

# Revue bibliographique sur la propagation du son en présence de forêts

Pierre Chobea : doctorant *IFSTTAR*<sup>1</sup>/*LRS*<sup>2</sup>

Encadrants : <sup>1</sup>J. Picaut, <sup>2</sup>G. Dutilleux, <sup>2</sup>D. Ecotière



## Sujet de la revue bibliographique

Prise en compte et quantification des phénomènes physiques influençant la propagation acoustique en présence de forêts.

## Intérêt de la prise en compte de la forêt

- Moyen de protection des zones calmes (directive européenne 2002/49/CE).
- Quantifier l'influence des milieux boisés sur les niveaux acoustiques.
- Préserver la biodiversité présente à l'intérieur des espaces forestiers.

## De quoi cette bibliographie ne traite PAS ?

- La sonification des données physiologiques propres aux arbres



*Pin équipé de capteurs écophysiologique et à ultrasons [a].*

[a] M. Maeder, Rendering ecophysiological processes audible, blog : <http://blog.zhdk.ch/marcusmaeder/>

# Plan de l'exposé

- 1 Effets de sol
- 2 Influence des obstacles
- 3 Inhomogénéités du milieu de propagation
- 4 Méthodes de calcul
- 5 La forêt : un moyen de protection

# Plan de l'exposé

- 1 Effets de sol
  - Composition du sol en forêt
  - Les modèles d'impédance
  - Performances des modèles
- 2 Influence des obstacles
- 3 Inhomogénéités du milieu de propagation
- 4 Méthodes de calcul
- 5 La forêt : un moyen de protection

# Effets de sol

## Composition du sol en forêt

- Couches supérieures de matières organiques :
  - couche de surface : la litière,
  - couche intermédiaire : l'humus.
- Couche inférieure de matières minérales :
  - couche inférieure : sable, terre compactée.

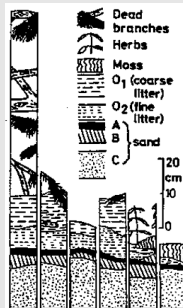


Figure: Coupe verticale de six sols de forêt [1].

[1] W. Huisman, Sound propagation over vegetation-covered ground, 1990, PhD Thesis.

# Effets de sol

## Les modèles d'impédance

- Le modèle structurel bi-couches semi-infinie (Talaske [2]) :
  - ▶ basée sur la théorie des lignes de transmission :

$$Z(d) = Z_1 \frac{Z_2 - iZ_1 \tan(k_b d)}{Z_1 - iZ_2 \tan(k_b d)} . \quad (1)$$

- ▶ hypothèses formulées :

- ★ couche supérieure fine et  $|Z_1/Z_2| \ll 1$ ,
- ★ sol homogène,
- ★ résistance au passage de l'air grande,
- ★ basse fréquence.

- Modèle à 2 paramètres (Attenborough [3]) :

$$Z \simeq \frac{1+i}{\sqrt{\pi\gamma\rho}} \sqrt{\frac{\sigma_e}{f}} + \frac{ic}{2\gamma\omega\Omega d} . \quad (2)$$

[2] R. Talaske, The acoustic impedance of layered forest floor, Msc Thesis, 1980.

[3] K. Attenborough, J. Acoust. Soc. Am., vol. 92, pp. 418-427, 1992.

# Effets de sol

## Les modèles d'impédance

- Modèle Zwikker et Kosten (ou modèle semi-phénoménologique) :
  - ▶ conditions adiabatiques à l'intérieur des pores,
  - ▶ introduction de la tortuosité.

$$Z_c = \frac{1}{\Omega} \sqrt{T + \frac{i\Omega\sigma}{\omega\rho}} \quad (3)$$

- modèle à tortuosité identique (2 paramètres effectifs) :

$$Z_{ce} = \frac{1}{\Omega_e} \sqrt{1 + \frac{i\Omega_e\sigma_e}{\omega\rho}} \quad (4)$$

**Table:** *Valeurs recalées des paramètres effectifs pour une forêt de pins [4].*

| Resistivité effective ( $kPa.s.m^{-2}$ ) | Porosité effective |
|------------------------------------------|--------------------|
| 16.4 – 46.0                              | 0.40 – 0.57        |

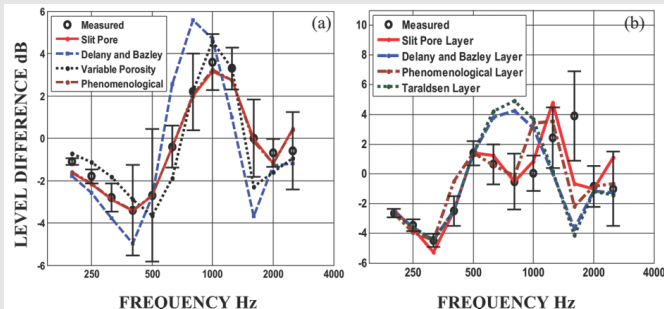
[4] K. Attenborough et al., J. Acoust. Soc. Am., vol. 129, pp. 2806-2819, 2011.



