

Dynamique non-linéaire d'un transducteur capacitif ultrasonore micro-usiné à membrane circulaire

A. Jallouli, N. Kacem, P. LeMoal, G. Bourbon, J. Lardies

Institut FEMTO-ST UMR 6174, Département Mécanique Appliquée,
Université Bourgogne Franche-Comté, UBFC, 24 Chemin de l'Épitaphe 25000 Besançon

Résumé étendu

Récemment, les transducteurs capacitifs ultrasonores micro-usinés (CMUTs) ont attiré l'attention des scientifiques et des ingénieurs et ils ont été utilisés dans de nombreuses applications telles que la génération des images échographiques 2D et 3D [1], le contrôle non destructif [2] et le développement des capteurs de pression [3]. Les actionneurs capacitifs ont tendance à être plus utilisés que les actionneurs piézoélectriques et ceci est dû à leur faible impédance mécanique. En outre, les CMUTs peuvent être co-intégrés avec l'électronique, tandis que, pour les transducteurs piézoélectriques, l'intégration directe est généralement difficile. La résistance des CMUTs à des températures élevées constitue un avantage considérable, ce qui les rend adéquats aux applications à haute température telles que la surveillance des gaz d'échappement pour l'automobile.

Un CMUT est composé d'une micro-membrane, d'une électrode supérieure mobile (sur ou sous la membrane) et d'une électrode inférieure fixe. L'espace entre les parties fixe et mobile définit la cavité. Les vibrations de la membrane activée de manière électrostatique sont dues à l'application : d'une tension continue appelée tension de polarisation pour défléchir la micro-plaque mobile vers le bas et d'une tension alternative générant les vibrations de la membrane à l'origine d'ondes ultrasonores (Figure 1). Plusieurs géométries de CMUTs ont été proposées dans la littérature et Mendoza-Lopez et al. [4] ont montré qu'un CMUT circulaire a le déplacement de la membrane le plus important pour la même tension d'excitation. L'équation du mouvement pour une membrane circulaire homogène isotrope fixée au bord et excitée par une force électrostatique est exprimée par [5]:

$$\rho h \frac{\partial^2 \tilde{w}}{\partial \tilde{t}^2} + 2\tilde{c} \frac{\partial \tilde{w}}{\partial \tilde{t}} + D \nabla^4 \tilde{w} = \frac{1}{\tilde{r}} \frac{\partial}{\partial \tilde{r}} \left(\frac{\partial \tilde{w}}{\partial \tilde{r}} \frac{\partial \tilde{\Phi}}{\partial \tilde{r}} \right) + \tilde{\tau} h \nabla^2 \tilde{w} + \frac{\varepsilon_0 \tilde{v}^2(\tilde{t})}{2(d - \tilde{w})^2}$$

$$D \nabla^4 \tilde{\Phi} = \frac{\partial^2 \tilde{w}}{\partial \tilde{r}^2} \left(\frac{1}{\tilde{r}} \frac{\partial \tilde{w}}{\partial \tilde{r}} \right)$$

avec

$$\nabla^4 = \left(\frac{\partial^2}{\partial \tilde{t}^2} + \frac{1}{\tilde{r}} \frac{\partial}{\partial \tilde{r}} \right)^2$$

Le tilde désigne une quantité dimensionnelle, \tilde{w} est le déplacement transverse de la membrane, \tilde{c} est le coefficient d'amortissement, ρ est la masse volumique du matériau, h est l'épaisseur de la membrane, $\tilde{\Phi}$ est la fonction de contrainte, E est le module de Young, D est la rigidité en flexion de la plaque définie comme étant $D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$, ν est le coefficient de Poisson, d est la distance effective entre les électrodes supérieure et inférieure avec $d = d_g + h/\varepsilon_r$, d_g la distance réelle du gap, ε_r est la permittivité électrique de la membrane, ε_0 est la permittivité électrique du milieu entre la membrane et

l'électrode inférieure, $\tilde{\tau}$ est la contrainte résiduelle, et $\tilde{v}(\tilde{t})$ est la tension appliquée. Les conditions aux limites de la membrane sont:

$$\tilde{w}(R, \tilde{t}) = 0 ; \frac{\partial \tilde{w}(R, \tilde{t})}{\partial \tilde{r}} = 0 ; \tilde{w}(0, \tilde{t}) \text{ est borné}$$

$$\frac{\partial^2 \tilde{\Phi}(R, \tilde{t})}{\partial \tilde{r}^2} - \frac{\nu}{R} \frac{\partial \tilde{\Phi}(R, \tilde{t})}{\partial \tilde{r}} = 0 ; \tilde{\Phi}(0, \tilde{t}) \text{ est borné}$$

