

Modélisation de la propagation acoustique à moyenne distance du bruit des trains à grande vitesse

Benjamin Cotté, Philippe Blanc-Benon
LMFA
UMR CNRS 5509
École Centrale de Lyon
36 avenue Guy de Collongue
69134 Ecully CEDEX
E-mail : benjamin.cotte@ec-lyon.fr
E-mail : philippe.blanc@ec-lyon.fr

Cora Cremezi-Charlet, Franck Poisson
SNCF
Direction de l'Innovation et de la Recherche
45 rue de Londres
75739 Paris CEDEX 08
E-mail : cora.cremezi@sncf.fr
E-mail : franck.poisson@sncf.fr

Résumé

Cette étude a pour but d'identifier les paramètres influant sur la propagation acoustique du bruit émis par des trains à grande vitesse (TGV). Une campagne expérimentale est présentée, pendant laquelle des passages de TGV ont été enregistrés à des distances de la voie comprises entre 7,50 et 600 mètres. Des mesures de température et de vent ont également été réalisées pour caractériser les conditions atmosphériques pendant les passages. Les profils moyens de température et de vent sont estimés à partir des mesures à l'aide de la théorie de la similitude. Un modèle de propagation du bruit de TGV est ensuite présenté. Dans une première étape, le train est décomposé en un ensemble de sources équivalentes. Dans une seconde étape, un modèle de propagation analytique est utilisé pour calculer le niveau acoustique au récepteur. Les résultats du modèle sont comparés aux mesures en champ acoustique proche.

Abstract

This work is aimed at identifying the relevant parameters for high speed train noise propagation. An experimental campaign is presented during which high speed train pass-bys have been recorded at distances from the track ranging from 7.50 to 600 meters. Temperature and wind speed measurements have also been performed to characterize the atmospheric conditions during the pass-bys. Mean temperature and wind speed profiles are estimated from the measurements using similarity theory. A model for high speed train noise propagation is then presented. In a first step, the train is modelled as a set of equivalent sources. In a second step, an analytical propagation model is used to calculate the sound pressure level at the receiver. Model results are compared to the measurements in the near-field.

D

e nombreuses études se sont intéressées à la propagation acoustique dans l'atmosphère pour une source stationnaire et ponctuelle, et les phénomènes physiques à considérer sont connus : effet de l'impédance du sol et de la topographie, réfraction due aux profils moyens de température et de vent, diffusion par la turbulence atmosphérique, etc. Dans le contexte du bruit ferroviaire, et en particulier du train à grande vitesse (TGV), la source est en mouvement, et ses dimensions sont grandes par rapport aux longueurs d'onde acoustiques ; la source ne peut donc plus être considérée comme compacte. Une campagne expérimentale est présentée dans le paragraphe 2, pendant laquelle des mesures acoustiques ainsi que des mesures météorologiques ont été réalisées. Puis un modèle de propagation du bruit de TGV est proposé dans le paragraphe 3. Ce modèle est basé sur la décomposition du train en un ensemble de sources ponctuelles équivalentes. Il peut être utilisé pour déterminer les sources sur lesquelles doivent porter les efforts de réduction, et évaluer l'impact des solutions de réduction de bruit au niveau des sources sur le bruit au passage. Ce modèle permet également d'étudier l'effet des conditions de propagation de façon réaliste.

Mesures acoustiques aux passages de TGV

Une campagne de mesures a été menée par l'Agence d'Essais Ferroviaires en mai 2003 sur le site de Pierrelatte. Des mesures de niveaux acoustiques ont été réalisées à courte distance (7,50 m et 25 m) et à moyenne distance (150 m, 300 m et 600 m). Dans le même temps, un mât météo a permis de mesurer la température, la vitesse du vent et sa direction à 2 et 10 mètres de hauteur. Enfin, l'impédance du sol a été mesurée en différents points sur le site expérimental. Sept passages de TGV pendant l'après-midi du 26 mai 2003 sont étudiés ici ; la vitesse de ces passages est proche, entre 295 et 300 Km/h. Le niveau de pression équivalent pondéré A sur le temps T est défini par :

$$L_{Aeq,T} = 10 \log_{10} \left[\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} 10^{L_A(t)/10} dt \right], \quad (1)$$

avec $L_A(t)$ le niveau de pression pondéré A instantané.

