



Une cabine acoustique pour la restitution contrôlée des basses et très basses fréquences (3Hz-300Hz) : qualification, identification acoustique et premier exemple de contrôle

Marc Pachebat, Jacques Chatron, Renaud Côte, Emmanuel Friot, Philippe Herzog, Sabine Meunier, Rabau Guy

► To cite this version:

Marc Pachebat, Jacques Chatron, Renaud Côte, Emmanuel Friot, Philippe Herzog, et al.. Une cabine acoustique pour la restitution contrôlée des basses et très basses fréquences (3Hz-300Hz) : qualification, identification acoustique et premier exemple de contrôle. 16e Congrès Français d'Acoustique CFA2022, Apr 2022, Marseille, France. hal-03599063v2

HAL Id: hal-03599063

<https://hal.science/hal-03599063v2>

Submitted on 31 Mar 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

Une cabine acoustique pour la restitution contrôlée des
basses et très basses fréquences (3Hz-300Hz) :
qualification, identification acoustique et premier exemple
de contrôle

M. Pachebat ^a, J. Chatron ^a, R. Côte ^a, E. Friot ^a, P. Herzog ^b, S. Meunier ^a, G. Rabau ^a,

^a CNRS - LMA, 4 impasse Nikola Tesla, CS 40006, 13453 Marseille, France

^b ARTEAC-LAB, Place de l'Innovation, 8 allées Léon Gambetta, 13001 Marseille, France,



Une installation expérimentale est présentée, constituée d'une cabine dédiée à la restitution de signaux basse fréquence aux oreilles d'un auditeur. Il s'agit de restituer les basses et très basses fréquences en un point de contrôle unique, à des niveaux suffisamment élevés pour être perceptibles par l'humain. Un ensemble de 32 sources est piloté dans une cabine close par 16 canaux de contrôle indépendants, sur la gamme des fréquences de 3 à 300 Hz. Tout d'abord, une phase d'appropriation par mesure de fonctions de transfert permet de déterminer : a. la dynamique du système d'acquisition-restitution et b. le nombre de degrés de libertés acoustiques à contrôler. Ensuite une stratégie de contrôle avec égalisation de la phase des transferts est proposée. On détermine les commandes maximisant en un point d'écoute, le niveau d'un sinus balayé dont la fréquence instantanée est connue à chaque instant. La dynamique des niveaux qu'il est possible de reproduire pour l'écoute est explorée, notamment en termes de distorsion des sources.

1 Introduction

Le domaine des basses fréquences a été largement "mis de côté" par le passé, notamment via l'utilisation du dBA qui en occultait les contributions. Depuis quelques temps, une prise de conscience progresse, à la fois parce que les basses fréquences ont des effets sur la santé à long terme, parce qu'on sait de mieux en mieux traiter les fréquences supérieures, et enfin parce que la réduction de masse nécessaire dans la plupart des applications devrait encore accentuer l'importance des octaves inférieures à 125 Hz. Des projets (*e.g.* ANR RIBEolh) conduisent donc à étudier la perception des basses fréquences, d'où l'importance de disposer d'un moyen d'essai adapté. Ceci pose des problèmes techniques aigus, notamment du fait de la remontée rapide des seuils perceptifs aux très basses fréquences. Ce qui implique de disposer d'un système de reproduction avec un taux de distorsion particulièrement faible. Une cabine acoustique destinée à l'étude de la perception humaine aux basses et très basses fréquences a été conçue et réalisée. Dans ce qui suit on détermine que l'installation présentée a une dynamique et un nombre de canaux de pilotage appropriés, des limites à la restitution des forts niveaux, ainsi qu'un taux de distorsion faible compatible par exemple avec des mesures de seuil d'audition autour de 20 Hz.

