

# Calibrage de microphones MEMs pour usage industriel multicateurs

**Christophe Picard, Lucille Lamotte,  
Valentin Labouré, Thibaut Le Magueresse**

MicrodB  
28, chemin du petit bois  
69130 Ecully  
E-mail : christophe.picard@microdb.fr

## Résumé

La démocratisation des technologies numériques, portée par le secteur des Technologies de l'Information et de la Communication (TIC), offre de nouvelles possibilités pour la métrologie acoustique. C'est en particulier le cas pour toutes les méthodes nécessitant le déploiement d'un grand nombre de microphones (mesure de voie de transfert, imagerie acoustique...). Les technologies de microphone MEMS<sup>1</sup> et de l'électronique embarquée (processeur ARM FPGA) permettent de répondre autrement à ces besoins métrologiques acoustiques : pouvoir augmenter les performances de ces techniques tout en réduisant leur coût de mise en œuvre. Toutefois, l'intégration de ces technologies qui ne sont pas destinées à la métrologie nécessite une étape fine et rigoureuse de calibrage pour déterminer et corriger la réponse en fréquence intrinsèque du microphone MEMS soudé sur une carte électronique (PCB<sup>2</sup>).

Cet article décrit la mise en œuvre d'une calibration locale d'un microphone MEMS et l'intégration d'un filtre correcteur associé à la réponse en fréquence estimée. Il s'agit dans un premier temps de définir un protocole expérimental pour mesurer la réponse du capteur MEMS sur sa plage de fréquence de fonctionnement en travaillant sur toute la chaîne d'excitation. Puis dans un second temps, la mise au point d'un filtre assurant la compensation de la réponse en fréquence, de préférence en temps réel afin de l'implémenter au plus proche du capteur, est détaillée. L'étude vise à valider le protocole exposé dans cet article et à évaluer la possibilité d'en faire un capteur fiable pour la mesure acoustique.

**L**es microphones MEMS ont fait leur apparition commerciale massive en 2002, en particulier avec les solutions de la société américaine Knowles [1]. Leur utilisation visée pour de la métrologie apparaît dès 2004 [2]. Cette technologie présente un intérêt certain pour les techniques d'imagerie acoustique et toute autre application nécessitant un grand nombre de capteurs [4]. Toutefois l'intégration de ce type de capteur doit faire l'objet d'une attention particulière pour un usage métrologique industriel. Les fabricants de microphones MEMS fournissent une réponse en fréquence typique, théorique, avec une dispersion plutôt intéressante, a priori. En effet, les processus industriels de fabrication, qui sont ceux des circuits intégrés, garantissent une très grande similarité de comportement pour les capteurs fabriqués sur une même galette de semi-conducteur<sup>3</sup> ainsi qu'une bonne reproductibilité d'une galette à une autre. Toutefois, l'intégration d'un microphone MEMS sur un PCB influe sur sa réponse fréquentielle (épaisseur du circuit imprimé, mode de soudure). Pour la métrologie en général, et pour les techniques

d'imagerie acoustique (à grand nombre de microphones) en particulier, il est absolument indispensable de maîtriser la réponse acoustique des microphones sur la bande de fréquence d'intérêt.

Pour faire d'un microphone MEMS un outil métrologique, une relativement bonne connaissance de sa réponse en fréquence sur la plage d'intérêt et de l'incertitude de mesure associée est indispensable. Il est donc nécessaire de mesurer de manière très fiable la réponse en fréquence du MEMS puis, si besoin, de la corriger avec une erreur aussi faible que possible dans la bande de fréquence d'intérêt. Cet article répond à ces deux objectifs avec comme contrainte de réaliser la mesure dans l'environnement d'intégration. Afin d'éviter les phénomènes complexes de diffraction au sens large, il est choisi d'éviter les méthodologies de caractérisation de champ libre [3, 4, 5] et de mesurer la réponse en fréquence de chaque microphone localement.

1- Microsystème électromécanique ou *Microelectromechanical systems*

2- Circuit imprimé ou *Printed circuit board*

3- WAFER

Dans un deuxième temps, un filtre de compensation est défini pour corriger au plus proche du capteur cette réponse en utilisant au mieux la ressource calculatoire temps réel du système électronique embarqué sélectionné.

## Définition d'un protocole de mesure locale de la réponse fréquentielle d'un microphone MEMS numérique

Le microphone sélectionné est le microphone MEMS InvenSense ICS43432. Il s'agit d'un microphone numérique : la conversion analogique/digitale est effectuée au plus proche de la partie active, sur la puce semi-conductrice. Le protocole de communication des données numérique est le protocole I<sup>2</sup>S.

### Caractéristiques de la réponse en fréquence d'un capteur microphone MEMS

La notion de sensibilité exprimée habituellement en Pa/V à 1 kHz ne fait pas sens avec un capteur digital ou MEMS numérique qui fournit directement des valeurs sur une échelle de codage numérique. Pour ce capteur digital, la sensibilité est définie à 1 kHz par rapport à la saturation du capteur qui correspond à la pleine échelle de numérisation du signal. La sensibilité d'un microphone digital est alors donnée en dB FS (« *decibels relative to a full-scale digital output* »)

$$Sensitivity_{dBFS} = 20 \times \log\left(\frac{Sensitivity_{FS}}{Output_{ref}}\right) \quad (1)$$

Avec  $Sensitivity_{FS}$ , la valeur numérique correspondant au signal de référence à 94 dB et  $Output_{ref}$ , la valeur numérique maximale.

