

La gestion des sons de très basses fréquences dans le domaine de l'audio

David Rousseau

Conseil en acoustique
22, rue Alibert
75011 Paris
Tél : 06 80 18 24 53
E-mail : rouss.dav@gmail.com

Manuel Melon

CNAM, LMSSC
Case Courier 2D6P21
292, rue Saint Martin
75141 Paris CEDEX 3
Tél : 01 40 27 22 33
E-mail : manuel.melon@cnam.fr

Résumé

Depuis une vingtaine d'année, les performances accrues des systèmes électroacoustiques et certains choix artistiques sollicitant plus fréquemment les très basses fréquences ont conduit à la génération de sons de très forts niveaux dans la gamme «20-80 Hz». Cette extension de la bande passante vers les graves est source de nuisances sonores pour le voisinage aussi bien dans le cadre d'événements en plein air, pour lesquels ces fréquences peuvent se propager sur de très longues distances, que pour la diffusion en salles, où les parois et les planchers isolent généralement très peu dans cette gamme fréquentielle. De plus, le comportement modal des locaux aux très basses fréquences induit une mauvaise répartition spatiale de l'énergie acoustique ainsi qu'une réponse fréquentielle très découpée nuisant ainsi à la qualité des signaux sonores restitués. La législation sur le voisinage et la recherche d'une qualité acoustique optimale ont donc conduit certains ingénieurs du son à développer des solutions techniques innovantes aussi bien pour améliorer la qualité de la diffusion sonore tout en limitant ses effets sur l'environnement que pour mesurer les caractéristiques des systèmes électroacoustiques aux très basses fréquences. Ces différents thèmes seront abordés dans cet article.

Abstract

Since about twenty year, the better performances of electroacoustic systems and artistic choices seeking more frequently low frequencies led to increased sound levels in the 20-80 Hz frequency band. This bandwidth extension is source of noise pollutions for the neighborhood for outdoor events, for which these frequencies can propagate on very long distances, as well as for indoor events, where walls and floors have poor isolation properties. Furthermore, the modal behavior of rooms at very low frequencies leads to a bad spatial distribution of the acoustic energy as well as a fluctuating frequency response thus reducing the quality of the restituted sound signal. The legislation on the neighborhood and the search for an optimal acoustic quality thus drove actors of the musical industry to develop innovative solutions.

Contexte

La reproduction sonore des très basses fréquences (20-80 Hz) a largement évolué lors des deux dernières décennies. Portés par l'industrie du cinéma, les systèmes de diffusion 5.1 se sont multipliés chez les particuliers. Ainsi, des caissons de graves permettant de reproduire le canal LFE, canal destiné aux effets sonores, complètent les enceintes large bande des systèmes home-cinéma. Ces caissons de graves, le plus souvent actifs, permettent de générer des fréquences très basses (jusqu'à moins de 30 Hz). Ce type de performance était jusqu'à peu réservé aux systèmes HI-FI haut de gamme. À titre d'illustration, la figure 1 représente le niveau de pression rayonné en champ libre dans l'axe d'un caisson de basses de milieu de gamme (autour de 300 €). On remarque que des niveaux encore très importants sont générés en dessous de 40 Hz. Le monde de la musique amplifiée n'est pas en reste. Ainsi, de nombreux modèles destinés à la sonorisation possèdent une fréquence de coupure à -6 dB de l'ordre de 30 Hz permettant ainsi de générer, lorsque plusieurs unités sont associées,

des niveaux pouvant dépasser 120 dB (non pondéré) aux très basses fréquences lors de concerts.

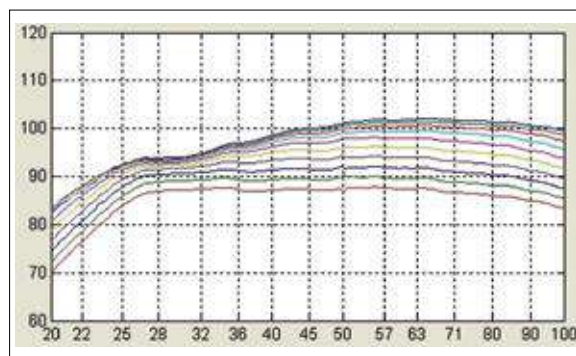


Fig. 1 : Niveau de pression (dB) à 1 m en champ libre pour un caisson de grave de milieu de gamme en fonction de la fréquence (Hz) pour différents niveaux d'entrée.
On-axis (1 m) frequency pressure response (dB) of a typical mid-range subwoofer for different driving signal levels.