En champ acoustique proche, les passages sont caractérisés par le niveau équivalent sur le temps de passage $L_{Aeq,tp}$, où $tp = L_{train}/V$, avec L_{train} la longueur du train et V sa vitesse ($tp = 2,4s$ à 300 Km/h). Les signatures temporelles et les spectres en tiers d'octave de $L_{Aeq,tp}$ sont tracés sur la figure 1 pour les sept passages. À $7,50\text{ m}$, les signatures présentent des pics de niveau de pression qui marquent le passage des bogies, ces pics étant plus marqués au niveau des motrices avant et arrière à cause des sources de bruit liées à la traction (moteurs, transmission, refroidissement, ...). À 25 m , les signatures sont plus régulières, même si les niveaux sont toujours plus élevés au début et à la fin des passages. On observe que les signatures et les spectres correspondant aux différents passages se superposent bien, à $7,50\text{ m}$ comme à 25 m . Ils seront utilisés dans le paragraphe 3 pour valider les résultats du modèle.

attribués au moins en partie aux variations des conditions atmosphériques entre les passages. À ces distances, les passages sont caractérisés par le niveau équivalent sur le temps d'exposition $L_{Aeq,te}$, où te est le temps pendant lequel le niveau de pression est à moins de 10 dB(A) de son maximum. Le temps d'exposition te est compris entre 5 et 6 secondes à 150 mètres , et entre 8 et 15 secondes à 300 mètres . Cette augmentation de te avec la distance de propagation s'observe au niveau des signatures temporelles de la figure 2 ; celles-ci sont plus étalées dans le temps à 300 m qu'à 150 m . Les spectres en tiers d'octave de $L_{Aeq,te}$ sont tracés sur la figure 2. On observe que la dispersion entre les passages est de l'ordre de 5 à 6 dB(A) à 300 m , contre 2 à 3 dB(A) seulement à 150 m . Si on compare ces spectres aux spectres de $L_{Aeq,tp}$ en champ proche, on remarque une évolution de la forme

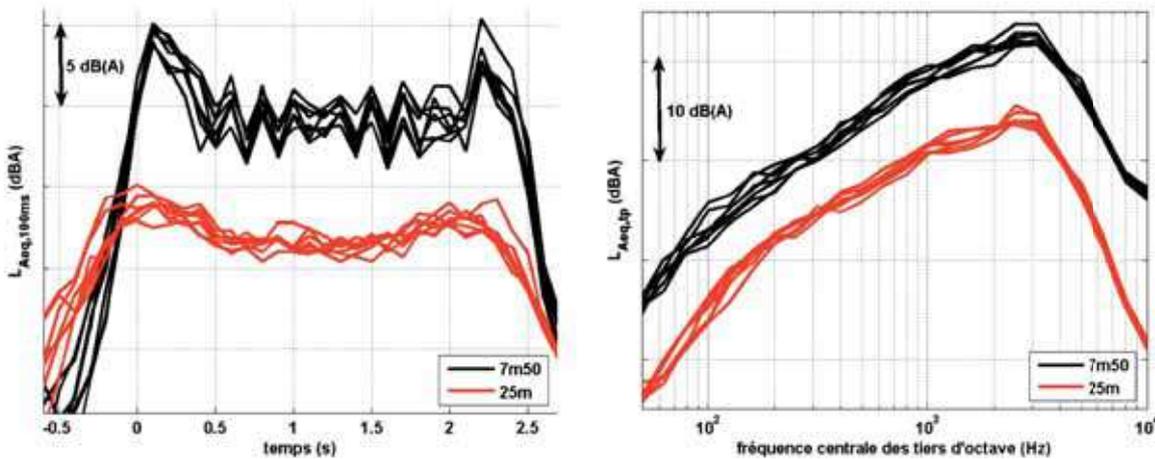


Fig. 1 : Signatures temporelles (gauche) et spectres en tiers d'octave de $L_{Aeq,tp}$ (droite) pour 7 passages de TGV à $7,50\text{ m}$ et 25 m de la voie.

