



HAL
open science

Sound Zones mobiles

Guilhem Pages, Manuel Melon, Laurent Simon, Luna Timbal, Valentin Bourrud

► **To cite this version:**

Guilhem Pages, Manuel Melon, Laurent Simon, Luna Timbal, Valentin Bourrud. Sound Zones mobiles. 16ème Congrès Français d'Acoustique, CFA2022, Société Française d'Acoustique; Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique, Apr 2022, Marseille, France. hal-03847981

HAL Id: hal-03847981

<https://hal.science/hal-03847981>

Submitted on 10 Nov 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



16^{ème} Congrès Français d'Acoustique
11-15 Avril 2022, Marseille

Sound Zones mobiles

G. Pagès^{a,b}, M. Melon^{a,b}, L. Simon^{a,b}, L. Timbal^b, and V. Bourrud^b

^aLaboratoire d'Acoustique de l'Université du Mans (LAUM), UMR 6613, CNRS, Le Mans Université, France

^bInstitut d'Acoustique - Graduate School (IA-GS), Le Mans Université, France



Le concept de *sound zones* vise à reproduire le plus fidèlement possible un champ sonore dans une région de l'espace généralement appelée *bright zone* tout en diminuant le niveau sonore dans une autre région de l'espace appelée *dark zone*. Cette capacité à reproduire des contenus audio indépendamment les uns des autres, en différents points de l'espace et suivant des critères donnés, permet de se passer de casques et d'appliquer cette technique à des environnements comme les véhicules terrestres, les avions, les salles en général, voire même les téléphones mobiles. Toutefois, à ce jour, les systèmes développés sont destinés à des utilisateurs statiques. Nous nous intéressons ici à l'extension du problème de *sound zones* aux utilisateurs mobiles. Dans un premier temps, le formalisme matriciel est étendu pour pouvoir exploiter des réponses impulsionnelles variant dans le temps. Le problème, écrit sous forme matricielle, permet alors d'exprimer un Lagrangien en temps discret qui ne dépend pas du signal d'entrée et utilise des réponses impulsionnelles dont seule la durée est imposée. La capacité de l'algorithme à utiliser des réponses impulsionnelles quelconques ouvre la possibilité de s'adapter à n'importe quel environnement, à partir du moment où l'inversion du problème reste possible. Les simulations réalisées ont permis de valider cette approche pour laquelle le nombre de rafraîchissements des filtres variant dans le temps dépend de la vitesse de déplacement des zones. Des résultats de simulation, pour une zone mobile en contexte anéchoïque, seront présentés.

1 Introduction

L'intérêt pour les zones d'écoute personnalisée, encore appelée *sound zones*, est grandissant depuis une vingtaine d'année. En effet, celles-ci permettent à différentes personnes partageant le même espace d'écouter des contenus sonores différents sans utiliser de casques. Les applications prévues sont nombreuses que ce soit dans le transport, la muséographie ou encore pour des usages domestiques.

Plusieurs solutions techniques permettant de réaliser ce type de diffusion existent. Ainsi, une source hyper-directive par protagoniste peut être utilisée limitant ainsi la diaphonie entre zones. Une autre solution consiste à piloter un réseau de haut-parleurs afin d'obtenir une diffusion sélective des messages sonores dans différentes zones de l'espace. Les filtres à appliquer à chaque enceinte sont généralement calculés par des méthodes d'optimisation sous contraintes. C'est cette dernière solution qui sera employée dans cet article.

De nombreuses méthodes ont été proposées dans la littérature sur la thématique des *sound zones*. Les différentes implémentations peuvent différer par les termes de contraintes utilisés pour le calcul des filtres ou encore par le domaine de calcul (calcul dans les domaines fréquentiel ou temporel). Une synthèse bibliographique des différentes méthodes peut être consultée en référence [1]. La plupart des travaux déjà réalisés traite de configurations statiques pour lesquelles les zones sont fixes et les conditions de propagation sont stationnaires. Il existe toutefois quelques travaux traitant de *sound zones* mobiles [2, 3] ou de la compensation de la modification des fonctions de transfert entre sources et zones [4].

