

Modélisation de la propagation acoustique en milieu extérieur par une approche temporelle : validation expérimentale sur site

Time-domain simulations of outdoor sound propagation : experimental validation on a complex site

Didier Dragna, Philippe Blanc-Benon

Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique, UMR CNRS 5509
École Centrale de Lyon
36, avenue Guy de Collongue
69134 Écully CEDEX
France

E-mail : didier.dragna@ec-lyon.fr et philippe.blanc-benon@ec-lyon.fr

Franck Poisson

SNCF
Direction de l'Innovation et de la Recherche
40, avenue des terroirs de France
75611 Paris CEDEX 12
France

E-mail : franck.poisson@sncf.fr

Résumé

Les simulations numériques de propagation acoustique en milieu extérieur par une approche temporelle ont démontré leur intérêt pour traiter des situations complexes. En effet, la plupart des phénomènes physiques jouant un rôle sur la propagation acoustique peuvent être pris en compte. Ainsi, des études récentes ont montré que l'impédance de surface des sols ainsi que la topographie peuvent être modélisées dans le domaine temporel avec un coût numérique peu important. Dans ce travail, les résultats d'une campagne de mesures réalisée sur le site ferroviaire de la Veuve près de Reims en mai 2010 sont comparés à ceux obtenus avec un code de résolution des équations d'Euler linéarisées dans le domaine temporel. La topographie du site ainsi que les impédances de surface ont été déterminées expérimentalement. Des mesures météorologiques ont aussi été effectuées. Des tirs de pistolet à blanc sont utilisés afin d'avoir une source acoustique impulsionnelle. Les différents paramètres sont utilisés comme données d'entrée du modèle numérique de propagation. Les comparaisons sont effectuées dans le domaine fréquentiel et dans le domaine temporel.

Abstract

Simulations of outdoor sound propagation using a time-domain approach have proved to be efficient to deal with complex situations. Indeed, the main effects on acoustic propagation can be taken into account. In particular, recent works have shown that impedance of the ground surfaces and topography can be modelled efficiently in time domain. In this paper, results from an experimental campaign carried out in la Veuve near Reims in may 2010 are compared to those obtained with a finite-difference time-domain (FDTD) solver of the linearized Euler equations. During the experiments, the topography of the site and the different surface impedances have been determined. Meteorological measurements have also been performed. A blank pistol is used to obtain impulsive signals. The different parameters are used as input into the FDTD solver. Comparisons are realized in both the frequency domain and in the time domain.

L

es problèmes de propagation acoustique en milieu extérieur sont souvent complexes. En effet, de nombreux phénomènes physiques, qui peuvent être reliés au milieu de propagation et aux caractéristiques des frontières du domaine, sont mis en jeu. Les simulations numériques s'avèrent ainsi être des outils intéressants pour la modélisation de la propagation acoustique sur site réel. En particulier, les modèles de propagation dans le domaine temporel font actuellement parties des sujets d'étude majeurs dans le domaine [1, 2, 3, 4].

Une campagne de mesure a été menée en mai 2010 sur un site ferroviaire avec l'Agence d'Essais Ferroviaires (AEF). Une source impulsionnelle a été utilisée et des récepteurs ont été placés à différentes distances le long d'une ligne de propagation.

Dans cette étude, les formes d'onde et les niveaux de pression obtenus expérimentalement sont comparés à ceux déduits d'un modèle de propagation dans le domaine temporel.

Dans le modèle de propagation, les équations d'Euler linéarisées sont résolues avec des méthodes de différences finies. Le modèle peut prendre en compte :

- des surfaces impédantes (sous l'hypothèse de la réaction locale),
- des surfaces non-planes,
- des profils moyens de vent et de température.

Une condition limite d'impédance dans le domaine temporel [5] est appliquée au niveau du sol. Des techniques de convolution récursive sont employées afin de réduire le coût numérique.