Les signatures temporelles des sept mêmes passages à 150 m et 300 m de la voie sont tracées sur la figure 2. À ces distances, on n'observe plus les forts niveaux au début et à la fin des passages, comme c'était le cas en champ proche. À 150 m , les passages se superposent bien ; à 300 m , par contre, des écarts importants apparaissent qui peuvent être

des spectres avec la distance de propagation. Les niveaux sont plus fortement atténués aux hautes fréquences qu'aux basses fréquences, en raison notamment de l'augmentation du coefficient d'absorption atmosphérique avec la fréquence acoustique. Pour étudier l'effet des conditions atmosphériques sur la propagation acoustique, il est nécessaire de connaître

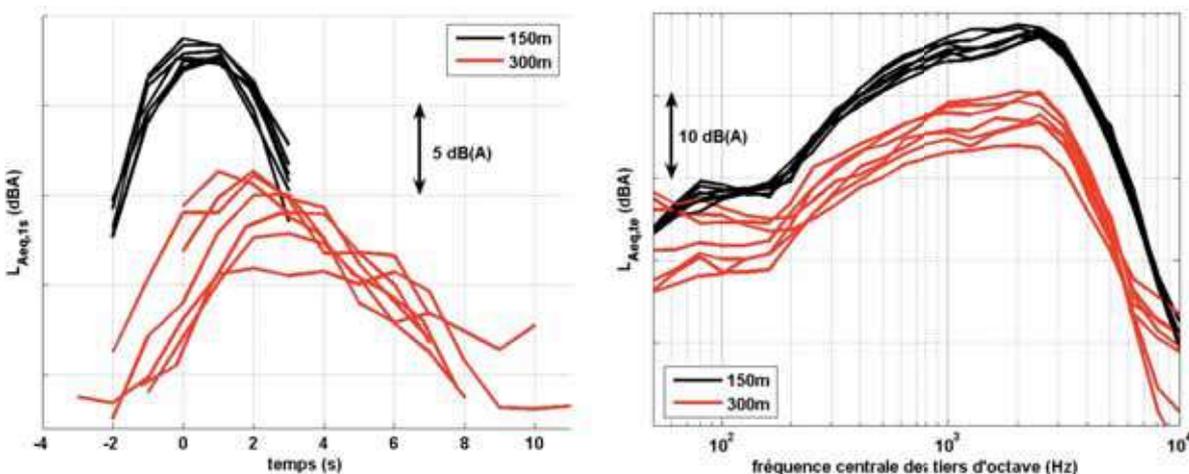


Fig. 2 : Signatures temporelles (gauche) et spectres en tiers d'octave de $L_{Aeq,te}$ (droite) pour 7 passages de TGV à 150 m et 300 m de la voie.

les profils moyens de température et de vent, ainsi que la direction du vent dans l'atmosphère. À partir des mesures de température et de vitesse de vent à 2 et 10 mètres de hauteur, ces profils peuvent être estimés à l'aide de la théorie de la similitude, dont les principaux paramètres sont la vitesse de friction u^* et l'échelle de température θ^* . La théorie de la similitude est valide dans la couche de surface de l'atmosphère, à condition que le sol soit suffisamment plat et homogène (Stull, 1988). En effet, les relations de similitude sont valides pour des hauteurs comprises entre $-2L_{MO}$ et L_{MO} , avec L_{MO} l'échelle de Monin-Obukhov. Trois profils estimés à différents moments de l'après-midi du 26 mai sont tracés sur la figure 3 ; les paramètres u^* , θ^* et L_{MO} associés à ces profils sont également donnés. On observe que le profil de température près du sol change notablement, avec un gradient de température qui passe de négatif à positif entre 15h17' et 18h31'.

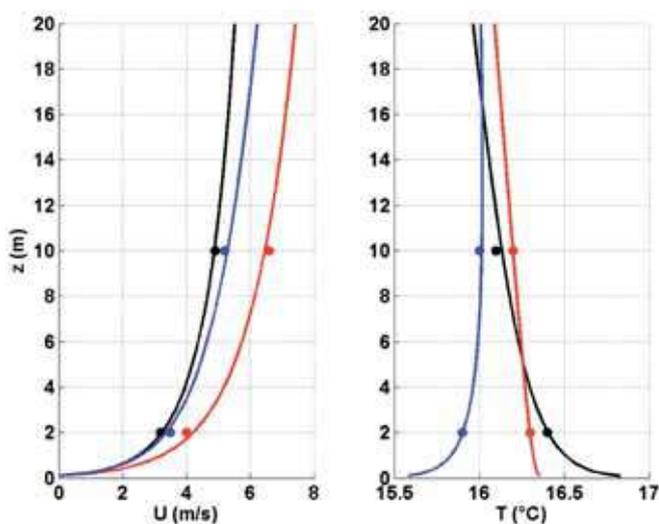


Fig. 3 : Profils moyens de vent U et de température T estimés avec les relations de similitude à partir des mesures à des hauteurs de 2 et 10 m (cercles). Ces profils correspondent aux passages de TGV de 15h17' (noir), 16h37' (rouge), et 18h31' (bleu). Les paramètres u^* , θ^* et L_{MO} associés à ces trois profils sont également donnés