La réponse en fréquence d'un capteur est l'écart sur le spectre de mesure entre le niveau de pression de référence et ce que le capteur mesure sans correction. La réponse est calée à 0 dB à 1 kHz de par le réglage de la sensibilité. La courbe type de réponse en fréquence d'un MEMS est donnée en Figure 1 pour le capteur InvenSense ICS43432. Elle possède une partie plate entre 100 et 5 000 Hz, une résonance autour de 20 kHz et une coupure basse fréquence en dessous de 100 Hz.

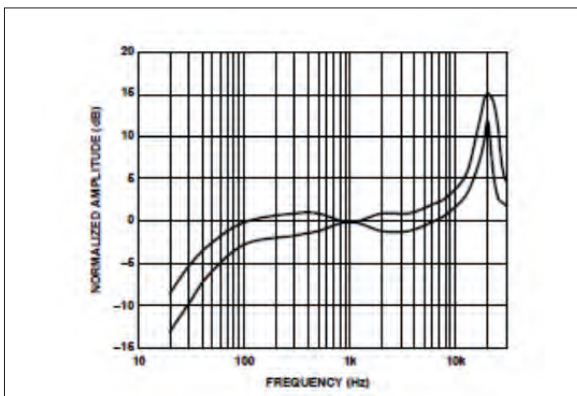


Fig. 1 : Réponse en fréquence d'un MEMS InvenSense ICS43432 (extrait de la datasheet)

Cette forme de réponse est typique d'un microphone MEMS et s'explique par sa micromécanique schématisée en Figure 2 et extrait de [6]. La partie active du capteur est composée de deux plaques : une plaque mobile, appelée membrane fermant une chambre ou cavité principale et une plaque fixe et percée de petits trous permettant de laisser passer les ondes acoustiques. Une deuxième cavité plus petite est ainsi créée entre les deux plaques. Un trou de ventilation reliant les deux chambres permet l'équilibrage de pression entre les deux chambres et facilite le mouvement de la membrane.

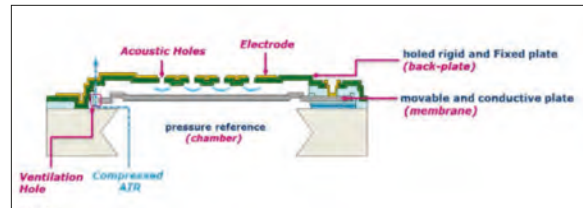


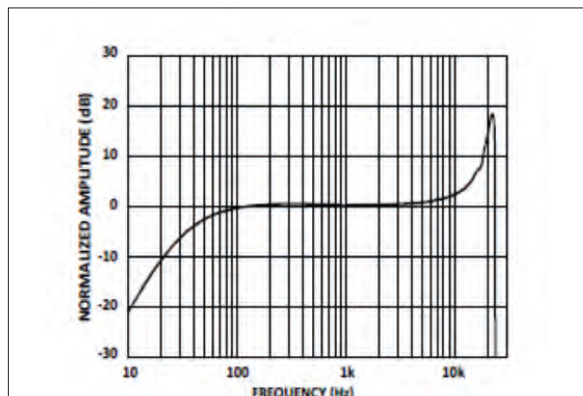
Fig. 2 : Schéma issu de la documentation Intel MEMS [6]

Ces cavités et le trou de ventilation dimensionnent ainsi la réponse du capteur. Le trou et la chambre principale influencent la réponse en basse fréquence alors que la cavité supérieure influence la réponse en haute fréquence. En effet, cette dernière crée un phénomène de résonance avec un pic sur la réponse à une fréquence (ici de l'ordre de 20 kHz) dépendant de ses dimensions.

On choisit de fixer la bande de fréquence utile du microphone de 100 Hz à 15 kHz ; la limite haute se situant dans le pied du pic de résonance.

### Choix de la méthodologie

La mesure de la réponse en fréquence peut être faite en global avec une source acoustique de référence positionnée en champ lointain ou pour chaque MEMS indépendamment avec une excitation locale [3,4,5]. Dans cet article, une mesure locale est préférée afin de ne pas être perturbé par la diffraction liée à l'environnement d'intégration (PCB, support mécanique). Pour garantir un calibrage global du microphone, représentatif de tous les phénomènes acoustique, cette réponse « environnementale » sera prise en compte dans un second temps mais ne fait pas l'objet de cet article.



Pour le calibrage local, on tente de reproduire le principe d'un système de calibrage en niveau et en phase proposé par les fabricants de microphones de laboratoire (Figure 3) : générer dans une cavité au voisinage du capteur à calibrer un champ acoustique connu, maîtrisé. La maîtrise parfaite d'un champ acoustique dans une cavité (analytique et/ou numérique) étant hors de notre portée, on procède expérimentalement en deux étapes :

- une première étape de caractérisation du champ acoustique généré.

