

Modélisation d'un transducteur à film PVDF avec membrane rectangulaire

Dr. Hervé Lissek

LEMA, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, CH-1015 Lausanne, Suisse, Email : herve.lissek@epfl.ch

Introduction

Dans le cadre d'une application de contrôle actif visant à réduire des nuisances sonores de forts niveaux et de composition harmonique déterminée, un cahier des charges a été établi pour le développement des actionneurs et des capteurs. Nous avons été amenés à développer un microphone spécifique, répondant aux exigences d'encombrement et d'adaptation aux conditions extrêmes rencontrées dans l'application de contrôle actif, et capable de supporter les niveaux de pressions acoustiques sans distorsion. Nos recherches se sont dirigées vers des films PVDF. Nous nous proposons de présenter le transducteur envisagé pouvant répondre aux spécifications acoustiques requises, au moyen d'un modèle électroacoustique et de simulations numériques. Nous verrons les perspectives qu'offre ce type de microphone dans le cadre très contraignant de la lutte active contre le bruit.

Cahier des charges du microphone

La signature acoustique du bruit contre lequel le dispositif de contrôle actif a été développé se caractérise par un spectre de raies harmoniques dans la bande [400 Hz- 2500 Hz], de forts niveaux de pressions dans cette bande (de 130 à 150 dB), et une émergence au-dessus de 3000 Hz qui n'est pas corrélée au champ sonore primaire, et susceptible d'entraîner des produits de distorsion d'intermodulation dans le domaine du contrôle actif ([400 Hz-2500 Hz]). L'un des objectifs du développement de ce microphone est la réjection de cette composante, au moyen d'un filtre acoustique spécifique.

Description du transducteur

Le transducteur est composé d'une membrane et d'une enceinte en laiton, de section rectangulaire (dimensions a et b , surface S) et de hauteur h . La membrane est une plaque d'aluminium (d'épaisseur e et de masse volumique ρ_{al}), sur les deux faces de laquelle sont collés deux films PVDF de masse négligeable [1].

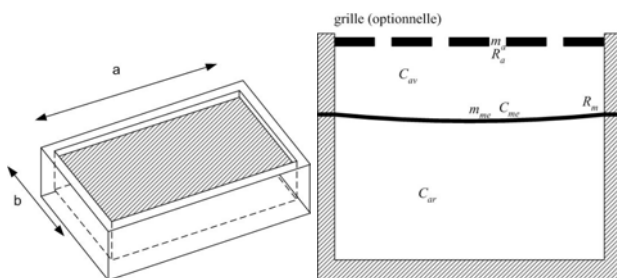


Figure 1: description du microphone

Partie mécanique

Les données mécaniques du problème sont donc :

- la masse équivalente de la membrane m_e ,

- la compliance mécanique équivalente de la membrane C_{me}
La masse équivalente et la compliance équivalente de la plaque d'aluminium sont dérivées du principe de Hamilton consistant à écrire analytiquement l'énergie cinétique et l'énergie potentielle de déformation de la plaque, en faisant certaines hypothèses sur les déplacements de la plaque.

Il vient :

$$\begin{cases} m_e = \frac{9}{64} \rho_{al} \cdot a \cdot b \cdot e = \frac{9}{64} m_{plaque} \\ C_{me} = \frac{16a^3}{E \cdot b \cdot h^3} \cdot \frac{(1-\nu^2)}{\pi^4 \left(1 + \frac{2}{3} \left(\frac{a}{b} \right)^2 + \left(\frac{a}{b} \right)^4 \right)} \end{cases} \quad (1)$$

où E désigne le module d'Young du matériau, ν son coefficient de Poisson.

Partie acoustique

Si nous ne considérons que la face avant, sans filtre acoustique, la membrane rayonne dans un demi-espace infini. L'impédance acoustique de rayonnement d'une plaque rectangulaire, rapport de la pression p sur le débit acoustique q est décrite [2] par la relation suivante :

$$Z_{ar} = \frac{p}{q} = \frac{\rho c}{S} (r + i\chi) = R_{ar} + i\omega m_{ar} \quad (2)$$

$$\text{où } \begin{cases} r = \frac{a^2 \theta_{\Xi}(ka) - b^2 \theta_{\Xi}(kb)}{a^2 - b^2} \\ \chi = -\frac{a^2 \chi_{\Xi}(ka) - b^2 \chi_{\Xi}(kb)}{a^2 - b^2} \end{cases}$$

$$\text{avec } \begin{cases} \theta_{\Xi}(z) = 1 - 4 \left(\frac{1 - J_0(z)}{z^2} \right) \\ \chi_{\Xi}(z) = \frac{8}{\pi z} \left(1 - \frac{\pi}{2z} M_0(z) \right) \end{cases}$$

où J_0 représente la fonction de Bessel d'ordre 0 et M_0 la fonction de Struve d'ordre 0. Nous en déduisons alors la résistance acoustique de rayonnement R_{ar} ainsi que la masse acoustique de rayonnement m_{ar} sur la face avant du transducteur.

La compliance acoustique correspondant au volume de charge arrière V_{ar} formé par l'enceinte a pour expression :

$$C_{ar} = \frac{V_{ar}}{\rho c^2}$$

Le filtre acoustique proposé pour atténuer l'influence de la composante perturbatrice sur la réponse du microphone consiste en une grille disposée devant la membrane. Les paramètres de ce filtre sont le nombre de trous et leur dimension, l'épaisseur de la grille, et le volume formé par le boîtier du microphone, la membrane et la grille.

