



HAL
open science

Méthode d'analyse monodimensionnelle d'un résonateur ultrasonore à couches multiples basée sur l'analogie des lignes électriques

J.-L. Dion, E. Cornieles

► **To cite this version:**

J.-L. Dion, E. Cornieles. Méthode d'analyse monodimensionnelle d'un résonateur ultrasonore à couches multiples basée sur l'analogie des lignes électriques. *Journal de Physique IV Proceedings*, 1994, 04 (C5), pp.C5-319-C5-322. 10.1051/jp4:1994565 . jpa-00253060

HAL Id: jpa-00253060

<https://hal.science/jpa-00253060>

Submitted on 4 Feb 2008

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.

Méthode d'analyse monodimensionnelle d'un résonateur ultrasonore à couches multiples basée sur l'analogie des lignes électriques

J.-L. DION et E. CORNIELES*

Laboratoire d'Ultrasonique et Capteurs, Université du Québec à Trois-Rivières, CP. 500, Trois-Rivières, Québec G9A 5H7, Canada

** Escuela de Ingeniería Eléctrica, Universidad del Zulia, Maracaibo, Venezuela*

Résumé

Nous présentons une méthode de calcul des résonateurs piézoélectriques en une dimension comportant un nombre quelconque de couches et d'éléments piézoélectriques électriquement en parallèles. Cette méthode fait appel systématiquement à l'analogie des lignes électriques, chaque milieu, actif ou passif, étant représenté par une ligne. Nous l'avons appliqué avec succès à diverses structures dont un résonateur symétrique avec une couche liquide intermédiaire et un total de 21 milieux.

Summary

We present a computation technique for one-dimensional piezoelectric resonators having an arbitrary number of layers and piezoelectric elements electrically in parallel. This method is based upon a systematic use of the electrical transmission line analogy, each passive or active medium being represented by a line. It has successfully been applied to various structures, particularly a symmetrical resonator with an intermediate liquid medium and a total of 21 media.

1. INTRODUCTION

Notre objectif était de concevoir un résonateur servant à produire des ondes stationnaires intenses à environ 100 kHz dans un volume d'eau d'épaisseur voisine de 33 mm avec des dimensions transversales d'environ 100 x 100 mm. Ce résonateur devait être formé de deux transducteurs face-à-face, chacun étant constitué particulièrement de deux céramiques piézoélectriques segmentées et collées sur une lame d'acier supportée par les bords. En tenant compte des couches de colle et des milieux extrêmes (air), on a alors un total de 21 milieux. Les céramiques sont électriquement en parallèles et mécaniquement en série. Or, il nous importait de pouvoir prédire l'impédance électrique du système, ainsi que les vitesses acoustiques aux interfaces, particulièrement les valeurs maximales et minimales dans la couche d'eau centrale, en analysant l'influence des paramètres des différents milieux, y compris les coefficients d'atténuation. Afin de modéliser cette structure complexe, nous avons utilisé systématiquement avec succès l'analogie des lignes électriques en innovant par rapport à nos travaux précédents où un seul élément piézoélectrique était utilisé [1,2]. Chaque milieu, actif ou passif, est représenté par une ligne acoustique à laquelle s'appliquent par analogie les diverses relations propres aux lignes électriques. Les paramètres de la colle utilisée ont été déterminés à partir de l'étude de systèmes plus simples à cinq ou six milieux. La méthode utilisée diffère substantiellement de celle de Martin [3] ou de Inoue *et al.* [4] qui s'inspiraient du modèle de Mason [5]. Sarvazyan *et al.* ont analysé des résonateurs à plusieurs milieux considérant l'effet de la diffraction, mais sans tenir compte des pertes dans les éléments piézoélectriques [6,7]. Une de nos conclusions est que les pertes internes des différents milieux solides affectent les résultats de façon appréciable. Nous obtenons un excellent accord entre les valeurs calculées et les valeurs expérimentales, compte tenu de l'approximation monodimensionnelle.

2. ÉLÉMENTS DE THÉORIE

Nous avons précédemment démontré en nous inspirant de la méthode de Coursant [8] que les contraintes T_A et T_B sur les faces d'un éléments piézoélectriques vibrant en épaisseur (fig. 1) sont reliées aux vitesses acoustiques U_A et U_B par le système d'équations ci-dessous (1) en régime harmonique de pulsation ω [1], où a est l'épaisseur et A la surface de l'élément, h est la constante piézoélectrique de contrainte, $\gamma = \alpha + j\beta$ est la fonction de propagation, avec α le coefficient d'atténuation et la constante de phase $\beta = \omega/v^D$, v^D étant la vitesse à champ D constant (à charge constante); $Z_0 = \rho v^D$ est l'impédance acoustique caractéristique, V et I sont respectivement les amplitude de tension et de courant, et C_0 est la capacité de l'élément bloqué (à déformation constante).

