

CFA '18 LE HAVRE ■ 23-27 avril 2018
14^{ème} Congrès Français d'Acoustique



Mesurer et corriger la réponse en fréquence d'un MEMS

L. Lamotte, T. Le Magueresse et C. Picard
MicrodB, 28 chemin du petit bois, 69130 Ecully, France
lucille.lamotte@microdb.fr

La démocratisation 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 capteur numérique MEMS et processeur embarqué ARM FPGA vont permettre de répondre autrement à ces techniques de mesures : pouvoir augmenter les performances de ces technologies tout en réduisant leur coût en œuvre. Toutefois, l'intégration de ces technologies qui ne sont pas destinées à la métrologie nécessite une étape fine et rigoureuse, de calibrage principalement pour déterminer et corriger la réponse en fréquence intrinsèque du MEMS soudé sur une carte électronique (PCB).

Cet article décrit la mise en œuvre d'une calibration locale d'un microphone MEMS et l'intégration d'un filtre associé à cette réponse pour la corriger. Il s'agira 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. Puis dans un second temps, il sera détaillé la mise au point d'un filtre assurant sa correction de préférence en temps réel afin de l'implémenter au plus proche du capteur. La validation de la mesure d'un capteur MEMS corrigé permettra de valider le protocole défini dans cet article et la possibilité d'en faire un capteur fiable pour la mesure acoustique.

1 Introduction

Les microphones MEMS ont fait leur apparition commerciale en 2002 avec Knowles [1]. Leur utilisation visée pour de la métrologie apparaît dès 2004 [2]. Ils sont souvent associés à des processeurs embarqués ARM FPGA afin d'effectuer leur traitement en local et conserver la compacité du produit final. Ces technologies ont un apport indéniable dans les techniques d'imagerie acoustique et toute autre application nécessitant un grand nombre de capteurs [4]. Il reste cependant la difficulté d'intégrer et distribuer ces micro-capteurs.

Par rapport à un microphone classique, l'intégration d'un MEMS sur un PCB va modifier sa réponse fréquentielle. Même si les constructeurs peuvent donner une courbe type, cette dernière variera autour de cette réponse. D'autre part, la notion de sensibilité exprimée habituellement en Pa/V ne fait pas sens avec un capteur digital ou MEMS numérique qui fournit directement des valeurs sur une échelle de codage numérique. La phase de calibrage va permettre de définir également une grandeur qui va transformer ces valeurs sans unité en unités physiques.

Pour faire d'un microphone MEMS un outil métrologique, une très grande précision de la valeur délivrée et de son incertitude est indispensable. Il est donc nécessaire de mesurer de manière très fiable la réponse en fréquence du MEMS puis de la corriger avec une erreur aussi faible que possible. Cet article répond à ces deux objectifs avec comme contrainte de réaliser la mesure dans leur environnement d'intégration. Cela implique une diffusion de champ non libre (compact, encombré réverbérant...). La mesure de sa réponse se fera alors en local, des méthodologies existant pour des capteurs intégrés conservant des propriétés de champ libre [3,4,5]. Dans un deuxième temps, un filtre est défini pour corriger au plus proche du capteur cette réponse avec un minimum de ressource consommée que permet un processeur embarqué.

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

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

La sensibilité permet tout d'abord d'ajuster le niveau de référence à 1 kHz. Pour un capteur digital, cette dernière 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 94dB 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 5000 Hz, une résonance autour de 20 kHz et une fréquence de coupure en dessous de 100 Hz.

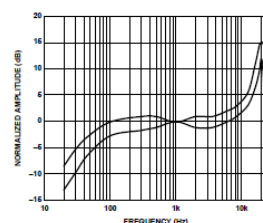


Figure 4. Frequency Response Mask

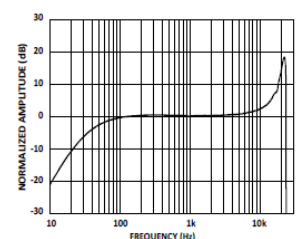


Figure 5. Typical Frequency Response (Measured)

Figure 1: réponse en fréquence d'un MEMS Invensense ICS43432 extrait de la datasheet.

