



**HAL**  
open science

## Modélisation d'une architecture innovante de microphone MEMS à détection par nano jauges

Thierry Verdot, Cécile Guianvarc'H, Jaroslaw Czarny, Emmanuel Redon, Kerem Ege, Jean-Louis Guyader

### ► To cite this version:

Thierry Verdot, Cécile Guianvarc'H, Jaroslaw Czarny, Emmanuel Redon, Kerem Ege, et al.. Modélisation d'une architecture innovante de microphone MEMS à détection par nano jauges. XXI<sup>e</sup> Congrès Français de Mécanique (CFM 2013), Aug 2013, Bordeaux, France. pp.6. hal-00823986

**HAL Id: hal-00823986**

**<https://hal.science/hal-00823986v1>**

Submitted on 18 May 2016

**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.

# Modélisation d'une architecture innovante de microphone MEMS à détection par nano jauges

T. Verdot<sup>a</sup>, C. Guianvarc'h<sup>a</sup>, J. Czarny<sup>a,b</sup>, E. Redon<sup>a</sup>, K. Ege<sup>a</sup>, J.-L. Guyader<sup>a</sup>

a. Laboratoire Vibrations Acoustique, INSA-Lyon, 25 bis avenue Jean Capelle, F-69621  
VILLEURBANNE Cedex, France

## Résumé :

*La plateforme technologique M<sup>3</sup>NEMS développée au CEA-LETI permet d'intégrer des nano fils de Silicium employés comme jauges de contrainte en exploitant l'effet piézorésistif [1]. Ce principe de détection est adapté pour la réalisation de capteurs auditifs miniaturisés destinés à des applications dans le domaine médical ou l'électronique grand public. Le microphone MEMS étudié possède une architecture originale qui fait intervenir des structures mécaniques sensibles oscillant dans le plan du substrat. Après la description du principe de fonctionnement, cet article présente la démarche de modélisation employée pour la prise en compte des conditions aux limites mécaniques et thermiques, et des phénomènes de diffusion dans les couches limites thermiques et visqueuses. Son implantation dans un code éléments finis permet le calcul numérique de la sensibilité en pression du microphone. Les solutions des simulations sont interprétées en se focalisant sur les phénomènes influant sur la sensibilité de cette nouvelle architecture de capteur.*

## Abstract :

*A new concept of microphones developed by CEA-LETI uses membranes moving in the plane of the substrate and inducing strain on piezoresistive Si nano-gauges [1] (M<sup>3</sup>NEMS technology). This detection principle is adapted for the realization of miniature sensors for medical applications or consumer electronics. After the description of the original design and the functioning of the MEMS microphone under study, this article presents the model developed which takes into account mechanical and thermal boundary conditions, and phenomena of viscous and thermal diffusion in air (boundary layers). Its implementation in a numerical FEM model allows to calculate the sensibility in pressure of the microphone. Solutions of simulations are interpreted by focusing on phenomena influencing the sensibility of this novel sensors design.*

**Mots clefs :** microphone ; effets visqueux ; couplage multi-physique.

## 1 Introduction

La miniaturisation des microphones constitue un enjeu important dans le domaine médical (implants auditifs) ou de l'électronique grand public (téléphones portables). La réduction de la surface du diaphragme constitue actuellement une limite fondamentale à la miniaturisation des microphones fonctionnant en incidence normale. Pour remédier à cette difficulté, le projet MADNEMS étudie une architecture originale fondée sur l'utilisation de structures mécaniques sensibles oscillant dans le plan du substrat.

La prédiction de la sensibilité de ce type de capteur nécessite une modélisation fine du comportement acoustique de l'air contenu dans le microsystème. Elle doit notamment prendre en compte les effets visqueux (de cisaillement) et de conduction thermique, influents à cette échelle au cours de la propagation de l'onde acoustique, pour être en mesure de déterminer avec précision la distribution des contraintes s'exerçant les structures mécaniques sensibles situées à l'intérieur du dispositif.

