

CFA/VISHNO 2016

**Etude paramétrique numérique de la propagation
acoustique en forêt**

A. Chopard^a, D. Ecotière^a, G. Dutilleux^a, P. Chobeau^b et J. Picaut^c

^aCerema, Laboratoire Régional de Strasbourg, 11 rue Jean Mentelin, 67000 Strasbourg,
France

^bAalto University, Dept. of Computer Science, Otaniementie 17, FI-02150 Espoo,
Finlande

^cIfsttar, Centre de Nantes, Route de Bouaye, CS 4, 44344 Bouguenais Cedex, France
david.ecotiere@cerema.fr



LE MANS

En acoustique de l'environnement, les milieux boisés peuvent présenter divers intérêts aussi bien en tant qu'obstacle potentiel à la propagation sonore du bruit de transport terrestres, qu'en tant que 'zones calmes' qu'il conviendrait de protéger. Les modèles d'ingénierie actuels ne prennent pas en compte ce type de milieu, et les travaux de recherche en cours visent à mieux connaître le comportement de ces milieux vis à vis de la propagation. D'un point de vue physique, la diffusion multiple par les arbres, ainsi que la nature du sol, font partie des phénomènes acoustiques pouvant influencer la propagation dans ce type de milieu. Le travail présenté porte sur l'influence de différents paramètres liés au milieu boisé (densité des arbres, diamètre des troncs, épaisseur de forêt, structure spatiale des arbres) sur la propagation acoustique. L'étude paramétrique est basée sur des calculs de propagation réalisés à l'aide de la méthode TLM, ainsi que sur des modèles permettant d'obtenir des structures spatiales des arbres réalistes à l'aide de modèles de type 'point-process'. Les résultats indiquent en particulier que dans la limite fréquentielle de l'étude (1 kHz), il n'est pas utile de connaître la structure spatiale et les caractéristiques des arbres (diamètres des troncs par exemple) de façon très précise, et que des représentations assez grossières suffisent pour obtenir des résultats pertinents.

1 Introduction

Les milieux boisés peuvent présenter divers intérêts pour l'acousticien de l'environnement, aussi bien en tant qu'obstacle potentiel à la propagation sonore du bruit de transports terrestres, qu'en tant que 'zones calmes' qu'il conviendrait de protéger. Les modèles d'ingénierie actuels [1][2] ne prennent pas en compte ce type de milieu, et les travaux de recherche en cours visent à mieux connaître le comportement de ces milieux vis à vis de la propagation acoustique. Avec les développements récents des méthodes numériques, la propagation du bruit en forêt peut être modélisée en tenant compte de nombreux phénomènes physiques tels que les effets de sol, la diffusion multiple sur les arbres, ou bien encore les effets météorologiques [3][4][5][6].

Dans le cadre du bruit des transports et des fréquences considérées (< 1.5 kHz par exemple pour le bruit routier), la forêt peut être assimilée à un réseau de cylindres verticaux disposés aléatoirement [5] ou régulièrement [6]. La diffusion multiple par les troncs, ainsi que la nature du sol, font partie des phénomènes acoustiques pouvant influencer la propagation dans ce type de milieu. Toutefois très peu d'études paramétriques ont été réalisées pour estimer l'influence de la structure d'une forêt réelle (densité, diamètre des troncs, structure spatiale ...) sur la propagation acoustique. Des travaux préliminaires [7][8] portant sur quelques cas d'étude ont permis de fournir des premiers éléments, mais ces travaux nécessitent d'être prolongés sur un nombre de configurations plus conséquent.

Les travaux présentés ici portent sur une modélisation 3D de la propagation d'un bruit routier à travers une forêt avec la méthode numérique *Transmission Line Matrix* (TLM) [9]. Seuls les effets de sol et de diffusion multiple sont considérés ; et aucun effet météorologique (vent, température) n'est donc pris en compte. L'objectif de l'étude est d'étudier l'influence des paramètres définissant la structure d'une forêt réelle sur la propagation acoustique. Plus précisément, l'objectif consiste à évaluer l'impact sur les niveaux sonores calculés d'une description fine de la structure réelle de la forêt, en comparaison à une description simplifiée.

