

10ème Congrès Français d'Acoustique

Lyon, 12-16 Avril 2010

Directivité verticale de 3 tramways français

Lionel Segaud^{1,4}, David Ecotière^{2,4}, Guillaume Dutilleux^{2,4}, Jean-François Puymérail^{3,4},

¹ CETE Normandie-Centre - Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Strasbourg de Blois - Acoustique,
11 rue Laplace, CS 2912, F-41029 Blois Cedex

² ERA32 "Acoustique" LCPC, CETE de l'Est – LRPC de Strasbourg, 11 rue Jean Mentelin, F-67035 Strasbourg Cedex

³ CETE du Sud-Ouest - LRPC de Bordeaux - EGR, rue Pierre Ramond, BP C, F-33165 St-Médard en Jalles Cedex

⁴ {lionel.segaud,david.ecotiere,guillaume.dutilleux,jean-francois.puymérail}@developpement-durable.gouv.fr

Bien que les tramways soient un mode de transport urbain de plus en plus populaire, les données sur l'émission sonore de cette classe de véhicule demeurent lacunaires. En particulier, la directivité verticale est mal connue car elle nécessite des dispositifs expérimentaux relativement lourds en tous cas sur des véhicules du flot. La présente communication présente les résultats de trois campagnes expérimentales réalisées de 2004 à 2009 sur l'Eurotram (Strasbourg), le Citadis (Bordeaux) et le Tramway Français Standard (Nantes). Le protocole expérimental y est décrit. L'angle couvert par les mesures varie de 5 à 85° et les vitesses de passage s'étalent de 10 à 55 km/h, selon les contraintes du site. Le dépouillement repose sur le "Leq temps de passage". En dB(A), il en ressort que les tramways étudiés peuvent en première approximation être représentés comme des sources cylindriques. Certains tiers d'octave peuvent cependant s'écarter nettement de cette directivité idéale, par exemple dans le haut du spectre avec du bruit de contact pantographe/caténaire, ou à basses fréquences avec du rayonnement de bruit de roulement.

1 Introduction

Entre 2006 et 2007, le nombre de kilomètres de voies de tramway construites a pratiquement doublé en France. Ce chiffre illustre à lui seul le succès actuel de ce mode de transport collectif. En 2008, 19 villes disposaient d'un réseau de tramway et dans 21 autres un tramway était soit en projet, soit en construction.

A la différence du train, le tramway emprunte les voiries communales jusqu'en centre-ville, ce qui lui vaut de passer très près des façades. Il est donc impératif de disposer des moyens d'évaluer de façon sûre l'impact acoustique dû à la circulation des tramways en ville.

Les différentes sources de bruit associées au tramway sont le bruit de contact roue/rail, les blocs moteurs et la transmission associée, les unités de conditionnement d'air, les convertisseurs de courant pour la traction, les équipements auxiliaires [1,2]. Dès que la vitesse excède 15-20 km/h, le bruit de roulement peut être considéré comme prédominant.

Le milieu urbain dense dans lequel s'insère fréquemment un tramway présente la particularité de la proximité immédiate de riverains, ainsi que de leur localisation à des hauteurs et des angles de site par rapport à la source de bruit qui peuvent être élevés. Il est donc important de caractériser la directivité verticale de la source. Ce paramètre demeure assez mal connu.

L'étude présentée ici porte sur la caractérisation expérimentale de la directivité verticale de 3 modèles de tramways circulant en France. La perspective est que les données acquises alimentent une base de données pour, à terme, en déduire un modèle d'émission et l'intégrer aux logiciels de modélisation acoustique à vocation opérationnelle afin de prédire les niveaux sonores aux abords d'une voie de tramway avec un minimum d'erreur.

La présente communication décrit tout d'abord les aspects généraux du dispositif expérimental permettant d'évaluer la directivité verticale de l'émission sonore de tramways. Pour chacun des 3 sites instrumentés (Strasbourg, Bordeaux et Nantes), les caractéristiques de chacun d'eux et le dispositif de mesure sont détaillés. Une synthèse des résultats est ensuite réalisée.