Parallèlement, le contenu fréquentiel des signaux sonores reproduits a également évolué, sollicitant, aujourd'hui, plus largement les très basses fréquences. Ainsi, les bandes-son des films d'actions, les musiques électroniques et rock exploitent largement l'extrême grave. La figure 2 représente les spectres en tiers d'octaves de différents titres musicaux. Le spectre en haut à gauche a été calculé sur la totalité du titre « Back in the USSR » des Beatles, on remarque qu'à partir de 80 Hz le niveau chute assez rapidement vers les graves. Sur les deux spectres suivants calculés sur un morceau de musique techno (2 Unlimited - No Limits) et sur un morceau folk-rock (Feist – A Commotion), on note que les niveaux sur les premiers tiers d'octaves sont bien plus élevés que pour le titre des Beatles. Ces deux titres sont assez représentatifs de l'équilibre spectral utilisé sur les productions actuelles – il est donc possible d'en trouver de plus extrêmes. Le dernier spectre correspond à une séquence de tirs de canon extraite du canal LFE du Blu-Ray du film Master and Commander. Le maximum énergétique se situe dans la bande centrée sur 12,5 Hz, avec des niveaux très importants dans les bandes adjacentes. Dans cet exemple, les extrêmes graves sont donc particulièrement représentés !

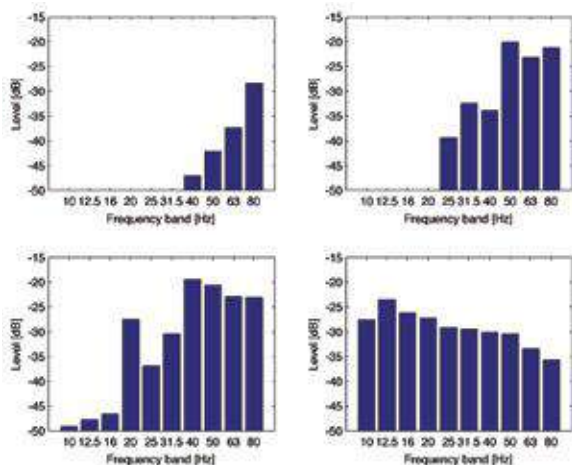


Fig. 2 : Spectres tiers d'octave (dB, référence arbitraire) de différents titres musicaux ; haut-gauche : Beatles – Back in the USSR, haut-droit : 2 Unlimited - No limits, bas gauche : Feist – A commotion, bas droit : tirs de canons, bande son du film Master and commander. One-third octave spectra of various songs; up-left: Beatles – Back in the USSR, up-right: 2 Unlimited - No limits, down-left: Feist – A commotion, down right: cannonade from Master and Commander movie.

amplifiée avantage fortement les basses fréquences. Tous ces effets, lorsqu'ils sont cumulés peuvent occasionner, en basse fréquence, la gêne des voisins de salles de spectacles ou de salons équipés d'un home-cinema. La figure 3 illustre les différents phénomènes précités. On remarque que la partie haute du spectre est généralement bien atténuée par les parois tandis qu'en basse fréquence, le niveau perçu par un voisin peut, dans certains cas, être supérieur au seuil d'audition.

On notera aussi que la perception des graves peut être renforcée par le caractère pulsé des rythmes associés à ces fréquences. De plus, la perception des sons de basses fréquences peut s'effectuer par d'autres organes que l'oreille. Ainsi, la mise en vibration de l'estomac, la cage thoracique, etc. peut renforcer la gêne ressentie.

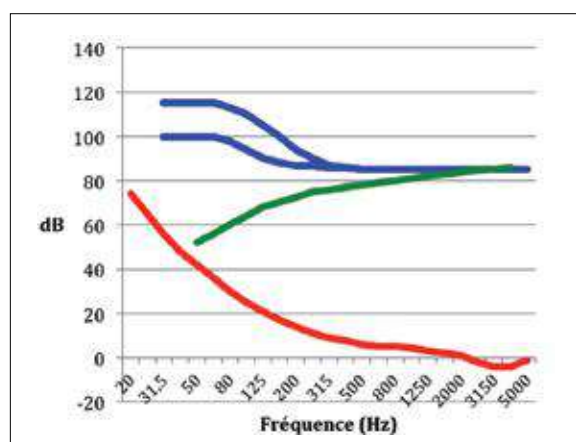


Fig. 3 : Spectres 1/3 d'octave (dB) du seuil auditif (rouge), de balances spectrales utilisées pour les concerts de musique amplifiée (bleu) et de l'indice d'isolement typique d'une salle de spectacle. (vert) Spectra (dB) : Auditory threshold (red), amplified music frequency balances used live (blue) typical SRI of a music hall wall)

Pour les ingénieurs système, responsables des dispositifs de sonorisation, les difficultés qui apparaissent à ces fréquences sont essentiellement dues, en extérieur, aux interférences constructives ou destructives entre sources et, en intérieur, au caractère modal des salles en basse fréquence responsable de réponses spatiales et fréquentielles très contrastées. Ces différentes contraintes ont conduit les sonorisateurs à rechercher des solutions innovantes permettant d'allier qualité de restitution et respect du voisinage.

