

Étude d'un actionneur piézoélectrique à onde progressive

C. Hénaux, J.F. Rouchon et B. Nogarede

Laboratoire d'Électrotechnique et d'Électronique Industrielle
INP-ENSEEIH
2 rue Camichel
F-31071 Toulouse, France

ETUDE D'UN ACTIONNEUR PIEZOELECTRIQUE A ONDE PROGRESSIVE

Carole HENAU, Jean-François ROUCHON, Bertrand NOGAREDE
Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique Industrielle
INP-ENSEEIH, 2 rue Camichel, 31071 Toulouse.
nom@leei.enseeiht.fr

Résumé :

Dans le domaine des actionneurs de dimension centimétrique à fort couple et basse vitesse, les moteurs piézoélectriques constituent aujourd'hui des produits aux fonctionnalités très attractives. Couple massique élevé, verrouillage naturel hors alimentation, discrétion acoustique, excellente dynamique, autant de points forts qui ont largement contribué au développement de ce type d'actionneurs dans des domaines très variés tels que la domotique, l'optique, l'aéronautique, le spatial voire le génie bio-médical. Il apparaît dans ce contexte, intéressant voire incontournable d'aborder dans le cycle de la formation GEA les principes de fonctionnement de ce type d'actionneur ainsi que la métrologie très appréciée qui lui est rattachée.

Mots clés : Actionneur piézoélectrique, onde progressive, vibromètre LASER, contact, structure résonante.

1 INTRODUCTION

L'objectif de ce TP consiste, d'une part, à appréhender le fonctionnement des actionneurs piézoélectriques à onde progressive par l'approche des caractéristiques couple/vitesse et des principales lois de fonctionnement qui lui sont propres et d'autre part à se familiariser avec une métrologie de pointe et de précision inhérente à l'étude des déformations micrométriques générées au sein d'une structure mécanique déformable.

1. PRESENTATION DE LA MAQUETTE

1.1. Présentation de l'ensemble du dispositif

Le banc d'essai se compose principalement d'un moteur piézoélectrique à onde progressive accouplé à un frein à poudre.

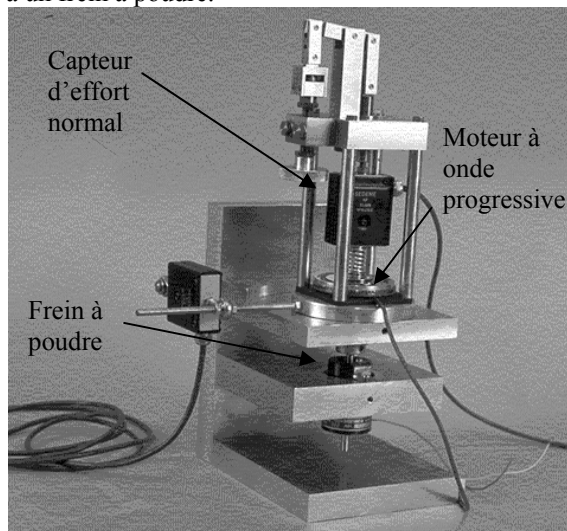


fig.1: Banc d'essais du moteur piézoélectrique

Le rotor de l'actionneur piézoélectrique est maintenu en contact avec le stator par l'intermédiaire d'un capteur à jauges de contrainte qui permet d'appliquer et de mesurer l'effort normal, alors que

le stator qui repose sur un roulement à billes est relié à un système de capteur de force permettant de mesurer la réaction du stator sur le rotor et donc indirectement le couple délivré par le moteur. L'alimentation du frein à poudre est accolée au banc d'essai alors que l'alimentation de l'actionneur piézoélectrique est intégrée dans un boîtier annexe.