On place un microphone de laboratoire considéré comme référence (noté en rouge en Figure 3) dans une configuration semblable à celle du microphone MEMS à calibrer, soit affleurant à une surface plane comme le PCB. Un autre microphone de laboratoire est placé tout proche du microphone de référence et est utilisé en étalon. Une première mesure permet d'estimer la fonction de transfert entre le microphone référence et le microphone étalon (ou fonction de transfert du système).

- une deuxième étape de calibrage du microphone MEMS. On applique alors le dispositif sur le microphone MEMS (en jaune en Figure 3). Et on estime la fonction de transfert entre le MEMS et le microphone étalon.

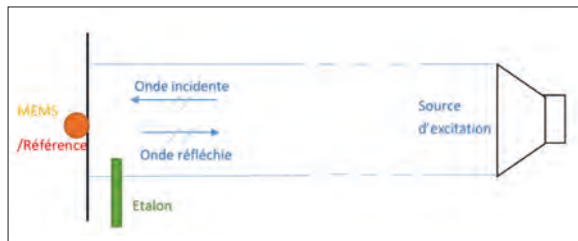


Fig. 3 : Schéma de la mesure locale d'une réponse d'un MEMS par référence

La réponse du MEMS est alors déduite du rapport des deux fonctions de transfert.

$$\text{Réponse}_{MEMS} = \frac{FRF_{MEMS}}{FRF_{REF}} = \frac{\frac{P_{MEMS}}{P_{étalon}}}{\frac{P_{REF}}{P_{étalon}}} = \frac{P_{MEMS}}{P_{REF}} \quad (2)$$

Retirer la fonction de transfert du système afin de conserver seulement la fonction de transfert du MEMS nécessite cependant de s'assurer de la linéarité de la chaîne complète d'excitation.

### Qualification du spectre d'excitation

La chaîne d'excitation se compose de 3 éléments :

- Le signal source en entrée de la chaîne,
- Le système d'émission acoustique,
- Le conduit permettant la propagation guidée de l'onde acoustique jusqu'au point de mesure MEMS, avec un effet de coloration acoustique du spectre du signal source d'entrée.

Une des difficultés majeures est d'arriver à exciter toute la plage fréquentielle d'intérêt de 100 à 15 000 Hz, avec un niveau suffisant pour ne pas être dans le bruit de fond et en limitant autant que possible la coloration acoustique (effet de résonance et antirésonance, etc.).

Le système de qualification doit donc fournir une excitation permettant d'obtenir un rapport signal à bruit (SNR) acceptable, sans toutefois faire saturer le microphone MEMS. Le niveau de bruit de fond du MEMS se situe à environ 30 dB et le maximum admissible se situe autour de 116 dB (10 % THD). On choisit un SNR de 40 dB et un niveau maximum de 110 dB ce qui permet une bonne sécurité par rapport à ces limites. Le signal au niveau du point de mesure se situera entre 70 et 110 dB.

Pour obtenir ce spectre d'excitation optimale, chacun des éléments de la chaîne doit être choisi et vérifié avec précaution.

### Qualification du signal source en entrée

Le signal source d'excitation résulte de la lecture d'un fichier son, passé au travers d'une carte son (conversion numérique/analogique) avec un amplificateur et émise par un haut-parleur.

Le fichier son contient un bruit blanc généré à une fréquence d'échantillonnage supérieure à celle de la mesure, ici 88 000 Hz pour un échantillonnage de mesure à 51 200 Hz. La référence [7] justifie d'utiliser un bruit blanc généré par loi normale par rapport à une loi uniforme. En effet, un bruit blanc créé selon une loi normale gardera une distribution normale après son passage dans un système linéaire. Cette propriété est utilisée afin de vérifier la linéarité du système.

Cette source de bruit blanc est injectée en entrée de la carte son du PC utilisé. Il est alors nécessaire de s'assurer que le signal audio créé en sortie possède un niveau électrique maximum de sortie qui utilise toute la dynamique de l'étage suivant, l'amplificateur de puissance. La dynamique d'entrée de l'amplificateur est adaptée à la tension de sortie de la carte son pour obtenir le meilleur rapport signal sur bruit possible.

Le système d'excitation nécessite également l'utilisation d'un logiciel de lecture audio. Ce dernier n'est pas neutre non plus comme le montre la figure 4, page suivante, avec la comparaison des spectres en sortie mesurés avec trois logiciels pour le même niveau de volume de la carte son du PC : Audacity, Foobar2000 et VLC. Un autre essai est réalisé avec Sweepgen qui n'est pas un lecteur audio mais directement un générateur de bruit blanc. Les spectres de Foobar2000 et de VLC possèdent une meilleure réponse en fréquence que Audacity et Sweepgen. Il est donc préconisé d'utiliser VLC ou Foobar2000. La suite de la qualification du lecteur se fait avec VLC.

L'étape suivante consiste à vérifier la linéarité de la carte son en fonction du volume en faisant varier ce dernier de 10 % à 100 % par pas de 10 %.

La figure 5, page suivante, prouve que, peu importe le volume réglé sur le mélangeur de Windows, la fréquence de coupure se trouve toujours aux alentours de 22 kHz (capacité limite de la carte son), et il n'y a pas d'accident dans la bande de fréquence étudiée. Le niveau maximum de la carte son est de -15 dBV. Cette valeur a son importance lors du choix de l'amplificateur de puissance.