$$\begin{bmatrix} T_A \\ T_B \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -G & H & -h/(j\omega A) \\ -H & G & -h/(j\omega A) \\ h/(j\omega) & -h/(j\omega) & 1/(j\omega C_0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ I \end{bmatrix} \quad (1)$$

avec: $G = \frac{Z_0}{\tanh(\gamma a)}$ et $H = \frac{Z_0}{\sinh(\gamma a)}$

Dans le **mode émetteur**, les relations suivantes s'appliquent aux interfaces entre la contrainte T , la vitesse acoustique U et les impédances des milieux adjacents :

$$T_A = +Z_{-1}U_A \quad T_B = -Z_1U_B \quad (2)$$

Si la tension en circuit ouvert et l'impédance de la source sont respectivement V_s and Z_s , nous avons aussi:

$$V = V_s - Z_s I \quad (3)$$

Considérons le système simple représenté dans la figure 2 formé de deux éléments piézoélectriques 1 et 2 de polarisation P raccordés à une source de tension idéale V . La méthode élaborée consiste à appliquer le système d'équations (1) à chaque élément, l'autre étant court-circuité, puis à appliquer le théorème de superposition comme suit.

1- L'élément 1 est supposé actif (relié à source de tension V) et l'élément 2 supposé passif (relié à une source nulle). La vitesse de propagation dans 2 est alors v^E , la vitesse à champ E constant. On calcule alors de la façon habituelle [1,2] les vitesses acoustiques requises

$$U'_{1A}, \quad U'_{1B} = U'_{2A}, \quad U'_{2B}$$

De la même façon, avec 1 passif et 2 actif, on calcule les vitesses acoustiques

$$U''_{1A}, \quad U''_{1B} = U''_{2A}, \quad U''_{2B}$$

Les vitesses acoustiques des faces sont alors:

$$U_{1A} = U'_{1A} + U''_{1A} \quad U_{1B} = U_{2A} = U'_{1B} + U''_{1B} \quad U_{2B} = U'_{2B} + U''_{2B} \quad (4)$$

2- Pour le premier élément (1) d'épaisseur a_1 , les contraintes, les vitesses acoustiques, la tension V et le courant I_1 sont reliés par le système d'équations suivant:

$$\begin{bmatrix} T_{1A} \\ T_{1B} \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -G_1 & H_1 & -h/(j\omega A) \\ -H_1 & G_1 & -h/(j\omega A) \\ h/(j\omega) & -h/(j\omega) & 1/(j\omega C_0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{1A} \\ U_{1B} \\ I_1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

où, $T_{1A} = +Z_0 U_{1A} \quad T_{1B} = -Z_d U_{1B} \quad V = V_s - Z_s I_1 \quad (6)$

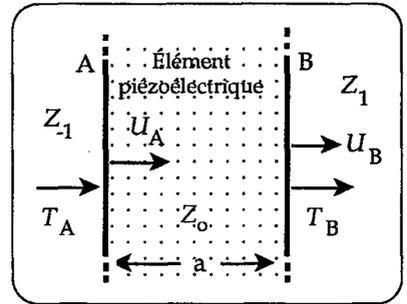


Figure 1

Figure 2

Système formé de deux éléments piézoélectriques électriquement en parallèle et mécaniquement en série.

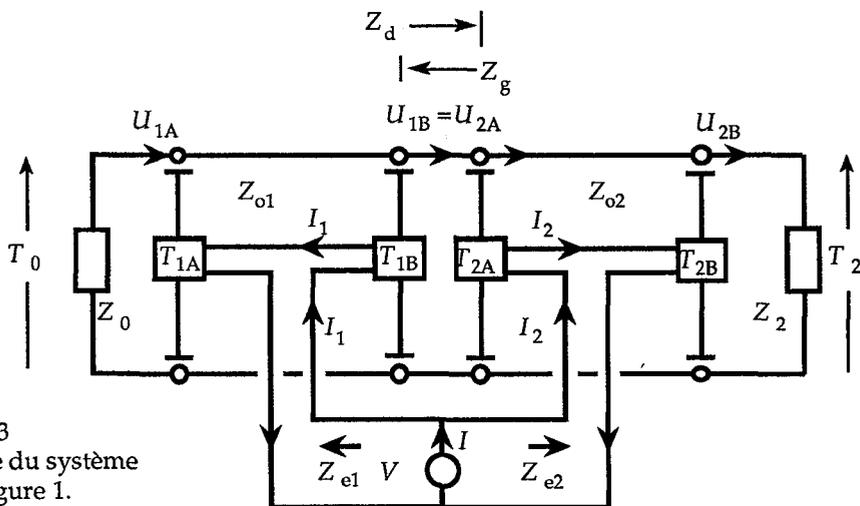
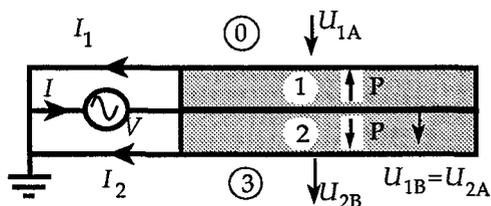


Figure 3
Modèle du système de la figure 1.