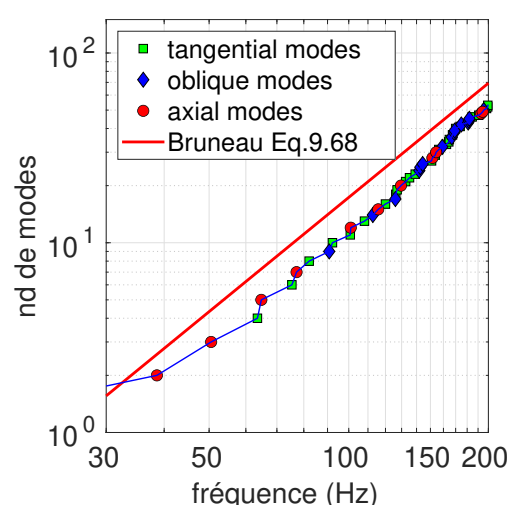


FIGURE 1 – Calcul théorique du nombre de modes en fonction de la fréquence dans une salle rectangulaire comme la cabine de restitution : $L = 4.45$ m, $l = 3.40$ m, et $h = 2.65$ m

2 Une cabine de restitution dédiée aux basses fréquences

L'installation expérimentale s'inspire d'une précédente cabine [1] dédiée à la restitution sonore des ondes de bang sonique. Elle est constituée d'une cabine, close, isolée et étanche, en béton. Une estimation modale théorique [2] (figure 1) indique un premier mode non isobare au delà de 30 Hz, et dénombre environ 50 modes à 200 Hz. Pour

$f > 120$ Hz, le nombre de degrés de liberté semble supérieur à 15, alors que l'installation comporte 16 canaux source indépendants. Un poste extérieur pilote l'émission-acquisition, via une carte son *RME HDSPe MADI* (PCI express) et 2 convertisseurs AD/DA *ferrofish A16 MKII* synchronisés par une horloge *ANTELOPE OCX HD*. L'émission sonore est assurée par 8 amplificateurs *Lab Gruppen IPD 1200* (16 canaux au total) et 32 caissons subwoofers *Electrovoice ELX 118*, modifiés en enceintes closes. L'acquisition est réalisée par un microphone, situé approximativement au centre de la pièce, de type *PCB 1/2" 48V* modèle 376A32, alimenté par un préamplificateur *Focusrite ISA Two*.

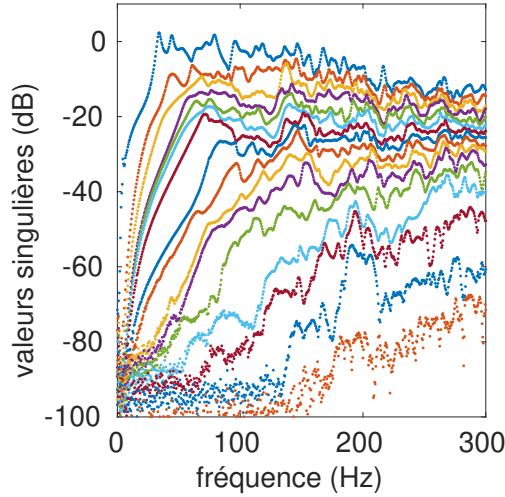


FIGURE 2 – Représentation des 16 valeurs singulières associées à la matrice de transfert $\mathbf{h}(\omega)$ identifiée dans la cabine.

Pour le mode isobare, la variation pression acoustique $\frac{P_{iso}}{P_{atm}} = \frac{\Delta V}{V}$ est liée à la variation de volume ΔV induite par le déplacement des membranes des haut-parleurs dans le volume V de la pièce. En choisissant pour les 32 haut-parleurs de diamètre 18 pouces, une excursion maximale $X_{rms}^{max} \approx 7.10^{-3}$ m, on obtient $P_{iso}^{max} \approx 93$ Pa soit environ 133 dB (re 2.10^{-5} Pa). De nombreuses limitations liées à la cabine (pertes visco-thermiques, étanchéité), et aux

