



HAL
open science

Transformateur piézoélectrique bimorphe de type poutre

Dejan Vasic, Emmanuel Sarraute, François Costa

► **To cite this version:**

Dejan Vasic, Emmanuel Sarraute, François Costa. Transformateur piézoélectrique bimorphe de type poutre. MAGELEC 2001, Dec 2001, Toulouse, France. pp 95-100. <hal-00843224>

HAL Id: hal-00843224

<https://hal.science/hal-00843224v1>

Submitted on 16 May 2024

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.



HAL Authorization

TRANSFORMATEUR PIEZOELECTRIQUE BIMORPHE DE TYPE POUTRE

Dejan VASIC, Emmanuel SARRAUTE, François COSTA

Ecole Normale Supérieure de Cachan
Laboratoire d'Electricité, Signaux et Robotique (LESiR, UPRESA 8029)
61, Avenue du Président Wilson
94235 Cachan France

Résumé

Nous présentons ici un nouveau type de transformateur piézoélectrique fonctionnant en mode de flexion. Le principe de fonctionnement repose sur la vibration d'une poutre encastrée sur une extrémité et libre de l'autre. Une modélisation analytique nous a permis d'établir le schéma électrique équivalent du transformateur, les fréquences de résonances ainsi que les profils des déformations et des déflexions de la poutre. La répartition de la contrainte longitudinale nous a permis de choisir la position des électrodes primaires et secondaires. Au final, ces résultats analytiques ont été confrontés à des résultats expérimentaux.

1 Introduction

Le principe de fonctionnement des transformateurs piézoélectriques connus à ce jour repose sur la vibration à la fréquence de résonance, que ce soit en mode longitudinal ou transversal, de tout le volume du bloc piézoélectrique constituant le transformateur. Ces structures qui fonctionnent en ondes de volume (transformateurs de type Rosen, multicouche ou circulaire) ont l'avantage d'être simples : formés d'un seul bloc de matériau piézoélectrique en général du PZT (Zirconate de Titanate de Plomb) et d'électrodes primaires et secondaires. Par contre ce type de transformateur piézoélectrique pose problème lorsque l'on souhaite l'intégrer en technologie micro-système sur un substrat de silicium avec d'autres composants. En effet la répartition de la contrainte dans le matériau étant dans tout le volume, il est difficile de déposer un bloc de PZT directement sur du silicium et de garder le même fonctionnement du transformateur. Nous présentons donc ici un nouveau type de transformateur piézoélectrique de type poutre fonctionnant cette fois-ci par onde de flexion et mieux adapté à l'intégration sur silicium.

Le transformateur poutre présente deux avantages pour l'intégration ; le premier est qu'il résonne à des fréquences faibles même pour des dimensions très réduites ; le deuxième est qu'il dispose d'un côté encastré qui permet une implantation facile sur un substrat en silicium. Il est possible sur le même principe d'établir d'autres structures fonctionnant en mode de flexion, qui peuvent être par exemple de type pont (poutre encastrée des deux cotées), membrane circulaire ou membrane carrée.

La poutre bimorphe étudiée ici est constituée de trois couches : une couche conductrice emprisonnée entre deux couches de céramique piézoélectrique PZT polarisées en inverse formant un bimorphe symétrique. Les déformations antagonistes de chaque couche provoquent, comme dans un bimétal, une forte torsion de l'ensemble.

2 Réalisation et principe

Le principe de cette nouvelle structure de transformateur piézoélectrique bimorphe poutre est présenté figure 1. La photo du prototype réalisé à partir d'un échantillon de chez Piezo Systeme Inc est donnée figure 2. La longueur totale de la poutre est de 30mm, l'épaisseur totale est de 0,508mm et la largeur est de 6,35mm.