# Effets de sol

## Performances des modèles

- Modèles d'impédance testés
  - Delaney & Bazley,
  - Taraldsen,
  - Biot (*slit-pore*),
  - Zwicker & Kosten.



**Figure:** Atténuation excédentaire (dB/100ft) en fonction de la fréquence (Hz) pour une distance de 50ft et pour une forêt de pin (a) et de hêtre (b) [4].

[4] K. Attenborough et al., J. Acoust. Soc. Am., vol. 129, pp. 2806-2819, 2011.

# Plan de l'exposé

- 1 Effets de sol
- 2 Influence des obstacles**
  - Influence des troncs d'arbres
  - Influence du feuillage
  - La réverbération en forêt
- 3 Inhomogénéités du milieu de propagation
- 4 Méthodes de calcul
- 5 La forêt : un moyen de protection

# Influence des obstacles

## Influence des troncs d'arbres

- Modèles de diffusion :
  - ▶ Twersky [5] / Embleton [6] :

$$K^2 = k^2 + 4igN . \quad (5)$$

- ▶ Linton et Martin [7, 8] :

$$K^2 = k^2 - 4iNg + (g_1^2 - g^2) \left( \frac{2N}{k} \right)^2 , \quad (6)$$

avec

$$g = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n , \quad g_1 = \sum_{n=-\infty}^{\infty} (-1)^n A_n . \quad (7)$$

[5] V. Twersky, J. Acoust. Soc. Am., vol. 24, pp. 42-46, 1952.

[6] T. F. W. Embleton, J. Acoust. Soc. Am., vol. 40, pp. 667-670, 1966.

[7] C. M Linton and P. A. Martin, J. Acoust. Soc. Am., vol. 117, pp. 3413-3423, 2005.

[8] M. E. Swearingen et J. White, J. Acoust. Soc. Am., vol.122, pp. 113-119, 2007.

# Influence des obstacles

## Influence des troncs d'arbres

- Exemple de propagation à travers un réseau de cylindres :

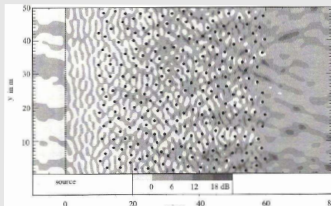


Figure: Section horizontale de l'atténuation implémentée par FDTD [9].

- Positionnement périodique des troncs :

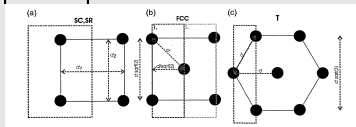


Figure: Représentation des trois schémas de répartition géométrique [10, 11, 12].

[9] D. Heimann, *Acta Acustica*, vol. 89, pp. 779-788, 2003.

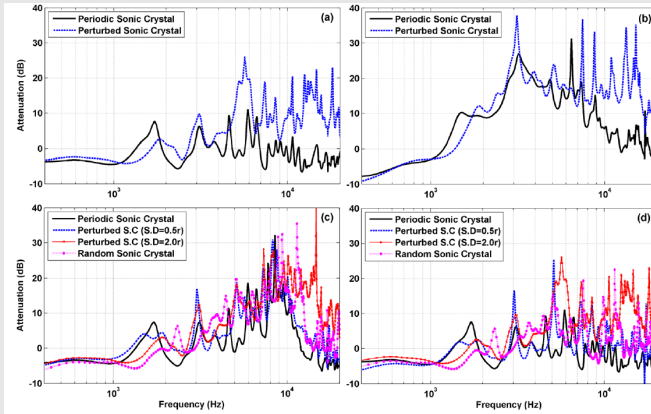
[10] T. Van Renterghem, *JSV*, vol. 331, pp. 2404-2425, 2012.

[11] R. Martinez-Sala, *JSV*, vol. 291, pp. 100-106, 2006.

[12] S. Taherzadeh, *JASA Express Letter*, vol. 132, 2012.