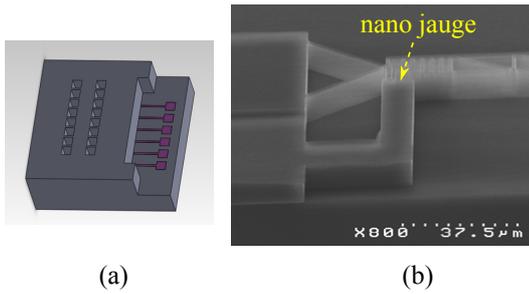


FIG. 1 – Vue d'ensemble du microphone réalisé au CEA, LETI (a) intégrant des microstructures équipées d'une nano jauge (b)

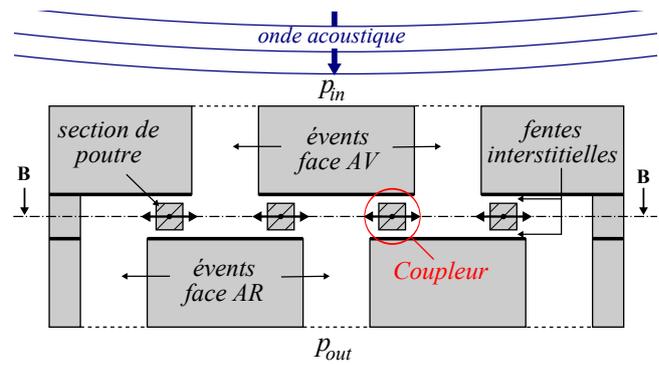


FIG. 2 – Coupe dans l'épaisseur (AA) montrant l'empilement des couches et le circuit de circulation de l'air (Coupe (BB) en FIG. 3)

Suite à la description du microphone et de son principe de fonctionnement, l'article présente la démarche de modélisation employée pour la prise en compte des conditions aux limites mécaniques et thermiques, et des phénomènes de diffusion visqueuse et thermique dans l'air (couches limites). Son implantation dans un code éléments finis permet le calcul numérique de la sensibilité en pression du microphone. Les solutions des simulations sont interprétées en se focalisant sur les phénomènes influents sur la sensibilité de cette nouvelle architecture de capteur.

## 2 Architecture et principe de fonctionnement

Le prototype de microphone étudié est représenté en FIG. 1. L'ensemble, d'encombrement réduit  $1.5 \times 1.5 \times 0.6 \text{ mm}^3$ , est réalisé par un procédé de fabrication en salle blanche permettant d'intégrer des structures sensibles équipées d'une nano jauge FIG. 1 (b).

Le microsysteme est constitué d'un empilement de trois couches de silicium représentées dans le plan de coupe en FIG. 2. Les événements réalisés en face avant (capot) débouchent sur l'environnement extérieur. Ils constituent l'entrée du système, soumise à une fluctuation de pression  $p_{in}$  due à l'onde acoustique incidente. Les événements gravés à travers la couche arrière débouchent, avec une pression acoustique de sortie  $p_{out}$ , sur une cavité fermée délimitée par le package encapsulant le microphone et son électronique de mesure. Ces événements communiquent par l'intermédiaire de fentes minces (coupleurs) où sont disposées les structures mécaniques sensibles qui se déplacent dans le plan.

La disposition des structures sensibles est précisée dans le plan de coupe en FIG. 3. Ces structures ont une architecture identique, détaillée en FIG. 4. Chaque structure est constituée d'une poutre dont les faces latérales (de surface  $S_m$ ) sont soumises à un différentiel de pression. Elles sont liées au substrat par une charnière flexible (FIG. 1b) qui les autorise à osciller dans le plan du dispositif.

Les poutres disposent d'une jauge de contrainte de section nanométrique (d'aire  $S_j$ ). Localisée à une distance  $d$  de l'axe de rotation, elle tend à s'opposer à la rotation de la poutre qui constitue alors un obstacle aux fluctuations acoustiques dans l'air. Les effets visqueux qui interviennent dans les fentes interstitielles (FIG. 2) s'opposent au contournement de l'obstacle et maintiennent le différentiel de pression appliqué de part et d'autre des structures. Les jauges subissent ainsi une contrainte axiale importante qui correspond au différentiel de pression amplifié par effet de bras de levier comme illustré en FIG. 4.