Sonorisation extérieure

Sur leur bande passante, les longueurs d'ondes générées par les caissons de graves varient de 34 m (10 Hz) à 4,3 m (80 Hz). Dans le cas de sonorisation stéréophonique, les interférences constructives entre les deux (ensembles de) caissons vont générer un couloir médian sur l'auditoire où le niveau des graves sera très élevé alors que les interférences destructives vont fortement limiter le niveau sonore ailleurs. Ce phénomène de filtrage en peigne est dénommé, en anglais, Power Alley. Il est illustré sur la figure 4 pour différentes fréquences et pour deux caissons de basses dont les positions sont symbolisées par les croix.

Conséquences

L'extension vers les graves de la bande passante apporte de nouvelles difficultés tant au niveau de la qualité du champ acoustique restitué que des nuisances sonores de voisinage. En ce qui concerne les nuisances sonores, la chute de la sensibilité de l'oreille aux basses fréquences contribue, certes, à limiter la gêne. Cependant, l'absorption négligeable de l'air (0,1 dB par kilomètre à 10 Hz) et les faibles isollements des parois dans cette gamme de fréquence participent à limiter les effets de l'augmentation du seuil auditif. De plus, la balance spectrale généralement utilisée pour la sonorisation de la musique

On remarque que le couloir médian possède toujours un niveau de pression assez élevé alors qu'ailleurs le niveau de pression fluctue fortement suivant la fréquence : certaines positions passent d'un niveau maximum à un niveau minimum pour deux fréquences différentes. Pour pallier ce problème, certains sonorisateurs utilisent un empilement central de subwoofers. Toutefois cette solution encombrante n'est pas toujours réalisable en pratique. De plus, l'homogénéité de la pression acoustique sur l'auditoire est loin d'être atteinte, à cause de la décroissance de 6 dB par doublement de distance.

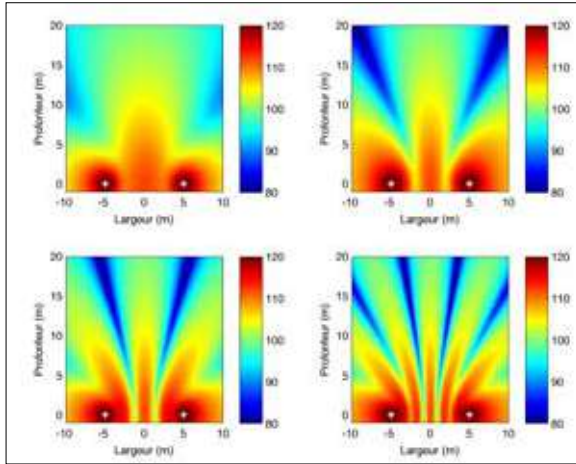


Fig. 4 : Illustration du phénomène de « Power Alley » (haut gauche : 25 Hz, haut droite : 40 Hz, bas gauche : 63 Hz, bas droite : 100 Hz) pour deux subwoofers séparés de 10 m.
Power alley for 2 subwoofers distant from 10 m (up left: 25 Hz, up right: 40 Hz, down left: 63 Hz, down right: 100 Hz).

Pour obtenir une couverture plus homogène, diverses solutions peuvent être envisagées. Aujourd'hui, beaucoup de fabricants de matériel de sonorisation comme Nexo (figure 5), L-Acoustics ou encore d&b audiotechnik proposent dans leur catalogue des caissons de basses cardioïdes. Lorsque ces caissons sont utilisés en sonorisation stéréophonique les interférences entre les côtés droit et

gauche sont alors grandement réduites. De plus, la différence de 15 dB généralement observée entre le rayonnement à l'avant et à l'arrière permet de limiter l'impact sonore sur l'environnement. Ce résultat est particulièrement intéressant dans le cas d'événements culturels situés à proximité d'habitations. Notons que la directivité peut encore être améliorée lorsque les subwoofers cardioïdes sont utilisés pour construire des réseaux de sources linéaires (line arrays). Dans tous les cas, il est possible de mettre en œuvre un système directif à partir de caissons omnidirectionnels s'ils ont été judicieusement agencés.

