



Développement d'un sonomètre imageur temps réel à représentation par bande de fréquence

C. Vanwysberghe^a, J. Marchal^a, F. Ollivier^a, P. Challande^a et R. Marchiano^b

^aUPMC Univ Paris 06, UMR7190, Institut Jean Le Rond d'Alembert, 2 place de la Gare de Ceinture,
78114 Saint-Cyr-L'Ecole, France

^bInstitut Jean le Rond d'Alembert-UPMC, 4 place Jussieu, 75005 Paris, France
charles.vanwysberghe@upmc.fr

L'étude de la pollution sonore implique l'utilisation de deux outils de diagnostic distincts : le sonomètre et l'imageur acoustique. Le premier fournit une analyse spectrale précise du champ environnant en terme de niveau acoustique par bandes d'octave ou de tiers d'octave. Le second permet, à l'aide d'un réseau de microphones, de cartographier le champ et donc de localiser les sources de bruit prédominantes. Si ces deux approches se complètent, unifier leurs fonctionnalités dans un moyen de diagnostic unique offre de nouvelles perspectives d'analyse acoustique.

Nous décrivons la conception d'un nouvel instrument d'imagerie, de l'acquisition jusqu'au traitement des données, et remplissant la tâche suivante : imager le champ acoustique sur plusieurs bandes d'octaves simultanément et en temps réel. Il s'agit de disposer d'un système de grande maniabilité, ce qui implique l'utilisation de 2 moyens technologiques modernes. D'une part, l'intégration de microphones MEMS pour construire le réseau assure une mise en œuvre simplifiée ; d'autre part, l'implémentation de la chaîne de traitement sur GPU offre une rapidité de calcul suffisante pour une exécution en temps réel d'algorithmes d'imagerie parallélisables.

Après une description rapide de l'architecture matérielle ainsi que de la chaîne de traitement, des expériences placées dans des scénarios classiques illustrent le fonctionnement dynamique du système imageur, et permettent d'évaluer la pertinence des résultats vis à vis de l'imageur classique et du sonomètre.

1 Introduction

Le diagnostic acoustique dans les domaines tels que les transports concerne principalement la réduction des sources de bruits, dans le souci d'améliorer le confort ou de respecter les réglementations. Le sonomètre reste, jusqu'à aujourd'hui, le moyen standard pour ce type d'études. Il décrit le champ acoustique environnant par un niveau acoustique global, ou encore par différents niveaux sur des bandes d'octave (ou tiers d'octave) pour détailler la répartition de l'énergie sur le spectre. Par ailleurs l'imagerie acoustique se révèle un outil important pour localiser les sources de bruit dans l'espace. Elle est utilisée notamment pour découvrir les origines physiques de ces sources. La méthode n'est pas standardisée, bien que des travaux proposent des solutions [1]. Aujourd'hui l'imagerie fait appel à la mise en œuvre d'un système relativement complexe et nécessite de lourds calculs.

Or des technologies récentes offrent la possibilité de pallier ces contraintes. D'une part, les microphones de type MEMS à sortie numérique, initialement prévus pour des appareils grand public comme les téléphones, conviennent également pour construire une antenne acoustique. Ceci réduit la complexité matérielle pour obtenir un système d'acquisition à grand nombre de voies. D'autre part, l'imagerie par formation de voies fait appel à un algorithme parallélisable, et l'utilisation d'un GPU devient une solution intéressante pour un traitement rapide des pressions mesurées. Des travaux ont déjà prouvé l'efficacité d'un tel choix en imagerie acoustique dans le domaine ultrasonore. [2, 3, 4, 5].

Cet article présente donc la mise en œuvre d'un système d'imagerie complet (matériel et logiciel) avec ces choix technologiques. L'objectif est de cartographier, en temps réel, le champ sonore sur différentes bandes d'octaves. L'imagerie acoustique sur GPU par bandes de fréquences a déjà été abordée dans [6] en utilisant un système d'acquisition conventionnel.

