

CFA/VISHNO 2016

Caractérisation de la réponse capteurs de pression et de microphones MEMS

S. Ollivier^a, C. Desjouy^a, E. Salze^a, P. Yuldashev^b, A. Koumela^c, L. Rufer^c et P. Blanc-Benon^a

^aLMFA UMR 5509 , Université Claude Bernard Lyon 1, 36 avenue Guy de Collongue, 69130 Ecully, France

^bM.V. Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics, M.V. Lomonosov Moscow State University, 119991 Moscow, Fédération de Russie

^cUniv. de Grenoble / Laboratoire TIMA, 46, Av. Felix Viallet, 38031 Grenoble, France
sebastien.ollivier@ec-lyon.fr



LE MANS

Dans le processus de conception, de réalisation et d'optimisation de nouveaux capteurs de pression ou de microphones, et notamment des microphones MEMS, il est nécessaire de pouvoir caractériser les prototypes afin de comparer les caractéristiques obtenues (réponse en fréquence, sensibilité, directivité) aux caractéristiques attendues d'après les modèles. De même, lors de l'utilisation de capteurs à la limite de leur bande passante ou avec des montages particuliers, les informations fournies par les fabricants sont souvent insuffisantes et la diffraction est difficile à caractériser. Il est dans ce cas également utile de pouvoir déterminer la réponse des capteurs en hautes fréquences. Dans cette présentation sera décrite la méthode de calibration hautes fréquences de microphones et capteurs de pression basée l'utilisation d'une source impulsionnelle pour la gamme 10 kHz-1MHz. La réponse des capteurs est obtenue par comparaison avec une estimation de la pression obtenue à l'aide d'un interféromètre optique. Nous discuterons de la possibilité d'étendre l'estimation de la réponse aux fréquences inférieures à 10 kHz. Afin d'illustrer l'intérêt de la méthode dans le cadre de la conception de capteurs MEMS, nous montrerons que la méthode permet de mettre en évidence des défauts de conception ou de fabrication après réalisation de prototypes. Des résultats de calibration de capteurs de chocs ou de pression pariétale commerciaux seront également discutés. L'influence du montage des capteurs sur leur réponse en hautes fréquences sera mise en évidence.

1 Introduction

Si la calibration des microphones de mesure, notamment capacitifs, a fait l'objet de nombreuses études conduisant à des protocoles bien définis, la calibration de microphones de types nouveaux, et en particulier des microphones MEMS, pose encore des difficultés. La tâche se complique encore d'avantage lorsqu'il s'agit de caractériser des microphones en cours d'optimisation car les caractéristiques mécaniques et acoustiques ne sont généralement pas ou mal connues. Enfin, dans le cadre de l'utilisation ou du développement de microphones destinés à la mesure de hautes fréquences, ou à la capture de chocs ou de fluctuations de pression à très petite échelle, la caractérisation doit se faire à des fréquences de plusieurs dizaines ou centaines de kiloHertz, c'est-à-dire dans une gamme de fréquence où les méthodes classiques ne sont plus valables ou plus applicables. La calibration de microphones et de capteurs de pression aux fréquences au-delà de 10 kHz est particulièrement difficile en raison notamment de l'absence de capteur de référence. Par ailleurs, les longueurs d'onde étant très courtes (de l'ordre du millimètre), la réponse en fréquence est très dépendante du montage des capteurs en raison notamment des effets de diffraction. Par exemple, si l'on considère un capteur de choc PCB 132A31 dont la fréquence de résonance est donnée supérieure à 1 MHz par PCB piezotronics, couplé à son conditionneur 482C05 dont la fréquence de coupure est donnée supérieure à 1 MHz [1, 2], et positionné dans un baffle affleurant à la paroi (usage courant en aéroacoustique), on obtient la réponse de la figure 1. On constate que ce type de capteur permet de détecter des chocs et de déterminer des temps d'arrivée précisément. Il ne peut en revanche pas servir de capteur de référence, l'étude de sa réponse mettant en évidence des résonances au voisinage de 300 kHz, 600 kHz, et 1 MHz.

Dans le cadre du projet SIMMIC, des microphones MEMS ont été conçus et fabriqués. Pour accompagner cette conception, nous avons développé et appliqué des méthodes de caractérisation en hautes fréquences pour des microphones dont la fréquence de résonance est comprise entre 300 et 900 kHz selon les prototypes [3, 4]. La méthode de calibration finalement retenue est basée sur une source impulsionnelle générant des ondes de choc et un interféromètre optique de type Mach-Zender [5] qui permet d'obtenir une mesure de référence pour la pression incidente. La méthode est décrite ci-après. Elle a été validée pour des microphones capacitifs standards (1/8 de pouce),

et appliquée pour des prototypes de microphones MEMS, et enfin pour des capteurs de pression hautes fréquence.