2. RAPPELS THEORIQUES

2.1. Constitution et principe de fonctionnement d'un actionneur piézoélectrique à onde progressive

Rappelons que le principe général de fonctionnement d'un actionneur piézoélectrique à onde progressive repose sur l'exploitation d'une onde progressive de flexion générée au niveau d'un anneau élastique par des céramiques piézoélectriques alimentées sous haute tension. Cette structure mécanique bimorphe que constitue le stator est excitée au voisinage d'une de ses fréquences propres de résonance en vue d'obtenir des déformations relativement importantes (quelques μm). Sur le stator, par l'intermédiaire d'une couche de matériau polymère de friction on vient appliquer un disque d'appui en dural formant le rotor. Un ressort permet d'exercer un effort d'appui normal calibré et permanent entre le rotor et le stator. En terme de performances atteintes, ce type de structure de dimensions centimétriques est, par exemple, en mesure de développer un couple sur l'arbre de l'ordre de 0.7 Nm de l'arrêt à la vitesse nominale de 120 tr/mn.

Structurellement, le stator est constitué d'une plaque de bronze à l'arrière de laquelle est collé un anneau de céramiques PZT. Des dents sont implantées sur la piste de contact afin, d'une part, d'amplifier les vitesses d'entraînement et, d'autre part, de piéger les particules d'usure résultant de la rotation du moteur. Ce stator annulaire est fixé sur un bâti par

l'intermédiaire d'un voile de découplage. La surface du stator est revêtue d'une fine couche de polymère (polyester chargé en particules de lubrifiant solide de PTFE). Le disque rotor en duralumin possède une zone de contact sur la jante extérieure pour assurer une transmission optimale du mouvement.

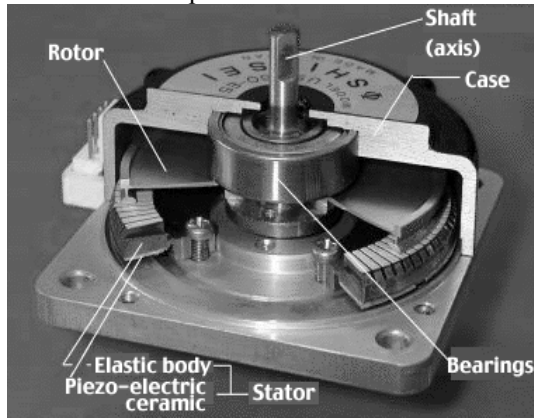


fig.2 : Vue en coupe du moteur USR 60 [1]

2.2. Génération d'une onde progressive

L'onde progressive statorique résulte de la superposition de deux vibrations stationnaires forcées créées par des éléments piézo-électriques excités à une même fréquence f , voisine d'une des fréquences de résonance du stator [2]. Considérant un anneau statorique correspondant au moteur étudié, ces ondes stationnaires résultent de la déformation générée par un ensemble de céramiques disposées en deux secteurs distincts et alimentées sous des tensions sinusoïdales déphasées tel que le montre la figure 3.

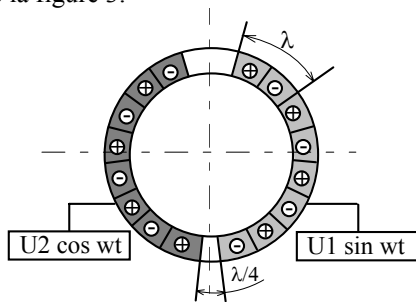


fig.3 : Sectorisation du transducteur piézo-électrique pour un rang de mode 9.

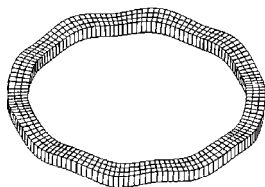


fig.4 : allure de la déformation élastique de la couronne statorique extérieure pour un rang de mode 9 utilisé pour un moteur USR 60

En faisant l'hypothèse simplificatrice que l'étude des déformations dans l'anneau statorique peut être ramenée dans un plan d'axe horizontal (Ox) et d'axe vertical (Oz), les céramiques piézoélectriques

affectées au secteur 1 provoque un déplacement de la forme : $u_{1N}(x,t) = A_n \cos(k_n x) \cos(\omega t)$ Tandis que les céramiques du secteur 2 alimentées en opposition de phase par rapport au secteur 1 provoque un déplacement de la forme :

$$u_{2N}(x,t) = A_n \cos(k_n x + \frac{\pi}{2}) \cos(\omega t)$$

La superposition de ces deux ondes crée l'onde progressive : $u_N(x,t) = A_n \sin(\omega t - k_n x)$

En supposant que l'amplitude A de la vibration est très petite devant la longueur d'onde, tout point matériel M de la surface du stator décrit une trajectoire elliptique donnée par l'équation suivante :

$$\left(\frac{u_T}{\Lambda A_n}\right)^2 + \left(\frac{u_N}{A_n}\right)^2 = 1 \quad \text{Avec } \Lambda = \frac{2\pi h}{\lambda} \text{ le facteur}$$

d'ellipse où h représente la hauteur entre la fibre neutre du stator et sa surface tel que le montre la figure 5. Dans le cas d'un moteur USR 60 $h = 4.3$ mm.