2 Méthodologie expérimentale

	Tramway Français Standard de Nantes [3]	Tramway Citadis de Bordeaux [4]	Eurotram de Strasbourg [5]
Nombre de bogies	4	4	4 ou 5
Longueur du tramway	40m	40m	34 et 43m
Gamme de vitesses mesurées	10 à 45 km/h (moyenne : 35km/h)	40 à 60 km/h	33 à 43 km/h
Nombre de points de mesure	9	5	13
d	6 m	6 m à 8.5 m	5 m
α	5° à 85°	5° à 45°	5° à 80°
Nombre de passages mesurés	50	8	24

Table 1 : Principales caractéristiques des 3 campagnes expérimentales (d : distance entre un microphone et le rail le plus proche, α : angle de site entre le rail le plus proche et un microphone, et l'horizontale.

3 campagnes de mesures ont été réalisées entre 2004 et 2009 sur 3 types de matériel roulant : l'Eurotram qui circule à Strasbourg, le tramway Citadis de Bordeaux, et le Tramway Français Standard (TFS) de Nantes. Ces

campagnes ont été respectivement réalisées par les LRPC de Strasbourg, Bordeaux et Blois. Les caractéristiques principales de chaque matériel et des conditions expérimentales sont résumées dans la table 1.

Les sites instrumentés présentent sensiblement les mêmes caractéristiques : revêtement herbeux homogène, sol plan dégagé, environnement sonore calme, voie de tram en ligne droite.

Dans chaque cas, le système d'acquisition est constitué d'un enregistreur numérique et d'un ensemble de microphones (entre 5 à 13 suivant les sites) disposés en arc de cercle à partir du rail le plus proche pour les sites de Strasbourg et Nantes (figures 1 et 3), ou sur une verticale à une distance de 6m du rail le plus proche pour le site de Bordeaux (figure 2).

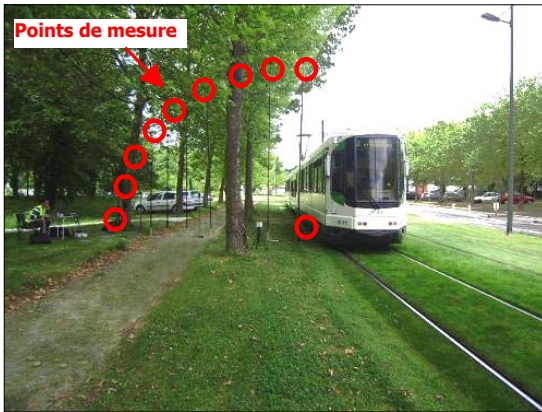


Figure 1 : Disposition des points de mesure (Nantes)

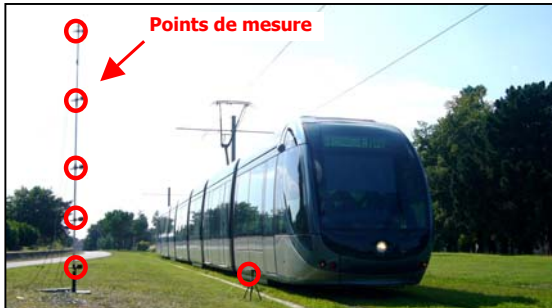


Figure 2: Disposition des points de mesure (Bordeaux)

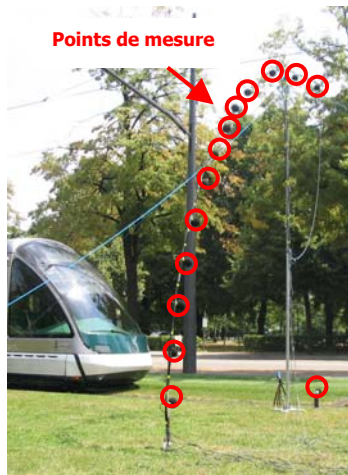


Figure 3 : Disposition des points de mesure (Strasbourg)

Pour chaque passage, les signaux de pression sont enregistrés et filtrés par bande de tiers d'octave. La vitesse de passage est mesurée à l'aide d'un cinémomètre radar ou acoustique [6]. Pour chaque enregistrement et chaque voie d'acquisition, les niveaux sonores équivalents sont extraits et calculés, en niveau global et par bandes de tiers d'octave, sur la durée du temps de passage du véhicule. La durée du temps de passage est déterminée à l'aide d'un microphone disposé à une distance d'environ 1 mètre du rail le plus proche.

La figure 4 représente un exemple d'évolution des niveaux sonores mesurés sur la voie d'acquisition la plus proche des rails (voie 14), ainsi sur une autre voie du dispositif de mesure (voie 10).

