

LES CAPTEURS DE PARTICULES DE TYPE MEMS PEUVENT-ILS MESURER UNE MASSE DE MANIÈRE FIABLE ?

T. Merrien¹, J. Sorel^{1*}, F. Marty¹, P. Didier², E. Algré¹ et E. Géhin²

¹Univ Gustave Eiffel, ESYCOM Laboratory, UMR 9007 CNRS, F-77454 Marne-la-Vallée, France

²Univ Paris-Est Creteil, CERTES, F-94010 Créteil, France

*Courriel de l'orateur : julien.sorel@esiee.fr

CAN MEMS-BASED PARTICULATE MATTER SENSORS RELIABLY MEASURE MASS ?

RESUME

Les systèmes MEMS sont prometteurs pour mesurer la masse de particules, mais leur calibration reste complexe. Cette étude combine théorie et expériences pour analyser les limites d'une microbalance MEMS, développée en laboratoire et soumise à des dépôts contrôlés de particules. Des dépôts de billes de latex dont le diamètre varie de 1,03 à 7 µm sont réalisés sur des MEMS et les variations de fréquences de résonances sont mesurées par l'intermédiaire d'un banc d'instrumentation dédié. Les décalages de fréquence observés s'écartent du modèle classique et s'expliquent par un modèle modifié intégrant l'adhésion et la dynamique de contact. Ainsi, les capteurs MEMS ne mesurent pas uniquement la masse : leur réponse dépend aussi de la taille et du comportement mécanique des particules.

ABSTRACT

MEMS systems show promise for measuring particle mass, but their calibration remains complex. This study combines theory and experiment to analyze the limitations of a laboratory-developed MEMS microbalance subjected to controlled particle deposition. Latex beads with diameters ranging from 1.03 to 7 µm are deposited onto MEMS, and the variations in resonance frequencies are measured using a dedicated instrumentation bench. The observed frequency shifts deviate from the classical model and are explained by a modified model incorporating adhesion and contact dynamics. Thus, MEMS sensors do not only measure mass: their response also depends on the size and mechanical behavior of the particles.

MOTS-CLÉS : adhésion, aérosols, calibration, MEMS / **KEYWORDS:** adhesion, aerosol, calibration, MEMS

1. INTRODUCTION

La surveillance des particules en suspension dans l'air (particulate matter, PM) est aujourd'hui un enjeu majeur de santé publique, en raison de leur impact avéré sur les systèmes respiratoire, cardiovasculaire et plus largement sur l'organisme (Davidson et al., 2005; Kim et al., 2015; Schwartz et al., 1996). Il devient donc nécessaire de développer des outils de détection et de surveillance de la qualité de l'air. Les méthodes de référence basées sur la pesée gravimétrique offrent une mesure fiable de la masse particulaire, néanmoins elles sont coûteuses, encombrantes et nécessitent des temps de mesure longs (Amaral et al., 2015). En réponse, des solutions alternatives, notamment les instruments de type compteur optique à particules sont développées (Soysal et al., 2017). Bien que ces capteurs optiques permettent des mesures en temps réel, leurs précisions se dégradent en fonction des conditions environnementales, notamment l'humidité et la composition des particules et une variation de leurs réponses peut être observée au cours du temps, nécessitant ainsi des calibrations fréquentes (Seesaard et al., 2024).

Avec l'amélioration des techniques de micro-fabrication, les capteurs de type micro-electromechanical systems (MEMS) apparaissent comme une méthode de détection innovante. Le principe de mesure de ces capteurs repose sur l'observation d'une variation de leurs fréquences de résonances à la suite de l'ajout de particules (et donc d'une masse) à leur surface. Ces systèmes miniatures présentent des avantages avec notamment une très forte sensibilité, une intégration plus aisée avec l'électronique de mesure ou encore un coût de production plus faible du fait de la possibilité de fabrication à plus grande échelle (Merrien et al., 2024; Soysal, 2019). Cependant après une dizaine d'années de travail à travers la collaboration entre le laboratoire ESYCOM, le laboratoire CERTES et le CSTB, il demeure encore des questions complexes quant à la compréhension du fonctionnement et de la mise en œuvre de ces capteurs. Ce travail propose donc de répondre à la question cruciale : est ce que les MEMS permettent d'obtenir une mesure de masse fiable ?

