

# Emission de bruit des tramways : analyse spectrale des sources de bruit

**Marie-Agnès Pallas,  
Joël Lelong,  
Roger Chatagnon**  
INRETS  
Laboratoire Transport et Environnement  
25, avenue François Mitterrand  
case 24  
69675 Bron CEDEX  
E-mail : marie-agnes.pallas@inrets.fr

## Résumé

Depuis une vingtaine d'années, nous assistons en France au (re)développement de réseaux de tramways dans les grandes villes. Conjointement, les réactions de riverains soulèvent des interrogations et soulignent un besoin de connaissances spécifiques, en matière de bruit et de vibrations dus aux tramways et des éventuelles nuisances associées. Un projet de recherche PREDIT a été mené dans ce sens, visant à caractériser les sources et évaluer la perception du bruit et des vibrations : cet article concerne la description du bruit émis au passage des tramways. Une campagne de mesures a été conduite sur le réseau de la ville de Nantes, impliquant deux types de rames de générations différentes, testées sur deux types de pose de voie et des revêtements distincts. Les mesures acoustiques incluaient une antenne microphonique pour l'identification des sources de bruit, et un dispositif permettant d'analyser la directivité verticale des rames. Les principales sources de bruit sont les zones des bogies (moteurs et porteurs), ainsi qu'une zone étendue le long de la voie en partie basse des rames, toutes impliquant la contribution du bruit de roulement. Cet article se concentre sur la description fréquentielle de ces sources, en soulignant l'effet de la vitesse, du type de rame, du type de pose de voie. La contribution des unités de climatisation (HVAC) est évoquée.

## Abstract

In France we can see a wide development of tram networks for public transportation in main cities. At the same time questioning arises on the noise emission of trams and possible consequences for resident exposure. A French research project has been conducted for studying noise and vibration emission of trams: this paper concerns the description of the noise emission of passing-by trams.

A measurement campaign was achieved on the city of Nantes network, involving two kinds of trams with distinct technologies and equipment, and tested on two types of tracks with different surface materials. Acoustic measurement included both a 2D-array for noise source identification and a microphone set for vertical directivity analysis. The dominant noise sources are mainly the bogie areas (powered bogies, unpowered bogies) and an extended noise source along the track and the lower part of the tram, all of them involving rolling noise.

This paper focuses on the spectral description of the main sources. It presents and points out the effect of speed, tram type and track type on the frequency distribution of the emitted noise. The contribution of HVAC units is also mentioned.

**A**près avoir supprimé la plupart des réseaux de tramway du paysage urbain dans les années 50, beaucoup de villes importantes redécouvrent ce mode de transport via de nouveaux équipements modernes. Le tramway bénéficie souvent d'une image environnementale favorable. Cependant des plaintes issues de riverains indiquent qu'il peut parfois générer des nuisances. Un projet PREDIT a cherché à identifier les situations perçues comme gênantes sur le plan du bruit et des vibrations, et à relier données physiques et perception des riverains. La partie acoustique du projet a analysé le bruit émis, en relation avec différents paramètres : la vitesse de passage, le type de rame et le type de voie. Elle s'est appuyée sur une campagne expérimentale menée sur le

réseau de la ville de Nantes [1]. Les principales sources de bruit ont été identifiées, et un modèle d'émission du bruit au passage en champ libre a été développé, basé sur des sources équivalentes associées aux positions des sources réelles [2].

Parallèlement une enquête a été menée auprès des riverains des lignes de tramway [3]. Elle a notamment montré le lien existant entre la gêne ressentie et les caractéristiques fréquentielles du bruit. Ceci a motivé une analyse précise des aspects fréquentiels du bruit émis. Cet article se concentre sur le bruit au passage en conditions de fonctionnement standard (en ligne droite et hors appareils de voie), et décrit l'effet de la vitesse, du type de rame et du type de pose de voie sur

les caractéristiques fréquentielles des sources de bruit principales. Le cas particulier du crissement en courbe, déjà étudié par ailleurs [4], est en dehors du cadre de cet article.

## Approche expérimentale

### Sites et configurations de mesure

Une campagne de mesures a été effectuée : elle constitue le socle de l'étude acoustique, notamment pour établir l'émission de bruit des tramways dans différentes configurations répandues sur les réseaux français. Deux sites ont été sélectionnés (Figure 1) : une pose de voie classique (semelles standard) avec un revêtement gazonné, et une pose de voie avec semelles souples (DPHI) et revêtement pavé. Dans chaque cas, pose de voie et revêtement présentent des propriétés convergentes sur le plan acoustique : plus silencieux pour le premier, plus bruyant pour le second. L'état de surface des rails était satisfaisant. La rugosité n'a pu être mesurée que pour des grandes longueurs d'onde (0,1m – 1,25 m), adaptées au domaine de fréquences liées aux vibrations mais concernant uniquement les basses fréquences pour l'acoustique : la rugosité dans cette gamme s'est avérée inférieure aux courbes limites du rail de référence (EN ISO 3095:2005) [5].