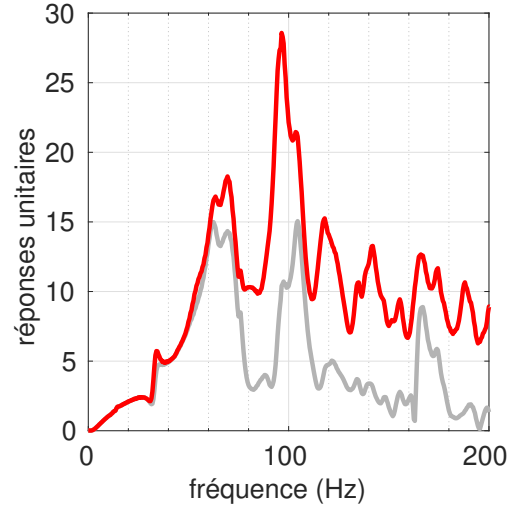


FIGURE 3 – Réponses au microphone de restitution pour des entrées de source unitaires : sources alimentées en phase (gris), sources en phase au point de restitution (rouge)

sources (non linéarités, pertes thermiques, non-étanchéité des membranes) rendent cette valeur non atteignable, notamment si le taux de distorsion dans le signal restitué doit rester faible.

3 Qualification et identification acoustique

Le contrôle du signal acoustique au microphone de restitution nécessite l'identification des fonctions de transfert notées $h_k(\omega)$ ($k = 1..16$) entre le $k^{ième}$ canal de commande et le microphone. Chaque canal source est donc sollicité séquentiellement avec un *sinus balayé synchronisé* noté $x(t)$ [3]. Les autres canaux sont actifs (signal de commande nul). La fréquence d'échantillonnage est $F_s = 48$ kHz. Les paramètres utilisés ici sont $f_1 = 2$ Hz, $f_2 = 500$ Hz, $\hat{T} \approx 8$ s, ce qui donne une durée de balayage effective de $T = 8.2822$ s.

Les transferts sont identifiés par une déconvolution opérée dans le domaine fréquentiel [3] :

$$h_k(\omega) = \mathcal{TF}[y(t)] \cdot \tilde{X}(\omega) \quad (k = 1..16), \quad (1)$$

où $\mathcal{TF}[y(t)]$ désigne la transformée de Fourier de la réponse $y(t)$ et $\tilde{X}(\omega)$ est l'expression analytique ([3] Eq.51) du filtre inverse associé à $X(\omega) = \mathcal{TF}[x(t)]$.

On forme, à chaque fréquence, le vecteur (ligne) $\mathbf{h}(\omega)$ de transfert entre le vecteur (colonne) $\mathbf{u}(\omega)$ des 16 entrées source et le signal au microphone de restitution. La représentation fréquentielle des 16 valeurs singulières de $\mathbf{h}$ (figure 2) après décomposition SVD [4] permet deux constats. Tout d'abord, la dynamique de mesure des transferts, de l'ordre de 70 dB sur la bande (5-300 Hz), confirme la bonne immunité des câblages et connectiques aux perturbations électromagnétiques, ainsi que la bonne isolation vis à vis des sources acoustiques et vibratoires extérieures. A 300 Hz, les 15 premières valeurs singulières sont comprises dans une dynamique de 60 dB environ, ce qui pourrait correspondre à la dynamique effectivement contrôlable en dessous de 300 Hz.

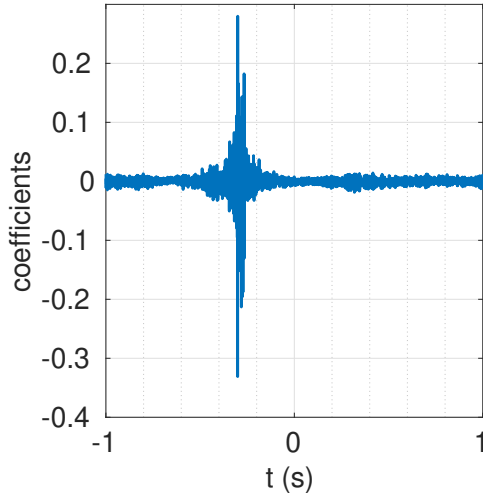


FIGURE 4 – RI d'un filtre égaliseur de phase large bande (0-1024 Hz)

