



HAL
open science

Bibliographie sur l'émission acoustique des tramways : modélisation des véhicules étendus par des sources sonores ponctuelles

Francis Golay

► To cite this version:

Francis Golay. Bibliographie sur l'émission acoustique des tramways : modélisation des véhicules étendus par des sources sonores ponctuelles. [Rapport de recherche] Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques (CERTU). 2008, 120 p., figures, tableaux, graphiques. hal-02150527

HAL Id: hal-02150527

<https://hal-lara.archives-ouvertes.fr/hal-02150527v1>

Submitted on 7 Jun 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Bibliographie sur l'émission acoustique des tramways

*Modélisation des véhicules étendus
par des sources sonores ponctuelles*

Bibliographie sur l'émission acoustique des tramways

*Modélisation des véhicules étendus
par des sources sonores ponctuelles*

Certu

centre d'Études sur les réseaux,
les transports, l'urbanisme
et les constructions publiques
9, rue Juliette Récamier
69456 Lyon Cedex 06
téléphone: 04 72 74 58 00
télécopie: 04 72 74 59 00
www.certu.fr

Avis aux lecteurs

La collection Rapports d'étude du Certu se compose de publications proposant des informations inédites, analysant et explorant de nouveaux champs d'investigation. Cependant l'évolution des idées est susceptible de remettre en cause le contenu de ces rapports.

Le Certu publie aussi les collections :

Dossiers : Ouvrages faisant le point sur un sujet précis assez limité, correspondant soit à une technique nouvelle, soit à un problème nouveau non traité dans la littérature courante. Le sujet de l'ouvrage s'adresse plutôt aux professionnels confirmés. Ils pourront y trouver des repères qui les aideront dans leur démarche. Mais le contenu présenté ne doit pas être considéré comme une recommandation à appliquer sans discernement, et des solutions différentes pourront être adoptées selon les circonstances.

Références: Cette collection comporte les guides techniques, les ouvrages méthodologiques et les autres ouvrages qui, sur un champ donné, présentent de manière pédagogique ce que le professionnel doit savoir. Le Certu a suivi une démarche de validation du contenu et atteste que celui-ci reflète l'état de l'art. Il recommande au professionnel de ne pas s'écarter des solutions préconisées dans le document sans avoir pris l'avis d'experts reconnus.

Débats : Publications recueillant des contributions d'experts d'origines diverses, autour d'un thème spécifique. Les contributions présentées n'engagent que leurs auteurs.

