad / s]
W_n	les poids appelés aussi coefficients synaptiques
a	la fonction d'activation
X_n	Les entrées
U	l'entrée du réseau de neurone
Y	la sortie du réseau de neurone

INTRODUCTION GENERALE

Le moteur piézoélectrique est un type d'actionneur qui exploite les vibrations mécaniques dans le domaine des fréquences ultrasoniques. Cependant, comme la conception des moteurs piézoélectriques simples, fiables et robustes qui est un sujet sur lequel beaucoup de choses restent à écrire, le contrôle de ces moteurs est une affaire délicate. En particulier, pour les moteurs à onde progressive, la commande du couple ou de la vitesse n'est pas aisée car les grandeurs électriques ne traduisent pas simplement les actions et réactions mécaniques. Par ailleurs, le moteur est le lieu d'une multitude de phénomènes complexes et non -linéaire : le contact entre stator et rotor, la mise en vibration du moteur, les non linéarités des éléments piézoélectriques eux- même.

L'intérêt de ce travail, réside également dans le fait qu'il constitue une étape vers une Application des réseaux de neurones pour la commande du moteur piézoélectrique.

La recherche sur les réseaux de neurones a connu un développement important ces dernières années, tant du côté architecture où plusieurs modèles sont proposés, que du côté algorithmes d'apprentissages utilisés pour entraîner ces réseaux.

En effet, ces travaux de recherche ont montré que les réseaux de neurones sont des approximateurs universels, ce qui permet de modéliser n'importe quel système non linéaire, et ils sont principalement, dotés de deux propriétés importantes : l'apprentissage et la généralisation.

Dans le premier chapitre On présentera d'abord Le phénomène de la piézoélectricité , Ensuite, les caractéristiques du moteur à onde progressive : sa construction, ses avantages et inconvénients, et Les différents types de ce moteur.

Le second chapitre concerne la modélisation analytique du moteur piézoélectrique à onde progressive. Une analyse détaillée des différents phénomènes nous a permis de développer un modèle efficace.

Le troisième chapitre s'intéresse ensuite de La commande d'un moteur piézoélectrique par réseau de neurone. « Commande la vitesse du moteur piézoélectrique par la fréquence d'entrée ».

Le dernier chapitre établit les résultats de simulation de la commande par le contrôleur neuronale et sans commande on fonctionnement à vide et en charge, avec une analyse technique

Enfin, nous clôturons notre travail par une conclusion générale

Chapitre 01

DESCRIPTION DES MOTEURS PIEZOELECTRIQUES

1.1. Introduction :

Le moteur piézoélectrique représente un intérêt certain pour l'industrie grâce à ses caractéristiques Très spécifiques qui le différencient des moteurs électromagnétiques classiques. Leur principe de fonctionnement repose sur la conversion par friction d'une vibration mécanique (souvent ultrasonore) du stator, en un mouvement continu du rotor. La déformation de la structure élastique (stator) est induite au moyen de céramiques piézoélectriques. Ces dernières ont la propriété de subir une déformation lorsqu'elles sont sous l'action d'un champ électrique (effet piézoélectrique inverse).

1.2. Le phénomène de la piézoélectricité :

1.2.1. Définition :

L'origine du mot piézoélectricité dérive du grec "Piézo" qui signifie pression. La piézoélectricité est une propriété basée sur la capacité de certains cristaux de générer un champ électrique lorsqu'ils sont soumis à une pression mécanique externe ; on parle alors d'effet piézoélectrique direct. Par contre, ces mêmes cristaux subissent une déformation sous l'action d'un champ électrique ; c'est l'effet piézoélectrique inverse [1].

La découverte de l'effet piézoélectrique 'direct' est attribué à pierre et jacques curie en(1880), sur la base des travaux de minéralogiste français l'Abbé Just [1]. L'effet inverse fut démontré en suite par Gabriel Lippmann (1845-1921), qui démontra que sous l'effet d'un champ électrique, un cristal se contracte ou se dilate, montrant des propriétés de résonance pour une fréquence donnée. Cet effet inverse est le même principe exploité dans les moteurs piézoélectriques. L'effet direct est généralement exploité dans le cadre de capteur vibratoire [2].

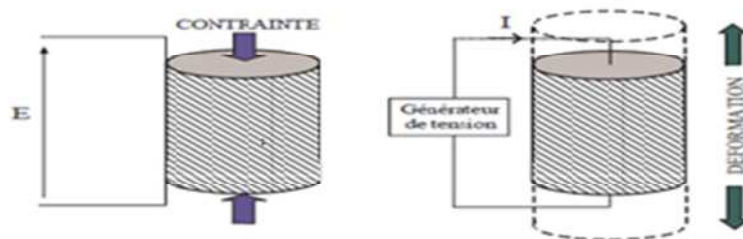


Figure 1.1 Illustration des effets piézoélectriques: à gauche l'effet direct, à droite l'effet inverse

Selon le principe de fonctionnement utilisé, nous pouvons distinguer substantiellement quatre différents types de dispositifs piézoélectriques :

- Capteurs ;
- Actionneurs ;
- Transformateurs ;

Les capteurs utilisent l'effet piézoélectrique direct, les actionneurs l'effet inverse. Pour ce qui concerne le transformateur, on a affaire à un dispositif particulier qu'utilise l'effet direct et inverse [1].

1.2.2. Céramique piézoélectrique:

Les céramiques constituent la partie la plus importante des transducteurs piézoélectriques. Elles peuvent convertir des grandeurs mécaniques, comme la pression ou l'accélération, en quantités électriques ou, à l'inverse, convertir des signaux électriques en mouvements ou oscillations mécaniques. Les céramiques piézoélectriques sont utilisées dans une vaste gamme d'applications et recouvrent une large bande fréquentielle. Dans les capteurs, elles permettent la conversion des forces, des pressions et des accélérations en signaux électriques. Tandis que dans les actionneurs, elles permettent la transformation de tensions électriques en déformations mécaniques. Si des lamelles de quartz sont encore utilisées pour la fabrication de résonateurs en électronique, les matériaux utilisés pour les actionneurs sont le titanate de baryum et des alliages de plomb, les oxydes de titane et de zirconium (couramment appelés céramiques piézoélectriques PZT).

L'élaboration de céramiques piézoélectriques peut s'effectuer à partir de poudre issue d'un alliage. Une procédure commune consiste à effectuer un pressage dans un moule pour la mise en forme et un frittage à haute température pour lier les grains entre eux.

Le dépôt d'électrodes est nécessaire pour l'étape finale de polarisation. En effet, les microcristaux assemblés par frittage conduisent à des domaines ferroélectriques orientés au hasard.

Le schéma de la figure suivante permet de résumer la procédure de fabrication des céramiques piézoélectriques [3] et [4].

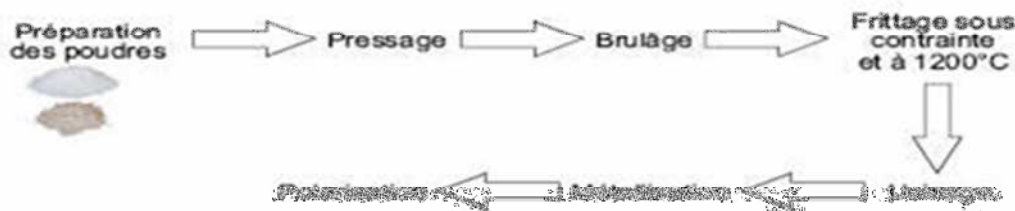


Figure 1.2 Fabrication des céramiques piézoélectriques

L'application d'un champ électrique intense (quelques kV par millimètre pendant quelques minutes à température élevée) permet d'aligner les polarisations des domaines élémentaires et de créer ainsi une direction de polarisation privilégiée. La Figure 1.3 illustre cette réorientation des domaines après l'étape de polarisation. [3]

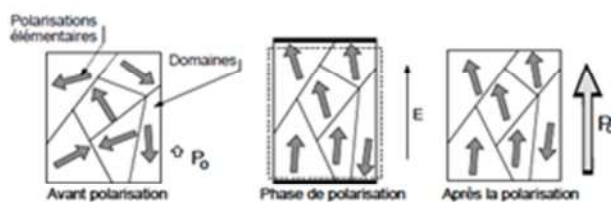


Figure 1.3 Polarisation d'un morceau de céramique. Le champ E intense force les domaines à s'orienter selon une direction privilégiée

1.2.3. L'application de la piézoélectricité :

La piézoélectricité est un phénomène de couplage électro-élastique linéaire qui conduit certains matériaux à produire une charge électrique proportionnelle à la contrainte mécanique, on trouve la piézoélectricité dans tous les domaines de l'électrotechnique, des matériaux piézoélectriques et des capteurs électromécaniques tels que les générateurs ultrasoniques, les filtres, les sondes, et les actionneurs.[5]

* Micro robotique:

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



Figure 1.4 Application des moteurs piézoélectriques en micro robotiques

* Montres :

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

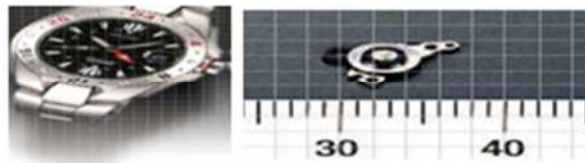


Figure 1.5 Application des moteurs piézoélectriques en montres

* Auto focus :

L'intégration au sein même du mécanisme est un avantage indéniable des moteurs à onde progressive. Leur géométrie annulaire permet l'utilisation de l'espace intérieur pour le maintien d'instrument (ici la lentille d'un appareil photo). On peut imaginer le passage de fils (commande, alimentation,) de tubes (refroidissement, lubrification,...), de mécanismes plus complexes

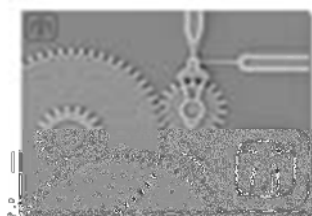


Figure 1.6 Application des moteurs piézoélectriques en auto focus

*Automobile :

Les applications automobiles ne sont pas encore largement développées. Cependant, il est imaginé qu'à l'avenir, les moteurs piézoélectriques actionneront les vitres, les sièges, les ouvertures centralisées, les écrans mobiles, les vannes,... Une application récente qui devrait se concrétiser dans les prochaines années est l'injection directe d'essence par un moteur linéaire combinant haute pression (200bar) et grande vitesse.

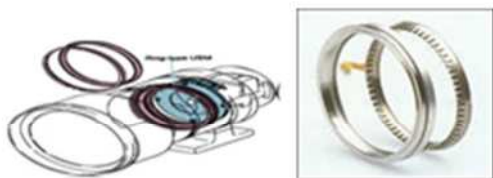


Figure 1.7 Application des moteurs piézoélectriques en automobile

*MEM's :

Les "Micro Electro Mechanical Systems" sont des mécanismes dont la taille avoisine le micromètre. Ces mécanismes nécessitent également des moteurs. La miniaturisation des moteurs électromagnétiques étant impossible à cette échelle, il faut se rabattre sur d'autres technologies telles que les moteurs piézoélectriques.



Figure 1.8 Application des moteurs piézoélectriques en MEM's

* Et bientôt :

Un nombre très important d'applications nécessitent des mouvements précis, rapides, "propres" (pas de pollutions électromagnétiques) et silencieux tout en limitant l'encombrement et le poids. Les moteurs piézoélectriques sont une réponse possible à ces besoins. Voici quelques exemples supplémentaires d'applications potentielles:

Motorisation de matériel médical; Positionneurs de précision pour microscope;

Manipulateur de cartes à puce;...et tous les petits moteurs se trouvant dans nos appareils quotidiens (PC, voiture, électroménager,...)

1.3. Les Caractéristiques des moteurs piézoélectriques :

Le moteur piézoélectrique est caractérisé par certains avantages et inconvénients qui sont exposés ci-dessous :

1.3.1. Les avantages :

Par rapport à un moteur classique (AC) de même taille (quelques watts)

- ☐ La puissance massique est potentiellement plus élevée;
- ☐ La vitesse de sortie est faible et le couple élevé ;
- ☐ Le niveau de bruit est très faible voir nul, (le fonctionnement silencieux) ;
- ☐ Le temps de réponse est de l'ordre de la milliseconde (au lieu de quelques centaines de ms);
- ☐ A l'arrêt, le moteur est naturellement bloqué sans consommer d'énergie grâce à la pression du rotor sur le stator ;
- ☐ Il n'y a aucun risque de perturbation électromagnétique;
- ☐ Le moteur est de fabrication simple ;
- ☐ Sa conception est très flexible, il peut s'intégrer au cœur même du mécanisme [5] ;

1.3.2. Les inconvénients :

- ☐ La faible durée de vie (2000h) due à l'usure de l'interface de friction;
- ☐ Le coût élevé (développement, fabrication des céramiques, nouvelle technologie);
- ☐ L'alimentation électrique complexe;
- ☐ Le rendement énergétique faible (10-25%) dû aux pertes dans la céramique piézoélectriques et lors de l'entraînement par friction;
- ☐ Le besoin d'une source électrique à haute fréquence [5] ;

1.4. Moteur piézoélectrique à onde progressive :

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. L'architecture de ce type d'actionneur est représentée à la figure 1.9 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).

Il est entraîné par frottement en exploitant les trajectoires elliptiques décrites par les points à la surface du stator (figure 1.11). [1]

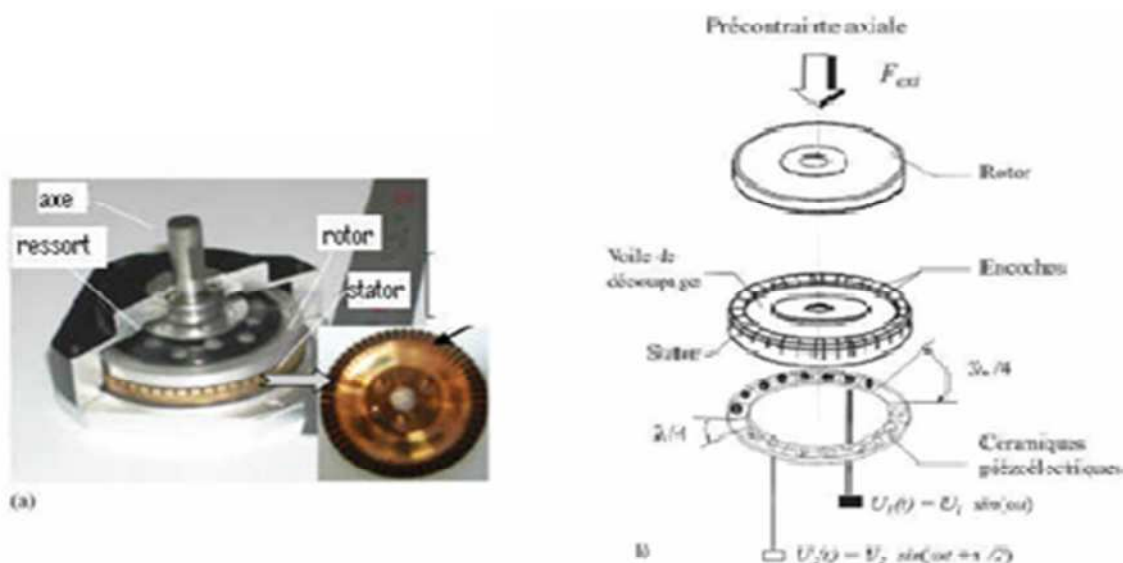


Figure 1.9a),b) Schéma de construction du moteur piézoélectrique à onde progressive

Le fonctionnement de ce type de moteur repose sur deux conversions d'énergie comme indiquée sur la Figure 1. 10:

La conversion électromécanique, 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 provoquant la mise en mouvement d'une pièce maintenue en contact sur la surface du stator. Les vibrations de la surface du stator sont transformées en mouvement de translation ou de rotation du rotor par l'intermédiaire des forces de frottement générées.