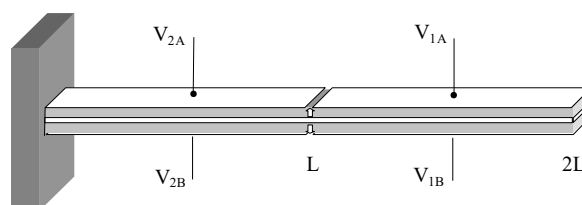


Figure 1 : Transformateur piézoélectrique poutre
Le primaire du transformateur est placé du côté libre de la poutre (tension $V_1 = V_{1A} - V_{1B}$). Le secondaire est mis à l'emplacement de contrainte maximum, c'est-à-dire du côté encastré (tension $V_2 = V_{2A} - V_{2B}$).

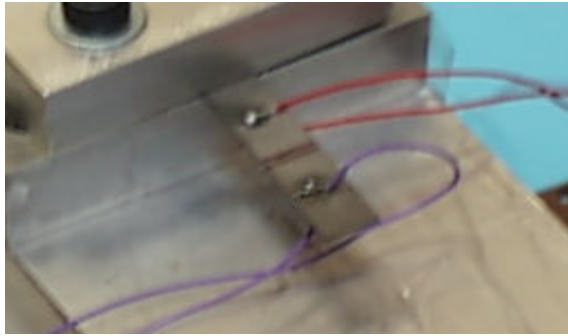


Figure 2 : Prototypé étudié

L'application d'une tension alternative au primaire du transformateur provoque une flexion de la poutre et une mise en vibration mécanique de toute sa longueur. Une tension alternative apparaît alors au secondaire. La figure 3 nous montre la distribution suivant la longueur de la poutre du déplacement et de la contrainte longitudinale pour les deux premiers modes de résonance. Dans le cas du premier mode (figure 3.a), à l'extrémité libre de la poutre le déplacement est maximum et la contrainte nulle, à l'extrémité encastree la contrainte est maximale. La contrainte axiale dans le second mode (figure 3.b) présente deux extrema un à l'extrémité encastree et l'autre au milieu. Cette répartition de la contrainte nous montre qu'il est préférable de fonctionner au premier mode de résonance.

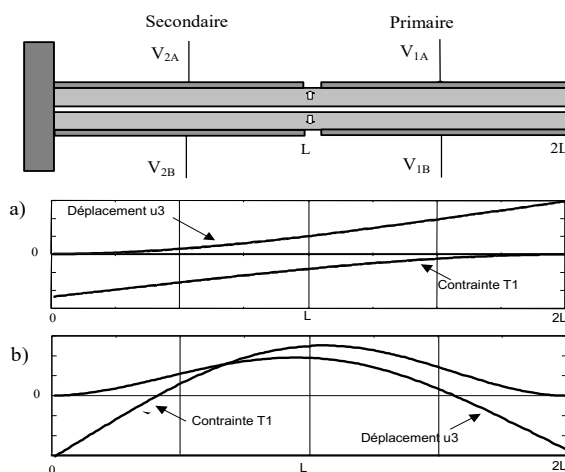


Figure 3 : Contrainte axiale et déplacement
3.a : Mode 1
3.b : Mode 2

3 Modélisation [1]

A partir des équations électromécaniques décrivant le système, nous établissons un schéma électrique équivalent, retranscrivant le comportement électrique

du transformateur. La modélisation permettant d'aboutir au schéma électrique est réalisée en deux étapes. Nous établissons séparément les modèles du primaire et du secondaire, ce qui revient à modéliser deux résonateurs piézoélectriques, puis on les relie mécaniquement en considérant la continuité des efforts et des vitesses à la jonction mécanique des deux éléments.

3.1 Modélisation d'un bimorphe piézoélectrique

Le bimorphe piézoélectrique à modéliser, représentant indifféremment le primaire ou le secondaire du transformateur est présenté figure 4.