La section 2 présente la méthodologie utilisée pour l'étude paramétrique et les paramètres numériques adoptés. Les résultats sont quant à eux présentés dans la section 3.

2 Méthodologie

2.1 Le domaine de propagation

Le domaine de simulation est constitué d'un parallélépipède d'une largeur de 20 m au centre duquel sont disposés des cylindres de 5 m de haut représentant les troncs des arbres (Figure 1). Le diamètre des troncs, la densité de la forêt, ainsi que l'épaisseur totale de la forêt font partie des paramètres d'influence pris en compte dans la présente étude paramétrique.

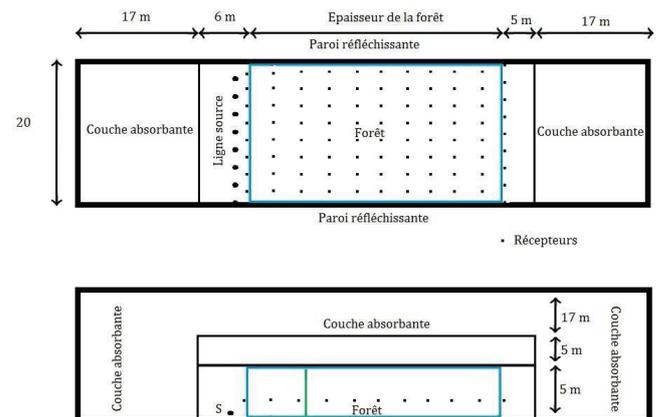


Figure 1: Description de la géométrie du domaine (haut : vue en coupe horizontale, bas : vue en coupe verticale).

Des récepteurs acoustiques sont disposés régulièrement sur une grille cartésienne de 2 m de côté à l'intérieur de la forêt, à une hauteur de 2 m. Une ligne de récepteurs est placée à 1 m en avant de la lisière de la forêt, à 2 m de haut. Cette ligne sert de référence pour les calculs d'atténuation acoustique due à la forêt (voir section 2.3).

Une source acoustique routière est placée à l'entrée de la forêt et est modélisée comme une distribution linéique de points sources situés à 5 cm au dessus du sol, et dont chaque point émet une impulsion gaussienne de la forme (Figure 2)

$$y_s(t) = \exp\left[-(\pi f_c t)^2\right]. \quad (1)$$

La fréquence de coupure de l'impulsion est choisie de façon à être dans la bande fréquentielle énergétique du spectre routier : $f_c = 500$ Hz.

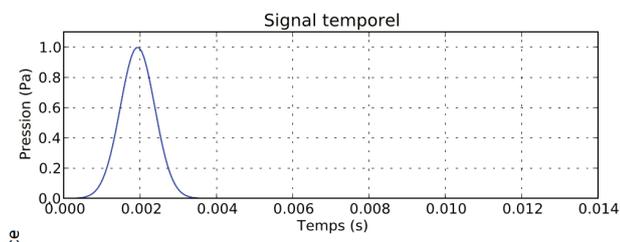


Figure 2: Signal acoustique de chaque point source

Des couches absorbantes, de type 'one-way' [10], sont placées à chaque extrémité et au-dessus des cylindres afin d'éviter les réflexions sur les extrémités du domaine. Leur épaisseur permet d'atténuer les plus basses fréquences considérées dans cette étude (100 Hz). Les frontières du domaine situées de part et d'autre de la forêt sont réfléchissantes afin de rendre compte d'une forêt et d'un milieu semi-infini dans la direction parallèle à la source routière [11].

La réflexion sur le sol est prise en compte de façon simplifiée à l'aide d'un coefficient de réflexion constant, c'est à dire indépendant de la fréquence et de l'angle d'incidence sur le sol. Cette approche se justifie ici par le fait que pour les angles d'incidence et les fréquences considérés, la gamme de variation du coefficient de réflexion est suffisamment restreinte pour ne pas entraîner d'erreur de plus de 1 dB sur les niveaux sonores [7]. Un coefficient de réflexion de 0.3 est utilisé, typique d'un sol forestier. Les troncs d'arbre sont considérés comme parfaitement réfléchissants [13].