Catalogue des publications disponible sur : <http://www.certu.fr>

Organisme commanditaire : Certu – LCPC			
Titre : Bibliographie sur l'émission acoustique des tramways			
Sous-titre : Modélisation des véhicules étendus par des sources sonores ponctuelles	Date d'achèvement : décembre 2008	Langue : Française	
Organisme auteur : Cete de l'Est/ LRPC de Strasbourg	Rédacteurs ou coordonnateurs : Francis GOLAY	Relecteur assurance qualité : (nom, prénom) Guillaume DUTILLEUX et Patrick DEMIZIEUX (Cete de l'Est) Jérôme SAURAT	
<p>Résumé</p> <p>Entre 2006 et 2007, le nombre de kilomètres de voies construites pour les tramways a pratiquement doublé en France. Ce chiffre illustre à lui seul l'engouement actuel suscité par ce mode de transport collectif. Le tramway revient pourtant de loin. En France, sensiblement pendant la première moitié du XX^e siècle, quelques 50 villes exploitaient un réseau de tramway plus ou moins étendu, avec des trafics souvent très importants.</p> <p>Malgré ses nombreux avantages, dans la droite ligne du Grenelle de l'Environnement, le bruit constitue un de ses principaux défauts. Cet ouvrage se propose donc de rassembler toutes les connaissances actuelles sur le bruit des tramways.</p> <p>Ce rapport traite en priorité de la modélisation des différentes sources d'émission acoustique de ce type de véhicule. La partie propagation est, quant à elle, traitée par les logiciels développés pour le bruit ferroviaire (par exemple, le logiciel MITHRA, validé par la SNCF) ou par des modèles d'ingénierie basés sur des abaques.</p> <p>La collecte des documents et références s'est étalée sur les années 2007 et 2008. Les références utilisées proviennent d'horizons variés, aussi bien sur le fond avec des articles scientifiques publiés dans des revues internationales et des rapports d'études, que sur la forme avec des textes en langue française ou étrangère, même si les documents en français sont les plus nombreux. De nombreuses références émanent du Réseau Scientifique et Technique (RST) du Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire (MEEDDAT).</p> <p>Ce travail est divisé en quatre grandes parties :</p> <ul style="list-style-type: none"> - les principales sources sonores émises par un tramway ainsi que les différentes modélisations existantes, - les paramètres principaux de l'émission sonore (vitesse, type de plate-forme, entretien des voies,...), - la réglementation française applicable aux tramways et quelques recommandations pour mener à bien une étude d'impact, - quelques réflexions sur la recherche d'un nouvel indicateur acoustique autre que le LAeq et spécifique au tramway. Cette réflexion est d'ailleurs générale dans le domaine du bruit des transports. <p>Le lectorat visé par ce document est relativement large : bureaux d'études acoustiques, maîtres d'ouvrage et gestionnaires d'infrastructures et même riverains désireux de mieux connaître le bruit des tramways et ses facteurs d'émissions.</p>			
Thème et sous-thème : Ville et environnement / Bruit			
Ouvrages sur le même thème : voir ouvrages Certu sur tramways, dont « Plates-formes de tramways »			
Mots clés : acoustique des transports terrestres / bibliographie / tramway	Diffusion : téléchargement gratuit	Web : oui <input checked="" type="checkbox"/> non	
Nombre de pages : 120	Tirage : Non	Confidentialité : Non	Bibliographie : Oui

Sommaire

Introduction.....	6
1. Modèles existants et en cours de développement.....	7
1.1 Le tramway : qu'est-ce que c'est ?.....	7
1.2 Les principales sources du tramway : le bruit de roulement et peut-être le bloc moteur.....	8
1.3 Modélisation du bruit de roulement des tramways par des sources ponctuelles.....	10
1.4 Modèle physique du bruit de roulement : adaptation du modèle ferroviaire TWINS.....	13
1.5 Le crissement : un phénomène difficilement reproductible ... et donc difficilement modélisable.....	15
1.6 Un petit mot sur les vibrations.....	18
2. Paramètres d'émission.....	19
2.1 Les paramètres cinématiques : la vitesse le facteur d'émission principal.....	19
2.2 Type de plateforme : une influence non négligeable.....	22
2.3 État des voies et entretien : une influence qui peut être prépondérante.....	26
2.4 La charge : une influence faible de 1-2 dB(A).....	30
2.5 Type et état des matériels roulants.....	33
2.6 Autres paramètres : une influence légère.....	35
2.7 Les paramètres influençant le crissement : peu de certitudes.....	35
3. Réglementation et déroulement d'une étude d'impact.....	39
3.1 Les textes en vigueur.....	39
3.2 Traitement d'une étude opérationnelle de tramway.....	42
4. Besoin de nouveaux indicateurs : oui, mais lesquels ?.....	56
4.1 Effets du bruit : santé et gêne.....	56
4.2 Principaux indicateurs existants.....	59
4.3 Quel(s) indicateur(s) pour le bruit des tramways?.....	64
Conclusion.....	70
5. Références.....	72
6. Références et résumés.....	77
Annexes.....	102
Table des matières.....	114

Introduction

Entre 2006 et 2007, le nombre de kilomètres de voies pour les tramways a pratiquement doublé. Ce chiffre illustre à lui seul l'engouement actuel suscité par ce mode de transport collectif. Le tramway revient pourtant de loin. En France, sensiblement pendant la première moitié du XX^{ème} siècle, quelques 50 villes exploitaient un réseau de tramway plus ou moins étendu, avec des trafics souvent très importants. Soudainement, peu avant la seconde guerre mondiale, et avec l'apparition de la voiture, les lignes ont fermé une à une. Seules trois villes ont conservé une ligne : Marseille, Lille et Saint-Étienne. Dans les années 1980, presque aussi rapidement qu'il avait disparu, plusieurs grandes améliorations osèrent le pari du tramway. Pari gagné, et qui a fait des émules !