2. MATÉRIELS ET MÉTHODES

2.1. Design du capteur et principe de mesure

Afin de combiner haute sensibilité et grande surface active, le consortium a travaillé au développement d'un MEMS, présenté à la Figure 1, basé sur une membrane carrée suspendue par des attaches en forme de T (Soysal et al., 2020). Cette configuration permet l'excitation de la membrane suivant différents modes de déformation dans le plan (par exemple Lamé, Extensionnel, etc.) tout en préservant une grande taille de

surface active (1mm^2). Une première problématique apparaît à la suite de l'utilisation de grande surface active, à savoir la sensibilité spatiale. En effet, une masse déposée ne va pas affecter la réponse du capteur de la même manière suivant sa localisation sur celui-ci. Pour répondre à cette problématique, les dépôts seront considérés homogènes sur la surface, et contrôlés de manière visuelle après chaque dépôt de particule. La modélisation électrique du capteur est présentée à la Figure 1 (b), où est représentée le résonateur, l'impédance équivalente parasite (C_f et R_f) et l'impédance Z_{LIA} représentant l'instrument de mesure. Afin de s'affranchir du courant parasite, nous excite les vibrations du capteur à leur fréquence de résonance (quel que soit le mode de détection utilisé) et les détectons en utilisant le mode harmonique de la détection synchrone.

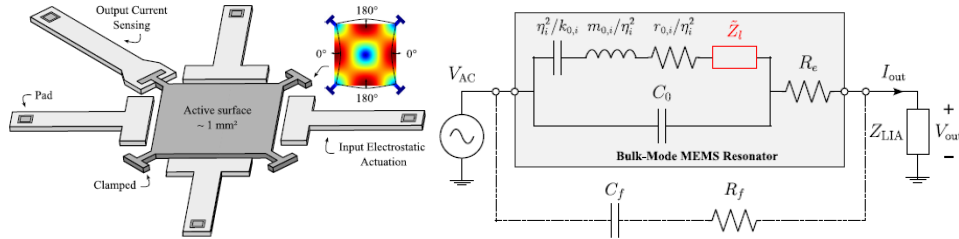


Figure 1, (a) Schéma de principe du MEMS développé. (b) Modélisation électrique des capteurs Les particules déposées sur la surface sont modélisées par l'ajout d'une impédance complexes Z_L

2.2. Impaction particulaire

Un banc d'impaction de billes de latex (PSL), présenté à la Figure 2(a), est utilisé afin de réaliser les essais. Les billes de latex testées durant notre étude ont des diamètres aérodynamiques entre $1,03$ et $7\mu\text{m}$. Les solutions sont obtenues après dilution d'un volume de suspension mère de billes de latex avec un volume d'eau ultra pure. Les solutions préparées sont injectées ensuite dans le banc d'impaction. Il est composé d'un générateur d'aérosols DDS Aéro (TCR TECORA), qui est un atomiseur pour solutions liquides. Un flux d'air comprimé (débit de 10 L/min) va nébuliser la solution d'aérosols, qui sera injectée dans la chambre de dilution (Aerosol Chamber, TCR TECORA), où les gouttelettes d'eau/billes de latex sont séchées pour ne laisser que les billes de latex en suspension. Enfin les billes de latex sont déposées sur la surface active du MEMS à l'aide de l'impacteur.

2.3. Mesure électrique et calibration théorique

Les résonateurs fabriqués sont caractérisés par une instrumentation dédiée composée d'un amplificateur à détection synchrone (Lock-In Amplifier – LIA), présentée à la Figure 2(b). Après application d'une tension alternative (10 Vpp) et d'une tension continue de polarisation (40 V) à l'une des électrodes du MEMS, cela a pour conséquence d'induire une force électrostatique périodique qui fait osciller le résonateur à sa fréquence de résonance. Comme expliqué dans la section précédente, afin de soustraire le courant parasite, nous utilisons le mode de détection harmonique de la LIA. Enfin, la tension complexe aux bornes de l'impédance de $50\ \Omega$ de la LIA est mesurée avant et après dépôts. Après chaque dépôt particulaire sur le capteur, des micrographies et un comptage particulaire sont réalisés, permettant de remonter à une estimation de la masse déposée sur le capteur.

A partir de ces mesures (comptage particulaire et mesures électriques), il est possible d'établir une courbe de calibration de la sensibilité. En effet, de manière théorique, une charge massique sur le MEMS induit une variation de la fréquence de résonance de ce dernier. En considérant la masse déposée sur le MEMS très inférieure à la masse du MEMS, et la variation de fréquence très petite par rapport à la fréquence de résonance, il est possible d'estimer la masse déposée, suivant l'équation de Sauerbrey :

$$\frac{\Delta f_i}{m_p} \approx - \frac{f_{0,i}}{2m_0} \text{ en Hz/ng.}$$

Où Δf_i est la variation de fréquence, m_p est la masse ajoutée, $f_{0,i}$ est la fréquence de résonance du capteur et m_0 est la masse effective du résonateur. L'indice i traduit les caractéristiques modales.