Cette forme typique de réponse d'un MEMS s'explique par sa micro-mécanique schématisée Figure 2 et extrait de [6]. Le capteur se compose d'une chambre principale fermée par le haut par un diaphragme, constitué de deux silicoes créant une deuxième petite cavité, celui du haut étant rigide et percé pour laisser passer les ondes acoustiques, celui du bas mobile telle une membrane qui comprime l'air dans la chambre. Un trou de ventilation dans la chambre permet d'évacuer la pression créée à l'intérieure. Cette chambre, le trou et la cavité entre les silicoes modifient donc les caractéristiques initiales du champ de pression mesuré.

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 dépendant de sa taille (ici 20 kHz). Le calibrage est effectué donc sur une plage utile de 100 Hz à 15 kHz en dehors du pic de résonance.

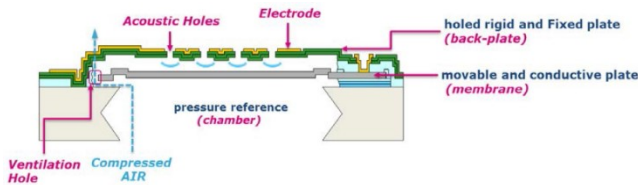


Figure 2: Schéma issu de la documentation Intel MEMS [6].

2.2 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 pour ne pas être perturbée par la diffraction liée à l'environnement d'intégration (PCB, mécanique de support...). Cette réponse de l'environnement pourra être mesurée ou calculée dans un second temps afin d'effectuer une mesure globale mais ne fait pas l'objet de cet article.

La mesure classique d'une réponse en fréquence comporte tout d'abord une mesure de pression de référence permettant de déterminer le spectre d'excitation au point de mesure. Pour cette dernière il est nécessaire d'utiliser un microphone calibré avec une réponse plate dans la bande d'intérêt, monté dans les mêmes conditions que le capteur MEMS, soit affleurant à une surface plane comme le PCB. Puis la mesure par le capteur MEMS dans les mêmes conditions est comparée à la référence. La réponse est alors l'écart entre les deux mesures au même point. Etant donné que les deux spectres ne peuvent être mesurés en simultanément, il est probable que les conditions de mesure soient différentes entre les 2 mesures (niveau de la source d'excitation, transfert entre la source acoustique et le point de mesure, ...). Il est alors préférable de travailler à partir des fonctions de transfert entre 2 points de mesure pour s'affranchir de la réponse du système.

La figure 3 illustre le montage expérimental de cette mesure par fonction de transfert. Un microphone de mesure commun et fixe appelé étalon est positionné au plus proche du point de mesure du MEMS et ce pour garder une onde

incidente de niveau supérieure à l'onde réfléchie. Un microphone en place du MEMS est utile pour la mesure de référence de la fonction de transfert qui permet de s'affranchir de la réponse du système. Il est remplacé par le MEMS à la deuxième mesure de fonction de transfert.

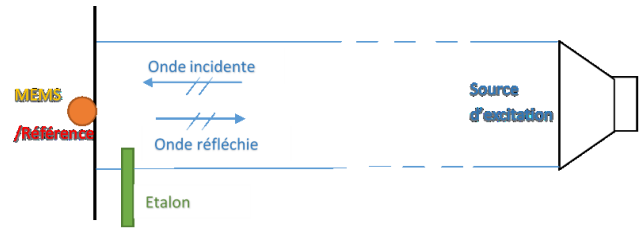


Figure 3: Schéma de la mesure locale d'une réponse d'un MEMS par référence.

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

$$Réponse_{MEMS} = \frac{FRF_{MEMS}}{FRF_{REF}} = \frac{P_{MEMS}}{P_{étalon}} \frac{P_{REF}}{P_{étalon}} = \frac{P_{MEMS}}{P_{REF}} \quad (2)$$

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 du système.

3 Qualification du spectre d'excitation

La chaîne d'excitation se compose de 3 éléments:

- La source en entrée de la chaîne,
- Le système d'émission de la source,
- Le conduit permettant la propagation guidée de l'onde acoustique jusqu'au point de mesure MEMS, avec un effet de coloration acoustique du spectre de la 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 en évitant fréquence de coupure et résonance. Le système de qualification doit donc fournir une excitation permettant d'obtenir un rapport signal à bruit (SNR) acceptable, sans toutefois faire saturer les MEMS. Le niveau de bruit de fond des MEMS se situe à environ 30 dB et ils saturent à environ 116 dB (10% THD). Un SNR de 40 dB et un niveau maximum de 110 dB permettent une bonne tolérance 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 de ces éléments doit être choisi avec précaution.

