

10ème Congrès Français d'Acoustique

Lyon, 12-16 Avril 2010

Caractérisation de Sources Acoustiques en 3D par Méthode Inverse avec une Sphère Rigide

Lucille Lamotte¹, Filip Deblauwe²

¹MicrodB, 28, chemin du petit Bois, F-69130 Ecully, ll@microd.fr

²LMS International, Interleuvenlaan 68, B-3001 Leuven

Les méthodes dites « inverses » sont appliquées dans le domaine de la caractérisation des sources acoustiques pour en définir leur localisation précise et pour en quantifier leur puissance. Elles se basent d'une mesure par antenne, d'une distribution des sources potentielles et d'une matrice de passage plus ou moins complexe entre les deux (IBEM, ESM...). La méthode présentée dans ce papier utilise comme antenne une sphère rigide placée au centre d'une cavité, la distribution de source s'apparente à un maillage de cette cavité, et la matrice de passage utilise un modèle de propagation simplifié suivant une fonction de Green prenant en compte la diffraction liée à la sphère. La résolution de ce problème inverse conduit à de bons résultats face à la difficulté de la caractérisation des sources en milieu confiné. Ce papier montre l'influence sur les résultats du maillage de la cavité et de la méthode de régularisation.

1 Introduction

Les méthodes de localisation de sources se sont largement développées ces dernières décennies afin de répondre à de nombreuses problématiques : mesures champs proche avec l'holographie acoustique et la focalisation, en champs lointain avec la formation de voie, et plus généralement les méthodes inverses avec l'IBEM, l'ESM. Ces méthodes sont appliquées à partir de mesures avec des antennes planes 2D, lacunaires ou non. Dans les milieux confinés, l'antenne plane ne peut séparer le champ incident de celui réfléchi. Les antennes double-couche [1] répondent partiellement à ces conditions de mesure mais nécessitent plusieurs itérations pour couvrir toutes les parois d'une cavité.

Les antennes 3 dimensions répondent au problème, en particulier la sphère qui assure un maillage régulier dans toutes les directions. Les sphères rigides sont d'autant plus directives [2]. La méthode proposée dans cet article s'appuie sur ce type d'antenne.

Derrière une sphère rigide, parmi les méthodes qui ont été déjà appliquées, on retient : de la focalisation avec intégration de la HRTF [2], de l'holographie acoustique basée sur une décomposition en onde sphérique [3], de la formation de voie en onde sphérique [4] ou encore des méthodes inverses [3]. Cet article développe dans cette dernière catégorie l'ESM (Equivalent Source Modeling) en prenant en compte la HRTF et en travaillant à partir d'une distribution de source quelconque (qui s'apparenterait à un maillage de peau de la zone confinée mesurée) [5].

Un premier paragraphe développe la méthode en donnant ses avantages et inconvénients. Le paragraphe suivant traite de la géométrie de la distribution de source.

2 Méthode

2.1 Principe

La méthode est basée sur des mesures à partir d'une antenne sphérique rigide composée d'un certain nombre de

microphones (entre 24 ou 36) répartis aléatoirement ou pseudo régulièrement, la méthode inverse n'imposant pas de répartition spécifique contrairement à la décomposition en onde sphérique. Avec un diamètre de 30 cm, la méthode de localisation couvre correctement une plage fréquentielle de 500 à 4000 Hz [5].

Le corps rigide impose une diffraction des ondes acoustiques. Cette diffraction est prise en compte au travers de l'expression de la pression en un point p pour une densité de source Q par ([6]):

$$p(r, a, \omega, \theta, t) = Q \sum_{n=0}^{\infty} (2n+1) i^n \left(j_n(kr) - \frac{j'_n(ka)}{h'_n(ka)} h_n(kr) \right) P_n(\cos \theta) \frac{e^{-i\alpha}}{r}$$

Le champ mesuré correspond à une distribution de source. Les points source sont l'ensemble des points d'un maillage de peau de la cavité à l'intérieur de laquelle est placée la sphère. En milieu confiné, cette méthode à l'avantage par rapport à une méthode champ proche d'une des parois de prendre également en compte dans la résolution du système les sources réfléchies. Par contre, elle ne distingue pas la nature des sources. Dans ces conditions, le nombre de point source est largement supérieur au nombre de point de mesure et la difficulté est de trouver LA bonne solution parmi toutes les solutions dans la pseudo-inversion du système. Si H exprime le niveau p de pression mesuré en un point de la sphère rigide par rapport à une source de densité q et qu'il y a m microphones et s points sources alors le système posé est :

$$U_{[s,s]} S_{[s,s]} V_{[m,s]}^* q = p$$

Avec

$$SVD(H_{[s,m]}^*) = V_{[m,s]} S_{[s,s]} U_{[s,s]}^*$$

Le terme SVD exprimant la décomposition en s valeur singulière de H .