2.2 Structures spatiales des forêts

Trois types de structure spatiale sont testées : régulière, totalement aléatoire et partiellement agrégée. Cette dernière correspond à une structure intermédiaire entre les deux autres cas et permet de représenter des structures réalistes similaires à une répartition en bosquets.

Un processus aléatoire générant un semis de points dans un espace à deux dimensions est utilisé pour obtenir les structures souhaitées. Ce type de processus est appelé processus de point ('point process') [14].

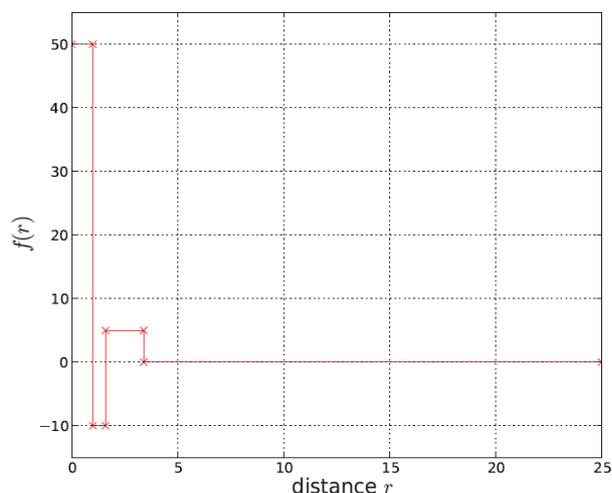
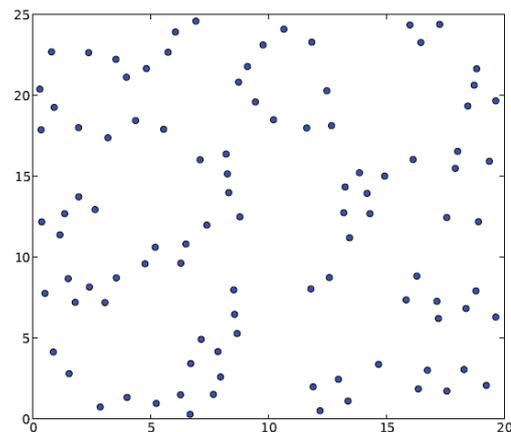
La structure aléatoire est réalisée en utilisant un processus de Poisson [14] où

$$P(N(S) = n) = \frac{S^n d}{n!} e^{-Sd} \quad (2)$$

est la probabilité de trouver un nombre de points n dans une surface S .

Les structures agrégées sont obtenues à l'aide d'un processus de Gibbs [14]. Ce processus tient compte des interactions entre les arbres à l'aide de relations d'attraction et de répulsion entre les points, qui peuvent avoir des portées variables. Il est caractérisé par une fonction coût $f(r)$ représentant les contraintes impliquées par la présence de deux points éloignés d'une distance r . En partant d'une structure spatiale aléatoire, un algorithme déplace les points du semis de façon à minimiser le coût total du semis, défini comme la somme des coûts pour toutes les paires de points du semis de points. Un exemple de structure agrégée et de sa fonction coût associée est présenté sur la Figure 3. Dans

cet exemple, la fonction coût traduit une répulsion forte entre 0 et 0.5m (emprise au sol du tronc), une attraction entre 1 et 3m, un comportement neutre au-delà.

Figure 3: Exemple de structure agrégée, *i.e.* la distribution des arbres (en haut) et sa fonction coût associée (en bas).

2.3 L'étude paramétrique

Les simulations consistent à tester l'influence de plusieurs caractéristiques de la forêt sur les spectres et les niveaux sonores à l'intérieur de la forêt, ainsi qu'en sortie de forêt. Les paramètres étudiés sont le diamètre des troncs, la densité des arbres, la structure spatiale des troncs et l'épaisseur de la forêt.