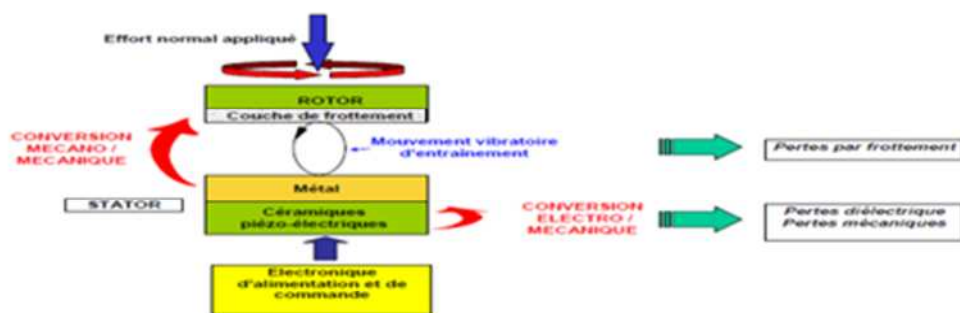


Figure 1.10 Double conversion d'énergie au sein des structures piézoélectrique

Nous pouvons donc diviser le principe de fonctionnement en deux :

1.4.1. Organe d'entraînement :

Un anneau de céramiques piézoélectriques est collé sur le stator de façon à induire dans ce dernier des oscillations à la fréquence de résonance. L'anneau est divisé en deux systèmes d'excitation (phases du moteur). Chaque système est alimenté idéalement par une tension sinusoïdale dans le domaine ultrasonique, générant ainsi deux ondes stationnaires dans le stator. Un déphasage spatial égal à un quart de la longueur d'onde est alors introduit entre les deux systèmes d'excitation de façon à générer une onde progressive par la superposition des deux ondes stationnaires. Cela est réalisé par l'imposition d'amplitudes et déphasages temporels adéquats. Grâce à l'onde progressive, les points à la surface du stator décrivent une trajectoire elliptique qui permet de combiner des déplacements verticaux et horizontaux. Il faut également relever que l'organe d'entraînement doit être fixé sur un support (socle de fixation). Ceci implique l'introduction, dans la géométrie de l'anneau statorique, d'un voile de découplage, comme le montre la figure 1.9, afin d'éviter certaines perturbations, dues à la fixation du stator sur le support. Ceci pourra avoir des répercussions sur la forme et l'amplitude de l'onde statorique générée.

1.4.2. 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, symbolisée avec la force F_{ext} sur la figure 1.9, contre le stator.

Grâce à la pression générée dans la zone de contact entre le stator et le rotor, une force de frottement existe permettant ainsi au mouvement horizontal des points à la surface du stator (due au mouvement elliptique) de transmettre une force de traction au rotor (figure 1.11). La force de précontrainte permet aussi de fixer le couple de maintien sans alimentation du moteur selon la loi du frottement.

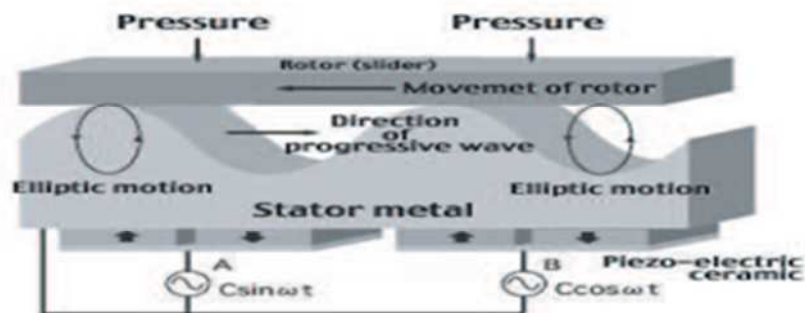


Figure 1.11 Principe d'entraînement du moteur piézoélectrique à onde progressive

1.5. Les types de moteur piézoélectrique à onde progressive :

Dans cette famille des actionneurs piézoélectriques à onde progressive nous pouvons distinguer deux principaux types de moteurs:

Les moteurs annulaires,

Les moteurs à rotation de mode.

Nous allons maintenant revenir plus en détail sur le mode de fonctionnement de chacun de ces moteurs.

1.5.1. Principe du moteur annulaire :

Le principe de fonctionnement de ce moteur repose sur l'exploitation d'une onde progressive de flexion générée au niveau d'un disque métallique (généralement en cuivre béryllium) par un anneau céramique piézo-électrique PZT collé à l'arrière du disque. La Figure 1. 12 présente une vue éclatée du moteur annulaire développé par Shinsei USR60 (à stator de 60 mm de diamètre extérieur), le moteur de référence depuis maintenant 25 ans [6].

Le stator en cuivre béryllium est relié au bâti par un voile de découplage pour laisser vibrer le stator tout en le maintenant. Le stator est constitué de dents au niveau de son contact avec le rotor, ce qui modifie peu la rigidité mais amplifie les mouvements générés en surface.

Elles permettent aussi d'évacuer les particules résultant de l'usure de la couche de friction.

Un rotor en duralumin, revêtu sur la piste de contact d'un matériau polymère, est pressé contre le stator au moyen d'un élément élastique (ressort parapluie) pour avoir ainsi un entraînement en rotation. Une couche de matériau de friction est déposée sur le rotor pour améliorer le contact et diminuer les bruits de frottement dus aux phénomènes de stick-slip interfaciaux tout en garantissant un taux d'usure contenu.[7]

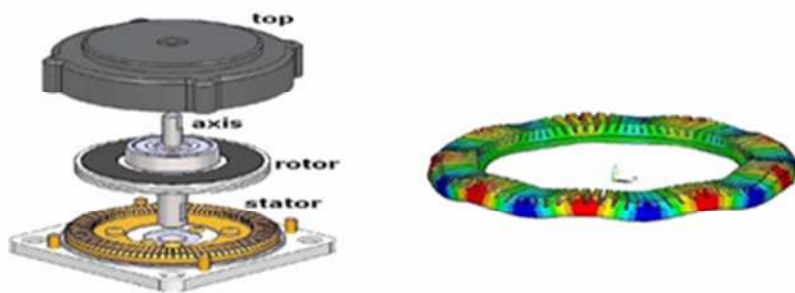


Figure 1.12 Vue éclatée du moteur USR60 SHINSEI et la simulation numérique par FEM du stator en déformation

Dans ce type de construction du stator, existe un problème technologique délicat, notamment l'assemblage de la structure bi morphie (céramique + résonateur béryllium). La liaison entre la céramique et la partie métallique est effectuée par un joint de colle. Le joint de colle utilisé doit en effet, d'une part, assurer un bon couplage mécanique entre la céramique et la partie métallique et, d'autre part, doit permettre un contact électrique satisfaisant entre la métallisation de la céramique et la partie métallique qui constitue la masse de l'actionneur.

1.5.2. Principe du moteur à rotation de mode :

Un moteur à rotation de mode (Figure 1.13) utilise deux modes de déformation orthogonaux. Il est constitué d'une poutre cylindrique associant des céramiques piézoélectriques encadrées par des contre masses [6]. La combinaison de ces modes provoque une rotation de la structure généralement de révolution autour de son axe de symétrie. L'ensemble est précontraint par une ou plusieurs vis. La partie mobile est maintenue contre le stator par une pression extérieure assurée par une raideur rapportée entre le rotor et le bâti.

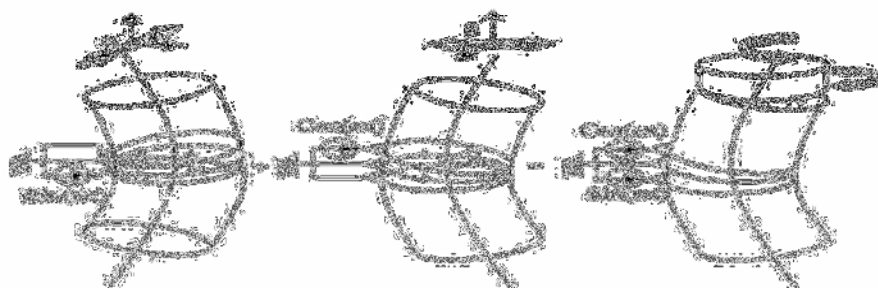


Figure 1.13 Principe de fonctionnement d'un moteur à rotation de mode

Contrairement aux structures annulaires, le contact entre rotor et stator se fait sur une seule zone. La génération des deux modes de flexion nécessite une subdivision des céramiques utilisées en deux secteurs de 180° avec des polarisations opposées sur chaque moitié (voir Figure 1.14).



Figure 1.14 Vue éclatée et assemblée d'un moteur à rotation de mode

1.6. Conclusion :

Nous avons présenté dans ce chapitre un aperçu sur le phénomène de la Piézoélectricité, quelques généralités sur Les actionneurs piézoélectriques, et on a donné quelques points importants concernant son utilité et son importance, ainsi leurs Principes de fonctionnement et Les différents types de ce moteur.

Chapitre 02

MODELISATION DES MOTEURS PIEZOELECTRIQUES

2.1. Introduction :

Comme illustré dans le chapitre précédent, grâce à leurs caractéristiques intrinsèques, les actionneurs piézoélectriques à onde progressive se sont révélés supérieurs aux moteurs électromagnétiques dans beaucoup d'applications. Malheureusement, la recherche d'un modèle analytique efficace s'avère très difficile et complexe. Cela est dû au principe de fonctionnement basé sur des vibrations à haute fréquence et aux phénomènes tribologiques agissant dans la zone de contact entre stator et rotor. Il en résulte des caractéristiques de fonctionnement fortement non-linéaires. Pour la saisie du problème, le calcul et enfin le traitement et la visualisation des résultats. Le but de ce chapitre est donc de présenter un modèle analytique qui permettra de simuler le comportement statique et dynamique du moteur.

2.2. Modèle mathématique d'un moteur piézoélectrique à onde progressive :

Le modèle du moteur piézoélectrique à onde progressive se compose de quatre parties principales : [4]

- ✓ Source de tension (l'excitation électrique).
- ✓ Stator en céramique piézoélectrique.
- ✓ Interface de contact rotor/stator.
- ✓ Rotor.

Le modèle schématique du moteur est illustré dans la figure suivante :

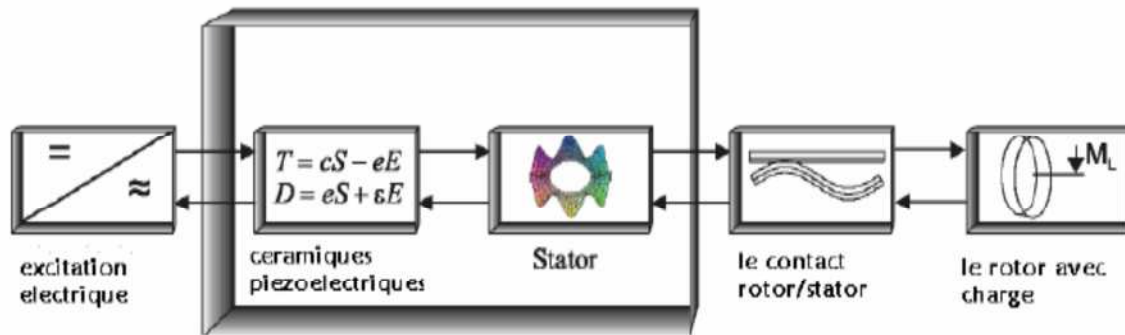


Figure 2.1 Schéma fonctionnelle du moteur piézoélectrique à onde progressive

Le model d'un moteur piézoélectrique à onde progressive constitue par quatre entrée, les amplitudes des deux phases de tension d'excitation, la fréquence et le déphasage entre les deux phases. Avec les deux sorties (la vitesse de rotation et le couple) [7].

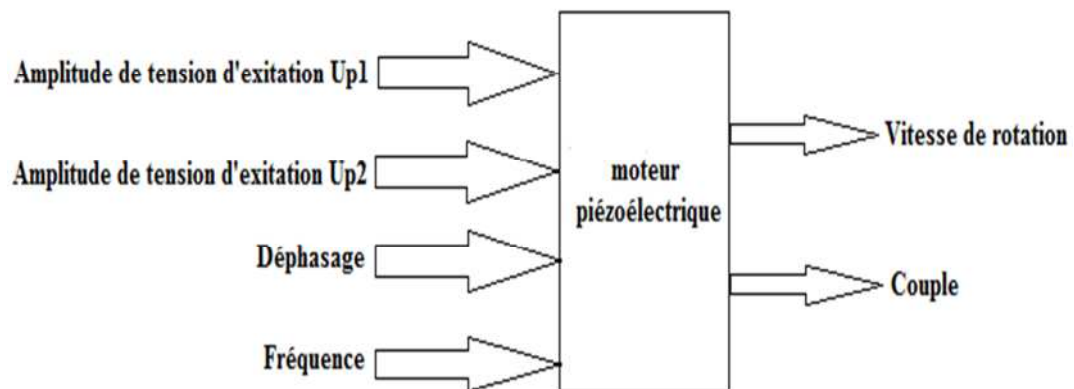


Figure 2.2 Schéma block du moteur piézoélectrique à onde progressive

2.2.1. Modèle du stator :

Le stator est la partie essentielle du moteur piézoélectrique, ou la conversion d'énergie électromécanique à lieu, appliqué en céramique au-dessous de stator, deux modes orthogonaux de vibration, dont la superposition produit une onde progressive.

Dans le stator modelant, notre but est d'établir un modèle avec les entrées suivantes :

Tension électrique d'excitation

Forces modales de l'interface de stator- rotor

et les sorties suivantes :

Déplacement modaux

Dérivés des déplacements modaux en fonction de temps

Le stator d'un moteur piézoélectrique, peut être représenté par un modèle de circuit électrique équivalent montré dans la Figure 2.3, dans ce cas on a étudié le modèle du stator isolé des autres parties du moteur [8].

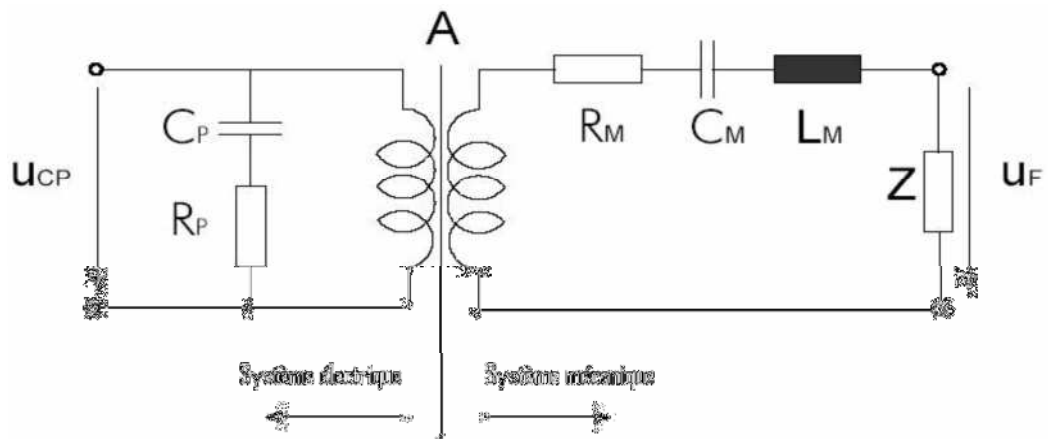


Figure 2.3 le circuit électrique équivalent du stator

Le système mécanique analogue à ce système est représenté dans la figure se dessus [4].

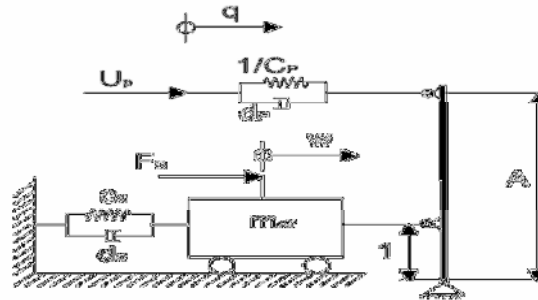


Figure 2.4 Le modèle mécanique équivalent de stator du moteur piézoélectrique

Les deux modèles de la Figure 2.3 et la Figure 2.4 sont équivalents. La masse, la rigidité et les pertes du circuit électrique équivalent du stator sont représentées par des éléments purement électriques (inductance, capacité et résistance), le déplacement W et la force U_P représentent respectivement la charge et la tension appliquée sur la céramique piézoélectrique.