2.2 Formation de H

La matrice de transfert entre les points de mesures et les points sources intègre une propagation en champ libre

jusqu'à la sphère puis une diffraction de cette onde autour de la sphère. Un élément de cette matrice dépend du rayon a de la sphère, de la fréquence ω de l'onde, son angle d'arrivée θ , de la distance source/centre sphère r . Il peut donc s'exprimer par la formule simplifiée donnée précédemment:

$$p(r, a, \omega, \theta, t) = \frac{i\rho c q}{4\pi a^2} \Psi e^{-i\alpha r}$$

Ψ représente l'expansion en harmonique sphériques et dépend des paramètres rappelés entre parenthèses.

L'intérêt de la sphère rigide par rapport à une sphère creuse est différent suivant la bande de fréquence:

- en basse fréquence, la phase est proportionnelle à $\cos(\theta)$,
- en moyenne et haute fréquence, la différence d'amplitude est amplifiée par rapport à un corps creux.

2.3 Régularisation du système

A l'inversion du système, ce sont les plus petites valeurs singulières correspondant à du bruit qui conduisent aux plus grosses valeurs et erreurs. La régularisation tente de déterminer la limite source/bruit. Le système est régularisé suivant une méthode de Thikonov avec une amplification progressive des plus petites valeurs singulières suivant cette formule:

$$q_i = V_{[s,m]} \text{diag} \left(\left[S + \beta_i / S \right]_{[m,m]}^{-1} \right) U_{[m,m]} P_{[m,1]}$$

Pour déterminer la meilleure solution, plusieurs méthodes existent. 2 méthodes sont reprises de [7] et utilisées dans cet article :

- la courbe en L : le point présentant la plus grosse courbure sur cette courbe donne la solution optimale pour laquelle l'erreur est faible tout en conservant une solution réelle,
- le GCV (general cross validation) : il mesure à chaque solution le rapport entre l'erreur et l'écart de l'inversion par rapport à la matrice identité, la valeur minimale assurant une faible erreur et une pseudo-inversion conservant des valeurs correctes.

Dans cette étape, le maillage (c'est-à-dire la distribution de sources choisies) joue sur les résultats comme le montre de paragraphe suivant.

3 Influence de la distribution de source

3.1 Inclure toutes les sources dans le maillage

La mesure peut comporter des ondes provenant d'autres points source qui ne seraient pas incluses dans la distribution initiale (réflexion sur les parois). Cette absence conduit à des erreurs lors de la résolution du système comme le montre le test théorique suivant. 2 sources sont placées par simulation à 1 mètre de la sphère à 90° l'une de l'autre pour s'apparenter à une source primaire et sa première réflexion. Une première distribution de source cubique englobe les deux sources réelles. Une seconde, plane ne comporte qu'une des 2 sources. Les résultats sont présentés tiers octave 500 et 1000 Hz.

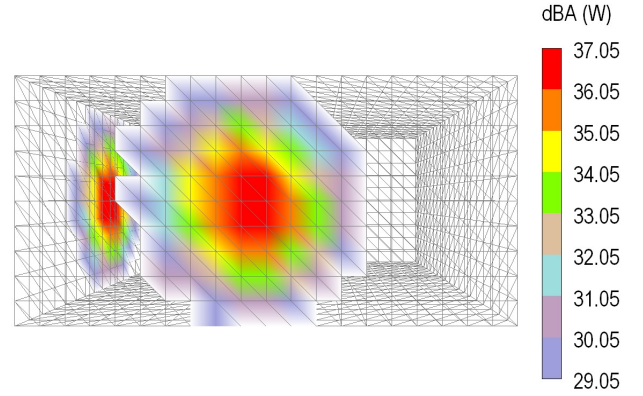


Figure 1 : identification « ESM » de 2 sources sur un maillage 2*2*1 m3 (pas 0.1m) : tiers octave 500 Hz