### Choix de l'amplificateur et du haut-parleur

Dans le choix de l'amplificateur, trois paramètres sont importants : la sensibilité d'entrée, le SNR et la puissance de sortie. La carte son fournit au maximum un signal de -15 dBV,

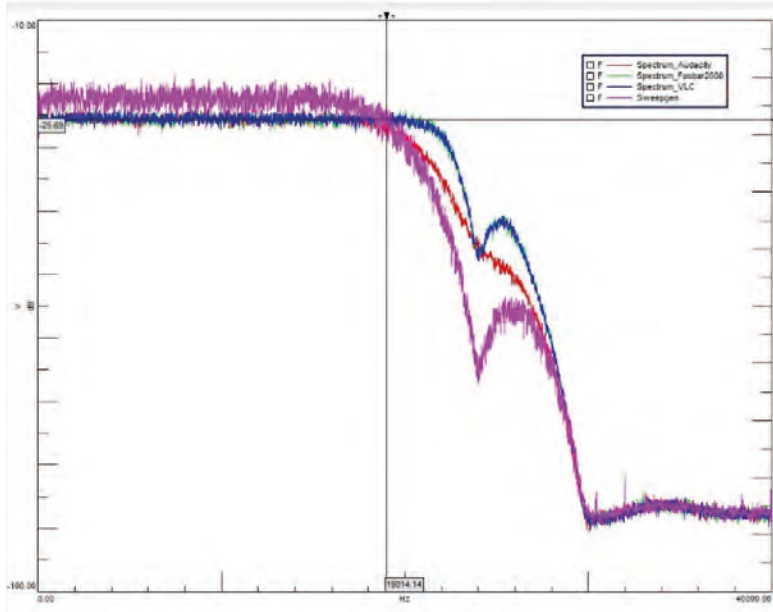


Fig. 4 : Spectre d'émission d'un même bruit blanc avec différents lecteurs logiciel Windows

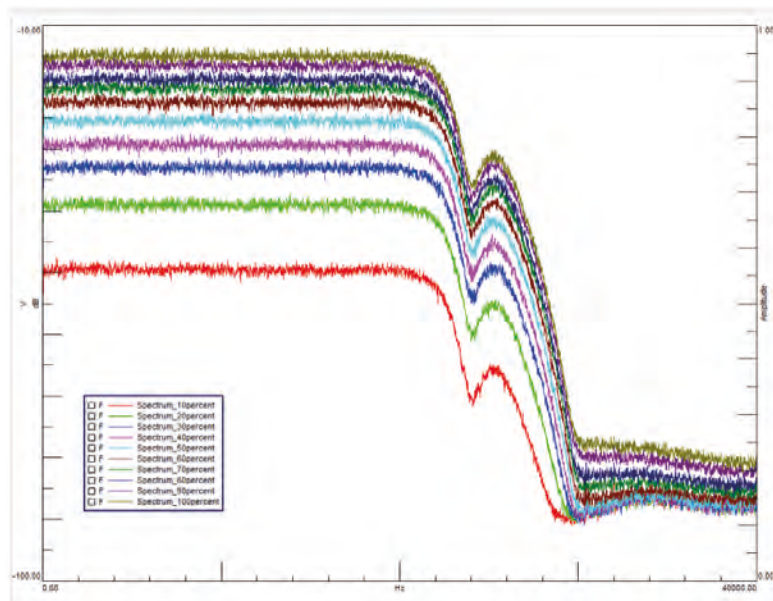


Fig. 5 : Linéarité du spectre en fonction du niveau de source

il n'y a donc pas de risque de saturation avec, par exemple, un amplificateur dont la sensibilité d'entrée est 550 mV, ou -5 dBV. La puissance de sortie doit être suffisante pour le haut-parleur visé sans être disproportionnée car cela évite de le détruire à volume maximum. Sur le SNR, si les spécifications de l'amplificateur donnent, par exemple, un SNR de 87 dB pour un signal de -5 dBV à 1 000 Hz, pour un volume maximum, un signal de -15 dBV est fourni, ce qui correspond à un SNR de 77 dB. Il est également nécessaire de s'assurer que la sortie de l'amplificateur ne colorie pas le son en fonction du volume de la source. Le choix du haut-parleur se fait en fonction de sa réponse qui doit permettre d'assurer les 40 dB maximum d'écart de niveau sur le spectre d'excitation au point de mesure final.

La réponse en fréquence donnée par le constructeur pour 1 W à 1 m du HP AURA SOUND NSW2-326-8A tient bien cette spécification avec des écarts de niveaux d'environ 6 dB entre 200 Hz et 15 kHz puis 20 dB entre 100 Hz et 20 kHz.