Afin d'étudier l'influence de certains paramètres d'excitation, on a tracé numériquement les réponses en fréquence du système en ne considérant que le premier mode vibratoire. Les paramètres physiques du CMUT sont présentés dans le Tableau 1. La Figure 2 présente l'évolution de la réponse en fréquence du CMUT pour diverses valeurs de la tension de polarisation V_{dc} avec $V_{ac} = 4.5V$. Puisque le terme d'excitation est proportionnel à V_{dc} , l'augmentation de la tension DC amplifie le déplacement de la micromembrane $\tilde{w}(r, t)$. En outre, la fréquence de résonance diminue en raison de la raideur négative qui est proportionnelle à V_{dc}^2 . De manière remarquable, à partir d'une valeur critique de V_{dc} , la réponse en fréquence du CMUT devient non-linéaire et la courbe penche vers la gauche (assouplissement) en raison de l'amplification des termes non-linéaires électrostatiques. Contrairement à l'effet de la tension de polarisation V_{dc} sur la réponse en fréquence du CMUT, la variation de la tension alternative a un effet sur l'amplitude d'excitation et un faible effet sur la raideur électrostatique négative. Par conséquent, les pics de résonance deviennent fortement non-linéaires pour des V_{ac} élevés sans aucun décalage en fréquence. Ce phénomène apparaît sur la Figure 3 pour une tension de polarisation de 100 V, où la réponse en fréquence présente un comportement raidissant.

Dans cette communication, un modèle numérique pour les oscillations non-linéaires d'un CMUT à membrane circulaire, sous résonance primaire est développé. Le modèle continu comprend des non-linéarités géométriques de Von Karman et des non-linéarités électrostatiques. La décomposition modale est utilisée pour transformer l'équation différentielle non-linéaire aux dérivées partielles en un système discret d'équations ordinaires qui est résolu numériquement en utilisant la méthode de la balance harmonique (HBM) et la méthode asymptotique numérique (ANM) [6]. Plusieurs simulations numériques ont été réalisées afin d'étudier l'influence des paramètres physiques sur la réponse en fréquence du MEMS capacitif. Le modèle développé est capable de prendre en compte l'ensemble des phénomènes non-linéaires d'un CMUT et d'analyser la différence entre les comportements raidissant et assouplissant [7]. En pratique, le modèle proposé peut être utilisé par les concepteurs afin de régler l'effet des non-linéarités pour améliorer les performances des CMUTs.

Tableau 1 : Les paramètres physiques du CMUT avec une membrane en Silicium Nitride (Si_3N_4).

$h(\mu m)$	$d_g(\mu m)$	$R(\mu m)$	ε_m	ν	$E(Gpa)$	$\rho(kg/m^3)$	Q	τ
0.6	1	25	9.7	0.23	250	3100	50	0

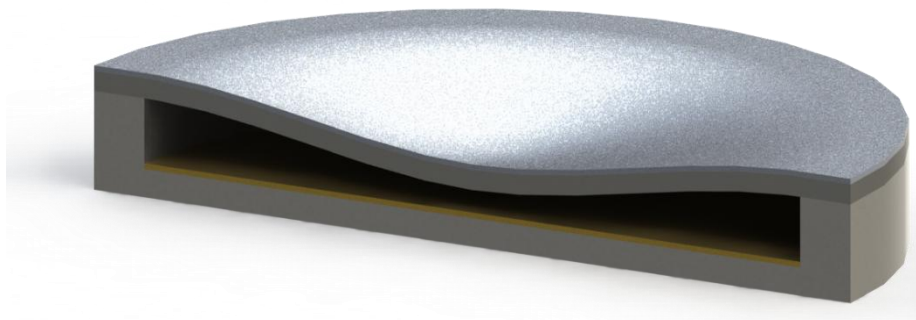


Figure 1 : Schéma d'une plaque circulaire fixée au bord électro-statiquement actionnée.