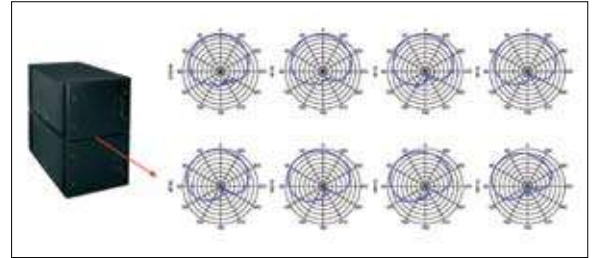


Fig. 5 : Exemple de directivités pour empilement de deux subwoofers cardioïdes de marque Nexo
Directivities for a stack of two Nexo subwoofers

Un exemple d'agencement est celui des réseaux à rayonnement longitudinal (end-fire arrays) qui permettent d'obtenir des directivités de type cardioïde [1]. Expliquons simplement le principe de fonctionnement : deux caissons sont séparés d'une distance égale au quart de la longueur d'onde, celui situé à l'avant est retardé d'un temps correspondant au quart de la période. Ce type de construction permet d'obtenir, sur l'axe, des interférences constructives à l'avant et destructives à l'arrière. Cette solution possède le désavantage de ne fonctionner correctement que sur une plage fréquentielle assez réduite. Pour augmenter la bande utile, il est possible d'augmenter le nombre de sources. Une simulation des directivités obtenues pour trois caissons accordés à 50 Hz et 68 Hz est présentée sur la figure 6. On remarque que le déséquilibre souhaité entre les rayonnements avant et arrière est obtenu pour différentes fréquences.

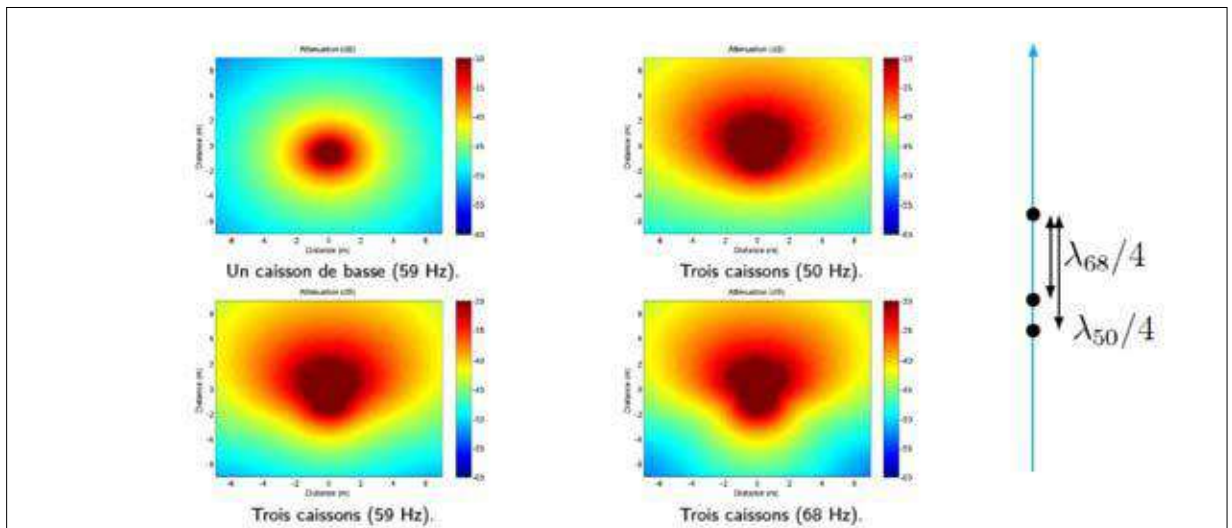


Fig. 6 : Simulation des directivités pouvant être obtenues par un réseau «end-fire»
Simulated directivities at several frequencies for endfire arrays.

Sonorisation intérieure

Lorsque la sonorisation s'effectue en intérieur, la bande fréquentielle générée par les subwoofers recouvre généralement celle des premiers modes de la salle. Les réponses fréquentielles et spatiales sont alors fortement chahutées, des écarts entre fréquences et entre positions dépassent facilement les 20 décibels. Ce type de résultat peut être observé sur la figure 7 où les niveaux de pression en fonction de la fréquence sont tracés pour différentes positions de l'auditoire d'une salle de concert dans le cas d'un caisson unique placé dans un coin. Le caractère modal de la réponse de la salle aux très basses fréquences privilégie les forts niveaux de pression à proximité des parois rigides (augmentant ainsi le niveau sonore transmis chez les voisins) et crée des zones nodales où les pressions sont très faibles sur l'auditoire. On obtient alors le résultat inverse de ce qui serait souhaitable.