3.1 La qualification de la source en entrée

La source d'excitation est le résultat 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 doit contenir un bruit blanc, avec une fréquence d'échantillonnage supérieure à celle de la mesure (88 000 Hz par exemple 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. Un bruit blanc créé par loi normale gardera une distribution normale après son passage dans un système linéaire. Cette propriété pourrait permettre de vérifier la linéarité du système et donc de s'assurer qu'il est possible de retirer la mesure de référence à la mesure du MEMS.

Cette source de bruit blanc est injectée en entrée de la carte son du PC en général (il est possible également d'utiliser un autre convertisseur numérique analogique) mais dans tous les cas, il est nécessaire de s'assurer que le signal audio créé en sortie a un niveau électrique maximum en sortie qui utilise toute la dynamique de l'amplificateur de puissance. La dynamique d'entrée de l'amplificateur sera adaptée à la tension de sortie de la carte son pour obtenir le meilleur rapport signal sur bruit possible.

Cette mesure nécessite également l'utilisation d'un logiciel de lecture audio. Ce dernier n'est pas neutre non plus comme le montre la Figure 4 avec la comparaison des spectres en sortie mesurés avec 3 logiciels pour le même niveau de volume: Audacity, Foobar2000 et VLC. Sweepeg. n'est pas un lecteur audio mais un générateur de bruit blanc. Il n'est donc pas possible de lui faire lire le même fichier que les autres. Les spectres de Foobar et de VLC possèdent une meilleure réponse en fréquence que Audacity et Sweepeg. Il est donc préconisé d'utiliser VLC ou Foobar. La suite de la qualification du lecteur se fait avec VLC.

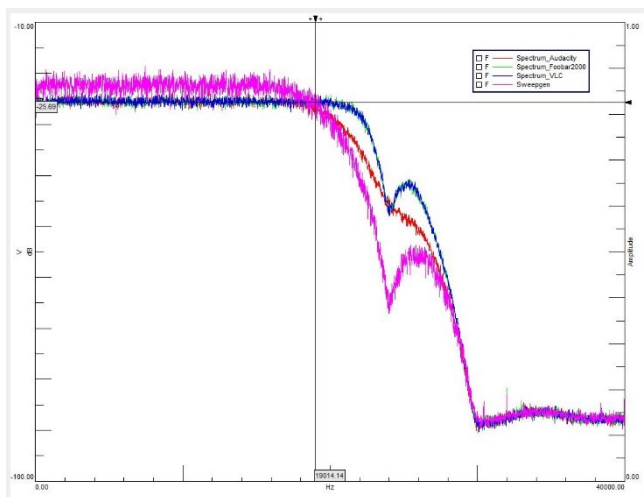


Figure 4: spectre d'émission d'un même bruit blanc avec différents lecteurs logiciel Windows

L'objectif suivant avec ce lecteur est de 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 prouve que peu importe le volume réglé sur le mélangeur de Windows la fréquence de coupure se trouve toujours aux alentours de 22kHz (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 -15dBV. Cette valeur a son importance lors du choix de l'amplificateur de puissance.

