



HAL
open science

Caractérisation électromécanique d'un actionneur piézoélectrique

Yves Bernard, Sunyoto Sunyoto, Laurent Daniel

► **To cite this version:**

Yves Bernard, Sunyoto Sunyoto, Laurent Daniel. Caractérisation électromécanique d'un actionneur piézoélectrique. 17e Congrès Français de Mécanique, Aug 2005, Troyes, France. hal-04268309

HAL Id: hal-04268309

<https://hal.science/hal-04268309>

Submitted on 2 Nov 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Caractérisation électromécanique d'un actionneur piézoélectrique

Yves BERNARD, SUNYOTO, Laurent DANIEL

Laboratoire de Génie Electrique de Paris – Supelec (LGEP)
Plateau du Moulon
91192 Gif sur Yvette

Résumé :

Cet article présente une représentation par schéma électrique équivalent du comportement électromécanique d'un échantillon piézoélectrique multicouche. L'échantillon étudié (Noliac™ ML-02-09-C5) est un composant de base des actionneurs piézoélectriques. Le schéma de Masson est utilisé pour modéliser cet échantillon, les paramètres du schéma équivalent sont donnés ainsi que la méthode permettant de les déterminer. Enfin une modélisation mécanique par éléments finis est réalisée afin de compléter la modélisation par schéma électrique et d'en expliquer certains aspects.

Abstract :

An equivalent electrical scheme of the electromechanical behaviour of a piezoelectric multi-layer element is presented. This element (Noliac™ ML-02-09-C5) is a basic component of piezoelectric actuators. The Masson's scheme is used to model this element. The parameters are given with the method to obtain them. Finally, a mechanical finite element modelling is done to complete the electrical scheme and to explain particular points of it.

Mots clefs :

Piézoélectrique multicouche ; résonance ; modélisation par schéma électrique.

1 Introduction

Les progrès réalisés dans l'élaboration des matériaux piézoélectriques permettent d'accroître considérablement leur utilisation en tant qu'actionneurs. C'est dans la gamme des dispositifs de taille centimétrique que ces actionneurs révèlent véritablement leurs avantages (puissance volumique élevée, faible temps de réponse, facilité d'intégration). Le développement d'échantillons multicouche permet en outre d'utiliser la piézoélectricité sous des tensions raisonnables. La difficulté intrinsèque à l'utilisation de cette technologie reste bien entendu les faibles déplacements générés, c'est la raison pour laquelle ces dispositifs sont souvent utilisés autour de la fréquence de résonance de la structure à laquelle ils appartiennent.

La volonté d'obtenir une adaptation d'impédance entre le générateur et l'élément piézoélectrique, permettant ainsi à l'alimentation électrique de travailler autour de son fonctionnement optimal conduit nécessairement à effectuer une mesure d'impédance. Cette mesure va permettre d'identifier un schéma électrique équivalent de l'échantillon piézoélectrique dans son environnement. Ce schéma contient bien plus d'informations que le comportement électrique mesuré.

L'échantillon étudié est un multicouche qui intervient dans la réalisation d'une gamme étendue de produits piézoélectriques, il a la particularité de fonctionner sous tension maximale de 60 V, de générer sous cette tension une force bloquée de 1500 N ou un déplacement libre de 2,4 μm . Sa géométrie et ses

caractéristiques électriques en font un dispositif relativement difficile à caractériser qui met en défaut les techniques classiques.

2 Le schéma de Masson

Le schéma de Masson [1] est une représentation électrique du comportement électromécanique des dispositifs piézoélectriques. Il permet de mettre en évidence le couplage électrique et mécanique intrinsèque des matériaux piézoélectriques munis d'électrodes. La mesure de l'impédance électrique d'un échantillon fait apparaître ses différentes fréquences de résonance mécaniques.