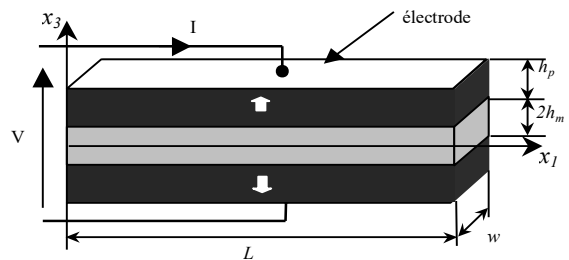


Figure 4 : Poutre bimorphe piézoélectrique

La notation x_i ($i=1,2,3$) représente les variables d'espace. La longueur et la largeur du bimorphe sont respectivement notées L et w , et vérifient la relation $w \ll L$. Les épaisseurs d'une des couches piézoélectriques et de la moitié de la couche intermédiaire sont respectivement h_m et h_p . On s'intéresse uniquement à la déflexion suivant l'axe x_1 . Le déplacement vertical est noté u_3 et on ne tient compte que de la composante longitudinale du déplacement relatif S_1 [2].

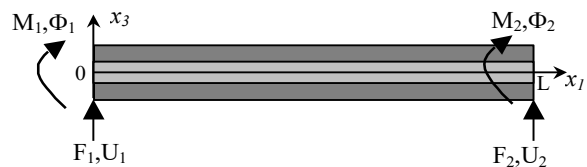


Figure 5 : Moments fléchissants et forces tranchantes

Pour modéliser cet élément, on d'établit une relation entre le moment fléchissant noté M_1 , la vitesse angulaire Φ_1 , la force tranchante F_1 et la vitesse linéaire U_1 à la position $x_1=0$ en fonction de ces mêmes grandeurs (M_2, Φ_2, F_2, U_2) à la position $x_1=L$ (figure 5).

Les expressions du moment fléchissant M et de la force tranchante F suivant l'axe x_1 en fonction de la tension appliquée V s'écrivent :

$$M_b = -K_b \frac{\partial^2 u_3}{\partial x_1^2} + N_b V \quad (1)$$

$$F_b = \frac{\partial M_b}{\partial x_1} = -K_b \frac{\partial^3 u_3}{\partial x_1^3} \quad (2)$$

où K_b est appelé rigidité à la flexion de la poutre bimorphe, et N_b est une constante liée à la conversion électromécanique, et définis par :

$$K_b = \frac{2}{3} w \left[\frac{1}{s_{p11}^E} \left(\left(\frac{h_p}{2} + h_m \right)^3 - \left(\frac{h_p}{2} \right)^3 \right) + \frac{1}{s_{m11}} \left(\frac{h_m}{2} \right)^3 \right] \quad (3)$$

$$N_b = -\frac{1}{2} w \frac{d_{31}}{s_{p11}^E} (h_p + 2h_m) \quad (4)$$

Le déplacement u_3 s'obtient en résolvant l'équation dynamique régissant la poutre bimorphe qui s'écrit :

$$K_b \frac{\partial^4 u_3}{\partial x_1^4} + 2w(\rho_m h_m + \rho_p h_p) \frac{\partial^2 u_3}{\partial t^2} = 0 \quad (5)$$

avec ρ_m et ρ_p respectivement la masse volumique de la couche intermédiaire et des couches piézoélectriques. En considérant un régime harmonique, la solution de l'équation différentielle (5) donnant le déplacement u_3 en fonction de x_1 est :

$$u_3 = \alpha_1 \cos \lambda_b x_1 + \alpha_2 \sin \lambda_b x_1 + \alpha_3 \cosh \lambda_b x_1 + \alpha_4 \sinh \lambda_b x_1 \quad (6)$$

où $\alpha_1 - \alpha_4$ sont des coefficients dépendant des

conditions limites et $\lambda_b = \left(\frac{\bar{\rho}_b}{K_b} \omega^2 \right)^{\frac{1}{4}}$ où

$$\bar{\rho}_b = 2w(\rho_m h_m + \rho_p h_p) \text{ et } \omega \text{ la pulsation.}$$