Nous présentons d'abord l'architecture matérielle du système d'acquisition et validons la pertinence du choix des microphones MEMS dans le cadre de l'imagerie. Ensuite, une stratégie de traitement des données par formation de voie, ainsi que son implémentation sur GPU, est proposée. Une étude de performances vérifie si l'exécution du traitement en temps réel est possible. Enfin, l'imagerie est réalisée par le système proposé pour deux scénarios

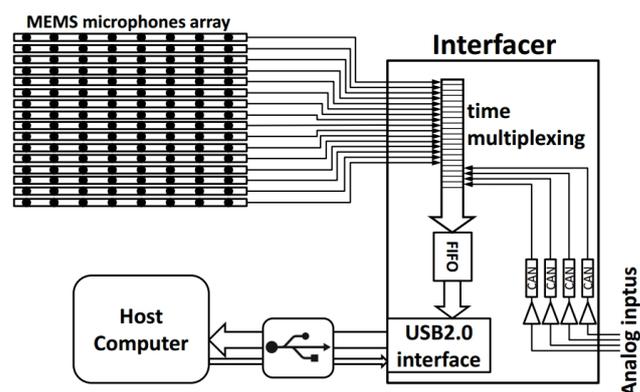


FIGURE 1 – Diagramme fonctionnel du système d'acquisition expérimentaux différents.

2 Le système d'acquisition

2.1 L'architecture

Le système d'acquisition comprend deux parties distinctes : l'antenne de microphones et une interface entre l'antenne et l'ordinateur. L'antenne est constituée de 16 faisceaux de 8 microphones MEMS (donc 128 microphones), et sa géométrie est au choix de l'opérateur. Les faisceaux peuvent être déployés dans un rayon de 30 mètres. Le microphone est le composant ADMP441 fabriqué par Analog Devices [7], qui contient toute la chaîne d'instrumentation : le transducteur, l'amplificateur et le convertisseur analogique-numérique de 24 bits de type $\Sigma - \Delta$. Grâce à un tel composant, le système est entièrement numérisé, ce qui apporte simplification et souplesse plus grandes de l'architecture électronique. Les microphones communiquent avec l'interface via le standard I2S, ce qui permet un choix paramétrable de la fréquence d'échantillonnage f_s de l'antenne complète. L'interface reçoit simultanément les 128 pressions mesurées codées sur 24 bits, mais converties dans un format 32 bits pour assurer la compatibilité avec l'ordinateur. Après un multiplexage temporel des 128 pressions, l'interface envoie les données vers la machine via un bus USB2.0. Ceci résulte en un flux de données fonction de la fréquence d'échantillonnage, égal à $512 \cdot f_s$ octet/s. Avec un bus USB2.0 en configuration *full - speed*, 25 Mo/s de données

sont transférées vers l'ordinateur pour être traitées et éventuellement sauvegardées en temps réel.

2.2 Caractérisation des microphones MEMS

Le composant ADMP441 est initialement conçu pour des appareils tels que les téléphones ou tablettes, essentiellement pour capturer la voix. Des travaux de recherche y ont fait appel pour construire une antenne acoustique destinée à l'acquisition de voix [8]. Cependant, puisqu'il doit intervenir dans la conception d'un instrument de mesure en imagerie acoustique, il est nécessaire d'établir ses performances précises. Dans ce but, quatre critères sont étudiés : la sensibilité, la directivité, la réponse en fréquence et le bruit de fond des microphones. Les deux premiers critères déterminent la pertinence des hypothèses faites pour établir l'algorithme d'imagerie pour lequel les récepteurs sont supposés omnidirectionnels et de sensibilités identiques. Une trop grande dispersion de ces caractéristiques serait susceptible de biaiser la construction des images. La réponse en fréquence définit les limites spectrales du système pour l'imagerie, tandis que le bruit de fond conditionne le rapport signal bruit et les capacités du système en termes de dynamique de représentation des niveau acoustique.

Les expériences de caractérisation sont menées dans la chambre anéchoïque du Laboratoire National d'Essai (LNE). Les 128 microphones MEMS sont disposés régulièrement sur un maillage de taille réduite (0.5×0.5 m), placé à 5m d'une source. Ce dispositif permet de supposer que les microphones reçoivent un niveau acoustique identique et une étude statistique permet de dégager un comportement global des composants. Les résultats qui suivent présentent essentiellement les moyennes statistiques et les dispersions.