Malgré ses nombreux avantages, dans la droite ligne du Grenelle de l'Environnement, le bruit constitue un des principaux défauts du tramway. Nous avons donc essayé de rassembler les connaissances actuelles sur le bruit émis par les tramways. Essayé, car il n'est pas toujours facile de se procurer toutes les études réalisées, y compris des études financées au sein de son propre ministère. D'autre part, il est parfois difficile de synthétiser des études dont les indicateurs utilisés sont différents.

Tout au long de ce document, nous allons nous restreindre à la modélisation de l'émission. La partie propagation peut être traitée par les logiciels développés pour le bruit des trains (par exemple, le logiciel MITHRA, validé par la SNCF) ou des modèles d'ingénierie basés sur des abaques¹.

La collecte des documents s'est étalée sur les deux dernières années. Les références utilisées sont très variées : aussi bien sur le fond avec des articles scientifiques publiés dans des revues internationales et des rapports d'études, que sur la forme avec des textes en langue française ou étrangère, même si les documents en langue française recueillis sont les plus nombreux. De nombreuses références concernent le travail réalisé au sein du Réseau Scientifique et Technique (RST) du Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du développement-durable et de l'Aménagement du Territoire.

Le lectorat visé par ce document est relativement large : bureaux d'acoustique qui réalisent des études d'impacts sur les tramways, gestionnaires d'infrastructures et riverains désireux de mieux appréhender le bruit et ses facteurs d'émissions. Les données d'émission et les références pourraient être utiles à d'autres pays.

Ce travail est divisé en quatre grandes parties.

Premièrement, nous allons nous intéresser aux principales sources de bruit du tramway et aux différentes modélisations existantes. Nous verrons ensuite quels sont les principaux paramètres de l'émission sonore. Puis nous ferons le point sur la réglementation applicable aux tramways, ainsi que des recommandations pour les études d'impact, en France. Enfin, nous réfléchirons sur la quête d'un nouvel indicateur acoustique autre que le L_{Aeq} , réflexion générale dans le domaine du bruit, mais que nous déclinerons dans le cas particulier des tramways.

Toutes les références utilisées pour cette bibliographie, sont disponibles p.71 et p.76, respectivement sans et avec résumé. En enfin je tiens à remercier tout particulièrement Guillaume Dutilleux, Patrick Demizieux et Jérôme Saurat pour leur relecture attentive.

1 Il existe un modèle slovaque d'ingénierie avec des abaques, incluant à la fois des paramètres relatifs à l'émission sonore (vitesse, meulage, pente, ...), et relatifs à la propagation (position du microphone, profil en travers type de la rue, ...) [1].

1 Modèles existants et en cours de développement

« Les machines ne font que calculer »
Picasso¹

Donner une définition du tramway n'est pas une tâche aussi simple qu'il n'y paraît. Cette appellation recouvre en fait des véhicules bien différents. Dans cette étude, nous nous cantonnerons au traditionnel tramway urbain sur rails. Nous verrons ensuite quelles en sont les principales sources. La modélisation acoustique sera ensuite détaillée suivant deux approches, l'une assez simple et adaptée pour des études d'impact, l'autre plus complexe. Nous étudierons ensuite la modélisation d'un phénomène peu reproductible mais très gênant, le crissement. Enfin, nous aborderons très succinctement l'étude des vibrations générées par le tramway dans le sol.

1.1 Le tramway : qu'est-ce que c'est ?

1.1.1 Le tramway : une définition pas si simple

Étymologiquement selon le Petit Robert, le tramway vient de l'anglais « tram » qui signifie « rail » et « way » qui signifie « voie, chemin ». Le tramway est alors toujours selon le Petit Robert défini comme un « Chemin de fer à rails plats servant surtout aux transports urbains; voiture qui circule sur ce type de rails ».