2.1 Principe

Les matériaux piézoélectriques sont des diélectriques. L'application du champ électrique dans lequel est plongé le matériau se fait par le biais de deux électrodes déposées sur le matériau. Du point de vue électrique, l'échantillon ainsi constitué (matériau + électrodes) est un condensateur. Son impédance est donc constituée d'un condensateur de capacité C_0 en parallèle avec une résistance R_0 .

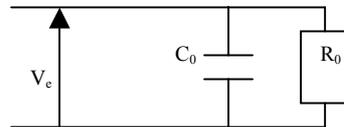


FIG. 1 – Schéma électrique équivalent de l'échantillon en statique.

La capacité C_0 s'écrit $C_0 = \epsilon s / l$ où ϵ est la permittivité électrique du matériau, s la surface des électrodes en regard et l la distance inter électrode. La résistance R_0 se calcule avec la formule $R_0 = \rho l / s$ où ρ est la résistivité du matériau.

Cependant, le générateur qui alimente cet échantillon fournit, en supplément de la puissance électrique mise en jeu dans le condensateur, une puissance mécanique qui induit les déformations subies par l'échantillon. Les efforts mis en jeu sont de trois natures : une force de rappel (F_r), liée au comportement élastique du matériau, une force d'inertie (F_i) liée au caractère dynamique de la sollicitation et une force de frottement (F_f) qui se traduit par une élévation de température du matériau. En notant u la vitesse de déplacement des faces lorsque celles-ci sont libres, on obtient $F_r = fu$ (f coefficient de frottement), $F_i = M \partial u / \partial t$ (M coefficient d'inertie), $F_r = k \int u dt$ (k coefficient de raideur). Ces trois forces s'additionnent et peuvent se représenter avec une analogie électrique mécanique sous forme d'un schéma électrique où les forces sont représentées par des tensions et les vitesses par des courants.

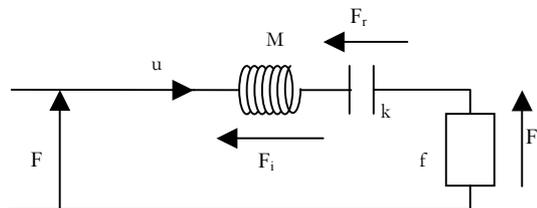


FIG. 2 – Schéma électrique représentant le comportement mécanique de l'échantillon en dynamique.

La puissance instantanée fournie par le générateur est la somme de la puissance électrique reçue par le condensateur équivalent et de la puissance mécanique acquise par le matériau. En tenant compte du couplage électrique et mécanique, on aboutit au schéma équivalent donné sur la figure 3 où le coefficient N est un coefficient piézoélectrique qui transforme la tension aux bornes de l'échantillon en force et le courant dans l'échantillon en vitesse de déplacement.

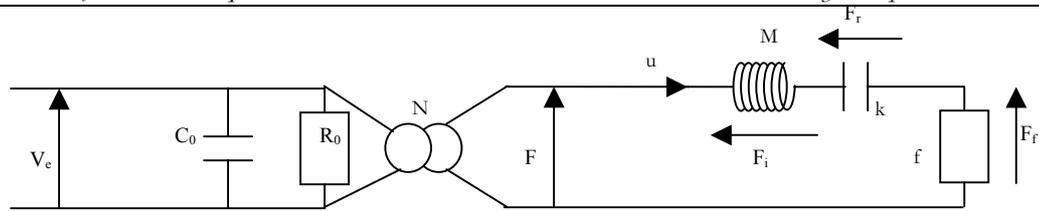


FIG. 3 – Schéma électrique représentant le comportement électromécanique de l'échantillon en dynamique.

On peut alors ramener le secondaire du transformateur au primaire moyennant le changement de variable $L=MN^2$, $C=k/N^2$, $R=fN^2$. On obtient le schéma de Masson (figure 4) dans lequel la branche R, L, C est dite motionnelle.