Résultats

L'homogénéité des microphones est évaluée par l'histogramme des 128 niveaux acoustiques mesurés face à une source de bruit blanc, en figure 2a. La régression gaussienne correspondante montre la pertinence de l'hétérogénéité des sensibilités avec la loi normale. L'écart type de 0.8 dB reflète la bonne homogénéité en sensibilité de ces composants, et leur correction en est facultative.

La directivité est évaluée en émettant une source de bruit blanc constant, et en variant l'orientation du cadre sur 180° . Sur la figure 2b, la directivité moyenne évolue dans un intervalle de 1.7 dB, et est similaire aux 128 directivités individuelles. On peut donc, d'une part, retenir l'hypothèse des récepteurs omnidirectionnels ; d'autre part, si une correction de la directivité est appliquée, elle peut être effectuée avec la directivité moyenne puisque celle-ci reflète le comportement des 128 récepteurs.

La réponse en fréquence est obtenue par la méthode d'estimation de fonction de transfert [9], référencée par rapport à un microphone de référence *B&K 4190*. Ainsi la réponse en fréquence de l'enceinte est compensée. Les résultats sont arbitrairement représentés sur un intervalle de fréquence couvrant les bandes d'octave importantes dans le cadre du bruit environnemental (entre $125/\sqrt{2} = 90$ Hz et $\sqrt{2} \cdot 8 = 11$ kHz) en figure 2c. On observe alors une réponse relativement plate avec 2 dB de variations jusqu'à 2 kHz, mais au-delà des variations de 7 dB existent. A priori ceci ne détériorera pas la forme de l'image mais biaisera le niveau

acoustique absolu. Ce biais peut être réduit en égalisant les mesures des microphones.

Enfin le bruit de fond correspond à la mesure des microphones en silence dans la chambre. Ce bruit provient de la chaîne d'instrumentation. La figure 2d fournit les densités spectrales de puissance référencées à $2 \cdot 10^{-5}$ Pa/ $\sqrt{\text{Hz}}$. Elle possède un pic à 300 Hz, mais reste en dessous de 0 dB/ $\sqrt{\text{Hz}}$ au-delà de 500 Hz. Au final, l'énergie totale du spectre (33.5 dB SPL) correspond au bruit de fond défini par la documentation constructeur (33 dB SPL). Pour tirer une conclusion de ce résultat, il doit être comparé avec la mesure d'une acquisition : il permet ainsi de définir le rapport signal à bruit de la pression mesurée.

Globalement, les résultats prouvent une grande homogénéité des composants pour les quatre critères. Donc les caractéristiques moyennes peuvent être utilisées pour corriger les signaux, ce qui s'avère nécessaire surtout pour la réponse en fréquence. Les images obtenues par l'expérience et présentées plus loin valident ce choix technologique des micros MEMS.

3 Le traitement pour l'imagerie en temps réel

3.1 La formation de voies

Il faut plusieurs étapes pour obtenir les images par bandes d'octave, en temps réel, à partir de l'acquisition de l'antenne de M microphones. Nous exposons ici le traitement appliqué pour obtenir une image, à partir de la matrice de mesure \mathbf{P} de dimension $N_s \times M$. Elle est telle que sa m -ième ligne contient l'acquisition de durée N_s/f_s du m -ième microphone. Notons $\hat{\mathbf{P}}$ sa transformée de Fourier selon les lignes (de résolution fréquentielle $\Delta f = f_s/N_s$) telle que :

$$\hat{\mathbf{P}} = \begin{bmatrix} \hat{p}_{11} & \dots & \hat{p}_{1k} & \dots & \hat{p}_{1N_s} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \hat{p}_{m1} & \dots & \hat{p}_{mk} & \dots & \hat{p}_{mN_s} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \hat{p}_{M1} & \dots & \hat{p}_{Mk} & \dots & \hat{p}_{MN_s} \end{bmatrix} \quad (1)$$