Le signal de mesure est obtenu en insérant les jauges dans un pont de Wheatstone représenté en FIG. 3. Lorsqu'une tension de polarisation constante  $V_b$  est imposée en entrée du pont de jauges, la fluctuation de tension  $u_m$  mesurée en sortie est liée à la variation de résistance des jauges. Ce montage exploite l'effet piézorésistif. En notant  $R_0$  la résistance des jauges non-contraintes, la variation de résistance  $\Delta R_i$  dans chaque jauge est proportionnelle à sa contrainte axiale  $\Delta R_i/R_0 = \Pi_{pzt} \sigma_i$  où  $\Pi_{pzt}$  désigne le coefficient de piézorésistivité.

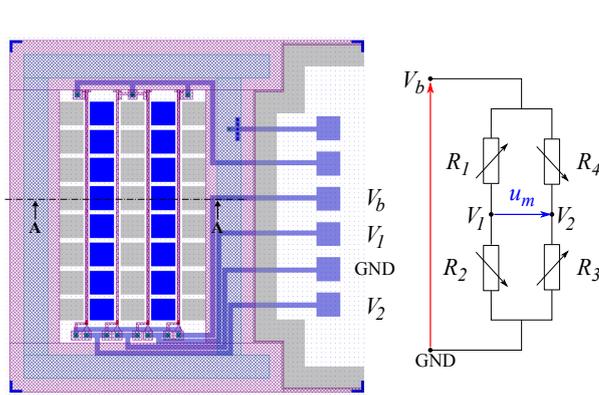


FIG. 3 – Coupe dans le plan de la couche intermédiaire (BB) montrant la disposition des structures sensibles et les connexions électriques réalisant le pont de jauges. (Coupe (AA) en FIG. 2)

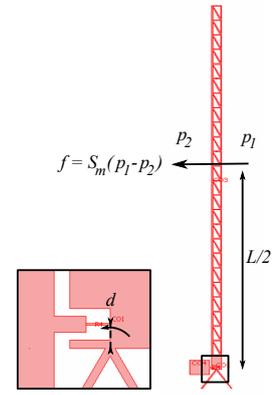


FIG. 4 – Effet de bras de levier assuré par les microstructures mécaniques.

La sensibilité en pression du microphone, correspond au transfert entre la fluctuation de pression harmonique à l'entrée du microphone  $p_{in}(\omega)$  et la fluctuation de tension mesurée en sortie  $u_m(\omega)$ . Pour les fréquences inférieures à la fréquence de résonance des structures mécanique, elle a pour expression :

$$\frac{u_m(\omega)}{p_{in}(\omega)} \approx \Pi_{pzt} V_b \frac{K_J d^2}{C + K_J d^2} \left[ \frac{L/2}{d} \right] \left[ \frac{S_m}{S_J} \right] \frac{p_{in}(\omega) - p_{out}(\omega)}{p_{in}(\omega)} \quad (1)$$

L'emploi du principe de détection par nano jauges permet de bénéficier d'une amplification en cascade faisant intervenir (a) l'effet de bras de levier  $L/(2d)$  (de l'ordre de  $10^2$ ) et (b) la concentration des contraintes dans les jauges associée au rapport entre les surfaces d'échange  $S_m/S_j$  (de l'ordre de  $10^5$ ). La sensibilité finale du capteur repose sur la capacité des phénomènes visqueux à générer et entretenir le différentiel de pression au niveau des coupleurs.

### 3 Démarche employée pour la modélisation du MEMS

Une difficulté spécifique posée par un microphone à détection par nano jauges réside dans la nécessité d'opérer le couplage d'un modèle acoustique en fluide viscothermique avec les structures mécaniques sensibles. La démarche proposée permet de résoudre simultanément les équations de propagation acoustique en milieu thermovisqueux et celles d'une structure mécanique sensible tout en assurant la continuité des vitesses sur les interfaces fluide-structure. Sa mise œuvre est illustrée pour le modèle simplifié 2D des figures 5 et 6 représentatif du comportement d'un microphone à détection par nano jauges.

