



HAL
open science

Modélisation d'une source sonore par une ou plusieurs sources équivalentes omnidirectionnelles : une approche inverse semi-analytique

Francis Golay, Guillaume Dutilleux, Christophe Heinkelé

► **To cite this version:**

Francis Golay, Guillaume Dutilleux, Christophe Heinkelé. Modélisation d'une source sonore par une ou plusieurs sources équivalentes omnidirectionnelles : une approche inverse semi-analytique. 10ème Congrès Français d'Acoustique, Apr 2010, Lyon, France. hal-00541725

HAL Id: hal-00541725

<https://hal.science/hal-00541725v1>

Submitted on 1 Dec 2010

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.

10ème Congrès Français d'Acoustique

Lyon, 12-16 Avril 2010

Modélisation d'une source sonore par une ou plusieurs sources équivalentes omnidirectionnelles : une approche inverse semi-analytique

Francis Golay^{1,2}, Guillaume Dutilleux¹, Christophe Heinkelé¹

¹ ERA 32 Acoustique LCPC, Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Strasbourg, 67 035 Strasbourg, France,

pre.nom@developpement-durable.gouv.fr

² LAUM, CNRS, Université du Maine, Av. O. Messiaen, 72 085 Le Mans, France

Les réglementations actuelles sur le bruit des infrastructures de transport terrestre sont fondées sur des indicateurs L_{Aeq} qui couvrent des périodes de plusieurs heures. La dynamique du bruit n'est pas prise en compte. Ainsi, les véhicules étendus (tels que les poids lourds) sont modélisés par une ligne de sources incohérentes dans la NMPB 2008 (Nouvelle Méthode de Prévision du Bruit, méthode française). Afin d'améliorer les modèles d'émission, une méthode inverse semi-analytique est proposée pour modéliser une source sonore par une ou plusieurs sources équivalentes omnidirectionnelles. Cette méthode se base sur la mesure du champ sonore en N microphones (3 à 4). Elle est donc facilement déployable sur le terrain. Elle permet d'optimiser le nombre de sources équivalentes, leurs positions, et leurs spectres. Elle utilise un modèle de propagation simplifié (Rudnick), la source et les microphones étant proches (espacés de moins de 10 m).

1 Introduction

Les réglementations actuelles sur le bruit des infrastructures de transport terrestre sont fondées sur des indicateurs L_{Aeq} qui couvrent des périodes de plusieurs heures. La dynamique du bruit n'est pas prise en compte. Ainsi, les véhicules étendus (tels que les poids lourds) sont modélisés par une ligne de sources incohérentes dans la Nouvelle Méthode de Prévision du Bruit développée en France [1]. Or, la dynamique du bruit peut être importante en milieu urbain ou en situation de faible trafic, car le flot de véhicules est discontinu.

Parallèlement à ce besoin d'une meilleure modélisation de l'émission, s'ajoute la nécessité d'avoir une méthode simple pour la caractériser. Des traitements d'antenne pour la modélisation des véhicules par des sources équivalentes ont été proposés [2]. Ces traitements sont malheureusement difficilement utilisables à grande échelle, tant à cause du matériel requis (nombreux microphones), que de la complexité de traitement des signaux recueillis.

Afin de répondre à ces deux objectifs, une méthode inverse semi-analytique est proposée. Elle permet de modéliser une source sonore par une ou plusieurs sources équivalentes omnidirectionnelles. Cette méthode est appelée Méthode Énergétique (MÉ) par la suite.

2 Modèle de propagation

Le modèle de propagation utilisé par MÉ est explicité.

2.1 Formulation générale

La pression acoustique $p_{ij}(f)$ générée par une source S_i à un microphone M_j est supposée de la forme générale :

$$P_{ij}(f) = A_i(f)H_{ij}(f), \quad (1)$$

où $A_i(f)$ est l'amplitude complexe de la source S_i et $H_{ij}(f)$ est la fonction de transfert entre la source et le microphone. Toutes ces variables dépendent de la fréquence f . Par la suite, f n'est pas explicitement précisée, afin d'alléger les notations. Une dépendance temporelle en $e^{-j\omega t}$ est supposée ($j^2 = -1$).

La formulation de la pression (1) est très générale. Elle peut s'appliquer à de nombreuses formulations. Par exemple, pour le champ de pression d'une source au-dessus d'un sol plat homogène : [3–8]. Un autre cas couramment rencontré le long des routes est un sol plat avec une discontinuité d'impédance. Dans ce dernier cas, le modèle de Rasmussen pourrait être utilisé [9].

