

Une approche hybride pour la propagation du son en milieu extérieur complexe

Hybrid approach for complex outdoor sound propagation

François Aballea*, Maud Priour, Jérôme Defrance, Eric Premat

Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB), 24, rue Joseph Fourier, 38400 St-Martin-d'Heres, France

Reçu le 28 avril 2003 ; accepté le 2 juin 2003

Résumé

Cet article présente une nouvelle méthode hybride permettant de coupler différents modèles numériques de propagation acoustique en milieu extérieur complexe. L'objectif est de développer un outil puissant permettant de prendre en compte des topographies complexes ainsi que des profils météorologiques évolutifs. Le travail est réalisé en couplant deux modèles numériques de propagation extérieure afin d'utiliser la puissance de chacun d'entre eux en fonction de la configuration étudiée.

© 2003 Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Abstract

In this paper a new hybrid method which allows coupling between different complex outdoor sound propagation models is presented. The aim is to develop a powerful tool able to take complex topographies and range dependant meteorological profile into account. The work is achieved by coupling two outdoor propagation models and using the advantages of each of them for a given setup.

© 2003 Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Mots-clés : Approche hybride ; Méthodes des éléments de frontière (BEM) ; Équation parabolique (PE)

Keywords : Hybrid approach; Boundary element method; Parabolic equation

1. Introduction

Les nouvelles exigences réglementaires relatives au bruit des transports terrestres imposent des niveaux sonores en réception de plus en plus faibles. Ceci implique une prévision du bruit de trafic à des distances de propagation de plus en plus élevées [3]. Il devient donc nécessaire de prendre en compte de façon suffisamment fine les phénomènes couplés d'inhomogénéités atmosphériques, de reliefs de terrain et de discontinuités d'impédances. Actuellement, il n'existe aucune méthode numérique capable de prendre en compte tous ces phénomènes de façon simultanée et de mener le calcul en un temps acceptable.

Le propos de cet article est de développer une méthode hybride couplant deux modèles numériques. La méthode des

éléments de frontière (Boundary Element Method, BEM) et un modèle basé sur l'équation parabolique (Green's Fonction Parabolic Equation, GFPE) sont utilisés [9].

Dans un premier temps, le champ acoustique proche des obstacles (écrans, buttes) et des irrégularités de terrain (tranchées, remblais, écrans) est calculé à l'aide de la BEM dans le cas d'une atmosphère homogène. Dans un second temps, le champ acoustique obtenu est utilisé comme condition initiale pour la GFPE appliquée au cas de la propagation à longue distance sur un sol plan avec prise en compte des profils météorologiques évolutifs.

2. Approche théorique

2.1. La méthode des éléments de frontières (BEM)

La méthode des éléments de frontière (BEM) fut développée dans les années 60 à partir de la théorie des intégrales de

* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : f.aballea@cstb.fr (F. Aballea).

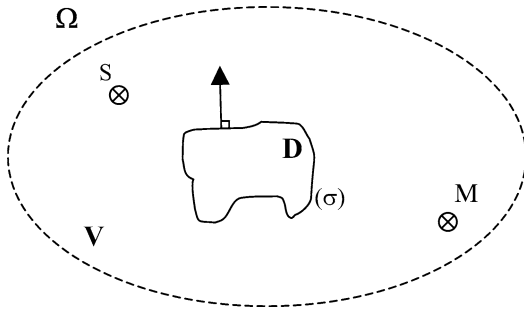


Fig. 1. Schéma général pour l'établissement de la représentation de Green.

frontières. Depuis, elle a fait l'objet de nombreuses publications. On pourra se reporter par exemple à l'ouvrage de Ciskowski et al. [1] pour plus de précisions.

La formulation directe est utilisée dans le cas qui nous intéresse. Elle repose sur l'équation d'Helmholtz dans laquelle la vitesse et la pression sont les inconnues. Le champ acoustique P est solution de l'équation d'Helmholtz :

$$(\nabla^2 + k^2)P(r, z) = f(r, z) \quad \forall (r, z) \in \Omega \quad (1)$$

où $f(r, z)$ représente la distribution des sources, k est le nombre d'onde et Ω est l'espace entourant un volume D de surface σ dont la normale est orientée vers l'extérieur (Fig. 1).

Après des développements décrits par Ciskowski et al. [1] utilisant la fonction de Green et la condition de Sommerfeld, on obtient :

$$c(r, z)P(r, z) = P_0(r, z) + \int_{\sigma} \left[\frac{\partial G}{\partial n_s}(r_0, z_0, r, z) - G(r_0, z_0, r, z) \frac{\partial P}{\partial n_s}(r, z) \right] dS \quad \forall (r, z) \in \Omega \quad (2)$$

Le coefficient c dépend de la position du récepteur. La méthode variationnelle, décrite par Jean [7,10] est alors utilisée pour résoudre l'équation.