Dans cet article, les développements théoriques permettant de calculer les filtres nécessaires à l'obtention de *sound zones* mobiles sont tout d'abord présentés. Puis, des simulations numériques sont proposées. Enfin, des résultats de mesures sont proposés avant de conclure.

2 Théorie

2.1 Position du problème [6]

Soient les vecteurs $(\mathbf{x}[n])_{n \in \mathbb{Z}} \in \mathbb{R}^N$, vecteur du signal d'entrée, $(\mathbf{w}_l[n])_{n \in \mathbb{Z}} \in \mathbb{R}^L$, coefficients du filtre à appliquer au haut-parleur l et $(\mathbf{h}_{B,ml}[n])_{n \in \mathbb{Z}} \in \mathbb{R}^M$ la réponse impulsionnelle entre le haut-parleur l et le microphone m . On note L le nombre de haut-parleurs et M le nombre de microphones dans chaque zone.

Nous utilisons la transformée en \mathcal{Z}_+ monolatérale pour les signaux causaux :

$$S(z) = \mathcal{Z}_+\{s[n]\} = \sum_{n=0}^{+\infty} s[n]z^{-n}. \quad (1)$$

Le signal mesuré par un microphone m provenant d'un haut-parleur l , qui passe par le filtre W_l recherché pour répondre aux contraintes de pression, et qui est modifié par la fonction de transfert entre le haut-parleur et le microphone $H_{B|D,pl}$, s'écrit :

$$P_{B|D,ml}(z) = H_{B|D,ml}(z) \cdot W_l(z) \cdot X(z). \quad (2)$$

Par principe de superposition de l'acoustique et par principe de linéarité de la transformée en \mathcal{Z} , on a donc au microphone m :

$$P_{B|D,m}(z) = \sum_{l=1}^L H_{B|D,ml}(z) \cdot W_l(z) \cdot X(z). \quad (3)$$

On définit par la suite le signal d'excitation comme une impulsion telle que :

$$x[n] = \begin{cases} 1 & \text{si } n = 0 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \Rightarrow \mathcal{Z}\{x[n]\} = X(z) = 1. \quad (4)$$

2.2 Formulation matricielle

Nous disposons des RI sous forme de filtres FIR. Ainsi, les matrices de réponses impulsionnelles peuvent se mettre sous

la forme de matrices de TOEPLITZ, pour la convolution :

$$\mathbf{H}_{B,ml} = \begin{bmatrix} h_{B,ml}(0) & 0 & 0 \\ \vdots & \ddots & 0 \\ h_{B,ml}(N-1) & \ddots & h_{B,ml}(0) \\ 0 & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & h_{B,ml}(N-1) \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Définissons la matrice par bloc de réponses impulsionnelles \mathbf{H}_B contenant tous les couples de $H_{B,pq}$ de la *bright zone* :

$$\mathbf{H}_B = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{B,11} & \cdots & \mathbf{H}_{B,1L} \\ \vdots & \mathbf{H}_{B,ml} & \vdots \\ \mathbf{H}_{B,M1} & \cdots & \mathbf{H}_{B,ML} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

La même démarche pour les réponses impulsionnelles dans la *dark zone* permet de noter :

$$\mathbf{H}_D = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{D,11} & \cdots & \mathbf{H}_{D,1L} \\ \vdots & \mathbf{H}_{D,ml} & \vdots \\ \mathbf{H}_{D,M1} & \cdots & \mathbf{H}_{D,ML} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Le vecteur poids recherché pour chaque haut-parleur est alors défini comme :

$$\mathbf{w}_l = \begin{bmatrix} w_{l1} \\ w_{l2} \\ \vdots \\ w_{lN} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Le vecteur poids général est alors une concaténation de tous les vecteurs poids :

$$\mathbf{w} = [\mathbf{w}_1^\top \quad \mathbf{w}_2^\top \quad \cdots \quad \mathbf{w}_L^\top]^\top. \quad (9)$$