4 Un contrôle par égalisation de la phase des transferts

4.1 Principe du contrôle proposé

Sous l'hypothèse de *transferts électro-acoustiques linéaires et invariants* la pression $p(\omega)$ au microphone de restitution s'écrit :

$$p(\omega) = \mathbf{h}(\omega) \cdot \mathbf{u}(\omega) = \sum_{k=1}^{16} h_k(\omega) \cdot u_k(\omega). \quad (2)$$

Pour restituer un son pur cible $s(\omega)$ avec un niveau maximum, il suffit d'exciter chaque source avec un son pur de niveau maximum et dont la phase est ajustée de telle sorte que les contributions de chacune des sources arrivent en phase sur le microphone de restitution, ce qui s'écrit sous la forme :

$$u_k(\omega) = e^{[-i \arg(h_k(\omega)) + \varphi]} \cdot s(\omega), \quad (3)$$

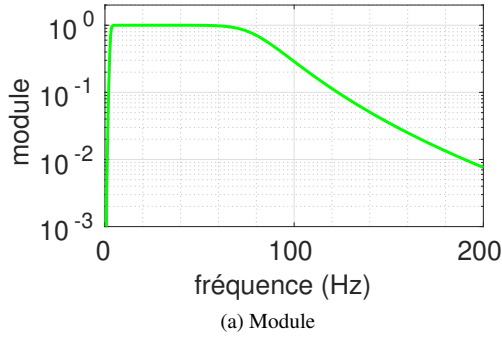
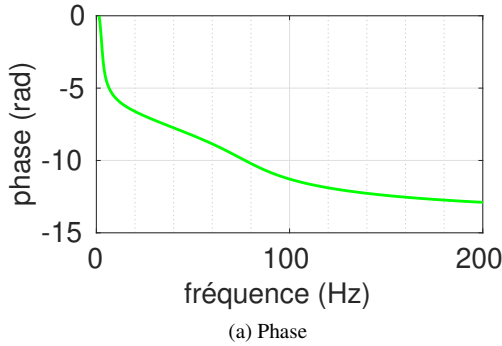
où φ est un déphasage entre $s(\omega)$ et le signal cible au microphone de restitution (ici $\varphi = 0$).

Dans le cas d'un sinus balayé à restituer, le niveau sera donc maximisé à toutes les fréquences si $u_k(\omega)$ de la $k^{ième}$ source est obtenue en passant $s(\omega)$ par un filtre de *Fonction de Réponse en Fréquence* $\exp[-i \arg(h_k(\omega))]$.

Un tel filtrage doit toutefois tenir compte de quelques points délicats car $s(\omega)$ ne doit pas introduire d'artefacts audibles. Le transfert $h_k(\omega)$ inclut de multiples retards; $\exp[-i \arg(h_k(\omega))]$ inclut donc des avances et n'est pas causal. Même si $u_k(\omega)$ n'est pas calculé en temps réel, il convient d'être attentif aux plages temporelles associées à chaque signal pour éviter certains artefacts.

4.2 Remarques sur les transferts

Une régression linéaire sur la phase de $h_1(\omega)$ donne un retard de groupe $\tau = \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi}{d\omega}$ de 0,28 s sur la plage 7-28 Hz, très supérieur aux temps de propagation entre sources et micros dans la cabine ($\approx 6 \cdot 10^{-3}$ s), différence en grande partie imputable au retard de groupe des enceintes closes [5]. La figure 3 compare, pour des sons purs $u_k(\omega) = 1$, la réponse $p(\omega)$ (Eq.2) pour les sources en phase $p(\omega) = \left| \sum_{k=1}^{16} h_k(\omega) \right|$, et celle éventuellement obtenue en optimisant

FIGURE 5 – Module du filtre passe-bande w (3-80 Hz)FIGURE 6 – Phase du filtre passe-bande w (3-80 Hz)

leurs phases pour maximiser le niveau, soit $p(\omega) = \sum_{k=1}^{16} |h_k(\omega)|$. Jusqu'à environ 60 Hz, le contrôle par compensation des phases ne sera pas efficace.