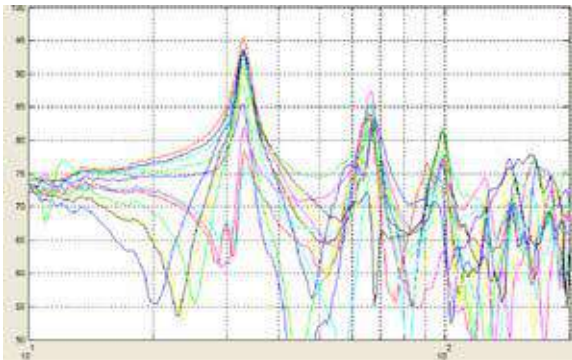


Fig. 7 : Niveaux acoustiques (dB) en fonction de la fréquence pour différentes positions d'une salle de concert dans le cas d'une sonorisation par un seul caisson dans un coin de la salle
Pressure levels (dB) vs frequency (Hz) at various locations in a concert hall for one subwoofer in a corner

En recherche, différentes études se sont intéressées au contrôle modal des salles aux basses fréquences [2-5]. Les types d'approches proposés peuvent faire appel à des sources directives, à un filtrage adapté ou à des matériaux absorbants passifs, actifs ou hybrides. Dans le domaine de l'audio grand public, la gestion des basses fréquences est souvent traitée par des absorbeurs passifs encore appelés «bass-traps».

Ces matériaux, souvent encombrants, ne permettent pas toujours d'obtenir les résultats escomptés. Des solutions simples, à l'aide de réseaux de sources pourraient être avantageusement envisagées. Ainsi, en reprenant la salle parallélépipédique rectangle de l'exemple précédent, on génère cette fois-ci les basses fréquences avec quatre subwoofers placés au milieu des quatre murs et alimentés par le même signal. Les niveaux de pressions mesurés en différents points de l'auditoire sont représentés sur la figure 8.

On note, en dessous de 50 Hz, une bien meilleure cohérence entre les différents points et une meilleure réponse fréquentielle. Ce résultat a été obtenu avec une solution technique relativement simple à mettre en œuvre, le contrôle modal résultant pourrait encore être amélioré par un filtrage optimisé de chaque source.

Notons également que l'utilisation des caissons cardioïdes décrits précédemment permet aussi de moins exciter les parois de la salle et donc de gagner en qualité sonore.

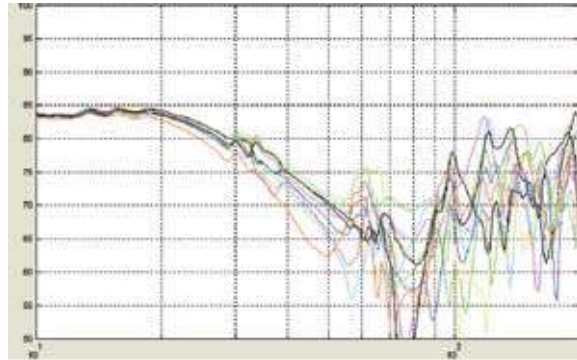


Fig. 8 : Niveaux acoustiques (dB) en fonction de la fréquence pour différentes positions d'une salle de concert dans le cas d'une sonorisation par 4 caissons en milieu de parois
Pressure levels (dB) vs frequency (Hz) at different locations in a concert hall for 4 subwoofers located at the wall centres

En ce qui concerne, les nuisances de voisinage, une diminution du champ de pression exercée sur les parois permet de limiter le niveau sonore transmis à l'extérieur de la salle. La figure 9 présente le gain par fréquence qui peut être obtenu si l'on remplace un caisson omnidirectionnel par une ligne source constituée de 32 haut-parleurs de 13 cm de diamètre. On remarque qu'entre 40 et 250 Hz le niveau chez le voisin a diminué de 10 dB à 20 dB. Ce résultat encourageant est d'autant plus intéressant, qu'il est plus facile de modifier une sonorisation que de reprendre le gros œuvre d'une salle existante pour en augmenter l'isolement des parois. Notons que les directivités obtenues en extérieur à l'aide de réseaux ne sont pas automatiquement transposables aux salles à cause des réflexions sur les différentes parois. Leur mise en œuvre demande donc une étude spécifique à chaque salle.