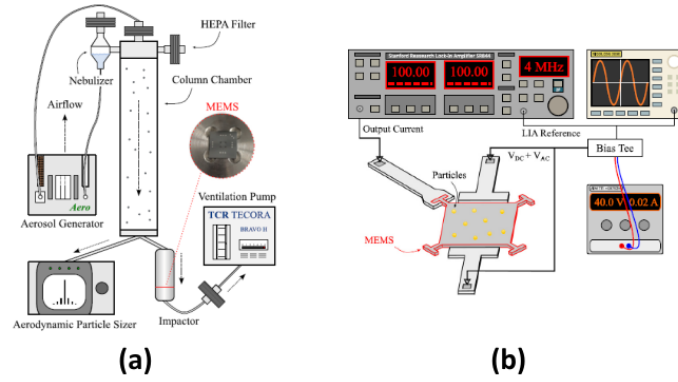


Figure 2,(a) Banc d'impaction utilisé pour le dépôt des billes de latex. (b) Banc de mesure électrique des résonances.

3. RÉSULTATS

3.1. Mesures de masses particulières

Des campagnes de dépôts de billes de latex ont été conduites, où les diamètres particuliers varient de 1,03 à 7 μ m. Des séries de 3 dépôts sont réalisées successivement pour chaque diamètre. A chaque impaction, des mesures de résonance avant et après dépôt, ainsi que des caractérisations par micrographies sont réalisées. Les variations des fréquences de résonances en fonction des masses déposées sont présentées à la Figure 3. Nous pouvons tout d'abord observer que les dépôts de masses ne suivent pas une seule tendance linéaire, montrant que la réponse du capteur varie malgré la même masse nominale déposée. Ensuite, nous pouvons voir qu'aucune des courbes linéaires obtenues ne correspond au modèle défini par Sauerbrey, indiquant donc que les particules ne sont pas perçues comme des ajouts purement massiques. Les plus petites particules apparaissent ainsi plus lourdes que leurs masses actuelles et inversement. A partir de ces premiers résultats, nous émettons l'hypothèse que les forces d'interactions entre les particules et la surface induisent un couplage effectif altérant la réponse mécanique, et à terme électrique, du système.

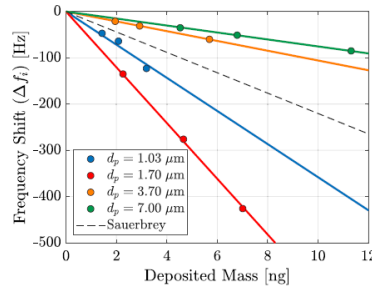


Figure 3, Mesures des variations de fréquence en fonction des masses déposées sur les capteurs.

3.2. Extension du modèle classique

Nous apportons ici de nouveaux éléments pour la compréhension du fonctionnement des MEMS. La première étape est de développer à nouveau les équations dynamiques de particules déposées sur le capteur en les supposant soumises à des moments de rotation. En considérant une particule, de rayon r_p et de masse m_p , sur la surface du MEMS lors d'une oscillation, défini par son déplacement u , la particule est désormais sujette à des forces de friction F_{fric} , forces élastiques F_{elas} , son moment d'inertie I et un moment M lié au roulement de la particule, comme illustré à la Figure 4(a).

A partir des équations couplées du mouvement (2^{ème} loi de Newton) donnée ci-dessous :

$$\begin{cases} m_p \left(\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - r_p \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} \right) = - (F_{fric} + F_{elas}) \\ I \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} + M = r_p (F_{fric} + F_{elas}) \end{cases}$$

Il est possible de réexprimer m_p^* , la masse équivalente perçue par le capteur, telle que :

$$m_p^* = \frac{m_p}{1 + \frac{5}{2} \left(\frac{\omega_{0,i}^2}{\omega_{0,i}^2 - \omega_p^2} \right)}$$