Nous avons considéré $x[n] = \delta[n]$ comme signal d'excitation dans la partie précédente. Par conséquent, la pression dans la *bright zone* s'écrit :

$$\mathbf{p}_B = \mathbf{H}_B \mathbf{w}, \quad (10)$$

et dans la *dark zone* :

$$\mathbf{p}_D = \mathbf{H}_D \mathbf{w}, \quad (11)$$

2.3 Problème d'optimisation

L'objectif du problème d'optimisation est d'obtenir le jeu de filtres \mathbf{w} qui permet de générer une pression cible \mathbf{p}_t dans la *bright zone*. Pour parvenir à cet objectif, nous sommes cependant limités par l'énergie maximale que peut reproduire le réseau E_0 . De manière complémentaire, nous souhaitons limiter autant que possible la pression dans la *dark zone* à un niveau défini D_0 . Ainsi, le problème d'optimisation peut se poser sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \min_{\mathbf{w}} & \|\mathbf{H}_B \mathbf{w} - \mathbf{p}_t\|_2^2 \\ \text{s.t.} & \|\mathbf{w}\|_2^2 < E_0 \\ \text{s.t.} & \|\mathbf{H}_D \mathbf{w}\|_2^2 < D_0 \end{cases}. \quad (12)$$

On construit alors le Lagrangien suivant, $(\lambda_1, \lambda_2) \in \mathbb{R}_+^2$:

$$J(\mathbf{w}) = \|\mathbf{H}_B \mathbf{w} - \mathbf{p}_t\|_2^2 + \lambda_1 (\|\mathbf{H}_D \mathbf{w}\|_2^2 - D_0) + \lambda_2 (\|\mathbf{w}\|_2^2 - E_0). \quad (13)$$

Dérivant l'équation précédente par rapport à \mathbf{w} , on obtient :

$$\frac{\partial J}{\partial \mathbf{w}} = 2\mathbf{H}_B^\top \mathbf{H}_B \mathbf{w} - 2\mathbf{H}_B^\top \mathbf{p}_t + 2\lambda_1 \mathbf{H}_D^\top \mathbf{H}_D \mathbf{w} + 2\lambda_2 \mathbf{w}. \quad (14)$$

Puis, la dérivée par rapport aux deux multiplicateurs donne :

$$\begin{cases} \frac{\partial J}{\partial \lambda_1} = \|\mathbf{H}_D \mathbf{w}\|_2^2 - D_0 = 0 & \Rightarrow \|\mathbf{H}_D \mathbf{w}\|_2^2 = D_0 \\ \frac{\partial J}{\partial \lambda_2} = \|\mathbf{w}\|_2^2 - E_0 = 0 & \Rightarrow \|\mathbf{w}\|_2^2 = E_0 \end{cases}. \quad (15)$$

Un point stationnaire est atteint lorsque cette dérivée s'annule, soit pour :

$$\mathbf{w} = [\mathbf{H}_B^\top \mathbf{H}_B + \lambda_1 \mathbf{H}_D^\top \mathbf{H}_D + \lambda_2 \mathbf{I}]^{-1} \mathbf{H}_B^\top \mathbf{p}_t. \quad (16)$$

Pour résoudre le problème d'optimisation complet avec les contraintes, il est par exemple possible d'utiliser les conditions de KARUSH-KUHN-TUCKER, ou alors, de manière empirique, de s'appuyer sur les connaissances physiques que nous avons du problème. C'est le second choix qui est retenu ici.

Le Lagrangien est une formulation énergétique du problème, ainsi le premier terme dans la solution $\mathbf{H}_B^\top \mathbf{H}_B$ représente l'énergie dans la *bright zone*, le second terme l'énergie dans la *dark zone* et le dernier terme l'énergie du réseau.

