



## **Méthodes de calibration des microphones en hautes fréquences (10kHz-1 MHz)**

S. Ollivier<sup>a</sup>, E. Salze<sup>a</sup>, P. Yuldashev<sup>b</sup>, C. Desjouy<sup>a</sup>, M. Karzova<sup>c</sup>, V. Khokhlova<sup>b</sup> et P. Blanc-Benon<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Ecole Centrale de Lyon - LMFA UMR CNRS 5509, Centre Acoustique - Ecole Centrale de Lyon, 36, avenue Guy de Collongue, 69134 Ecully, France

<sup>b</sup>Moscow State University, Department of General Physics and Condensed Matter Physics, Faculty of Physics, Moscow State University, 119991 Moscou, Fédération de Russie

<sup>c</sup>Moscow State University et Ecole Centrale de Lyon, LMFA UMR 5509, Ecole Centrale de Lyon, 36 avenue Guy de Collongue, 69134 Ecully, France  
sebastien.ollivier@univ-lyon1.fr

Dans le cadre du projet SIMMIC (Microphone de mesure large bande en silicium pour l'acoustique en hautes fréquences) soutenu par l'ANR (SIMI 9, ANR 2010 BLANC 0905 03), des prototypes de microphones MEMS haute fréquence ont été développés. Les prototypes réalisés ont une réponse dans une gamme de fréquences de 1kHz jusqu'à 300 kHz à 900 kHz. Parallèlement au développement des microphones, trois méthodes de calibration ont été mises au point et testées au LMFA. La source acoustique utilisée est une source à arc électrique générant des ondes de choc dites « en N » dont le spectre couvre une gamme de 10kHz à 1 MHz. Une première méthode basée sur l'allongement de la durée de l'onde par effet de propagation non linéaire permet d'estimer le niveau de pression maximum de l'onde. Une seconde méthode, basée sur une mesure optique de type schlieren permet d'estimer l'amplitude de la réponse des microphones. Une méthode par comparaison avec une mesure optique par interférométrie permet d'obtenir la réponse en amplitude et en phase de la réponse de microphones, jusqu'à 1 MHz.

## 1 Introduction

Dans le cadre du projet SIMMIC (Microphone de mesure large bande en silicium pour l'acoustique en hautes fréquences) soutenu par l'ANR (SIMI 9, ANR 2010 BLANC 0905 03), des prototypes de microphones MEMS haute fréquence ont été développés [1, 2, 3]. Les prototypes réalisés ont une réponse dans une gamme de fréquences de 1kHz jusqu'à 300 kHz à 900 kHz. Afin de calibrer les prototypes dans la gamme de fréquence 10 kHz-1MHz, trois méthodes de calibration ont été mises au point et testées au LMFA. Pour générer des ondes acoustiques dans une gamme de fréquence jusqu'à 1 MHz dans l'air, nous avons utilisé une source à arc électrique qui génère des ondes de pression impulsionnelles de niveau de pression élevé (4000 Pa à 10 cm de la source). Ce niveau est suffisamment élevé pour qu'une onde de choc soit formée au bout de quelques centimètres de la source. On dispose ainsi d'une source de directivité sphérique au contenu fréquentiel étendu dans une gamme de fréquence 10 kHz-2 MHz. La principale difficulté concerne la caractérisation du champ de pression, puisqu'il n'y a pas de capteur correctement calibré dans cette gamme. On remarque d'ailleurs que les fabricants de capteurs de choc se contentent généralement de n'indiquer que la fréquence de résonance de leurs capteurs, dont les spécifications diffèrent de celles visées dans le projet SIMMIC. Au cours du projet SIMMIC, trois méthodes basées sur l'utilisation d'une source à étincelle ont été utilisées pour calibrer les prototypes. La première méthode est basée sur l'allongement de la durée de l'onde avec la distance de propagation en raison des effets non linéaires. Cette méthode permet d'estimer le niveau de pression de l'onde mais non la réponse en fréquence. La seconde méthode est basée sur la mesure optique de l'onde de pression à l'aide d'une méthode par striescopie ("schlieren") en lumière blanche. Cette méthode permet de caractériser la forme d'onde de pression, et ainsi estimer la réponse en fréquence. Cette méthode ne permet en revanche pas d'estimer le niveau de pression et il est nécessaire d'utiliser la méthode précédente pour estimer les niveaux, et donc la sensibilité. Une troisième méthode a été développée sur la base d'une mesure d'interférométrie optique. Cette méthode consiste à obtenir l'onde de pression de manière absolue par l'analyse d'une interférence entre deux faisceaux laser dont l'un est traversé par l'onde de choc. Durant l'exposé de la conférence, ces trois méthodes seront décrites, et des résultats de calibration permettront d'illustrer les avantages et inconvénients des différentes méthodes pour la calibration des microphones en hautes fréquences.