Pour modéliser des sols non-plans, des coordonnées curvilignes sont introduites. Le modèle de propagation a été validé à l'aide de différents cas tests (voir [6] et [7]). Dans une première partie, le site de mesure est décrit. Les paramètres des profils de vent et de température, des impédances de surface et de la topographie, utilisés comme données d'entrée du modèle, sont ensuite présentés. Dans une seconde partie, des comparaisons sont réalisées entre les formes d'onde et entre les niveaux de pressions obtenus expérimentalement et déterminés avec le modèle de propagation.

Modélisation du site

La campagne de mesure a été réalisée sur un site ferroviaire près de Reims en mai 2010. La ligne de propagation considérée est perpendiculaire à la direction de la voie ferroviaire. Elle est représentée sur les figures 1 et 2. L'origine du système de coordonnées est prise au centre de la voie, au sommet du rail et sur la ligne de propagation (voir Fig. 1). L'axe x correspond ainsi à la ligne de propagation. L'axe y est parallèle à la voie et l'axe z est vertical.

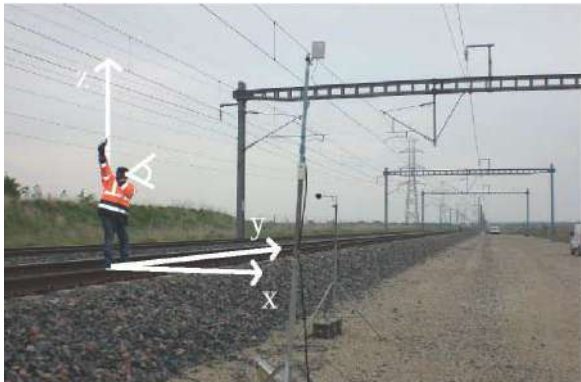


Fig. 1 : Positionnement de la source sur le site de mesure
Position of the acoustic source on the experimental site



Fig. 2 : Ligne de propagation vue depuis la source
Propagation line considered during the experiments seen from the source

On s'intéressera ici aux trois récepteurs situés en $x = 7,5$ m, $x = 25$ m et $x = 100$ m le long de la ligne de propagation.

Topographie

La topographie du site a été mesurée le long de la ligne de propagation. Dans le modèle de propagation, le profil 2D implémenté du terrain doit être suffisamment « lisse ». Ainsi, une approximation par morceaux par des polynômes de degré 2 est réalisée. Les coefficients polynômiaux sont donnés dans [7].

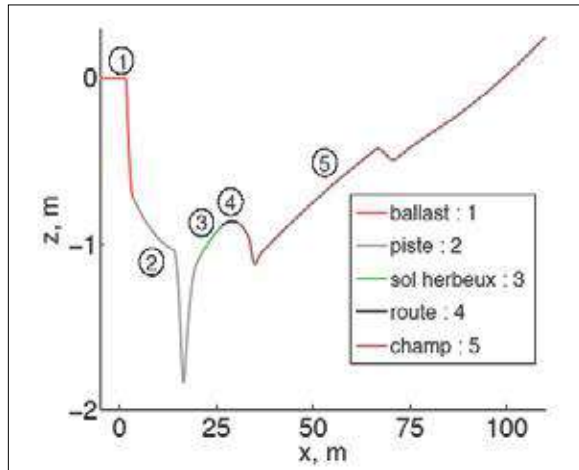


Fig. 3 : Topographie du site implémentée dans le code de résolution. Les différentes couleurs correspondent aux types de sols rencontrés
Topography of the experimental site implemented in the FDTD solver. The colors correspond to the different types of ground

Le profil du terrain est représenté en fonction de la distance de propagation sur la figure 3. Il est relativement plat sauf :

- au niveau de la couche de ballast,
- près du fossé situé en $x = 20$ m. La profondeur du fossé est d'environ 0,8 m.