Afin d'éviter les dispersions importantes relevées d'un récepteur à un autre, et dues aux réflexions et diffractions multiples sur les troncs, pour chaque ligne d'indice i parallèle à la lisière de la forêt on calcule la moyenne énergétique $\bar{L}_{eq}(i)$ des niveaux sonores équivalents de tous les récepteurs de la ligne. L'indicateur finalement retenu par la suite est égal à l'atténuation sonore (spectre ou niveau global) entre une ligne i et la ligne de référence placée à l'entrée de la forêt (Figure 1) :

$$\Delta L_{eq}(i) = \bar{L}_{eq}(i) - \bar{L}_{eq}(ref). \quad (3)$$

2.3 Paramètres de simulation

Les simulations sont réalisées à l'aide du code Python/OpenCL-TLM décrit dans [12]. Le pas de discrétisation spatiale du maillage est égale à $\lambda/8.5$, où λ est la longueur d'onde, soit $4.10^{-2}m$ pour une fréquence de 1 kHz. Le pas temporel de simulation est de $6,8.10^{-5}s$, et la durée totale de chaque signal temporel simulé est de 0,5s. La durée des calculs est d'environ 10 heures pour le plus grand domaine considéré ($75m \times 27m \times 20m$), sur une infrastructure de calcul parallèle composée de deux cartes graphiques NVIDIA Tesla K20 GPU (5 GB GDDR5).

3 Résultats

3.1 Influence du diamètre des troncs

Les diamètres des troncs d'une forêt réelle ne sont jamais tous rigoureusement identiques, même pour une plantation homogène d'arbres de même âge. L'influence de ce paramètre est étudiée en comparant le spectre d'atténuation sonore en sortie de forêt (Figure 4), ainsi que l'atténuation sonore dans la forêt (Figure 5), pour des arbres à diamètres constants et des arbres dont le diamètre varie de façon aléatoire à l'intérieur d'une classe donnée (loi de distribution uniforme). Les quatre classes évaluées (Tableau 1) indiquent que ce paramètre n'a pas d'influence significative sur la propagation acoustique aux fréquences considérées.

Tableau 1: Classes de diamètres de tronc

Classe	D1	D2	D3	D4
Diamètre	15-24 cm	25-34 cm	35-44 cm	45-54 cm

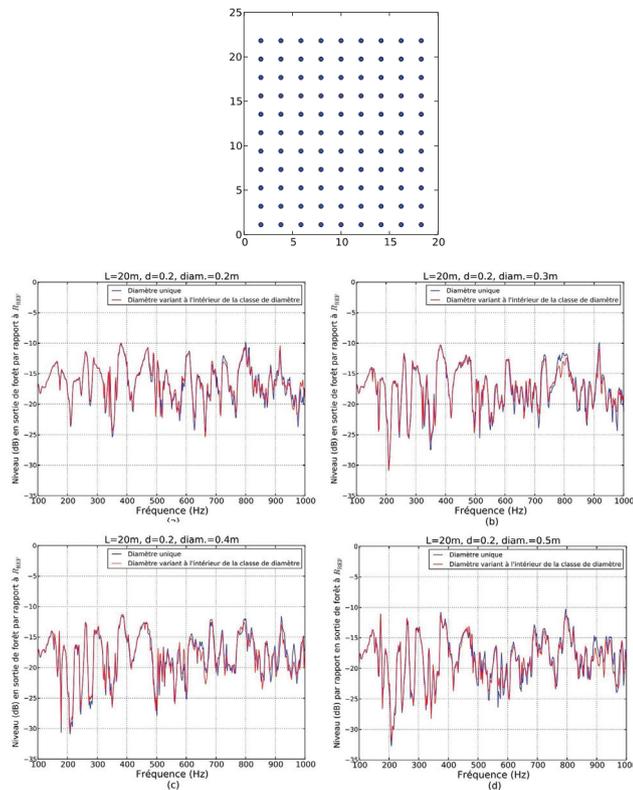


Figure 4 : Spectres d'atténuation sonore en sortie de forêt ($L=20\text{ m}$, $d=0,2\text{ arbres/m}^2$, plantation régulière) pour

des troncs à diamètres fixes (bleu) et à diamètres dispersés (rouge).

