

Modèle global de synthèse sonore du bruit d'un véhicule au passage : application aux véhicules ferroviaires et routiers

E. Bongini¹, S. Molla², F. Poisson¹, P.-O. Mattéi², P.-E. Gautier¹, D. Habault²

¹ SNCF, Direction de l'Innovation et de la Recherche, 73379 Paris, [estelle.bongini, franck.poisson, pierre-etienne.gautier]@sncf.fr

² Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique, CNRS, 13402 Marseille France, [molla, mattei, habault]@lma.cnrs-mrs.fr

Résumé

La réduction du bruit des transports en milieu urbain est une thématique de recherche très active, au centre des préoccupations environnementales actuelles. La problématique à laquelle nous nous attachons ici est le développement d'un logiciel de synthèse sonore du passage d'un véhicule (voiture, train). Dans l'optique de tests perceptifs d'évaluation de la gêne causée par le bruit, il devra fournir le niveau global et le spectre rayonné ainsi que le signal temporel correspondant à une configuration donnée. Un modèle acoustique du véhicule représenté par le biais de sources équivalentes est présenté. Plusieurs étapes sont abordées ici: (1) la modélisation du véhicule, (2) la caractérisation des sources de bruit, (3) les campagnes de mesures, (4) le choix et le développement d'un modèle de synthèse sonore.

Introduction

Le projet européen SILENCE¹ vise à la réduction du bruit causé par les transports routier et ferroviaire en milieu urbain. Dans ce cadre, une étude perceptive aura lieu dans le but d'identifier les phénomènes gênants pour le riverain. Il est donc nécessaire de développer au préalable un outil efficace de synthèse sonore de bruits de véhicules au passage, afin de pouvoir générer de nombreux signaux correspondant à différentes configurations, réelles ou envisageables. Pour ces raisons, le logiciel doit s'appuyer sur des méthodes générant à la fois des temps de calcul raisonnables et une synthèse sonore de qualité.

Nous abordons ici la modélisation du véhicule sous forme de sources équivalentes. La caractérisation de ces sources est actuellement menée suite à différentes campagnes de mesures. Ainsi, nous proposons le schéma de synthèse sonore qui permet de simuler le passage d'un véhicule du point de vue d'un auditeur fixe (typiquement: 7.5 m de la voie pour le ferroviaire). La prise en compte de l'effet du mouvement du véhicule (effet Doppler) et de la propagation (effet de sol) permettent une restitution sonore physiquement cohérente et fidèle à la réalité. Nous discuterons finalement de l'interaction entre modèle de synthèse et modélisation des sources.

La Figure 1 présente le modèle global de simulation du passage d'un véhicule. L'outil de simulation se décompose donc en trois blocs interactifs : la définition acoustique du véhicule, à travers celle des sources équivalentes, la donnée du scénario du passage et enfin

la synthèse sonore.

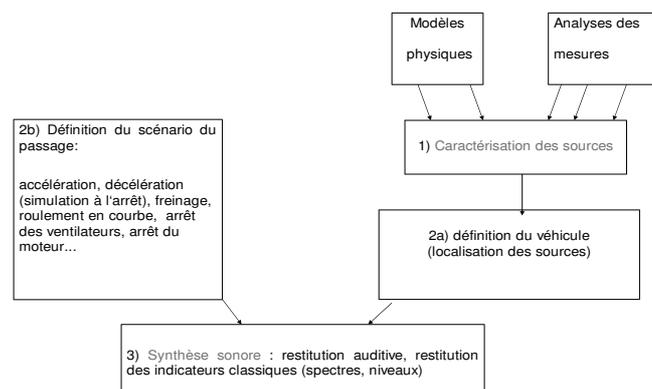


Figure 1: Schéma de la modélisation globale

Modélisation du véhicule

Sources équivalentes

Le bruit au passage d'un véhicule, qu'il soit routier ou ferroviaire, est une somme de différentes contributions acoustiques, chacune de ces contributions pouvant être modélisée par une (ou quelques) sources équivalentes ponctuelles localisées sur le véhicule, caractérisées par un spectre évoluant dans le temps et un diagramme de directivité.