L'algorithme de formation de voies dans le domaine fréquentiel est appliqué sur $\hat{\mathbf{P}}$, en pointant vers les N différents points d'une grille dans l'espace. Nous rappelons que l'opération construisant l'image du champ sonore à la fréquence $f_k = k\Delta f$ est linéaire et s'écrit :

$$\hat{\mathbf{b}}_k = \mathbf{A}_k \hat{\mathbf{p}}_k \quad (2)$$

$\hat{\mathbf{p}}_k$ étant la k -ième colonne de $\hat{\mathbf{P}}$. Physiquement, la matrice \mathbf{A}_k retourne la propagation des sources sonores des points de la grille vers les récepteurs de l'antenne, à la fréquence f_o . Elle est fonction des positions des points de la grille et des récepteurs, respectivement notées \mathbf{y}_n et \mathbf{x}_m . En supposant une propagation sphérique des sources sonores, il est possible de construire \mathbf{A}_k ; l'élément nm est tel que :

$$A_{k\,nm} = (\mathbf{y}_n - \mathbf{x}_m) e^{j2\pi f_k (\mathbf{y}_n - \mathbf{x}_m)/c_o} \quad (3)$$

où c_o est la vitesse du son du milieu. En étendant le calcul 2 sur la totalité du spectre, nous obtenons finalement $\hat{\mathbf{b}} = [\hat{\mathbf{b}}_1 \dots \hat{\mathbf{b}}_k \dots \hat{\mathbf{b}}_{N_s}]$.

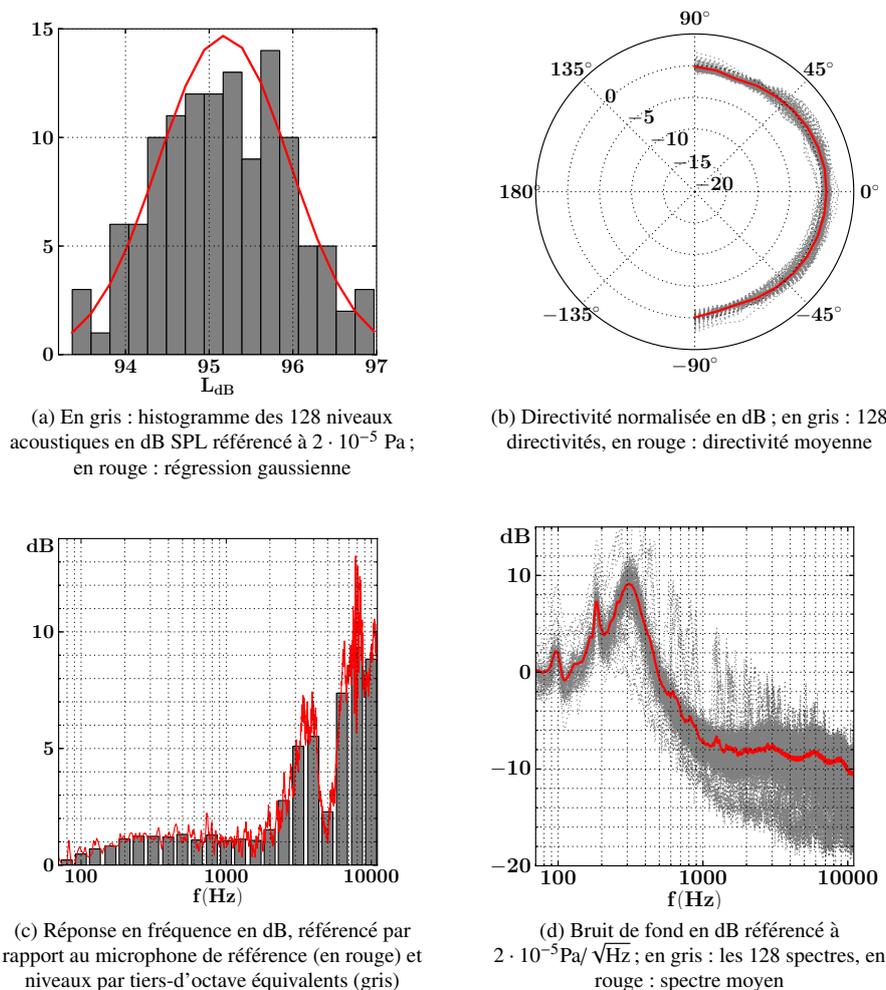


FIGURE 2 – Caractéristiques acoustiques des microphones MEMS : résultats expérimentaux.