* Le modèle complet du stator et de la céramique piézoélectrique est montré dans la figure 2.5 :

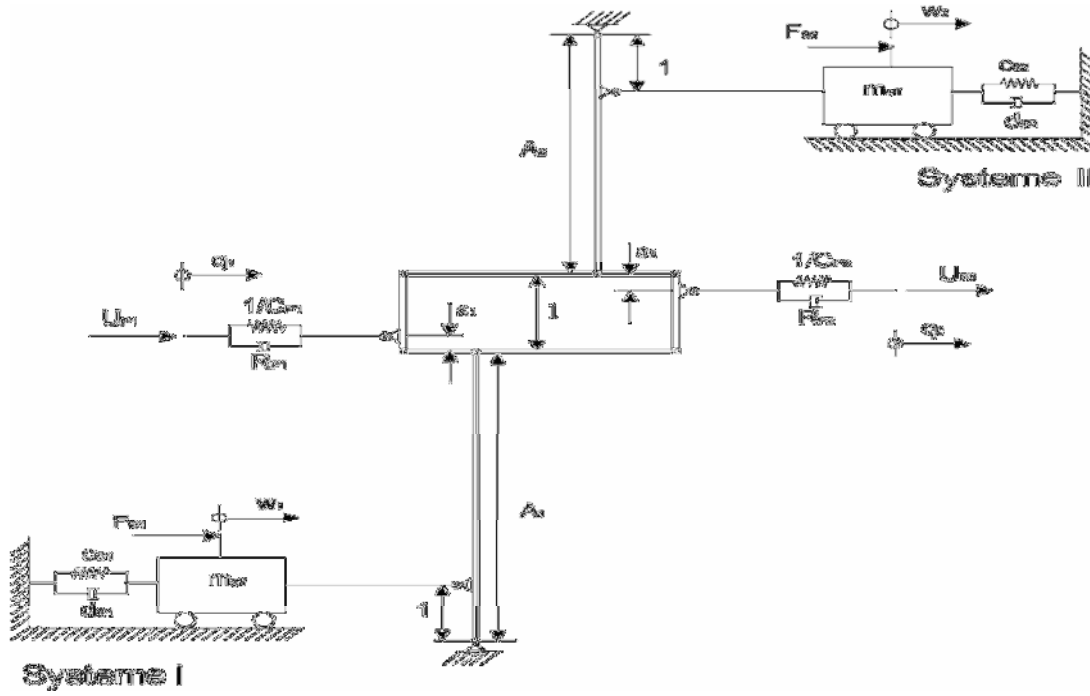


Figure 2.5 Modèle mécanique équivalent complet du stator

Dans la figure 2.5 les deux Systèmes (I et II) sont raccorder à un system de levier pour représenter l'influence du système I sur le mode de vibration du système II, les forces F_{s1} et F_{s2} avec les tensions d'excitation U_{p1} et U_{p2} agissant sur les déplacements modaux des deux systèmes w_1 et w_2 . Donc on peut écrire les équations différentielles des deux systèmes suivant [8] :

$$m_{eff}\ddot{w}_1 + d_{s1}\dot{w}_1 + c_{s1}w_1 = A_1 * [(1 - \varepsilon_1)U_{p1} + \varepsilon_2 U_{p2}] + F_{s1} \quad (2 - 1)$$

$$m_{eff}\ddot{w}_2 + d_{s2}\dot{w}_2 + c_{s2}w_2 = A_2 * [(1 - \varepsilon_2)U_{p2} + \varepsilon_1 U_{p1}] + F_{s2} \quad (2 - 2)$$

Après la transformation de Laplace nous avons obtenu:

$$W_1(s) = \frac{A_1(1-\varepsilon_1)}{m_{eff}s^2 + d_{s1}s + c_{s1}} U_{p1}(s) + \frac{A_1\varepsilon_2}{m_{eff}s^2 + d_{s1}s + c_{s1}} U_{p2}(s) + \frac{1}{m_{eff}s^2 + d_{s1}s + c_{s1}} F_{s1}(s) \quad (2 - 3)$$

$$W_2(s) = \frac{A_2\varepsilon_1}{m_{eff}s^2 + d_{s2}s + c_{s2}} U_{p1}(s) + \frac{A_2(1-\varepsilon_2)}{m_{eff}s^2 + d_{s2}s + c_{s2}} U_{p2}(s) + \frac{1}{m_{eff}s^2 + d_{s2}s + c_{s2}} F_{s2}(s) \quad (2 - 4)$$

Les matrices d'états sont :

$$\begin{bmatrix} \dot{w}_1 \\ \dot{w}_1 \\ \dot{w}_2 \\ \dot{w}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{-c_{s1}}{m_{eff}} & \frac{-d_{s1}}{m_{eff}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \frac{-c_{s2}}{m_{eff}} & \frac{-d_{s2}}{m_{eff}} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} w_1 \\ \dot{w}_1 \\ w_2 \\ \dot{w}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{A_1*(1-\varepsilon_1)}{m_{eff}} & \frac{A_1*\varepsilon_2}{m_{eff}} & \frac{1}{m_{eff}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{A_2*\varepsilon_1}{m_{eff}} & \frac{A_2*(1-\varepsilon_2)}{m_{eff}} & 0 & \frac{1}{m_{eff}} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} U_{p1} \\ U_{p2} \\ F_{s1} \\ F_{s2} \end{bmatrix} \quad (2 - 5)$$

$$\begin{bmatrix} y1 \\ y2 \\ y3 \\ y4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} w_1 \\ \dot{w}_1 \\ w_2 \\ \dot{w}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} U_{p1} \\ U_{p2} \\ F_{s1} \\ F_{s2} \end{bmatrix} \quad (2-6)$$

- ❖ La fréquence de résonance est la fréquence ou la réponse en fréquence du système est au maximum.

La fréquence de résonance peut être obtenue à partir de l'équation du mouvement suivante[5] :

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{c_s}{m_{eff}}} \quad (2-7)$$

- ❖ La fréquence d'anti-résonance est la fréquence à laquelle le courant d'entrée dans un céramique piézoélectrique est minimal , il est avantageux pour avoir le courant d'entrée aussi petit que possible afin de réduire au minimum les pertes dans la céramique piézoélectrique qui est représentée par la résistance R_p , pour cette raison certains auteurs proposant que le moteur devrait être conduit à la fréquence d'anti-résonance , en plus l'efficacité du moteur ultrasonique est maximale dans cette fréquence (anti-résonance) [5].

Si nous isolons les électrodes du système ($q1=0$) la prétendue fréquence d'anti-résonance peut être calculée [5]:

$$f_{ant} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{c_s + \frac{A^2}{c_p}}{m_{eff}}} \quad (2-8)$$

2.2.2. Modèle de l'interface Stator-rotor :

Le modèle d'interface stator-rotor est la partie la plus complexe du modèle du moteur piézoélectrique. On suppose que le stator est rigide, ce qui implique, que le profil de vibration ne change pas après le contact avec le rotor, sachant que celui-ci a une couche de contact uniforme. Dans notre étude deux cas sont considérés dans le modèle du contact : avant et après application de la contrainte de cisaillement. La trajectoire des points de surface du stator peut être analysée à partir du mouvement vertical de l'onde progressive idéale. [1] Si nous voulons construire un moteur avec une vitesse de rotation élevée, la valeur de déplacement u_x doit être aussi grande que possible (l'ellipse doit être plate).

$$\left(\frac{u_z}{w_0}\right)^2 + \left(\frac{u_x}{a.k.w_0}\right)^2 = 1 \quad (2-9)$$

La trajectoire des points de la surface du stator est représentée par la Figure 2.6

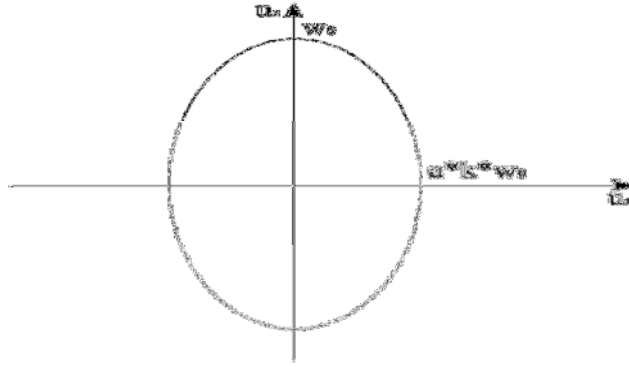


Figure 2.6 La forme elliptique de la trajectoire des points de la surface du stator

La vitesse tangentielle est définie comme la dérivée du déplacement tangentiel [9] :

$$v_{hor}(x, t) = -a \cdot \frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial x \partial t} = -akw_0\omega \cos(kx - \omega t) = v_0 \cos(kx - \omega t) \quad (2 - 10)$$

Avec :

$$v_0 = -akw_0\omega \quad (2 - 11)$$

v_0 : Vitesse tangentielle maximale des points de surface du stator.

* La vitesse tangentielle maximale a une valeur négative, parce que la vitesse tangentielle des points extérieurs est opposée au sens de déplacement de propagation de l'onde.

2.2.3. Zone de contact :

Une autre manière de décrire le mécanisme de contact, est d'employer le modèle de zone de contact. Ce modèle suppose que le stator est rigide. Le rotor a une couche de contact flexible similaire à un ressort linéaire avec une rigidité équivalente dans la direction axiale et tangentielle c_N . Afin d'explicitier le principe de fonctionnement, on analyse les points de la surface dans un nouveau système de coordonnées qui se déplace avec l'onde progressive, avec la même vitesse et dans la même direction que l'onde progressive [1].

Les coordonnées d'un nouveau système sont :

$$\hat{x} = x - \frac{\omega}{k}t \quad (2 - 12)$$

$$\hat{z} = z \quad (2 - 13)$$

Observons(2 - 12)le déplacement vertical de plan neutre du stator tel que :

$$w(\hat{x}) = w_0 \cdot \cos(k\hat{x}) \quad (2 - 14)$$

Donc la distribution de vitesse des points de surface du stator donné par la relation suivant :

$$v_{hor}(\hat{x}) = v_0 \cdot \cos(k\hat{x}) \quad (2 - 15)$$

C'est le cas d'une onde progressive idéale. Le déplacement des points aux crêtes de l'onde progressive décale avec la valeur de la vitesse horizontale, par ce que le déphasage entre le déplacement vertical de plan du stator et la distribution de vitesse des points de surface du stator est nul. Dans la couche de contact le stator a causé la création de la pression normale le long de la zone de contact. La Figure 2.7 représenté le chevauchement entre la couche de contact du rotor et la surface du stator. [5]

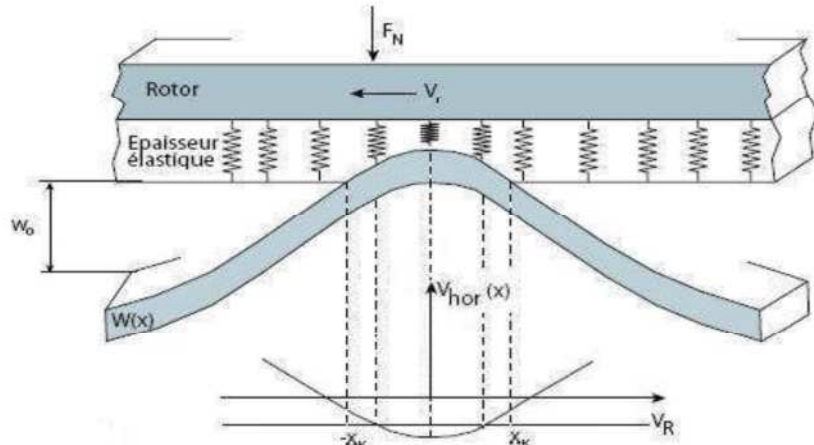


Figure 2.7 Schéma du contact mécanique stator/rotor

Le chevauchement entre le stator et le rotor est décrit par la relation suivant :

$$\Delta W = W_0 \cdot (\cos(k\tilde{x}) - \cos(kx_k)) \quad (2 - 16)$$

Avec x_k c'est la moitié de la longueur de la zone de contact.

Ce chevauchement produit la ligne de distribution de la force le long de la zone de contact, Parce que il ya des forces (force normale) qui est résulté des propriétés physique de la couche de contact la ligne de force est exprimée comme suit :

$$F_z = \frac{E \cdot b}{h} \cdot \Delta W = c_N \cdot \Delta W \quad (2 - 17)$$

Avec :

$$c_N = \frac{E \cdot b}{h} \quad (2 - 18)$$

c_N : La rigidité équivalente de la couche de contact.

h : L'épaisseur de la couche de contact, b : la largeur de contact dans la direction radiale.

Donc la ligne de force donnée par la relation suivant :

$$f_z = c_N \cdot \Delta W = c_N \cdot W_0 \cdot (\cos(k\tilde{x}) - \cos(kx_k)) \quad (2 - 19)$$

la force normale peut être calculée en intégrant la ligne de force au-dessus de la zone de contact

$$F_n = n \int_{-x_k}^{x_k} f_z(\hat{x}) d\hat{x} \quad (2 - 20)$$

n : Le nombre des crêtes d'onde.

Comparons la vitesse des points d'un profil de surface du stator le long de la zone de contact à la vitesse du rotor. Nous pouvons voir qu'il y a des zones où la vitesse du rotor est plus grande que la vitesse des points de surface du stator et des zones où la vitesse du rotor est plus petite, et aussi des points où ces deux vitesses sont égales (les points de non glissement) [10].

Puisque le frottement de coulomb a été supposé force de friction alors, celle ci peut être calculée à partir de la relation (2-21):

$$F_{antr} = n\mu \int_{x_k}^{x_k} \text{sign}(v_{hor}(\hat{x}) - v_R) \cdot f_z(\hat{x}) d\hat{x} \quad (2 - 21)$$

* La direction de cette force dépend du signe de la vitesse relative entre les points de surface du stator et la vitesse de rotor. Les forces tangentiels du stator agissantes sur le rotor sont exposées dans la Figure 2.8

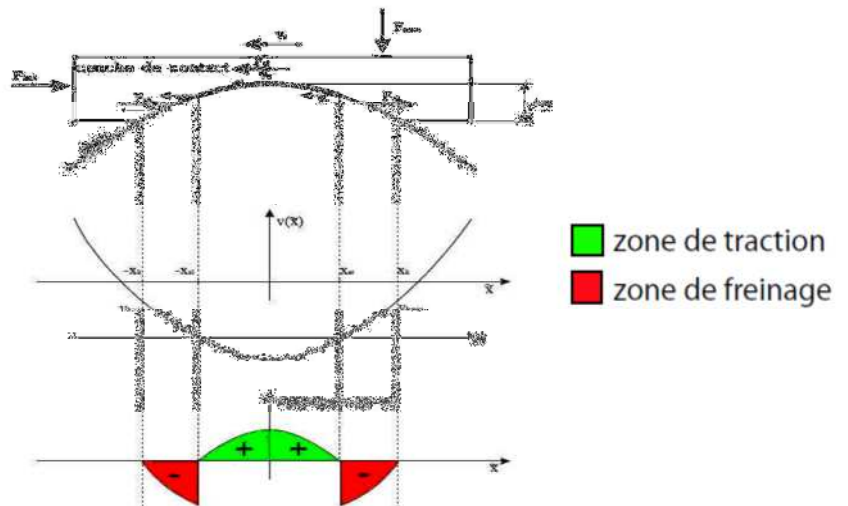


Figure 2.8 Les forces de freinage et de traction dans la zone de contact

On applique la loi de newton (Figure 2.8):

$$F_{antr} = F_{a1} - F_{a2} - F_{a3} \quad (2 - 22)$$

à partir de la Figure 2.8 on a deux zones dans la zone de contact :

- ❖ **Zone de freinage:** c'est une zone où la vitesse de rotor est plus grande que la vitesse des points extérieurs du stator, dans cette zone les forces de friction agissantes sur le rotor sont dirigées dans le même sens que la force de charge (couple). Ainsi, elles contribuent au freinage du rotor.
- ❖ **Zone de traction :** c'est une zone où la vitesse de rotor est plus basse que la vitesse des points extérieurs du stator, et Le couple de traction doit avoir la même valeur que le couple de charge appliqué.
- ❖ Les points où la vitesse du rotor est égale à la vitesse de la surface du stator, s'appellent points de non glissement. Qui seront à la limite de la zone de contact. La position de ces points détermine la largeur des zones de traction. Il dépend du couple de charge appliqué au rotor la force de traction maximale

$$F_{antrmax} = n\mu \int_{-x_k}^{x_k} f_z(\hat{x}) d\hat{x} = \mu F_{norm} \quad (2-23)$$

Avec F_{norm} la force axiale appliquée.