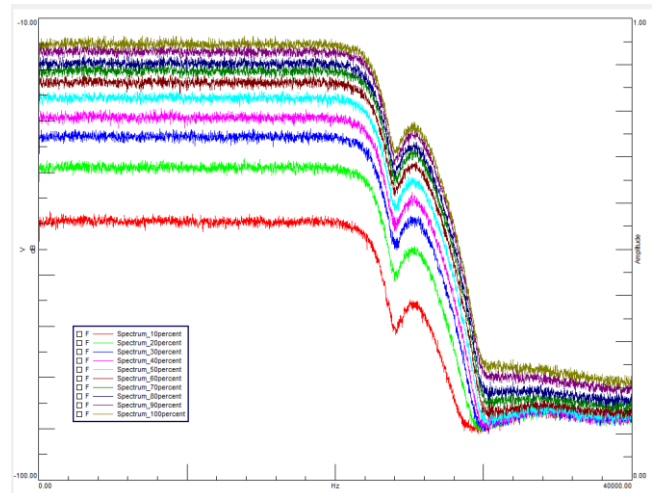


Figure 5: linéarité du spectre en fonction du niveau de source

3.2 Choix du haut-parleur et de l'amplificateur

Dans le choix de l'amplificateur, 3 paramètres sont importants : la sensibilité d'entrée, le SNR et la puissance de sortie. La carte son fournit au maximum un signal de -15dBV, il n'y a donc pas de risque de saturation avec par exemple un amplificateur dont la sensibilité d'entrée est 550 mV, -5 dBV. La puissance des sorties doit être suffisante pour les petits haut-parleurs visés sans être disproportionnée car cela permet de ne pas les détruire à son volume maximum. Sur le SNR, si les spécifications de l'amplificateur donnent par exemple un SNR de 87dB pour un signal de -5dBV à 1000Hz, pour un volume maximum, un signal de -15dBV est fourni, ce qui correspond à un SNR de 77dB. 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 1W à 1m 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, sa petite taille 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 (57mm de diamètre) cette hypothèse devrait être valable jusqu'à :

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

Par la suite de l'étude de la chaîne, cette hypothèse se vérifiera en sortie du tube avec une atténuation de plus en plus forte en dessous de 3 kHz avec une plus grande longueur de tube.

3.3 La qualification de la chaîne d'excitation

C'est la partie entre la source d'excitation et le MEMS représentée en Figure 1. Elle est constituée d'un cône placée au-dessus de la source qui se termine par un conduit plastique. A son autre extrémité se positionne un embout

afin d'assurer l'étanchéité avec la surface de mesure. Entre les deux, un tube transmet l'énergie. Ces différents étages modifient le spectre d'émission de manière plus ou moins prononcée, avec un compromis à définir sur les fréquences de coupure : conserver celui qui garde au mieux le niveau de la source avec un spectre le plus plat possible et dont la plage d'émission est au plus proche de la bande de fréquence d'intérêt (100Hz-15 kHz).

Les dimensions et forme du pavillon ne peuvent être choisies arbitrairement car il s'agit de la partie de la chaîne qui colore le plus le son dans le transfert d'énergie. Sa forme peut engendrer de nombreuses résonances et antirésonances qui engendreraient respectivement une saturation sur le MEMS ou une mesure du bruit de fond si les données préliminaires de 110 dB de saturation et 40 dB de dispersion 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. De par leur 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 exponentielle est tirée de [8]:

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

avec

$S(x)$, surface de la section en x

S_i surface initiale du pavillon

m , coefficient définit par :

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

Avec

F_c , fréquence de coupure du pavillon

c , vitesse du son.

A une fréquence basse de 100 Hz pour passer d'une surface de $1,73e-3$ m (Surface HP) à $2,83e-5$ m (Surface tube) correspond un pavillon de 1,1m. Il est nécessaire de remonter la fréquence de coupure afin de diminuer l'encombrement. Une taille d'environ 10 cm donne une fréquence de coupure de 1000 Hz. Des résonances devraient donc normalement apparaître dans le pavillon sur la bande de fréquences 1000 Hz – 15 kHz.

Le pavillon ainsi calculé a été fabriqué à l'aide d'une imprimante 3D, un volume ajusté au HP a été ajouté permettant de fixer la position du pavillon par rapport au HP.



Figure 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, supérieur aux 40 dB maximum requis, notamment en basse fréquence en dessous de la fréquence de coupure de 1000 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 mesure du pavillon exponentielle, 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 HP et le pavillon. Le mode de cavité a bien disparu et le spectre conserve au-delà de 1000 Hz sa première anti-résonance 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 atteint 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 pour ne pas saturer le système par ailleurs.