Les grandeurs aux extrémités de la poutre s'obtiennent en substituant la relation (6) dans les expressions (3) et (4). En tenant compte du signe défini sur la fig 5 les moments fléchissants et les efforts tranchants aux extrémités s'écrivent :

$$F_1 = F \Big|_{x_1=0} \quad M_1 = M \Big|_{x_1=0}$$

$$F_2 = -F \Big|_{x_1=L} \quad M_2 = -M \Big|_{x_1=L}$$

Les vitesses aux extrémités de la poutre correspondants aux déplacements linéaires et de rotation sont définis par :

$$U_1 = \frac{\partial u_3}{\partial t} \Big|_{x_1=0} \quad \Phi_1 = -\frac{\partial u_3}{\partial t \partial x_1} \Big|_{x_1=0}$$

$$U_2 = \frac{\partial u_3}{\partial t} \Big|_{x_1=L} \quad \Phi_2 = -\frac{\partial u_3}{\partial t \partial x_1} \Big|_{x_1=L}$$

En éliminant les coefficients $\alpha_1 - \alpha_4$, on établit une relation matricielle 4x4 reliant les efforts et les vitesses d'une extrémité de la poutre ($x_1=0$) à l'autre ($x_1=L$) ainsi que la tension V .

$$\begin{pmatrix} F_1 \\ M_1 \\ U_1 \\ \Phi_1 \end{pmatrix} = \Gamma \begin{pmatrix} -F_2 \\ -M_2 \\ U_2 \\ \Phi_2 \end{pmatrix} + \Pi V \quad (7)$$

où Γ est appelée la matrice chaîne 4x4 et est définie par :

$$\frac{1}{2} \begin{pmatrix} m+c & -\lambda_b(n-s) & \frac{K_b \lambda_b^3 (n+s)}{j\omega} & \frac{K_b \lambda_b^2 (m-c)}{j\omega} \\ -(n+s)/\lambda_b & m+c & \frac{-K_b \lambda_b^2 (m-c)}{j\omega} & \frac{-K_b \lambda_b (n-s)}{j\omega} \\ \frac{j\omega(n-s)}{K_b \lambda_b^3} & \frac{-j\omega(m-c)}{K_b \lambda_b^2} & m+c & (n+s)/\lambda_b \\ \frac{j\omega(m-c)}{K_b \lambda_b^2} & \frac{-j\omega(n+s)}{K_b \lambda_b} & \lambda_b(n-s) & m+c \end{pmatrix}$$

et Π une matrice 1x4 définie par :

$$\Pi = \begin{pmatrix} \frac{N_b \lambda_b (n-s)}{2} \\ N_b - \frac{N_b (m+c)}{2} \\ \frac{j\omega N_b (m-c)}{2K_b \lambda_b^2} \\ \frac{j\omega N_b (s+n)}{2K_b \lambda_b} \end{pmatrix}$$

avec :

$$c = \cos \lambda_b L \quad s = \sin \lambda_b L \quad m = \cosh \lambda_b L \quad n = \sinh \lambda_b L$$

3.2 Modélisation du transformateur

Le transformateur piézoélectrique poutre est décomposé en deux éléments (figure 6). Chaque élément est caractérisé par sa matrice chaîne qui relie les grandeurs mécaniques (efforts et vitesse) d'une extrémité à l'autre ainsi que les potentiels électriques V_1 et V_2 pour respectivement le primaire et le secondaire.

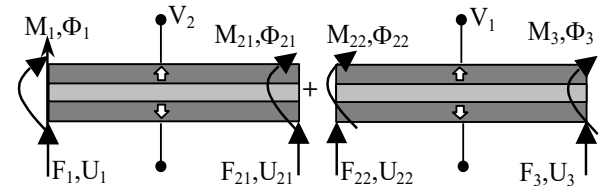


Figure 6 : Décomposition du transformateur

Les relations chaînes pour chaque élément du transformateur s'écrivent :

$$\text{Elément 1 : } \begin{pmatrix} F_1, M_1 \\ U_1, \Phi_1 \end{pmatrix} = \Gamma^L \begin{pmatrix} -F_{21}, -M_{21} \\ U_{21}, \Phi_{21} \end{pmatrix} + \Pi^L V_2$$

$$\text{Elément 2 : } \begin{pmatrix} F_{22}, M_{22} \\ U_{22}, \Phi_{22} \end{pmatrix} = \Gamma^L \begin{pmatrix} -F_3, -M_3 \\ U_3, \Phi_3 \end{pmatrix} + \Pi^L V_1$$