Finalement, l'image de la bande d'octave centrée à la fréquence f_o peut être construite à partir de $\hat{\mathbf{b}}$. Elle se calcule de la même manière que dans un sonomètre, en intégrant le spectre entre $f_o/\sqrt{2}$ et $\sqrt{2} \cdot f_o$. Le niveau par bande d'octave au n -ième point de la grille s'écrit :

$$\mathbf{L}_n(f_o) = 10 \log \left(\frac{2 \sum_{k=1}^{\sqrt{2} f_o} \|\hat{b}_{nk}\|^2}{N_s^2 p_o^2} \right) \quad (4)$$

où p_o est la pression de référence à $2 \cdot 10^{-5}$ Pa. Au final $\mathbf{L}_n(f_o)$, qui sera affiché pour le diagnostic, est physiquement équivalent au niveau par bande d'octave d'un sonomètre.

3.2 Intégration sur GPU

L'imagerie monofréquentielle classiquement utilisée (calcul d'un $\hat{\mathbf{b}}_k$) requiert relativement peu de calculs, et un traitement sur CPU convient. Mais pour obtenir $\hat{\mathbf{b}}$, ce calcul est étendu sur toute la dimension fréquentielle. Ceci alourdit le traitement, et garder une implémentation sur CPU ne permet pas d'atteindre le temps réel.

Pourtant le calcul nécessaire pour obtenir chaque élément de $\hat{\mathbf{b}}$ reste de nature parfaitement identique. Un tel contexte permet une intégration adaptée sur architecture parallèle. Le choix du GPU se justifie pour plusieurs raisons : son

coût, sa compacité pour obtenir un système embarqué, et un développement relativement efficace [10] grâce aux plateformes de programmation tels que CUDA ou OpenCL [11]. De plus, la gestion de l'affichage est intégrée puisque c'est également la carte graphique de l'ordinateur.

Le GPU est relié via le bus PCIe, et tout calcul nécessite au préalable le transfert des données à traiter vers sa mémoire globale (\mathbf{P} dans le cas présent). Toutes les tâches de traitement seront effectuées sur le GPU, à savoir :

- la transformée Fourier pour obtenir $\hat{\mathbf{P}}$. L'algorithme FFT est appliqué sur les M lignes de \mathbf{P} en parallèle.
- Chaque élément b_{nk} de $\hat{\mathbf{b}}$ est calculé par un thread qui lui est propre. Cette parallélisation suit le modèle SIMD (Single Instruction on Multiple Data).
- L'image finale $\mathbf{L}(f_o)$ est obtenue par un calcul parallèle de chacun des éléments de la matrice $\mathbf{L}_n(f_o)$, donc N threads différents exécutent l'équation 4. Il s'agit aussi de la stratégie de parallélisation SIMD.

Finalement $\mathbf{L}(f_o)$ est converti dans une texture d'affichage, dont la gestion est assurée par la librairie OpenGL.

Pour s'assurer du fonctionnement en temps réel, un benchmark permet de vérifier si la configuration du système complet est adaptée. La rapidité de calcul finale dépendant de nombreux paramètres, il est difficile de tirer une conclusion globale car chaque configuration devient un cas particulier.



FIGURE 3 – Le système d’acquisition lors des expériences imagerie

Toutefois notons les paramètres essentiels qui entrent en jeu :

- le nombre de points N de la grille. Le temps de calcul y est directement proportionnel ;
- la fréquence centrale f_o de l’image. En effet, avec une résolution fréquentielle Δf constante, doubler f_o amène à doubler le nombre d’éléments de \mathbf{b} nécessaires pour le calcul de $\mathbf{L}(f_o)$. La bande d’octave la plus aiguë sera la plus coûteuse en temps de calcul ;
- le choix du GPU. Dans les résultats en section 4, un Nvidia Titan est utilisé et permet le fonctionnement en temps réel dans la configuration décrite.

4 Résultats

Deux expériences présentent le système d’imagerie en fonctionnement normal :

- d’abord la mesure absolue des niveaux acoustiques mesurés est évaluée. Il s’agit de vérifier que la caméra image les sources à des niveaux physiquement cohérents. Pour cela, les résultats seront comparés avec les mesures d’un sonomètre (*B&K 2236* de classe I). Cette expérience s’apparente à un étalonnage de la caméra.
- Le deuxième scénario donne une illustration du système en fonctionnement dans un cas pratique : l’imagerie par bandes d’octave d’un aspirateur. Nous discuterons de l’intérêt du système proposé vis à vis de l’imageur monofréquentiel et du sonomètre.