#### 3.1 Modélisation de l'acoustique en fluide thermovisqueux

Les phénomènes diffusifs liés à la viscosité et à la conductivité thermique de l'air sont essentiellement localisés au voisinage des parois, dans les couches limites, et leurs effets sur la propagation acoustique peuvent être négligés dans de nombreuses applications. Dans les microsystèmes, les couches limites thermiques et visqueuses occupent une grande partie de l'espace et l'étude du comportement acoustique de l'air fait alors appel à l'emploi de modèles adaptés à la prise en compte de ces phénomènes [2, 3].

Ces modèles font intervenir les paramètres thermodynamiques décrivant les conditions ambiantes du milieu de propagation (la pression statique  $P_0$ , la température  $T_0$ , la masse volumique  $\rho_0$  de l'air au repos et  $c_p$  sa capacité calorifique à pression constante). Leur formulation repose sur un système d'équations couplées, obtenu en linéarisant les bilans de quantité de mouvement (2), d'énergie (3) et de masse (4) au voisinage de l'état d'équilibre et exprimé en termes de fluctuations de vitesse  $\mathbf{v}$ , de

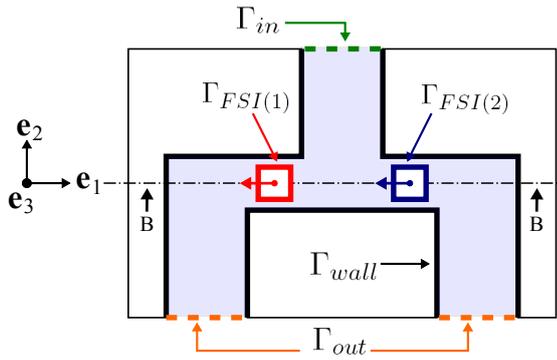


FIG. 5 – Coupe dans l'épaisseur (AA) : domaine fluide (en bleu) et dénomination des frontières de l'équation (5).

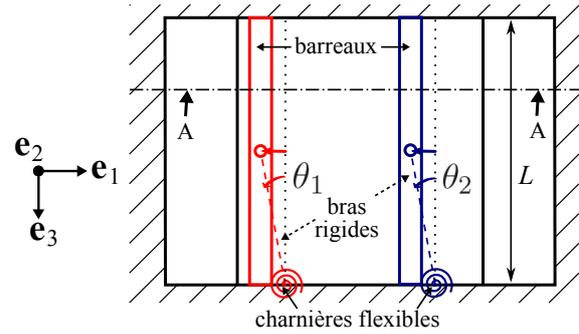


FIG. 6 – Coupe dans le plan (BB) de la FIG. 5 montrant les structures mécaniques du modèle 2D (en trait plein) décrites en section 3.3.

pression  $p$  et de température  $\tau$  :

$$\rho_0 \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} = -\nabla p + \nabla \cdot \underline{\underline{\sigma}}_v \quad (2)$$

$$\rho_0 c_P \frac{\partial \tau}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} = -\nabla \cdot \mathbf{q} \quad (3)$$

$$-\frac{1}{T_0} \frac{\partial \tau}{\partial t} + \frac{1}{P_0} \frac{\partial p}{\partial t} = -\nabla \cdot \mathbf{v} \quad (4)$$

Les phénomènes de diffusion de chaleur et de quantité de mouvement font respectivement intervenir le flux de chaleur entrant  $\mathbf{q}$  et le tenseur des contraintes visqueuses  $\underline{\underline{\sigma}}_v$ . La loi de Fourier est employée pour exprimer le flux de chaleur sous la forme  $\mathbf{q} = -\lambda \nabla \tau$  (où  $\lambda$  désigne la conductivité thermique de l'air). L'air est supposé se comporter comme un fluide newtonien (de coefficients de viscosité de volume  $\eta$  et de cisaillement  $\mu$ ) ce qui permet d'écrire  $\underline{\underline{\sigma}}_v = \eta (\nabla \cdot \mathbf{v}) \underline{\underline{1}} + \mu (\underline{\underline{\nabla}} \mathbf{v} + \underline{\underline{\nabla}} \mathbf{v}^t)$ .