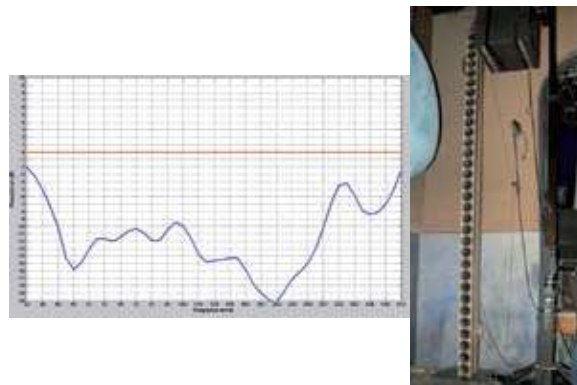


Fig. 9 : Atténuation (dB) sur le niveau de pression transmis chez le voisin d'une salle de spectacles apportée par une source directive (line array) par rapport à un caisson omnidirectionnel
Attenuation of the pressure level transmitted to the neighborhood by using a linear array in place of a monopole source

Mesure des sources sonores aux très basses fréquences

Pour un fabricant d'enceintes, connaître précisément la réponse fréquentielle de ses subwoofers n'est pas une mince affaire. En effet, dans cette gamme de fréquences, beaucoup de salles anéchoïques... ne le sont plus. Quand bien même, ce type de salle possède un coût qui est souvent prohibitif pour de petites entreprises. Heureusement, il existe des solutions alternatives qui permettent de qualifier le champ rayonné, par exemple : mesurer la source en champ libre ou dans des conditions qui s'en rapprochent le plus : la mesure en extérieur. Cette approche permet généralement d'obtenir de bons résultats lorsque l'on dispose d'un environnement calme, sans bâtiments aux alentours, et que la météo est favorable. Ces conditions sont difficiles à obtenir pour un grand nombre de sociétés installées en environnement urbain. À titre d'exemple, une photographie de conditions de mesures pouvant être typiquement obtenues en ville est donnée sur la figure 10 tandis que la figure 11 présente les résultats obtenus. On remarque, sur la courbe bleue, que la réponse fréquentielle dans l'axe mesurée à 1 m du cache noyau du haut-parleur présente des oscillations assez marquées (de l'ordre de quelques dB) dues aux réflexions sur le sol et sur les immeubles environnants. Lorsque l'on rapproche le microphone à proximité du cache noyau (courbe rouge), on obtient une allure beaucoup plus lisse et donc *a priori* plus satisfaisante. Cependant, ce choix de positionnement privilégie le rayonnement direct de la membrane et ne permet pas de mettre en évidence d'éventuels défauts du caisson, comme les vibrations des parois de l'enceinte ou encore la présence de fuites acoustiques. Les mesures en champ proche ne sont donc possibles que si l'on connaît à l'avance toutes les surfaces participant au rayonnement acoustique.



Fig. 10 : Mesure d'un caisson de basse en environnement urbain
Subwoofer measurement set-up in urban area

Lorsqu'on est confronté à des environnements non anéchoïques, le laboratoire d'acoustique du CNAM a proposé l'utilisation d'une méthode de séparation de champs pour la mesure de sources basses fréquences [6,7]. Cette méthode consiste à mesurer le champ de pression rayonné sur deux (demi-)sphères englobant la source à caractériser pour retrouver des conditions de champ (semi-)libre. Les deux champs de pression mesurés sont alors projetés sur une base d'harmoniques sphériques, puis, une résolution adaptée permet de séparer les contributions convergentes et divergentes des ondes sonores.

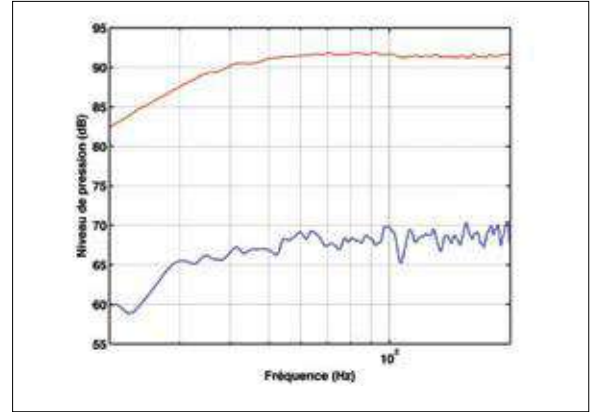


Fig. 11 : Réponse fréquentielle dans l'axe d'un subwoofer mesurée en extérieur (rouge : caisson suspendu, microphone à 11 cm du cache noyau, bleu : caisson sur le sol microphone à 1 m du cache noyau)
Subwoofer on-axis frequency response measured outside. (red Microphone at 11 cm from the dust cap, blue: microphone at 1 m from the dust cap)