La continuité des grandeurs mécaniques à la jonction des deux éléments nous permet d'écrire la relation matricielle de l'ensemble du transformateur :

$$\begin{pmatrix} F_1, M_1 \\ U_1, \Phi_1 \end{pmatrix} = \Gamma^{2L} \begin{pmatrix} -F_3, M_3 \\ U_3, \Phi_3 \end{pmatrix} + (\Pi^{2L} - \Pi^L) V_1 + \Pi^L V_2 \quad (8)$$

Du côté encastré du transformateur le déplacement est nul : $U_1=0$ et $\Phi_1=0$. En négligeant l'impédance de l'air, les efforts du côté libre du transformateur sont nuls : $F_3=0$ et $M_3=0$. Ce qui nous permet de réécrire la relation précédente :

$$\begin{pmatrix} F_1, M_1 \\ 0 \end{pmatrix} = \Gamma^{2L} \begin{pmatrix} 0 \\ U_3, \Phi_3 \end{pmatrix} + (\Pi^{2L} - \Pi^L) V_1 + \Pi^L V_2 \quad (9)$$

La relation (9) nous permet de calculer toutes les vitesses définies sur la figure 6, pour cela nous décomposons la matrice chaîne Γ en quatre sous-matrices et la matrice Π en deux sous-matrices :

$$\Gamma^{2L} = \begin{pmatrix} \Gamma_1^{2L} & \Gamma_2^{2L} \\ \Gamma_3^{2L} & \Gamma_4^{2L} \end{pmatrix} \text{ et } \Pi^{2L} = \begin{pmatrix} \Pi_1^{2L} \\ \Pi_2^{2L} \end{pmatrix}$$

On en tire deux relations matricielles :

$$\begin{pmatrix} F_1 \\ M_1 \end{pmatrix} = \Gamma_2^{2L} \begin{pmatrix} U_3 \\ \Phi_3 \end{pmatrix} + (\Pi_1^{2L} - \Pi_1^L \quad \Pi_1^L) \begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \end{pmatrix} \text{ et}$$

$$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \Gamma_4^{2L} \begin{pmatrix} U_3 \\ \Phi_3 \end{pmatrix} + (\Pi_2^{2L} - \Pi_2^L \quad \Pi_2^L) \begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \end{pmatrix}$$

Cette seconde relation nous permet de calculer les vitesses à l'extrémité de la poutre U_3 et Φ_3 en fonction de V_1 et V_2 :

$$\begin{pmatrix} U_3 \\ \Phi_3 \end{pmatrix} = -(\Gamma_4^{2L})^{-1} (\Pi_2^{2L} - \Pi_2^L \quad \Pi_2^L) \begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \end{pmatrix} \quad (10)$$

La relation chaîne relative à l'élément 2 nous permet de calculer les vitesses U_2 et Φ_2 :

$$\begin{pmatrix} U_2 \\ \Phi_2 \end{pmatrix} = \Gamma_4^L \begin{pmatrix} U_3 \\ \Phi_3 \end{pmatrix} + \Pi_2^L V_1 \quad (11)$$

3.3 Etablissement du schéma électrique

Pour établir le schéma électrique du transformateur on exprime les relations électriques pour chaque éléments. En partant de la définition du courant électrique et pour une section A , on peut écrire :

$$I = \int_A \frac{\partial D_3}{\partial t} dA$$

Les courants dans chaque élément s'écrivent donc :

$$I_1 = j\omega C V_1 + N_b (\Phi_3 - \Phi_2)$$

$$I_2 = j\omega C V_2 + N_b \Phi_2$$

ou encore sous forme matricielle :

$$\begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \end{pmatrix} = j\omega C \begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \end{pmatrix} + N_b \begin{pmatrix} -1 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Phi_2 \\ \Phi_3 \end{pmatrix} \quad (12)$$

avec C la capacité, définie par :

$$C = \varepsilon_{33}^T \left(1 - \frac{d_{31}^2}{s_{p11}^E \varepsilon_{33}^T} \right) \frac{Lw}{2h_p} \quad (13)$$