Deux rames de tramway ont été mesurées, chacune évoluant sur les deux sites (Figure 1). La première rame (TFS, Alstom), nommée « rame A » dans cet article, est représentative du matériel roulant de première génération (1985-1995). Composée de trois modules, dont l'un à plancher bas, elle comprend deux bogies moteurs et deux bogies porteurs. Sa longueur totale est de 39,15 m. Elle est équipée de moteurs à courant continu, et ne possède pas d'unités de climatisation des voitures. La seconde rame (Incentro, Bombardier), dénommée ici « rame B », présente les caractéristiques typiques des générations de matériel roulant plus récentes (après 1995) : à plancher bas intégral, elle comprend trois bogies, dont deux bogies moteurs à roues indépendantes (un moteur asynchrone par roue). Différents équipements auxiliaires, dont les unités de climatisation, sont placés en toiture. Sa longueur est de 36,14 m. Pour chaque rame, les roues présentaient un état de surface satisfaisant, excepté un léger plat sur une roue du TFS.

Lors des mesures, les deux rames ont circulé dans les deux sens sur les mêmes portions de voie, à vitesse constante de 20 à 50 km/h, en ligne droite. Des mesures complémentaires ont été effectuées à l'arrêt, pour caractériser le bruit des équipements auxiliaires.

### Mesures acoustiques

Différents types de mesures acoustiques ont été effectuées. Outre un microphone en position standard (distance 7,5 m, hauteur 1,2 m), deux dispositifs complémentaires ont été employés (Figure 2). Le premier, composé d'un jeu de 5 microphones répartis sur un arc de cercle de rayon 5,1 m centré sur l'axe de la voie, vise à caractériser la directivité verticale du bruit émis et à évaluer la puissance acoustique totale émise par les rames. Le second dispositif est une antenne microphonique, pour la caractérisation des sources de bruit. Composée de 41 microphones, cette antenne en croix est formée de deux antennes linéaires imbriquées (espacement des microphones : 5 cm et 15 cm) perpendiculaires, disposées dans un plan vertical parallèle aux rails (distance 2,32 m du rail le plus proche) ; les branches peuvent être orientées soit horizontalement/verticalement, soit tournées à 45° de la verticale. Le centre de l'antenne se trouve soit à une hauteur de 1 m pour les sources situées en partie basse des rames, soit à 3 m pour l'analyse des sources situées en toiture. Le traitement d'antenne inclut formation de voies en champ proche (focalisation) et suivi des sources au passage (dédopplerisation) [1].

Simultanément, des données cinématiques, délivrées via des cellules infrarouges, permettent de détecter le passage des bogies et d'estimer la vitesse au passage de chaque bogie.

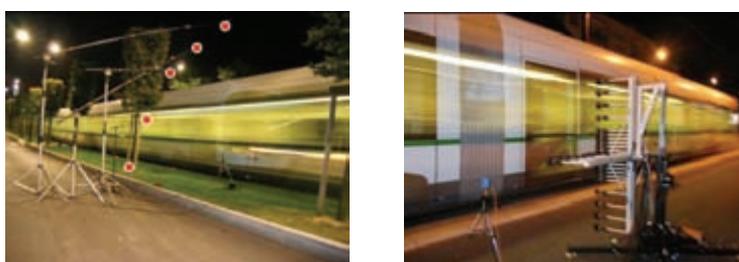


Fig. 2 : Dispositif de mesure de la directivité verticale (gauche) et antenne microphonique (droite)  
Vertical directivity measurement set (left) and microphone array (right)



Fig. 1 : Rames et sites de mesure (gauche : rame A – voie DPHI + pavés ; droite : rame B – voie classique + gazon)  
Trams and measurement sites (left : tram A - DPHI track + paving ; right : tram B - standard track + grass)

### Sources principales

L'analyse des sources de bruit a montré que la plupart d'entre elles se trouvent en partie basse des véhicules [2]. Les zones des roues, et plus largement les zones des bogies, sont des sources compactes prédominantes, avec des différences entre bogies moteurs et bogies porteurs, ces premiers incluant une contribution

moteur caractérisée notamment par des raies et des composantes spectrales à bande étroite. Par ailleurs, le bruit de roulement domine dans les zones bogiées, en raison du rayonnement des roues, des rails et de la plateforme. En particulier, l'effet du type de plateforme et de pose de voie sur le niveau de bruit global a pu être souligné. La seconde source prédominante s'étend en partie basse, de l'avant à l'arrière des rames : peu élevée localement, sa contribution totale sur toute la longueur de la rame peut être importante. Elle résulte notamment du rayonnement des rails et de la plateforme, en lien avec le bruit de roulement, et de la contribution de la caisse avec de possibles réflexions entre sol et châssis. Le type de voie et de revêtement est un paramètre primordial du niveau de bruit et de la puissance acoustique rayonnée par cette source.

D'autres sources, secondaires, ont pu être détectées, parmi lesquelles les systèmes de climatisation sur le toit de la rame B, qui peuvent affecter les résidents habitant les étages des immeubles. Les autres équipements auxiliaires ne contribuent pas significativement au bruit global émis.