D'après (2-23), on peut déterminer le couple maximal produit par le stator.

$$M_{max} = \mu R_W F_{norm} \quad (2-24)$$

2.2.3.1. Cas général de l'onde progressive non idéale :

Grasse a la superposition des deux ondes stationnaires orthogonales ayant la même amplitude et déphasage de 90° (cas idéal). Une onde de déplacement idéale (onde progressive) est excitée. Mais dans la pratique, ce n'est pas le cas, alors Le but est de décrire comment ces ondes sont générées et en tenant compte des différents cas des formes d'ondes du stator .

$$W_1(x, t) = \widehat{W}_1 \cdot \sin(\omega t) \cdot \sin(kx) = W_{1m}(t) \cdot \sin(kx) \quad (2-25)$$

$$W_2(x, t) = \widehat{W}_2 \cdot \sin(\omega t + \varphi_c) \cdot \cos(kx) = W_{2m}(t) \cdot \cos(kx) \quad (2-26)$$

Avec :

$$W_{1m}(t) = \widehat{W}_1 \cdot \sin(\omega t) \quad (2-27)$$

$$W_{2m}(t) = \widehat{W}_2 \cdot \sin(\omega t + \varphi_c) \quad (2-28)$$

W_{1m} et W_{2m} sont les déplacements modaux.

La superposition de ces deux ondes stationnaires (2-24) et (2-25) donne

$$W(x, t) = W_1(x, t) + W_2(x, t) = W_{1m}(t) \cdot \sin(kx) + W_{2m}(t) \cdot \cos(kx) \quad (2-29)$$

L'équation (2-29) peut être calculée à l'aide du diagramme vectoriel. Nous pouvons représenter toutes les deux parties de (2-29) dans la Figure 2.9.

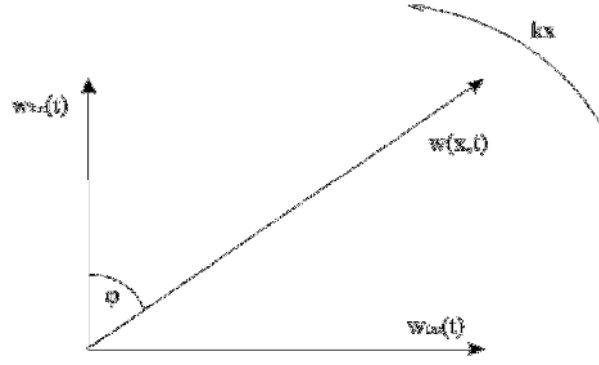


Figure 2.9Diagramme vectoriel de l'onde progressive

On peut écrire :

$$W(x,t) = \sqrt{W_{1m}^2(t) + W_{2m}^2(t)} \cos(kx + \text{ang}(W_{1m}(t), W_{2m}(t))) \quad (2-30)$$

Où la fonction mathématiquement **ang** peut être définie comme suit :

$$\text{ang}(x_1, x_2) = \begin{cases} \arctg \frac{x_1}{x_2}, & x_2 > 0 \\ \arctg \frac{x_1}{x_2} + \text{sign}(x_1) \cdot \pi, & x_2 < 0 \\ \text{sign}(x_1) \cdot \frac{\pi}{2}, & x_2 = 0 \end{cases} \quad (2-31)$$

En peut écrire les relations des vitesses horizontales des points de la surface du stator comme suite :

$$v_{hor}(x,t) = -a \cdot \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial x \partial t} = -ak (\dot{W}_{1m}(t) \cos(kx) - \dot{W}_{2m}(t) \sin(kx)) \quad (2-32)$$

L'emploi du diagramme vectoriel (Figure 2.10) nous permet de calculer la relation (2-32) de la même manière que le déplacement vertical du stator :

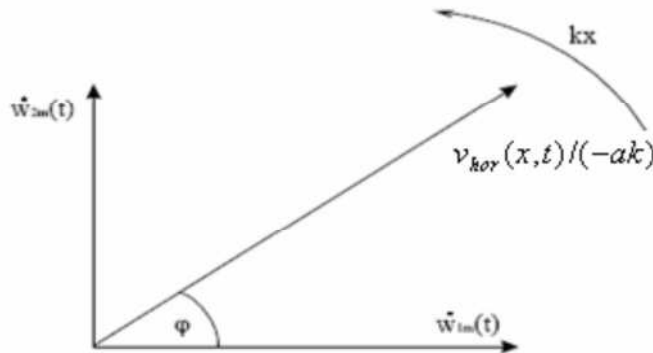


Figure 2.10Diagramme vectoriel des dérivés par rapport au temps des déplacements modaux

$$\begin{aligned}
v_{hor}(x, t) &= -ak\sqrt{\dot{W}_{1m}^2(t) + \dot{W}_{2m}^2(t)}\cos\left(kx + \text{ang}\left(\dot{W}_{1m}(t), \dot{W}_{2m}(t)\right)\right) \\
&= v_0(t)\cos\left(kx + \text{ang}\left(\dot{W}_{1m}(t), \dot{W}_{2m}(t)\right)\right)
\end{aligned} \quad (2-33)$$

Avec:

$$v_0(t) = -ak\sqrt{\dot{W}_{1m}^2(t) + \dot{W}_{2m}^2(t)} \quad (2-34)$$

Donc les coordonnées d'un nouveau système sont :

$$\tilde{x} = x - \frac{\text{ang}(W_{2m}(t), W_{1m}(t))}{k} \quad (2-35)$$

$$\tilde{z} = z \quad (2-36)$$

Le déplacement vertical du stator est donc :

$$W(\tilde{x}) = \sqrt{W_{1m}^2(t) + W_{2m}^2(t)} \cdot \cos(k\tilde{x}) = W_0(t) \cdot \cos(k\tilde{x}) \quad (2-37)$$

Où

$$W_0(t) = \sqrt{W_{1m}^2(t) + W_{2m}^2(t)} \quad (2-38)$$

La vitesse horizontale des points de la surface du stator sont :

$$\begin{aligned}
v_{hor}(\tilde{x}) &= v_0(t)\cos\left(k\tilde{x} + \text{ang}(W_{1m}(t), W_{2m}(t)) + \text{ang}(\dot{W}_{2m}(t), \dot{W}_{1m}(t))\right) \\
&= v_0(t)\cos(kx + \varphi_c(t))
\end{aligned} \quad (2-39)$$

Tel que :

$$\varphi_c(t) = \text{ang}(W_{1m}(t), W_{2m}(t)) + \text{ang}(\dot{W}_{2m}(t), \dot{W}_{1m}(t)) \quad (2-40)$$

D'après les équations (2-37) et (2-39) nous pouvons conclure :

- ❖ L'amplitude de l'onde de déplacement $w_0(t)$ dépend généralement du temps.
- ❖ La vitesse horizontale maximale des points de surface du stator $v_0(t)$ change aussi avec le temps.
- ❖ Un déphasage entre le déplacement vertical du stator et la vitesse horizontale existe (les points avec la vitesse horizontale maximale ne sont pas dans les crêtes de l'onde de déplacement)

Dans le cas des amplitudes d'ondes idéales c'est-à-dire égalités d'amplitudes, et de déphasage entre les déplacements modaux est 90 degrés :

$$W = W_1 = W_2 \quad (2-41)$$

$$\varphi_c = 90 \quad (2-42)$$

Donc

$$W_{1m}(t) = \widehat{W}_1 \cdot \sin(\omega t) \quad (2-43)$$

$$W_{2m}(t) = \widehat{W}_2 \cdot \sin(\omega t) \quad (2-44)$$

La substitution de (2-43) et (2-44) donne :

$$W(\tilde{x}) = \sqrt{\widehat{W}^2 (\cos^2(\omega t)) + \sin^2(\omega t)} \cdot \cos(k\tilde{x}) = \widehat{W} \cdot \cos(k\tilde{x}) \quad (2-45)$$

$$v_{hor}(\tilde{x}) = -ak \sqrt{\widehat{W}^2 (\cos^2(\omega t)) + \sin^2(\omega t)} \cdot \cos(k\tilde{x}) = v_0 \cdot \cos(k\tilde{x}) \quad (2-46)$$

$$v_0 = -akw \quad (2-47)$$

- ❖ Les dispositifs d'une onde progressive idéale sont :
- ❖ L'amplitude de l'onde progressive est constante (ne change pas avec du temps).
- ❖ La vitesse horizontale maximale des points de surface du stator est aussi invariable en temps.
- ❖ Le déphasage $\varphi_c = \frac{\pi}{2}$
- Les points sur les crêtes de l'onde progressive ont la plus grande vitesse horizontale (le décalage entre le déplacement vertical du stator et le profil horizontal de vitesse, est nul).

2.2.3.2. Les forces dans l'interface du stator-rotor :

La force tangentielle d'entraînement du stator est :

$$F_{antr_{max}} = n\mu \int_{-x_k}^{x_k} \text{sign}(V_{hor}(\tilde{x}) - V_R) \cdot f_z(\hat{x}) d\hat{x} \quad (2-48)$$

$$\xi(\tilde{x}) = k \int (\cos(k\tilde{x}) - \cos(kx_k)) d\tilde{x} = \sin(k\tilde{x}) - k\tilde{x} \cos(kx_k) \quad (2-49)$$

La superposition de (2-48) dans (2-49) on peut trouve :

$$F_{antr_{max}} = n\mu c_N W_0 \int_{-x_k}^{x_k} \text{sign}(V_{hor}(\tilde{x}) - V_R) \cdot (\cos(k\tilde{x}) - \cos(kx_k)) d\hat{x} \quad (2-50)$$

Le déplacement axial du stator induit une force de rétroaction normale (feedback) \mathbf{F}_{fbnorm} :

$$F_{fbnorm} = -n \int_{-x_k}^{x_k} \phi_x^T \cdot f_z(\tilde{x}) d\tilde{x} \quad (2-51)$$

Avec le vecteur $\phi_x^T = [\sin(kx) \cos(kx)]$ qui permet de décomposer l'effet de la force globale sur les deux modes de vibrations séparément, selon l'équation précédent. Le vecteur force \mathbf{F}_{fbtg} représente la réaction de l'interface de stator-rotor dans la direction tangentielle induite par le mouvement horizontal des points de surface du stator.

$$F_{fbtg} = -n\mu a \int_{-x_k}^{x_k} \frac{\partial \phi_x^T}{\partial x} \text{sign}(V_{hor}(\tilde{x}) - V_R) \cdot f_z(\tilde{x}) d\tilde{x} \quad (2-52)$$

L'addition des deux vecteurs (2-48) et (2-50) donne le vecteur force de rétroaction modale :

$$F_s = F_{fbnorm} - S_m F_{fbtg} \quad (2-53)$$

Avec :

S_m : C'est le sens du mouvement

Pour déterminer le facteur S_m il faut vérifier le signe de la vitesse horizontale des points de surface du stator aux crêtes de l'onde.

D'après les équations (2-49) et (2-50) avec $\tilde{x}_{max} = 0$ donne :

$$V_{hor}(\tilde{x}_{max}) = V_0(t) \cos(\varphi_c(t)) \quad (2-54)$$

Où

$$S_m = \text{sign}(V_{hor}(\tilde{x}_{max})) \quad (2-55)$$

➤ Les cas possibles des points de non glissement sont :

a. Le premier cas : ($x_{sl} \leq x_k$ et $x_k \leq x_{sr}$), x_{sl} (gauche) et x_{sr} (droite) :

Les deux points de non glissement sont à l'intérieur de la zone de contact (Figure 2.11)

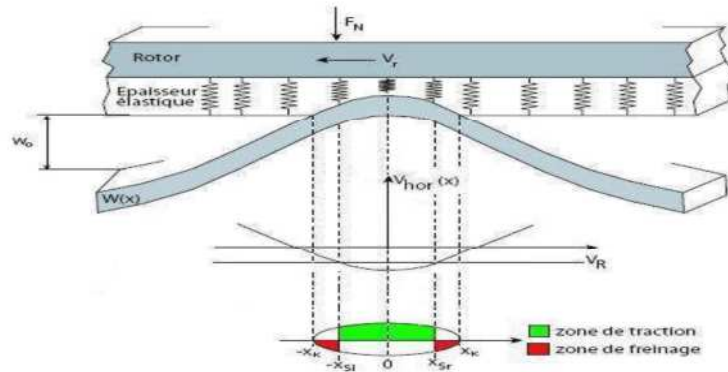


Figure 2.11 Position des points de non glissement Cas 1

Donc la force de traction F_{ant} peut-être écrite par la relation suivante [11] :

$$F_{ant} = n\mu c_N W_0 \left[- \int_{-x_k}^{-x_{sl}} f_z(\tilde{x}) d\tilde{x} + \int_{-x_{sl}}^{x_{sr}} f_z(\tilde{x}) d\tilde{x} - \int_{x_{sr}}^{x_k} f_z(\tilde{x}) d\tilde{x} + \right] \quad (2-56)$$

On calcule (2-56) et on obtient :

$$F_{ant} = \frac{n\mu c_N W_0}{k} \left[-2(\sin(kx_k) - kx_k \cos(kx_k)) + 2(\sin(kx_{sr}) - kx_{sr} \cos(kx_k)) + \right. \\ \left. + 2(\sin(kx_{sl}) - kx_{sl} \cos(kx_k)) \right] \quad (2-57)$$

On utilise (2 – 49) pour simplifier (2 – 57)

Donc :

$$F_{ant} = \frac{n\mu c_N W_0}{k} [-2\xi(x_k) + 2\xi(x_{sr}) + 2\xi(x_{sl})] \quad (2 - 58)$$

La force tangentielle de réaction peut être calculée ainsi :

$$F_{fbtg} = n\mu a c_N [- (E_c(-x_{sl}) - E_c(x_k)) + (E_c(x_{sr}) - E_c(x_{sl})) - (E_c(x_k) - E_c(x_{sr}))] \quad (2 - 59)$$

$$= -2n\mu a c_N [E_c(-x_{sl}) - E_c(x_k) + E_c(x_{sr})] \quad (2 - 60)$$

b. Le deuxième cas : ($x_{sl} > x_k$ et $x_k \leq x_{sr}$)