Pour garder l’objectif d’analyser le champ sonore comme un sonomètre, les images représentent 6 bandes d’octaves de fréquences centrales normalisées suivant la norme *ISO 266*. Ces images seront rafraichies toutes les 125 ms en temps réel.

La configuration du système reste constant : l’antenne de 128 éléments a une géométrie circulaire et la fréquence d’échantillonnage est fixée à $f_s = 50$ kHz. Une grille de $N = 100 \times 100$ points est imagée par l’ordinateur et le GPU Nvidia GTX Titan.

4.1 Etalonnage de la caméra

Un étalonnage est nécessaire pour évaluer la précision de mesure des niveaux absolus dans les images. Dans l’expérience exposée, deux sources sinusoïdales à 3 kHz sont placées à 5 m de l’antenne. Une source garde une amplitude fixe durant tout l’étalonnage (69 dB), tandis que l’autre prendra 3 amplitudes différentes (69, 64 et 59 dB). Les amplitudes de chacune des sources sont indépendamment vérifiées avec le sonomètre placé 1 m face à la source.

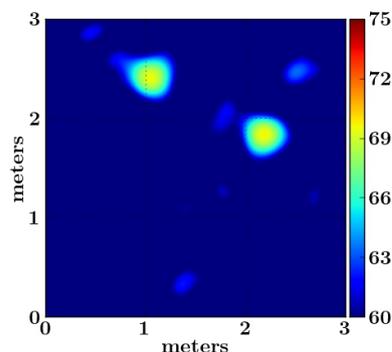
Test	Enceinte		Niveau relatif
	gauche	droite	
(a)	69.6 (69.0)	69.8 (69.0)	0.2 (0)
(b)	63.8 (64.0)	68.2 (69.0)	4.5 (5.0)
(c)	60.9 (59.0)	69.3 (69.0)	8.4 (10.0)

TABLEAU 1 – Etalonnage de la caméra sous les trois tests. Niveaux acoustiques en dB, sous le format : Niveau caméra (Niveau L_{eq} du sonomètre sur 30 s)

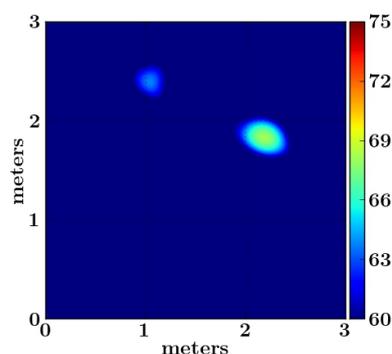
Les images résultantes de la bande à 4 kHz sont représentées en figure 4, et le tableau 1 confronte les valeurs mesurées par la caméra et le sonomètre. L’erreur sur les niveaux absolus des images est inférieur à 0.8 dB, sauf dans le test (c) pour l’enceinte gauche (1.9 dB de différence). Dans ce dernier cas la source a un niveau relatif élevé de 10 dB avec la source prédominante (enceinte droite). Notons également la présence de lobes dans la figure 4c. Ces lobes, intrinsèques à la géométrie de l’antenne et à la formation de voie, posent la limite de la dynamique exploitable de l’image. Ceci est la raison possible du biais observé pour l’enceinte gauche dans le test (c). Donc globalement, tant que l’on reste dans la dynamique d’imagerie exploitable du système, la télédétection des niveaux des sources reste précise au dB près.

4.2 Imagerie d’un aspirateur

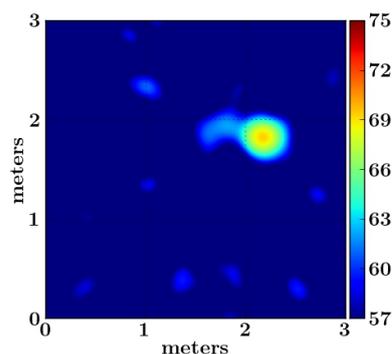
Un aspirateur en fonctionnement normal est placé 4 m devant l’antenne. Le champ acoustique résultant reconstruit par la caméra est en figure 5. Plusieurs points sont confirmés. Premièrement, la propriété d’une caméra acoustique à localiser les différentes sources dans l’espace permet de retrouver les 2 sources de bruits majeures de l’aspirateur : le moteur et la bouche du tuyau d’aspiration. Deuxièmement, l’imagerie par bandes d’octaves offre une analyse plus complète du champ sonore. En plus de localiser les sources de bruit, leur nature spectrale est définie. Les sources sont alors localisées dans l’espace et dans le spectre, ce qui rajoute une dimension supplémentaire au diagnostic.