Lors des simulations, l'énergie du réseau n'est pas contrainte, mais peut par contre être mesurée. Ainsi, nous ne considérerons pas la contrainte d'énergie du réseau : λ_2 n'est donc plus une contrainte, mais un paramètre de régularisation, noté λ par la suite. Il sera choisi le plus petit possible tout en veillant à ce que le conditionnement de la matrice à inverser reste correct.

Pour ne pas sur-contraindre l'algorithme, la condition de pression minimale est modifiée en imposant plutôt un ratio entre le meilleur contraste et la plus petite erreur. Soit $\beta \in [0, 1]$ le paramètre en question.

On obtient finalement :

$$\mathbf{w} = [(1 - \beta)\mathbf{H}_B^\top \mathbf{H}_B + \beta\mathbf{H}_D^\top \mathbf{H}_D + \lambda \mathbf{I}]^{-1} \mathbf{H}_B^\top \mathbf{p}_t. \quad (17)$$

2.4 Convolution LTV

Pour simuler le déplacement de la *bright zone*, et les filtres changeant au cours du temps, il est nécessaire de réaliser des convolutions dont les coefficients de filtres changent au cours du temps.

Soit l'équation de convolution linéaire variant dans le temps (LTV) :

$$y[n] = \sum_{k=0}^n h[n-k, n] x[n-k] \quad (18)$$

La transformée en z de la réponse impulsionnelle devient alors dépendante du temps :

$$H(z, n) = \sum_{m=0}^n h[m, n] z^{m-n} \quad (19)$$

Soit sous forme matricielle :

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h[0,0] & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & h[1,0] & \ddots & 0 \\ h[0, N-1] & \vdots & \ddots & h[M,0] \\ 0 & h[1, N-1] & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & h[M, N-1] \end{bmatrix} \quad (20)$$

avec M le nombre de points du signal à convoluer avec la réponse impulsionnelle.

Simulation mouvement : pour simuler un mouvement dans une salle, il est possible de calculer à chaque instant les réponses impulsionnelles dans la salle. Ainsi chaque colonne de la matrice de convolution contiendra la réponse impulsionnelle en vigueur au moment de la simulation.

Modification des filtres sound zones : les filtres *sound zones* changent au cours du temps, de manière périodique, en fonction de la vitesse souhaitée. Si les filtres sont calculés tous les centimètres, et que nous souhaitons une vitesse de 1 cm s^{-1} alors les filtres doivent changer toutes les secondes. A une fréquence de 4000 Hz, les 4000 premières colonnes contiendront le jeu de filtres calculés à la première position, les 4000 suivantes le jeu de filtres calculés à la deuxième position, etc.

2.5 Critères de performance

Pour analyser les performances de l'algorithme, il est nécessaire de définir un certain nombre d'indicateurs. Ces indicateurs sont analysés dans un premier temps en contexte statique, puis dans un second temps pour diverses situations dynamiques. La définition du contraste est reprise de ELLIOTT [5] afin de pouvoir comparer les résultats de l'algorithme à ceux de l'état de l'art.

Pression RMS A l'instant n , on définit le niveau de pression RMS¹ en un point, tel que :

$$p[n]_{RMS} = \bar{p}[n] = \sqrt{\frac{1}{k_i} \sum_{k=n-(k_i-1)}^n p^2[k]}. \quad (21)$$

Erreur de pression Cet indicateur code la faculté de l'algorithme à atteindre la pression cible demandée et est défini suivant :

1. Le temps d'intégration pour le calcul des pressions RMS est toujours de 0.1 s

$$EP[n] = \frac{\frac{1}{L} \sum_{l=1}^L |\bar{p}_{B,l}[n] - \bar{d}[n]|}{\frac{1}{L} \sum_{l=1}^L |\bar{p}_{B,l}[n]|} \cdot 100. \quad (22)$$