La BEM est une puissante méthode de calcul permettant de décrire la propagation du son en milieu homogène. Le champ créé par une source peut être calculé dans tout l'espace en prenant en compte des topographies complexes.

Cette méthode présente toutefois quelques inconvénients tels que le temps de calcul qui peut devenir extrêmement important dans certains cas, notamment lors de la propagation à longue distance, ainsi que la difficulté de prendre en compte des profils de célérité quelconques [8].

2.2. La méthode de l'équation parabolique rapide (GFPE)

L'approximation parabolique fut introduite au début des années 40 pour résoudre certains problèmes liés aux ondes électromagnétiques. Plus tard, elle fut utilisée dans divers domaines tel que l'acoustique sous-marine puis fut adaptée pour la propagation atmosphérique par Gilbert et White [5].

Un champ initial connu est propagé pas à pas de la source vers le récepteur. En utilisant la convention en $e^{-i\omega t}$, l'équation d'Helmholtz en coordonnées cylindriques pour la pression acoustique P s'écrit :

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} + k(r, z)^2 \right) P(r, z) = 0 \quad (3)$$

où $k(r, z) = \omega/c(r, z)$ est le nombre d'onde et $c(r, z)$ la célérité du son.

On suppose que $kr \gg 1$ (approximation en champ lointain) et que la symétrie est azimutale. En posant $P(r, z) = (1/\sqrt{r})u(r, z)e^{jk_0 r}$ et en négligeant l'onde retour, la solution de l'Éq. (3) peut s'écrire sous la forme :

$$u(r + \Delta r) = e^{j\Delta r \sqrt{Q}} u(r) \quad (4)$$

où $Q \approx \partial^2/\partial z^2 + k^2$.

GFPE repose sur l'utilisation d'une forme spectrale de Q . Après de nombreux développements décrits dans l'article de Gilbert et al. [6], le champ de pression en un pas peut être écrit en fonction du champ au pas précédent sous la forme :

$$u(r + \Delta r, z) = \frac{1}{2\pi} \left[\int_{-\infty}^{+\infty} (U(r, k') + R(k')U(r - k')) \times e^{j\Delta r(\sqrt{k_r^2 - k'^2} - k_r)} e^{jk'z} dk' \right] + 2j\beta U(r, \beta) e^{j\Delta r(\sqrt{k_r^2 - \beta^2} - k_r)} e^{-j\beta z} \quad (5)$$

où $U(r, k) = \int_0^{+\infty} e^{-jkz'} u(r, z') dz'$ est la transformée de Fourier de $u(r, z)$ et $\beta = k_r/Z_g$.

La PE est une puissante méthode de calcul permettant de décrire la propagation du son en milieu inhomogène. Un champ initial peut ainsi être calculé en atmosphère réfractante au-dessus d'un sol impédant et ce quelle que soit la complexité du profil de célérité. En effet, la PE permet de faire varier l'impédance du sol pour chaque pas de calcul et de prendre en compte des profils de vent ainsi que de température complexes sans augmenter sensiblement les temps de calcul.

Cette méthode présente toutefois l'inconvénient d'être limitée par l'angle d'ouverture de propagation ainsi que par la difficulté de prendre en compte des topographies complexes.

3. Simulations numériques

La méthode est mise en œuvre ici dans le cas de deux configurations typiques d'infrastructures routières. A ce jour, aucun modèle numérique ne permet de traiter en un minimum de temps de tels cas, présentant à la fois une topographie complexe et des effets météorologiques.

Le premier cas étudié est un écran en T rigide (Fig. 2) [2] dont la partie supérieure est recouvert d'un absorbant de 5 cm d'épaisseur de résistivité $\sigma_{\text{absorbant}} = 30$ cgs. Le sol est rigide.

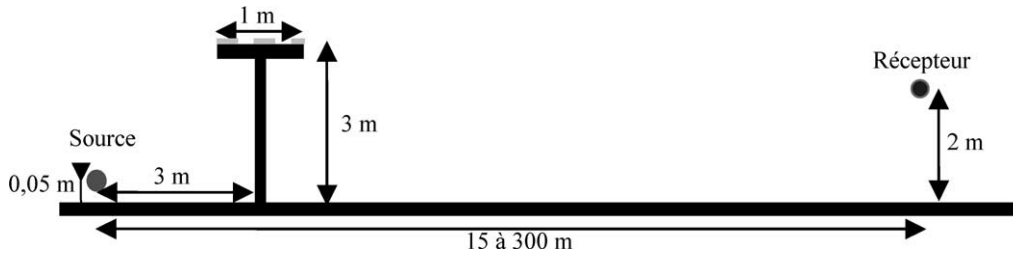


Fig. 2. Géométrie de l'écran en T.