Impédances de surface

	Miki			Hamet et Bérengier
	piste	sol herbeux	champ	ballast
σ_0 , kPa.s.m ⁻²	600	180	170	0,4
d , m	0,006	0,018	0,022	∞
q	-			1,4
Ω				0,6

Tabl. 1 : Coefficients des modèles d'impédance de surface
Coefficients of the surface impedance models

Cinq types de sol ont été caractérisés sur la ligne de propagation. Ils sont représentés par différentes couleurs sur la figure 3. Afin d'obtenir un modèle d'impédance de surface pour chaque sol, des mesures in situ avec la méthode dite de la fonction de transfert ont été réalisées par l'Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux (IFSTTAR).

Un bon accord a pu être obtenu pour la piste, le sol herbeux et le champ en utilisant un modèle d'impédance à un paramètre, i.e. le modèle de Miki [8]. La route a été modélisée par un sol parfaitement réfléchissant. Enfin, il n'a pas été possible d'obtenir à partir des mesures in situ un accord acceptable pour le ballast. En effet, il était difficile de s'affranchir des réflexions sur les rails et sur la piste et de prendre en compte de façon convenable l'effet d'épaisseur. Des mesures complémentaires ont été réalisées sur le site de Bouguenais de l'IFSTTAR. Un bon accord a ainsi pu être obtenu avec le modèle d'impédance d'Hamet et Bérenghier [9].

Les valeurs de :

- la résistivité effective au passage de l'air σ_0 ,
- l'épaisseur effective d ,
- la tortuosité effective q ,
- la porosité effective Ω

sont données pour les différents sols dans le tableau 1.

Conditions météorologiques

Un mât météorologique a été installé sur le site de mesure à une distance $x = 125$ m près de la ligne de propagation. Trois anémomètres à hélice et trois capteurs de température ont été montés sur le mât à des hauteurs de 1 m, 3 m et 10 m. Un capteur d'humidité a aussi été placé à une hauteur de 3 m.

Enfin, un anémomètre sonique a été installé à une hauteur de 10 m.

Dans le tableau 2 sont consignées les valeurs de :

- la pression atmosphérique P_0 ,
- l'humidité relative r_h ,
- la température T_0 ,
- la célérité du son c ,
- la vitesse du vent V_0 ,
- la direction du vent par rapport à la ligne de propagation.

Les valeurs données pour V_0 et θ sont des valeurs moyennées sur une minute.

z , m	P_0 , hPa	r_h , %	T_0 , °C	ρ_0 , kg.m ⁻³	c , m.s ⁻¹	V_0 , m.s ⁻¹	θ , °
1m	991	82	6,1	1,24	335,5	3,3	297
3m			6,4	1,24		3,5	304
10m			6,7	1,24		4,0	315

Tabl. 2 : Valeurs mesurées de différents paramètres météorologiques
Measured values of meteorological conditions

Les profils verticaux de vent et de température sont obtenus avec la théorie de la similitude de Monin-Obukhov. Bien que cette théorie ne soit pas valable pour des sols inhomogènes et non-plans, elle permet d'obtenir des profils verticaux réalistes à partir d'un faible nombre de mesures. Les coefficients des profils sont ici déterminés en utilisant une méthode d'optimisation proposée par Cotté [10]. Les profils verticaux obtenus sont représentés sur la figure 4. Les mesures ont été effectuées le matin et les profils sont alors caractéristiques d'une atmosphère instable.

Un modèle de gaz réel [11] est utilisé afin d'obtenir le profil de célérité du son à partir des mesures. Ce profil est tracé en fonction de la hauteur sur la figure 4.