4.3 Calcul de commandes optimales

La figure 4 montre la Réponse Impulsionnelle, calculée via *Inverse Fourier Transform*, du filtre dont la FRF est $\exp[-i \arg(h_1(\omega))]$ pour des fréquences de 0 à 1024 Hz. L'essentiel de cette réponse est non-causale. Comme il n'y a pas de plage de temps sur laquelle les coefficients s'annulent, il est presque sûr que la longueur de la réponse du filtre que l'on veut représenter est supérieure à 2 s et s'étend à la fois vers les temps positifs et négatifs. La figure 4 inclut donc une forme de « repliement » ; un filtrage associé cette

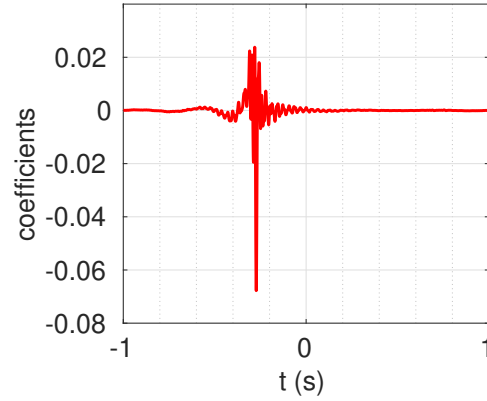


FIGURE 7 – RI d'un filtre égalisateur de phase dans la bande (3-80 Hz), avec compensation de la phase du filtre passe-bande

RI générerait des artefacts audibles.

Pour n'égaliser la phase des transferts que sur une bande plus étroite, on utilise un filtre passe-bande $w(\omega)$ à *Réponse Impulsionnelle Infinie* d'ordre 10, avec ici pour fréquences de coupure 3 et 80 Hz (choisies à titres d'exemple), et construit avec la commande Matlab® *designfilt* (figures 5 et 6).

Moyennant un retard τ à choisir pour que les opérations à réaliser soient bien causales, un sinus balayé $s(t)$ (3-80 Hz) peut être ainsi filtré :

$$u_k(\omega) = w(\omega) e^{-i[\omega \tau + \arg(h_k(\omega)) + \arg(w(\omega))]} s(\omega), \quad (4)$$

pour obtenir chacun des signaux d'entrée $u_k(\omega)$, et des contributions en phase sur le microphone de restitution. La fréquence instantanée du signal au microphone de restitution à l'instant t sera celle de $s(t - \tau)$.

La mise en œuvre de la méthode de Békésy [6] avec un sinus balayé [7, 8] suppose toutefois de connaître à chaque instant la fréquence instantanée du signal perçu par l'auditeur, fréquence qui aura du retard sur celle du sinus balayé cible $s(t)$. Le filtre passe-bande $w(\omega)$ introduit un déphasage supplémentaire entre le signal cible et le signal. C'est pourquoi l'expression (4) compense également la phase de $w(\omega)$. La figure 7 montre la RI du filtre associé

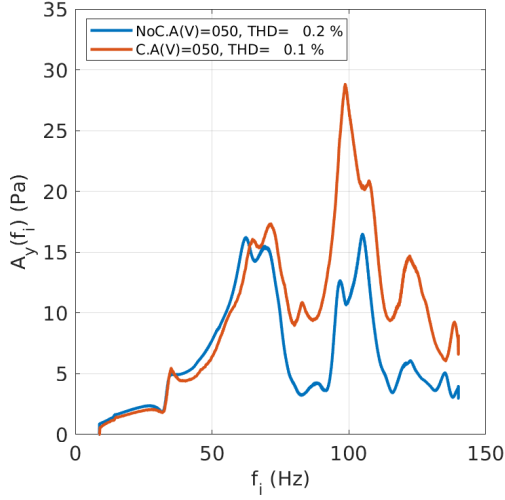


FIGURE 8 – Amplitude instantanée (Pa) restituée au point d'écoute avec (orange) et sans (bleu) le contrôle proposé (amplitude source : $A = 50$).