L'équation (5) précise les conditions aux limites appliquées sur les frontières du domaine fluide de la FIG. 5 (où  $\mathbf{n}$  désigne le vecteur unitaire, sortant du domaine fluide et normal à l'interface considérée).

- Sur les frontières d'entrée  $\Gamma_{in}$  et de sortie  $\Gamma_{out}$ , les contraintes internes ( $\underline{\underline{\sigma}} = -p \underline{\underline{1}} + \underline{\underline{\sigma}}_v$ ) équilibrent la pression extérieure. On suppose qu'il n'y a pas d'échange de chaleur (condition adiabatique).
- Les interfaces fluide-structure sont supposées de température constante ( $\tau = 0$ ). La vitesse des parois est imposée au fluide : elle correspond à la vitesse des barreaux (où  $\Omega_i$  est la vitesse de rotation du  $i$ -ème bras définie en (7) ) sur les interfaces fluide-structure  $\Gamma_{FSI(i)}$  ; elle est nulle sur les parois rigides  $\Gamma_{wall}$ .

$$\Gamma_{in} \begin{cases} \underline{\underline{\sigma}} \mathbf{n} = -p_{in} \mathbf{n} \\ \mathbf{q} \cdot (-\mathbf{n}) = 0 \end{cases} \quad \Gamma_{out} \begin{cases} \underline{\underline{\sigma}} \mathbf{n} = -p_{out} \mathbf{n} \\ \mathbf{q} \cdot (-\mathbf{n}) = 0 \end{cases} \quad \Gamma_{FSI(i)} \begin{cases} v_1 = -\frac{L}{2} \Omega_i \\ v_2 = 0 \\ \tau = 0 \end{cases} \quad \Gamma_{wall} \begin{cases} \mathbf{v} = \mathbf{0} \\ \tau = 0 \end{cases} \quad (5)$$

A partir des travaux reportés dans [2], nous avons établi la formulation faible associée aux équations locales (dans le domaine et sur les frontières) en employant la méthode des résidus pondérés. Elle est implantée dans le code éléments finis COMSOL 3.4 pour construire le modèle numérique du cas test. La construction du modèle éléments finis emploie des éléments de Lagrange. Le choix des fonctions d'interpolation respecte la condition Inf-Sup mentionnée par [2] : quadratiques pour les champs de vitesse et de température et linéaire pour les champs de pression. Conformément aux préconisations indiquées dans [4], un raffinement du maillage est opéré au voisinage des parois du substrat pour obtenir un nombre suffisant d'éléments dans les couches limites. Dans l'étude d'un microphone à détection par nano jauges, il est également indispensable d'employer un maillage très dense dans les coupleurs où les effets visqueux et le couplage fluide-structure interviennent de manière déterminante.

Employée dans le cadre d'une étude précédente [5], cette formulation variationnelle est adaptée ici à la prise en compte du couplage avec les structures mécaniques et la cavité arrière.

### 3.2 Couplage de la cavité arrière

La cavité arrière (non représentée en FIG. 5) possède des dimensions faibles par rapport aux longueurs d'onde considérées (audibles). La pression  $y$  est supposée homogène et sa fluctuation  $p_{cav}$  gouvernée par la loi de conservation de la masse (6) écrite en introduisant la souplesse acoustique équivalente de la cavité ( $C_{cav}$ ) et en identifiant le débit entrant dans la cavité à celui sortant du microsystème.

$$C_{cav} \frac{\partial p_{cav}}{\partial t} = L \int_{\Gamma_{out}} \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} d\ell \quad (6)$$

La pression de la cavité correspond à la pression imposée sur la frontière  $\Gamma_{out}$  du microsystème ( $p_{out} = p_{cav}$  dans (5)).