Par ailleurs, la petite taille de ce haut-parleur va limiter la conservation d'un champ en onde plane au-delà de deux fois son diamètre et ainsi diminuer les niveaux d'un spectre d'excitation plat. D'après ses dimensions (57 mm de diamètre), cette hypothèse devrait être valable jusqu'à :

$$f_{max} = \frac{c}{2d} = 2982 \text{ Hz}$$

### Qualification de la partie mécanique de la chaîne d'excitation

Il s'agit de la partie entre la source d'excitation et le MEMS représenté. Elle est constituée d'un cône (Figure 6) qui accueille le haut-parleur d'un côté puis est connectée à un tube de plus faible diamètre de l'autre côté. À l'extrémité de ce tube on positionne un embout plastique recevant le microphone étalon et assurant l'étanchéité avec la surface de mesure. Ces différents étages modifient le spectre d'émission de manière plus ou moins prononcée, avec un compromis à trouver entre tous les paramètres mécaniques. Le choix se porte sur le jeu de paramètres assurant au mieux un niveau d'excitation au niveau du microphone à calibrer avec un spectre le plus plat possible sur la bande de fréquence d'intérêt (100 Hz-15 kHz).

Les dimensions et forme du pavillon ne peuvent être choisies arbitrairement car il s'agit de la partie de la chaîne qui assure le transfert d'énergie et qui colore le plus l'excitation acoustique. Sa forme peut engendrer de nombreuses résonances et antirésonances qui causeraient respectivement une saturation sur le MEMS ou une mesure dans le bruit de fond si les limites de 110 dB de saturation et 40 dB de dynamique sur les niveaux du spectre ne sont pas respectées. De nombreuses formes de pavillons existent pour la reproduction sonore comme les pavillons hyperboliques, paraboliques, coniques ou exponentiels. Par expérience, la forme retenue est exponentielle car elle semble offrir la meilleure adaptation et donc présenter le moins de résonances. La formule d'expansion d'un pavillon exponentiel est tirée de [8] :

$$S(x) = S_i \times e^{-mx} \quad (3),$$

avec  $S(x)$ , la surface de la section en  $x$ ,  $S_i$ , la surface initiale du pavillon, et  $m$ , un coefficient défini par :

$$m = F_c \times 4\pi / c$$

et avec  $F_c$ , la fréquence de coupure du pavillon, et  $c$ , la vitesse du son.

Pour la plus basse fréquence de 100 Hz pour passer d'une surface de  $1,73e-3$  m (Surface HP) à  $2,83e-5$  m (Surface tube), ceci nécessite un pavillon de 1,11 m de long. Il est nécessaire de remonter la fréquence basse afin de diminuer l'encombrement. Une taille d'environ 10 cm donne une fréquence de coupure de 1 000 Hz. Des effets indésirables de type résonance d'embouchure pourraient donc apparaître dans le pavillon en dessous de 1 000 Hz. Le pavillon ainsi calculé a été fabriqué à l'aide d'une imprimante 3D, un volume ajusté au haut-parleur a été ajouté permettant de fixer la position du pavillon par rapport à celui-ci.



Fig. 6 : Pavillon exponentiel de 10 cm

La mesure de l'autospectre de la source en sortie du pavillon est présentée en Figure 7. Des pics de résonance conduisent à des écarts de niveaux très importants sur le spectre, supérieurs aux 40 dB maximum requis, notamment en basse fréquence en dessous de la fréquence de coupure de 1 000 Hz calculée précédemment. Par ailleurs, les antirésonances ne sont pas trop marquées avec cette forme de pavillon, au moins 10 dB au-dessus du bruit de fond. Lors de la première caractérisation du pavillon exponentiel, le système est fermé aux deux extrémités et provoque un mode de cavité important en basse fréquence. La même mesure est réalisée en décollant de 2 cm le système entre le haut-parleur et le pavillon. Le mode de cavité a bien disparu et le spectre conserve au-delà de 1 000 Hz sa première antirésonance puis une réponse similaire au pavillon collé. Avec cette position et forme de pavillon, les niveaux par fréquence évoluent entre 75 dB maximum et 30 dB minimum, minima atteints autour de l'antirésonance à 10 000 Hz. La cohérence pourrait donc chuter autour de cette fréquence avec des niveaux dans le bruit de fond. On ne peut plus augmenter le niveau global afin de ne pas dépasser par ailleurs le niveau maximum admissible par le microphone MEMS.

La chaîne d'excitation se termine par un tube qui peut également modifier la coloration du spectre par sa longueur, son type de matériau. La mesure de l'autospectre précédent à la sortie du pavillon et du tube a été comparée pour différentes longueurs et matières de tube : tube en plastique souple et tube en plastique rigide. Il s'est avéré que le manque d'énergie observé entre 4 kHz et 7 kHz avec un tube souple est compensé avec le tube rigide, donc ce dernier est recommandé en comparaison du tuyau souple. Par ailleurs, la longueur du tube (50 cm, 1 m et 2 m) influe sur l'atténuation des niveaux au-delà de 3 kHz car l'hypothèse onde plane n'est plus respectée de par le diamètre du haut-parleur, il est alors préférable de conserver un tube court.

Pour finir la définition et la validation de la partie excitation, la conservation de la linéarité de la chaîne est vérifiée à l'aide de la densité de probabilité du signal à tous les étages. La deuxième partie sur la mesure de fonction de transfert entre le MEMS/le microphone de référence et le microphone étalon dans l'embout va confirmer ce point.