2.2 Modèle de Rudnick

Les simulations réalisées ici utilisent un modèle de propagation simple sur sol homogène : le modèle de Rudnick. Les effets météorologiques (réfraction, turbulence, absorption atmosphérique) ne sont donc pas pris en compte. Cette hypothèse est peu restrictive car l'on s'intéresse à des distances faibles entre les sources et les récepteurs. Pour un sol plat homogène $H_{ij}(f)$ s'écrit [3] :

$$H_{ij}(f) = \frac{1}{R_{ij}^d} e^{j k_0 R_{ij}^d} + \frac{Q}{R_{ij}^r} e^{j k_0 R_{ij}^r}, \quad (2)$$

avec R_{ij}^d la longueur du chemin direct de la source au récepteur et R_{ij}^r la longueur du chemin réfléchi (cf. figure 1). k_0 est le nombre d'onde dans l'air et Q est le

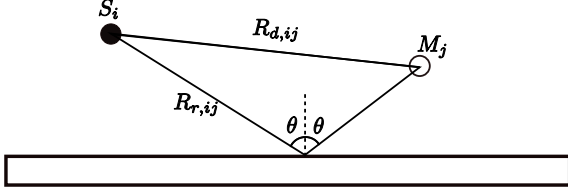


FIG. 1 – Géométrie de la propagation du son.

coefficient de réflexion pour une onde sphérique :

$$Q = R_p + (1 - R_p)F(w), \quad (3)$$

avec R_p le coefficient de réflexion pour une onde plane, donné par [10] pour un sol caractérisé par une réaction localisée.

Le facteur de perte aux frontières $F(w)$ s'écrit :

$$F(w) = 1 + 2j\sqrt{w}e^{-w} \int_{-j\sqrt{w}}^{\infty} e^{-u^2} du, \quad (4)$$

où w est la distance numérique. Pour un sol à réaction localisée [10] :

$$w = \frac{jkR_{r,ij}^2}{2} (\beta + \cos\theta)^2, \quad (5)$$

avec β l'admittance normalisée du sol. Le modèle de Delany-Bazley, mis à jour par Miki [11], est utilisé :

$$\beta = \left(1 + 5.5 \left(\frac{f}{\sigma} \right)^{-0.632} + j 8.43 \left(\frac{f}{\sigma} \right)^{-0.632} \right)^{-1} \quad (6)$$

avec σ la résistance spécifique au passage exprimée en $kNsm^{-4}$. L'implémentation utilisée pour le calcul du produit e^{-w} par l'intégrale dans l'équation (4) est celle fournie par Poppe et Wijers [12].

2.3 Calcul de la densité spectrale de puissance

Considérons N_S sources incohérentes deux à deux. A partir de l'équation (1), la densité spectrale de puissance reçue au microphone M_j , s'écrit :

$$DSP_j^{Mod}(f) = \sum_{i=1}^{N_S} |A_i H_{ij}|^2. \quad (7)$$

3 Méthode énergétique

Après avoir formulé le problème et précisé les notations, nous détaillerons le principe de la Méthode Énergétique (ou MÉ).

3.1 Formulation du problème

On considère une source acoustique fixe S . Cette source peut être complexe, par exemple composée d'une ou plusieurs sources ponctuelles réelles. On considère aussi N_M

microphones. Pour chacun des microphones, la densité spectrale de puissance $DSP_j^{Mes}(f)$ est calculée à partir des signaux de pression mesurés. Le but de MÉ est de modéliser S par un minimum de sources ponctuelles équivalentes omnidirectionnelles S_i , de manière à ce que les densités spectrales de puissance mesurées et simulées, $DSP_j^{Mes}(f)$ et $DSP_j^{Mod}(f)$, soient les plus proches possible.

L'espace des solutions dans lequel on recherche les sources équivalentes est noté \mathbf{E} . \mathbf{E} comprend des n-uplets e (de taille variable), précisant :

- le nombre N_S de sources équivalentes S_i ,
- les positions des sources S_i ,
- la directivité de chacune des sources S_i .

3.2 Résolution

La figure 2 montre l'algorithme de résolution retenue.