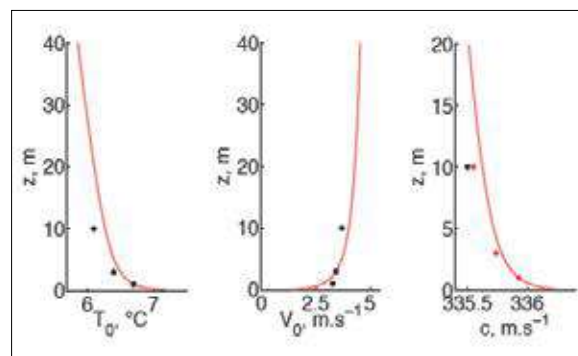


Fig. 4 : Profils verticaux (gauche) de la température, (milieu) de la vitesse du vent et (droite) de la célérité du son. Les valeurs mesurées sont représentées par des points noirs et les profils obtenus en appliquant la théorie de la similitude de Monin-Obukhov par des lignes rouges. Les points rouges correspondent aux valeurs de la célérité du son déduites des mesures et du modèle de gaz réel.

Vertical profiles of (left) temperature, (middle) wind speed and (right) sound speed. The black points correspond to measurements, and the red curves have been obtained by applying Monin-Obukhov similarity theory. Red points for sound speed profiles correspond to values of sound speed deduced from the temperature measurements and from the real gas model.

On peut remarquer que pour une hauteur de 10 m, la valeur obtenue pour c est très proche de la valeur mesurée avec l'anémomètre sonique. Dans cette étude, l'atténuation due à l'absorption atmosphérique est négligée. En effet, la valeur maximale de l'atténuation est égale à -2 dB pour le récepteur à $x = 100$ m et pour une fréquence $f = 3\,000$ Hz.

Source impulsive

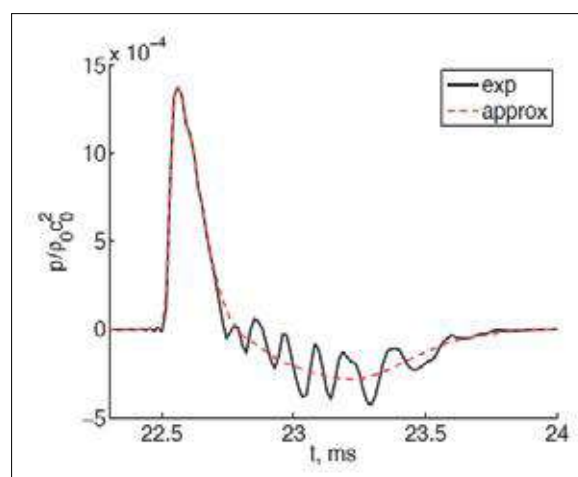


Fig. 5 : Partie d'une forme d'onde obtenue au récepteur situé en $x = 7,5$ m, correspondant à l'onde directe. Les lignes noires et rouges correspondent respectivement à la forme d'onde mesurée et à son approximation
Example of a waveform obtained at the receiver at $x = 7,5$ m. The black and red lines correspond respectively to measurements and to the approximation

Des tirs de pistolets à blanc constituent ici la source acoustique (voir Fig. 1). Le pistolet a été placé à différentes hauteurs mais on ne considère par la suite que la hauteur $zS = 1$ m.

Une série de trois tirs a été effectuée. La directivité de la source n'a pas été mesurée et on supposera que celle-ci est monopolaire. La puissance de la source $S_{\text{exp}}(f)$ peut alors être calculée à partir des formes d'onde. Pour cela, on considère la forme d'onde à $x = 7,5$ m ; la forme d'onde de l'onde directe peut alors être obtenue en fenêtrant le signal.

Dans le domaine fréquentiel, l'onde directe p_D peut s'écrire comme le produit de la fonction de Green en champ libre et de la puissance de la source :

$$p_D(\omega) = -S_{\text{exp}}(\omega) \frac{\exp(ik_{\text{eff}}R)}{4\pi R}, \quad (1)$$

où $\omega = 2\pi f$ est la pulsation, R la distance source-récepteur et avec $k_{\text{eff}} = \omega/c_{\text{eff}}$. Le terme c_{eff} correspond à la célérité effective du son. La partie correspondant à l'onde directe d'une forme d'onde obtenue expérimentalement est représentée sur la figure 5. La puissance de la source correspondante est tracée en fonction de la fréquence sur la figure 6. La puissance de la source obtenue agit comme un filtre passe-bande. Le maximum de celle-ci est atteint à une fréquence proche de 900 Hz. On peut aussi noter que le contenu fréquentiel de la source est important jusqu'à 10 kHz environ. Dans la suite, les comparaisons ne seront effectuées que jusqu'à une fréquence de 3 kHz.