## Analyse spectrale de la puissance acoustique d'une rame

La figure 4, qui présente les spectres de la puissance acoustique pour une rame complète, montre des différences notoires suivant les types de rame et de voie et en fonction de la vitesse. On peut en particulier remarquer la forte contribution des tiers d'octave voisins de 4 000 Hz, spécifique à la rame B. L'analyse des sources de bruit avait permis d'associer ces composantes fréquentielles à la position des moteurs, à côté de chaque roue motrice [2].

La distribution fréquentielle varie notablement avec le site : étalé de façon relativement uniforme sur une grande part du domaine fréquentiel pour le site en pose classique, il présente une allure plus concentrée autour de la gamme des fréquences moyennes pour le site DPHI pavé. Ces observations sont détaillées par zone source dans le paragraphe suivant.

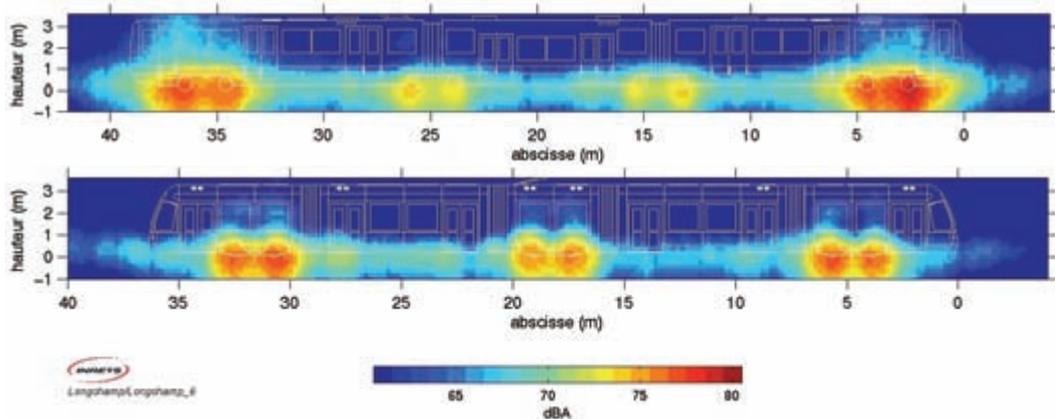


Fig. 3 : Cartographies acoustiques des deux types de rames à 30 km/h (site DPHI + pavés) (haut : rame A – bas : rame B)  
Noise source cartographies of both tram types at 30 km/h (site DPHI + paved surface) (up : tram A – down : tram B)

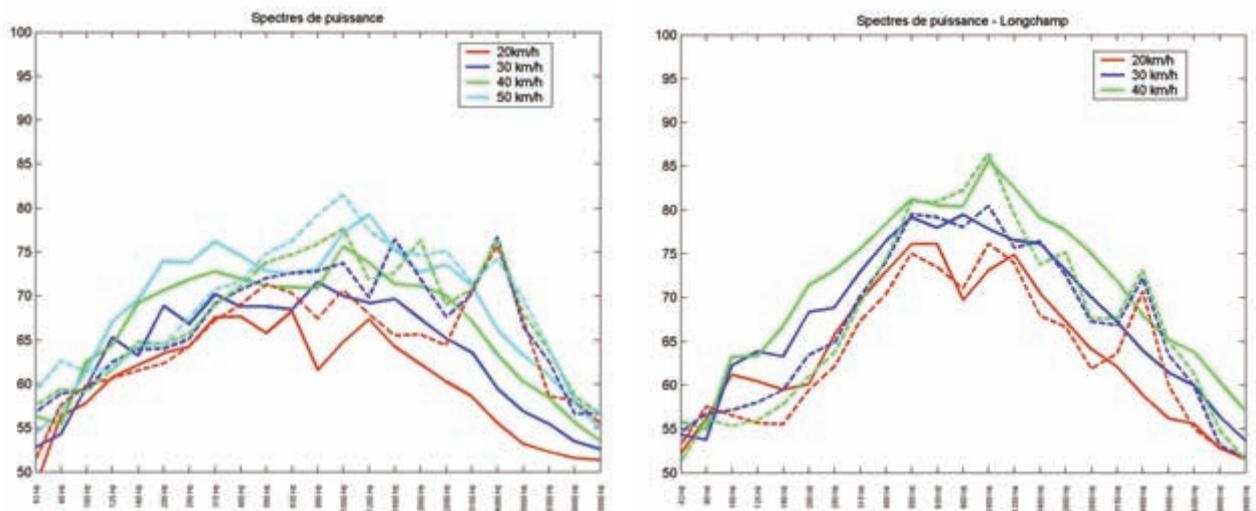


Fig. 4 : Spectre de la puissance acoustique du bruit émis par les rames (abscisse : tiers d'octave 63 Hz à 10000 Hz) (traits continus : rame A – pointillés : rame B) (gauche : pose classique + gazon – droite : DPHI + pavés)  
Acoustic power spectra of tram noise emission (abscissa : third-octaves 63 to 10000 Hz) (full line : tram A – dashed line : tram B) (left : standard track + grass – right : DPHI + paving)