Figure 7: spectre d'émission du pavillon exponentiel collé (rouge) et décollé (vert)

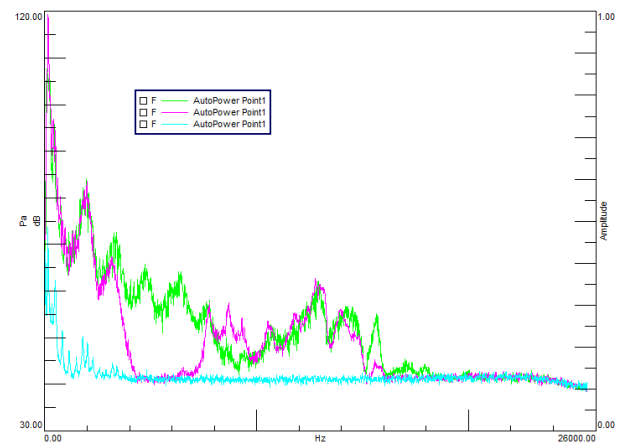


Figure 7: spectre d'émission du pavillon exponentiel collé en plastique souple (magenta) et plastique rigide (vert) en sortie du tube par rapport au bruit de fond (bleu)

La chaîne d'excitation se termine par un tube qui peut également modifier la coloration du spectre par sa longueur, son matériau. La mesure de l'autospectre précédent à la sortie du pavillon et du tube a été comparée pour différentes longueurs et matière 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 au tuyau souple.

Par ailleurs, la longueur du tube (50 cm, 1m et 2m) 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 validation de la partie excitation, la conservation de la linéarité de la chaîne est vérifiée par exemple à l'aide de la densité de probabilité du signal. Ce travail n'a pas été fait car 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 permettre de conclure sur ce point.

4 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 va être présentée dans ce chapitre. Le système possède également 4 voies externes analogiques ICP synchrones pour la mesure de la référence avec des microphones 1/8 de pouces.

4.2 Réponse du système

La première mesure à partir des microphones étalon et de référence à réponse plate sur la bande 100-15000 Hz 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 des niveaux de saturations des MEMS. Le léger creux de cohérence annoncé par l'anti résonance du pavillon est vérifié sinon la cohérence est très bonne (courbe rouge).

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.

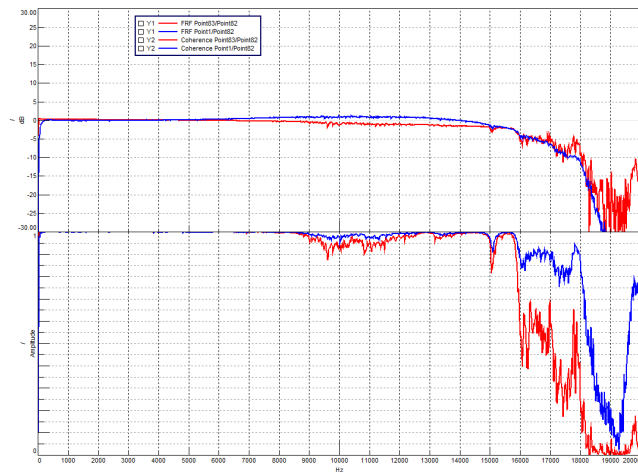


Figure 8: Cohérence et fonction de transfert pour la référence en rouge et un MEMS en bleu.

4.3 Réponse du MEMS

La deuxième mesure est celle de la fonction de transfert MEMS/étalon. Les résultats sont donnés en Figure 8 pour un MEMS et 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.

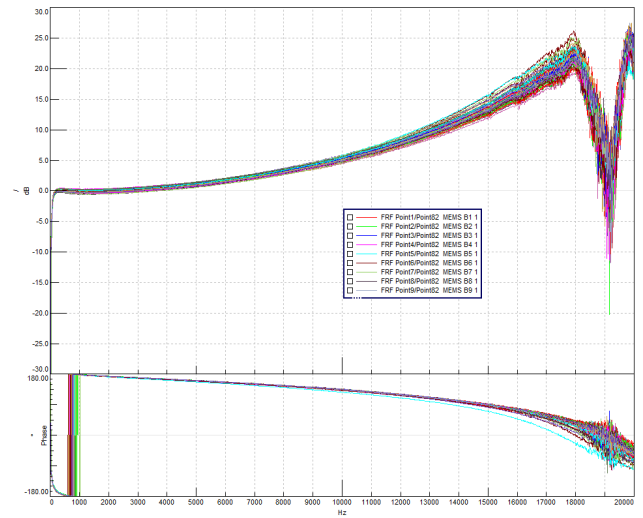


Figure 9: Fonction de transfert de 81 MEMS InvenSense ICS43432 avec la référence.