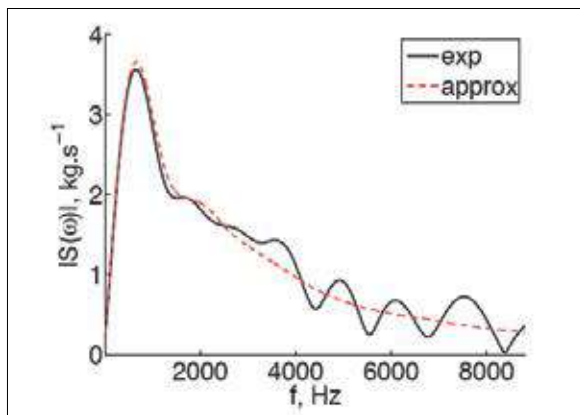


Fig. 6 : Puissance de la source en fonction de la fréquence obtenue (en ligne rouge) à partir de la forme d'onde expérimentale et (en ligne noire) à partir de son approximation
Source strength versus frequency. The black and red lines correspond respectively to measurements and to the approximation

Pendant la phase de décompression, la forme d'onde présente quelques oscillations. Afin de ne pas prendre en compte celles-ci, une approximation polynômiale par morceaux de la forme d'onde est utilisée dans la suite (voir Fig. 5 et 6) [7].

Comparaison avec des résultats d'une simulation numérique

Description du modèle de propagation

Les équations d'Euler linéarisées sont résolues dans le domaine temporel par des méthodes de type différences finies, appelées FDTD pour Finite-Difference Time-Domain.

La condition limite d'impédance est implémentée à l'aide d'une technique de convolution récursive [5].

La topographie est prise en compte en utilisant des coordonnées curvilignes [12,6]. Les différentes méthodes numériques employées sont décrites en détail dans [5] et [13]. Puisque la géométrie est invariante dans la direction y , la simulation numérique est réalisée pour une configuration 2-D. Les coordonnées curvilignes sont ici appelées (ξ, η) . Les équations de passage des coordonnées curvilignes vers les coordonnées courantes s'écrivent :

$$\begin{aligned} x &= \xi, \\ z &= \eta + H(x) = \eta + H(\xi), \end{aligned} \quad (2)$$

où H est le profil du terrain, représenté en fonction de x sur la figure 3. Le domaine de calcul contient 11 000 points dans la direction ξ et 1 501 points dans la direction η . Le maillage est uniforme avec un pas spatial $\Delta\xi = \Delta\eta = 0,01$ m. Le nombre CFL défini par $\text{CFL} = c\Delta t/\Delta x$ est fixé à 0,5. Environ 22 000 itérations temporelles sont réalisées. Le calcul est effectué sur une machine vectorielle NEC SX-8 et nécessite 8 heures CPU.