# Influence des obstacles

## Influence des troncs d'arbres



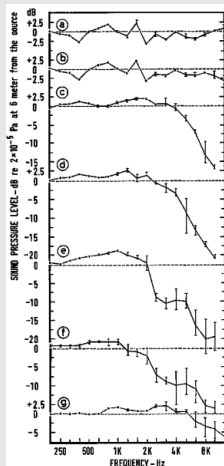
**Figure:** Comparaison des atténuations mesurées pour deux dispositions : périodique (carré) et aléatoire ; et en introduisant des modifications du rayon  $r$  des cylindres ( $0.5r$  et  $2r$ ) [12].

[12] S. Taherzadeh, JASA Express Letter, vol. 132, 2012.

# Influence des obstacles

## Influence du feuillage

- Étude des propriétés absorbantes du feuillage



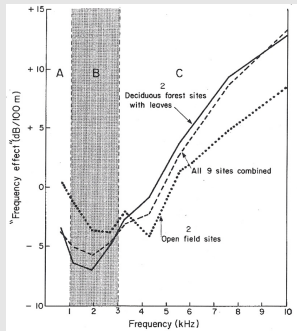
**Figure:** Niveaux de pression mesurés en chambre anéchoïque à 6 m de la source avec différentes espèces de plantes (avec et sans feuillage) [13].

[13] M. Martens, J. Acoust. Soc. Am., vol. 67, pp. 66-72, 1980.

# Influence des obstacles

## La réverbération en forêt

- Étude expérimentale de la réverbération en forêt
  - Persistances des niveaux sonores aux alentours de 2 kHz.
- Étude de la communication animale
  - Changement de tonalité dans le chant des oiseaux (fenêtre de Morton [14]).



**Figure:** Atténuation excédentaire de plusieurs sites forestiers (---) et (—), et en champ libre (....), identification de la "fenêtre de Morton" (zone B) [15].

[14] E. S. Morton, *Amer. Natur.*, vol. 108, pp. 17-34, 1975.

[15] K. Marten, *Behav. Ecol. Sociobiol.*, vol. 67, pp. 66-72, 1980.

# Plan de l'exposé

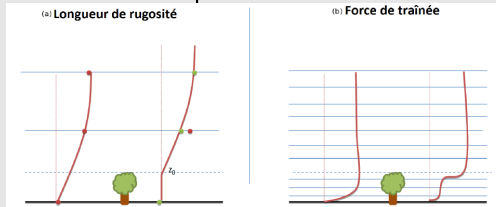
- 1 Effets de sol
- 2 Influence des obstacles
- 3 **Inhomogénéités du milieu de propagation**
  - Variations micrométéorologiques en forêt
  - Conséquences des variations micrométéorologiques
- 4 Méthodes de calcul
- 5 La forêt : un moyen de protection



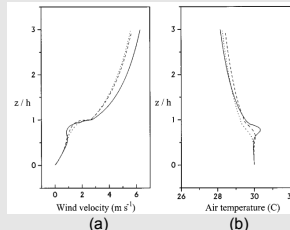
# Conditions atmosphériques

## Variations micrométéorologiques en forêt

### ● Profils de vent et de température



**Figure:** *Profils typiques de vent en présence de forêt modélisé par : (a) la longueur de rugosité ; (b) par une force de traînée [16].*



**Figure:** *Profils de (a) vitesse de vent et (b) de températures pour trois LAI [17].*

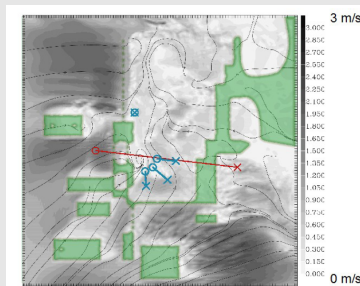
[16] P. Aumond, PhD Thesis, 2011.

[17] A. Tunick, J. Acoust. Soc. Am., vol. 114, pp. 1796-1806, 2003.

# Conditions atmosphériques

## Variations micrométéorologiques en forêt

- La turbulence
  - ▶ cisaillement de vents dans la partie supérieure de la canopée,
  - ▶ échanges de chaleur, évapotranspiration.



**Figure:** *Coupe horizontale du champ de vent instantané à 10 m du sol sur la zone expérimentale de Lannemezan 2005. En bleu, le positionnement des capteurs de mesures, les zones vertes correspondent aux zones arborées. [16].*

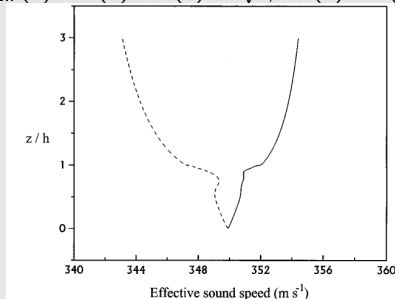
[16] P. Aumond, PhD Thesis, 2011.