La mesure étant effectuée sur un maillage discret (nombre de points de mesure limité), la projection s'effectue alors sur une bande fréquentielle limitée par une fréquence de coupure haute. Dans le cas de la demi-sphère, $f_{\max} = Nc/2\pi\alpha$, où N est l'ordre de décomposition maximal, α le rayon de la sphère de mesure et c la vitesse du son. Pour un rayon de 1 m et 16 points de mesures ($N=3$), on obtient une valeur de $f_{\max} \approx 160\text{Hz}$, qui est suffisante pour la mesure de caissons de basse. Le schéma de principe de la méthode est fourni sur la figure 12. Les résultats obtenus dans une salle au temps réverbération voisin de la demi-seconde, caractéristique d'une salle d'habitation usuelle, sont présentés sur la figure 13. On remarque que les oscillations dues aux modes propres du local ont disparu après traitement des mesures. Le résultat obtenu est très proche des valeurs données par une modélisation éléments finis du caisson de basse [7].

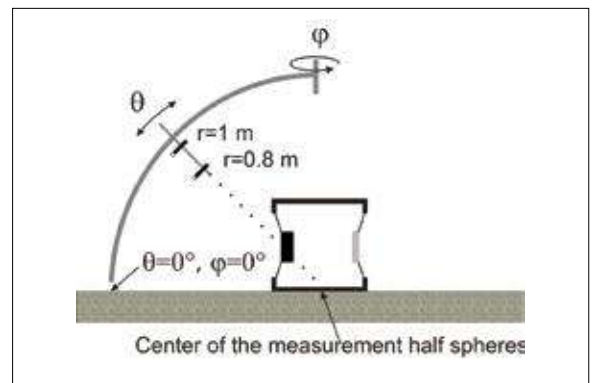


Fig. 12 : Dispositif de mesure de la méthode de séparation de champ
Measurement set-up of the field separation method

La méthode de séparation de champ permet d'obtenir des résultats assez précis autant en terme de réponse fréquentielle que de directivité. Cette méthode nécessite toutefois un minimum de connaissances théoriques et du matériel de mesure adapté (robot sphérique, microphones appariés).

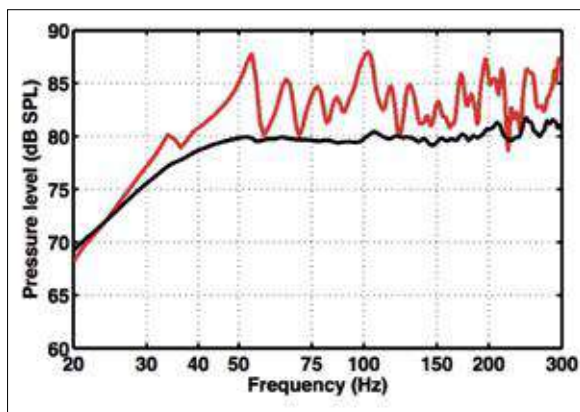


Fig. 13 : Niveaux de pression (dB) en fonction de la fréquence (Hz) dans l'axe du caisson de basse. Courbe rouge : niveau mesuré, Courbe noire : niveau après séparation. On-axis pressure levels. Red curve : measured, black curve: after separation processing.

Pour un fabricant ne disposant pas de ces prérequis, une méthode alternative : « la chambre de référence » permet également d'obtenir de bons résultats. Pour mettre en œuvre cette technique, il suffit de mesurer le rayonnement d'un caisson de référence en extérieur et dans une salle de très petit volume - dont le premier mode est supérieur à 200 Hz par exemple. On calcule ensuite la fonction de transfert entre les configurations intérieur et extérieur. Cette fonction de transfert pourra ensuite être appliquée pour tout caisson de dimensions voisines et de type de rayonnement semblable [6].

Conclusion

Le renforcement des basses fréquences dans le cadre d'évènements sonorisés a augmenté les risques de nuisances de voisinage et fait émerger les problèmes de « power alley » ou encore des problèmes liés à la réponse modale des salles dans les graves. Les acteurs du métier ont proposé différentes solutions pour pallier ces difficultés. Ces solutions donnent souvent de bons résultats mais possèdent un surcoût en général assez élevé. En effet, pour les systèmes multicanaux, le coût des haut-parleurs supplémentaires et surtout des amplificateurs associés est loin d'être négligeable. On conçoit aisément que la contrepartie financière ne puisse pas être assumée par les plus petites structures organisant des concerts.