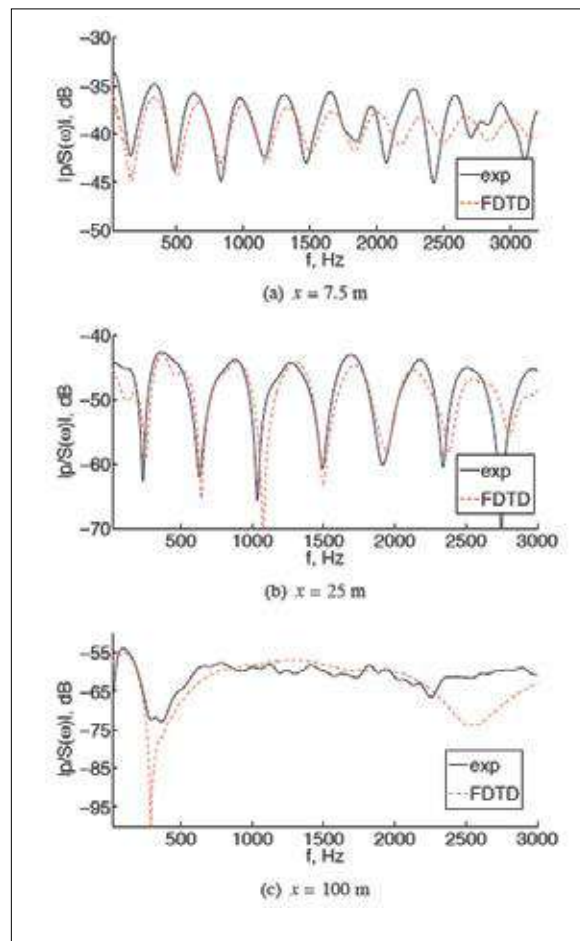


Fig. 7 : Niveaux de pression normalisés par la puissance de la source pour les récepteurs situés en (a) $x = 7,5$ m, (b) $x = 25$ m et (c) $x = 100$ m. La hauteur de la source est $z_s = 1$ m. - mesure et - - simulation
Sound pressure levels normalized by the source strength at receivers located at (a) $x = 7,5$ m, (b) $x = 25$ m and (c) $x = 100$ m. The height of the source is $z_s = 1$ m. - experiment and - - FDTD

Dans les simulations numériques, la source acoustique est un pulse gaussien. Le terme de source de masse s'écrit :

$$Q(x, z, t) = \exp\left(-\frac{x^2 + (z - z_S)^2}{B^2}\right) \delta(t), \quad (3)$$

avec $B = 0,06$ m. La puissance de la source correspondante, notée S_{FDTD} , s'écrit [13]:

$$S_{\text{FDTD}}(\omega) = ik_0 \pi B^2 \exp(-k_0 B^2 / 4). \quad (4)$$

Le rapport $(p/S)_{\text{FDTD}}$ est déterminé à partir des résultats de la simulation numérique et peut être identifié à la fonction de Green du problème pour une géométrie 2-D. Une correction doit être appliquée afin de prendre en compte la divergence sphérique. Suivant les travaux de Parakkal *et al.* [14], la pression acoustique pour une géométrie 3-D invariante dans la direction y p_{3D} est reliée à la pression acoustique pour une géométrie 2-D p^{2D} par :

$$p^{3D}(x, y, z) = p^{2D}(x, z) \sqrt{\frac{k_0}{2\pi i x}} \exp\left(\frac{ik_0 y^2}{2x}\right). \quad (5)$$

Les comparaisons dans le domaine fréquentiel sont réalisées sur la quantité p_{3D}/S . Pour les comparaisons dans le domaine temporel, le rapport $(p_{3D}/S)_{\text{FDTD}}$ est multiplié par la puissance de la source S_{exp} , et les formes d'onde « numériques » sont alors obtenues par une transformée de Fourier inverse.

Enfin, on peut noter que les mesures acoustiques aux différents récepteurs sont synchrones. Néanmoins, le temps auquel le tir a été effectué n'est pas connu. Pour la comparaison avec les résultats de la simulation numérique, l'origine des temps est choisie de manière à ce que le temps d'arrivée de l'onde directe au récepteur à $x = 7,5$ m soit le même pour les résultats expérimentaux et numériques.

Comparaison des résultats

Les niveaux de pression normalisés obtenus aux trois récepteurs avec les mesures et avec la simulation numérique sont tracés sur la figure 7. L'accord est globalement bon. Des écarts peuvent néanmoins être observés pour des fréquences supérieures à 2 000 Hz.