## Etude paramétrique du spectre des sources

### Zone bogie

Le traitement d'antenne classique, basé sur la formation de voies, est caractérisé par sa résolution spatiale (capacité à séparer des sources proches) variable sur le domaine des fréquences, qui dépend du rapport entre la longueur d'onde de l'onde incidente et l'étendue de l'antenne<sup>1</sup>. Ainsi pour une antenne donnée, la résolution est faible aux basses fréquences. Dans la mesure où les deux roues successives d'un bogie ne peuvent pas être séparées aux basses fréquences, il est préférable d'adopter une démarche unique pour toute la gamme de fréquences, et de toujours considérer simultanément toutes les sources d'un bogie comme un ensemble source unique, dénommé ici zone bogie.

L'analyse porte sur les niveaux de pression associés à la position du centre de l'antenne (2,32 m du rail le plus proche), et décrit le comportement moyen pour chaque type de bogie (respectivement bogies moteurs

ou porteurs). Les spectres associés à la zone bogie dépendent du type de rame, du type de voie et de la vitesse de passage, avec certains comportements spécifiques décrits ci-dessous.

**Bogies moteurs vs porteurs :** Les spectres des bogies moteurs et porteurs diffèrent par la présence (resp. l'absence) de composantes liées aux moteurs, spécifiques à chaque type de tramway (Figure 5). Les bogies moteurs de la rame A sont plus bruyants sur une grande part du spectre (principalement 125-4 000 Hz) ; ceci inclut des raies dont la fréquence est variable avec la vitesse (530 Hz à 20 km/h et ses premières harmoniques, et 120 Hz à 20 km/h), directement liées au fonctionnement du moteur et des auxiliaires voisins. Concernant la rame B, les niveaux de pression des deux types de bogies sont similaires au-dessous de 1 250 Hz ; ils diffèrent nettement aux fréquences supérieures à 1 600 Hz. Les composantes additionnelles des bogies moteurs incluent une raie variable avec la vitesse (1 545 Hz à 30 km/h), et une contribution plus large bande (2500-4 000 Hz, prépondérante à 4 000 Hz), déjà mentionnée au §2.

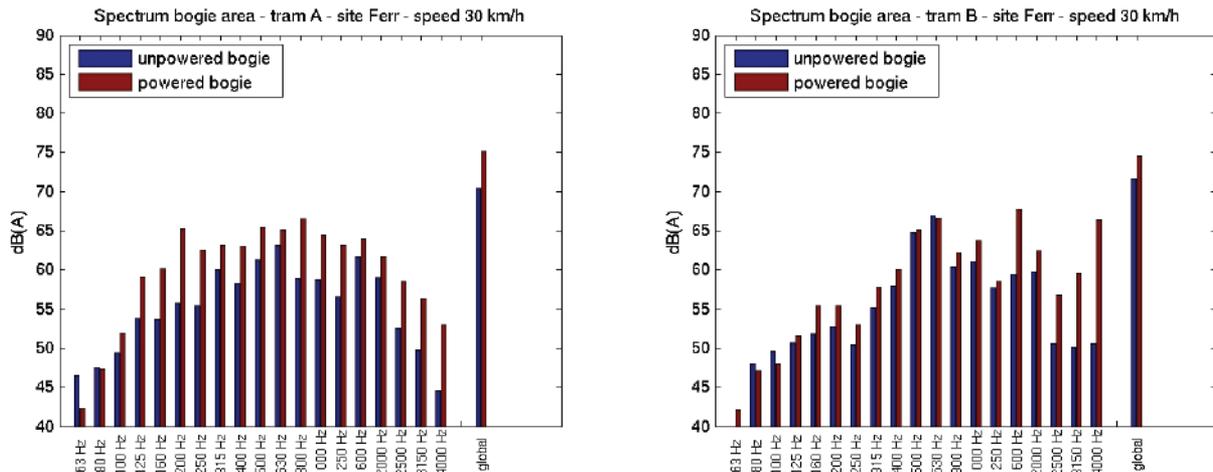


Fig. 5 : Spectres de la pression pour les zones bogies moteurs (resp. porteurs) à 30 km/h – voie classique (abscisse : tiers d'octave 63 Hz à 4 000 Hz) (gauche : rame A – droite : rame B)  
Noise pressure spectra of the powered (resp. unpowered) bogie area at 30 km/h – standard track (abscissa : third-octaves 63 to 4 000 Hz) (left : tram A – right : tram B)