Ces contributions, dans le cas du train et pour des vitesses urbaines, sont :

- le bruit de roulement, qui provient de l'interaction roue/rail est modélisée à l'aide du logiciel TWINS [1], qui fournit les spectres en tiers d'octave de ce type de sources,
- le bruit de traction, qui englobe les contributions acoustiques du moteur, de la chaîne de traction et des auxiliaires, et qui est propre à chaque type de matériel. Il doit donc faire l'objet de campagnes de mesure dédiées, qui sont décrites plus loin,
- les bruits de crissement (au freinage et en courbe), font actuellement l'objet d'études et de modélisations [2] & [3]. Jusqu'à la validation de ces modèles, il seront pris en compte par l'intermédiaire d'enregistrements dans notre outil de simulation sonore.

Ces différentes contributions peuvent être modélisées par des sources équivalentes, selon leur étendue sur le véhicule et leurs caractéristiques fréquentielles.

¹ce travail est mené dans le cadre du projet européen SILENCE, subventionné par le 6^{ème} PCRD.

Campagne de mesures

La caractérisation des sources de traction a été réalisée pour un AGC bimode (Autorail Grande Capacité pouvant fonctionner en mode de traction électrique ou diesel). Ce véhicule constitue le matériel ferroviaire de référence pour la mise au point de notre modèle de synthèse. Lors d'une campagne de mesure organisée dans le cadre du projet SILENCE, une mesure spécifique a été menée visant à caractériser le spectre et la directivité des sources de traction. Les sources étant particulièrement étendues (certaines pouvant atteindre 3 m de long sur 1 m de haut), une méthode classique de caractérisation par un réseau de microphones englobant la source n'était pas applicable. Il a été nécessaire d'employer une méthode peu conventionnelle pour mesurer la directivité. Un mât vertical de 12 microphones a été placé à 1 m de la voie devant lequel le train s'est déplacé très lentement. Grâce à un pilotage des différents auxiliaires, assuré par le constructeur, les sources de bruit de traction ont été mesurées de façon isolée. La répartition des microphones sur le mât permet d'établir à chaque instant un diagramme de directivité verticale de la source. Le déplacement du train devant le mât permet quant à lui d'obtenir la directivité horizontale de la source. Ceci reste réalisable tant que les sources sont suffisamment isolées les unes des autres.



Figure 2: Passage de l'AGC devant le mât de microphones lors de la campagne de mesures.

Caractérisation des sources

L'exploitation de ces mesures est en cours. Des analyses classiques des mesures (densité spectrale de puissance des signaux, spectrogramme) ont permis de différencier les harmoniques émergentes et le bruit de fond large bande pour chaque source physique. Chacune de ces composantes pourra être modélisée par une source

équivalente qui lui est propre (il faut noter que le spectre du bruit de fond et les harmoniques émergentes peuvent ne pas avoir la même localisation spatiale). La hauteur de cette source équivalente correspond à celle du micro ayant enregistré les plus forts niveaux durant le passage, dans le domaine fréquentiel considéré. Selon

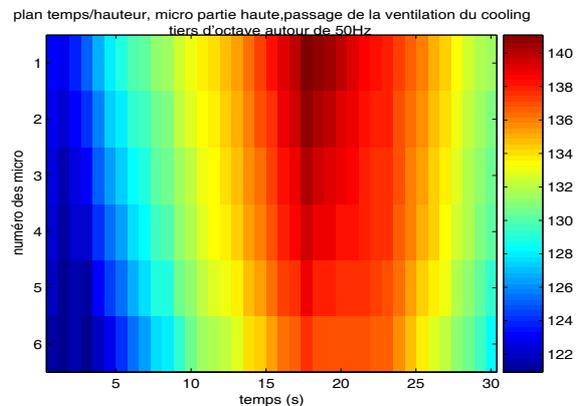


Figure 3: Plan temps/hauteur pour le tiers d'octave centré sur 50 Hz lors du passage du cooling.

l'évolution temporelle du niveau au cours du passage de la composante étudiée, les sources équivalentes seront soit monopolaire, soit dipolaire, soit d'ordre supérieur. Une procédure d'optimisation a été développée, permettant d'obtenir les positions et niveaux en puissance des monopôles ou dipôles équivalents qui vont représenter ces sources. Il s'agit, en jouant sur ces paramètres (position et puissance) de minimiser l'écart entre les niveaux successifs au passage de la composante réelle de la source et les niveaux successifs au passage de la source équivalente. Afin de faciliter la procédure d'optimisation, des modèles de sources pré-établis dans la littérature, pour les sources type ventilateur ou échappement, sont actuellement à l'étude. L'idée est de déterminer le modèle de source "simple" le plus proche de la source physique. Cette méthode de caractérisation pourrait permettre, avec une mise en œuvre plus légère que les méthodes classiques d'antennerie (mât vertical de 12 microphones), d'avoir une description suffisante des sources de bruit de traction, pour n'importe quel type de matériel.