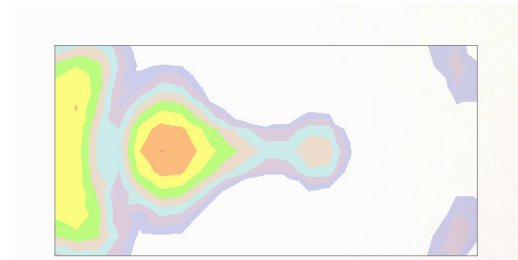


Figure 2 : identification « ESM » de 2 sources sur un plan 2*1 m2 : tiers octave 500 Hz

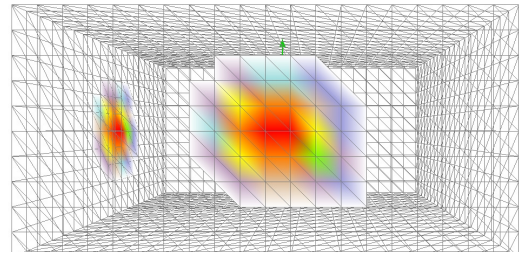


Figure 3 : identification « ESM » de 2 sources sur un maillage 2*2*1 m3 : tiers octave 1000 Hz

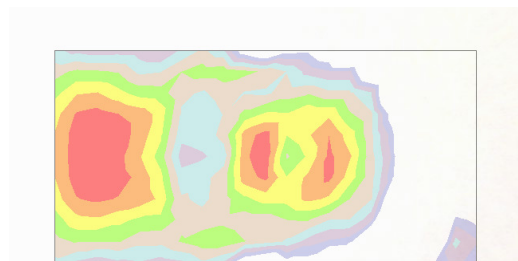


Figure 4 : identification « ESM » de 2 sources sur un plan 2*1 m2 : tiers octave 1000 Hz

Dans le cas d'une distribution englobant les deux sources, ces dernières sont clairement identifiées. Dans le cas plan, la deuxième source qui n'est pas prise en compte dans la distribution perturbe la régularisation : la source susceptible d'être identifiée est mal positionnée.

Cette simulation montre l'importance en milieu réverbéré de résoudre le système avec une distribution de source incluant toute les surfaces.

3.2 Influence de la densité de maille sur l'interprétation des résultats

Les maillages de cavité (intérieur habitacle, cockpit) ne présentent pas toujours un pas régulier avec des mailles plus ou moins lâches. Or par la méthode ESM, les cartes de localisation de source représentent la densité de source par m^2 . Les niveaux sont donc pondérés par la superficie de la maille, et un maillage fin conduit à des niveaux plus élevés. La figure 5 permet de comparer les niveaux d'une carte de localisation obtenue avec un maillage de 20 cm au lieu de 10 cm comme celui figure 3. Avec des mailles 4 fois plus grandes, les niveaux maximaux augmentent de plus de 5 dB. Il est donc important pour l'interprétation des résultats de conserver un maillage régulier.

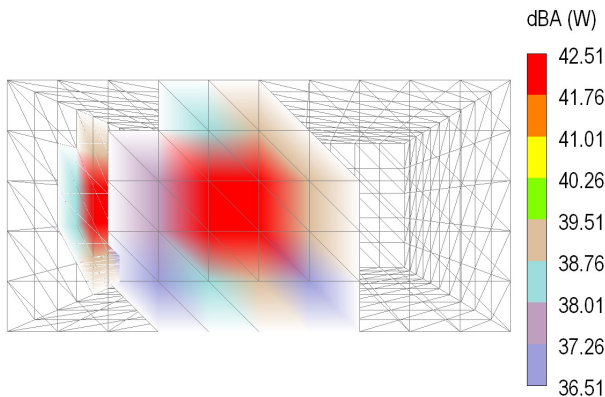


Figure 5 : identification « ESM » de 2 sources sur un maillage 2*2*1 m3, (pas 0.2 m) : tiers octave 500 Hz