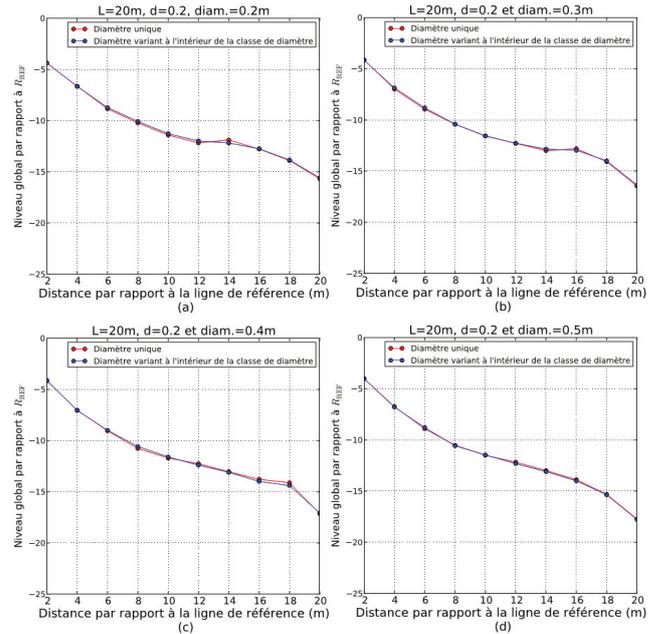


Figure 5: Atténuations sonores dans la forêt ($L=20m$, $d=0.2\text{ arbres/m}^2$, plantation régulière) pour des troncs à diamètres fixes (rouge) et à diamètres dispersés (bleu).

Si l'on considère à présent des troncs de diamètre identique, égaux à la médiane de chaque classe de diamètres, on constate que le diamètre du tronc influence le spectre d'atténuation en sortie de forêt (Figure 6) comme attendu lorsque $ka > 1$, où k est le nombre d'onde et a le diamètre du tronc. Cet effet est peu significatif ($<1\text{ dB}$) pour les atténuations sonores en niveau global, aussi bien à l'intérieur qu'en sortie de forêt (Figure 7).

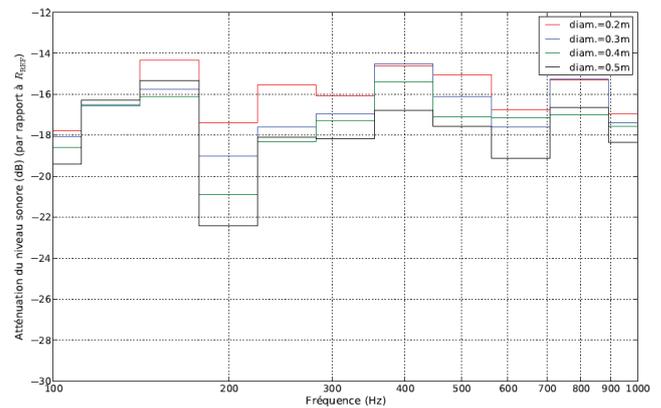


Figure 6: Spectres d'atténuations sonores en sortie de forêt ($L=20m$, $d=0.2\text{ arbres/m}^2$, plantation régulière) en fonction du diamètre de tronc.

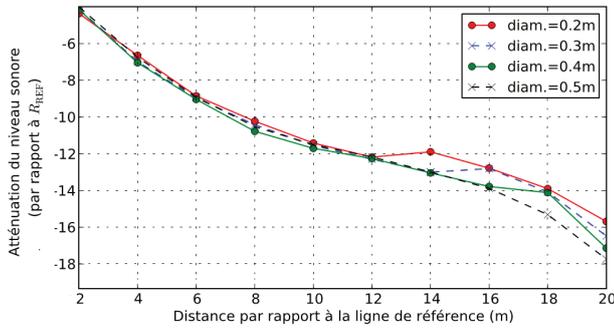


Figure 7: Atténuations sonores dans la forêt ($L=20$ m, $d=0.2$ arbres/m², plantation régulière) en fonction du diamètre de tronc.