(a) Niveau des sources : 69 dB (gauche et droite)



(b) Niveau des sources : 64 dB (gauche), 69 dB (droite)



(c) Niveau des sources : 59 dB (gauche), 69 dB (droite)

FIGURE 4 – Expérience d'étalonnage de la caméra, avec deux sources sinusoïdales à 3 kHz.

Dans l'exemple, le moteur émet un bruit basse fréquence, tandis que la bouche d'aspiration émet un bruit de nature électroacoustique, donc de plus large bande, en moyenne et haute fréquences. Troisièmement, la caméra étalonnée donne des niveaux acoustiques par bandes d'octave. En plus de la fonctionnalité classique du sonomètre, la caméra est à même de fournir les niveaux par bandes d'octave de chacune des sources. Grâce au filtrage spatial créé par la formation de voies, c'est comme si le sonomètre est virtuellement placé au niveau d'un point source pendant que toute autre source environnante ne rayonne pas. Dans la figure, les sources prédominantes sont le moteur dans les deux bandes d'octave graves, puis la bouche d'aspiration dans la bandes d'octave à 2 kHz.

L'algorithme de formation de voie montre son principal défaut : la résolution augmente en fonction de la fréquence, ce qui entraîne une imagerie dégradée en basse fréquence. En revanche, la localisation est fine en haute fréquence : l'image de la bande à 8 kHz résoud le bruit de l'entrée d'air principale et de la valve d'ajustement, qui sont deux sources proches.

Cette expérience montre l'apport du système hybride entre l'imageur et le sonomètre : il fournit un diagnostic concis et riche en informations. De plus, le fonctionnement en temps réel permet une interaction directe avec l'expérience, ce qui augmente la souplesse dans le diagnostic.

5 Conclusion

Un outil d'imagerie complet a été proposé, dans le but de fusionner les capacités de deux outils de diagnostic acoustique : l'imageur et le sonomètre. A cet objectif s'est ajoutée la capacité de fonctionnement en temps réel, avec un système d'architecture matérielle souple et simplifiée par rapport aux systèmes classiques.

Les choix technologiques ont été validés. D'une part, les microphones MEMS constituent une solution performante pour réduire la complexité du système d'antennerie. Leurs caractéristiques acoustiques prouvent qu'ils ont un bon potentiel dans le cadre de l'imagerie aérienne. D'autre part, le GPU s'est montré adapté pour le système. Sa capacité de calcul parallèle permet l'exécution du traitement en temps réel. Il permet de disposer d'un outil embarqué pour le diagnostic acoustique *in situ*.

L'expérience d'illustration montre les nouvelles perspectives qu'offre le système en termes de diagnostic acoustique. Non seulement, les fonctionnalités du sonomètre et de l'imageur se complètent de manière intelligible et intuitive, mais le fonctionnement en temps réel permet une interaction dynamique avec l'expérience. Cependant les limites de la formation de voie sont apparues à plusieurs reprises. D'autres algorithmes d'imagerie permettent d'optimiser la qualité de reconstruction du champ sonore. Bien qu'ils nécessitent de plus lourds calculs, ils constituent des alternatives potentiellement intéressantes.

Remerciements

Nous tenons à remercier le Laboratoire National d'Essai pour avoir mis à disposition la chambre anéchoïque, qui a servi aux expérience de caractérisation des MEMS.