# Conditions atmosphériques

## Conséquences des variations micrométéorologiques

- Réfraction
  - Approche de la célérité effective

$$c_{\text{eff}}(z) = c(z) + u(z) = \sqrt{\gamma RT(z)} + u(z). \quad (8)$$



**Figure:** *Profils de célérité effective pour une propagation pour un vent portant (—) et un vent contraire (- -) à la direction de propagation [17].*

- Diffusion
  - Conséquence de la turbulence

[17] A. Tunick, J. Acoust. Soc. Am., vol. 114, pp. 1796-1806, 2003.

# Plan de l'exposé

---

## 1 Effets de sol

## 2 Influence des obstacles

## 3 Inhomogénéités du milieu de propagation

## 4 Méthodes de calcul

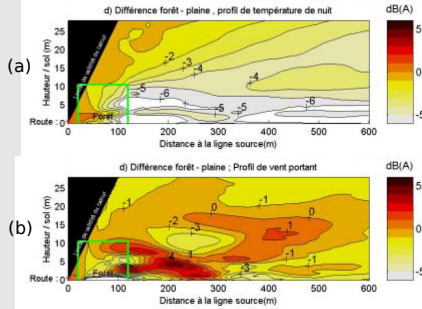
- Méthodes de référence
- Méthodes d'ingénierie

## 5 La forêt : un moyen de protection

# Méthodes de calcul

## Méthodes de référence

- Méthodes fréquentielles
  - ▶ Tirs de rayons [1],
  - ▶ Équation parabolique (GFPE [18, 19] ; CNPE [20]).



**Figure:** *Différence d'atténuation entre forêt et plaine : (a) température de nuit sans vent, (b) vent portant et température constante sur la hauteur [19].*

[1] W. Huisman, Sound propagation over vegetation-covered ground, 1990, PhD Thesis.

[18] M. E. Swearingen and J. White, J. Acoust. Soc. Am., vol. 122, pp. 113-119, 2007.

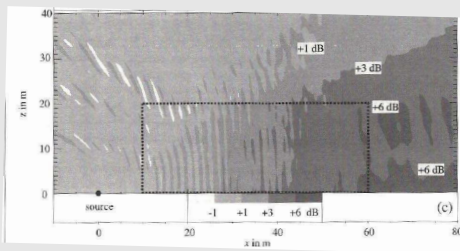
[19] N. Barrière, PhD thesis, 1999.

[20] E. Johansson, Msc thesis, 2010.

# Méthodes de calcul

## Méthodes de référence

- Méthode temporelle
  - ▶ Différences finies (FDTD).



**Figure:** *Coupe verticale de l'atténuation excédentaire (dB) pour un vent portant couplé à la diffusion multiple des troncs [9].*

[9] D. Heimann, *Acta Acustica*, vol. 89, pp. 779-788, 1992.

# Méthodes de calcul

## Méthodes d'ingénierie

- ISO9613-2 [21]
  - ▶ atténuation due au feuillage.
- Nord2000 [22] et Harmonoise [23]
  - ▶ effets de sol : modèle Delany & Bazley,
  - ▶ diffusion : modèle statistique

[21] ISO 9613-2, Attenuation of sound during propagation outdoors - part 2, 1996

[22] Nord2000, General Nordic Sound Propagation Model And Applications, 2002

[23] Harmonoise, Engineering method for road traffic and railway noise, 2005

# Plan de l'exposé

---

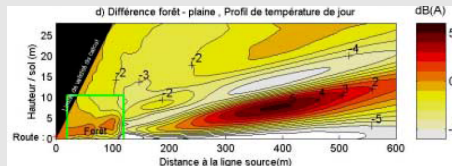
- 1 Effets de sol
- 2 Influence des obstacles
- 3 Inhomogénéités du milieu de propagation
- 4 Méthodes de calcul
- 5 La forêt : un moyen de protection**
  - Point de vue externe
  - Point de vue interne



# La forêt : un moyen de protection

## Point de vue externe

- Influence de la forêt sur l'extérieur :
  - ▶ barrière anti-bruit efficace en condition favorable :  
simulation FDTD bande forestière de 15 m de large = barrière anti-bruit de 1.5 m de haut [10],
  - ▶ dégrade les effets micrométéorologiques en condition défavorable [19].