Modélisation du passage et synthèse sonore

L'outil de synthèse sonore que nous développons doit fournir la pression acoustique rayonnée par le passage d'un véhicule au niveau d'un récepteur fixe. D'un point de vue acoustique, cette étude se situe en champ proche, puisqu'en milieu urbain. Typiquement, le récepteur se trouve à 7.5 m de la voie pour le ferroviaire et autour de 2 m pour le routier, à une hauteur de l'ordre de 1.70 m. Les temps de calculs pour la synthèse sonore sont aussi un élément déterminant dans le choix des méthodes, puisqu'une utilisation dans le cadre d'études paramétriques menées pour des tests psychoacoustiques n'autorise pas de traitements trop longs.

Choix de la méthode

Comme nous l'avons vu, un véhicule est représenté comme un assemblage de sources équivalentes réparties spatialement. Il est donc naturel de représenter la pression rayonnée comme la superposition des contributions de chacune des sources. Pour N sources S_n , la pression p au point M et au temps t s'exprime:

$$p(M, t) = \sum_{n=1}^N p_{S_n}(M, t) \quad (1)$$

On distingue deux types de sources: harmoniques et bruit large bande. Logiquement, deux représentations différentes leurs sont associées.

Pour une source monofréquentielle omnidirectionnelle S de pulsation w , de longueur d'onde $k = w/c$, d'amplitude unité et à la distance $d(S, M)$ du point M , la pression reçue au point M est:

$$p_S(M, t) = A(t) \Re(e^{ikd(S, M) - i(wt + \phi)}) \quad (2)$$

Le paramètre ϕ représente la phase à l'origine et t le temps. $A(t)$ est le terme d'amplitude qui tient compte des évolutions du champ au cours de la propagation de S à M . Si une source correspond à plusieurs fréquences distinctes, harmoniques ou non, un sommation de contributions du type p_S est effectuée.

Pour une source de bruit large bande, plutôt qu'utiliser une méthode de synthèse additive très coûteuse en temps de calcul, une synthèse par FFT inverse et chevauchement dans le temps lui est préférée. Cela permet de bénéficier de la rapidité de la transformation, tout en facilitant les traitements ultérieurs (voir la section suivante). Ce choix autorise à procéder à la manière d'un filtrage variant dans le temps par transformée de Fourier inverse à court terme [4]. Typiquement, cette approche consiste à construire un "plan Temps-Fréquence" dans lequel seront pris en compte les effets du passage avant inversion vers le domaine temporel.

Effet Doppler

Si l'on se place dans le cas de sources stationnaires², deux phénomènes apparaissent lors du passage (mise en mouvement) du véhicule: l'effet Doppler et la réflexion sur le sol, qui affectent l'amplitude et la phase du signal émis par les sources [5, 6].

L'effet Doppler se traduit par une modulation en amplitude et en fréquence, en fonction de la vitesse v . Un signal émis par la source au temps τ sera reçu au temps $t = \tau + d(S(\tau), M)/c$. Ainsi, la fréquence f_M perçue en M , émise par une source harmonique de fréquence f_S est:

$$f_M(t) = \frac{f_S}{1 - \frac{v}{c} \cos \theta(\tau)} \quad (3)$$

L'amplitude subit quant à elle une modification d'un fac-

²nous verrons que leurs caractéristiques sont susceptibles d'évoluer au cours d'un scénario, notamment en fonction de la vitesse

teur A_{Dop} :

$$A_{Dop}(t) = \frac{1}{(1 - \frac{v}{c} \cos \theta(\tau))^2 \times \text{signe}(1 - \frac{v}{c} \cos \theta(\tau))} \quad (4)$$

Dans les équations précédentes, θ est l'angle entre la direction de la source S et le récepteur M .