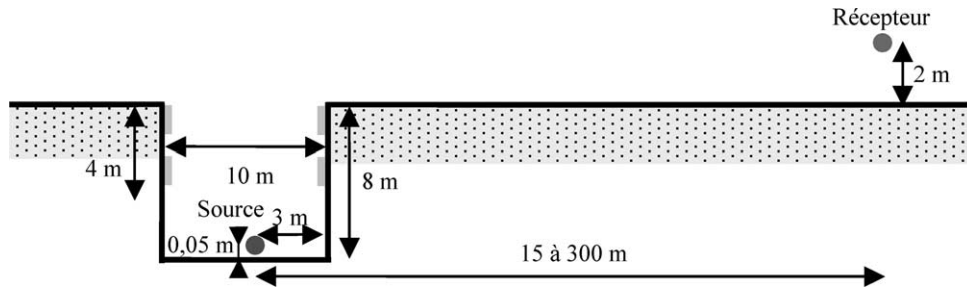


Fig. 3. Géométrie de la tranchée.

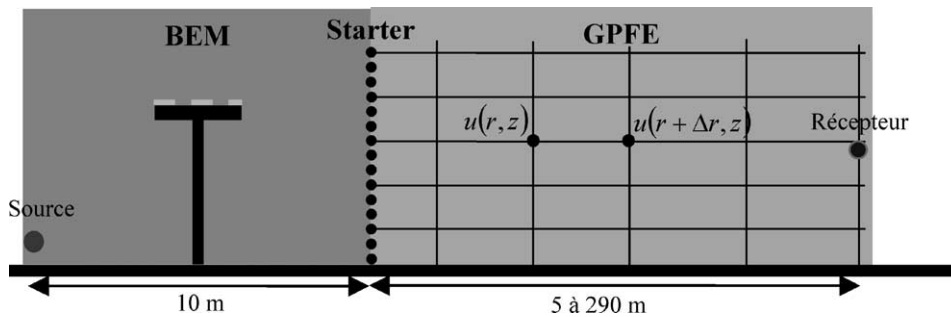


Fig. 4. Configuration du couplage.

La deuxième configuration est le cas d'une route à l'intérieur d'une tranchée encaissée dans un sol herbeux de résistivité $\sigma_{\text{sol}} = 300$ cgs (Fig. 3). De l'absorbant de 5 cm d'épaisseur et de résistivité $\sigma_{\text{absorbant}} = 30$ cgs est disposé de part et d'autre sur la partie haute de la tranchée. Le fond de la tranchée est quant à lui rigide.

Pour chacune des configurations une source ponctuelle omnidirectionnelle est placée à 5 cm au dessus du sol. Une série de récepteurs est placée de 15 à 300 m de la source et à 2 m au dessus du sol. Les impédances sont calculées à l'aide du modèle de Delany et Bazley [4].

4. Résultats

Les Figs. 5 et 6 représentent, pour une fréquence de 1000 Hz, les atténuations relatives au champ libre en fonction de la distance source-récepteur pour l'écran et la tranchée. Les résultats sont présentés en milieu homogène ainsi qu'en présence d'un profil de vitesse du son logarithmique.

La pression acoustique est calculée en milieu homogène à 10 m de la source à l'aide de la BEM. Le champ ainsi

obtenu est alors introduit comme champ initial (starter) dans la GPFE que l'on utilise ensuite pour la propagation en milieu inhomogène jusqu'aux récepteurs (Fig. 4). Les effets météorologiques sont représentés par un profil de célérité logarithmique de la forme : $C(z) = C_0 + \ln(1 + z/z_0)$ où $C_0 = 340 \text{ m s}^{-1}$ et $z_0 = 0,1 \text{ m}$.

Avant d'effectuer les calculs en milieu inhomogène, les résultats ont été validés dans les cas d'un milieu homogène. Ces résultats ont été confrontés aux calculs de référence effectués à l'aide de la BEM. On peut constater dans ce cas une très bonne concordance pour les deux configurations (Figs. 2 et 3) entre la méthode hybride et la BEM.

On peut noter l'importance des phénomènes météorologiques lors de la propagation longue distance. Les résultats Figs. 5 et 6 montrent que, dans certains cas, les effets météorologiques peuvent être négligés lorsque l'on se trouve proche de la source. Ceci n'est plus vrai loin de la source. Fig. 5, à 200 m, on peut constater que l'atténuation par rapport au champ libre présente une différence de 20 dB entre le cas avec et sans météo.