## 2 Première méthode : Exploitation des effets non linéaires

La première méthode de calibration reprend la méthode utilisée par Wayne Wright [4] pour estimer la sensibilité de capteurs réalisés à la main pour la mesure d'ondes de choc. Il s'agit d'exploiter la propriété des ondes de choc dites "en N" dont la durée augmente au cours de la propagation en raison des effets non linéaires de propagation. Si l'on considère que les effets non linéaires sont prépondérants sur les autres effets et si l'on assimile les ondes de pression générées par une source à étincelle à des ondes en  $N$ , alors la durée de l'onde de pression augmente avec la distance de propagation, et dans le même temps le niveau du pic de pression  $P_{max}$  diminue. Les évolutions de ces deux caractéristiques de l'onde avec la distance étant liées, il est possible d'estimer le niveau du pic de pression maximum par l'analyse de l'augmentation de la durée car celle-ci dépend du niveau de pression initial. Pour une onde en  $N$  sphérique, la théorie des chocs faibles donne la relation suivante pour l'évolution de la durée en fonction de la distance :

$$T(r) = T_0 \sqrt{1 + \sigma_0 \ln\left(\frac{r}{r_0}\right)} \quad (1)$$

avec

$$\sigma_0 = (\gamma + 1)r_0 P_0 / (2\gamma P_{atm} c_0 T_0) \quad (2)$$

où  $\gamma = 1.4$  est le rapport des chaleurs spécifiques pour l'air,  $P_{atm} = 10^5$  Pa est la pression atmosphérique, et  $c_0$  est la vitesse du son. Le coefficient  $\sigma_0$  indique la dépendance de  $T$  à l'onde de pression initiale à la distance  $r = r_0$  (mesurée par rapport à la position de la source).

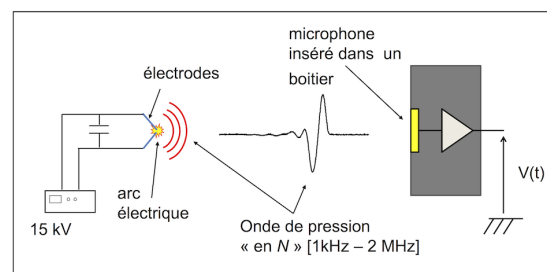


FIGURE 1 – Schéma du dispositif de calibration

Pour obtenir le coefficient  $\sigma_0$  à partir duquel le niveau de pression  $P_0$  peut être estimé, les ondes de pression sont mesurées à différentes distances de propagation  $r$  par le microphone à calibrer et les tensions de sortie  $V(t, r)$  sont enregistrées. Connaissant le niveau de pression maximum  $P_0$  en  $r_0$ , alors à partir du pic de tension  $V_{max}(r_0)$  on peut

déduire une sensibilité en mV/Pa. Cette méthode a priori simple de mise en oeuvre suppose que l'onde est sphérique, que les effets non linéaires sont prépondérants, et que la forme d'onde est une forme en  $N$  idéale. Lorsque l'onde n'est pas exactement symétrique il est possible d'appliquer la relation (1) en considérant la durée de la phase positive. La mesure de la durée n'étant pas toujours évidente en cas de distortion de l'onde par la réponse du capteur, il peut s'avérer plus simple d'estimer la durée à partir de l'analyse des minima du spectre [6, 7], l'expression (1) pouvant être modifiée pour tenir compte d'une modification de la loi d'évolution de la durée au cours de la propagation en fonction de la forme d'onde [8].

### 3 Seconde méthode : Estimation de la forme d'onde par méthode strioscopie ("schlieren")

La méthode précédente permet d'obtenir une estimation de la sensibilité d'un microphone, moyennant certaines hypothèses, et notamment concernant la forme de l'onde. Si l'on souhaite déterminer la réponse en fréquence d'un capteur, il est nécessaire de déterminer aussi précisément que possible le contenu fréquentiel de l'onde. En l'absence de microphone de référence dans la gamme de fréquence et de dynamique des capteurs développés dans le cadre de SIMMIC, nous avons développé une méthode alternative basée sur l'analyse d'images obtenues par strioscopie lors du passage d'une onde en  $N$  générée par une source à étincelle.