Ainsi, dans l'optique de la synthèse sonore, ces effets sont directement implémentés sur la représentation temps-fréquence, pour une source de bruit large bande, avant inversion. Pour les sources harmoniques, un traitement

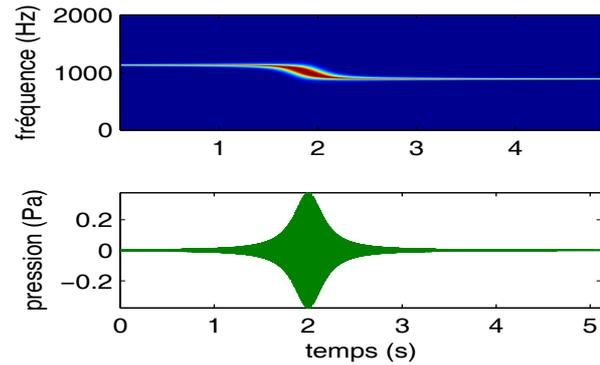


Figure 4: Source harmonique monopolaire à 1000Hz, $v = 40m.s^{-1}$. Param.: $h_S = 3m$, $h_M = 1.7m$, $r_0 = 7.5m$. Haut: spectrogramme; Bas: signal temporel.

direct dans le domaine temporel est préféré: soit par interpolation du signal sur le temps d'émission τ , soit par implémentation de retards variables en fonction du temps (voir par exemple [7]).

La Figure 4 illustre l'effet du passage d'une source dipolaire harmonique de fréquence 1000 Hz. Le véhicule se déplace à une vitesse $v = 40m.s^{-1}$. La source est située à une distance $h_S = 3m$ du sol, le récepteur à $h_M = 1.7m$ du sol et $r_0 = 7.5m$ de la voie. Le temps $t = 2s$ correspond au moment où source et récepteur sont les plus proches.

Effet de sol

La réflexion sur le sol est le deuxième phénomène à prendre en compte. Pour une source ponctuelle omnidirectionnelle émettant un signal harmonique (e^{-iwt}) au dessus d'un sol (considéré comme un milieu à réaction localisée, donc totalement caractérisé par son impédance normale spécifique réduite ζ), il existe des approximations analytiques du champ de pression rayonnée. Dans notre problème, il apparaît que l'approximation proposée par Ingard (voir par exemple [5], chapitre 4) est suffisamment précise dans le domaine considéré. En première approximation, l'impédance normale spécifique réduite du sol suivra le modèle de Delany et Bazley, ce qui permet l'utilisation d'un seul paramètre (la résistance à l'écoulement σ) pour caractériser le sol. L'approximation de p au point M est alors de la forme:

$$p(M) \approx -\frac{e^{ikd(S, M)}}{4\pi d(S, M)} - (R_0 + (1 - R_0)F) \frac{e^{ikd(S', M)}}{4\pi d(S', M)} \quad (5)$$

où R_0 est le coefficient de réflexion en onde plane, S' est l'image de la source S par rapport au sol, considéré comme un plan, et F est issu de l'évaluation d'une intégrale que nous ne détaillerons pas ici. Notons que R_0 et F dépendent de ζ et θ .

La Figure 5 représente le champ rayonné par une source monopolaire harmonique émettant à 1000 Hz au-dessus d'un sol moyennement réfléchissant. On voit que la prise en compte de l'effet de sol introduit de la "directivité" par le biais d'interférences entre champ direct et champ réfléchi.

L'introduction de l'effet de sol dans la synthèse sonore est immédiat par le calcul de la contribution des sources images correspondant aux sources du véhicule. Il existe évidemment deux types de sources images, harmoniques et larges bandes, modélisées comme précédemment.

Vers un scénario de passage...

La simulation d'une circulation urbaine sous-entend, outre l'impression de passage, une évolution du régime de fonctionnement du véhicule (accélération, décélération, freinage) qui entraîne des changements dans les caractéristiques définissant les différentes sources de bruit. Il s'agit alors de définir les relations de dépendance entre les régimes de fonctionnement de chaque source et la vitesse du train, et de traduire ces régimes de fonctionnement en termes acoustiques. Les mesures effectuées permettront de traduire acoustiquement les différents régimes des sources. La mise au point des relations de dépendance entre vitesse du train et régimes des différents auxiliaires doit se faire en collaboration avec les constructeurs.