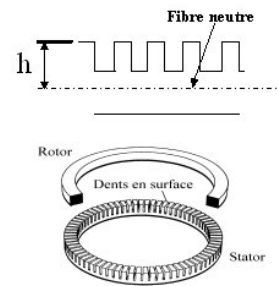


fig.5 : Représentation du paramètre géométrique h .

2.3. Cinématique d'interface

Considérons la déformation du stator suivant une onde de déformation progressive de type sinusoïdale : les points de la surface du stator décrivent des trajectoires elliptiques ou circulaires (voir figure 6) [2].

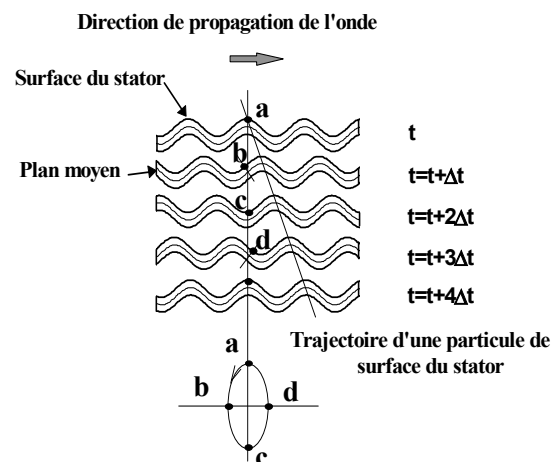


fig. 6 : Mécanisme de déformation hors plan du stator.

La vitesse d'entraînement tangentielle au sommet de l'ellipse qui est égale à la vitesse d'entraînement du rotor sous la condition d'un roulement sans glissement correspondant alors à un contact linéique tel que le montre la figure 7 s'écrit alors :

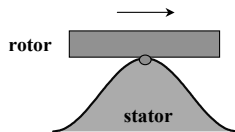
$$v_T = \max\left(\frac{du_T}{dt}\right) = -\Lambda A \omega$$


fig. 7 : Contact ponctuel rotor/stator

Un rotor maintenu en contact avec les crêtes de l'onde de déformation statorique sera donc entraîné en rotation par frottement et chaque particule de matière située à l'interface rotor/stator contribue alors à l'entraînement du rotor.

Dans le cas d'un contact surfacique, tel que le montre la figure 8 la vitesse de rotation moteur est donnée par :

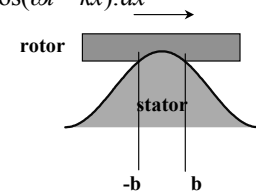
$$V_{moy} = \int_{-b}^b \Lambda \cdot A \cdot \omega \cdot \cos(\omega t - kx) \cdot dx$$


fig. 8 : Contact surfacique rotor/stator

Notons que cette relation montre la dépendance directe de la vitesse avec l'amplitude de déformation. Cette vitesse transmise au rotor dépend alors du taux de contact rotor/stator.

2.4. Interface rotor/stator

La transmission d'un couple à l'interface rotor/stator est assurée par les forces de frottement créées par la vitesse relative entre les points de la surface du stator et le rotor.

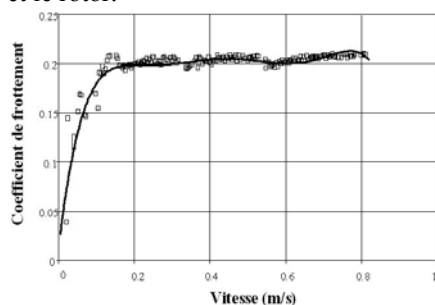


fig. 9 : Evolution du coefficient de frottement à l'interface rotor/stator en fonction de la vitesse de déplacement relative [3].