à l'expression (4). Cette RI laisse présager d'un filtrage raisonnable à condition de retarder le signal d'entrée d'un temps τ de l'ordre de 1 s.

5 Restitution, distorsion et niveaux sonores atteignables

Afin de tester la démarche de contrôle et évaluer l'installation, on procède à la restitution d'un nouveau sinus balayé synchronisé $x'(t)$ ($f_1 = 8.75$ Hz, $f_2 = 140$ Hz, $T = 150$ s). Le filtre w (section 4.3) est recalculé, et un retard $\tau = 2$ s est choisi pour obtenir les commandes u_k (Eq.4). Le signal restitué $y(t)$ issu de ces commandes est enregistré, en choisissant plusieurs amplitudes $A_{x'} = A/1000$ pour le sinus balayé $x'(t)$, avec $A = [1, 10, 50, 100, 200, 500]$.

Pour quantifier les performances de la restitution, la fonction de transfert $h'_1(\omega)$ entre le signal restitué et le sinus balayé est alors estimée et sa réponse impulsionnelle associée $R_i(t)$ est obtenue par transformée de Fourier inverse. Le taux de distorsion de la restitution est calculé en comparant les énergies aux temps positifs et

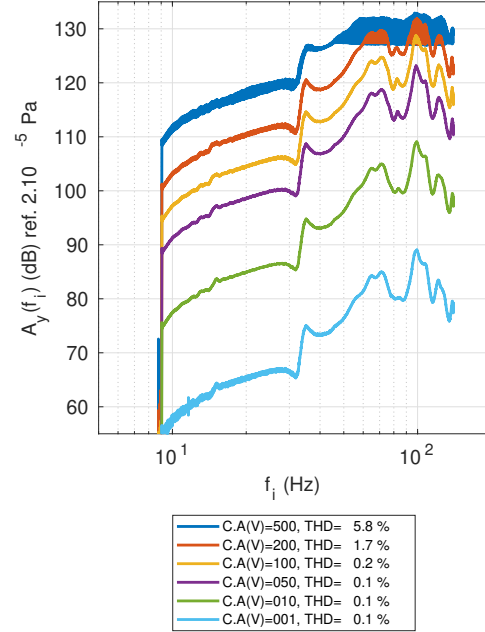


FIGURE 9 – Niveaux sonores restitués $A_y(f_i)$ et distorsion associée, en appliquant le contrôle proposé pour différentes amplitudes du sinus balayé $x'(t)$.

négatifs :

$$THD = 100 \cdot \left(\frac{\sum R_i^2(t < 0)}{\sum R_i^2(t > 0)} \right)^{\frac{1}{2}} \%, \quad (5)$$

où $t=0$ est localisé suite à une estimation du retard négatif de la première non-linéarité [3].

Pour connaître les niveaux sonores effectivement restitués, l'amplitude instantanée $A_y(t)$ du signal $y(t)$ au microphone est estimée en utilisant le module du signal analytique, et la transformée de Hilbert $\mathcal{H}$:

$$A_y(t) = |y(t) + i\mathcal{H}(y(t))|. \quad (6)$$

Avec la sensibilité du microphone, $A_y(t)$ peut être représentée comme un niveau sonore instantané en fonction de la fréquence instantanée $f_i(t)$ du sinus balayé $x'(t)$ (figures 8 et 9). La figure 8 illustre les effets de la stratégie de contrôle

proposée sur le niveau sonore restitué $A_y(f_i)$ (Pa). Le pilotage proposé présente peu d'intérêt en dessous de 60 Hz. Au delà il permet, d'augmenter le niveau sonore restitué. La figure 8 est très comparable à l'estimation des effets du contrôle en utilisant uniquement les transferts (figure 3) ce qui confirme que le contrôle et la restitution se sont bien passés.