Le temps de passage est déterminé au niveau des maximums (dus aux passages des premier et dernier bogie) à partir du microphone proche des rails. Les niveaux de bruit équivalents sur l'ensemble des autres voies sont ainsi calculés sur l'intervalle de temps $[t_1, t_2]$.

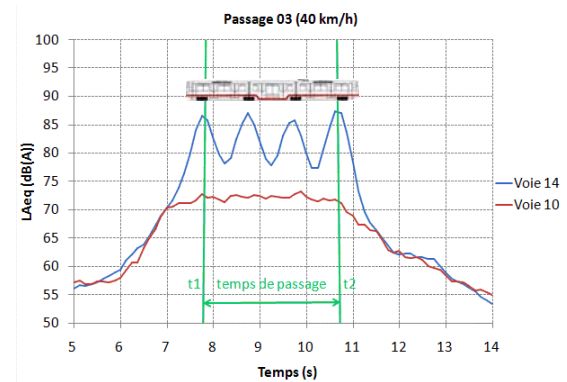


Figure 4 : Détermination des "Leq temps de passage"

Une correction est appliquée pour chaque bande de tiers d'octave pour s'affranchir de l'effet de sol et se ramener à une mesure en champ libre.

En présence du sol, la pression acoustique mesurée au niveau d'un microphone peut s'écrire à l'aide du modèle de Rudnick [7] :

$$p_{mes} = \frac{e^{jkR_d}}{R_d} + Q \frac{e^{jkR_r}}{R_r} \quad (1)$$

où R_d et R_r sont respectivement la longueur du rayon direct et du rayon réfléchi (voir figure 5). Le premier terme représente la contribution du champ libre, le deuxième la contribution du sol. Ce dernier correspond à la correction à apporter à la pression mesurée. k est le nombre d'onde acoustique dans l'air et Q est le coefficient de réflexion en onde sphérique défini par :

$$Q = R_p + (1 - R_p)F(w) \quad (2)$$

où R_p est le coefficient de réflexion en onde plane donné par exemple par [8].

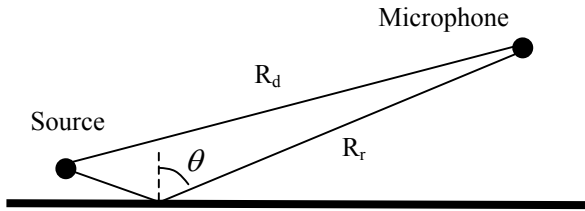


Figure 5 – Configuration géométrique et notations

$F(w)$ s'écrit

$$F(w) = 1 + 2j\sqrt{w}e^{-w} \int_{-\sqrt{w}}^{\infty} e^{-u^2} du \quad (3)$$

où w prend la forme, pour un sol à réaction localisée [5] :

$$w = \frac{1}{2} jkR_r (Z_0 / Z_g + \cos \theta)^2 \quad (4)$$

Z_g / Z_0 est le rapport des impédances acoustiques du sol et de l'air. Le modèle de Miki [9] est utilisé ici pour estimer cette dernière quantité, avec une résistance au passage de l'air typique d'un seul herbeux : $\sigma = 1000kNsm^{-4}$.

La source prépondérante est située proche du contact roue-rail. Des travaux précédents [10, 11] indiquent que la source équivalente peut être considérée à une hauteur de quelques cm.

Dans le cas du tramway de Bordeaux, les niveaux mesurés aux 5 points verticaux sont de plus recalés en tenant compte de leur position afin d'être ramenés virtuellement sur un arc de cercle d'un rayon de 4m.

3 Résultats

Les résultats sont représentés sous la forme de diagrammes polaires avec les niveaux sonores en fonction de différents angles de propagation par rapport au sol (niveaux sonores relatifs au niveau sonore de l'angle 5°).

3.1 Directivité globale

La répétabilité entre chaque passage est satisfaisante puisqu'on observe typiquement une étendue maximale de l'émission sonore entre les différents passages allant de 1 à 4 dB suivant les angles.

En niveau global, la directivité dans le quart de plan vertical entre le sol et le flanc du véhicule est peu marquée et relativement omnidirectionnelle (voir figure 6) : l'amplitude de variation entre les angles n'excède pas 3 dB(A) pour chaque tramway. Seule la directivité suivant les faibles angles de propagation semble légèrement plus importante pour le tramway TFS. Des niveaux légèrement plus faibles sont mesurés pour les angles supérieurs à 75°. Ceci peut être dû à l'influence de la caisse du tramway ou à l'influence de sources hautes telles que le pantographe. On constate un comportement sensiblement similaire pour les trois types de matériel roulant.