Une autre difficulté concerne l'intégration des réseaux de haut-parleurs sur scène. La place n'est pas toujours disponible pour disposer un ou deux réseaux sur le sol. La solution consistant à suspendre les réseaux est bien adaptée aux configurations à rayonnement transversal mais peut plus difficilement être appliquée aux réseaux de type « end-fire ». Dans tous les cas, une bonne gestion des basses fréquences passe par une bonne formation des différents intervenants : ingénieurs système et ingénieurs du son qui ne chercheront pas à obtenir l'impossible. Il est indispensable de bien connaître les limites du système de sonorisation à sa disposition et les contraintes associées au lieu de diffusion afin de s'y adapter. Ces derniers pouvant varier chaque jour lors de tournées. Les fabricants de matériel, pour beaucoup, proposent de l'aide aux utilisateurs finaux qui peut prendre la forme de pré-réglages,

de cours ou de logiciels permettant de prédire le rayonnement de réseaux de sources complexes.

Concernant l'avenir, l'évolution du décret n° 98-1143 relatif aux locaux recevant du public et diffusant de la musique amplifiée permettra sans doute de mieux protéger le public et le voisinage en imposant de nouvelles contraintes. Si certaines des solutions techniques présentées ici sont utilisées, on peut espérer que la qualité acoustique sera au rendez-vous sans déclencher intempestivement les limiteurs électroacoustiques.

Dans un autre domaine, des projets de recherche PARABAS [8] dont le but était d'étudier la faisabilité de matériaux hybrides actifs-passifs à contrôle décentralisé permettant d'obtenir de bonnes caractéristiques d'isolement et d'absorption aux basses fréquences permettront peut-être d'apporter de nouvelles solutions. Ces nouveaux matériaux seraient particulièrement utiles pour les salles de spectacles enclavées entre des immeubles d'habitation. Des grandes villes comme Paris, regorgent de salles de ce type, dont l'activité pourrait être mise en péril sans recourir à l'utilisation de solutions techniques performantes.

Pour terminer, rappelons que l'isolation acoustique ne pouvant que très rarement être améliorée à un coût non prohibitif, la gestion des problèmes d'émergence aux très basses fréquences passe par donc par deux grands principes : une utilisation raisonnable et intelligente des exploitants et une installation de sonorisation adaptée et réglée aux contraintes spécifiques de chaque lieu diffusant de la musique amplifiée.

Glossaire

Bass trap : matériau, généralement passif, absorbant les basses fréquences.

End-fire array : réseau dont la directivité est maximale dans la direction d'alignement des transducteurs.

Line array : réseau linéaire d'enceintes acoustiques permettant d'augmenter la zone de couverture du public.

LFE (Low Frequency Effect) : canal réservé aux basses fréquences (10-120 Hz). Sa présence est généralement précisée par le terme « .1 » (exemple système 5.1).

Subwoofer : caisson de graves ou caisson de basses sont des termes désignant les enceintes chargées de reproduire les fréquences inférieures à 80 Hz.

Références bibliographiques

- [1] M. Boone, W. Cho & J. Ih, "Design of a highly directional endfire loudspeaker array", *J. Audio Eng. Soc.*, 309-25, 382-92 (2009)
- [2] Ph. Herzog, A. Soto-Nicolas, and F. Guéry. Passive and active control of the low-frequency modes in a small room. 98th A.E.S. convention, number 3591, Paris, 1995
- [3] J. Backman Low-frequency polar pattern control for improved in-room response., 115th Convention, number 5867, New York, 2003
- [4] H. Lissek, R. Boulandet and R. Fleury, "Electroacoustic absorbers: Bridging the gap between shunt loudspeakers and active sound absorption", *J. Acoust. Soc. Am.*, 129(5), 2968 (2011)
- [5] A. Gintz, Contrôle actif du champ acoustique diffracté à basse fréquence pour les parois d'une chambre anéchoïque, thèse de l'Université de Provence, 2009
- [6] M. Melon, C. Langrenne, D. Rousseau, P. Herzog, "Comparison of four subwoofer measurement techniques", *J. Audio Eng. Soc.*, 55 (12), 1077-91 (2007)
- [7] M. Melon, C. Langrenne, P. Herzog, A. Garcia, "Evaluation of a method for the measurement of subwoofers in usual rooms", *J. Acoust. Soc. Am.*, 127(1), 256-263 (2010)
- [8] <http://www.lma.cnrs-mrs.fr/imprime757.html>