Avec Z_d l'impédance acoustique vue par 1 à droite [1,2], V_s la tension de la source en circuit ouvert, et Z_s l'impédance interne de la source. Mais, cette impédance doit être **nulle** afin de pouvoir appliquer le théorème de superposition: donc $V = V_s$. Dans le calcul de Z_d , l'élément 2 est court-circuité, alors, la vitesse de propagation dans cet élément est v^E .

3- Pour le deuxième élément (2), des relations correspondant à (5) et (6) s'appliquent à partir desquelles on peut calculer le courant I_2 :

$$\begin{bmatrix} T_{2A} \\ T_{2B} \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -G_2 & H_2 & -h/(j\omega A) \\ -H_2 & G_2 & -h/(j\omega A) \\ h/(j\omega) & -h/(j\omega) & 1/(j\omega C_o) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{2A} \\ U_{2B} \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

On en tire les impédances électriques de chaque élément dans le système:

$$Z_{e1} = \frac{V}{I_1} \quad \text{et} \quad Z_{e2} = \frac{V}{I_2} \quad (8)$$

Finalement:

$$Z_e = \frac{Z_{e1}Z_{e2}}{Z_{e1} + Z_{e2}} = \frac{V}{I_1 + I_2} \quad (9)$$

Cette méthode se généralise pour un nombre quelconque de milieux et de piézoélectriques, quelle que soit leur position dans le système. Avec n piézoélectriques, on calcule les vitesses acoustique simplement comme suit:

$$U_{1A} = \sum_{j=1}^n U_{1A}^{(j)} \quad U_{2A} = U_{1B} = \sum_{j=1}^n U_{2A}^{(j)} \quad \text{etc} \quad (10)$$

L'impédance électrique du système devient:

$$\frac{1}{Z_e} = \frac{1}{\sum_{j=1}^n Z_{ej}} = \frac{\sum_{j=1}^n I_j}{V} \quad (11)$$

3. RÉSULTATS

Nous avons vérifié expérimentalement, par mesure de l'impédance électrique de 0 à 2 ou $3f_r$, que cette méthode donne d'excellents résultats avec tous les systèmes auxquels l'approximation monodimensionnelle peut s'appliquer, dont le résonateur à 100 kHz mentionné au début. Nous l'avons vérifiée particulièrement avec un groupement de trois barreaux piézoélectriques de 6,33 mm de diamètre et 16 mm de longueur, collés bout-à-bout et mis électriquement en parallèle. Dans ce dernier cas, on peut faire varier la dispersion de la vitesse acoustique avec la fréquence suivant une loi simple pour obtenir un excellent accord dans un spectre de fréquence étendu.

4. BIBLIOGRAPHIE

- [1] DION, Jean-Luc, «New transmission line analogy applied to single and multilayered piezoelectric transducers», *IEEE Trans. Ultrasonics, Ferroel. Freq. Control*, v. 40, no 5 (1993), p. 577-583.
- [2] DION, J.L. et BRISSAUD, M., «Modélisation de moteurs piézoélectriques modulaires», *J. de Physique IV, Colloque C1, suppl. J. de Physique*, v. 2 (avril 1992), C1-373-376.
- [3] MARTIN, G.E., «On the theory of segmented electromechanical systems», *J. Acoust. Soc. Amer.*, v. 36, no 7 (1964), p. 1366-1370.
- [4] INOUE, T., SASAKI, T., MIYAMA, T., SUGIUCHI, K. et TAKAHASHI, S., «Equivalent circuit analysis for tonpiltz piezoelectric transducer», *Trans. IEICE*, v. E70, no 10 (1987), p. 909-916.
- [5] MASON, W.P., «Electromechanical Transducers and Wave Filters», Van Nostrand inc., New York, 1948.
- [6] SARVAZYAN, A.P. et CHALIKIAN. T.V., «Theoretical analysis of an ultrasonic interferometer for precise measurements at high pressures», *Ultrasonics*, v. 29 (1991), p. 119-124.
- [7] SARVAZYAN, A.P., SEL'KOV et CHALIKYAN, T.V., «Constant-path acoustic interferometer with transition layers for precision measurements in small liquid volumes», *Sov. Phys. Acoust.*, v. 34, no 6 (1988), p. 631-634.
- [8] COURSAnt, Roger Henri, «Les transducteurs ultrasonores», *Acta Electronica*, v. 22, no 2 (1979), p. 129-141.