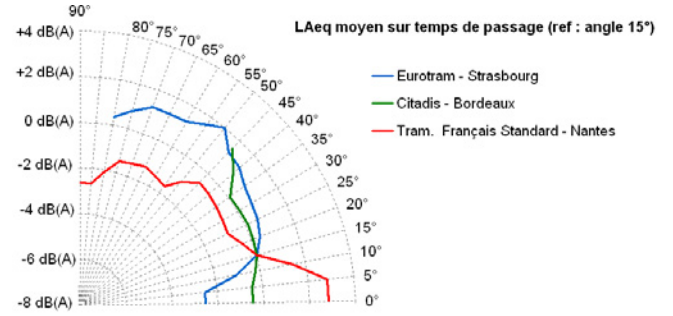


Figure 6 – LAeqTP, niveau global, comparaison des 3 tramways (toutes vitesses confondues)

3.2 Influence de la vitesse (TFS)

Les passages de tramway sont regroupés selon 6 classes de vitesse et les niveaux sonores mesurés pour les différents passages sont moyennés pour chaque classe de vitesse. La figure 7 reprend l'ensemble de ces courbes moyennes pour le tramway TFS et permet d'évaluer l'effet de la vitesse sur la directivité. Le comportement de la directivité verticale est sensiblement le même suivant la vitesse. Le comportement atypique des faibles vitesses (10 à 14 km/h) s'explique par une perturbation parasite de l'environnement sonore constatée lors de ces situations. On notera cependant une légère augmentation de l'émission sonore pour les angles intermédiaires (45°) suivant l'augmentation de la vitesse. Ce phénomène est cependant modéré puisqu'il n'excède pas 3 dB(A).

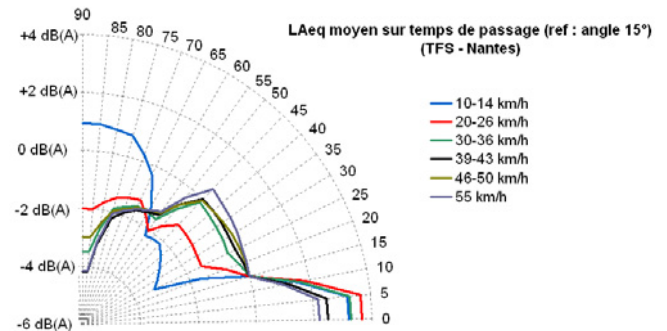


Figure 7 – Diagramme d'émission en fonction de la vitesse (TFS – Nantes)

3.3 Directivité en tiers d'octave

Des comportements assez différents sont observés suivant les types de matériel pour la directivité en fonction de la fréquence (figures 8 et 9). L'Eurotram fait apparaître une émission sonore plus faible pour les petits angles (5 à 10°), de l'ordre de 1 à plus de 6dB suivant l'octave considérée. C'est l'inverse qui se produit pour le tramway TFS : l'émission sonore est de 10 à 20 dB plus forte pour ces mêmes angles que pour ceux supérieurs à 15°. Au delà de 15°, on constate également une directivité quasi omnidirectionnelle suivant les fréquences pour le tramway TFS, tandis que la forme de la directivité tend à se marquer en augmentant avec la fréquence. Cette différence aux faibles angles s'explique peut être par la présence de sources particulières situées sous le tramway TFS et qui ne se retrouvent pas pour l'Eurotram.