### Mesures et correction de la réponse d'un MEMS

La mesure de la réponse des 81 microphones MEMS InvenSense ICS43432 de l'antenne digitale LMS SoundCamera est présentée dans ce chapitre. L'antenne possède également quatre voies externes analogiques ICP synchrones pour la mesure de la référence et de l'étalon réalisée avec des microphones 1/8 de pouces.

#### Réponse du système

La première mesure à partir des microphones étalon et de référence 1/8 pouce permet de vérifier la réponse du système. Les résultats sont donnés en Figure 8.

Dans un premier temps la cohérence est analysée afin de s'assurer de ne pas se situer dans le bruit de fond ou atteindre les niveaux de saturation des MEMS. Le léger creux de cohérence annoncé par l'antirésonance du pavillon est vérifié sans gravité. La cohérence est très bonne (courbe rouge) au global.

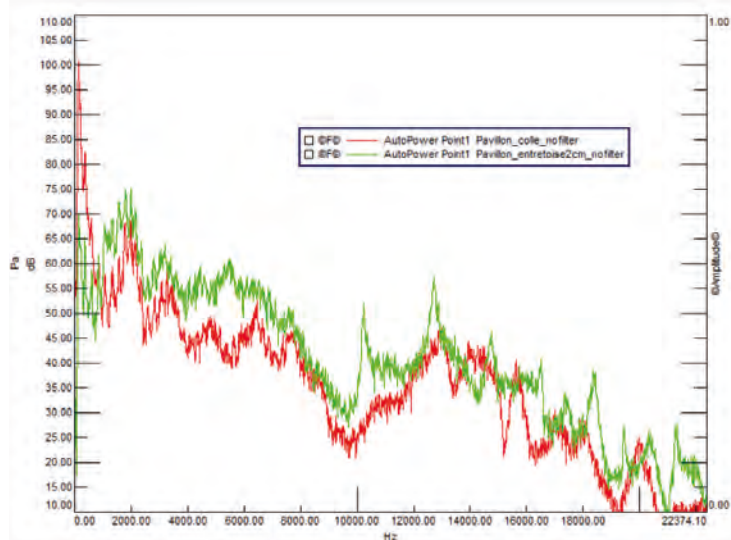


Fig. 7a : Spectre d'émission du pavillon exponentiel collé (rouge) et décollé (vert)

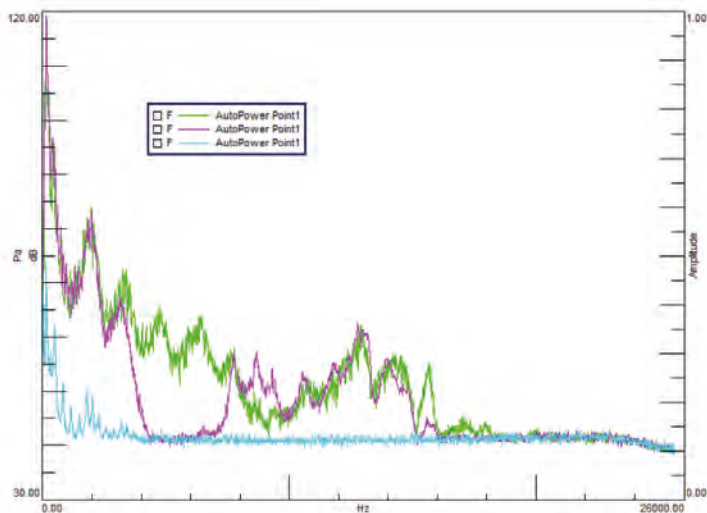


Fig. 7b : Spectre d'émission du pavillon exponentiel collé en plastique souple (magenta) et plastique rigide (vert) en sortie du tube par rapport au bruit de fond (bleu)

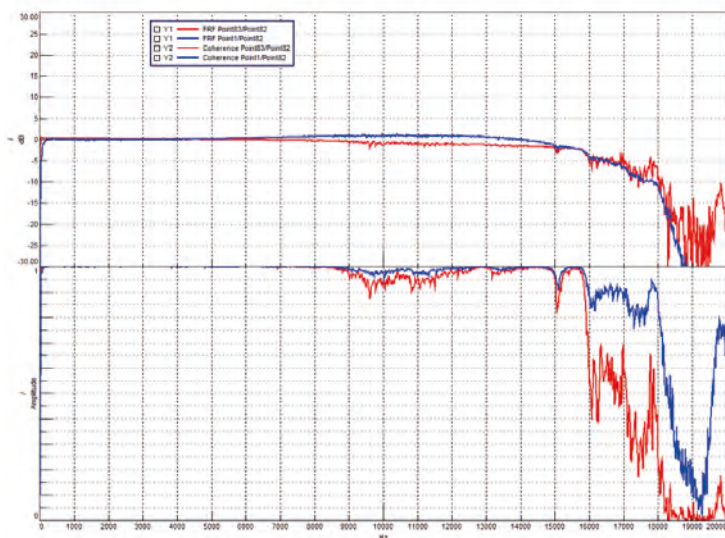


Fig. 8 : Fonction de transfert (haut) et cohérence (bas) pour la référence en rouge et un MEMS en bleu par rapport au microphone étalon

Le transfert est quasi nul entre la référence et l'étalon jusqu'à 15 kHz ce qui signifie que la mesure de fonction de transfert du MEMS donne quasi directement sa réponse.