**Figure:** *Différence d'atténuation entre forêt et plaine pour un profil de température de jour [19].*

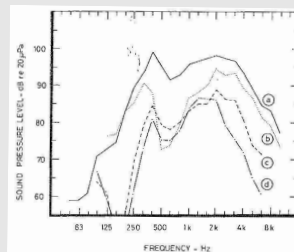
[10] T. Van Renterghem, JSV, vol. 331, pp. 2404-2425, 2012.

[19] N. Barrière, PhD thesis, 1999.

# La forêt : un moyen de protection

## Point de vue interne

- Influence sur la propagation à l'intérieur :
  - réduction des niveaux sonores globaux,



**Figure:** *Influence de l'atténuation excédentaire de certaines plantes sur le bruit routier [24].*

- persistance de certaines bandes fréquentielles : réverbération.

[24] M. Martens, Appl. Acoust., vol. 14, pp. 167-189, 1981.

## Constats :

- intérêt constant pour la propagation sonore en présence de forêts,
- approfondissement régulier de chaque phénomène physique,
- résultats divergents et parfois contradictoires,
- modèles analytiques et numériques souvent simplifiés.

## Perspectives :

- développement de la méthode TLM (*Transmission Line Matrix*) pour l'étude de la propagation du son en présence de forêts.

# Merci de votre attention

## Revue bibliographique sur la propagation du son en présence de forêts

Pierre Chobeau : doctorant *IFSTTAR*<sup>1</sup>/*LRS*<sup>2</sup>

Encadrants : <sup>1</sup>J. Picaut, <sup>2</sup>G. Dutilleux, <sup>2</sup>D. Ecotiène



W. Huisman, *Sound propagation over vegetation-covered ground*.

PhD thesis, Radboud Universiteit Nijmegen, 1990.



R. Talaske, "The acoustic impedance of layered forest floor," Master's thesis, Pennsylvania State University, 1980.



K. Attenborough, "Ground parameter information for propagation modeling," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 92(1), pp. 418–427, 1992.



K. Attenborough, I. Bashir, and S. Taherzadeh, "Out door ground impedance models," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 129, pp. 2806–2819, 2011.



V. Twersky, "Multiple scattering of radiation by an arbitrary configuration of parallel cylinders," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 24, pp. 42–46, 1952.



T. Embleton, "Scattering by an array of cylinders as a function of surface impedance," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 40, pp. 667–670, 1966.



C. M. Linton and P. A. Martin, "Multiple scattering by random configurations of circular cylinders : second-order corrections for the effective wavenumber," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 117, pp. 3413–3423, 2005.



M. E. Swearingen and J. White, "Influence of scattering, atmospheric refraction, and ground effect on sound propagation through a pine forest," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 122, pp. 113–119, 2007.



D. Heimann, "Numerical simulation of wind and sound propagation through an idealised stand of trees," *Acta Acustica*, vol. 89, pp. 779–788, 2003.



T. V. Renterghem, D. Botteldooren, and K. Verheyen, "Road traffic noise shielding by vegetation belts of limited depth," *J. Sound Vib.*, vol. 331, pp. 2404–2425, 2012.



R. Martinez-Sala, C. Rubio, L. M. Garcia-Raffi, J. V. Sanchez-Perez, E. A. Sanchez-Perez, and J. Llinares, "Control of noise by trees arranged like sonic crystals," *J. Sound Vib.*, vol. 291, pp. 100–106, 2006.

○○○○

○○○○○

○○○

○○○

○○



S. Taherzadeh, I. Bashir, and K. Attenborough, "Aperiodicity effects on sound transmission through arrays of identical cylinders perpendicular to the ground," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 132(4), p. Express letter, 2012.



M. Martens, "Foliage as a low-pass filter : experiments with model forests in an anechoic chamber," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 67, pp. 66–72, 1980.



E. Morton, "Ecological sources of selection on avian sounds," *Amer. Natur.*, vol. 108, pp. 17–34, 1975.



K. Marten and P. Marler, "Sound transmission and its significance for animal vocalization," *Behav. Ecol. Sociobiol.*, vol. 2, pp. 271–290, 1977.



P. Aumond, *Modélisation numérique pour l'acoustique environnementale : simulation de champs météorologiques et intégration dans un modèle de propagation*. PhD thesis, Université du Maine, 2011.



A. Tunick, "Calculating the micrometeorological influences on the speed of sound through the atmosphere in forests," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 114, pp. 1796–1806, 2003.



M. White and M. Swearingen, "Sound propagation through a forest : a predictive model," tech. rep., US army corps of engineers., 2004.



N. Barrière, *Etude théorique et expérimentale de la propagation du bruit de trafic en forêt*. PhD thesis, Centre scientifique et technique du bâtiment, 1999.