	Heure	u^* (m/s)	θ^* (K)	L_{MO} (m)
-	15h17'	0.45	-0.05	-260
-	16h37'	0.58	-0.01	-4700
-	18h31'	0.46	+0.05	+320

Pour ces trois profils, l'échelle de Monin-Obukhov est supérieure à 200 mètres en valeur absolue. Les relations de similitude sont donc valides jusqu'à des hauteurs importantes, largement suffisantes pour la propagation du son sur des distances inférieures au kilomètre. Ces fortes valeurs de L_{MO} correspondent à une atmosphère neutre, où les effets de cisaillement dominent les effets de convection.

Modèle de propagation du bruit de TGV

Le calcul du niveau de pression au récepteur se déroule en deux étapes : caractérisation de la source et propagation acoustique. Les modèles prédictifs existants considèrent le train comme une source linéique ou comme un ensemble de sources ponctuelles (van Leeuwen, 2000). La source linéique est couramment utilisée pour modéliser le bruit de roulement, correspondant au contact roue/rail (Rathe, 1977 ; Kurzweil et al., 1979 ; Ringheim, 1988). Les sources ponctuelles sont généralement mieux adaptées pour modéliser les autres sources de bruit (bruit de traction, bruit d'origine aérodynamique), car

ces sources ne sont généralement pas réparties uniformément le long du train (Kurzweil et al., 1979 ; Ringheim, 1988). Dans cette étude, on s'intéresse aux TGV circulant à des vitesses de l'ordre de 300 Km/h. La contribution des sources de bruit aérodynamique du TGV est importante à ces vitesses (Mellet et al., 2006), c'est pourquoi une modélisation par un ensemble de sources ponctuelles est choisie. La figure 4 présente la géométrie et les notations utilisées par la suite. Le mouvement du train est supposé rectiligne et uniforme.

Dans le modèle présenté ici, le TGV est décrit par 31 sources équivalentes, réparties en cinq catégories, comme le montre la figure 5. Le bruit de roulement est modélisé par une source équivalente pour deux roues. Les quatre autres types de sources sont d'origine aérodynamique et correspondent à la zone bogie, aux ventilateurs de refroidissement des moteurs de traction, à la cavité du pantographe, et au pantographe.

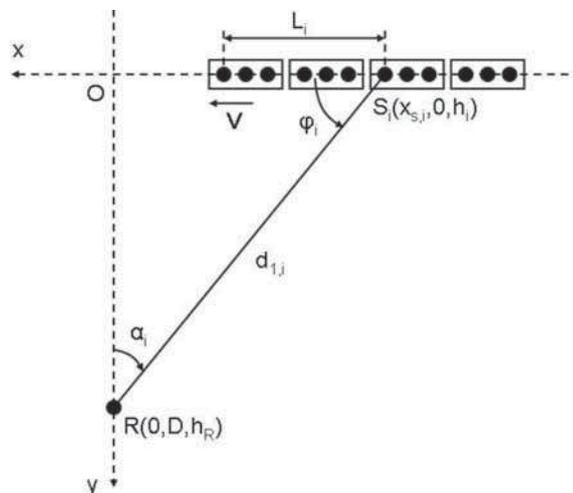


Fig. 4 : Géométrie pour le modèle de sources équivalentes et notations.

Chaque source est décrite par un spectre en tiers d'octave du niveau de pression à 1 mètre, une directivité horizontale et une directivité verticale. Les caractéristiques des sources ont été obtenues à partir des résultats de différents projets, parmi lesquels on peut citer le projet DEUFRAKO K2 (Talotte et al., 2000 ; Mellet et al., 2006).

Les résultats du modèle sont comparés aux mesures en champ proche de la figure 1. La voie est posée sur une couche de ballast de 75 cm épaisseur, qui repose elle-même sur un remblai de 2,50 m de hauteur. Il est important de prendre en compte cette géométrie pour calculer correctement l'atténuation due à l'effet de sol. L'impédance du sol est

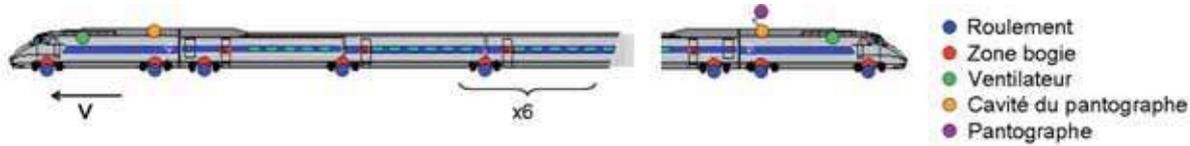


Fig. 5 : Modèle de 31 sources équivalentes pour le TGV.