Contraste Le contraste est le rapport entre les pressions dans la *bright zone* et dans la *dark zone* :

$$CT[n] [dB] = 20 \log_{10} \left(\frac{\sum_{l=1}^L \bar{p}_B[n]}{\sum_{l=1}^L \bar{p}_D[n]} \right). \quad (23)$$

3 Simulations

3.1 Paramètres et géométrie

Les seize haut-parleurs sont équitablement répartis autour d'un carré de 3 m de côté (Figure 1). La *bright zone* est à gauche et est mobile sur une distance de 2 m. La *dark zone* est à droite et est fixe. La salle est considérée comme anéchoïque

Les paramètres utilisés pour ces simulations sont les suivants : la fréquence d'échantillonnage vaut 4000 Hz. Le paramètre β est égal à 0,4 tandis que $\lambda = 8 \times 10^{-3}$. Trois configurations de déplacement de la *bright zone* ont été simulées :

- Statique : *bright zone* en $x = 1 \text{ m}$ et $y = 0.5 \text{ m}$.
- Vitesse lente : 0.5 m s^{-1}
- Vitesse rapide : 2 m s^{-1}

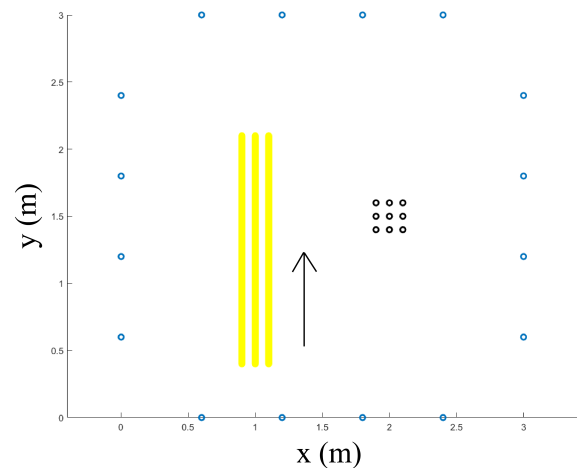


FIGURE 1 – Géométrie du problème. Les points bleus représentent les haut-parleurs, les points noirs les microphones dans la *dark zone* et les lignes jaunes la trajectoire des microphones de la *bright zone*.

3.2 Pression désirée

La construction du vecteur \mathbf{p}_t est un préalable pour l'algorithme. Le choix retenu ici est d'imposer dans la *bright zone* la pression que générerait un seul haut-parleur avant filtrage, ici le haut-parleur situé en $x = 0.6 \text{ m}$ et $y = 0 \text{ m}$.

Si le haut-parleur émet une impulsion d'amplitude B_0 alors la pression mesurée par le microphone m est :

$$\mathbf{p}_{t,m} = \mathbf{h}_{ml} \cdot B_0, \tag{24}$$

ainsi le vecteur désiré est la concaténation des vecteurs désirés de chaque microphone de la *bright zone* :

$$\mathbf{p}_t = [\mathbf{p}_{t,1}^\top \quad \dots \quad \mathbf{p}_{t,M}^\top]^\top. \tag{25}$$

3.3 Statique

La première simulation s'effectue en statique pour comparer la méthode proposée ici vis-à-vis de la littérature [8].

La figure 2 présente le niveau de pression dans le plan des sources, pour une fréquence de 100 Hz. Les points en noir représentent la *dark zone*, où la pression acoustique est plus faible qu'au niveau des points blancs, emplacement de la *bright zone*. On observe bien une réduction du niveau dans la *dark zone* par rapport à la *bright zone*.