E. Johansson, "The sound amplifying forest, with emphasis on sounds from wind turbines," Master's thesis, Chalmers University of Technology, 2010.



ISO9613-2, "Attenuation of sound during propagation outdoors - part 2," in *Geneva : International Organization for Standardization*, 2006.



Nord2000, "Nordic environmental noise prediction method," in *General Nordic Sound Propagation Model And Applications In Source-related Prediction Methods*, 2002.

○○○○

○○○○○

○○○

○○○

○○



HarmonoiseWP3, "Engineering method for road traffic and railway noise after validation and fine-tuning," in *Technical Report HAR32TR-040922-DGMR20*, 2005.



M. Martens, "Noise abatement in plant monocultures and plant communities," *Appl. Acoust.*, vol. 14, pp. 167–189, 1981.



D. Albert, "Past research on sound propagation through forests," *US army corps of engineers, engineer research and development center. Cold regions research and engineering laboratory*, 2004.



K. Attenborough, "A review of research related to noise reduction by trees," in *The 3rd International congress and exposition on noise control and engineering. Inter-noise*, 2004.



K. Attenborough, "Acoustical impedance models for outdoor ground surfaces," *J. Sound Vib.*, vol. 99(4), pp. 521–544, 1985.



K. Attenborough, K. M. Li, and K. Horoshenkov, *Predicting outdoor sound*. Taylor & Francis, 2007.



D. Aylor, "Sound transmission through vegetation in relation to leaf area density, leaf width, and leaf breadth of canopy," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 51, pp. 411–414, 1972.



N. Barrière, "La forêt : " un écran anti-bruit météorologique ". 1ère partie : Une nouvelle méthode de calcul de la propagation du bruit de trafic en forêt.," *Acoustique et techniques*, vol. 23, pp. 41–48, 2000.



N. Barrière and J. Defrance, "La forêt : " un écran anti-bruit météorologique ". 2ème partie : Campagne de mesures dans les landes - validation des méthodes de calcul," *Acoustique et techniques*, vol. n°24, pp. 34–40, 2001.



K. Bolin, *Wind turbine noise and natural sounds-masking, propagation and modeling*. PhD thesis, KTH engineering sciences, 2009.



D. Botteldooren and B. D. Coensel, "Quality assessment of quiet areas : a multi-criteria approach," in *Euronoise*, 2006.

○○○○

○○○○○

○○○

○○○

○○



J. Bouillie, "Bilan patrimonial des forêts domaniales," *ONF*, pp. 1–55, 2006.



M. Bruneau, *Manuel d'acoustique fondamentale*.  
Hermes, 1998.



R. Bullen and F. Fricke, "Sound propagation through vegetation," *J. Sound Vib.*, vol. 80, pp. 11–23, 1982.



S. H. Burns, "The absorption of sound by pine trees," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 65, pp. 658–661, 1979.



M. Bérengier, B. Gauvreau, P. Blanc-Benon, and D. Juvé, "Outdoor sound propagation : a short review on analytical and numerical approaches," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 89, pp. 980–991, 2003.



D. I. Cook and D. F. Haverbeke, *Trees and shrubs for noise abatement*.  
University press of the Pacific, 1971.



J. Defrance, E. Salomons, I. Noordhoek, D. Heimann, B. Plovsing, G. Watts, H. Jonasson, X. Zhang, E. Premat, I. Schmich, F. Aballea, M. Baulac, and F. de Roo, "Outdoor sound propagation reference model developed in the european harmonoise project," *Acta Acustica*, vol. 93, pp. 213–227, 2007.



M. Delany and E. Bazley, "Acoustical properties of fibrous absorbent materials," *Appl. Acoust.*, vol. 3, p. 1970, 1969.



S. Dupont and Y. Brunet, "Coherent structures in canopy edge flow : a large-eddy simulation study," *J. Fluid Mech.*, vol. 630, pp. 93–128, 2009.



S. Dupont and Y. Brunet, "Impact of forest edge shape on tree stability : a large-eddy simulation study," *Forestry*, vol. 81, pp. 299–315, 2008.



S. Dupont and Y. Brunet, "Edge flow and canopy structure : a large-eddy simulation study," *Boundary-layer meteorology*, vol. 126, pp. 51–71, 2008.



S. Dupont and Y. Brunet, "Influence of foliar density profile on canopy flow : a large-eddy simulation study," *Elsevier*, vol. 148, pp. 976–990, 2008.



○○○○

○○○○○

○○○

○○○

○○



G. Dutilleux, J. Defrance, B. Gauvreau, and F. Besnard, "The revision of the french method for road traffic noise prediction," in *Acoustics'08Paris*, 2008.