En substituant les relations (10) et (11) dans la relation (12), on établit la matrice des admittances électriques.

$$\begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \end{pmatrix} = j\omega C \begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \end{pmatrix} \quad (14)$$

avec :

$$Y_{12} = Y_{21} = j\omega N_b^2 \frac{(c_L n_L + s_L m_L)(c_L m_L - m_L - c_L) + s_L + n_L}{K_b \lambda_b (1 + c_{2L} m_{2L})}$$

$$Y_{11} + Y_{12} = j\omega N_b^2 \frac{s_L + n_L - (c_L n_L + s_L m_L)(m_L + c_L)}{K_b \lambda_b (1 + c_{2L} m_{2L})}$$

$$Y_{22} + Y_{12} = j\omega N_b^2 \frac{(c_L n_L + s_L m_L)(m_L + c_L - 4c_L m_L) + s_{2L} + n_{2L} - (s_L + n_L)}{K_b \lambda_b (1 + c_{2L} m_{2L})}$$

La relation (14) nous permet d'établir le schéma électrique équivalent du transformateur poutre, qui est présenté figure 7.

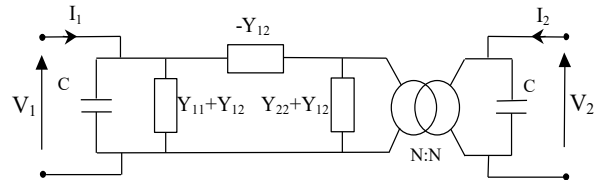


Figure 7 : Schéma électrique équivalent

On retrouve ici un schéma électromécanique analogue à ceux dit de Mason et faisant apparaître deux branches électriques (capacités C) et des branches mécaniques (Y_{11} , Y_{12} , Y_{22}). Pour les branches mécaniques, on voit apparaître trois admittances en Π , que l'on peut également représenter par trois impédances en T .

4 Résultats analytiques

Les résultats analytiques présentés ici sont obtenus à partir de la modélisation précédente et en tenant compte des pertes mécaniques schématisées par une résistance R insérée dans la branche mécanique. La valeur de cette résistance est calculée à partir du

coefficient de qualité mécanique donné par le fabricant du matériau PZT : $Q_m=80$.

A partir du schéma électrique équivalent, il est facile d'établir l'expression du gain du transformateur V_2/V_1 en fonction de la fréquence et de la résistance de charge R_L .

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{-R_L Y_{12}}{1 + R_L (Y_{22} + jC\omega)} \quad (15)$$

Les dimensions du transformateur et les caractéristiques des matériaux utilisés sont données dans le tableau 1.

TABLEAU 1
Données des matériaux

L	w	h_p	h_m
13mm	6,35mm	0,1905mm	0,0635mm
d_{31}	S_{p11}	S_{m11}	k_{31}
$-190 \cdot 10^{-12}$	$15,15 \cdot 10^{-12}$	$5 \cdot 10^{-12}$	0,32
ϵ_{33}^T	Q_m	ρ_m	ρ_p
$1800\epsilon_0$	80	2690kg/m^3	7800kg/m^3

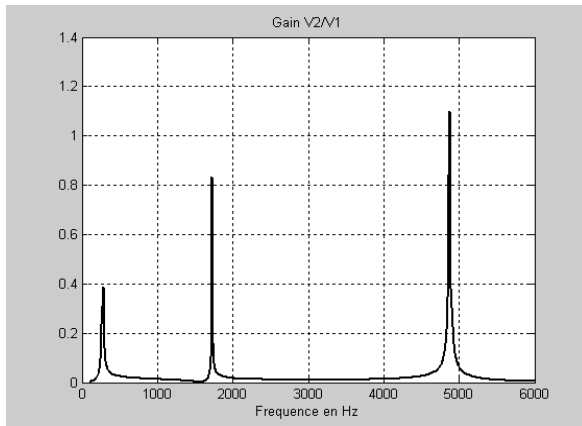


Figure 8 : Gain à vide du transformateur

La figure 8 nous donne le gain V_2/V_1 lorsque le secondaire est à vide. Ces simulations sont réalisées avec un facteur de qualité $Q_m=80$ ce qui explique le gain inférieur à 1. Trois pics de gain sont obtenus pour les fréquences de 269Hz, 1722Hz et 4772Hz représentant respectivement les trois premiers modes de résonance en flexion.