Le point de non glissement est à l'extérieur et le point droit de non glissement à l'intérieur de la zone de contact (Figure 2.12) ,dans ce cas il y a deux zone : zone de traction sur la côté gauche et une zone freinage sur le côté droit, donc la force tangentielle de réaction et la force d'entraînement peut être écrire :

$$F_{fbtg} = -2n\mu a c_N [-E_1(x_k) + E_c(x_{sr})] \quad (2 - 61)$$

$$F_{ant} = \frac{n\mu c_N W_0}{k} [2\xi(x_{sr})] \quad (2 - 62)$$

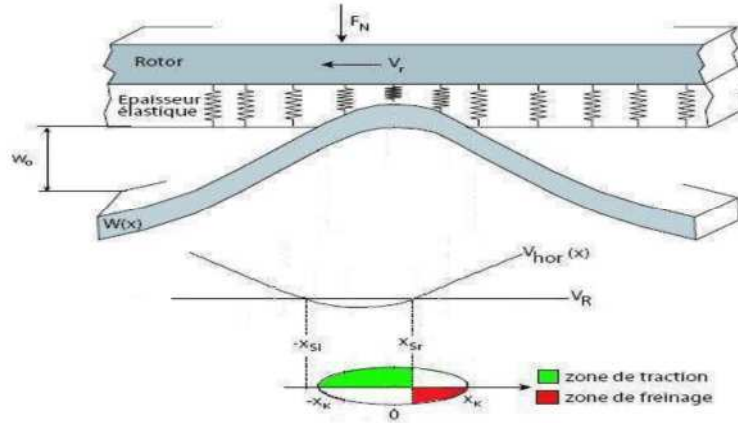


Figure 2.12 Position des points non glissement Cas2

c. Le troisième cas : ($x_{sl} \leq x_k$ et $x_{sr} > x_k$)

La zone de traction est à droite et la zone freinant sur le côté gauche (Figure 2.13)

$$F_{fbtg} = -2n\mu a c_N [-E_c(-x_{sl}) + E_1(x_k)] \quad (2 - 63)$$

$$F_{ant} = \frac{n\mu c_N W_0}{k} [2\xi(x_{sl})] \quad (2 - 64)$$

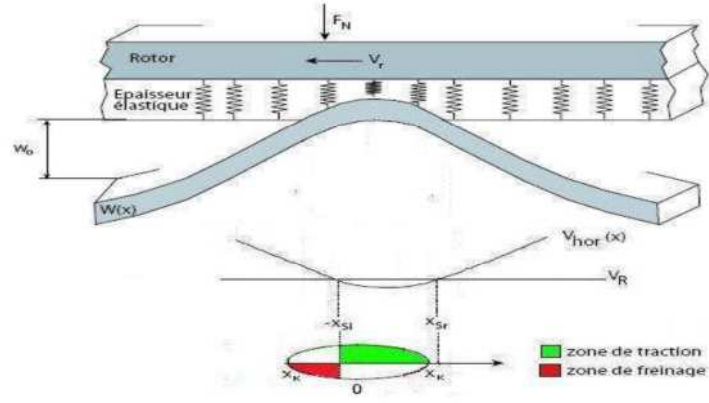


Figure 2.13 Position des points non glissement Cas 3

d. *Le quatrième cas* : $(x_{sl} > x_k \text{ et } x_{sr} > x_k)$

Dans ce cas on remarque que la zone de traction agissant seulement dans la zone de Contact, donc La vitesse du rotor est plus faible que la vitesse horizontale des points de la surface du stator.(Figure 2.14)[11]

$$F_{fbtg} = -2n\mu c_N [E_2(x_k)] \quad (2-65)$$

$$F_{ant} = \frac{n\mu c_N W_0}{k} [2\xi(x_k)] \quad (2-66)$$

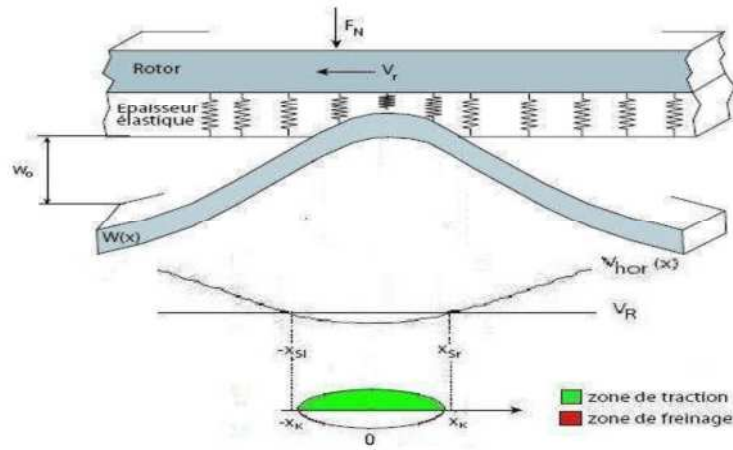


Figure 2.14 Position des points de non glissement Cas 4

➤ Deux autres cas doivent être pris en considération :

État de freinage : La vitesse du rotor peut être plus grande que la vitesse horizontale maximale des points de surface du stator le long de la zone de contact .

$$\begin{cases} V_R > V_0 \text{ et } V_0 > 0 \\ \text{ou} \\ V_R < V_0 \text{ et } V_0 < 0 \end{cases} \quad (2-67)$$

➤ État purement d'entraînement(traction le long de la zone de contact)

➤ La vitesse du rotor est plus petite que la vitesse minimale du stator.

$$\begin{cases} V_R < -V_0 \text{ et } V_0 > 0 \\ \text{ou} \\ V_R > -V_0 \text{ et } V_0 < 0 \end{cases} \quad (2-68)$$

Les points de non glissement peuvent être obtenus à partir de l'égalité de la vitesse de rotor et de la vitesse horizontale des points de surface de stator donc on peut déterminer les points de non glissement et la longueur de la zone de contact [5].

$$v_R = v_0(t) \cos(k\tilde{x} + \varphi_c(t)) \quad (2-69)$$

Donc :

$$\begin{aligned} kx_{sr} + \varphi_c(t) &= \arccos\left(\frac{v_R}{v_0(t)}\right) \\ x_{sr} &= \frac{1}{k} \left(\arccos\left(\frac{v_R}{v_0(t)}\right) - \varphi_c(t) \right) \end{aligned} \quad (2-70)$$

On utilise la figure 2.15 pour montrer que :

$$\begin{aligned} -\left(-x_{sr} + \frac{1}{k}\varphi_c(t)\right) &= x_{sl} + \frac{1}{k}\varphi_c(t) \\ x_{sl} = x_{sr} + \frac{2}{k}\varphi_c(t) &= \frac{1}{k} \left(\arccos\left(\frac{v_R}{v_0(t)}\right) + \varphi_c(t) \right) \end{aligned} \quad (2-71)$$

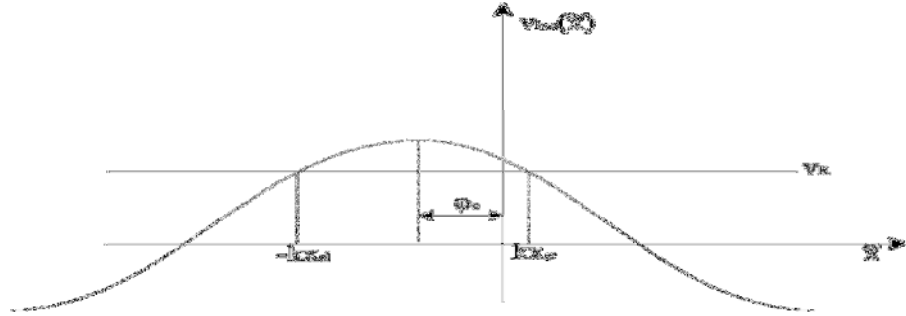


Figure 2.15 Position des points de non glissement en fonction du déphasage φ_c

Dans le cas :

$$W_{rot}(t) = W_0(t) \cos(kx_k) \quad (2-72)$$

Avec :

$W_{rot}(t)$: La position verticale du rotor

Donc x_k peut être calculé :

$$x_k = \frac{1}{k} \arccos\left(\frac{W_{rot}(t)}{W_0(t)}\right) \quad (2-73)$$

$$x_k = \begin{cases} 0 & \frac{1}{k} \arccos\left(\frac{W_{rot}(t)}{W_0(t)}\right) W_{rot}(t) \leq |W_0(t)| \\ & W_{rot}(t) > W_0(t) \\ & \frac{\pi}{k} W_{rot}(t) > W_0(t) \end{cases} \quad (2-74)$$

Le couple d'entraînement M_{antr} peut être calculer a partir de l'équation suivant :

$$M_{antr} = s_m R_W F_{antr} \quad (2-75)$$

2.2.4. Modèle de rotor :

Le rotor du moteur ultrasonique étudié est modélisé pour avoir deux degrés de liberté :

Mouvement vertical

Rotation

2.2.4.1. Mouvement vertical :

La figure se dessous représente le système mécanique équivalent pour modeler le mouvement vertical du rotor illustré.

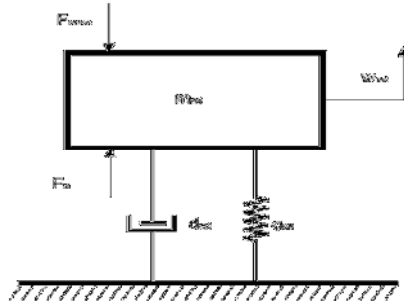


Figure 2.16 Le modèle équivalent pour le mouvement vertical de l'équation de rotor

L'équation (2-76) décrit le mouvement vertical du rotor :

$$m_{rot} \ddot{w}_{rot} + d_{rot} \dot{w}_{rot} + c_{rot} w_{rot} = F_n - F_{norm} \quad (2-76)$$

$$F_n = n\mu \int_{-x_k}^{x_k} f_z(\hat{x}) d\hat{x} = \mu F_{norm} \quad (2-77)$$

F_n : La force normale agissant sur le rotor,

n : représente le nombre des crêtes d'onde.

F_{norm} : La force axiale appliquée , m_{rot} : la masse équivalente du rotor, d_{rot} et c_{rot} sont l'atténuation et la rigidité équivalentes. En appliquant la transformation de Laplace sur l'équation (2-76) :

$$G_{rz} = \frac{w_{rot}(s)}{F_n(s) - F_{norm}(s)} = \frac{1}{m_{rot}s^2 + d_{rot}s + c_{rot}} \quad (2-78)$$

2.2.4.2. Rotation :

Le modèle équivalent pour le mouvement de rotation du rotor est illustré dans Figure 2.17

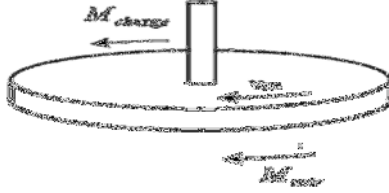


Figure 2.17 Le modèle équivalent pour le mouvement de rotation

Le mouvement de rotation du rotor décrit par une équation simple (négligeant l'atténuation de la rotation du rotor) :

$$J_{rot} \cdot \dot{w}_{rot} = M_{antr} - M_{charge} \quad (2 - 79)$$

Alors la fonction de transfert est :

$$G_{ra}(s) = \frac{w_{rot}}{M_{antr} - M_{charge}} = \frac{1}{J_{rot}s} \quad (2 - 80)$$

2.3. Conclusion

Cette étude détaillée, nous a permis de trouver un modèle mathématique au moteur piézoélectrique a onde progressive .Malgré, la complexité des phénomènes physiques liés au principe de fonctionnement. Ensuite, des relations mathématiques décrivant les propriétés électromécaniques des milieux piézoélectriques ont été ultérieurement introduites.ces dernières seront utilisées dans la modélisation analytique de l'actionneur. Enfin, ces équations décrivant le comportement des différentes parties nous permettons de simuler dans l'environnement MATLAB/Simulink les caractéristiques du moteur

Chapitre 03

COMMANDE DES MOTEURS PIEZOELECTRIQUES PAR RESEAU DENEURONE

3.1. Introduction :

L'exploitation des moteurs ultrasoniques, exige une bonne précision sur la position et la vitesse, différentes méthodes de commande sont possibles (adaptative, logique floue, neuronale, variation de tension) , dans ce chapitre ,nous avons choisi la commande par réseau de neurone dans le but d'obtenir un algorithme qui réalise le meilleur compromis entre performance, robustesse et facilité d'implémentation.

3.2. Historique :

Les réseaux de neurones artificiels ont été construits au départ sur le modèle du cerveau humain. Les premiers travaux ont été écrits en 1943 où W.Mcculloch et Pitts introduisent les réseaux de neurones et donnent ainsi naissance au connexionnisme. Puis, en 1957, Rasemblatt présente le premier modèle opérationnel le réseau de neurone, le perceptron inspiré du système visuel et capable d'apprendre à calculer certaines fonctions logiques en modifiant ses connexions synaptiques. Déjà, en 1949 Hebb parle de cette propriété de plasticité synoptique en proposant une explication à l'apprentissage [12].

Cependant, dans les années 60, les réseaux de neurones tombent dans l'oubli par un Désintéressement des chercheurs et les investisseurs. Ce n'est que depuis les années 80 que l'on assiste au renouveau des réseaux de neurones grâce à des chercheurs comme Hopfield qui en 1982 a montré l'analogie des réseaux de neurones avec certains systèmes physiques et a permis de leur appliquer un formalisme mieux maîtrisé. Depuis, les recherches et les applications ont progressé [12].

3.3. Le neurone biologique :

Le neurone (cellule nerveuse) est une cellule différenciée et biologiquement spécialisée dans le traitement et la transmission de l'information. Voici schématiquement un neurone biologique

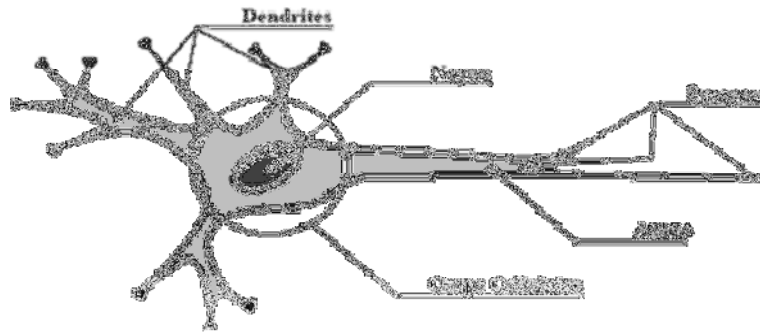


Figure 3.1Le neurone biologique

3.4. Communication entre neurones :

Un neurone stimulé envoie des impulsions électriques ou potentielles d'action, à autres Neurones. Ces impulsions se propagent le long de l'axone unique de la cellule.

Au point de contact entre neurones, les synapses, ces impulsions des excitations atteint un certain seuil, le neurone engendre un potentiel d'action, d'une amplitude d'environ 100 ms et pendant une Durée de 1 ms.

Le neurone émettant le signal est appelé neurone-près synaptique et celui recevant ce signal, neurone post-synaptique [14].

3.5. Le neurone Artificiel :

Chaque neurone artificiel est un processeur élémentaire. Il reçoit un nombre variable d'entrées en provenance de neurones amont. A chacune de ces entrées est associé un poids w représentatif de la force de la connexion. Chaque processeur élémentaire est doté d'une sortie unique, qui se ramifie ensuite pour alimenter un nombre variable de neurones avals. A chaque connexion est associé un poids (Figure 3.2).

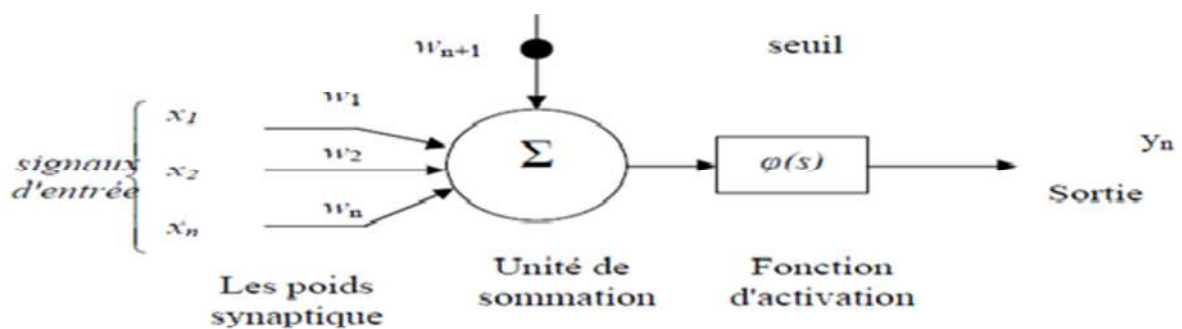


Figure 3.2Le modèle de neurone formel

3.6. Analogie entre le neurone biologique et le neurone formel :

On pourra résumer la modélisation précédente (Figure 3.2) par le Tableau 3.1, qui nous permettra de voir clairement la transition entre le neurone biologique et le neurone formel.