Le dispositif expérimental est représenté sur la figure 2. Les images obtenues lors du passage de l'onde sont liées à la variation de densité induite par l'onde de pression (figure 3.a). Ce type de visualisation est souvent utilisée pour déterminer la position d'ondes de choc ou la forme du front d'onde [9]. En revanche, l'analyse permettant de remonter à la forme d'onde et à la pression n'est généralement pas faite. Le processus d'estimation de l'onde de pression implique de reconstruire la variation d'intensité (figure 3.b) par une transformation d'Abel inverse en raison de l'observation d'un front onde sphérique (les détails de l'analyse ne sont pas reportés ici). Après inversion, la variation spatiale du niveau de pression est obtenu à partir de l'estimation de la variation locale de l'indice optique. A l'issue du processus, une estimation de l'onde de pression est obtenue, comme sur l'exemple de la figure 3.c.

Si la méthode de mesure optique permet d'obtenir une estimation de la forme d'onde, elle ne permet pas de remonter à la pression en Pascals. On peut utiliser la méthode précédente pour estimer la valeur du pic de pression et ainsi obtenir la forme d'onde en Pascals. On constate néanmoins sur la figure 3.c que l'onde en  $N$  générée par la source à arc électrique diffère notablement d'une onde en  $N$  idéale, la partie négative de l'onde n'étant pas la symétrique de la partie positive. Si la mesure permet d'estimer correctement la demi durée de l'onde, les relations données au paragraphe précédent s'appliquent,  $T$  s'entendant comme la durée de la phase positive. Si la mesure de la demie durée ne peut se faire précisément (cas des microphones résonants), alors il est possible d'analyser les fréquences des minima du module du spectre pour estimer la durée de l'onde, le coefficient  $\sigma_0$  dans l'équation (1) pouvant être modifiée pour tenir

compte d'une modification de la loi d'évolution de la durée au cours de la propagation en fonction de la forme d'onde (valeur à déterminer par exemple à l'aide de simulations numériques) [8]. A l'issue du processus, la forme d'onde étant connue, il est possible de déterminer le spectre puis, en comparant la réponse (en mV) du microphone à l'onde de choc (en Pa), il est possible d'estimer la réponse en fréquence des microphones.

Un exemple de réponse d'un capteur MEMS réalisé dans le cadre du projet SIMMIC est donné dans la figure 4. On remarque sur la courbe de sensibilité (figure 4.b) des oscillations qui pour une part proviennent des décalages de minima dans les spectres estimés et mesurés, ce qui peut être corrigé en combinant des mesures à plusieurs distances. Néanmoins, cette calibration permet de mettre en évidence les résonances et fréquences de coupure des microphones en hautes fréquences, comme par exemple la résonance à 713 kHz sur la réponse donnée en figure 4.b.

Bien que cette méthode permette d'estimer la réponse de capteurs en hautes fréquence via la caractérisation de l'onde de choc incidente, elle présente néanmoins des limites, notamment dans la phase d'estimation du niveau de pression. On notera également que la résolution temporelle de la méthode, dépend de la durée d'acquisition de l'appareil utilisé pour capter les images. Par exemple pour les mesures réalisées dans le cadre de SIMMIC, la durée d'acquisition était de  $1 \mu\text{s}$ . Cette durée d'acquisition limite la capacité à mesurer le temps de montée du choc, et limite la fréquence maximum pour la calibration. Il est néanmoins possible, en combinant une analyse de mesures et modélisation, d'estimer la valeur du temps de montée en tenant compte de l'effet de moyenne dû à la propagation durant l'acquisition de l'image, et ainsi se rapprocher des valeurs de temps de montée estimés avec une meilleure résolution grâce à une technique par ombroscopie focalisée [7].