Le couple moteur généré dépend alors du coefficient de frottement, de la géométrie du moteur et de l'effort normal permettant de maintenir en contact rotor et stator.

Le coefficient de frottement, déterminé quant à lui expérimentalement sur tribomètre rotatif en contact bille/plan dépend de la vitesse particulière

interfaciale telle que le montre la courbe de la figure 9. En première approximation, le coefficient de frottement moyen sera pris égal à 0,21.

3 CARACTERISATION DU MOTEUR A ONDE PROGRESSIVE

La caractérisation de l'onde progressive statorique est réalisée en utilisant un vibromètre LASER présenté sur la figure 10.

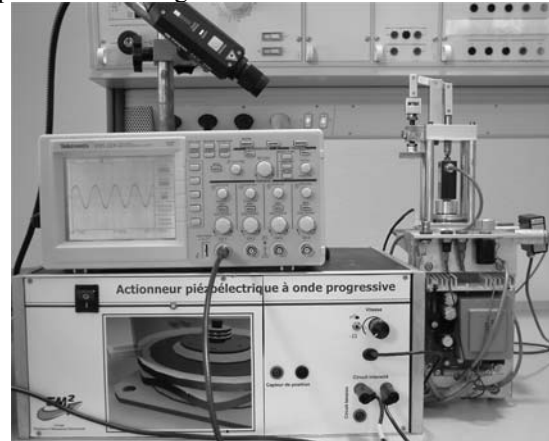


fig.10 : Système de mesure de la vitesse vibratoire par LASER.

3.1. Caractérisation de l'onde progressive

L'objectif de cette mesure est de fixer quelques ordres de grandeurs de paramètres tels que l'amplitude vibratoire, la longueur d'onde de la déformation statorique, la fréquence d'excitation ainsi que le rang du mode. Le moteur étant alimenté, il est demandé de mesurer la fréquence vibratoire de l'onde de déformation statorique grâce au vibromètre LASER en prenant une tension d'alimentation constante, un effort normal appliqué variable (160 et 200 N), et pour les deux valeurs extrêmes de la vitesse de rotation.

Effort (N)	Fréq. (kHz)		Amplitude (µm)	
	Vmaxi	Vmini	Vmaxi	Vmini
160	41.6	43.2	1.43	0.66
200	41.7	43.4	1.48	0.64

Tab.1 : Résultats donnat la fréquence et l'amplitude vibratoire pour deux efforts normaux et deux position de commande de vitesse

Ces résultats montrent qu'il est possible de considérer une vitesse vibratoire indépendante de l'effort normal appliqué. D'autre part, nous remarquons que le contrôle de la vitesse de rotation est assuré par le contrôle de la fréquence d'excitation du stator, et ce toujours au voisinage de la fréquence d'excitation correspondant au rang du mode considéré. Considérant une vitesse de propagation de l'onde progressive d'environ 800m/s, la longueur d'onde est égale à 19,2 mm. Le rang du mode du stator est alors déterminé en divisant la circonférence de la couronne statorique par la

longueur d'onde : le rang de mode est 9 pour un moteur de type USR 60.

3.2. Caractérisation des performances moteur à vide

3.2.1 Vitesse

Connaissant maintenant les différentes amplitudes vibratoires, il est intéressant de calculer la vitesse tangentielle maximale pouvant être transmise au rotor. Les résultats sont donnés dans le tableau suivant.

Effort (N)	Amp. (μm)	Vit. tang. Max. calculée (m/s)	Vit. mesurée (m/s)
160	1.43	0.525	0.393
200	1.48	0.543	0.404

Tab. 2 : Comparaison de la vitesse tangentielle maximale et la vitesse tangentielle effective.

Ces résultats montrent bien que la détermination de la vitesse de rotation théorique nécessite de connaître le taux de contact rotor/stator. En effet, la vitesse théorique calculée n'a pas de réalité physique puisque correspondant à un contact ponctuel hypothétique. Ces résultats montrent aussi que dans la gamme d'effort normaux comprise entre 160 N et 200 N, le taux de contact est très faiblement influencé par l'effort normal.