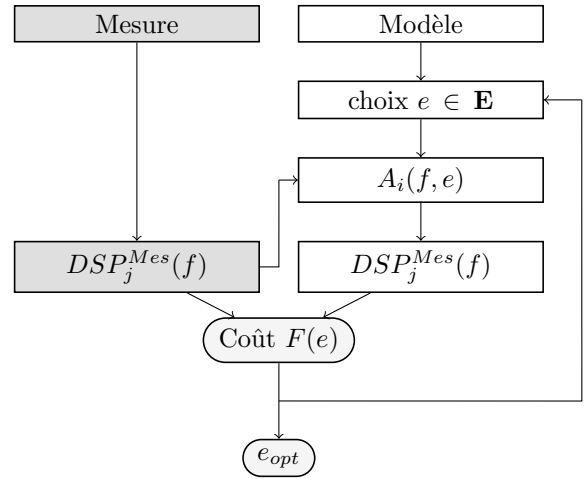


FIG. 2 – Synoptique de la méthode énergétique.

Tout d'abord, à partir des mesures, on calcule $DSP_j^{Mes}(f)$ à l'aide de périodogrammes moyennés [13]. Ensuite, on calcule pour un e donné le spectre optimisé des sources équivalentes $A_i(f, e)$. Ce calcul est explicité dans le chapitre 3.3. $DSP_j^{Mod}(f, e)$ est ensuite calculé grâce à l'équation (7).

La fonction coût, qui sert à comparer mesure et modèle, est la suivante :

$$F_{cout}(e) = \sum_f \sum_j \left| 10 \log_{10} \frac{DSP_j^{Mes}(f)}{DSP_j^{Mod}(f, e)} \right|. \quad (8)$$

Le minimum de $F_{cout}(e)$ dans l'espace des solutions \mathbf{E} est noté e_{opt} .

3.3 Optimisation des spectres

D'après la fonction coût (8), pour une configuration de sources e donnée, le spectre optimisé $|\mathbf{A}(e)|$ doit vérifier :

$$DSP^{Mes} \approx |\mathbf{H}(e)|^2 |\mathbf{A}(e)|^2. \quad (9)$$

$$|\mathbf{H}(\mathbf{e})|^2 = \begin{pmatrix} |H_{1,1}(f_1, e)|^2 & \cdots & |H_{N_S,1}(f_1, e)|^2 \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ |H_{1,N_M}(f_1, e)|^2 & \cdots & |H_{N_S,N_M}(f_1, e)|^2 \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ |H_{1,1}(f_{N_f}, e)|^2 & \cdots & |H_{N_S,1}(f_{N_f}, e)|^2 \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ |H_{1,N_M}(f_{N_f}, e)|^2 & \cdots & |H_{N_S,N_M}(f_{N_f}, e)|^2 \end{pmatrix} \quad (10)$$

avec :

$$\mathbf{DSP}^{\text{Mes}} = \begin{pmatrix} DSP_1^{\text{Mes}}(f_1) \\ \vdots \\ DSP_{N_M}^{\text{Mes}}(f_1) \\ \vdots \\ \vdots \\ DSP_1^{\text{Mes}}(f_{N_f}) \\ \vdots \\ DSP_{N_M}^{\text{Mes}}(f_{N_f}) \end{pmatrix}, \quad (11)$$

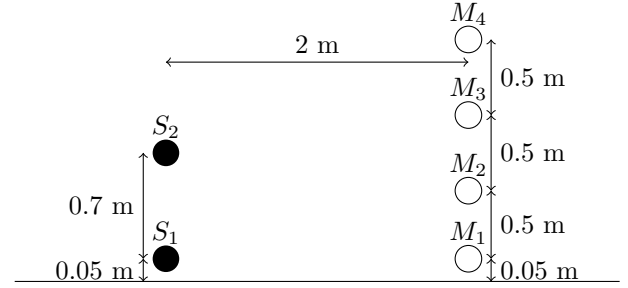


FIG. 3 – Configuration simulée.

et

$$|\mathbf{A}(\mathbf{e})|^2 = \begin{pmatrix} |A_1(f_1, e)|^2 \\ \vdots \\ |A_{N_S}(f_1, e)|^2 \\ \vdots \\ \vdots \\ |A_1(f_{N_f}, e)|^2 \\ \vdots \\ |A_{N_S}(f_{N_f}, e)|^2 \end{pmatrix}. \quad (12)$$

Enfin, l'équation (10) donne l'expression de $|\mathbf{H}(\mathbf{e})|^2$.

$\mathbf{DSP}^{\text{Mes}}$ comporte $N_M \times N_f$ lignes et 1 colonne, $|\mathbf{H}(\mathbf{e})|^2$ $N_M \times N_f$ lignes et $N_S(e) \times N_f$ colonnes, et $|\mathbf{A}(\mathbf{e})|^2$ $N_S(e) \times N_f$ lignes et 1 colonne.