Au temps t au récepteur, le niveau de pression est obtenu en sommant les contributions de chacune des sources équivalentes S_i . Le niveau de pression pour la source S_i sur le tiers d'octave (n) est calculé à l'aide des relations :

$$L_i^n = W_i^n - 20 \log_{10}(d_{1,i}) + (A_e)_i^n, \quad (2)$$

$$W_i^n = L_{i,1m}^n(V, \alpha_i) + D_i^n, \quad (3)$$

où W_i^n est le terme source, $-20 \log_{10}(d_{1,i})$ correspond à l'atténuation géométrique, avec $d_{1,i}$ la distance entre la source et le récepteur, et $(A_e)_i^n$ est l'atténuation due à la propagation du son dans l'atmosphère. La distance $d_{1,i}$ peut être exprimée en fonction de la vitesse V , du temps au récepteur t et des paramètres géométriques (voir par exemple Morse et Ingard (1968)). Le terme source est calculé selon l'équation (3), avec $L_{i,1m}^n(V, \alpha_i)$ le niveau de pression à 1 mètre pour la source S_i corrigé par l'effet Doppler, et D_i^n la correction de directivité. L'atténuation $(A_e)_i^n$ due aux effets de propagation dans l'atmosphère est calculée avec un modèle analytique qui prend en compte la réflexion d'une onde sphérique sur un sol impédant et l'absorption atmosphérique (Chessel, 1977 ; Salomons, 2001). Le calcul est réalisé sur les tiers d'octave entre 50 et 5000 Hz.

modélisée par le modèle phénoménologique de Hamet et Bérenghier à trois paramètres (Bérenghier et al., 1997). Pour le ballast, la résistivité au passage de l'air est 20 kN.s/m^4 et la porosité est $0,6$; pour le remblai et pour le sol, la résistivité au passage de l'air est 100 kN.s/m^4 et la porosité est $0,4$. La tortuosité est $2,5$ dans les deux cas. Les résultats du modèle sont comparés aux mesures dans la figure 6. Les signatures temporelles sont en bon accord, même si on remarque qu'il y a un décalage au début des signatures à 25 m . Il existe quelques différences entre les spectres de $L_{\text{Aeq,tp}}$ calculés et mesurés, notamment sur les tiers d'octave entre 200 et 400 Hz . Par ailleurs, le modèle d'impédance de sol de Delany-Bazley a été testé et permet également d'obtenir des résultats satisfaisants. Les principales caractéristiques des passages de TGV sont donc bien reproduites par le modèle. Les différences observées entre résultats expérimentaux et numériques peuvent provenir des modèles de source, en particulier pour les sources aérodynamiques qui ne sont pas parfaitement caractérisées.

Conclusions

Des résultats expérimentaux et numériques ont été présentés afin d'identifier les principaux paramètres influant sur la propagation acoustique du bruit des TGV. Des mesures