Tableau 3.1 analogie entre le neurone biologique et le neurone formel

Neurone biologique	Neurone artificiel
Synapses	Poids de connexions
Axones	Signal de sortie
Dendrite	Signal d'entrée
Somma	Fonction d'activation

3.6.1. Entrées :

Elles peuvent être :

Booléennes. Binaires (0, 1) ou bipolaires (-1, 1). Réelles

3.6.2. Fonction d'activation

Les fonctions d'activations représentent généralement certaines formes de non Linéarité. Elle a pour rôle de borner l'activité du neurone. Le premier modèle proposé est la fonction seuil qui est une fonction binaire, d'autres fonctions ont été mises au point. Parmi lesquelles on retrouve la sigmoïde, la tangente hyperbolique ou la log-sigmoïde

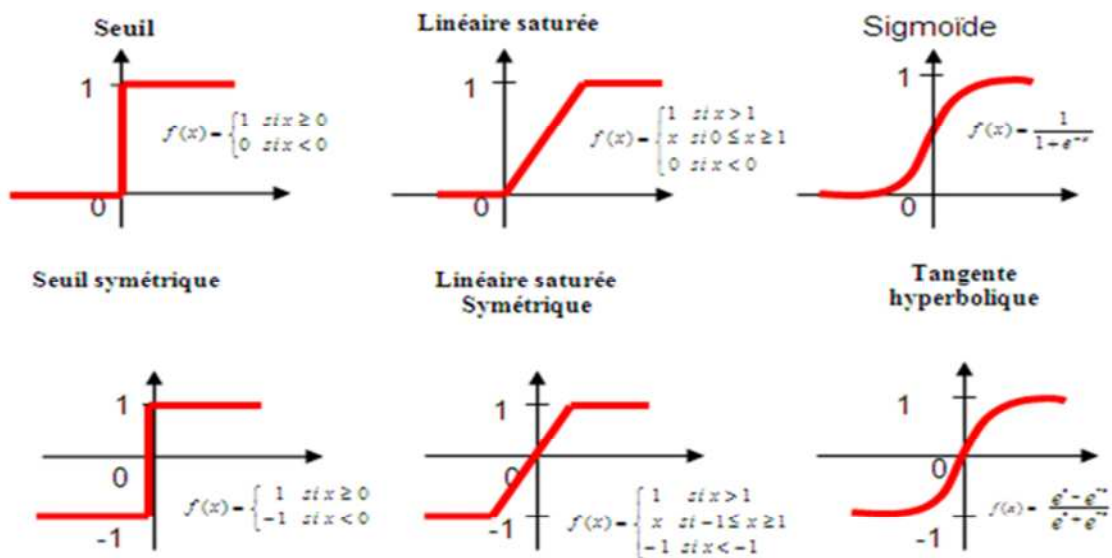


Figure 3.3 Différentes fonctions d'activation

3.6.3. Fonction de sortie :

Elle calcule la sortie d'un neurone en fonction de son état d'activation. En général, cette fonction est considérée comme la fonction identité.

Elle peut être :

Binaire (0, 1) ou bipolaire (-1, 1) , Réelle

3.7. Réseaux de Neurones Artificiels :

3.7.1. Définition :

Un réseau de neurone est un ensemble d'éléments de traitement de l'information, avec une topologie spécifique d'interconnexions entre ces éléments.

3.7.2. Propriétés des réseaux de neurones :

Les réseaux de neurone comporte de multiples avantages ce qu'explique leur utilisation à grande échelle dans le domaine de l'intelligence artificielle essentiellement en tant qu'approximateurs. D'entre les avantages des réseaux de neurones on peut citer : un réseau de neurones possède les propriétés suivantes :

3.7.2.1. Le Parallélisme :

C'est la base sur laquelle repose l'idée de construire de tels réseaux, où les entités élémentaires travaillent en même temps (simultanément).

3.7.2.2. La mémoire distribuée :

Ces réseaux sont caractérisés par le fait qu'il stocke l'information en petites quantités dans différents emplacements pour ensuite rassembler l'information pour une utilisation bien plus importante.

3.7.2.3. La Structure de connexion :

Les connexions entre les neurones qui composent le réseau décrivent la "topologie" du modèle. Elles sont très variées, le nombre de connexions étant énorme. Cette topologie fait apparaître une certaine régularité de l'arrangement des neurones.

3.7.2.4. La résistance aux pannes :

Un résultat immédiat découle de la caractéristique précédente qui permet de distinguer le comportement d'un tel réseau parmi d'autre dans un environnement où la panne est susceptible de se produire. En effet la défaillance d'une partie d'un tel réseau ne nuit en aucun cas à son bon fonctionnement car la collection de l'information presque complètement et efficacement.

3.7.2.5. La généralisation :

C'est la capacité du réseau et l'aptitude de donner une réponse à une entrée qui ne fait pas partie des exemples appris.

3.7.2.6. La capacité d'adaptation :

C'est la capacité d'apprentissage qui permet au réseau de compter des nouvelles contraintes ou des nouvelles données de l'environnement. De plus, il se caractérise par sa capacité d'auto organisation qui assure sa stabilité en tant que système dynamique.

3.7.3. Topologie des réseaux de neurones :

3.7.3.1. Les réseaux de neurones statiques (Non Boucles):

L'information dans ces réseaux circule directement de l'entrée vers la sortie sans bouclage, on utilise une structure à couche telle que les neurones qui appartiennent à une même couche ne soient pas connectés entre eux ... chacune des couches recevant des signaux de la couche précédente et transmettant le résultat de ces traitements à la couche suivante. La première couche reçoit les entrées, la dernière couche fournit le résultat des traitements et les couches intermédiaires sont appelées couches cachées, leur nombre est variable voire Figure 3.4.[15]

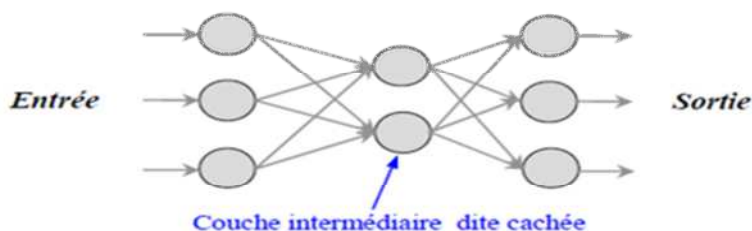


Figure 3.4Forme d'un réseau de neurones statique

3.7.3.2. LES Réseaux de neurones dynamiques (Boucles):

Ces réseaux, appelés aussi réseaux récurrents, sont organisés de telle sorte que chaque neurone reçoit sur ses entrées une partie ou la totalité de l'état du réseau (sortie des autres neurones) en plus des informations externes. (Contiennent le retour d'information) Pour les réseaux récurrents l'influence entre les neurones s'exerce dans les deux sens. L'état global du réseau dépend aussi de ses états précédents. ils représentent donc une évolution dépendante du temps. Un exemple de réseaux dynamiques est donné par la Figure3.5 [16].

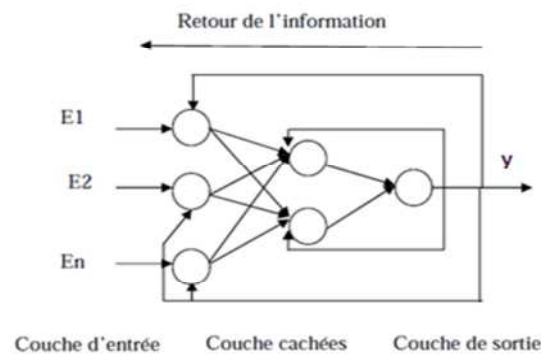


Figure 3.5Forme d'un réseau dynamique

Remarque :

Dans un réseau de neurones non bouclé, le temps ne joue aucun rôle fonctionnel : si les entrées sont constantes, les sorties le sont également. Le temps nécessaire pour le calcul de la fonction réalisée par chaque neurone est négligeable.

3.7.4. Perceptron Multicouche

C'est une nouvelle architecture. En s'inspirant du perceptron monocouche une architecture plus complexe englobant plusieurs neurones a été mise au point.

L'apparition de cette architecture a permis de résoudre les problèmes de classification non linéaire du perceptron. La régression non linéaire, la reconnaissance de la parole et bien d'autres applications du perceptron et de dépasser les limites principales de celui-ci.

L'idée principale est de grouper des neurones dans une couche. En plaçant ensuite bout à bout plusieurs couches et en connectant complètement les neurones de deux couches Adjacentes.

Les entrées des neurones de la deuxième couche sont donc en fait les sorties des neurones de la première couche. Ce passage par ces couches contribue à la richesse du traitement de l'information à l'intérieur du réseau afin d'obtenir le résultat désiré en sortie.

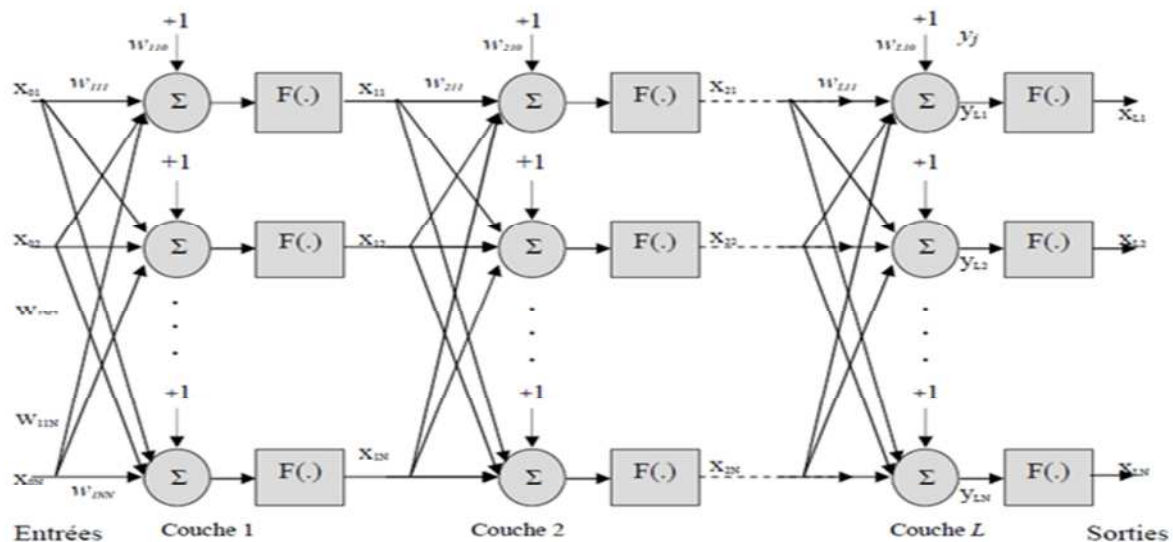


Figure 3.6 Architecture du réseau multicouche

3.7.5. L'apprentissage des réseaux de neurones :

On appelle « apprentissage » des réseaux de neurones la procédure qui consiste à estimer les paramètres des neurones du réseau, afin que celui-ci remplisse au mieux la tâche qui lui est affectée. L'apprentissage d'un réseau de neurone peut être considéré comme une action de la mise à jour de ses poids des connexions synaptiques, afin de résoudre le problème demandé. L'apprentissage est la caractéristique principale des réseaux de neurones et il peut se faire de différentes manières et selon différentes règles.

On peut distinguer trois types d'apprentissage : l'apprentissage supervisé, l'apprentissage non-supervisé et Renforcé : [17]

3.7.5.1. Apprentissage supervisé :

Dans ce type d'apprentissage, on attribue au réseau une entrée et la sortie désirée correspondante, (les combinaisons d'entrées-sorties désirées sont connues) les coefficients synaptiques sont alors ajustés dans le but de minimiser un critère de coût. Une fois l'apprentissage est effectué, le réseau est apte à accomplir la tâche prévue. Les performances du réseau sont évaluées à l'aide d'un ensemble d'exemples (de même nature que l'ensemble d'apprentissage ou d'entraînement) dit ensemble de test. La méthode la plus utilisée pour ce type d'apprentissage est la **rétro propagation**.

3.7.5.2. Apprentissage non supervisé :

Dans ce type d'apprentissage l'adaptation des coefficients synaptiques n'est pas basée sur la comparaison avec une certaine sortie désirée, (Ce type d'apprentissage est choisi lorsqu'il n'y pas de connaissances à priori des sorties désirées pour des entrées données), mais c'est le réseau qui

organise lui-même les entrées qui lui sont présentées de façon à optimiser une certaine fonction de coût, sans lui fournir d'autres éléments de réponses désirées. Cette propriété est dite **Auto organisation** (self organisation).

3.7.5.3. Renforcé :

Ce mode suppose qu'un comportement de référence n'est pas disponible. Mais en revanche, il est possible d'obtenir des indications qualitatives (exemple : correct / incorrect), sur les performances du réseau.

3.7.6. Règles d'apprentissage :

Les stratégies de modification des poids synaptiques sont dérivées des règles générales suivantes :

3.7.6.1. Règle de correction d'erreur (règle de WIDROW HOFF) :

ou le poids synaptique est adapté pour obtenir la diminution de l'erreur entre la sortie réelle du processeur élémentaire et la sortie désirée jusqu'à ce que la sortie réelle soit égale à la sortie désirée.

3.7.6.2. Règle de Boltzmann :

Les réseaux de Boltzmann sont des réseaux symétriques récurrents. Ils possèdent deux sous-groupes de cellules, le premier étant relié (cellules dites visibles) et le second ne l'étant pas (cellules dites cachées). Cette règle d'apprentissage stochastique consiste à ajuster les poids des connexions, de telle sorte que l'état des cellules visibles satisfasse une distribution probabiliste souhaitée.

3.7.6.3. Règle de Hebb :

Règle de Hebb ou le poids des connexions entre deux processeurs élémentaires est renforcé, si les deux processeurs élémentaires (neurones) sont activés simultanément (de façon synchrone et répétée) ; la force de connexion synaptique va aller croissant. Il est à noter ici que si l'apprentissage est localisé, c.-à-d. que la modification d'un poids synaptique w_{ij} ne dépend que de l'activation d'un neurone i et d'un autre neurone j .

3.7.6.4. Règle d'apprentissage par compétitions :

L'apprentissage ne concerne qu'un seul neurone. Le principe de cet apprentissage est de regrouper les données en catégories. Les patrons similaires vont donc être rangés dans une même classe, en se basant sur les corrélations des données, et seront représentées par un seul neurone. Dans un réseau à compétition simple, chaque neurone de sortie est connecté aux neurones de la couche d'entrée, aux autres cellules de la couche de sortie et elle-même. La sortie va donc dépendre de la compétition entre les connexions inhibitrices et excitatrices.

3.7.7. La règle de rétro-propagation :

La règle inventée par Rumelhart, Hinton et Williams en 1986. Elle est actuellement l'outil le plus utilisé dans le domaine des réseaux de neurones.