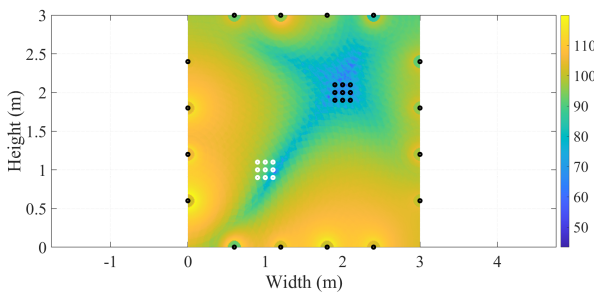


FIGURE 2 – Niveau de pression (dB) simulé dans le plan des sources à 100 Hz

La figure 3 présente le contraste atteint dans la bande de fréquence [100 Hz, 1000 Hz]. On retrouve ici un contraste comparable aux valeurs publiées dans la littérature scientifique, par exemple dans la référence [8].

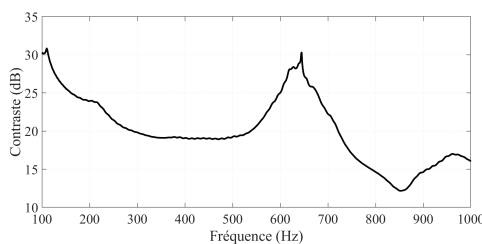


FIGURE 3 – Contraste en statique en fonction de la fréquence

L'erreur relative dans la *bright zone* (Figure 4) fluctue en fonction de la fréquence et possède un maximum autour de 600 Hz. Cette évolution est liée aux distances entre sources et microphones et aux interférences constructives et destructives résultantes.

3.4 Vitesse lente

À vitesse lente le contraste (Figure 5) devient dépendant de la position, et diminue de 25 dB à 12 dB lorsque la *bright*

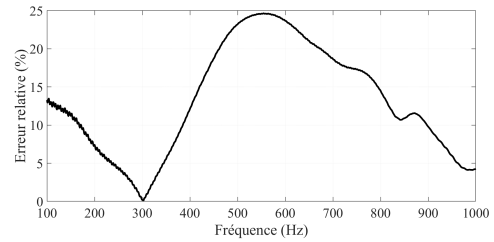


FIGURE 4 – Erreur de reproduction en statique en fonction de la fréquence

zone est au centre de l'axe. Le haut-parleur qui sert de référence pour construire la pression cible s'éloigne de plus en plus au cours du mouvement. De plus, la régularisation est identique pour toutes les positions, alors que les matrices de convolutions varient largement en fonction du mouvement.

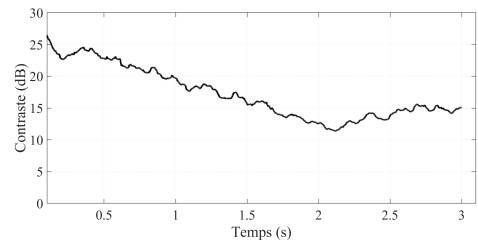


FIGURE 5 – Évolution du contraste au cours du temps à vitesse lente pour une fréquence de 100 Hz

L'erreur relative dans la *bright zone* est quant à elle représentée sur la Figure 6. On remarque qu'elle augmente au fur et à mesure que l'on s'éloigne du haut-parleur qui a été choisi pour calculer la pression cible.

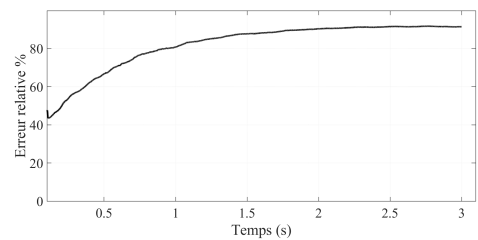


FIGURE 6 – Évolution de l'erreur relative au cours du temps à vitesse lente pour une fréquence de 100 Hz

3.5 Vitesse rapide

Les mêmes graphiques ont été calculés pour la vitesse rapide. Ainsi le contraste au cours du temps est donné sur la Figure 7 et l'erreur rapide sur la Figure 8. On remarque que ces métriques sont moins favorables lorsque la vitesse augmente : significativement pour le contraste et légèrement pour l'erreur relative.