**Réponse du MEMS**

La deuxième mesure est celle de la fonction de transfert MEMS/étalon. Les résultats sont donnés en figure 9 pour les 81 MEMS d'une antenne. La dispersion est assez faible sur l'ensemble des microphones MEMS, moins de 1 dB jusqu'à 10 kHz, et moins 5 dB entre 10 et 15 kHz.

Pour les 81 MEMS de l'antenne, leur réponse fréquentielle a été calculée à partir des mesures de fonction de transfert précédente en soustrayant la réponse du système (courbe rouge de la figure 8, en haut). En figure 10, les réponses sont données en tiers octave. Elles sont très proches de la spécification constructeur (Figure 1) avec une partie plate entre 200 Hz et 3 kHz. En revanche la variation dans le pied de la résonance est plus importante que celle spécifiée par le fabricant.

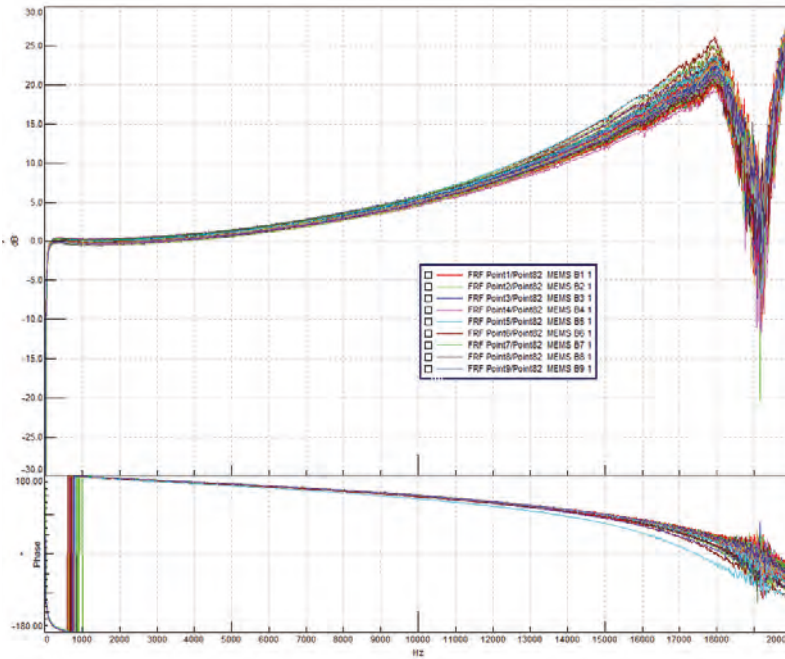


Fig. 9 : Fonction de transfert de 81 MEMS InvenSense ICS43432 avec la référence

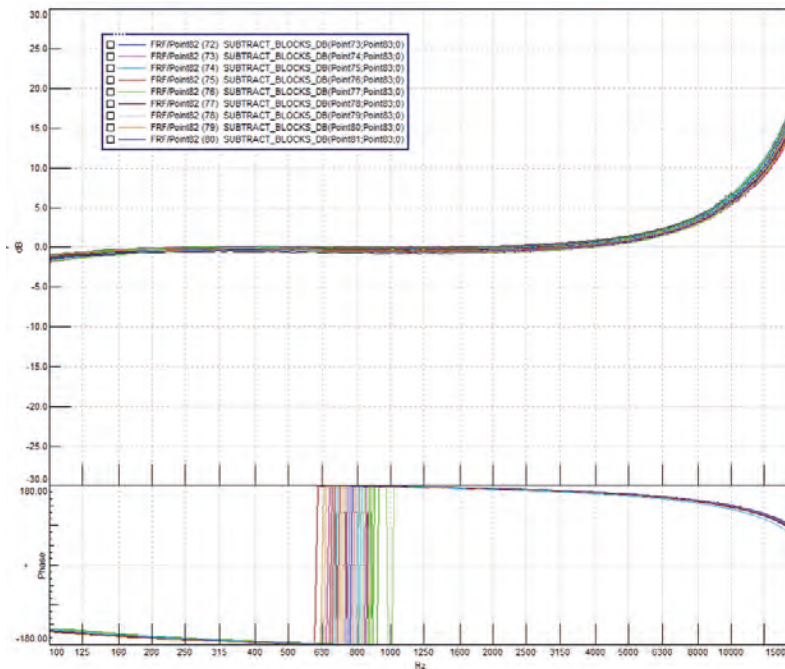


Fig. 10 : Fonction de transfert de 81 MEMS avec la référence

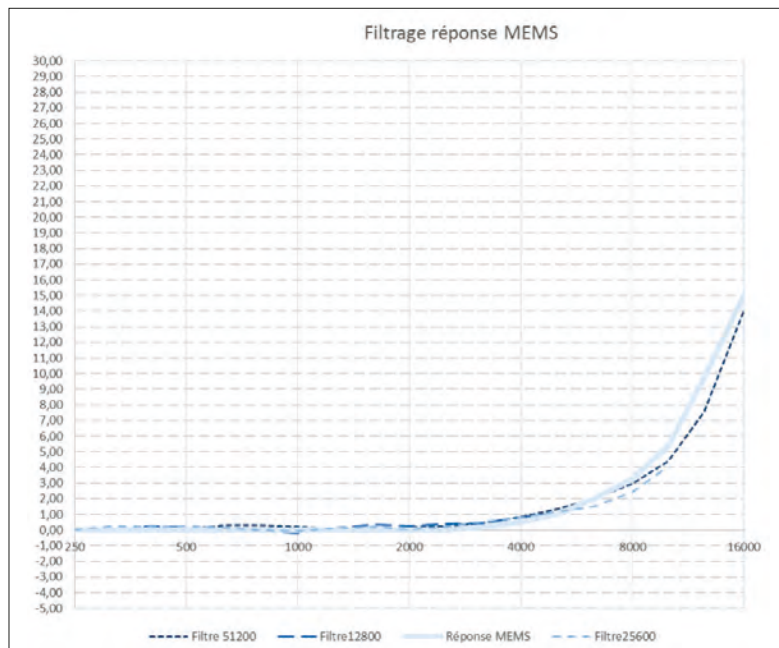


Fig. 11: Réponse des filtres de correction à 51 200 Hz et avec du rééchantillonnage à 25 600 Hz et 12 800 Hz

### Définition et validation d'un filtre correctif à la réponse fréquentielle d'un microphone MEMS

Le filtrage ne doit pas modifier la phase. Le choix se porte donc sur un filtrage à phase nulle à base de filtres à réponse impulsionnelle finie (RIF). Un filtre numérique RIF est caractérisé par une réponse uniquement basée sur un nombre fini de valeurs du signal d'entrée. Par conséquent, quel que soit le filtre, sa réponse impulsionnelle sera stable et de durée finie, dépendante du nombre de coefficients du filtre.

$$y[n] = \sum_{k=0}^N b_k \cdot x[n-k]$$

On choisit d'effectuer la compensation au plus proche du capteur, dans le système embarqué basé sur un processeur bi-cœur ARM/FPGA. Les ressources calculatoires sont limitées. Il n'est pas possible d'appliquer un filtre différent adapté à chaque capteur. On choisit donc un filtre moyen pour tous les microphones MEMS et on essaie de limiter le nombre de cellule N du filtre.

Par ailleurs, ce filtre est combiné à un filtre de décimation afin de sous-échantillonner (fonctionnalité utile voulue pour ce système) d'un facteur 2 ou 4 et travailler dans les bandes de fréquences 100-12 800 Hz ou 100-6 400 Hz respectivement.

