

DEVELOPPEMENT DE CAPTEURS DE TYPE MEMS DEDIES A LA MESURE EN TEMPS REEL DE LA CONCENTRATION MASSIQUE EN AEROSOLS

P. Didier*¹, U. Soysal¹, E. Algré², C. Motzkus³ et E. Géhin¹

¹Univ Paris Est Creteil, CERTES, F-94010 Creteil, France

²Université Gustave Eiffel, ESYCOM (EA2552), ESIEE Paris, Cite Descartes, 93162 Noisy le Grand, France

³CSTB, 84 Avenue Jean Jaurès, Champs-sur-Marne, 77447 Marne-la-Vallée Cedex 2, France

*Courriel de l'orateur : pierre.didier@u-pec.fr

TITLE

DEVELOPMENT OF MEMS-TYPE SENSORS DEDICATED TO REAL-TIME MEASUREMENT OF AEROSOL MASS CONCENTRATION

RESUME

De nos jours, la détection et la caractérisation des particules de l'air est un enjeu sociétal majeur. Des outils existent pour mesurer la contamination de l'air conformément aux directives et normes en vigueur. Cependant, malgré leurs performances élevées, ils ont des inconvénients tels que leurs encombrements, leurs coûts ou encore leurs impossibilités de réaliser des mesures en temps réel. Ainsi ce résumé présente un concept miniaturisé d'un système de détection et de suivi des particules dans l'air comprenant un micro-impacteur combiné à un capteur résonant de type MEMS. Les étapes permettant l'obtention de ce système ainsi que des résultats préliminaires de caractérisation de dépôt de particules seront présentés.

ABSTRACT

Nowadays, the detection and characterization of air particles is a major societal issue. Tools exist to measure air contamination in accordance with the directives and standards. However, despite their high performance, they have disadvantages like their dimensions, their costs or their impossibility to carry out real-time measurements. Thus, this summary presents a miniaturized concept of a system for detecting and monitoring particles in the air comprising a micro-impactor combined with a resonant sensor of MEMS type. The steps allowing this system to be obtained as well as the preliminary results of particle deposition characterization will be presented.

MOTS-CLES : qualité de l'air, aérosols, MEMS, micro-impacteur / **KEYWORDS**: air quality, aerosols, MEMS, micro-impactor

1. INTRODUCTION

Depuis 2013, le Centre International de Recherche sur le cancer a classé la pollution atmosphérique et les particules la composant comme des composés « cancérogènes certains pour l'homme » qui peuvent avoir des effets néfastes à court et long terme sur l'organisme (apparition de bronchites, maux de têtes ou encore des pathologies cardiovasculaires ou respiratoires (Commissariat général au développement durable, 2015; Lave & Seskin, 1970). C'est pourquoi, il sera important de développer de nouveaux moyens de contrôle et de suivi de la qualité de l'air. Parmi les polluants réglementés, les PM₁₀ et PM_{2.5} (concentration massique en particules de diamètres aérodynamiques respectifs de 10 et 2,5 µm) peuvent être mesurées en quasi-temps réel par des méthodes validées par les instances réglementaires, telles que la jauge bêta, le TEOM (Tapered Element Oscillating Microbalance) ou encore le TEOM-FDMS (Filter Dynamics Measurement System) (Allen et al., 1997; Chueinta & Hopke, 2001; Zhu et al., 2007). Cependant, elles possèdent des limitations dans leurs utilisations dues à leurs encombrements importants et à leurs coûts. Une des voies majeures d'amélioration dans le développement de nouveaux systèmes de détection se porte vers la miniaturisation de ces derniers.

Dans ce contexte et depuis plusieurs années, des travaux de recherche menés en collaboration entre le CERTES (UPEC), l'ESYCOM (ESIEE Paris) et le CSTB visent à développer des micro-capteurs résonants de type Micro- Electro- Mechanical System (MEMS) couplés à un micro-impacteur (Thèse de Ugur Soysal, 2019). Ces systèmes, dédiés à la détection et à la caractérisation de particules atmosphériques, ont pour finalité d'analyser la qualité de l'air en temps réel, tout en respectant les directives et normes réglementaires en vigueur. Ce résumé présente les travaux effectués en vue du développement d'un impacteur ainsi que des capteurs miniatures résonants de type MEMS pour la détection et le suivi des particules d'aérosols.

2. MATERIELS ET METHODES

2.1. Capteur de type MEMS

Afin de répondre à la problématique posée, des capteurs de type MEMS ont été développés. La Figure 1 illustre la structure des capteurs fabriqués, dont les étapes de micro-fabrication ont été reportées précédemment (Soysal et al., 2018). Le principe de mesure du capteur, dont la surface active est de 1 mm², repose sur le suivi de sa fréquence de résonance en fonction du dépôt et/ou du retrait de particule fait à sa surface.