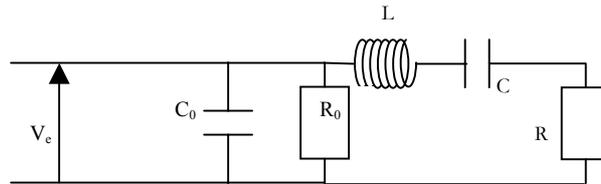


FIG. 4 – Schéma de Masson.

Ce schéma permet d'obtenir le comportement en admittance donné sur la figure 5.

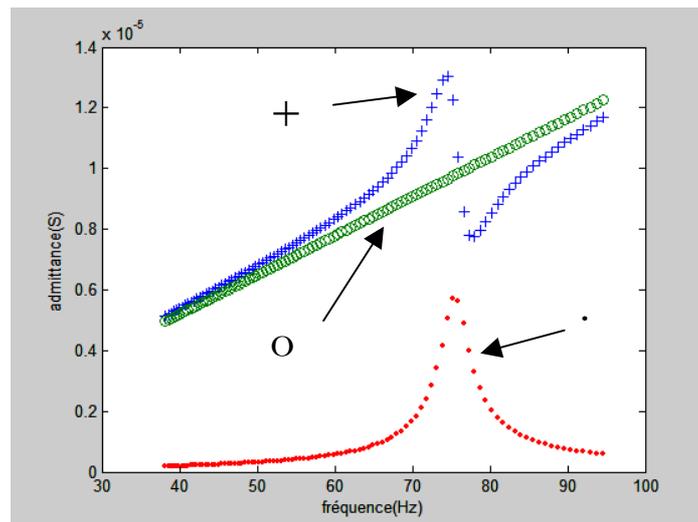


FIG. 5 – Admittance du schéma de Masson simulé pour des valeurs arbitraires ('o' admittance purement électrique, '.' admittance purement mécanique, '+' admittance électromécanique).

On observe que le diagramme d'admittance du schéma de Masson présente un maximum puis un minimum, ce qui correspond à ce que l'on mesure dans le cas d'un échantillon piézoélectrique. On notera en outre que le minimum (dit antirésonance) n'existe qu'en raison de la présence de la branche purement électrique. Cette branche électrique contribue aussi à décaler la fréquence de résonance mécanique et la fréquence d'admittance maximale.

Reste, à partir d'une mesure d'admittance, à déterminer les paramètres (R_0 , C_0 , R , L , C) qui permettent de caractériser l'échantillon mesuré. C'est l'objet de la section suivante.

2.1.1 Détermination des paramètres

L'admittance du schéma de Masson est :

$$Y(\omega) = \left(\frac{1}{R_0} + \frac{R}{R^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)^2} \right) + j \left(C_0\omega - \frac{\left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)}{R^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)^2} \right)$$

La procédure d'identification classique [2] consiste, dans un premier temps à effectuer une mesure d'admittance à basse fréquence afin d'identifier R_0 . Ensuite, à partir du maximum de la partie réelle de l'admittance, et du coefficient de surtension, on détermine respectivement R et L . On peut alors à partir des fréquences de résonance et d'antirésonance obtenir les paramètres manquants. On verra dans le paragraphe suivant que cette procédure n'est pas toujours applicable.

3 L'échantillon caractérisé

L'échantillon étudié est un multicouche de la société NoliacTM de forme rectangulaire (5x5 mm). L'épaisseur de cet échantillon (2 mm) est constituée d'une alternance de couches piézoélectriques (PZT) et d'électrodes (Pt). Les couches sont mises en série mécaniquement et en parallèle électriquement ce qui permet d'obtenir pour une tension d'alimentation donnée un champ électrique dans le matériau n fois supérieur à celui obtenu pour un matériau massif (n est le nombre de couches de PZT). La dénomination de ce produit est CMA (Ceramic Multi-layer Actuator).