G. Dutilleux and U. R. Kristiansen, "Implementation of a boundary with diffuse reflection in tlm," in *Tenth international congress on sound and vibration*, 2003.



T. F. W. Embleton, "Tutorial on sound propagation outdoors," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 100, pp. 31–48, 1996.



T. F. W. Embleton, "Sound propagation in homogeneous deciduous and evergreen woods," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 35, pp. 1119–1125, 1963.



C. F. Eyring, "Jungle acoustics," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 18, pp. 257–270, 1946.



Y. Fan, B. Zhiyi, Z. Zhujun, and L. Jiani, "The investigation of noise attenuation by plants and the corresponding noise-reducing spectrum," *J. Env. Health*, vol. 72, pp. 8–15, 2010.



C. F. Fang and D. L. Ling, "Guidance for noise reduction provided by tree belts," *Landscape and Urban Planning*, vol. 71, pp. 29–34, 2005.



J. B. Fisher, T. A. DeBiase, Y. Qi, M. Xu, and A. H. Goldstein, "Evapotranspiration models compared on a sierra nevada forest ecosystem," *J. Env. Mod. Soft.*, vol. 20, pp. 783–796, 2005.



F. Fricke, "Sound attenuation in forests," *J. Sound Vib.*, vol. 92, pp. 149–158, 1984.



O. Fégeant, "Wind-induced vegetation noise. part i : a prediction model," *Acta Acustica*, vol. 85, pp. 228–240, 1999.



M. C. Girard, C. Walter, J. C. Rémy, J. Berthelin, and J. L. Morel, *Sols et environnement*. Sciences Sup, 2005.



G. Guillaume, *Application de la méthode TLM à la modélisation de la propagation acoustique en milieu urbain*. PhD thesis, LCPC, 2009.



G. Guillaume, J. Picaut, G. Dutilleux, and B. Gauvreau, "Time-domain impedance formulation for transmission line matrix modelling of outdoor sound propagation," *J. Sound Vib.*, vol. 330, pp. 6467–6481, 2011.



G. Guillaume, J. Picaut, G. Dutilleux, and B. Gauvreau, "Use of the transmission line matrix method for the sound propagation modelling in open-space," in *13th Long range sound propagation symposium*, 2008.



D. Heimann and E. M. Salomons, "Testing meteorological classifications for the prediction of long-term average sound levels," *Appl. Acoust.*, vol. 65, pp. 925–950, 2004.



G. Heisler, O. McDaniel, and M. Dahl, "Measurements of normal-incidence impedance of six forest floors by the tube method," in *LRSP 2.2, New Orleans, LA USA*, 1984.



J. Hofmann and K. Heutschi, "Simulation of outdoor sound propagation with a transmission line matrix method," *Appl. Acoust.*, vol. 68, pp. 158–172, 2005.



S. Y. Hui and A. Crockford, "Wind profiles and forests," Master's thesis, Technical University of Denmark, 2007.



W. H. T. Huisman, "Microclimate influence on sound propagation in vegetations," in *Internoise München*, 453–456, 1985.



W. H. T. Huisman and K. Attenborough, "Reverberation and attenuation in a pine forest," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 90, pp. 2664–2677, 1991.



W. H. T. Huisman, M. J. M. Martens, R. W. B. Beekwilder, and A. M. J. A. Linders, "Measured and modelled sound transmission in a pine forest," in *Internoise Avignon*, 1583–1586, 1988.



G. B. Jónsson and F. Jacobsen, "A comparison of two engineering models for outdoor sound propagation : Harmonoise and nord2000," *Acta Acustica*, vol. 94, pp. 282–289, 2008.



Y. Kagawa, T. Tsuchiya, B. Fujii, and K. Fujioka, "Discrete Huygens' model approach to sound wave propagation," *J. Sound Vib.*, vol. 218, pp. 419–444, 1998.

○○○○

○○○○○

○○○

○○○

○○



J. Kragh, "Road traffic noise attenuation by belts of trees and bushes,," tech. rep., Danish acoustic laboratory, report 31, 1982.



C. Leroy, *La forêt redécouverte*.  
Belin, 2009.



W. K. Lui and K. M. Li, "The scattering of sound by a long cylinder above an impedance boundary," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 127, pp. 664–674, 2009.



D. van Maercke and J. Defrance, "Developpment of an analytical model for outdoor sound propagation within the harmonoise project," *Acta Acustica*, vol. 93, pp. 201–212, 2007.