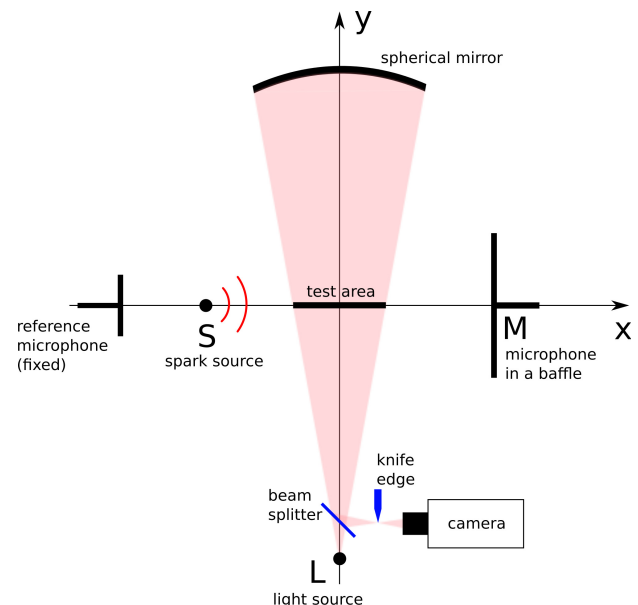


FIGURE 2 – Schéma du dispositif pour la mesure du signal de pression par strioscopie.

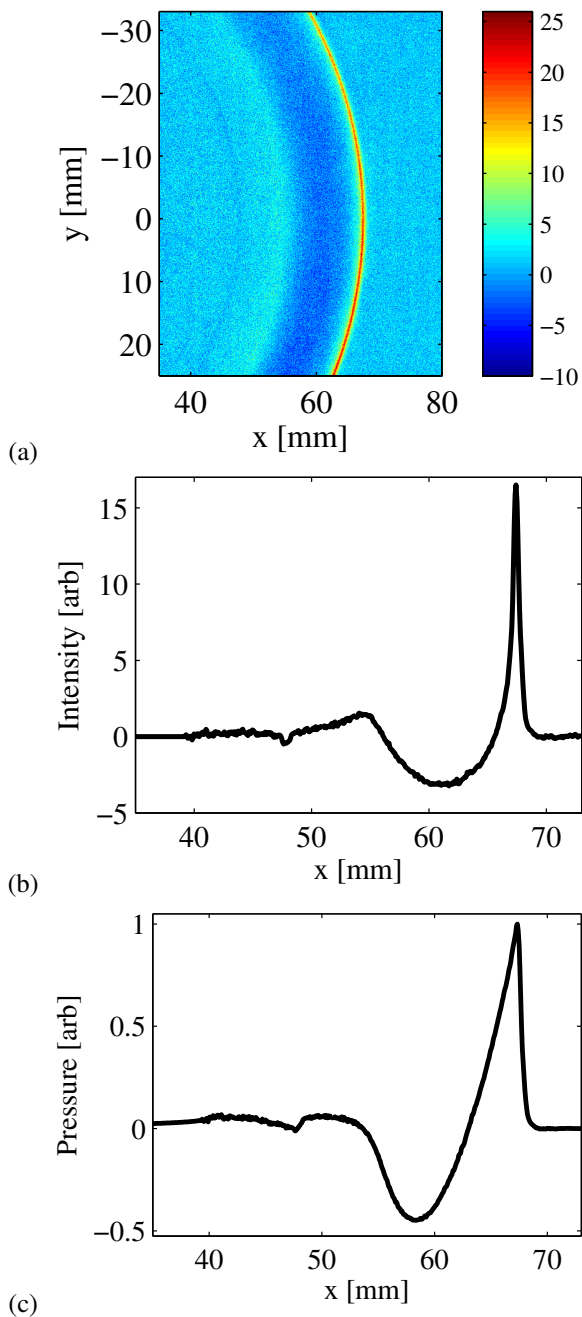


FIGURE 3 – (a) Figure d'intensité obtenue par strioscopie. (b) intensité moyenne selon le rayon de propagation. (c) pression obtenue après analyse de l'intensité. Les unités sont arbitraires.