Plusieurs raisons ont motivé le choix de cet échantillon. Ses dimensions permettent d'envisager son utilisation dans un grand nombre d'actionneurs, l'encombrement situant alors l'actionneur dans des volumes où le recours à la piézoélectricité se justifie. Ensuite, cet échantillon constitue le composant de base d'une grande gamme de produits. La société NoliacTM commercialise des « empilements » (SCMA) dont la longueur finale peut attendre plusieurs centimètres à partir de CMA. Enfin, la composition multicouche de ces échantillons permet de les utiliser sous des tensions ne dépassant pas la centaine de Volts.

Revers de la médaille, le comportement dynamique des CMA présente des singularités (cf. figure 6). Ce comportement se retrouve à plus ou moins grande échelle sur tous les échantillons testés.

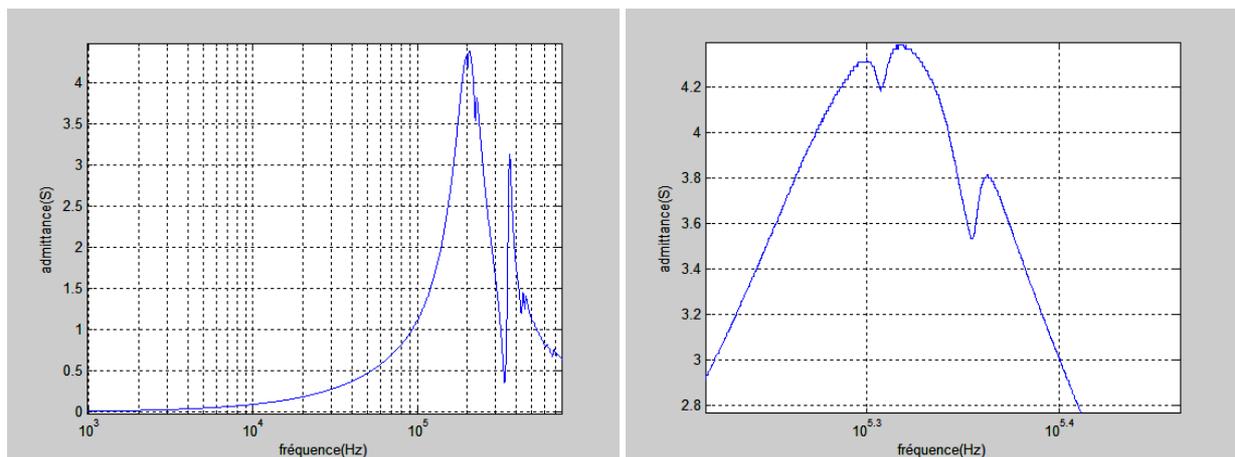


FIG. 6 – Admittance mesurée du CMA(a), détail de la zone autour de 250 kHz (b) .

4 Modélisation par schéma équivalent de l'échantillon

Les mesures effectuées à l'aide d'un impédance mètre HP4191A laissent bien apparaître le comportement attendu à basse fréquence (dizaine de Hertz). On identifie $R_0=21 \text{ k}\Omega$ et $C_0=1,38 \text{ }\mu\text{F}$ (cette dernière valeur est conforme aux données constructeur : 1415 nF, les 77 électrodes conduisent à une valeur de capacité

élevée). En revanche, lorsque l'on s'approche de la première résonance mécanique, on s'aperçoit que plusieurs modes sont proches les uns des autres et qu'il n'est pas possible de clairement dissocier la première résonance de la suivante. De ce fait, si l'on cherche à modéliser globalement l'admittance de l'échantillon, la méthode classique de détermination des paramètres se trouve en défaut : d'abord parce qu'on ne peut pas trouver la fréquence de résonance, ensuite parce que le coefficient de surtension englobe plusieurs résonances. Une méthode d'optimisation (moindres carrés) sur des points choisis de part et d'autre de la résonance sera alors à privilégier (cf. figure 7).