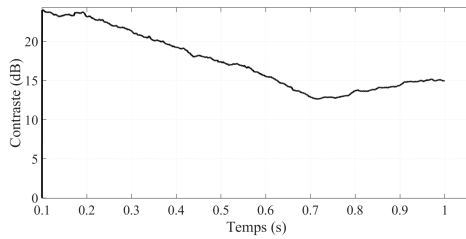


FIGURE 7 – Évolution du contraste au cours du temps à vitesse rapide pour une fréquence de 100 Hz

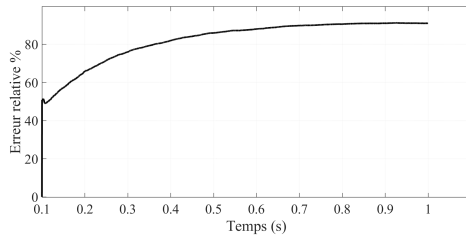


FIGURE 8 – Évolution de l'erreur relative au cours du temps à vitesse rapide pour une fréquence de 100 Hz

4 Expériences

Une série de mesures a été réalisée afin de valider les résultats obtenus en simulation. Pour des raisons dues au planning de mesure, seule la configuration statique sera présentée ici.

Dispositif expérimental : L'acquisition et la génération des signaux a été effectuées à l'aide de cartes sons RME fonctionnant sous le protocole MADI. Les microphones de mesures sont modèles 1/4 de pouces Brüel & Kjær 4958. Les enceintes utilisées sont des enceintes deux voies développées au LAUM et amplifiées par des amplificateurs HPA D604.

L'espace dans lequel est réalisée l'expérience est constitué d'un rectangle de 3.1 m sur 3.2 m. Seize haut-parleurs sont répartis de façon régulière autour de l'espace, à 1 m du sol. Pour mesurer la pression dans les deux *sound zones*, des antennes de neuf microphones, formant un carré et distants les uns des autres de 5 cm, ont été utilisées. La *bright zone* se déplace le long d'un axe motorisé long de 2 m, dont le contrôle s'effectue à distance.

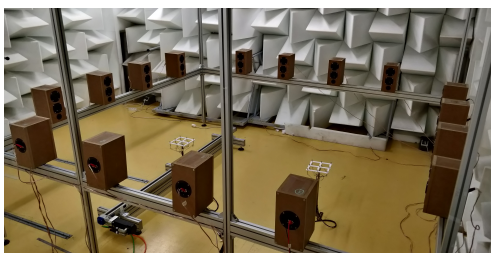


FIGURE 9 – Dispositif expérimental.

Acquisition des mesures : Pour chacune des positions de l'axe, un sinus glissant balayant les fréquences de 50 Hz à 20 kHz en 3 s est émis séquentiellement par chaque haut-parleur, ce qui correspond alors à 16 mesures tous les centimètres, couvrant ainsi une distance totale de 2 m.

Les réponses impulsionnelles sont ensuite calculées via la méthode proposée par Farina [7] et sont ensuite sous-échantillonnées à 4.8 kHz.

4.1 Statique

La première mesure permettra de valider les niveaux de contraste que nous pouvons obtenir à partir de réponses impulsionnelles réelles. Ainsi nous commençons par mesurer les réponses impulsionnelles lorsque la *bright zone* est au début du rail.

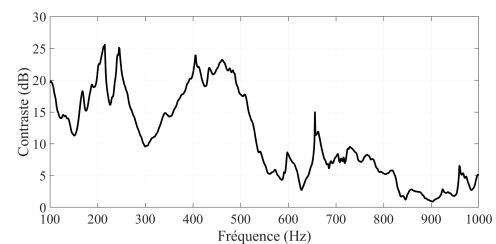


FIGURE 10 – Contraste en fonction de la fréquence en statique.