La définition d'un scénario de passage doit permettre de connaître à chaque instant les caractéristiques des sources et du véhicule, afin de procéder à la synthèse sonore équivalente.

Dans l'optique de tests psycho-acoustiques, l'utilisateur doit aussi avoir la possibilité "d'activer ou désactiver" certaines sources, tout en restant cohérent à la réalité physique. On imagine en effet mal une voiture passer sans bruit de roulement.

Interactions entre caractérisation et synthèse sonore

Il est important de ne jamais dissocier caractérisation des sources et synthèse sonore. En effet, prenons l'exemple de la modélisation des sources de type ventilateur: sur un train, ce type d'auxiliaire présente des pales de 0,75 m de longueur. Son spectre est composé d'harmoniques émergentes liées à la vitesse de rotation et au nombre de pales, mais aussi d'un bruit de fond large bande. Pour modéliser des harmoniques émergentes, deux pistes sont possibles: d'une part, cette composante peut être modélisée par une seule source ponctuelle équivalente, en lui adjoignant une directivité "peu physique" pour représenter au mieux son envergure. D'autre part, elle peut être modélisée par un ensemble de sources ponctuelles équivalentes. Cependant, modéliser une source monofréquentielle de grande taille sous forme de plusieurs sources ponctuelles risque

de poser des problèmes de battements et d'interférences lors de la synthèse temporelle. Il faut donc vérifier le réalisme de la synthèse sonore des sources équivalentes. C'est pourquoi il est crucial de garder à l'esprit les conséquences des choix de modèles que nous mettons en place.

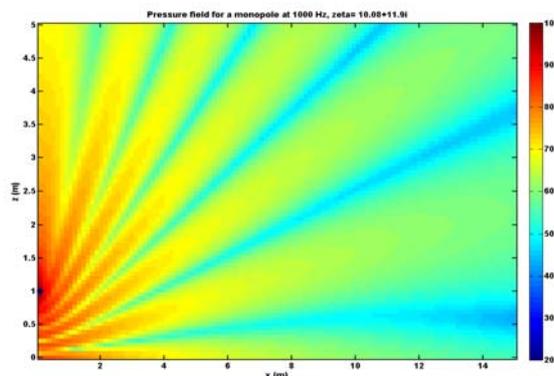


Figure 5: Réflexion sur le sol. Source: 1000 Hz, hauteur 1 m, sol à $z=0$, $\zeta = 10.08 + 11.9i$.

Conclusion

Nous avons posé les bases d'un modèle global de simulation sonore du passage d'un véhicule en milieu urbain. A partir de la caractérisation des sources d'un véhicule, il est alors possible de définir un scénario de passage, pour ensuite procéder à des synthèses réalistes. La prochaine étape du développement consiste à exploiter les mesures afin d'optimiser la caractérisation physique des sources. Il faudra ensuite les intégrer et tester leur bien-fondé dans le schéma de synthèse sonore proposé. Actuellement, les premières simulations sonores, basées sur des bruits de roulement, sont satisfaisantes, et les temps de calculs sont raisonnables (avec Matlab pour l'instant).

References

- [1] D.J.Thompson, "Wheel/rail noise generation", (I, II, III & IV), J. of Sound and Vib. 161, 1993, pp 387-466.
- [2] X. Lorang , F.Margiocchi, Q.S.Nguyen, P.E. Gautier, "TGV disc brake squeal", J. of Sound and Vib., Proc. 8th Int. Workshop on Railway Noise, 2006, à paraître.
- [3] De Beer, Janssens, Kooijman, van Vliet, "Curve squeal of railbound vehicles" (part 1, 2 & 3), Proc. of Internoise, Nice, France, 2000.
- [4] A. De Goetzen, N. Bernardini, D. Arfib, "Traditional implementations of a phase vocoder: the tricks of the trade", Proc. DAFX00, Vérone, 2000, pp 37-43.
- [5] Filippi P.J.T. *et al.*, "Acoustics: Basic Physics, Theory and Methods", Academic Press, 1999.
- [6] D.G. Crighton *et al.*, "Modern Methods in Analytical Acoustics", Springer-Verlag, 1996.
- [7] U. Zölzer (Ed.), "DAFX Digital Audio Effects", John Wiley & Sons, 2002.