M. Martens, L. van der Heijden, H. Walhaus, and W. van Rems, "Classification of soils based on acoustic impedance, air flow resistivity, and other physical soil parameters," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 78, pp. 970–980, 1985.



M. J. M. Martens and A. Michelsen, "Absorption of acoustic energy by plant leaves," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 69, pp. 303–306, 1981.



B. S. Nelson, "Reliability of sound attenuation in florida scrub habitat and behavioral implications," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 113, pp. 2901–2911, 2003.



NMPB'08, "Prévision du bruit routier," in *Méthode de calcul de propagation du bruit incluant les effets météorologiques*, 2008.



S. Onder and Z. Kocbeker, "Importance of the green belts to reduce noise pollution and determination of roadside noise reduction effectiveness of bushes in konya, turkey," *World Acad. Sc., Eng. and Tech.*, vol. 66, pp. 639–642, 2012.



V. E. Ostashev, D. K. Wilson, and S. N. Vecherin, "Effect of randomly varying impedance on the interference of the direct and ground-reflected waves," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 130, pp. 1844–1850, 2011.



M. Padgham, "Reverberation and frequency attenuation in forest - implications for acoustic communication in animals," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 115, pp. 402–410, 2003.



M. Price, "Sound attenuation through trees : measurements and models," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 84, pp. 1836 – 1844, 1988.



M. Provost, *Dynamique de la biodiversité dans la Serra do Itajaí, Brésil : une approche bioacoustique de la conservation*.  
PhD thesis, Université de Montréal, 2010.



F. Ramade, *Eléments d'écologie : écologie fondamentale*.  
Sciences Sup, 2003.



H. Sakai, S. Sato, and Y. Ando, "Orthogonal acoustical factors of sound fields in a forest compared with those in a concert hall," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 104, pp. 1491–1497, 1998.



H. Sakai, S. Shibata, and Y. Ando, "Orthogonal acoustical factors of a sound field in a bamboo forest," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 109, pp. 2824–2830, 2001.



E. Salomons, D. van Maercke, J. Defrance, and F. de Roo, "The harmonoise sound propagation model," *Act*, vol. 97, pp. 62–74, 2011.



E. M. Salomons, *Computational atmospheric acoustics*.  
Kluwer academic publishers, 2001.



M. E. Swearingen and D. G. Albert, "Variability in acoustic scattering of impulsive signals in forested environments," in *Internoise*, 2012.



M. E. Swearingen and D. C. Swanson, "A numerical model for point source scattering from an impedance cylinder placed normal to an impedance plane," *Acta Acustica*, vol. 98, pp. 523–533, 2012.



A. Tarero, J. Gonzalez, M. Machimbarrena, and M. Arenal, "Temperature and trees influence on propagation outdoor," in *International Congress on Acoustics*, 2001.

○○○○

○○○○○

○○○

○○○

○○



A. Tarero, M. Martin, J. Gonzalez, M. Machimbarrena, and F. Jacobsen, "Sound propagation in forests : a comparison of experimental results and values predicted by the nord 2000 model," *Appl. Acoust.*, vol. 69, pp. 662–671, 2008.



A. Tunick, "Coupling meteorology to acoustics in forests," tech. rep., US Army - Army research laboratory, 2002.



A. Tunick and M. E. Swearingen, "Numerical model to calculate microphysical influences on sound wave propagation in forests," *Appl. Acoust.*, vol. 70, pp. 857–867, 2009.



V. Twersky, "On scattering of waves by random distributions. i. free space scatterer formalism," *J. Math. Phys.*, vol. 3, pp. 700–715, 1962.



O. Umnova, K. Attenborough, and C. M. Linton, "Effects of porous covering on sound attenuation by periodic arrays of cylinders," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 119, pp. 278–284, 2006.



O. Umnova, C. M. Linton, and K. Attenborough, "Multiple scattering by arrays of large cylinders," in *The 3rd International congress and exposition on noise control and engineering. Inter-noise*, 2004.



T. Watanabe and S. Yamada, "Sound attenuation through absorption by vegetation," *J. Acoust. Soc. Jpn.*, vol. 17, pp. 175–182, 1996.



T. Wiens, S. Bradley, and K. George, "Experimental chracterization of sound propagation in a dense new zealand forest," in *Internoise Shanghai*, 2008.



J. Wunderli and E. Salomons, "A model to predict the sound reflection from forests," *Acta Acustica*, vol. 95, pp. 76–85, 2009.



J. M. Wunderli, "An extended model to predict reflections from forests," *Acta Acustica*, vol. 88, pp. 263–278, 2012.