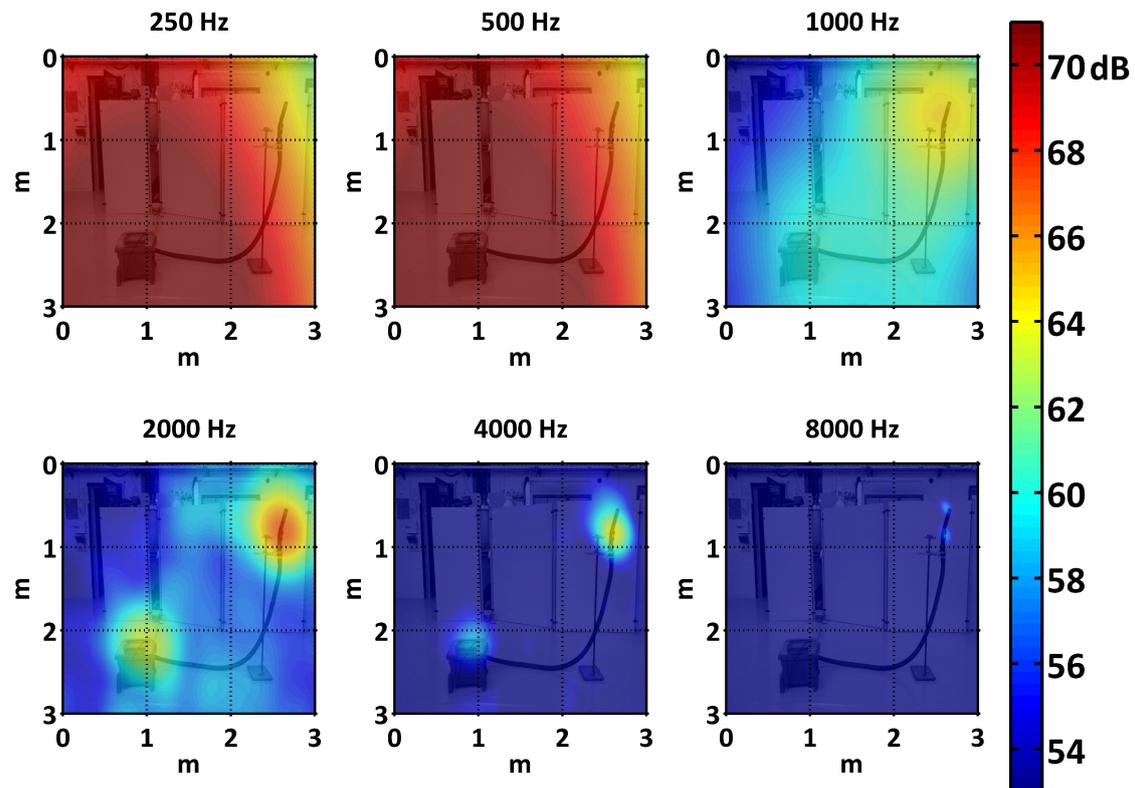


FIGURE 5 – Diagnostic par imagerie d'un aspirateur sur 6 bandes d'octave. Niveaux acoustiques en dB référencés à $5 \cdot 10^{-5}$ Pa.

Références

- [1] H. Kook, An efficient procedure for visualizing the sound field radiated by vehicles during standardized passby tests, *Journal of Sound and Vibration* **233**, 137-156 (2000).
- [2] C.-I. C. Nilsen, Digital beamforming using a gpu, *IEEE ICASSP*, **1-8**, 609-612 (2009).
- [3] C. J. Martin-Arguedas, An ultrasonic imaging system based on a new soft approach and a gpu beamformer, *IEEE transactions on ultrasonics ferroelectrics and frequency control*, **59**, 1402-1412 (2012).
- [4] J. Chen, Real-time gpu-based adaptive beamformer for high quality ultrasound imaging, *IEEE international ultrasonics symposium*, 474-477 (2012).
- [5] J. P. Asen, Implementing capon beamforming on the gpu for real time cardiac ultrasound imaging, *IEEE international ultrasonics symposium*, 2133-2136 (2012).
- [6] A. O'Donovan, Real time capture of audio images and their use with video, *IEEE workshop on applications of signal processing to audio and acoustics*, 257-260 (2007).
- [7] Analog Devices, Omnidirectional Microphone with Bottom Port and I2S Digital Output (2011).
- [8] I. Hafizovic, Design and implementation of a MEMS microphone array system for real-time speech acquisition, *Applied Acoustics*, **73**, 132-143 (2012).
- [9] J. Bendat, Engineering applications of correlation and spectral analysis, Wiley, (1980).
- [10] J. Chen, Design considerations of real-time adaptive beamformer for medical ultrasound research using fpga and gpu, *IEEE International conference on field-programmable technology*, 198-205 (2012).
- [11] D. B. Kirk, Programming Massively Parallel Processors - A Hands-on Approach, Morgan Kaufmann, (2010).