3.2 Influence de la distribution spatiale des troncs

Une structure spatiale totalement aléatoire est comparée à trois structures agrégées (Figure 8, Tableau 2). La structure A3 représente un cas extrême, très éloigné de ce que l'on peut observer, mais utile à la comparaison.

Tableau 2 : Paramètres de la fonction coût des structures agrégées

	Répulsion	Attraction	Répulsion	Neutre
A1	0-1 m	1-1.4 m	1.4-3.8 m	>3.8 m
A2	0-1.5 m	1.5-3m	3-4.85 m	>4.85 m
A3	0-1.85 m	1.85-3m	3-9 m	>9m

On constate (Figure 9 et Figure 10) que la différence de niveaux sonores entre les cas de structures agrégées et le cas de structure aléatoire reste inférieure à 2 dB, aussi bien pour les bandes spectrales que sur les niveaux sonores globaux dans la forêt. On peut en conclure que le comportement d'une structure agrégée est sensiblement équivalent à celui d'une structure totalement aléatoire.

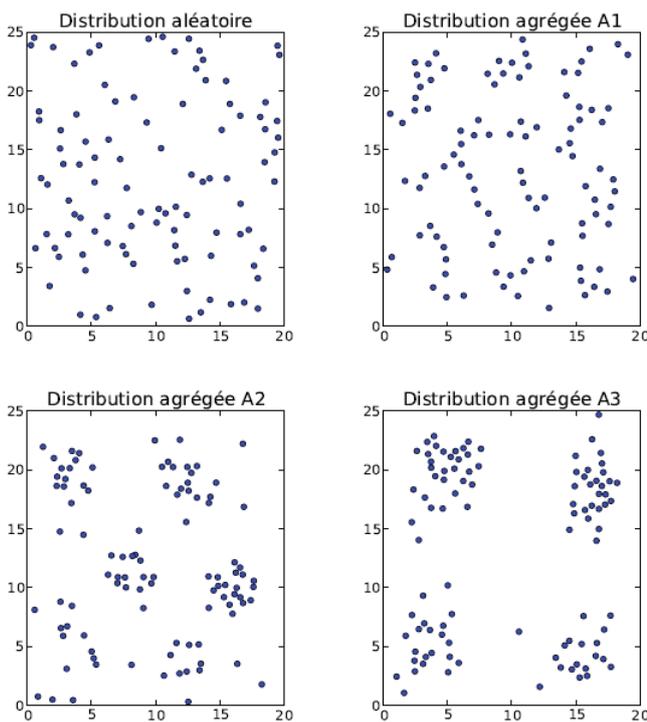


Figure 8 : Structures spatiales testées ($d=0.2$ arbres/m²)

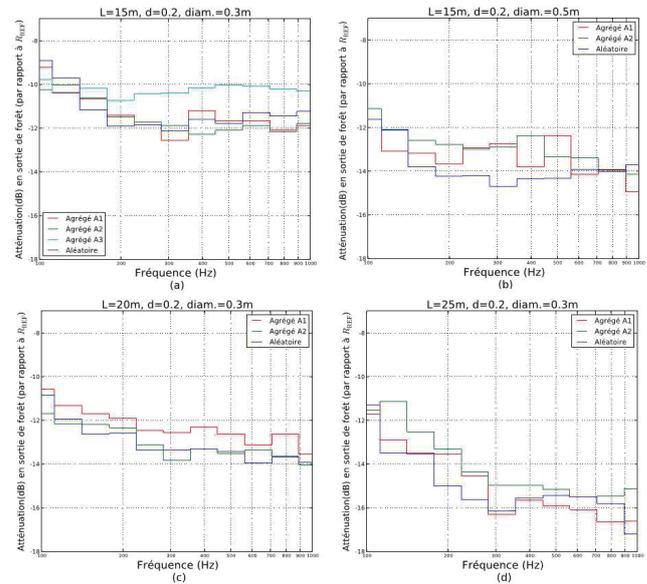


Figure 9 : Spectres d'atténuations sonores en sortie de forêt pour plusieurs structures spatiales ($L=20$ m, $d=0.2$ arbres/m²).