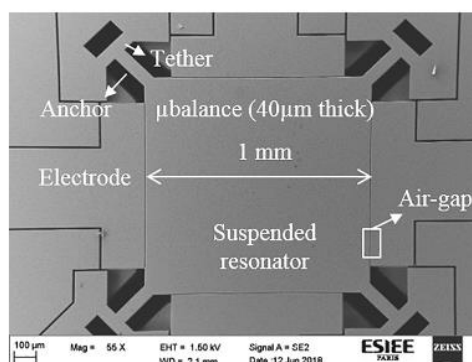


Figure 1, Micrographie SEM de la structure du capteur résonant de type MEMS développé.

Les résonateurs fabriqués sont caractérisés par une instrumentation dédiée composée d'un analyseur d'impédance HP4194A. Après application d'une tension alternative (1 V) 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. Lorsqu'un dépôt de masse à la surface du capteur est effectué, une variation de fréquence peut être observée, comme le suggère l'équation (1), qui est basé sur l'équation de Sauerbrey :

$$\frac{\Delta f}{\Delta m} = - \frac{f_0}{2m_{eff}} \quad (1)$$

Où, Δf est la variation de fréquence, Δm est la masse ajoutée, f_0 est la fréquence de résonance du capteur et m_{eff} est la masse effective du résonateur.

Le suivi des particules déposées à la surface du capteur est alors rendu possible par le suivi fréquentiel via un programme Labview spécifiquement développé.

2.2. Micro-impacteur

Afin d'améliorer les performances des capteurs d'études, ils sont intégrés à un dispositif miniature de tri, composé d'un système de prélèvement et d'un impacteur à étages. Le dispositif miniature de tri est composé d'un système de prélèvement et d'un impacteur à cascade comprenant 1 à 3 étages, tel qu'il est présenté dans le brevet déposé. Les différents étages de l'impacteur permettent de sélectionner par effet aérodynamique les particules inférieures à 2.5µm puis 1µm puis 0.3µm. En intégrant des microbalances MEMS au niveau des différentes plaques d'impaction, il sera ainsi possible de réaliser différents tris particulières, en fonction de leurs diamètre aérodynamiques, tout en réalisant la caractérisation de ces différentes fractions granulométriques PM10-2,5. Au travers de précédentes études, une preuve de concept du microsystème pour un impacteur simple étage, pour la mesure de la masse de particules d'aérosols triées en taille a été démontrée (Soysal et al., 2020, 2018). La Figure 2 illustre le schéma de principe ainsi qu'une photographie du dispositif expérimental.

Dans le cas des particules possédants un diamètre aérodynamique de 1 µm, le diamètre expérimental de coupure de l'étage du micro-impacteur est de 0.8 µm. De plus, l'efficacité de collecte a été établie à (98,5 ± 0,5) % en recouvrant la surface du micro-impacteur de graisse afin d'atténuer les effets de rebonds lors des impactions des particules.

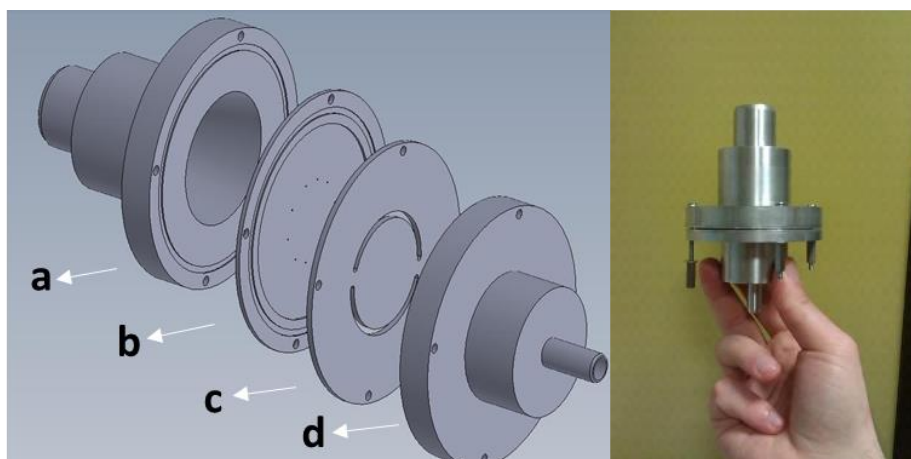


Figure 2, A gauche, structure du micro-impacteur à particules développé. a) Entrée b) Plaque avec ajustage c) Plaque d'impaction d) Sortie. A droite, photographie du système de micro-impaction développé.

3. RESULTATS

Des essais préliminaires ont été réalisés afin d'évaluer les performances de détection de particules par l'ensemble micro-impacteur / capteurs de type MEMS. Pour ce faire, un dépôt de particules fluorescentes a été effectué à la surface du capteur par l'intermédiaire du micro-impacteur. La partie gauche de la Figure 3 montre une image SEM de la surface active du capteur après dépôt de particules fluorescentes à sa surface. Le diamètre aérodynamique des particules déposées était de $1 \mu\text{m}$. La première étape consiste à mesurer la fréquence de résonance du capteur à vide. La courbe noire à la Figure 3 montre le spectre fréquentiel à vide du capteur, la fréquence de résonance est ainsi mesurée à 4100249.7 Hz . Une fois la mesure de fréquence effectuée, le dépôt de particule peut être réalisé. Puis une seconde mesure fréquentielle, illustrée par la courbe rouge de la Figure 3, donne la nouvelle fréquence de résonance à 4100104.2 Hz , correspondant ainsi à une variation de fréquence de $(145 \pm 51) \text{ Hz}$. D'après l'équation (1), la masse déposée à la surface du capteur après dépôt est donc de $(3,3 \pm 1,1) \text{ ng}$.