Les formes d'onde sont représentées sur la figure 8. Au récepteur à $x = 7,5$ m, la forme d'onde obtenue avec la simulation numérique est similaire à la forme d'onde expérimentale. On peut notamment remarquer que la partie des formes d'onde correspondant à l'onde réfléchie est en bon accord. Au récepteur à $x = 25$ m, une bonne correspondance est, là encore, trouvée. En particulier, la contribution avec un temps d'arrivée égal à $t = 80$ ms qui correspond à l'onde diffractée par le fossé à $x = 20$ m est retrouvée. Néanmoins, on peut observer un décalage d'environ $\Delta t = 0,5$ ms entre les formes d'ondes. Celui-ci peut être dû à une erreur sur le positionnement de la source et/ou du récepteur dont l'ordre de grandeur est alors égal à $\Delta x = c_0 \Delta t = 0,2$ m. L'erreur relative sur le temps d'arrivée reste cependant inférieure à 1 %. Au récepteur à $x = 100$ m, le décalage temporel est plus important $\Delta t = 7$ ms. L'erreur relative est cette fois égale à environ 2,5 %.

Néanmoins, un bon accord peut être observé sur l'allure des formes d'onde.

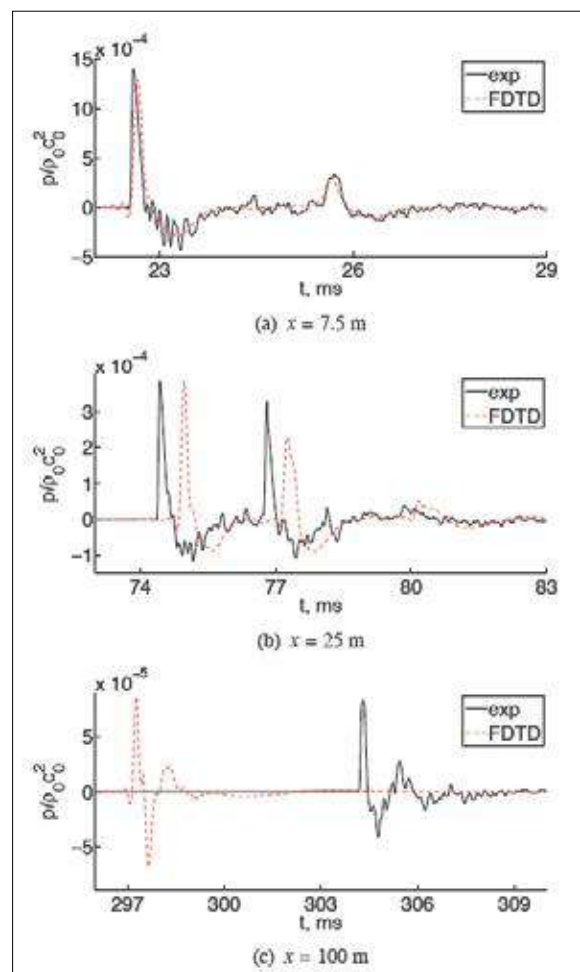


Fig. 8 : Formes d'onde de pression aux récepteurs situés (a) en $x = 7,5$ m, (b) $x = 25$ m et (c) $x = 100$ m. La hauteur de la source est de $z_S = 1$ m. - mesure et - - simulation
Pressure waveforms at receivers located at (a) $x = 7,5$ m, (b) $x = 25$ m and (c) $x = 100$ m. The height of the source is $z_S = 1$ m. - experiment and - - FDTD

Conclusion

Un modèle de propagation acoustique dans le domaine temporel a été développé et permet de prendre en compte les principaux phénomènes physiques. Dans cette étude, des résultats expérimentaux ont été comparés à ceux obtenus avec le modèle. Dans le domaine temporel, l'allure des formes d'onde aux différents récepteurs est similaire. Cependant, un décalage sur les temps d'arrivée a pu être observé et peut être relié à des incertitudes de mesure, notamment sur le positionnement de la source et des récepteurs. Dans le domaine fréquentiel, un bon accord a pu être obtenu.