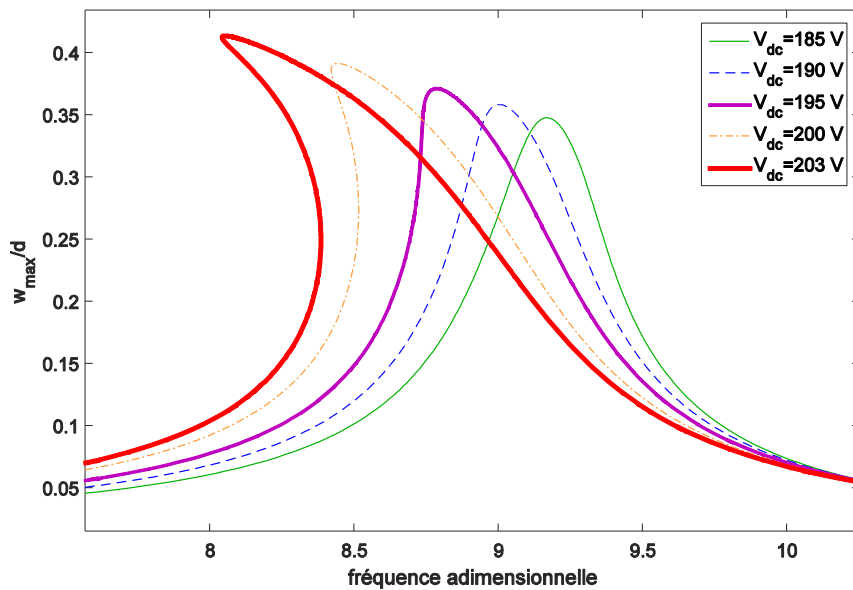


Figure 2 : Réponses en fréquence d'un CMUT pour $V_{ac} = 4.5V$ et plusieurs valeurs de V_{dc} .

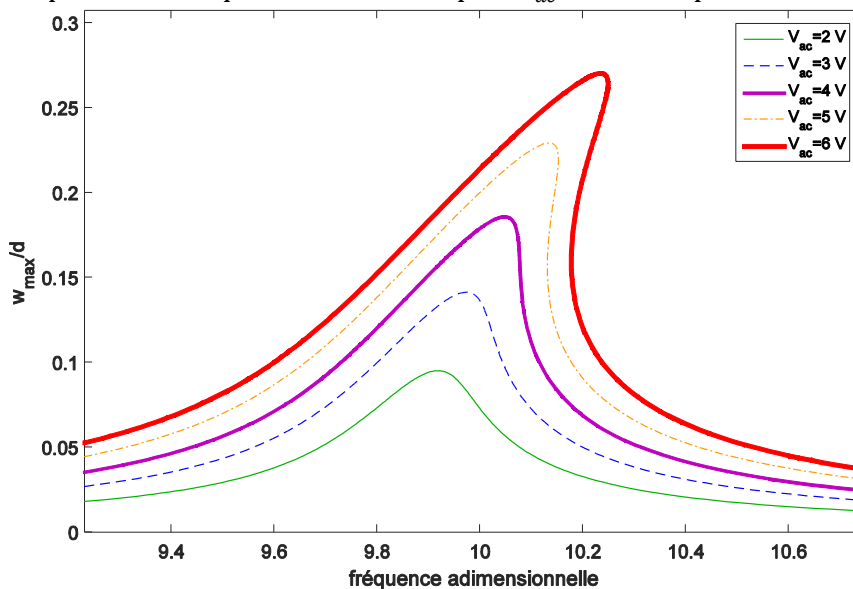


Figure 3 : Réponses en fréquence d'un CMUT pour $V_{dc} = 100V$ et plusieurs valeurs de V_{ac} .

Références

- [1] J. Song, S. Jung, Y. Kim, K. Cho, B. Kim, S. Lee, J. Na, I. Yang, O.-k. Kwon, and D. Kim. Reconfigurable 2d cmut-asic arrays for 3d ultrasound image. In SPIE Medical Imaging, pages 83201A–83201A, 2012.
- [2] X. Wang, Y. Fan, W.-C. Tian, H.-J. Kwon, S. Kennerly, G. Claydon, and A. May. An air-coupled capacitive micromachined ultrasound transducer for noncontact nondestructive evaluation. In Sensors, 2007 IEEE, pages 1464–1467. IEEE, 2007.
- [3] H. Dudaicevs, M. Kandler, Y. Manoli, W. Mokwa, and E. Spiegel. Surface micromachined pressure sensors with integrated cmos read-out electronics. Sensors and Actuators A: Physical, 43(1):157–163, 1994.
- [4] J. Mendoza-Lopez and C. Sanchez-Lopez, "Electromechanical performance comparison for different CMUT element geometries", SMACD, IEEE, pages 109-112, 2012.
- [5] G. W. Vogl and A. H. Nayfeh. Primary resonance excitation of electrically actuated clamped circular plates. Nonlinear Dynamics, 47(1-3):181–192, 2007.
- [6] B. Cochelin, C. Vergez, A high order purely frequency-based harmonic balance formulation for continuation of periodic solutions. Journal of sound and vibration, 324(1), 243–262, 2009.
- [7] Kacem, Najib, and Sebastien Hentz. "Bifurcation topology tuning of a mixed behavior in nonlinear micromechanical resonators." Applied Physics Letters 95.18 (2009): 183104.