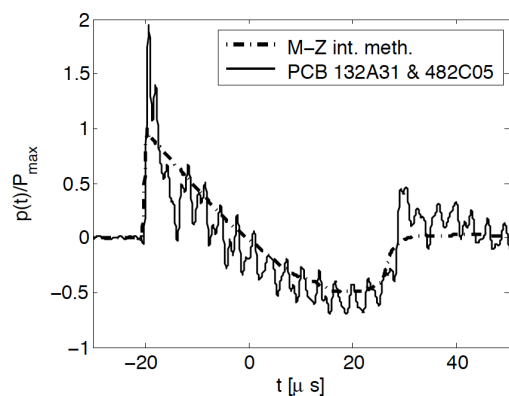


FIGURE 1 – Réponse à une onde de choc en N d'un capteur de choc PCB 132A31 associé à un conditionneur 482C05. Tirets : signal de pression (mesure à l'interféromètre) ; Trait plein : réponse du capteur.

2 Méthode

Afin de calibrer des prototypes de microphones MEMS nous avons développé plusieurs méthodes de calibration basées sur une source impulsionnelle et la mesure d'ondes de chocs en champs libre. La méthode de calibration que nous avons principalement utilisée est celle décrite en détails dans la référence [5]. Elle est basée sur l'utilisation en champ libre d'une source à arc électrique constituée d'électrodes séparées de 2 cm soumises à une différence de potentiel de l'ordre de 15 à 20 kV. Lorsque la tension de claquage de l'air est atteinte, un arc électrique est émis, générant une onde de pression impulsionnelle au moment de la décharge. De l'ordre de plusieurs kPa, cette impulsion se déforme rapidement par effet non linéaire de propagation et une onde de choc est obtenue. Cette onde de durée finie, a une forme entre une onde dite en N et une onde de souffle ("blast wave"). Par soucis de simplification on se référera à l'onde en N , même si elle n'est pas tout à fait symétrique. L'onde de choc ainsi générée peut être considérée avec une bonne approximation comme une onde sphérique. Pour des distances de propagation inférieures au mètre, le spectre s'étend jusqu'à 1 voire 2 MHz. L'intérêt de l'utilisation d'une source impulsionnelle ponctuelle réside dans le fait

que la directivité de la source ne dépend quasiment pas de la fréquence contrairement au cas des émetteurs à membrane ou piston.

Afin de calibrer des capteurs de réponse inconnue, il faut une mesure de référence permettant de déterminer les variations de pression aux hautes fréquences. Ne disposant pas de capteur fiable dans la gamme de fréquence 10 kHz - 1 MHz, nous avons développé des méthodes optiques dont une méthode basée sur un interféromètre de type Mach-Zender. A l'aide de la mesure du déphasage introduit par le passage de l'onde acoustique entre un faisceau LASER traversé par l'onde et un faisceau de référence, il est possible d'obtenir de manière indirecte une estimation de la forme d'onde avec une résolution temporelle de l'ordre de quelques dixièmes de microseconde. Cette estimation de l'onde de pression sert de référence pour l'estimation de la réponse de microphones en hautes fréquences. La méthode est décrite en détails dans la référence [5] et a été validée en l'appliquant à la mesure de la réponse de microphones à condensateurs Brüel & Kjør type 4138 de diamètre 1/8 de pouce.