### 3.3 Couplage avec les structures mécaniques

Les barreaux de section homogène et de longueur  $L$  de la FIG 6 jouent le rôle des structures mécaniques sensibles. Guidés à leurs extrémités, ils sont rotulés à un bras rigide sans masse lié au substrat par une charnière flexible de raideur  $C$ . Les bras articulés sont équipés de jauges de raideur  $K_J$  dont l'axe est localisé à une distance  $d$  de la charnière. La masse attribuée aux barreaux est  $M = J/(L/2)^2$  où  $J$  représente l'inertie des poutres de la FIG. 4. En notant  $\theta_i$  et  $\Omega_i$  l'angle et la vitesse angulaire du  $i$ -ème bras, le théorème du moment dynamique appliqué au bras (exprimé sur l'axe de la charnière) est écrit sous la forme du système d'état :

$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} 0 & J \\ J & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_i \\ \Omega_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(C + K_J d^2) & 0 \\ 0 & J \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_i \\ \Omega_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L/2 \\ 0 \end{bmatrix} (-r_i) \quad (7)$$

$(-r_i)$  désigne la résultante des efforts imposés par l'air sur le barreau en réaction à la vitesse imposée en (5). Son expression, donnée en (8) inclut les effets de cisaillement visqueux et de la pression.

Le couplage fluide-structure intervient sur les frontières  $\Gamma_{FSI(i)}$  : la résultante des efforts imposés par l'air sur le barreau en réaction à sa vitesse imposée en (5) est évaluée à partir des contraintes calculées dans l'air. Son expression (8) inclut les effets des contraintes visqueuses et du champ de pression. Elle se limite ici à la composante selon la direction  $\mathbf{e}_1$  (précisée en figures 5 et 6) où se produit le mouvement des barreaux.

$$r_i = L \int_{\Gamma_{FSI(i)}} \mathbf{e}_1 \cdot (-p\mathbf{n} + \sigma_v \mathbf{n}) d\ell \quad (8)$$

## 4 Résultats

Le passage de la formulation du domaine temporel au domaine fréquentiel demande peu d'aménagements et a été opéré pour simuler la réponse du système à une fluctuation de pression harmonique (d'amplitude 1Pa). Les solutions obtenues dans le coupleur à 1kHz et 12kHz (FIG. 7) montrent l'aptitude des effets de viscosité de cisaillement à maintenir un différentiel de pression de part et d'autre de la structure sensible. Les profils de vitesse particulière dans la fente démontrent que la formulation réalise le couplage fluide-structure avec succès. A 1kHz, la vitesse d'oscillation de la structure est faible et le profil de vitesse particulière qui s'établit dans les fentes est essentiellement dû au différentiel de pression ; son profil se rapproche de celui d'un écoulement de Poiseuille (parabolique dans l'épaisseur). Au voisinage de la fréquence de résonance de la structure (à 12kHz) sa vitesse d'oscillation très importante est communiquée à l'air. Le profil de vitesse est similaire à celui d'un écoulement de Couette (linéaire dans l'épaisseur).

La courbe de sensibilité (FIG. 8) de la structure test présente des résultats conformes aux attentes : la fréquence de résonance des structures mécaniques détermine la borne supérieure de la bande passante. La fréquence de coupure qui détermine la borne inférieure de la bande passante est conditionnée par la résistance visqueuse des fentes et des événements et par le volume de la cavité arrière. Pour les fréquences plus faibles, en l'absence d'une vitesse particulière suffisante, les phénomènes visqueux sont négligeables et ne peuvent pas créer le différentiel de pression dans le coupleur.