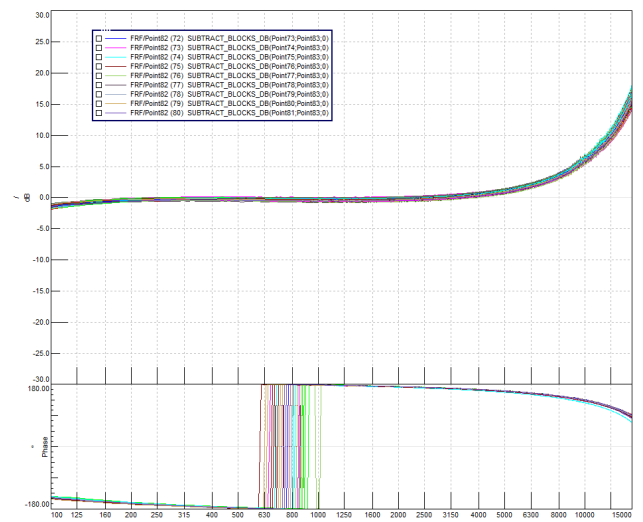


Figure 10: Fonction de transfert de 81 MEMS avec la référence.

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

4.4 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 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. Par ailleurs, il n'introduit pas de déphasage.

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

Etant donné que la correction doit être faite au plus près du capteur afin de transférer au module de traitement du processeur ARM/FPGA directement les valeurs physiques mesurées, le filtre ne doit pas comporter trop de cellule N.

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

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 cellule 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 à 12 800 Hz de fréquence d'échantillonnage.

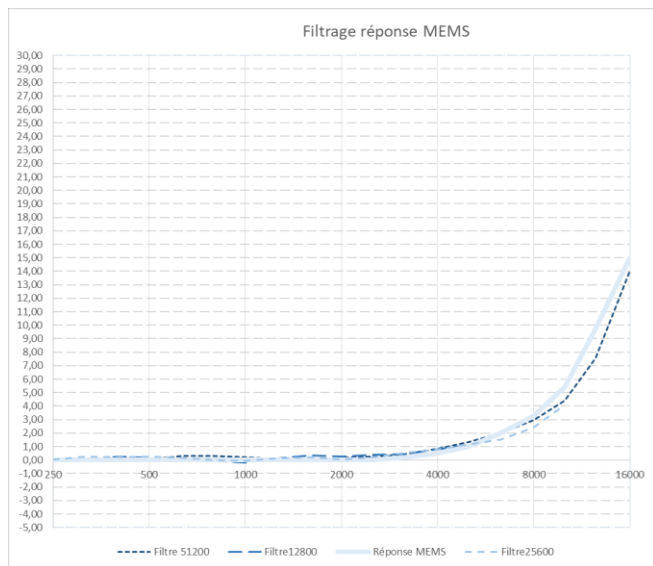


Figure 11: Réponse des filtres de correction à 51 200 Hz et avec du rééchantillonnage à 25 600 Hz et 12 800 Hz.

Le figure 11 valide le choix des filtres avec un écart à la réponse des MEMS inférieur au dB jusqu'à 5 kHz, puis 2 dB entre 5 et 15 kHz.

5 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 au caractère d'un microphone MEMS. 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 constructeur. Grâce à la connaissance précise et la stabilité de cette réponse, une correction est possible et facile afin 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

- [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] Walter C. Babel III, Qamar A. Shams, James F. Bockman, *Qualitative Analysis of MEMS Microphones*, 16th ANNUAL 2004 INTERNATIONAL MILITARY & AEROSPACE /AVIONICS COTS CONFERENCE, EXHIBITION & SEMINARS, August 2004
- [3] Jaroslaw Czarny: *Conception, fabrication of a MEMS microphone and Characterization of a MEMS microphone*, INSA de Lyon, 2015. English <NNT:2015ISAL0003>. <tel-01247487>
- [4] Zdenek Havranek, Petr Benes, *Free field calibration of MEMS microphone array used for acoustic holography: 21st ICSV, 2014, China*
- [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