Par rapport aux simulations, le contraste obtenu (Figure 10) est plus faible sur l'ensemble de la bande de fréquences. Le tableau 1 donne une comparaison des contrastes simulé et mesure pour différentes fréquences.

TABLEAU 1 – Comparaison entre contraste simulé et mesuré

Fréquence	Simulation	Expérience
100 Hz	5 dB	9.6 dB
158 Hz	24 dB	7.0 dB
208 Hz	25 dB	7.2 dB
320 Hz	3 dB	1.8 dB
410 Hz	24 dB	7.2 dB

L'évolution de l'erreur en fonction de la fréquence est donnée sur la Figure 11. On remarque ici aussi une dégradation de cette métrique, celle-ci reste toutefois inférieure à 100 %.

5 Conclusion et perspectives

Dans cet article, nous avons pu montrer qu'il est possible de générer des *sound zones* mobiles en modifiant dynamiquement les filtres.

Cependant, le contraste varie en de grandes proportions en fonction de la position de la *bright zone*. Ce provient principalement du paramètre de régularisation λ , le conditionnement des matrices de convolution étant différent

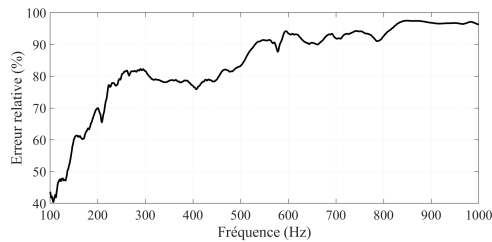


FIGURE 11 – Erreur relative en fonction de la fréquence en statique.

en fonction des réponses impulsionnelles qui les composent et donc de la position.

De plus, il est nécessaire de mesurer toutes les réponses impulsionnelles à un nombre important de positions, ce qui peut conduire à de très longs temps de mesure.

Pour optimiser les filtres, il pourrait être envisagé d'interpoler les coefficients des filtres entre deux calculs directs. Cette approche permet de garder un faible coût de calcul.

Pour éviter de mesurer toutes les réponses impulsionnelles, un système basé sur le filtrage adaptatif permettrait d'en trouver une estimation en tout point.

Une des perspectives à court terme est de compléter la partie expérimentale par des mesures dynamiques pour différentes vitesses.

Remerciements

Les auteurs remercient James BLONDEAU pour son travail sur l'automatisation de l'axe de translation utilisé dans ce travail.

Références

- [1] L. Vindrola, *Personalised low-frequency sound reproduction in a car cabin*, Thèse de doctorat Acoustique, Le Mans (2021).
- [2] G. Roussel, *Contributions à la mise au point de méthodes adaptatives de reproduction de champs sonores multi-zone pour les auditeurs en mouvement : Sound zones pour auditeurs en mouvement*, Thèse de doctorat Acoustique, Le Mans (2019).
- [3] M. B. Moller & J. Ostergaard, A Moving Horizon Framework for Sound Zones, *IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing* **38**, 256–265 (2020).
- [4] L. Vindrola, M. Melon, J.-C. Chamard & B. Gazengel, Use of the filtered-x algorithm to adapt Personal Sound Zones in a car cabin, *J. Acoust. Soc. Am.* **150**(3) 1779-93 (2021)
- [5] Elliott, Stephen J and Jones, Matthew, An active headrest for personal audio, *J. Acoust. Soc. Am.* **119**(5) (2006)
- [6] O. Kirkeby, P. Nelson, F. Orduna-Bustamante and H. Hamada, Local sound field reproduction using digital signal processing, *J. Acoust. Soc. Am.* **100**(3) 1584-1593 (1996)
- [7] A. Farina, Simultaneous measurement of impulse response and distortion with a swept-sine technique, *J. Audio Eng. Soc.* **100**(3) 1584-1593 (1996)
- [8] D., Schellekens, M. Møller, & M. Olsen, Time domain acoustic contrast control implementation of sound zones for low-frequency input signals. IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), 365-369 (2016).