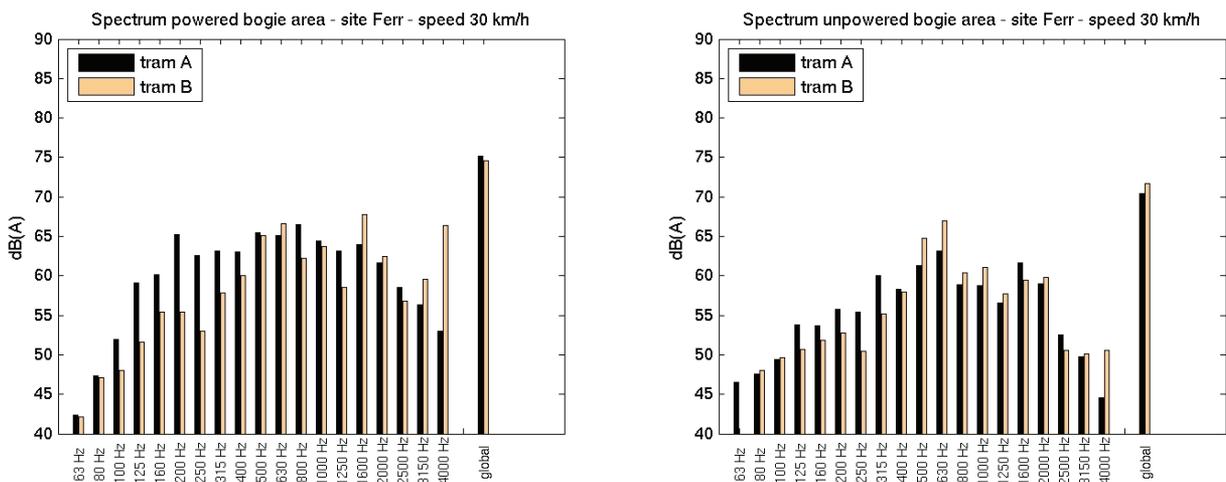


Fig. 6 : Spectres de la pression pour les zones bogies des rames A et B à 30 km/h – voie classique (abscisse : tiers d'octave 63 Hz à 4 000 Hz) (gauche : bogie moteur – droite : bogie porteur)  
Noise pressure spectra of the bogie area for trams A and B at 30 km/h – classical track (abscissa : third-octaves 63 to 4 000 Hz) (left : powered bogie – right : unpowered bogie)

Les différences entre bogies moteurs et porteurs sont globalement plus importantes pour la rame A, comme on peut le remarquer aussi sur la figure 3.

**Type de rame :** Les deux types de rames analysés sont issus de différentes générations de tramways, impliquant des choix technologiques distincts. Par la suite les spectres présentent des distributions fréquentielles différentes, avec une prédominance de la rame A aux basses fréquences et de la rame B aux hautes fréquences (Figure 6). Cependant les niveaux de pression globaux sont similaires pour les deux rames.

**Vitesse :** La vitesse de passage est un paramètre essentiel pour les niveaux de pression rayonnée par les bogies, l'augmentation globale étant de l'ordre de 7,5 à 9 dB(A) entre 20 et 40 km/h, en fonction du type de rame, de voie et de bogie. Cependant cet accroissement est très variable en fréquence : pour la rame A, l'effet de la vitesse est important sur tout l'axe fréquentiel, alors qu'il n'intervient qu'aux fréquences élevées pour la rame B (Figure 7). Ce comportement est valable pour les bogies moteur et porteur, quel que soit le type de voie. Ainsi la vitesse ne modifie pas la répartition fréquentielle de la rame A, alors qu'elle renforce les hautes fréquences sur la rame B.

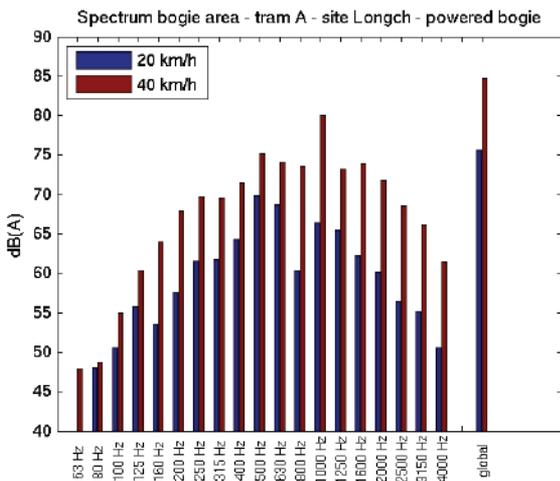


Fig. 7 : Effet de la vitesse sur les spectres associés à la zone bogie moteur – (pose de voie DPHI + pavés) (abscisse : tiers d'octave 63 à 4000 Hz)(gauche : rame A – droite : rame B)  
Effect of the speed on the pressure spectra for powered bogie area – (DPHI+paving)  
(abscissa : third-octaves 63 to 4000 Hz) (left : tram A – right : tram B)

**Type de pose de voie et de plateforme :** La voie est un paramètre-clé, à la fois pour la génération du bruit de roulement (rugosité des rails, pose de voie) et pour l'absorption du bruit (type de surface). Comme mentionné plus haut, bien que l'état de surface des rails n'ait pu être contrôlé sur la totalité de la gamme de longueurs d'onde utile, il est jugé satisfaisant pour les deux sites. Les mesures indiquent que l'effet du site peut atteindre en niveau global 8 dB(A) pour la zone bogie moteur et 9 dB(A) pour la zone bogie porteur, à même vitesse. Les différences concernent essentiellement les fréquences supérieures à 200 Hz. La figure 8 est un exemple, montrant de grandes différences entre 315 et 1 250 Hz pour la rame B. Celles-ci ne peuvent être attribuées au seul effet de l'absorption ; on peut par ailleurs noter la coïncidence

avec la gamme de fréquence où le rayonnement d'un rail est généralement prédominant.