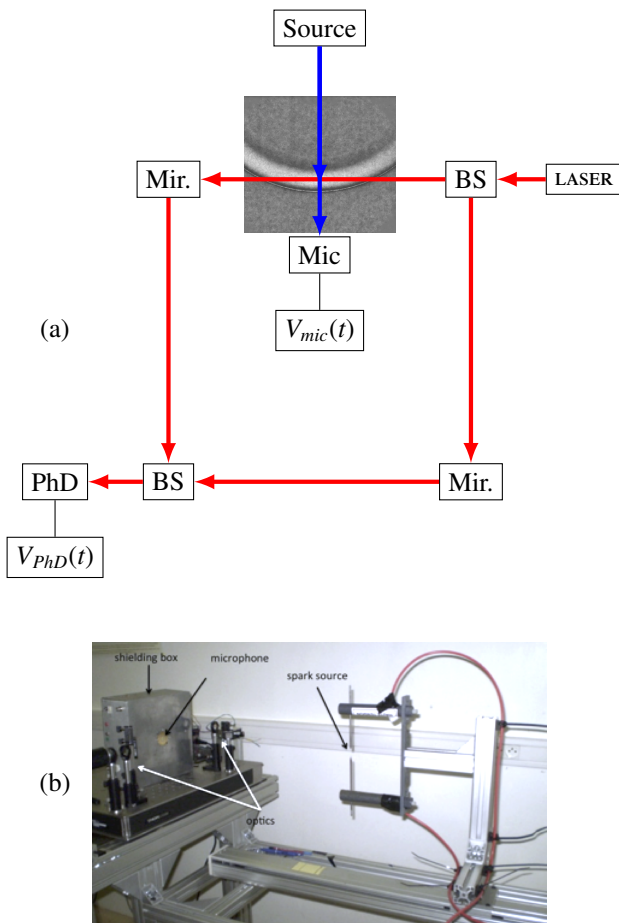


FIGURE 2 – (a) Schéma du dispositif de mesure. Flèches rouges : faisceau LASER ; flèches bleues : rayon acoustique.

BS : Séparateurs de faisceau, Mir : miroirs, PhD : photodiode, V_{mic} : tension de sortie du microphone à calibrer (ou sortie de son conditionneur de signal), V_{PhD} : tension de sortie de la photodiode. (b) Photo du dispositif.

Afin d'en donner le déroulement de façon synthétique, les différentes étapes sont résumées ci-dessous et le dispositif est représenté sous forme schématique dans la figure 2.a. Le dispositif optique est constitué d'un interféromètre de type

Mach-Zender tel que le faisceau issu d'un laser est séparé en un faisceau de référence, tandis que l'autre est le faisceau de mesure qui est traversé par l'onde acoustique. Lorsqu'une étincelle est générée, elle crée une onde en N sphérique qui se propage sur jusqu'au faisceau LASER situé à une distance r_{opt} , puis jusqu'au microphone situé 7 à 10 cm plus loin, à une distance r_{mic} . Le passage de l'onde acoustique au niveau du faisceau de mesure introduit un déphasage par rapport au faisceau de référence. Ce déphasage se traduit pas une variation de tension V_{opt} au niveau de la photodiode (PhD sur la figure 2). La mesure de l'onde de pression par le microphone et de son préamplificateur se traduit par une tension V_{mic} , qui dépend du microphone, de son amplificateur, et du montage du capteur (diffraction). Dans les études reportées ici, les capteurs étaient installés dans un baffle afin de limiter les contributions diffractées, qui se trouvent suffisamment décalées dans le temps pour permettre de ne considérer que le champ direct.

L'interféromètre ne donne pas l'accès directement à la pression, qui est déterminée en post-traitement en plusieurs étapes décrites en détails dans la référence [5]. En résumé, de la tension mesurée en sortie de la photodiode, on remonte d'abord à la variation de phase entre le faisceau de référence et le faisceau de mesure. De la variation de phase en fonction du temps, on remonte à la variation d'indice optique par l'intermédiaire d'une transformée d'Abel inverse qui tient compte de la géométrie circulaire du front d'onde. La pression en r_{opt} est finalement déduite de la variation d'indice optique, lié à la variation de densité induite par le passage de l'onde de pression. Afin de comparer la pression acoustique déduite de la mesure d'interférence optique et la réponse en tension du microphone, il est nécessaire de tenir compte de la propagation entre le faisceau de mesure et le microphone, soit sur une distance $r_{mic} - r_{opt}$. Le signal de pression étant d'amplitude de 100 à 2000 pascals (selon la distance source micro), il est nécessaire d'effectuer un calcul numérique de la propagation non linéaire à l'aide d'un code tenant compte des effets dissipatifs et de la relaxation moléculaire. C'est un code de propagation de type équation de Burgers sphérique qui permet de propager l'onde de pression mesurée au niveau du faisceau de référence jusqu'au microphone à calibrer, afin de déterminer la valeur de l'onde de pression incidente sur la surface du microphone à calibrer. Si on appelle P_{opt} la pression ainsi estimée et V_{mic} la tension mesurée en sortie de microphone, le rapport des spectres, ou bien l'estimation de la fonction de transfert à partir d'un modèle physique ou mathématique permet de déterminer la sensibilité en fonction de la fréquence $S(f) = V_{mic}(f)/P_{opt}(f)$.