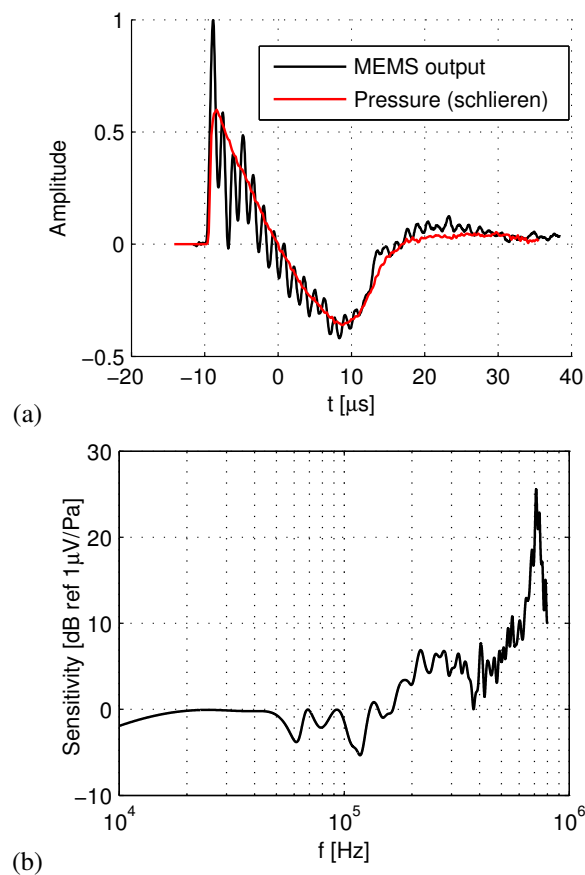


FIGURE 4 – (a) Comparaison entre la réponse temporelle d'un microphone MEMS piezorésistif et l'onde de pression incidente déduite de la mesure par ombroscopie (unités arbitraires). (b) Estimation de la réponse fréquentielle du microphone.



## 4 Troisième méthode : Estimation de la forme d'onde par interférométrie optique

La méthode précédente permet d'obtenir la forme d'onde mais pas directement le niveau de pression. Une méthode alternative, basée sur un article de Smeets [10] est d'analyser l'interférence entre deux faisceaux lasers, dont l'un est traversé par l'onde de pression. Le dispositif expérimental est basé sur un interféromètre de Mach-Zender, constitué d'un faisceau laser séparé en 2 faisceaux d'intensité égale  $I_1$  et  $I_2$  que l'on recombine au niveau d'une photodiode. Si l'un des faisceaux est traversé par l'onde acoustique, alors il se crée une interférence et la variation d'intensité détectée au niveau de la photodiode est liée à la variation de phase induite par la variation d'indice optique au niveau du faisceau traversé par l'onde, variation d'indice elle-même liée au champ de pression acoustique [11]. Dans son article, Smeets ne reconstruit pas le signal de pression à partir du signal optique, étape pourtant nécessaire car l'interféromètre ne mesure pas directement le signal de pression. Comme dans la méthode précédente, la reconstruction du champ de pression passe par une transformée d'Abel inverse car le front d'onde est sphérique. A l'issue du processus (que l'on ne détaille pas ici), on obtient une estimation de l'onde de pression en Pascals, sans avoir besoin d'étudier la variation de la durée de l'onde en fonction de la distance (méthode 1). Comme il n'y a pas nécessité d'exploiter des effets de propagation non linéaire de l'onde de choc, cela a pour conséquence que la méthode est potentiellement exploitable pour des sources linéaires ou faiblement non linéaires.

Cette méthode a été utilisée pour caractériser des microphones MEMS dans le cadre du projet SIMMIC (photo de l'expérience en figure 5). Un exemple de résultat de caractérisation d'un microphone MEMS (différent du précédent) est donné dans la figure 4 afin de montrer l'applicabilité de la méthode.

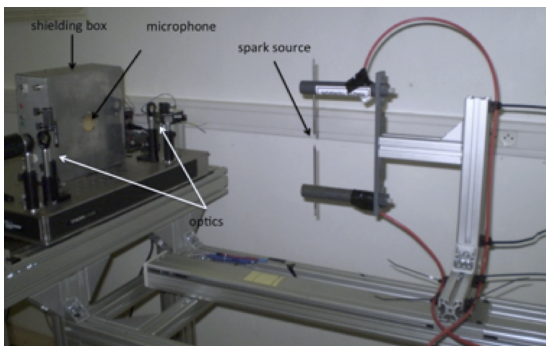


FIGURE 5 – Photo du dispositif pour la calibration d'un microphone MEMS

## 5 Conclusion

A l'issue de ces études, il apparaît qu'il est possible de calibrer des microphones dans l'air de 10 kHz jusqu'à des fréquences de l'ordre du MHz (potentiellement 2 MHz) en utilisant une source à étincelle. Trois méthodes complémentaires ont été succinctement décrites. La première méthode peut permettre d'avoir rapidement une idée de la