L'équation (9) est résolue par l'algorithme des moindres carrés [14]. Les solutions trouvés pour $|\mathbf{A}(\mathbf{e})|^2$ peuvent malheureusement être négatives, ce qui est physiquement impossible. Des algorithmes de moindres carrés sous contraintes existent [14]. Ils sont plus compliqués et n'ont pas été implémentés. Pour l'instant, les éventuels coefficients négatifs retournés par l'algorithme des moindres carrés sont remplacés par 0.

4 Simulation numérique

Une configuration comprenant deux sources et quatre microphones est simulée.

4.1 Configuration simulée

La figure 3 présente la configuration testée. Les signaux de pression aux microphones ont été simulés

numériquement par propagation temporelle des signaux des sources. Le sol est supposé parfaitement réfléchissant. Préalablement à cette simulation, des erreurs aléatoires de ± 2.5 cm ont été introduites sur chacune des coordonnées des microphones. Ceci afin de simuler l'incertitude de positionnement de microphones lors de mesures réelles. Les spectres d'émission des sources ont été générés aléatoirement. Ils sont représentés figure 4. Enfin, un bruit blanc a été ajouté

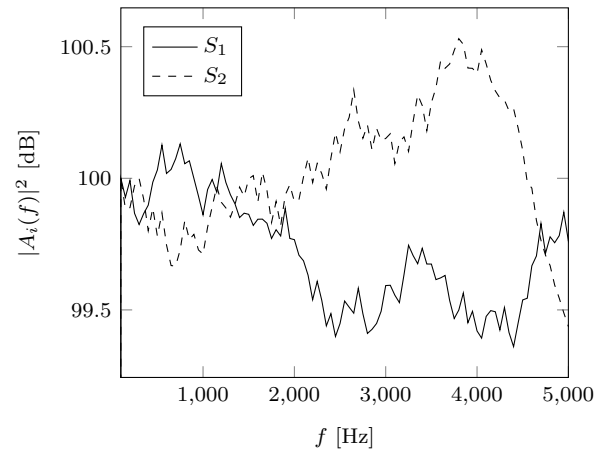


FIG. 4 – Amplitude complexe des sources.

à chaque microphone, en considérant un rapport signal sur bruit de 10 dB.

4.2 Paramètres de dépouillement

Les paramètres de dépouillement sont les suivants :

- le périodogramme moyenné est calculé sur une moyenne de 15 segments de 20 ms, avec un taux de

recouvrement de 0.5, et en considérant une fenêtre de Hann,

- . les fréquences prises en compte s'étalent entre 100 Hz et 5000 Hz avec un pas de 50 Hz (soit 99 fréquences considérées en tout),
- . la position des microphones est celle de la figure 3,
- . le modèle de propagation est le modèle de Rudnick développé chapitre 2. Pour le sol, $\sigma = 100000 \text{ kNsm}^{-4}$.

L'espace des solutions \mathbf{E} est constitué de n-uplets considérant deux sources omnidirectionnelles, toutes les deux en $x_S = 0, y_S = 2$. Seule la hauteur diffère.

- Pour S_1 , les hauteurs recherchées varient entre 0.01 m et 0.30 m, avec un pas de 0.01 m.
- Pour S_2 , les hauteurs recherchées varient entre 0.31 m et 1 m, avec un pas de 0.01 m.

\mathbf{E} comprend donc au total $30 \times 700 = 2100$ configurations.

4.3 Premiers résultats

Tout d'abord, la figure 5 représente la fonction coût. Le minimum de la fonction coût est de 0.73 dB. Il correspond exactement à la configuration avec deux sources de la figure 3. Il est à noter que MÉ retourne une seule valeur négative sur les 198 inconnues que constituent les $|A_i(f, e)|^2$.

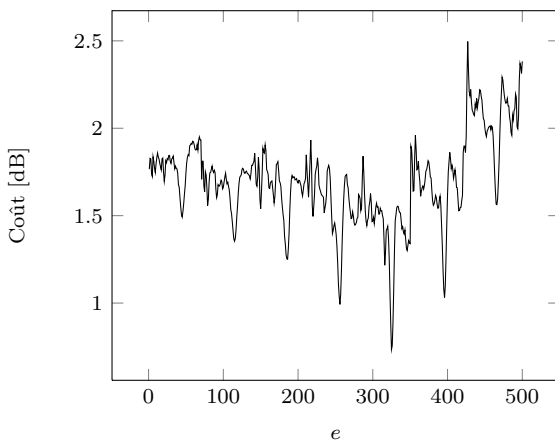


FIG. 5 – Fonction coût $F(e)$. Seule une partie de la fonction coût est représentée.