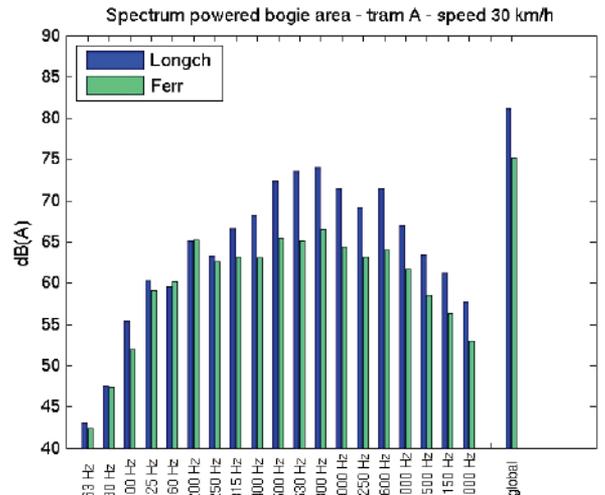
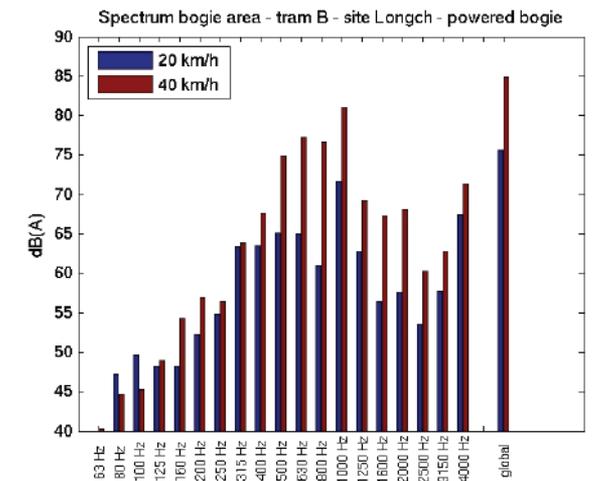


Fig. 8 : Effet de la voie sur le spectre de la pression – zone bogie moteur – 30 km/h – rame A (abscisse : tiers d'octave 63 à 4 000 Hz)(bleu : DPHI+pavés – vert : voie classique+gazon)  
Effect of the type of track on the pressure spectra, for powered bogie area at 30 km/h – tram A  
(abscissa : third-octaves 63 to 4 000 Hz) (blue : DPHI+paving – green : standard track+grass)



### Zone source étendue voie-rail

Cette zone source s'étend sur toute la longueur de la rame, le long de la voie. En première approximation, elle peut être vue comme une source linéique uniforme. Par suite la méthode d'analyse diffère de celle employée dans le cas de sources compactes. On utilise alors la branche horizontale de l'antenne en position basse (hauteur : 1,0 m), lorsqu'elle est située face à des parties centrales des modules de la rame, à distance des bogies. Ceci n'est possible qu'en l'absence de toute autre source à des

1-L'exigence d'une résolution uniforme en fréquence nécessiterait l'utilisation de traitements et/ou de géométries d'antenne spécifiques [6], non implémentés ici.

hauteurs distinctes dans ces zones d'analyse. L'antenne est équivalente à une fenêtre spatiale ; on estime alors la contribution d'une unité de longueur de voie au niveau de pression acoustique, en incluant une correction liée à la réponse spatiale de l'antenne [2]. Les grandeurs acoustiques délivrées sont des niveaux de pression à la distance de l'antenne (2,32 m du rail le plus proche) et à 1 m de hauteur, exprimés par unité de longueur de voie. Les niveaux globaux montrent que le type de voie et la vitesse sont des paramètres importants pour cette source [2]. Nous décrivons ci-dessous les différences en fonction de la fréquence.

**Vitesse :** L'augmentation des niveaux globaux est de l'ordre de 7 à 9,5 dB(A) entre 20 et 40 km/h, suivant le site et le type de rame ; elle est cependant très variable sur l'axe des fréquences. La répartition fréquentielle du

bruit varie peu pour la rame A ; en revanche pour la rame B, la vitesse renforce les moyennes et hautes fréquences (500 à 2 500 Hz), mais modifie peu les niveaux aux basses fréquences (Figure 9). On remarque que des tendances similaires avaient été notées pour les zones bogies (§3.1), probablement en raison de la forte contribution du bruit de roulement dans les deux cas.