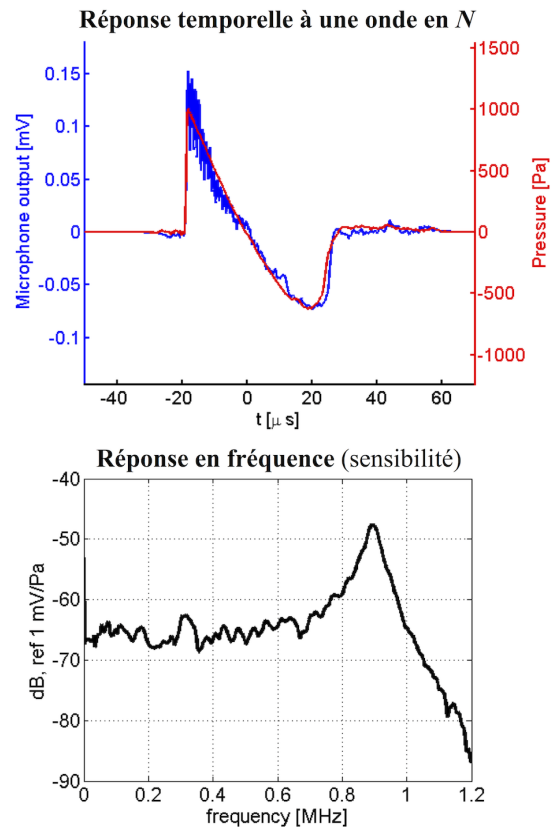


FIGURE 6 – Exemple de résultat de calibration par comparaison avec une estimation de la pression à partir d'un interféromètre optique. En haut : réponse temporelle d'un microphone MEMS à une onde en N. En bas : estimation de la sensibilité. Remarque : il s'agit d'un micro différent de celui de la figure 4.

sensibilité d'un microphone car elle ne nécessite pas de dispositif particulier, ni de post-traitement complexe. La méthode basée sur une mesure strioscopique a l'avantage de donner accès au front d'onde mais ne donne pas accès directement au champ de pression. La méthode basée sur un dispositif d'interférométrie optique apparaît la plus adaptée, mais sa validité reste conditionnée à une bonne connaissance de la directivité de la source. Pour compléter cette caractérisation à l'aide d'une source à arc électrique, une méthode plus conventionnelle par comparaison avec un microphone de mesure capacitif (1/4 ou 1/8 de pouce) permet d'obtenir la réponse en dessous de 10 kHz.

## Remerciements

Les auteurs remercient Emmanuel Jondeau, Jean-Michel Perrin et Frédéric Ferrand pour leur contribution 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] 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).
- [2] Z.J. Zhou, L. Rufer and M. Wong, "Damped Aero-Acoustic Microphone with Improved High-Frequency Characteristics", *Journal of Microelectromechanical Systems*, 99 (2014)
- [3] L. Rufer, A. Koumela, Z. Zhou, M. Wong, S. Ollivier, E. Salze, P. Yuldashev, S. Basrour, Ph. Blanc-Benon, "Wideband Silicon Measurement Microphone for High-frequency Acoustics", 12ème Congrès Français d'Acoustique, Poitiers (2014)
- [4] W.M. Wright, "Propagation in air of N-waves produced by sparks", *J. Acoust. Soc. Am.*, **73**, 1948-1955 (1983).
- [5] S. Ollivier, E. Salze, M. Averiyarov, P. Yuldashev, and P. Blanc-Benon, "Calibration method for high frequency microphones", in *Acoustics2012*, Nantes France (2012).
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] E. Salze, 2012, *Propagation acoustique non-linéaire en atmosphère inhomogène avec effets de sol : expériences à l'échelle du laboratoire*, thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lyon, No. 2012-38
- [9] G.S. Settles, "Schlieren and shadowgraph techniques : visualizing phenomena in transparent media" (Springer-Verlag, Heidelberg) (2001)
- [10] G. Smeets, "Laser interference microphone for ultrasonics and nonlinear acoustics", *J. Acoust. Soc. Am.* 61, 872-875 (1977).
- [11] P. Yuldashev, M. Averiyarov, V. Khokhlova, O. Sapozhnikov, S. Ollivier, and P. Blanc-Benon, "Measurement of shock N-waves using optical methods", in 10ème Congrès Français d'Acoustique, Lyon, 12-16 avril, CD (2010).