En fait, sous le mot tramway, se cachent trois grands types de véhicules, qui cachent eux-mêmes nombre de variantes [2] :

- le **tramway sur rails** : il s'agit pour l'instant de la grande majorité des tramways circulant en France. Néanmoins, la technologie de ce type de tramway a largement évolué depuis une trentaine d'année : modularité (qui permet une très grande variété dans le design, avec de grandes baies vitrées par exemple), planchers bas, système de captation électrique par le sol (tramway de Bordeaux) ou batteries embarquées (tramway de Nice) afin de s'affranchir des lignes aériennes lors de la traversée des centres historiques.
- le **tramway sur pneus** : cette technologie est relativement récente, et a été confrontée à des problèmes de mise au point. Le véhicule dispose bien d'un rail central, mais ce dernier ne sert qu'au guidage du véhicule. Théoriquement moins cher que le tramway sur rail, cette technologie permettrait de grimper des pentes plus raides. Le tramway sur pneus roule à Nancy, Caen, et Clermont-Ferrand.
- le **tram-train** : Inventé outre-Rhin à Karlsruhe en 1992, il permet à la fois de circuler sur le réseau de rails urbain et sur le réseau interurbain. Il permet ainsi de desservir rapidement le centre-ville pour des communes éloignées. Cette idée simple ne doit pas cacher une mise en pratique parfois trop complexe : sécurité, interconnexions (gabarits...), tarifications, voire rivalités de territoires et de responsabilités [3]. En région parisienne, le premier tram-train a été inauguré fin 2006 entre Aulnay et Bondy. D'autres sont prévus en France, par exemple : Mulhouse (2010), Lyon (2010) ou Nantes. Pour plus de précisions sur les tram-trains, on pourra se référer à l'article très complet du magazine Ville & Transports [3]. Un dernier point lexicographique, il faut faire attention de bien distinguer [3] :
 - tram-train : « stricto sensu, c'est un tramway qui poursuit sa route en périphérie sur une voie ferrée classique. Il y a donc interconnexion, et *a priori* véhicule bimode, pour rouler sous les différentes tensions, urbaine – généralement 750 V – et ferroviaire. »
 - train léger : « s'il roule sur les voies ferrées et n'est pas interconnecté au réseau urbain ». Par exemple, le T4, entre Aulnay et Bondy est plutôt un train léger.

1 Pablo Ruiz Picasso (1881-1973). Peintre, dessinateur et sculpteur espagnol.

- tramway suburbain : « s'il ne roule pas sur des voies ferrées, ou emprunte une (ex) voie ferrée qui lui est réservée (exemple futur : Leslys, entre Lyon et son aéroport) ». Le T4 parisien peut aussi rentrer dans cette catégorie.
- train-tram : « c'est un train léger qui termine sa course en ville sur les voies du tram (exemple : Zwickau, en Allemagne). » Ce type de véhicule est relativement rare.

Dans la suite de ce rapport, nous nous intéresserons uniquement au tramway sur rails. C'est en effet le plus répandu, et le seul type de tramway sur lequel nous disposons d'informations plus ou moins détaillées.

1.1.2 Quelques sources de données sur les tramways : caractéristiques techniques et réseaux

Pour des informations techniques très détaillées sur les tramways dans une ville donnée, on peut consulter le site Rail21, très documenté [4] : type de rames, date d'achat, numéros des rames, masses, nombre de bogies moteurs...

Les réseaux évoluant très vite, il est difficile de trouver un site internet à jour sur le réseau existant. On peut néanmoins citer les sites internet suivants [5] et [6], ainsi qu'un livre sur les tramways en France, présentant l'histoire, les coûts des projets... et illustré par de nombreuses photos [7]. Au total, le réseau français long de 200 km en 2006, devait gagner 160 km supplémentaires d'ici fin 2007 [2]. Le marché est en pleine expansion.

1.2 Les principales sources du tramway : le bruit de roulement et peut-être le bloc moteur

1.2.1 Les différentes sources du tramway

La figure 1 illustre les principales sources sur un tramway, avec l'exemple du tramway T3000 de Bruxelles :

- les unités de ventilation et d'air conditionné (notées HVAC1 et HVAC2),
- les convertisseurs, ou hacheurs, pour les moteurs de traction (notés DPU),
- les équipements auxiliaires (notés BNU),
- sources au niveau du bogie : bruit de roulement (dû au contact roue/rail), moteur de traction et boîte de vitesse.