Le filtre a été conçu à partir de SCILAB qui propose des fonctions pour la conception de ce genre de filtres. Le nombre minimal de cellules pour réaliser ce filtre est guidé par la capacité de traitement. Il en résulte un filtre de 9 cellules à 51 200 Hz, 28 cellules à 25 600 Hz et de 54 cellules à 12 800 Hz de fréquence d'échantillonnage.

La figure 11 valide le choix des filtres avec un écart à la réponse des MEMS inférieur au dB jusqu'à 5 kHz, puis de l'ordre de 2 dB entre 5 et 15 kHz. Ceci satisfait les spécifications de l'antenne.

### Conclusion

Le processus défini dans cet article permet de mesurer en local la réponse en fréquence d'un microphone MEMS intégré dans son environnement de 100 Hz à 15 kHz. Chaque élément de la chaîne d'excitation a été optimisé afin d'obtenir un signal d'excitation adapté aux caractéristiques d'un microphone MEMS. Mais ce système ne permet pas encore de mesurer la réponse entre 15 et 20 kHz. Les mesures d'une centaine de MEMS ont montré que la répétabilité du processus est bonne, la dispersion sur les MEMS est très faible et est conforme à la spécification du constructeur. Grâce à la connaissance précise et la stabilité de cette réponse, une correction est implémentée et permet de faire de ces capteurs un outil métrologique quantitatif.

La réponse de l'environnement pourrait être mesurée ou calculée dans un second temps afin d'effectuer une correction globale.

### Références bibliographiques

- [1] G.W. Elko and K.P. Harney. A history of consumer microphones : The electret condenser microphone meets micro-electro-mechanical-systems. *Acoustic Today*, 5 :4-13, 2009
- [2] W. C. Babel III, Q. A. Shams, J.F. Bockman. Qualitative Analysis of MEMS Microphones, 16th Annual International Military & Aerospace/Avionics Cots Conference, Exhibition & Seminars, August 2004
- [3] J. Czarny. Conception, Fabrication of a MEMS microphone and Characterization of a MEMS microphone, INSA de Lyon, 2015. English <NNT:2015ISAL0003>. <tel-01247487>
- [4] Z. Havranek, P. Benes. Free field calibration of MEMS microphone array used for acoustic holography. 21st ICSV, China, 2014
- [5] S. Ollivier, E. Salze, M. Averiyarov, P.V. Yuldashev, V. Khokhlova, P. Blanc-Benon. Calibration method for high frequency microphones, *Acoustic 2012*
- [6] AN 4426, Application note, ST, DocID025704 rev2
- [7] Bendat and Piersol. *Engineering Applications of correlation and spectral analysis*. J. Wiley, 8 mars 1993
- [8] Horn Theory : An Introduction. Part 1 par AudioXpress