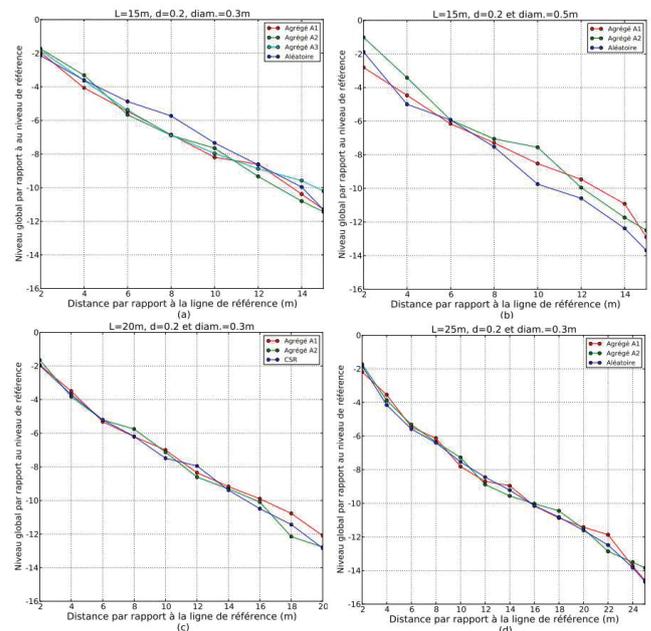


Figure 10 : Atténuations sonores dans la forêt pour plusieurs structures spatiales ($L=20$ m, $d=0.2$ arbres/m²).

3.3 Influence de l'épaisseur de forêt

L'influence de l'épaisseur de la forêt a été évaluée avec une structure spatiale aléatoire, de densité $d=0.2$ arbres/m² et des troncs de diamètre 0.3 m. La perte par insertion en sortie de forêt (différence entre le niveau sonore avec la forêt et le niveau sonore sans la forêt) est représentée sur la Figure 11. On constate qu'il est nécessaire d'atteindre une épaisseur d'au moins 20m pour que la forêt atténue le bruit de 3 dB. La loi de réduction de bruit semble quasi linéaire jusqu'à 20 m, avec une réduction du bruit de l'ordre de 1.5 dB par 10 m d'épaisseur de forêt. Ce constat, établi sur un seul jeu de paramètres densité/diamètre de tronc, mérite cependant d'être confirmé par une étude explorant davantage de configurations, ainsi que des épaisseurs de forêt supérieures à 30m.

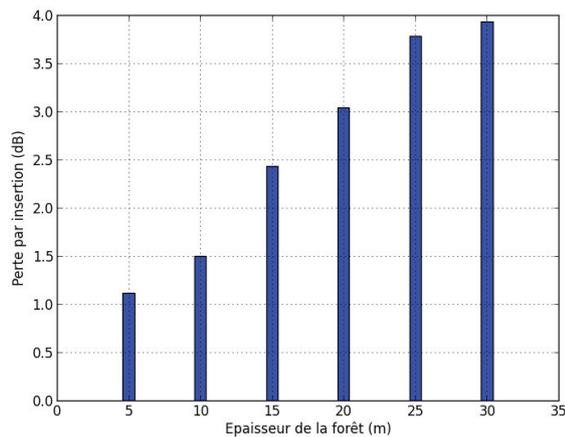


Figure 11 : Perte par insertion en fonction de l'épaisseur de la forêt.