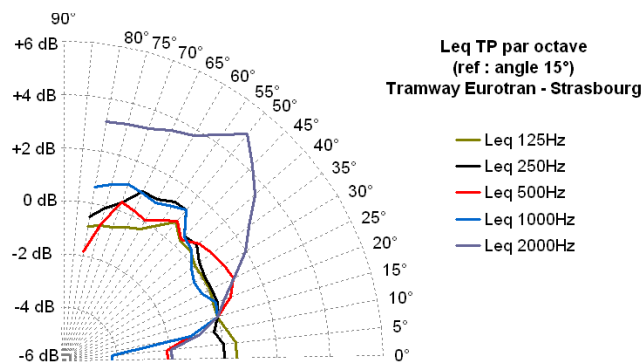


Figure 8 – Directivité en octaves – Eurotram

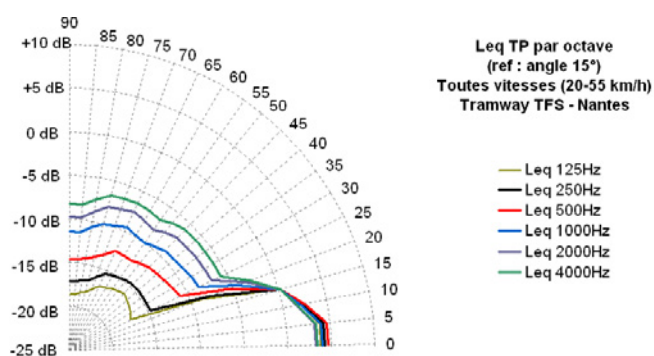


Figure 9 – Directivité en octaves – TFS

Il semblerait que le bruit généré par le frottement pantographe/caténaires soit une source de bruit importante dès lors que l'on s'intéresse à des angles de site élevés et ce pour des distances source / récepteur faibles (ce qui est typique du milieu urbain).

4 Conclusions

Les mesures de directivité dans le plan vertical perpendiculaire au passage du tramway ont permis de montrer le caractère quasi omnidirectionnel de la source de bruit, avec toute fois une diminution légère de l'émission sonore pour les angles élevés (supérieurs à 80°), ainsi qu'aux angles faibles (inférieurs à 15°). Seul le tramway TFS fait apparaître une émission plus forte pour des angles inférieurs à 15°. On retrouve le même type de comportement si l'on considère les directivités par bande de tiers d'octave. La vitesse ne semble pas avoir une influence significative sur la directivité verticale.

Remerciements

La caractérisation de la directivité du tramway de Strasbourg a été financée par l'opération de recherche du LCPC 11F022 « Aménagement et Ambiances Urbaines », celles des tramways de Bordeaux et de Nantes par l'opération de recherche du LCPC 11M061 « Prévoir le bruit en milieu urbain ».

Les auteurs remercient Fabien Auriat, Bernard Bonhomme, Patrick Demizieux, Loïc Toussaint, pour leur assistance lors des campagnes de mesure, la SEMITAN (Nantes), les TBC (Bordeaux) et la CTS (Strasbourg) pour leur coopération.

Références

- [1] Golay F., « Bibliographie sur l'émission acoustique des tramways », CERTU, Production 52 201, (2009)
- [2] Pallas M.A., Philipps-Bertin C., Maldonado M., « Bruit et vibrations dus aux tramways : Emission et perception », INRETS, ISBN 978-2-85782-678-1 (2009)
- [3] Segaud L., « Mesures sur le tramway de Nantes », LRPC de Blois, février 2010, 60p.
- [4] Puymérail J.F., « Caractérisation de l'émission sonore du tramway de la Communauté Urbaine de Bordeaux – Niveaux de puissance et directivité verticale », LRPC de Bordeaux, Etude 17-75Z080A, février 2009, 59p.
- [5] Ecotière D., Dutilleux G., « Etude expérimentale de la directivité d'un tramway », LRPC de Strasbourg, Etude 2004-76-032, octobre 2004, 16p.
- [6] Dutilleux G., « Acoustic-signature-based determination of railway vehicle speed – application to tramways », CFA/DAGA'04, Strasbourg (2004)
- [7] I. Rudnick. « The propagation of an acoustic wave along a boundary », J. Acoust. Soc. Am., 19:348–357 (1947) .
- [8] Embleton T.F.W.. Outdoor sound propagation over ground with finite impedance», J. Acoust. Soc. Am., 59:267–277 (1976).
- [9] Miki. Y., « Acoustical properties of fibrous absorbent materials - modifications of Delany-Bazley models », J. Acoust. Soc. Jpn., 11:19–24 (1990).
- [10] Dutilleux G., Salvucci A., Ecotière D. "Determination of the source height of a moving rectilinear distribution of point sources with 2 microphones – Application to tramways", CFA/DAGA'04, Strasbourg (mars 2004)
- [11] Picaud J., « Approches physiques de l'impact sonore des aménagements urbains », LCPC, coll. Études et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées, ISSN 1157-3988 (2005).