**Type de voie et de plateforme :** Le site équipé de semelles souples et d'une surface pavée conduit toujours à un niveau de pression associé à la zone source étendue qui est nettement supérieur à celui de la voie classique, aux moyennes et hautes fréquences (400-4 000 Hz). Cependant la voie classique est légèrement plus bruyante aux basses fréquences (80-200 Hz) pour les deux types de rames (Figure 10).

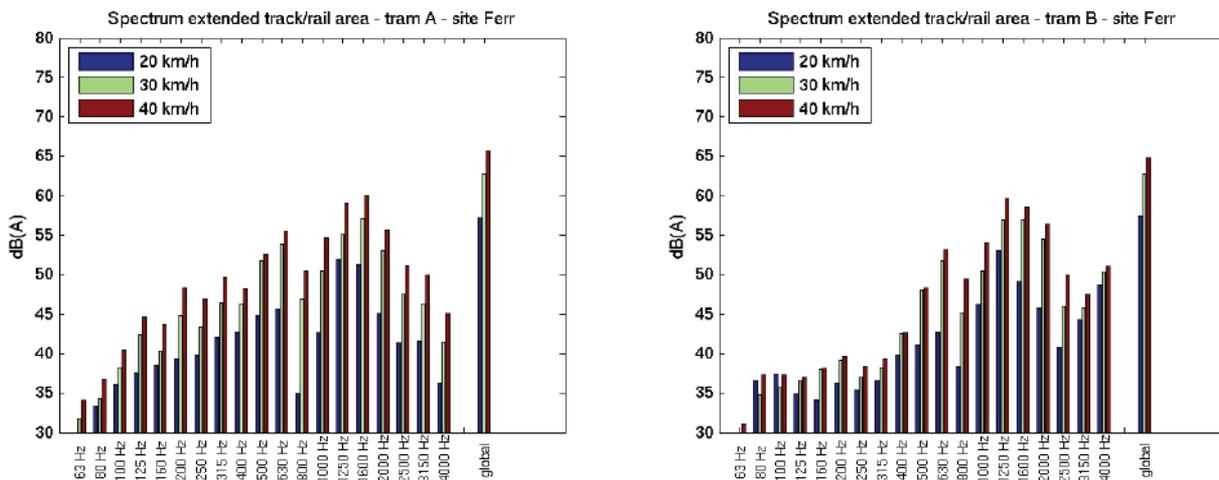


Fig. 9 : Effet de la vitesse sur les spectres de pression de la zone source étendue voie-rail –(voie classique + gazon) (abscisse : tiers d'octave 63 à 4000 Hz) (gauche : rame A – droite : rame B)  
Effect of the speed on the pressure spectra for the extended track source – (standard track+paving) (abscissa : third-octaves 63 to 4000 Hz) (left : tram A – right : tram B)

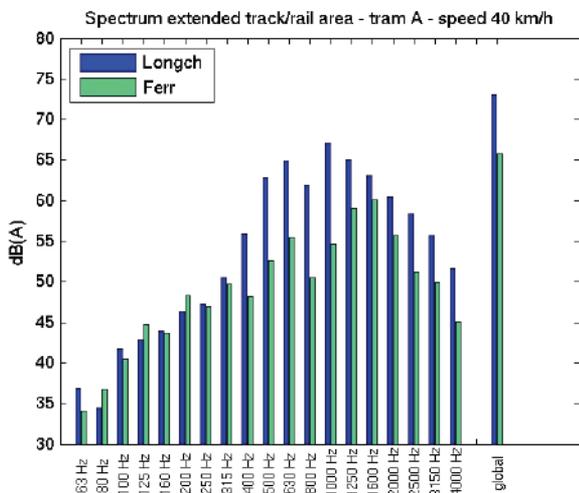


Fig. 10 : Effet du type de voie sur le spectre de pression de la zone source étendue à 40 km/h (abscisse : tiers d'octave 63 à 4000 Hz) (bleu : DPHI+pavés – vert : voie classique+gazon)  
Effect of the track type on the pressure spectra for the extended track source at 40 km/h ((abscissa : third-octaves 63 to 4000 Hz) (blue : DPHI+paving – green : standard track +grass)

## Système de climatisation (HVAC)

La rame B est équipée d'unités HVAC (Heating, Ventilating, and Air Conditioning) situées sur la toiture. Lors des mesures au passage, la climatisation était arrêtée ; seule fonctionnait la ventilation standard. Dans ce cas, l'antenne a détecté une faible source de bruit à cette position. L'émission de bruit en fonctionnement à plein régime a été mesurée à l'arrêt : le spectre comprend plusieurs raies, dont une raie puissante (290 Hz) et ses premières harmoniques (Figure 11).

Les mesures de directivité verticale indiquent que cette source est susceptible d'affecter en priorité les niveaux de bruit en direction des étages des habitations. On a montré que dans un contexte où le bruit de roulement est important (vitesse élevée, conditions de voie défavorables<sup>2</sup>), le bruit lié au système HVAC est négligeable. En revanche dans le cas d'un faible bruit de roulement (vitesse faible, conditions de voie favorables), les raies fréquentielles du système HVAC peuvent émerger dans le spectre du bruit rayonné en hauteur.