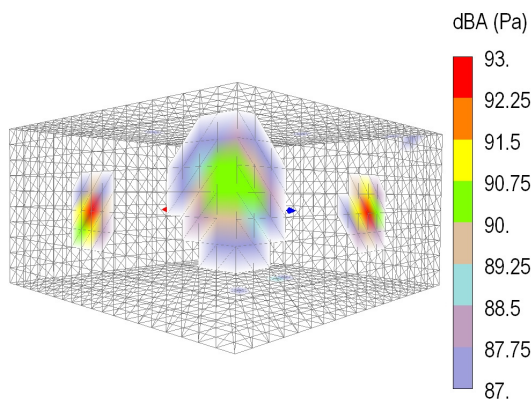


Figure 6 : résultat de focalisation pour 2 sources sur un maillage 2*2*1 m3, (pas 0.1 m) : 3900-4100 Hz

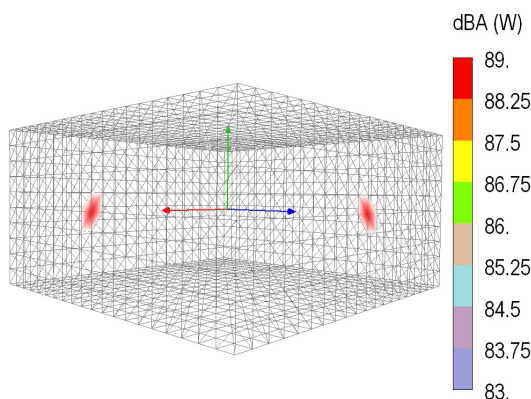


Figure 7 : résultat d'identification « ESM » pour 2 sources sur un maillage 2*2*1 m3, (pas 0.1 m) : 3900-4100 Hz

3.3 Dynamique des résultats en haute fréquence

Avec une méthode de focalisation, la dynamique se dégrade en haute fréquence, influençant l'interprétation des résultats comme le montre la Figure 6. Pour ce cas dans la bande 3900-4100 Hz, les lobes secondaires de chaque source se superposent, laissant penser en la présence d'une troisième source. La méthode ESM appliquée sur cette même bande détecte bien les 2 seules sources Figure 7.

Cette méthode a l'avantage de ne pas être dégradée par la dynamique. La qualité des résultats est surtout liée à la méthode de régularisation comme le montre le paragraphe suivant.

4 Conclusion

La méthode ESM proposée dans cet article, appliquée derrière des mesures avec une antenne pleine sphérique répond au problème de localisation de source en milieu confiné. Elle a une résolution identique à une méthode de focalisation en moyenne et haute fréquence, une meilleure résolution en basse fréquence. En haute fréquence, où la dynamique se dégrade avec une méthode de formation de voie, elle conserve les mêmes performances qu'en moyenne fréquence.

Pour donner des résultats satisfaisants, la distribution de sources doit cependant répondre aux critères suivants :

- mailler toute les surfaces de la cavité afin de considérer en plus de la source principale toutes les sources images qui pourraient perturber la résolution du système,
- avoir un maillage de densité constante pour une interprétation correcte des niveaux maximaux.

Il serait intéressant d'améliorer la méthode afin de pouvoir identifier la source origine des sources images.

La méthode de régularisation reste un point délicat de cette méthode.

Références

- [1] Havranek, Bejcek, "Local patch Acoustic holography method in enclosed space", *Acoustics'08, Euronoise*, 459-464 (2008).
- [2] Robin M., Béguet B. "Acoustic source localization inside cabin", *congrès SIA 2008*.
- [3] Sklanka, Buehrle, William "Acoustic Source Localization in Aircraft Interiors Using Microphone Array Technologies", *Acoustics'08, Euronoise*, 2887-2892 (2008).
- [4] Haddad, Hald, "3D Localization of acoustic sources with spherical array", *Acoustics'08, Euronoise*, 477-482 (2008).
- [5] Lamotte L., Robin M., Deblauwe F., "Noise mapping and sound quantification in the space using spherical array", *Euronoise 2009*.
- [6] William E., Fourier Acoustics: "Sound radiation and Nearfield Acoustical Holography", *Academic Press: Harcourt Brace & Company*, p.228.
- [7] Leclerc Q., "Acoustic imaging using under-determined inverse approaches: Frequency limitations and optimal regularization", *Journal of Sound and Vibration*, 321, 605-619 (2009).