3 Résultats

L'application de la méthode à la caractérisation de la réponse de microphones capacitifs standards 1/8 de pouce a montré qu'il est possible de déterminer la réponse en amplitude et en phase de microphones jusqu'à des fréquences de 300 kHz [5]. Cette caractérisation est possible car ces capteurs ont une sensibilité relativement élevée (de l'ordre de 0.5 mV/Pa) et les conditionneurs adaptés sont optimisés (faible bruit, gain élevé, bande passante jusqu'à 200 kHz). La méthode a ensuite été appliquée à la caractérisation de capteurs prototypes adaptés à la mesure

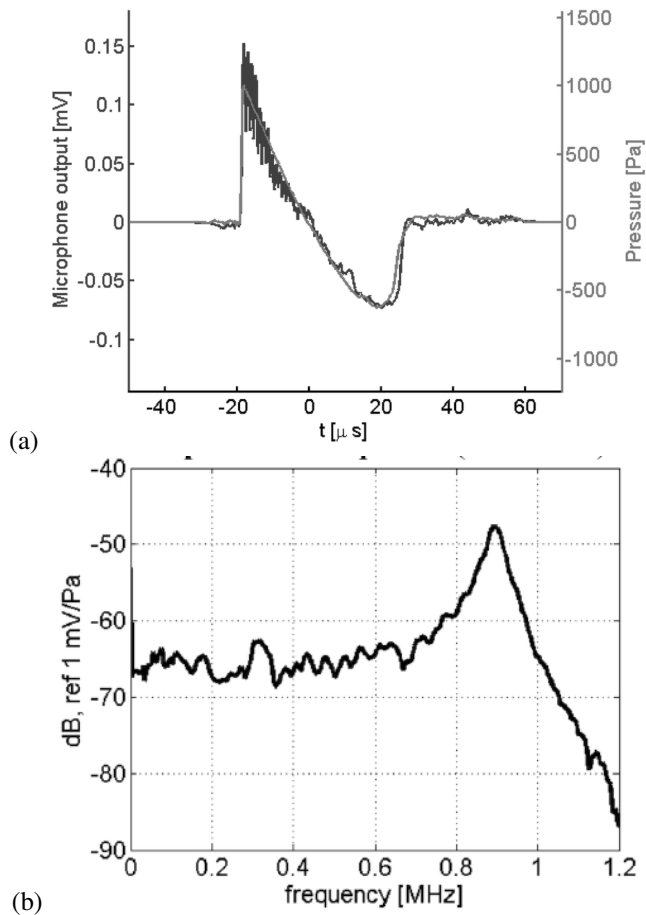


FIGURE 3 – Réponse du micro “MEMS300-10-MS” réalisé dans le cadre du projet SIMMIC. (a) Réponse temporelle à une onde en N . Trait gris : signal de pression (mesure à l’interféromètre); Trait noir : réponse du microphone MEMS (tension avec gain amplificateur 60 dB). (b) Réponse en fréquence du microphone déduite des spectres des signaux tracés en (a).

des hautes fréquences (> 100 kHz). Leur faible sensibilité, avec pour conséquence un mauvais rapport signal à bruit, et une électronique de conditionnement au stade de prototype non optimisée ont rendu plus difficile l’application de la méthode. Il a néanmoins été possible de déterminer la ou les fréquences de résonance des différents prototypes, et lorsque le rapport signal à bruit était suffisamment élevé, la réponse a pu être déterminée. Par exemple, la figure 3 présente la réponse temporelle d’un capteur de membrane de $300 \mu\text{m}$ de côté dont la fréquence de résonance est de l’ordre de 900 kHz.

La méthode a également permis de détecter des défauts dus à une réalisation non conforme au modèle de conception, liés à des défauts dans la gravure, ou encore à des défauts de montage. Par exemple sur la figure 4, on peut observer pour un capteur dont la fréquence de résonance est prévue à 500 kHz, une seconde résonance en basse fréquence, vers 30 kHz. Cette résonance a été identifiée comme étant la conséquence d’un mauvais collage conduisant à une ouverture de la cavité arrière, et en conséquence une résonance de Helmholtz “basse fréquence”. Afin de valider cette hypothèse, l’étanchéité du collage a été corrigée et une nouvelle caractérisation a permis de valider cette hypothèse : on constate en comparant les réponses obtenues pour deux montages que la résonance indiquée par une flèche est

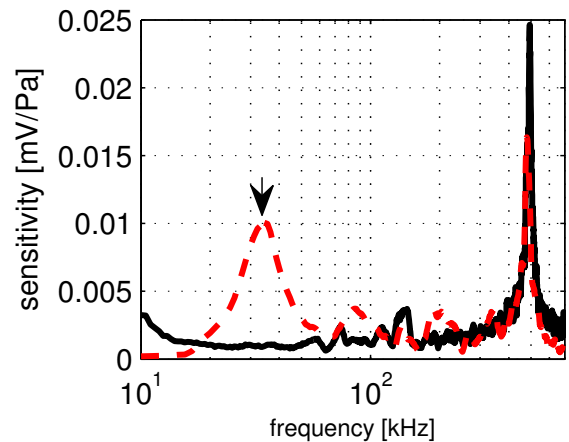


FIGURE 4 – Utilisation de la méthode de calibration pour mettre en évidence un défaut lié à un mauvais mode de collage du capteur. En noir : montage initial ; en rouge : après modification du montage, la résonance vers 30 kHz est supprimée.

supprimée.