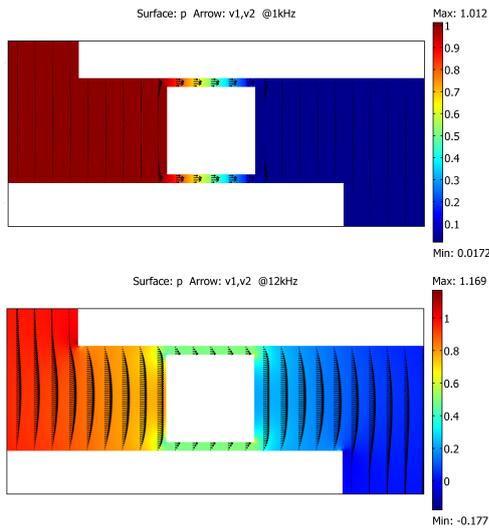


FIG. 7 – Champs de pression et profil de vitesse dans un coupleur à 1kHz et 12kHz

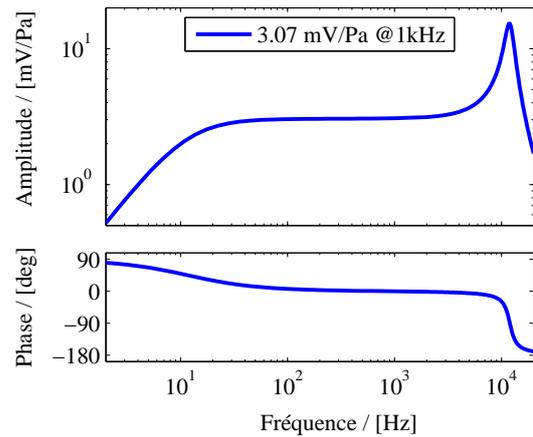


FIG. 8 – Sensibilité  $u_m/p_{in}$  du microphone simulé ( $V_b=1V$ ,  $\Pi_{pzt} = 0.4 \text{ GPa}^{-1}$ )

## 5 Conclusions et perspectives

La formulation variationnelle couplée permet de simuler simultanément le comportement acoustique de l'air et le comportement dynamique d'une structure mécanique sensible. Elle permet de déterminer précisément les réactions associées à la condition de continuité de vitesse au niveau des interfaces. L'emploi de cette formulation pour simuler le prototype en trois dimensions n'est malheureusement pas directement envisageable en raison de la dimension considérable du système à résoudre. Des modèles simplifiés (tels que *Low Reduced Frequency* [6]) peuvent être employés pour modéliser le comportement des tubes et limiter l'emploi de la formulation complète aux coupleurs où se concentrent les effets visqueux prédominants et où intervient le couplage avec les structures mécaniques.

## Remerciements

Ce travail a été mené grâce au financement de l'ANR à travers le projet MADNEMS ANR-11-NANO-026. Depuis 2011, le Laboratoire Vibrations Acoustique fait partie du LabEx CeLyA ("Centre Lyonnais d'Acoustique", ANR-10-LABX-60).

## Références

- [1] Walther, A., Savoye, M., Jourdan, G., Renaux, P., Souchon, F., Robert, P., Le Blanc, C. Delorme, N., Gigan, O. and Lejuste, C. 2012 3 axis gyroscope with Si nanogauge piezo-resistive detection. *in Proc. IEEE MEMS*
- [2] Kampinga, W.R. 2010 Viscothermal acoustics using finite elements - Analysis tools for engineers. *PhD Thesis, University of Twente* chap. 2, 31-40
- [3] Bruneau, M. and Scelo, T. (translator and contributor) 2006 Fundamentals of Acoustics. *ISTE, London*
- [4] Joly, N. 2010 Finite Element Modeling of Thermoviscous Acoustics on Adapted Anisotropic Meshes : Implementation of the Particle Velocity and Temperature Variation Formulation *Acta Acust. united Ac.* **96** 102-114
- [5] Guianvarc'h, C., Verdot, T., Czarny, J., Redon, E., Ege, K., Guyader, J-L., Walther, A. and Robert, P. 2013 New planar nano-gauge detection microphone : analytical and numerical acoustic modelling. *Proc. International Congress on Acoustics*
- [6] Kampinga, W.R., Wijnant, Y.H. and de Boer, A. 2011 An efficient finite element model for viscothermal acoustics. *Acta Acust. united Ac.* **97** 618-631