L'objectif de la méthode de rétro-propagation est d'adapter les poids de la couche d'entrée à la couche cachée de façon à minimiser la valeur moyenne de l'erreur sur l'ensemble d'entraînement. L'erreur se rétro-propage à travers les couches du réseau, elle peut être appliquée à n'importe quel système composé de plusieurs sous systèmes élémentaires qui peuvent être représentés par des fonctions connues, continues et dérivables. Fig.3.7. [18]

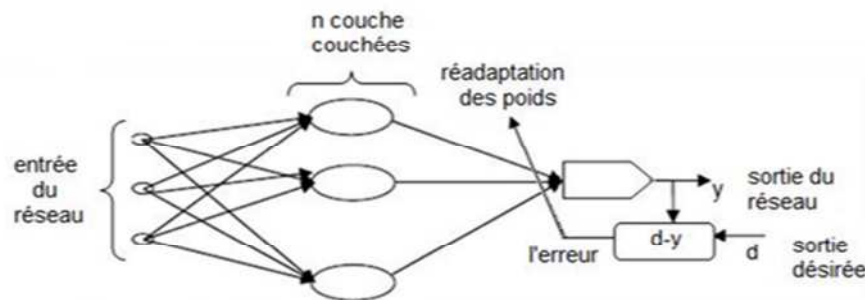


Figure 3.7 Principe de l'entraînement du réseau par rétro-propagation de l'erreur

3.8. Domaine d'application des réseaux de neurones :

Les propriétés d'apprentissage et d'approximation des réseaux de neurones, ont permis une importante application de ces derniers dans les différents domaines pratiques, notamment les domaines suivants:

3.8.1. Classification des signaux:

Le classement des signaux dans des catégories différentes en fonction des caractéristiques de forme. (Amplitude, fréquences, phase) etc. peut être réalisé aisément par l'utilisation d'un réseau de neurone.

3.8.2. Identification des processus:

Identifier un processus, c'est d'essayer de donner un modèle plus proche ou processus réelle qui permet de reproduire avec la précision voulue, la sortie en fonction des entrées du processus, c'est typiquement un problème d'approximation qui peut être résolu un réseau de neurone.

3.8.3. CONTROLE DE SYSTEME:

Contrôler un système, c'est donné un ensemble d'entrées adéquates qui permettant d'avoir la sortie désiré (position, vitesse, etc..) et comme étant la fonction liant la sortie du système avec l'ensemble de commande est non linéaire, cette fonction peut être approché avantageusement par réseau de neurone.

3.8.4. Problèmes de diagnostic :

Les réseaux de neurones sont bien adaptés à la résolution des problèmes de diagnostic, utilisant la classification automatique des signaux et des formes. Dans ce contexte, on distingue plusieurs applications des réseaux de neurones pour le diagnostic des défaillances et en particulier, pour le diagnostic des pannes des machines électriques.

Vision, parole.

Prévision et modélisation.

Aide à la décision.

Robotique.

Ces quelques domaines possèdent pratiquement toutes les caractéristiques exposées précédemment, c'est pourquoi ils constituent le cœur des applications des réseaux de neurones.

Il ne faut cependant pas oublier le rôle que peuvent jouer les réseaux de neurones formels dans l'étude du cerveau en tant qu'instrument de simulation.

3.9. Choix de la grandeur de commande :

En général la vitesse de moteur peut être contrôlée en agissant sur l'amplitude, la fréquence et le déphasage, la caractéristique de vitesse en fonction de ces paramètres exhibe de fortes non-linéarités. Il est donc difficile d'évaluer a priori le paramètre, ou la combinaison des paramètres, le moteur peut alors fonctionner à la fréquence de résonance permettant d'une part d'obtenir l'excursion de vitesse maximale et d'autre part de travailler avec le meilleur rendement possible.

La fréquence de résonance est un paramètre fondamental dans les moteurs piézoélectriques. Une variation de celle-ci, provoquée par une augmentation de la température, peut induire des dérives de la caractéristique vitesse -fréquence qui ne sont pas négligeables, d'après les recherches qui ont été élaborées concernant ce type des moteurs on a trouvé que la comparaison entre les trois grandeurs a été effectuée grâce à l'analyse du comportement du moteur en fonction de ces trois paramètres de commande; et ce qui montre clairement que la commande par fréquence est la plus performante et utile.

3.10. Commande de processus :

L'utilisation des réseaux de neurones pour la commande de processus non linéaires découle naturellement des aptitudes de ces derniers à la modélisation. Il s'agit essentiellement d'une extension non linéaire de la commande optimale avec coût quadratique sur un horizon infini [12]

Considérons en effet une structure de commande représentée sur la Figure 3.8

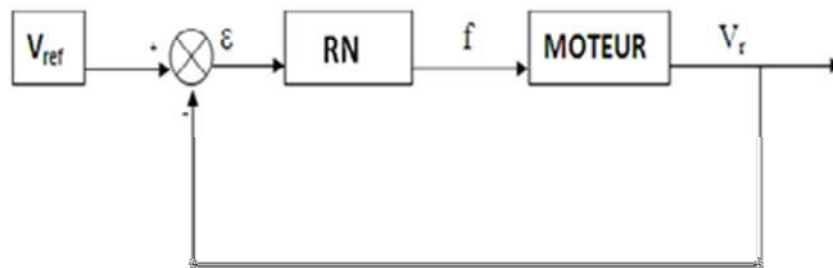


Figure 3.8 Schéma fonctionnel de la commande

Après une comparaison des deux vitesses V_{ref} et V_r on calcule l'erreur, comme une entrée de réseau de neurone. La sortie du contrôleur neuronale est considérée comme la fréquence de vibration de céramique piézoélectrique f .

Le modèle proposé a été employé en suivant la procédure :

- fixer le nombre de couches cachées : mis à part les couches d'entrée et de sortie. L'analyste doit décider le nombre de couches intermédiaires ou cachées.
- déterminer le nombre de neurones par couches cachées : chaque neurone supplémentaire permet de prendre en compte des profils spécifiques des neurones d'entrée.
- choisir la fonction d'activation : le passage de cette dernière à la couche de sortie sera soit linéaire, soit sigmoïde (logistique) selon les types de variables.
- choisir l'apprentissage : l'apprentissage nécessite la détermination du paramètre d'ajustement des poids synaptiques à chaque itération en utilisant la rétro-propagation du gradient.

3.1. Conclusion :

Nous avons présenté dans ce chapitre, les notions principales relatives aux réseaux de neurones. Nous avons donné quelques définitions et notions de bases : architecture, principe de fonctionnement , apprentissage et leurs applications.

Les RNA peuvent fournir une solution intéressante pour la modélisation et la commande des systèmes non linéaires grâce à leurs capacités de mémorisation, d'apprentissage et de généralisation, propriétés d'approximations universelles, d'adaptation et le parallélisme du calcul.

Chapitre 04

RESULTATS DE SIMULATION

4.1. Introduction :

Nous simulons dans ce chapitre, le modèle analytique du moteur piézoélectrique à onde progressive sous l'environnement MATLAB/SIMULINK version 7.1. Nous introduisons le régulateur neuronal pour commander la vitesse de rotor à base de la fréquence d'alimentation du moteur.

4.2. Résultats de simulation :

Les paramètres du moteur Daimler-Benz (AMW90 – X), qui ont été utilisés pour simuler le modèle analytique exposé dans le chapitre 3. La fréquence de résonance du système mécanique équivalent simulé a été trouvée égale à 46,65 kHz. Elle est très proche de la fréquence d'antirésonance du système simulé dans la littérature. L'amplitude des tensions d'excitation est de 570 Volts. Les deux ondes sont orthogonales.

4.2.1. Fonctionnement à vide :

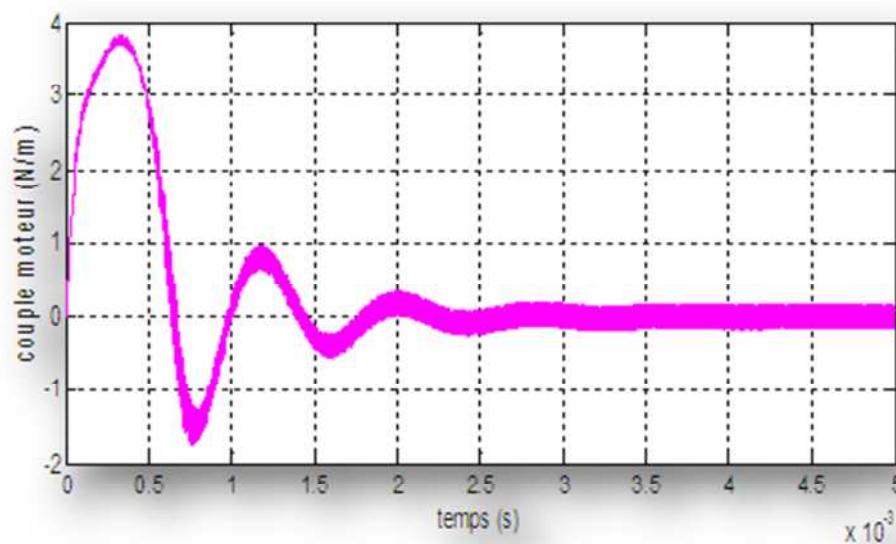


Figure 4.1 couple moteur à vide

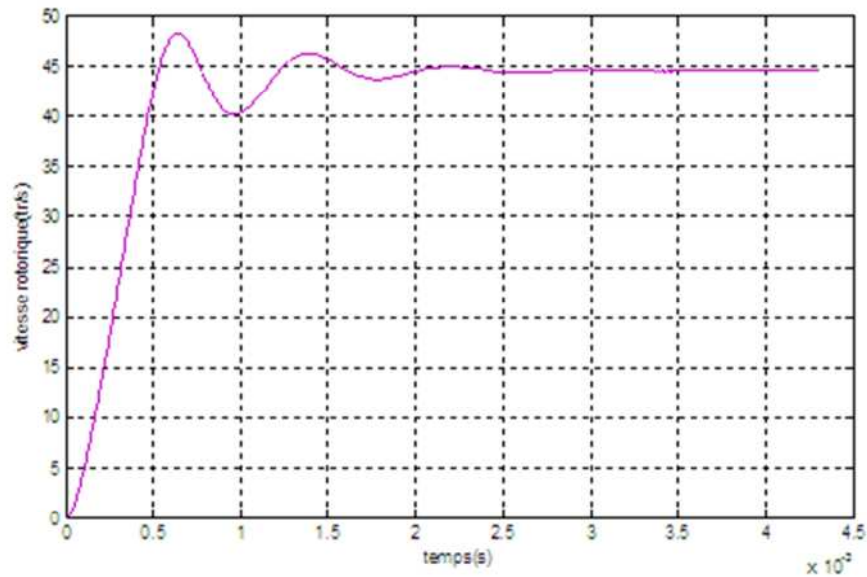


Figure 4.2la vitesse rotorique

Au démarrage du moteur le stator doit être fourni un grand couple, et après tend vers zéro à l'état permanent, et on remarque que la vitesse rotorique augmente de sa valeur initiale nulle jusqu'à une valeur constante.

4.2.2. Fonctionnement en charge :

On peut utiliser différentes charges et contrôler le couple et la vitesse .Ce test permet de donner des mentions et des estimations à propos de l'influence de la charge sur les performances des moteurs dans le régime transitoire et le régime permanent.

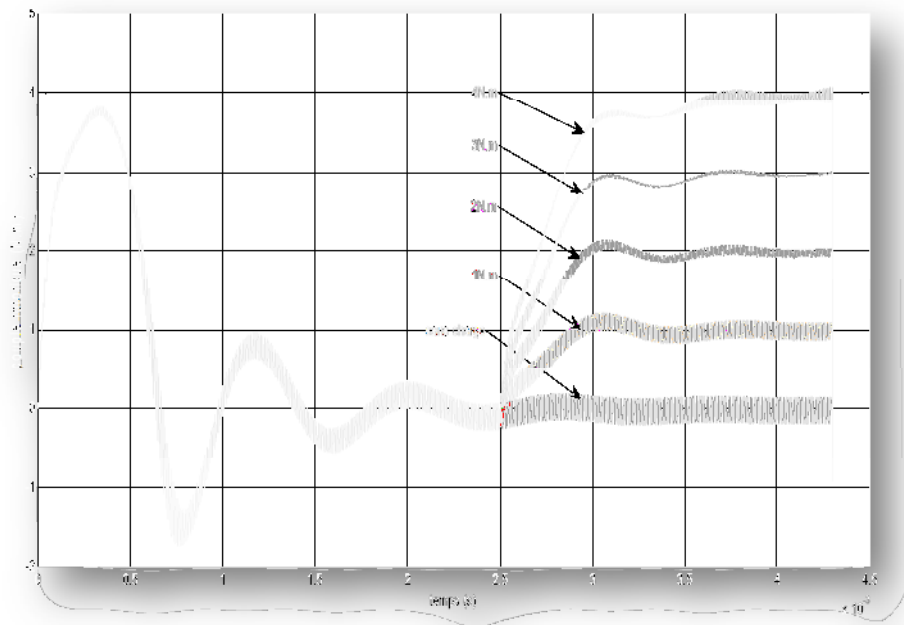


Figure 4.3 Couple moteur avec différentes charges

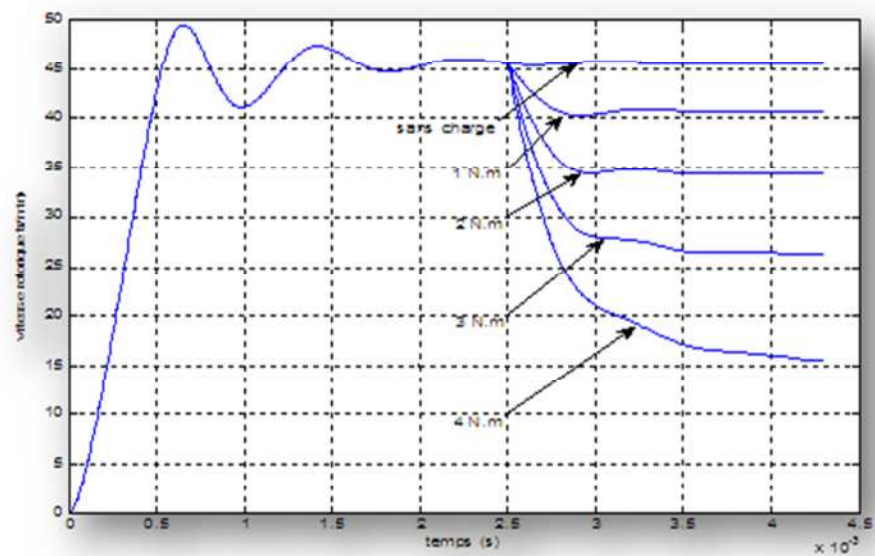


Figure 4.4 vitesse du moteur avec différentes charges

On fonctionnement sans charge le stator fournit un grand couple, et puis tend vers zéro, mais si on applique une charge le couple augmente à chaque valeur de la charge appliqué, on remarque que la vitesse diminue si la charge augmente.

4.3. Commande par fréquence :

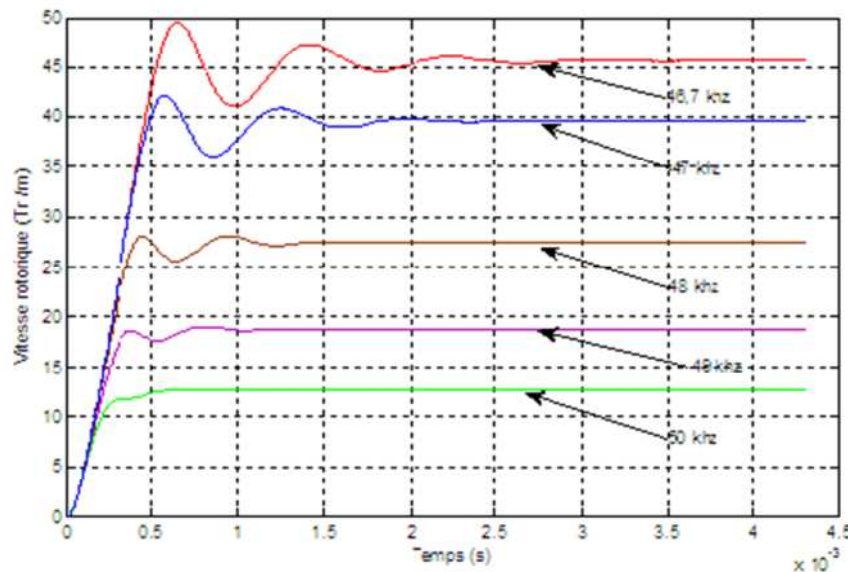


Figure 4.5 la vitesse rotorique d'un moteur avec différentes valeurs de fréquences

La variation de fréquence donne une variation de la vitesse rotorique, si on augmente la valeur de fréquence la vitesse diminue et le contraire, cela est dû à l'augmentation de la zone de contact, donc le frottement entre le stator et le rotor plus important et frein le rotor.