4 Conclusion

Une méthode de calibration des microphones adaptée aux hautes fréquences a été mise au point et validée. La sensibilité fonction de la fréquence peut être obtenue dans la gamme 10 kHz - 1 MHz. Cette méthode doit être associée à une méthode adaptée aux basses fréquences pour déterminer l’ensemble de la réponse des microphones (voir par exemple [1]).

Remerciements

Les auteurs remercient Emmanuel Jondeau, Jean-Michel Perrin et Frédéric Ferrand pour leur contribution indispensable à la mise au point des expériences. Ces travaux ont été réalisés au sein du Labex CeLyA de l’Université de Lyon, géré par l’Agence Nationale de la Recherche (ANR-10-LABX-0060/ ANR-11-IDEX-0007). Ils ont été soutenus par l’ANR (Programme BLANC 2010 SIMI 9, projet SIMMIC, et par le programme international franco-russe International Program for Scientific Cooperation PICS (RFBR 10-02-91062 / CNRS 5063).

Références

- [1] PCB Piezotronics, Fiche technique du capteur PCB 132A31, http://www.pcb.com/contentstore/docs/PCB_Corporate/Pressure/Products/Specsheets/132A31_R.pdf, 6 octobre 2015, consulté le 15 mars 2016.
- [2] PCB Piezotronics, Fiche technique du conditionneur PCB 482C05, http://www.pcb.com/contentstore/docs/PCB_Corporate/

- Electronics/Products/Specsheets/482C05_J.pdf , 28 janvier 2015, consulté le 15 mars 2016.
- [3] Z.J. Zhou, L. Rufer, E. Salze, P. Yuldashev, S. Ollivier, and M. Wong, "Bulk micro-machined wide-band aero-acoustic microphone and its application to acoustic ranging", *J. Micromech. Microeng.*, 23 (2013).
 - [4] Z.J. Zhou, L. Rufer and M. Wong, "Damped Aero-Acoustic Microphone with Improved High-Frequency Characteristics", *Journal of Microelectromechanical Systems*, 99 (2014)
 - [5] P.V. Yuldashev, M. Karzova, S. Ollivier, V. Khokhlova, Ph. Blanc-Benon, Mach-Zehnder interferometry method for acoustic shock wave measurements in air and broadband calibration of microphones, *J. Acoust. Soc. Am.*, 137(6), 2015.
 - [6] G. Smeets, "Laser interference microphone for ultrasonics and nonlinear acoustics", *J. Acoust. Soc. Am.* 61, 872-875 (1977).
 - [7] W.M. Wright, "Propagation in air of N-waves produced by sparks", *J. Acoust. Soc. Am.*, 73, 1948-1955 (1983).
 - [8] P.V. Yuldashev, M.V. Averiyarov, V.A. Khokhlova, S. Ollivier, and Ph. Blanc-Benon, "Nonlinear spherically divergent shock waves propagating in a relaxing medium", *Physical Acoustics*, 54(1) :32-41, 2008.
 - [9] P.V. Yuldashev, S. Ollivier, M. Averiyarov, O. Sapozhnikov, V. Khokhlova, and Ph. Blanc-Benon, "Nonlinear propagation of spark generated N-waves in relaxing atmosphere : modeling and measurements using acoustical and optical methods", *J. Acoust. Soc. Am.*, 120(3) :29-34, 2010.
 - [10] M. Karzova, P. Yuldashev, V. Khokhlova, O. Sapozhnikov, S. Ollivier, Ph. Blanc-Benon, "Characterization of spark-generated N-waves in air using an optical schlieren method", *J. Acoust. Soc. Am.*, 137(6), 2015.
 - [11] E. Salze, C. Desjouy, E. Jondeau, S. Ollivier, "High frequency calibration of wall pressure sensors", *The XXII Symposium on Measuring Techniques in Turbomachinery Transonic and Supersonic Flow in Cascades and Turbomachines*, Lyon, 4-5 Septembre 2014