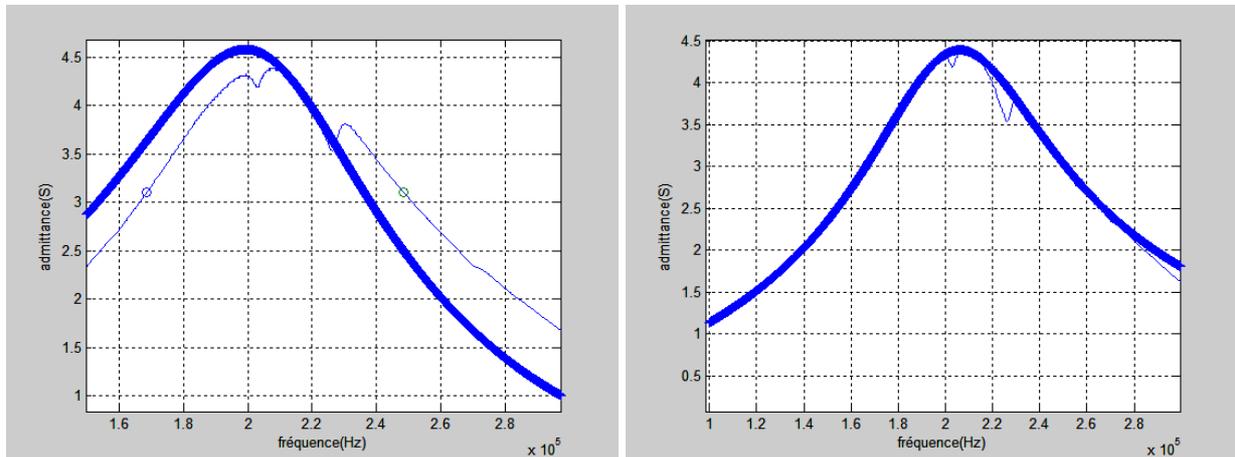


FIG. 7 – Admittance mesurée (-) et modélisée (+) par méthode classique (a), par optimisation (b).

Les valeurs obtenues suite à optimisation sont : $R=0,23 \Omega$, $L=0,44 \mu\text{H}$, $C=1,3 \mu\text{F}$. Bien sur, ce schéma ne permet pas d'avoir accès aux différentes résonances mais uniquement au comportement global. Pour pouvoir dissocier par exemple le troisième pic, il faut utiliser une représentation contenant deux branches mot ionnelles [3]. Nous avons déterminé les six paramètres R_1 , L_1 , C_1 , R_2 , L_2 , C_2 des deux branches en parallèle par optimisation.

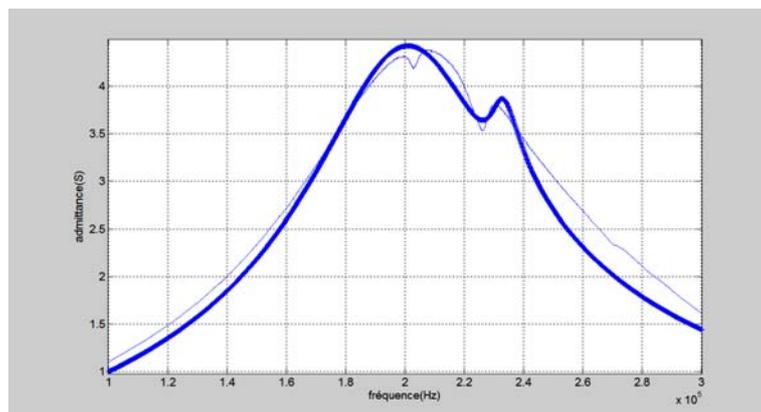


FIG. 8 – Admittance mesurée et modélisée par deux branches mot ionnelles.