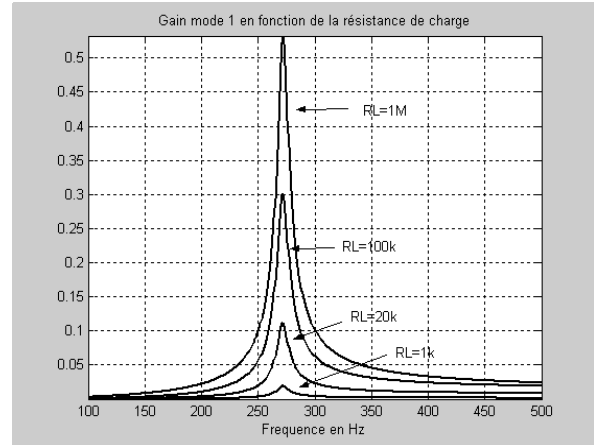


Figure 9 : Gain en fonction de R_L (mode 1)

Le gain dépend également de la résistance de charge R_L . La figure 9 représente les différents gains pour le premier mode lorsque la résistance de charge vaut 1k Ω , 20k Ω , 100k Ω et 1M Ω . Le gain est maximum lorsque le transformateur est à vide.

5 Résultats expérimentaux

La figure 10 nous montre l'admittance électrique d'entrée du transformateur mesurée avec un analyseur d'impédance HP4192 pour le premier mode lorsque le secondaire est en court-circuit, ainsi que l'admittance calculée analytiquement. On voit apparaître les fréquences de résonance et d'antirésonance. Le coefficient de couplage effectif k_{eff} et le facteur de qualité Q_m sont définis par :

$$k_{eff}^2 = \frac{f_p^2 - f_s^2}{f_p^2} \quad (16) \quad \text{et} \quad Q_m = \frac{f_s}{f_2 - f_1} \quad (17)$$

où f_s , f_p , f_1 et f_2 sont respectivement les fréquences du maximum de conductance, du maximum de résistance, du maximum de susceptance et du minimum de susceptance. Les valeurs obtenues expérimentalement sur la figure 10 pour le coefficient de couplage effectif k_{eff} et le facteur de qualité Q_m sont respectivement 0,102 et 44. On remarque que le coefficient de couplage électromécanique effectif est assez faible, cela est dû au mode de fonctionnement en flexion. Dans ce mode de fonctionnement la contrainte n'est pas uniforme dans tout le matériau (nulle du côté libre), c'est là un inconvénient de ce type de transformateur piézoélectrique, mais qui peut être remédié en utilisant des structures ponts ou membrane.

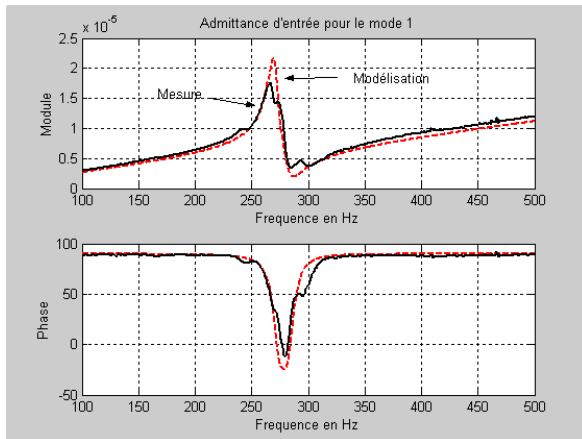


Figure 10 : Admittance d'entrée (mode 1)