La figure 9 explore les niveaux sonores $A_y(f_i)$ (dB ref. $2 \cdot 10^{-5}$ Pa) atteignables au point de restitution, pour $A = [1, 10, 50, 100, 200, 500]$. Dans la zone de la figure donnée par $f_i \gtrsim 40$ Hz, et $A_y(t) \gtrsim 125$ dB, l'expression 6 donne une amplitude $A_y(f_i)$ qui oscille en fréquence extrêmement rapidement. La transformée de Hilbert utilisée peine à estimer une amplitude instantanée correcte lorsque le contenu du signal n'est plus monochromatique à chaque instant. Ceci indique qu'au delà d'environ 125 dB (à comparer aux 133 dB estimés en section 2), la restitution n'est plus celle attendue et comporte des composantes fréquentielles indésirables. Le même phénomène peut être constaté sur la bande (5-30 Hz) pour le signal restitué le plus fort ($A=500$). Les causes de cette limitation devront être étudiées.

La figure 9 montre que l'installation est capable de reproduire environ 80 dB à 20 Hz, *i.e.* seuil d'audition à cette fréquence [9], avec un taux de distorsion très faible ($THD \leq 0.1\%$). Ceci est encourageant pour l'exploration ultérieure des seuils d'audition aux très basses fréquences ($f < 20$ Hz) grâce à cette nouvelle cabine.

6 Conclusion

Les mesures dans la cabine montrent une dynamique de mesure de l'ordre de 60 à 70 dB, à priori suffisante pour le contrôle modal dans la bande 5-300 Hz. Un filtre synchronisant les phases des sources au point de restitution maximise l'amplitude de la pression acoustique, avec peu d'effet en dessous de 60 Hz. La restitution d'un sinus balayé synchrone montre une distorsion faible à 20 Hz, compatible avec la mesure de seuil d'audition en basse fréquence. Pour étendre le domaine des niveaux sonores atteignables avec une distorsion

maîtrisée, il serait possible de réduire le volume acoustiquement disponible dans la cabine et de pré-compenser des non linéarités de transducteur dans le signal d'excitation.

Références

- [1] Guy RABAU et Philippe HERZOG : A specific cabin for restitution of sonic boom : application for perceptive tests. *In Congrès Français d'Acoustique-CFA/DAGA'04*, page 2, Strasbourg, 2004. 2
- [2] Michel BRUNEAU : *Manuel d'acoustique fondamentale*. Hermès, Paris, 1998. 2
- [3] Antonin NOVAK, Pierrick LOTTON et Laurent SIMON : Synchronized Swept-Sine : Theory, Application, and Implementation. *Journal of the Audio Engineering Society*, 63(10):786–798, novembre 2015. 3, 3, 3, 5
- [4] Gene H. GOLUB et Charles F. Van LOAN : *Matrix Computations*. JHU Press, février 2013. 3
- [5] Philippe HERZOG : Impact des performances des transducteurs acoustiques pour le contrôle actif. *In Société Française d'Acoustique SFA*, éditeur : 10^{ème} Congrès Français d'Acoustique, Lyon, France, avril 2010. 4.2
- [6] Georg v. BÉKÉSY : A New Audiometer. *Acta Oto-Laryngologica*, 35(5-6):411–422, janvier 1947. 4.3
- [7] Christian MEYER-BISCH : Audioscan : A High-definition Audiometry Technique Based on Constant-level Frequency Sweeps -A New Method with New Hearing Indicators. *International Journal of Audiology*, 35(2):63–72, janvier 1996. 4.3
- [8] Chantal LAROCHE et Raymond HÉTU : A Study of the Reliability of Automatic Audiometry by the Frequency Scanning Method (AUDIOSCAN). *International Journal of Audiology*, 36(1):1–18, janvier 1997. 4.3
- [9] H MØLLER et C S PEDERSEN : Hearing at Low and Infrasonic Frequencies. *Noise & Health*, 6(23):37–57., 2004. 5