Où ω_p est la pulsation de « rocking », dépend du travail d'adhésion de la particule sur la surface W_A , sa masse volumique ρ_p , et sa masse telle que :

$$\omega_p \approx \sqrt{\frac{45W_A}{4\rho_p r_p^3}}$$

Les résultats normalisés sont présentés à la Figure 4(b). Plusieurs domaines peuvent être mis en évidence où (1) la masse perçue par le capteur est égale à la masse de la particule ($\omega_{0,i} \ll \omega_p$), (2) la masse perçue est alourdie par rapport à la masse de la particule ($\omega_{0,i} < \omega_p\sqrt{2/7}$), (3) la masse perçue devient négative ($\omega_p\sqrt{2/7} < \omega_{0,i} < \omega_p$), (4) la masse perçue est nulle ($\omega_{0,i} = \omega_p$) et (5) la masse perçue redevient positive mais plus petite que la masse de la particule réelle ($\omega_{0,i} \gg \omega_p$). On remarque donc que la réponse du capteur est directement liée aux propriétés des particules (nature, diamètre, etc.).

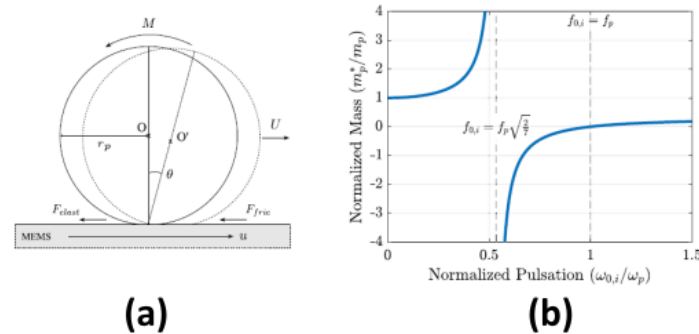


Figure 4, (a) Mouvement de translation (U) et rotationnel (θ) d'une particule lors de l'oscillation du MEMS. (b) Masse équivalente perçue par le MEMS en fonction de la pulsation de fréquence normalisée.

4. CONCLUSION

En conclusion, cette étude met en évidence l'importance de repenser les stratégies de calibration des capteurs MEMS de particules, en intégrant les phénomènes d'adhésion et les dynamiques vibratoires propres aux particules déposées. Elle suggère également que ces capteurs pourraient servir non seulement à la surveillance environnementale, mais également à des analyses avancées en santé environnementale, contrôle de procédés industriels ou diagnostic de bioaérosols.

Remerciements

Les auteurs remercient la SATT Erganeo pour le financement de ce projet de recherche.

Références

- Amaral, S. S., de Carvalho, J. A., Costa, M. A. M., & Pinheiro, C. (2015). An overview of particulate matter measurement instruments. *Atmosphere*, 6(9), 1327–1345. <https://doi.org/10.3390/atmos6091327>
- Davidson, C. I., Phalen, R. F., & Solomon, P. A. (2005). Airborne particulate matter and human health: A review. *Aerosol Science and Technology*, 39(8), 737–749. <https://doi.org/10.1080/02786820500191348>
- Kim, K. H., Kabir, E., & Kabir, S. (2015). A review on the human health impact of airborne particulate matter. *Environment International*, 74, 136–143. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.10.005>
- Merrien, T., Didier, P., & Algre, E. (2024). Equivalent Circuit Modeling of Air-Coupled Laterally Actuated Electrostatic Bulk-Mode MEMS. *IEEE Open Journal of Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 4(April), 63–76. <https://doi.org/10.1109/OJUFFC.2024.3413603>
- Schwartz, J., Dockery, D. W., & Neas, L. M. (1996). Is Daily Mortality Associated Specifically with Fine Particles? *Journal of the Air and Waste Management Association*, 46(10), 927–939. <https://doi.org/10.1080/10473289.1996.10467528>
- Seesaard, T., Kamjornkittikoon, K., & Wongchoosuk, C. (2024). A comprehensive review on advancements in sensors for air pollution applications. *Science of the Total Environment*, 951(August), 175696. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175696>
- Soysal, U. (2019). *Study and design of MEMS microbalances for aerosol and bioaerosol detection in indoor environments*. 179.
- Soysal, U., Géhin, E., Algré, E., Berthelot, B., Da, G., & Robine, E. (2017). Aerosol mass concentration measurements: Recent advancements of real-time nano/micro systems. *Journal of Aerosol Science*, 114(November 2016), 42–54. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2017.09.008>
- Soysal, U., Marty, F., Géhin, E., Motzkus, C., & Algré, E. (2020). Fabrication, electrical characterization and sub-ng mass resolution of sub- μm air-gap bulk mode MEMS mass sensors for the detection of airborne particles. *Microelectronic Engineering*, 221(November 2019), 111190. <https://doi.org/10.1016/j.mee.2019.111190>