Pour juger de la qualité des résultats, la figure 6 compare les densités spectrales de puissance mesurées et modélisées au microphone M_2 . Les résultats sont satisfaisants. L'écart maximum est de 2 dB. Mais l'écart moyen est nettement plus faible : 0.5 dB.

5 Conclusion

Afin d'améliorer les modèles d'émission, une méthode inverse semi-analytique est proposée pour modéliser une source sonore par une ou plusieurs sources équivalentes omnidirectionnelles. Cette méthode, dite énergétique (MÉ), se base sur la mesure du champ sonore en quelques microphones. Elle est donc facilement déployable sur le terrain. Elle permet théoriquement

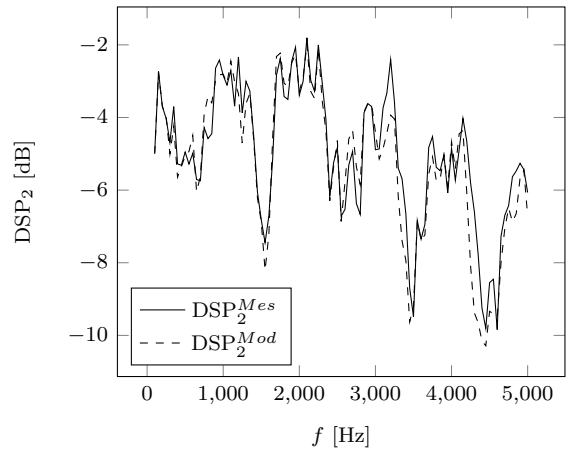


FIG. 6 – Comparaison des spectres mesurés et modélisés au microphone M_2 .

d'optimiser le nombre de sources équivalentes, leurs positions, et leurs spectres. Cette méthode, testée numériquement sur une configuration simple (2 sources et 4 microphones), donne des résultats satisfaisants. La suite du travail consiste à appliquer MÉ sur des mesures réelles, afin de modéliser des sources de transport terrestre.

Remerciements

Ce travail a été financé par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées dans le cadre de l'opération de recherche 11M061 "Pédiction du bruit en zone urbain".

Références

- [1] SETRA and al. Nouvelle méthode de prévision du bruit. *Acta Acustica united with Acustica*, soon submitted.
- [2] M.-A. Pallas, J. Lelong, and R. Chatagnon. Noise emitted by trams. part ii : development of a tram noise emission model. In *Internoise 2007, Turkey (Istanbul)*, page 10, 2007.
- [3] I. Rudnick. The propagation of an acoustic wave along a boundary. *J. Acoust. Soc. Am.*, 19 :348–357, 1947.
- [4] Chien C. F. and Soroka W. W. Calculation of sound-propagation along an impedance surface. *J. Sound Vib.*, 43(1) :9–20, 1975.
- [5] S.I. Thomasson. Reflections of waves from a point source by an impedance boundary. *J. Acoust. Soc. Am.*, 59 :780–785, 1976.
- [6] Chien C. F. and Soroka W. W. A note on the calculation of sound-propagation along an impedance surface. *J. Sound Vib.*, 69(2) :340–343, 1980.
- [7] S.I. Thomasson. A powerful asymptotic solution for sound propagation above an impedance boundary. *Acustica*, 45 :122–125, 1980.
- [8] M. Nobile and S. I. Hayek. Acoustic propagation over an impedance plane. *J. Acoust. Soc. Am.*, 78(4) :1325–1336, 1985.

- [9] K. B. Rasmussen. A note on the calculation of sound propagation over impedance jumps and screens. *J. Sound Vib.*, 84 :598–602, 1982.
- [10] T.F.W. Embleton. Outdoor sound propagation over ground with finite impedance. *J. Acoust. Soc. Am.*, 59 :267–277, 1976.
- [11] Y. Miki. Acoustical properties of fibrous absorbent materials - modifications of Delany-Bazley models -. *J. Acoust. Soc. Jpn.*, 11 :19–24, 1990.
- [12] G. P. M. Poppe and C. M. J. Wijers. More efficient computation of the complex error function. *ACM Transactions on Mathematical Software*, 1 :38–46, 1990.
- [13] J. Max and J.-L. Lacoume. *Méthodes et techniques de traitement du signal*. Dunod, France, Paris, 2000. ISBN 2-10-005332-9.
- [14] Åke Björck. *Numerical methods for least squares problems*. Siam, 1996.