Pour des applications réalistes dans le domaine du bruit des transports, il est nécessaire de modéliser des sources plus complexes. Ainsi, les travaux futurs viseront à prendre en compte des sources en mouvement, qui pourront ensuite être implémentées sur le site étudié.

Remerciements

Les auteurs remercient très chaleureusement Selim Bellaj, Michel Leterrier et Sylvain Bossier de l'AEF ainsi que Benoît Gauvreau, Philippe L'Hermite et Rémi Rouffaud de l'IFSTTAR pour avoir réalisé les mesures d'impédance de surface. Ces travaux ont bénéficié d'un accès aux moyens de calcul de l'IDRIS au travers de l'allocation de ressources 2011-022203 attribuée par GENCI (Grand équipement National de Calcul Intensif).

Références bibliographiques

- [1] E. M. Salomons, R. Blumrich, D. Heimann, "Eulerian time-domain model for sound propagation over a finite-impedance ground surface. Comparison with frequency-domain models", *Acta Acustica United with Acustica* 88, 483-492 (2002)
- [2] V. E. Ostashev, D. K. Wilson, L. Liu, D. F. Aldridge, N. P. Symons, D. Marlin, "Equations for finite-difference, time-domain simulation of sound propagation in moving inhomogeneous media and numerical implementation", *J. Acoust. Soc. Am.* 117(2), 503-517 (2005)
- [3] B. Cotté, Ph. Blanc-Benon, "Time-domain simulations of sound propagation in a stratified atmosphere over an impedance ground", *J. Acoust. Soc. Am.* 125(5), EL 202-207 (2009)
- [4] L. Ehrhardt, S. Cheinet, "Développement et évaluation d'un code de propagation acoustique en domaine temporel", 10ème Congrès Français d'Acoustique, Lyon (2010)
- [5] B. Cotté, Ph. Blanc-Benon, C. Bogey, F. Poisson, "Time-domain impedance boundary conditions for simulations of outdoor sound propagation", *AIAA J.* 47(10), 2391-2403 (2009)
- [6] D. Dagna, Ph. Blanc-Benon, F. Poisson, "Effects of topography in time-domain simulations of outdoor sound propagation", Sixteenth AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Stockholm, Suède, AIAA Paper 2010-3758 (2010)
- [7] D. Dagna, "Modélisation par une approche temporelle de la propagation acoustique en milieu extérieur : traitement de frontières complexes et validation sur site ferroviaire", thèse de doctorat, école Centrale de Lyon n.2011-35 (2011)
- [8] Y. Miki, "Acoustical properties of porous materials - modifications of Delany-Bazley models", *J. Acoust. Soc. Jpn.* 11(1), 19-24 (1990)
- [9] M. Bérengier, M. R. Stinson, G. A. Daigle, J.-F. Hamet, "Porous road pavement: Acoustical characterization and propagation effects", *J. Acoust. Soc. Am.* 101(1), 155-162 (1997)
- [10] B. Cotté, "Propagation acoustique en milieu extérieur complexe : problème spécifiques au ferroviaire dans le contexte des trains à grande vitesse", thèse de doctorat, école Centrale de Lyon n.2008-19 (2008)
- [11] O. Cramer, "The variation of the specific heat ratio and the speed of sound in air with temperature, pressure, humidity, and CO concentration", *J. Acoust. Soc. Am.* 93(5), 2510-2516 (1993)
- [12] O. Marsden, C. Bogey, C. Bailly, "High-order curvilinear simulations of flows around non-Cartesian bodies", *J. Comp. Acoust.* 13 (4), 731-748 (2005)
- [13] D. Dagna, B. Cotté, Ph. Blanc-Benon, F. Poisson, "Time-domain simulations of outdoor sound propagation with suitable impedance boundary conditions", *AIAA J.* 49(7), 1420-1428 (2011)
- [14] S. Parakkal, K. E. Gilbert, X. Di, H. E. Bass, "A generalized polar coordinate method for sound propagation over large-scale irregular terrain", *J. Acoust. Soc. Am.* 128(5), 2573-2580 (2010)