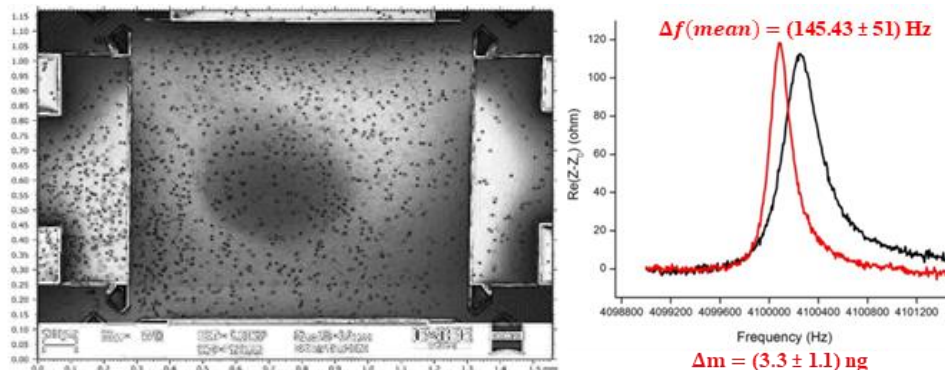


Figure 3, A gauche, Image SEM de la surface du capteur après impactation de particules fluorescentes ($d_{ae} = 1 \mu\text{m}$). A droite, réponse fréquentielle du capteur avant impactation (courbe noire) et après impactation (courbe rouge) de particules à sa surface.

Enfin, une étape de comptage de particules est réalisée après dépôt des particules sur la surface du capteur. Pour se faire, des micrographies par microscopie sont réalisées et des analyses d'images sont mises en place. Ainsi, le nombre de particules déposées à la surface du capteur, présenté à la Figure 3, a été estimé à (1096 ± 463) particules.

4. CONCLUSION

Ce résumé présente les travaux de conception en vue de l'obtention d'un dispositif de mesure miniature des particules d'air composé d'un micro-impacteur ainsi que de capteurs de type MEMS. L'impacteur et les capteurs de masse de type MEMS ont ainsi pu être conçus, fabriqués ainsi que caractérisés afin d'évaluer les performances de l'ensemble. Après la réalisation de dépôt de particules à la surface des capteurs, la sensibilité de ces derniers a été estimée à environ 50 Hz/ng , ce qui valide le caractère sensible de ce type de transducteur. Ainsi, la solution présentée ici tend vers l'obtention d'un micro-capteur permettant le suivi en temps réel des particules de l'air tout en respectant les directives et normes réglementaires.

Remerciements

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

Références

- Allen, G., Sioutas, C., Koutrakis, P., Reiss, R., Lurmann, F. W., & Roberts, P. T. (1997). Evaluation of the TEOM® Method for Measurement of Ambient Particulate Mass in Urban Areas. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 47(6), 682–689. <https://doi.org/10.1080/10473289.1997.10463923>
- Chueinta, W., & Hopke, P. K. (2001). Beta Gauge for Aerosol Mass Measurement. *Aerosol Science and Technology*, 35(4), 840–843. <https://doi.org/10.1080/027868201753227398>
- Commissariat général au développement durable. (2015). *Bilan de la qualité de l'air en France en 2014*. www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr
- Lave, L. B., & Seskin, E. P. (1970). Air Pollution and Human Health: The quantitative effect, with an estimate of the dollar benefit of pollution abatement, is considered. *Science*, 169(3947), 723–733. <https://doi.org/10.1126/science.169.3947.723>
- Soysal, U. (2019). *Study and design of MEMS microbalances for aerosol and bioaerosol detection in indoor environments*. Université Paris-Est.
- Soysal, U., Marty, F., Algre, E., Gehin, E., & Motzkus, C. (2018). Sub- μm air-gap resonant MEMS mass sensors fabrication and electrical characterization for the detection of airborne particles. *2018 Symposium on Design, Test, Integration & Packaging of MEMS and MOEMS (DTIP)*, 0, 1–5. <https://doi.org/10.1109/DTIP.2018.8394231>
- 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>
- Zhu, K., Zhang, J., & Liyo, P. J. (2007). Evaluation and comparison of continuous fine particulate matter monitors for measurement of ambient aerosols. *Journal of the Air and Waste Management Association*, 57(12), 1499–1506. <https://doi.org/10.3155/1047-3289.57.12.1499>