4.4. Choix du réseau de neurone appliqué :

On a fait plusieurs essais pour obtenir l'architecture qui simule le fonctionnement de l'moteur, parce qu'il n'existe pas de méthodes permettant de trouver une architecture appropriée. Ces expériences prennent beaucoup de temps, tel que le choix du nombre de couches cachées et le nombre de neurones par couches ou de choisir des valeurs initiales satisfaisantes pour les poids, et des valeurs convenables pour les paramètres d'apprentissage.

Dans Matlab pour créer un réseau de « feed-forward » ; nous avons utilisé l'instruction « newff ».

Le type d'apprentissage qu'on a utilisé, c'est l'apprentissage de rétropropagation du gradient .

La fonction qui fait l'apprentissage appelée « train » cet fonction appliquée le même type qui donnée dans la première.

4.5. Résultat de la commande par réseau de neurone :

On a ajusté la consigne de vitesse par la valeur 46.4 tr/min, on a intégré le contrôleur neuronale pour commander la vitesse de rotor à partir de la fréquence d'entrée du moteur (fréquence d'alimentation).

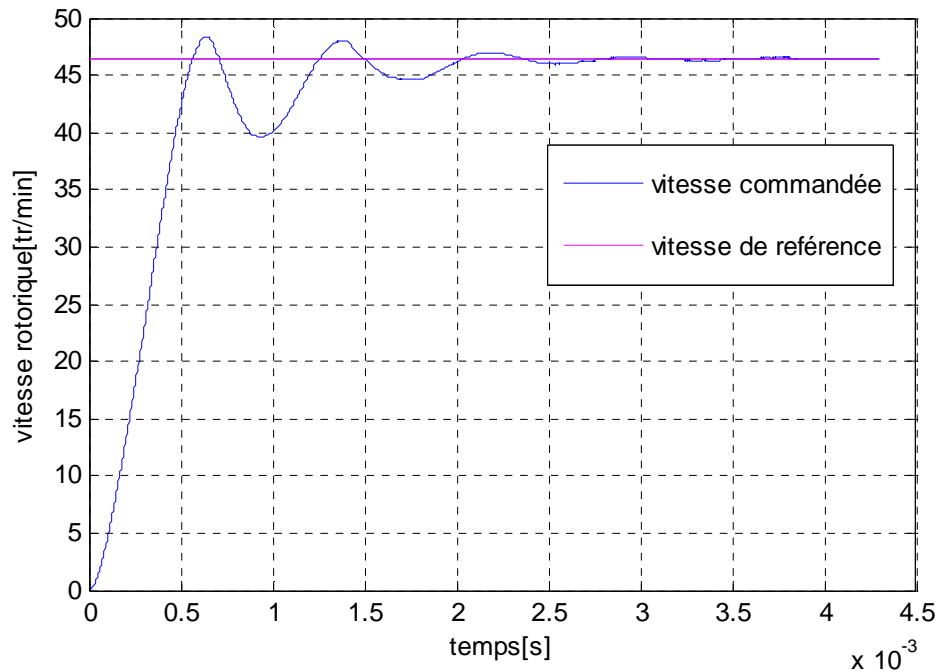


Figure 4.6 Vitesse rotorique commandée par réseau de neurone

A partir des résultats obtenus ci-dessus on a visualisé que :

Dans le modèle sans commande on a utilisé la fréquence de 46.65 KHz qui nous a donné des résultats de simulation proche de l'expérimentale, après la commande on a trouvé que la fréquence a été ajustée vers la valeur 46.75 KHz qui est très proche de celle-ci de simulation.

La vitesse V_{rot} du rotor atteint la vitesse $V_{réf}$ sans dépassement et l'erreur statique est nulle à l'instant $t = 2.3$ ms (commande par réseau de neurone).

4.6. Conclusion :

Après la simulation du modèle de moteur piézoélectrique à onde progressive type Daimler-Benz, on a introduit le régulateur neuronale pour commander la vitesse à base de la fréquence. La fréquence de bon fonctionnement du moteur a été déterminé.

CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES

Notre étude s'articule principalement sur la modélisation et la commande du moteur piézoélectrique à onde progressive et plus particulièrement du moteur *Daimler-Benz(AMW90- X)*.

A cause du principe de fonctionnement, basé sur des vibrations à haute fréquence et aux phénomènes tribologiques agissant au niveau de l'interface de contact entre le stator et le rotor, la recherche d'un modèle analytique efficace s'avère être une tâche très complexe à réaliser. Donc beaucoup d'expérience et demeure peu pratique pour l'exploitation du modèle dans la conception d'algorithmes de commande optimaux. Ils requièrent néanmoins des moyens matériels importants et nécessitent des temps de calcul non négligeables.

Dans cette optique, nous avons développé dans ce mémoire un modèle analytique qui permet de réaliser un bon compromis entre son degré de complexité et sa fidélité à la réalité.

La vitesse de rotation du moteur piézoélectrique à onde progressive. Peut, de manière générale, être imposée en agissant soit sur l'amplitude, la fréquence ou le déphasage temporel des deux tensions d'alimentation.

Selon la littérature, l'analyse des méthodes de commandes existantes nous a permis d'identifier la fréquence comme étant le paramètre de commande le plus efficace.

D'après l'intégration de la technique de réseau de neurone pour contrôler et commander la vitesse de rotor en fonction de la fréquence d'alimentation, on a trouvé que la fréquence de vibration des céramiques piézoélectriques qui constituent la partie la plus essentielle dans les moteurs piézoélectrique a été ajusté vers la fréquence de simulation du modèle analytique développé sans commande.

En perspectives, il sera fort intéressant :

- Etudier et améliorer la robustesse de réseau de neurone dans le cadre de commande des moteurs piézoélectriques
- .
- Introduire les réseaux de neurone pour commander le moteur par l'amplitude ou le déphasage entre les deux tensions d'alimentation.

Annexe A-

Tableau 4.1 Tableau des paramètres du moteur Daimler-Benz (AMW90-X)

Nom	Symbole et valeur	Grandeur
Résistances d'entrées	$R_{p1} = 5$ $R_{p2} = 5$	[Ω]
Capacité de céramique	$C_{p1} = 7.8 \cdot 10^{-9}$ $C_{p2} = 7.87 \cdot 10^{-9}$	[F]
Capacité de stator	$C_{ps1} = 0.421 \cdot 10^{-9}$ $C_{ps2} = 0.428 \cdot 10^{-9}$	[F]
Inertie de Rotor	$J_R = 3.4367 \cdot 10^{-004}$	[Kg m^2]
Rayon	$R_w = 40.5 \cdot 10^{-3}$	[m]
La masse efficace	$m_{eff} = 40.5$	[Kg]
La masse de Rotor	$m_R = (m_{eff} + 22.8 + 3) \cdot 10^{-3}$	[Kg]
La rigidité de Rotor	$c_R = 300 \cdot 10^3$	[N/m]
Atténuation de Rotor	$d_R = 50 \cdot 10^3$	[Ns/m]
Coefficient de frottement de coulomb	$\mu = 0.21$	
La distance entre les points de surface de stator et le neutre	$a = 4.5 \cdot 10^{-3}$	[m]
Nombre de crête d'onde	$n = 11$	
Fréquence de Résonance	$W_{res2} = W_{res1}$ $w_{res1} = 2 \cdot \pi \cdot 46.65 \cdot 10^3$	[Hz]
Longueur d'onde	$\lambda = 2 \cdot \pi \cdot R_w / n$	[m]
Nombre d'onde	$k = 2 \cdot \pi / \lambda$	
La rigidité de la zone de contact	$c_N = 8500 \cdot 10^6$	[N/m 2]
Fréquence d'Antirésonance	$W_{ant2} = W_{ant1}$ $w_{ant1} = 2 \cdot \pi \cdot 43.425 \cdot 10^3$	[Hz]

La masse modale de Stator	$m=0.082$	[Kg]
Rapport de transfert	$A1=(m \cdot C_{p1} \cdot (w_{ant1}^2 - w_{res1}^2))^{1/2}$ $A2=(m \cdot C_{p2} \cdot (w_{ant2}^2 - w_{res2}^2))^{1/2}$	$[(kgFs^{-2})^{1/2}]$
Rigidité du stator	$c_{S1}=(w_{res1})^2 \cdot m$ $c_{S2}=(w_{res2})^2 \cdot m$	[N/m]
Facteur de perturbation	$\varepsilon_1 = \varepsilon_2$ $\varepsilon_1 = 0.02$	
Facteurs d'amortissement	$d_{S2}=d_{S1}$ $d_{S1}=10$	[Ns/m]

Références Bibliographiques

- [1] MATTEO. B. « MODELISATION ET COMMANDE DU MOTEUR PIEZOELECTRIQUE A ONDE PROGRESSIVE » THESE DE DOCTORAT, ECOLE POLYTECHNIQUE FEDERALE DE LAUSANNE EPFL 2005
- [2] GILLE ROBERT « LES CERAMIQUES POUR LES CAPTEURS ET LES ACTIONNEURS» LABORATOIRE DES CERAMIQUES DEPARTEMENT DE MATERIAUX EPFL
- [3] WOJCIECH SZLABOWICZ « CONTRIBUTION AU DIMENSIONNEMENT ET A LA REALISATION D’ACTIONNEUR PIEZOELECTRIQUE A ROTATION DE MODE FORT COUPLE POUR APPLICATIONS AERONAUTIQUES» THESE PREPAREE AU LABORATOIRE D’ELECTROTECHNIQUE ET D’ELECTRONIQUE INDUSTRIELLE DE L’ENSEEIH TUNITE MIXTE DE RECHERCHE N° 5828 AU CNRS
- [4] FREDERIC GIRAUD «MODELISATION CAUSALE ET COMMANDE D’UN ACTIONNEUR PIEZOELECTRIQUE A ONDE PROGRESSIVE » THESE DOCTORAT DE L’UNIVERSITE DE LILLE2002
- [5] KEBABB. FZ « COMMANDE EN FREQUENCE OU PAR PHASE DES MOTEURS ULTRASONIQUES » MEMOIRE D’INGENIEUR D’ETAT UNIVERSITE FERHAT ABBAS SETIF 2009 /2010.
- [6] GREGOR KANDARE,JORG WALLASCHEK « DERIVATION AND VALIDATION OF A MATHEMATICAL, MODEL FOR TRAVELING WAVE ULTRASONIC MOTORS » SMART MATER, STRUCT 11(2002)565-574
- [7] F. THIELEMANS, PR. E. FILIPPI, “PIEZOELECTRIC MOTORS FOR AEROSPACE APPLICATION”. ABSTRACT, 7TH NATIONAL CONGRESS ON THEORETICAL AND APPLIED MECHANICS, 29-30 MAI, MONS, BELGIQUE, 2006.
- [8] HEINER STORCK, JORG WALLASCHEK « THE EFFECT OF TANGENTIAL ELASTICITY OF THE CONTACT LAYER BETWEEN STATOR AND ROTOR IN TRAVELING WAVE ULTRASONIC MOTORS» INTERNATIONAL JOURNAL OF NON-LINEAR MECHANICS 38(2003)143-159
- [9] MARC BUDINGER, JEAN-FRANÇOIS ROUCHON, BERTRAND NEARED « ANALYTICAL MODELING FOR THE DESIGN OF A PIEZOELECTRIC ROTATING –MODE MOTOR» TRANSACTION ON MECHATRONICS, VOL. 9,NO. 1, IEEE 2004
- [10] YANG MING, QUE PEIWEN «PERFORMANCE ESTIMATION OF A ROTARY TRAVELING WAVE ULTRASONIC MOTOR BASED ON TWO –DIMENSION ANALYTICAL MODEL» ULTRASONICS 39(2001)115-120
- [11] STORCK, W.LITTMANN,J.WALLASCHEK,M.MRACEK « THE EFFECT OF FRICTION REDUCTION IN PRESENCE OF ULTRASONIC VIBRATIONS AND ITS RELEVANCE TO TRAVELLING WAVE ULTRASONIC MOTORS» ULTRASONICS40(2003) 379-383
- [12] I. RIVALS, MODELISATION ET COMMANDE PAR RESEAUX DE NEURONES : APPLICATION AU PILOTAGE D’UN VEHICULE AUTONOME, THESE DE DOCTORAT DE L’UNIVERSITE PIERRE ET MARIE CURIE,1995.
- [13] Guillaume Beslon «Contrôle sensori-moteur par réseaux neuromimétiques modulaires -Approche pour le pilotage réactif en atelier flexible-», pour obtenir le grade de Docteur, 03/11/1995.
- [14] E. Davalo, P. Naïm, "Réseaux de Neurones", Deuxième Edition, Eyrolles, 1993.
- [15] E. Davalo et Naim « des réseaux de neurones », première édition 1989.
- [16] B.Mohamed «Identification et contrôle avec RN». Thèse de magister institue d’électronique Sétif1993.

- [17] Gilles Rostaing., “Diagnostic des défauts dans les entraînements électriques”, thèse de doctorat de l’institut national polytechnique de grenoble, 1997
- [18] R.Coulom "Apprentissage par Renforcement utilisant des Réseaux de Neurones avec des Applications au Contrôle Moteur", Thèse de Doctorat, Institut National Polytechniques de Grenoble, 19 juin 2002.

ملخص:

المحركات البيزوكهربائية تمثل اهتمام الصناعة من خلال خصائصها الجيدة جدا: قوة العزم المقاوم دون تغذية، العزم المرتفع عند سرعة صغيرة (التشغيل المباشر)، غياب الحقل المغناطيسي الضائع وإمكانية دمجها في السلم المليميتر مع النظام الإلكتروني التابع له، عدم إحداث صوت أثناء تشغيله.

فهي التي تميزها عن المحركات الكهرومغناطيسية التقليدية. لذلك بسبب جدتها وضع نماذج لها يلعب دورا أساسيا في تنميتها. في هذا العمل، قمنا بتطوير تقنية الشبكة العصبية للسيطرة على سرعة موجة الدوار للمحرك البيزوكهربائي. يتم عرض نتائج المحاكاة في SIMULINK / MATLAB وتفسيرها

كلمات مفتاحية: السيراميك البيزوكهربائية، الكهربائية الضغطية، محرك بيروكهربائي ذو موجة تقدمية، الشبكة العصبية

Résumé :

Les moteurs piézoélectrique représentent un intérêt certain pour l'industrie grâce à ces caractéristiques très spécifiques: Le fort couple de maintien sans alimentation, le couple élevé à petite vitesse (favorisant les entraînements directs), l'absence de champs magnétiques parasites, possibilité d'intégration à l'échelle millimétrique avec l'électronique associée et son fonctionnement silencieux, Qui le différencie des moteurs électromagnétiques classiques. Alors, à cause de sa nouveauté la modélisation joue un rôle fondamental dans leur développement.

Dans ce travail, nous avons développé la technique de réseau de neurone pour commander la vitesse du rotor du moteur piézoélectrique à onde progressive. Les résultats de simulation sous l'environnement MATLAB/SIMULINK sont présentés et interprétés.

Mots Clés : Céramique piézoélectrique, Piézoélectricité, moteur piézoélectrique à onde progressive, réseau de neurone.

Abstract:

Piezoelectric motors are of interest to the industry thanks to these very specific

Characteristics: high holding torque without supply, the high torque at low speed (supporting the direct drives), the absence of parasitic magnetic fields, possibility of integration on a millimeter length scale with associated electronics and its quiet operation. Which differentiate it from conventional electromagnetic motors. So, because of its novelty modeling plays a fundamental role in their development.

In this work, we developed the technique of neural network to control the speed of travelling wave piezoelectric motor. The simulation results in MATLAB / SIMULINK are presented and interpreted.

Key Words: Ceramic piezoelectric, Piezoelectricity, traveling wave piezoelectric motor, Neural Networks.