Les paramètres utilisés pour cette simulation sont : $R_1=0,23 \Omega$, $L_1=0,56 \mu\text{H}$, $C_1=1,1 \mu\text{F}$, $R_2=1,25 \Omega$, $L_2=17 \mu\text{H}$, $C_2=0,02 \mu\text{F}$. On pourra bien sur augmenter le nombre de branches mot ionnelles à chaque fois que l'on cherche à modéliser une résonance. Cependant, le schéma pourra être le plus précis possible, il ne donnera jamais que le comportement qualitatif dynamique de l'échantillon autour de sa résonance, sans préciser de quelle résonance il s'agit. Pour avoir plus d'informations sur ces résonances, nous avons effectué une modélisation de cet échantillon par éléments finis.

5 Modélisation par éléments finis de l'échantillon

L'étude par éléments finis a pour but d'identifier les modes de vibration qui ont été sollicités lors de la mesure d'admittance. Le calcul effectué est un calcul découplé, l'effet piézoélectrique n'est pas pris en compte. Les caractéristiques élastiques du PZT sont fournies par le constructeur, celles du platine ont été obtenues par ailleurs. En raison de l'assemblage considéré et de la nature des sollicitations appliquées (essentiellement selon l'axe perpendiculaire aux couches de l'élément piézoélectrique), on choisit en première approximation de considérer que le matériau est homogène et qu'il a pour tenseur des souplesses la somme des tenseurs des souplesses du PZT et du platine, pondérés par leurs fractions volumiques respectives (approche de Reuss). En raison des symétries du problème, seul 1/8 de l'élément est modélisé. La densité choisie est aussi la densité moyenne du matériau. Le calcul fait apparaître, conformément à ce qui était observé expérimentalement deux premières fréquences de résonance assez proches, au voisinage de 250 Hz.

Un troisième mode assez proche également, un peu avant 300 Hz est également mis en évidence. Il correspond approximativement à la troisième résonance observée lors de la mesure d'admittance. Les résultats obtenus pour les valeurs des fréquences propres sont assez sensibles aux dimensions de l'échantillon. L'incertitude annoncée par le constructeur sur ces dimensions (0,2 mm pour une largeur de 5mm) pourrait expliquer la dispersion assez importante obtenue sur les mesures d'admittance pour les différents échantillons testés. Des mesures d'admittance ont également été effectuées en imposant un déplacement orthogonal à la surface supérieure de l'échantillon (qui était libre précédemment), cette sollicitation a eu pour conséquence de diminuer l'amplitude de l'admittance et de faire disparaître le double pic à 250 kHz. La modélisation par élément finis montre quant à elle que l'application d'une telle sollicitation tend à écarter les deux premiers modes de résonance, dissipant cet effet de double pic en les écartant l'un de l'autre.

6 Conclusion

Nous avons abordé la modélisation électromécanique par schéma équivalent d'un échantillon multicouche piézoélectrique. Nous avons montré que la caractérisation, à l'aide du schéma de Masson, de ce composant de base des actionneurs piézoélectriques était possible, moyennant une détermination des paramètres par optimisation. Nous avons donné les valeurs de ces paramètres. Il a été montré que le nombre de branches motionnelles devait augmenter afin d'accroître la précision de modélisation.

Les mesures d'admittance laissent apparaître différents modes de résonance. Ces modes ont été identifiés qualitativement à l'aide d'une modélisation par éléments finis.

La mesure de l'admittance d'un échantillon piézoélectrique permet donc de mesurer les fréquences de résonance de la structure dans laquelle il est intégré. A partir du schéma de Masson, on est aussi en mesure de connaître les forces mises en jeu ainsi que les vitesses de vibration. Il faut pour cela avoir déterminé le coefficient de conversion N, ce sera l'objet de travaux futurs.

Références

- [1] W. P. MASON, Piezoelectric crystals and their applications to ultrasonics, New York, Van Nostrand, 1950.
- [2] B. NOGAREDE, Moteurs piézoélectriques, Techniques de l'ingénieur, traité génie électrique, D3 765, 06/1996.
- [3] F. GALIANO, B. NOGAREDE, « Un nouveau concept d'actionneur piézoélectrique plan monophasé à onde stationnaire », Revue internationale de génie électrique, volume N°2/1999, pages 419 à 437.