4 Conclusion

Les simulations réalisées à l'aide de la méthode TLM ont permis de tester l'influence de différents paramètres de la structure d'une forêt sur la propagation acoustique à travers la forêt pour des fréquences comprises entre 100Hz et 1kHz. Les résultats ont permis de confirmer et d'affiner ceux trouvés par Chobeau lors de travaux préliminaires [7][8]. Ces résultats peuvent être résumés de la façon suivante :

- la dispersion des diamètres des troncs dans une classe de diamètre n'a pas d'influence significative sur la propagation acoustique ;
- une structure spatiale de forêt agrégée a une influence équivalente à une structure totalement aléatoire.

Ces deux conclusions ont un intérêt pratique important pour de futures simulations numériques car elles indiquent qu'il est inutile d'adopter une description très précise de la structure de la forêt et qu'une forêt réelle non régulière peut être modélisée par une forêt totalement aléatoire à troncs de diamètres égaux, sans apporter d'erreur supérieure à 2 dB sur les niveaux sonores des bandes spectrales comprises entre 100 Hz et 1 kHz.

Pour une densité importante, des diamètres de troncs moyens et un placement des arbres aléatoires, le gain d'atténuation sur les niveaux sonores globaux apportée par la présence de la forêt n'est significatif qu'à partir d'une épaisseur de 20 m.

Remerciements

Ce travail a reçu le soutien financier de la Direction Générale de la Prévention des Risques du Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable.

Références

- [1] G. Dutilleux, J. Defrance, B. Gauvreau, D. Ecotièrre, M. Bérengier, F. Besnard : NMPB-ROUTES-2008: The revision of the French method for road traffic noise prediction, *Acta Acustica* 96(3), 452-462 (2010).
- [2] E. Salomons, D. van Maercke, J. Defrance, F. de Roo, The Harmonoise Sound Propagation Model, *Acta Acustica* 97, 62 – 74 (2011)
- [3] A. Tunick, 'Calculating the micrometeorological influences on the speed of sound through the atmosphere in forests', *J. Acoust. Soc. Am.*, 114, 1796-1806, (2003).
- [4] D. Heimann, 'Numerical simulation of wind and sound propagation through an idealised stand of trees', *Acta Acustica*, 89, 779-788, (2003).
- [5] T. Van Renterghem, D. Botteldooren, K. Verheyen, 'Road traffic noise shielding by vegetation belts of limited depth', *J. Sound Vib.*, 331, 2404-2425, (2012).
- [6] M.E. Swearingen, M.J. White, P. Guertin, D.G. Albert, A. Tunick, 'Influence of a forest edge on acoustical propagation: experimental results', *J. Acoust. Soc. Am.*, 133, 2566-2575, (2013).
- [7] P. Chobeau. Modeling of sound propagation in forests using the transmission line matrix method. PhD thesis, Université du Maine - Académie de Nantes, 2014.
- [8] P. Chobeau, G. Guillaume, J. Picaut, D. Ecotièrre, G. Dutilleux, Time-domain simulations of sound propagation in a simplified forest: A parametric study based on the transmission line matrix (TLM) method', *Internoise conference, San Francisco* (2015).
- [9] G. Guillaume, P. Aumond, B. Gauvreau, G. Dutilleux, Application of the transmission line matrix method for outdoor sound propagation modelling – Part 1: Model presentation and evaluation, *Applied Acoustics* 76, 113–118 (2014)
- [10] G. Guillaume, J. Picaut, A simple absorbing layer implementation for the transmission line matrix modeling', *J. Sound Vib.* 332, 4560-4571 (2013).
- [11] T. Van Renterghem, D. Botteldooren, K. Verheyen, Road traffic noise shielding by vegetation belts of limited depth, *J. Sound Vib.* 331, 2404-2425, (2012).
- [12] G. Guillaume, N. Fortin, 'Optimized transmission line matrix model implementation for graphics processing units computing in built-up environment', *J. Build. Perf. Sim.*, 7, 45-56, (2013).
- [13] G. Reethof, L. Frank, O.H. McDaniel, 'Absorption of sound by tree bark', *USDA Service Research, NE-341*, 1-6, (1976).
- [14] F. Goreaud. Apports de l'analyse de la structure spatiale en forêt tempérée à l'étude et la modélisation des peuplements complexes. Thèse, ENGREF (AgroParisTech), 2000.