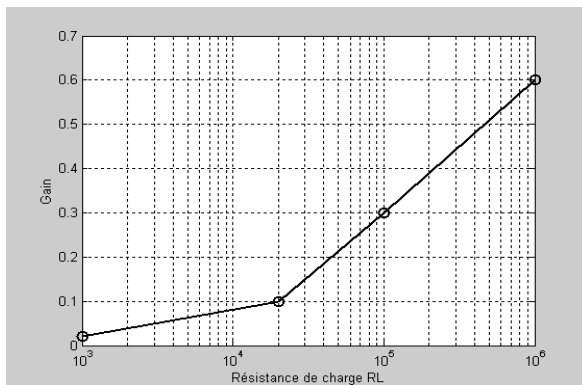


Figure 11 : Gain du transformateur en fonction de R_L

Le gain du transformateur en fonction de la résistance de charge R_L est présenté la figure 11. En raison de la variation de la fréquence de résonance (maximum du gain) en fonction de la résistance de charge, la fréquence doit être réajustée pour chaque point de mesure.

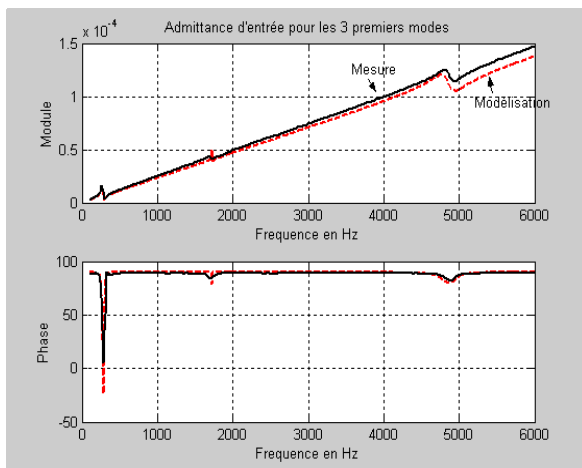


Figure 12 : Admittance d'entrée à vide

La figure 12 représente l'admittance d'entrée obtenue expérimentalement pour les trois premiers modes ainsi que celle obtenue par modélisation. La concordance des fréquences de résonance est présentée dans le tableau 2. Notre modélisation analytique est donc validée.

TABLEAU 2
Fréquences de résonance

Mode	Premier	Second	Troisième
Analytique	269Hz	1722Hz	4772Hz
Mesures	266Hz	1680Hz	4820Hz

6 Conclusion

Une nouvelle structure de transformateur piézoélectrique fonctionnant en onde de flexion a été conçue. Une modélisation analytique de ce transformateur a été réalisée et a permis d'aboutir à un schéma électromécanique équivalent. Ces résultats analytiques ont été confrontés à des résultats expérimentaux obtenus sur une poutre bimorphe. L'intérêt principal de ce type de structure est de permettre une intégration plus facile du transformateur sur un substrat en silicium. L'inconvénient majeur est le faible coefficient de couplage dû au mode de fonctionnement en flexion. Le travail à venir est une étude plus précise de la puissance disponible au secondaire du transformateur, ainsi que du rendement et la mise en œuvre de prototypes micro-usinés sur silicium.

7 Remerciement

Ce travail a été réalisé dans le cadre d'une convention d'étude entre le CNES de Toulouse, l'ENS de Cachan, l'IEF d'Orsay, l'ESIEE de Marne la Vallée et le département MIMM de l'Université de Valenciennes. Nous remercions donc pour leur participation Messieurs F.Presseccq et J.Garnier du CNES, D.Remiens et E.Cattan de l'Université de Valenciennes, A.Bosseboeuf de l'IEF d'Orsay et P.Sanguard de l'ESIEE de Marne la Vallée.

Références

- [1] D. VASIC, E. SARRAUTE, F. COSTA. Dynamic 4x4 chain matrix for analytical modeling of piezoelectric actuator. *IEEE Ultrasonics symposium 2001*. Oct. 2001.
- [2] Young S. CHO, Y. Eugene PARK and Sung K. HA, "Five-port equivalent electric circuit of piezoelectric bimorph beam", *Sensors and Actuators 84(2000)*, May 1999.