Dans certains cas d'étude en milieu homogène, la méthode hybride s'avère être bien moins coûteuse en temps de

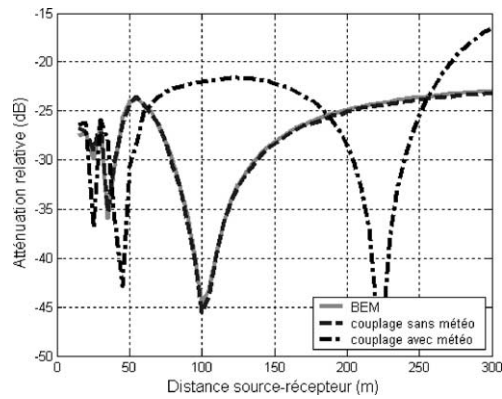


Fig. 5. Atténuation par rapport au champ libre en fonction de la distance à la source pour une fréquence de 1000 Hz. Cas de l'écran en T (Fig. 2).

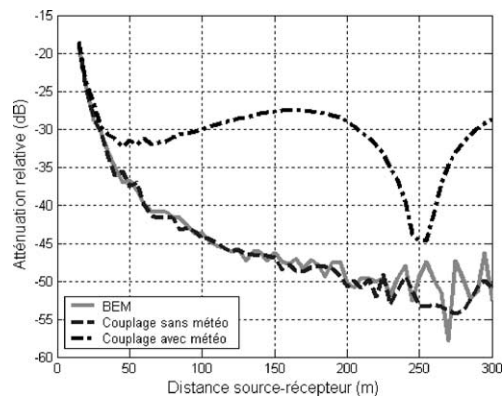


Fig. 6. Atténuation par rapport au champ libre en fonction de la distance à la source pour une fréquence de 1000 Hz. Cas de la tranchée (Fig. 3).

calcul que la BEM. Les calculs ont été effectués sur un ordinateur Pentium III 700 MHz en plaçant 1 récepteur tous les 5 m entre 15 et 300 m de la source. Même si, pour l'étude de l'écran en T, les temps de calculs sont sensiblement identiques, la méthode hybride est bien plus rapide dans le cas de la tranchée. Alors que la BEM nécessite un peu plus d'une heure de calcul, la même configuration est traitée en 2 à 3 minutes à l'aide de la méthode hybride.

5. Conclusions

Ce travail a permis de développer un modèle hybride associant deux méthodes numériques : la BEM et la GFPE. Les résultats obtenus sont très prometteurs. En milieu homogène, l'accord observé entre le couplage et la BEM est très satisfaisant. Cette méthode permet de réduire considérablement les temps de calcul de certaines configurations. Cette nouvelle approche rend également possible la modélisation de cas plus réalistes, couplant topographies complexes et profils météorologiques variables, se rapprochant des situations rencontrées couramment dans l'étude du bruit des transports terrestres.

Références

- [1] R.D. Ciskowski, C.A. Brebbia, *Boundary Element Methods in Acoustics*, Elsevier, London, 1991.
- [2] J. Defrance, Ph. Jean, Y. Gabillet, Acoustic performance of a T-shaped barrier cap, in: *Euro-Noise'98*, Munchen, Germany, 4–7 October, 1998, pp. 1123–1126.
- [3] J. Defrance, Y. Gabillet, A new analytical method for the calculation of outdoor noise propagation, *Appl. Acoustics* 57 (2) (1999) 109–127.
- [4] M.E. Delany, E.N. Bazley, Acoustical properties of fibrous absorbent materials, *Appl. Acoustics* 3 (1970) 105–116.
- [5] K.E. Gilbert, M.J. White, Application of the parabolic equation to sound propagation in a refracting atmosphere, *J. Acoust. Soc. Am.* 85 (1989) 630–637.
- [6] K.E. Gilbert, X. Di, A fast Green's function method for one-way sound propagation in the atmosphere, *J. Acoust. Soc. Am.* 94 (4) (1993) 2343–2352.
- [7] P. Jean, A variational approach for the study of outdoor sound propagation and application to railway noise, *J. Sound. Vibration* 212 (2) (1998) 275–294.
- [8] E. Premat, Y. Gabillet, A new boundary-element method for predicting outdoor sound propagation an application to the case of a sound barrier in the presence of downward refraction, *J. Acoust. Soc. Am.* 108 (6) (2000) 2775–2783.
- [9] E. Premat, J. Defrance, F. Aballea, M. Priour, A hybrid GFPE–BEM approach for complex outdoor sound propagation, in: *10th International Symposium on Long Range Sound Propagation*, Grenoble, France, 12–13 September, 2002.
- [10] P. Jean, J. Defrance, Y. Gabillet, The importance of source type on the assessment of noise barriers, *J. Sound Vibration* 226 (2) (1999) 201–216.