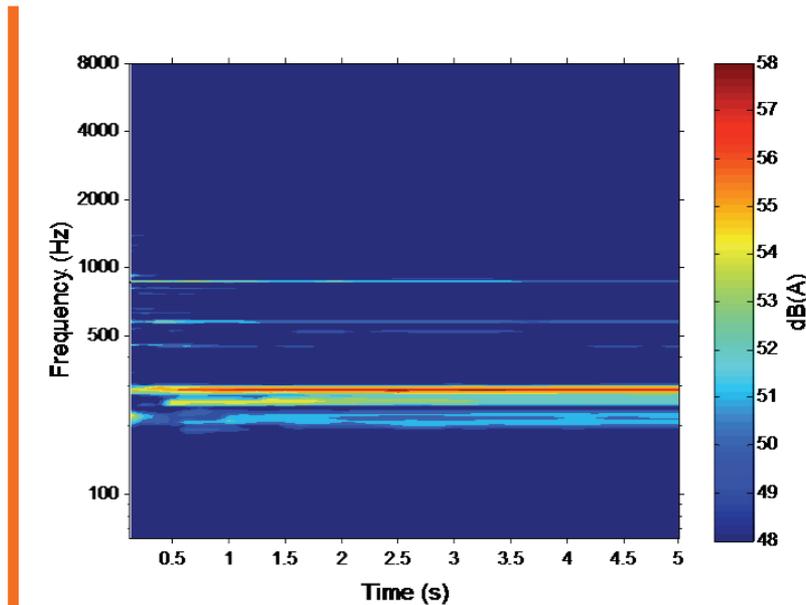


Fig. 11 : Spectrogramme associé au système HVAC (mesure sur microphone le plus élevé du dispositif de mesure de directivité) – rame B à l'arrêt – HVAC à plein régime  
Spectrogram of the upper directivity microphone – tram at stop – full working HVAC

## Remerciements

Le projet de recherche «Caractérisation de l'émission et évaluation de la perception du bruit et des vibrations des tramways» a été financé par l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME), au sein du programme de recherche PREDIT. Les auteurs remercient les sociétés SerdB et SEMITAN, respectivement coordinateur et partenaire du projet.

## Références bibliographiques

- [1] J. Lelong, M. A. Pallas, R. Chatagnon, «Noise emitted by trams - Part 1 : investigations on emitted noise power, vertical directivity and localization of noise sources», *Internoise 2007, Istanbul, Turkey* (2007)
- [2] M.A. Pallas, J. Lelong, R. Chatagnon, «Noise emitted by trams - Part 2 : development of a tram noise emission model», *Internoise 2007, Istanbul, Turkey* (2007)
- [3] C. Philipps-Bertin, P. Champelovier, J. Lambert, C. Trindade, T. Legouis, «Perception and annoyance due to tramway noise», *Internoise 2007, Istanbul, Turkey* (2007)
- [4] O. Chiello, J.-B. Ayasse, N. Vincent, J.R. Koch, «Curve squeal of urban rolling stock—Part 3: Theoretical model.», *Journal of Sound and Vibration, Proceedings of the 8th International Workshop on Railway Noise*, 293(3-5): 710-727 (2006)
- [5] EN ISO 3095:2005, «Railway applications - Acoustics - Measurement of noise emitted by railbound vehicles» (2005)
- [6] R. Perrier, M.A. Pallas, «Comparaison de méthodes de traitement d'antenne à directivité constante en champ proche», *GRETSI2007, Troyes, France* (2007)

## Conclusion

Élément d'un projet étudiant le bruit et les vibrations au passage des tramways, cet article analyse les spectres de bruit et l'effet de différents paramètres sur les spectres associés aux sources principales. De façon très concise, le type de plateforme (pose de voie + surface) et la vitesse influencent fortement le niveau du bruit émis par les sources, tandis que l'effet du type de rame est secondaire. Cependant la répartition en fréquence de ces effets est fortement dépendante du type de rame.

On a pu noter des tendances communes aux zones bogies et à la zone source étendue le long de la voie, en raison de la contribution du bruit de roulement dans ces deux cas. D'une façon générale, le spectre de la rame B est plus riche en composantes hautes fréquences que celui de la rame A, et la vitesse tend à renforcer cette spécificité.

En revanche, la vitesse ne modifie pas la distribution fréquentielle du spectre de la rame A. S'agissant du type de voie, le site avec semelles souples et un revêtement réfléchissant conduit à des niveaux de bruit plus élevés – avec une forte contribution aux moyennes fréquences – que la voie en pose classique avec revêtement herbeux. Il n'a pas été possible de séparer les contributions respectives de la pose de voie et du type de surface. Les caractéristiques fréquentielles du système HVAC (climatisation) ont été déterminées, et des indications sur leur contribution au bruit total, principalement en direction des étages des habitations, ont été données.