3.2.2 Couple

Pour les deux efforts normaux précédents, il est intéressant de calculer le couple de freinage C ou le couple bloqué. Le rayon moyen de la couronne statorique d'environ 57 mm ainsi que le coefficient de frottement moyen μ de 0,21 permettent leur calcul par une relation très simple $C = \mu \cdot F \cdot R_{\text{moy}}$. Le tableau 3 présente les résultats.

Effort (N)	Couple bloqué (N.m)
160	0.95
200	1.197

Tab.3 : Estimation du couple bloqué ou de freinage en fonction de l'effort normal.

3.3. Caractérisation des performances moteur en charge

Le moteur est alors utilisé en charge, le couple de charge étant assuré par un frein à poudre. Le couple de charge est augmenté jusqu'à l'arrêt du moteur, ceci permettant la détermination du couple bloqué du moteur. Les courbes couple/vitesse sont réalisées pour les deux efforts normaux (160 et 200 N). La puissance absorbée est mesurée conjointement. Le rendement de l'actionneur peut ainsi être calculé en fonction de la charge appliquée. Ces courbes expérimentales mettent en évidence certains points caractéristiques du fonctionnement d'un moteur piézoélectrique à onde progressive tel que le couple bloqué ou de freinage.

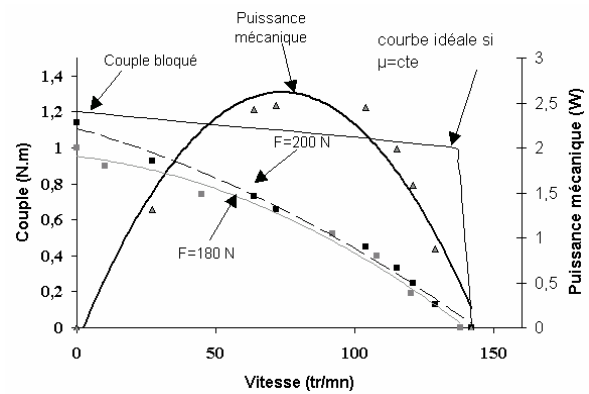


Fig. 11 : Courbe couple/vitesse et puissance mécanique fournie à effort normal constant.

En revanche, la description fine de la courbe couple/vitesse est plus difficile à appréhender dans le cadre d'un TP. Cet aspect est en outre relayé par un programme de simulation qui met clairement en évidence les contraintes à l'interface rotor/stator au travers de la prise en compte d'une loi de frottement associé à la zone de contact rotor/stator. Les mesures complémentaires de rendement, effectuées en charge mettent en évidence des pertes élevées qui se situent au niveau des matériaux électroactifs et des matériaux constitutifs ainsi qu'à l'interface de contact. En effet, compte tenu d'une puissance électrique absorbée d'environ 22W, le rendement de l'actionneur est seulement de 12%. L'ensemble de ces résultats permet de conclure quant aux domaines d'application privilégiés de ce type d'actionneur qui restent les applications nécessitant des couples massiques élevés telles que les applications aéronautiques par exemple en privilégiant des fonctionnements intermittents.

CONCLUSIONS

Le système expérimental mis en place dans le cadre de ce TP permet d'aborder les points importants du fonctionnement d'un actionneur piézoélectrique et les ordres de grandeur associés. Ce TP permet aussi par le matériel de métrologie qui lui est associé d'aborder le problème de la mesure de micro déplacements à haute fréquence qui peut être utilisé dans bien d'autres circonstances sur des machines plus classiques.

Bibliographie

- [1] UEHA S., TOMIKAWA Y Ultrasonic Motors, Chap 7, Oxford Science Publications, Clarendon Press, Oxford 1993
- [2] NOGAREDE.B., Moteur piezoélectrique, Les Techniques de l'Ingénieur, Traité Génie Electrique, D3765, Juillet 1996
- [3] J.F. Rouchon, Ph. Kapsa, P. Minotti, L. Buchaillet, R. Duffait, Modélisation du fonctionnement des moteurs à ultrasons, Matériaux & Techniques, N° 5-6, p 37-42, 1995.