Les masses et résistances acoustiques des trous de la grille sont notées m_a et R_a [3] :

$$R_a = 8\eta l / (\pi r^4) \quad (4)$$

$$m_a = 4\rho l / (3\pi r^2)$$

où η est la viscosité de l'air, ρ la densité de l'air, l l'épaisseur de la grille, et r le rayon d'un trou. La compliance acoustique du volume avant est analogue à C_{ar} .

Il est à noter que le volume de charge total doit être suffisamment grand pour rendre le microphone le moins sensible aux variations de pression atmosphérique (l'équivalent mécanique de cette compliance doit être supérieure à au moins dix fois la compliance mécanique équivalente de la membrane, voir (1)).

Modèle acousto-mécanique

Considérons le transducteur de la Figure 1. Le schéma mécanique équivalent, tenant compte du rayonnement acoustique avant et arrière est celui de la Figure 2.

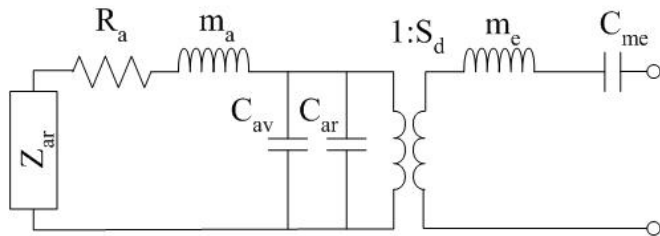


Figure 2: schéma équivalent de la transduction acousto-mécanique

Il est alors pratique, pour la suite des calculs, de ne considérer que l'équivalent mécanique Z'_m de l'ensemble acousto-mécanique composant le microphone.

Conversion électromécanique

En considérant un amplificateur de charge à la sortie électrique du microphone, imposant une tension de sortie nulle et permettant de simplifier l'expression du couplage électromécanique du matériau piézoélectrique, les équations du couplage reliant le déplacement de la membrane ξ , à la charge Q du matériau deviennent :

$$Q = d' \cdot \frac{\xi}{C_{me}} \quad (5)$$

$$\text{avec } d' \approx d_{31} \cdot \frac{(1 + \nu) \cdot S / \pi}{4 \cdot n \cdot e^2}$$

où d_{31} représente le module de piézoélectricité du matériau, n le rapport entre le module d'Young de la plaque et celui du matériau piézoélectrique, et e l'épaisseur de la membrane.

La sensibilité du microphone s'exprime alors simplement, d'après (5) :

$$M = G \cdot d' \cdot \frac{1}{i \cdot \omega \cdot C_{me} \cdot Z'_m} \quad (6)$$

où G est le gain de l'amplificateur de charge (en V/C) donné par le constructeur, et Z'_m est l'impédance mécanique équivalente que le microphone présente au champ acoustique (voir Figure 2).

Résultats de simulation

L'objectif du calcul consiste à dimensionner les paramètres physiques du microphone et de la grille, de manière à accorder le filtre sur la fréquence perturbatrice.

Nous avons effectué un calcul numérique, avec le logiciel Matlab, de la sensibilité d'un tel microphone, avec une membrane rectangulaire en aluminium, de longueur 40 mm pour 30 mm de largeur, d'épaisseur 150 μ m, dans un boîtier de volume total 12 cm³. Le gain de l'amplificateur de charge a été pris égal à 10⁷ V/C. Afin d'observer l'influence du filtre, nous avons calculé la sensibilité du microphone avec et sans grille, d'épaisseur 1 mm, comportant 50 trous circulaires occupant la moitié de la surface de rayonnement. Les résultats sont illustrés sur la Figure 3.

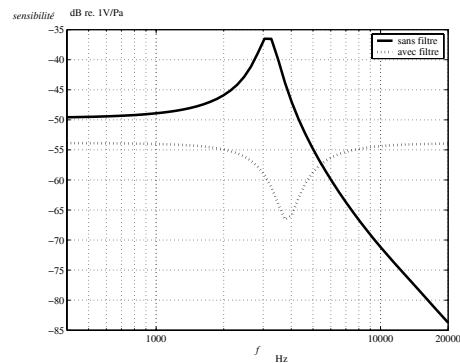


Figure 3: calcul de la sensibilité d'un microphone rectangulaire

Nous observons que, pour ces dimensions, la sensibilité du microphone est égale à 2mV/Pa (-54 dB à ± 3 dB) dans la bande [400-2500 Hz], et le réglage du filtre permet d'éliminer la composante susceptible d'engendrer de la distorsion d'intermodulation dans la bande de travail. En outre, nous voyons que les effets de la résonance de la membrane dans la bande utile disparaissent grâce à ce filtre acoustique.

Conclusions

L'objectif de cette étude est de s'affranchir des effets de distorsion d'intermodulation, entre un bruit déterminé et une fréquence pure située en dehors de la bande fréquentielle de travail d'un dispositif de contrôle actif. Cette tâche est pratiquement impossible avec des filtres électriques en sortie de microphone. Un moyen d'y parvenir est de recourir à un résonateur acoustique réglé sur la fréquence perturbatrice, tout en n'affectant pas la réponse du microphone dans la bande de travail.

REFERENCES :

- [1] BEURER F., "Transducteurs à films piézoélectriques", Travail pratique de diplôme, février 2002
- [2] MORSE P., INGARD K., "Theoretical acoustics", Mc-Graw-Hill ed., USA, 1968
- [3] ROSSI M., "Traité d'électricité volume XXI : Electroacoustique", Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 1986