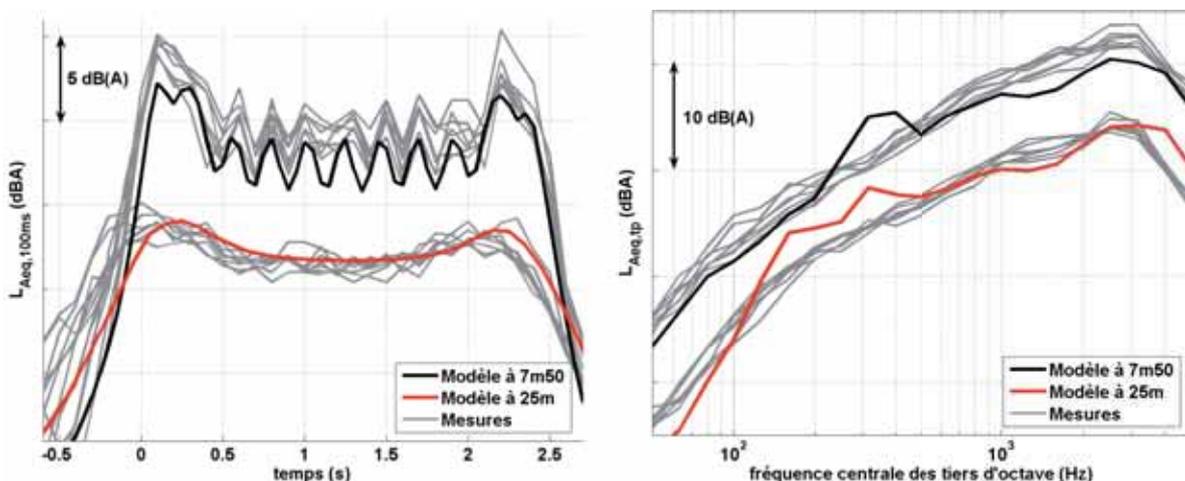


Fig. 6 : Signatures temporelles (gauche) et spectres en tiers d'octave de $L_{\text{Aeq,tp}}$ (droite) mesurés et calculés à 7,50 m et 25 m de la voie.

acoustiques réalisées à différentes distances de la voie ont permis d'observer l'évolution des signatures temporelles et des spectres en tiers d'octave des passages en fonction de la distance de propagation. On a montré également qu'il était possible d'estimer les profils moyens de température et de vent à partir de mesures à deux hauteurs à l'aide de la théorie de la similitude. Un modèle de propagation du bruit de TGV a été présenté ; il est basé sur une décomposition du train en un ensemble de sources ponctuelles équivalentes. L'accord entre les résultats du modèle et les mesures est bon en champ proche, même si les modèles de source pourraient être améliorés. Le modèle de propagation utilisé ne prend pas en compte les effets météorologiques, qui semblent importants pour des distances de propagation supérieures à 300 mètres, comme le montre les mesures de la figure 2. Dans de futurs travaux, le modèle pourra être couplé avec un modèle de propagation numérique incluant les profils de température et de vitesse dans l'atmosphère, tel que le modèle d'équation parabolique (Gauvreau et al., 2002).

Remerciements

Nous voudrions remercier Paul Vinson et Fabien Létourneaux de l'Agence d'Essais Ferroviaires pour leur aide concernant l'analyse des données expérimentales. Ces travaux sont réalisés dans le cadre d'une bourse de thèse BDI cofinancée par le CNRS et la SNCF, et s'inscrivent dans les thématiques du GDR CNRS 2493 « Bruit des transports ».

Références bibliographiques

- Bérenghier, M.C., Stinson M.R., Daigle G.A. & Hamet, J.F. Porous road pavements: Acoustical characterization and propagation effects. *J. Acoust. Soc. Am.* 101, pp 155-162, 1997
- Chessell, C.I. Propagation of noise along a finite impedance boundary. *J. Acoust. Soc. Am.* 62, pp 825-834, 1977
- Gauvreau, B., Bérenghier, M., Blanc-Benon, Ph. & Depollier, C. Traffic noise prediction with the parabolic equation method: Validation of a split-step Padé approach in complex environments. *J. Acoust. Soc. Am.* 112, pp 2680-2687, 2002
- Kurzweil, L.G., Cobb, W.N. & Kendig, R.P. Propagation of noise from rail lines. *J. Sound. Vib.* 66, pp 389-405, 1979
- Mellet, C., Létourneaux, F., Poisson, F. & Talotte, C. High speed train noise emission: Latest investigation of the aerodynamic/rolling noise contribution. *J. Sound. Vib.* 293, pp 535-546, 2006
- Morse, P.M. & Ingard K.U. *Theoretical Acoustics*. Princeton University Press, 1968.
- Rathe, E.J. Railway noise propagation. *J. Sound. Vib.* 51, pp 371-388, 1977
- Ringheim, M. Sound propagation and the prediction of railway noise. *J. Sound. Vib.* 120, pp 363-370, 1988
- Salomons, E.M. *Computational Atmospheric Acoustics*. Kluwer Academic, 2001
- Stull., R.B. *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. Kluwer Academic, 1988
- Talotte C., Guerrand S. & Gaumain C. Simulations of the noise radiation of high speed trains. *Proceedings of INTERNOISE 2000*, Nice, France, 2000
- Van Leeuwen, H.J.A. Railway noise prediction models: A comparison. *J. Sound. Vib.* 231, pp 975-987, 2000