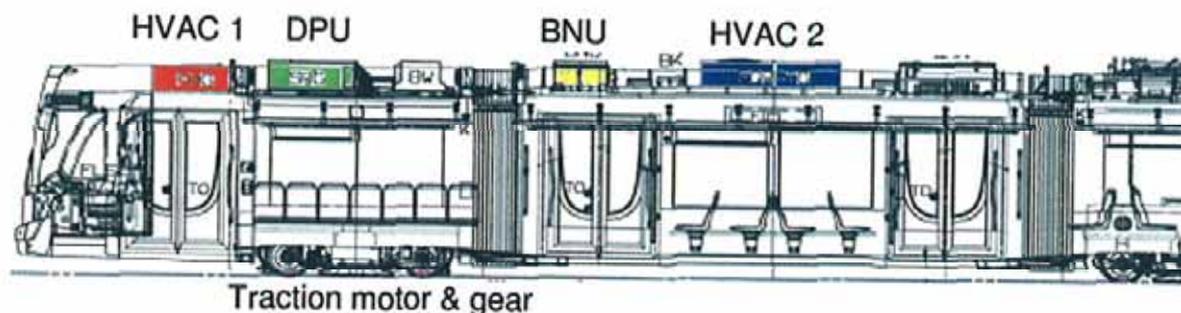


Figure 1: Vue de côté du tram T3000 (le tram étant symétrique, seule une moitié est représentée), avec positionnement des principales sources acoustiques [8].

D'autres bruits particuliers peuvent être recensés et sont :

- le crissement : ce problème apparaît principalement dans des zones de virage de faible rayon. Un bruit aigu est généré. Les riverains sont en général très sensible à ce bruit.

- le klaxon : il est utilisé afin de libérer les voies du tramway. Aucun élément n'a été trouvé à ce sujet.
- les appareils de voie : des bruits d'impacts peuvent être importants au niveau des appareils de voie. Ce type de bruit fait partie du bruit de roulement. Comme ces bruits sont très localisés, nous répertorions quand même ce type de bruit comme particulier.
- le contact caténaire/pantographe, qui débouche souvent sur un arc électrique.

Ces bruits particuliers, même s'ils peuvent s'avérer gênants pour les riverains, ne modifient pas beaucoup les niveaux sonores réglementaires.

1.2.2 Le bruit de roulement : principale source à partir de 15-20 km/h

La source de bruit prépondérante est le bruit de roulement au-delà de 15-20 km/h [9] [10] : la valeur exacte du seuil dépend des caractéristiques des autres sources du tramway et de leur état de fonctionnement. Cela se traduit expérimentalement par une dépendance linéaire de l'émission sonore en fonction du logarithme de la vitesse.

L'étendue des investigations qui aboutit à cette conclusion n'est pas connue avec précision dans [9] ; le panel de vitesse étudiée se situe entre 6 et 60 km/h. Il s'agit au minimum de campagnes de mesures sur le tramway de Nantes. Au sein du RST, des mesures sur l'émission en fonction de la vitesse ont été réalisées. C'est le cas pour les LRPC¹ sur le tramway de Strasbourg [10] (vitesse entre 10 et 50 km/h) et de Bordeaux [11] (vitesse entre 40 et 60 km/h), ainsi que pour l'INRETS² sur le tramway de Nantes [12] (vitesse entre 20 et 50 km/h).

1.2.3 Blocs moteurs (moteurs + vitesses) : non négligeable même à haute vitesse ?

Des mesures sous charges en laboratoire sur un seul type de bloc de traction auto-ventilé (moteur + vitesse) montrent clairement une dépendance en $50 \times \log_{10}(rm)$, avec rm le régime moteur en tours/minute [8]. Ce résultat est jugé conforme aux attentes pour un bloc auto-ventilé³. Des mesures réalisées sur des véhicules en mouvement, toujours dans le même article, montrent que le bruit de roulement est prédominant, du fait d'une dépendance en 28 à $34 \times \log_{10}(v)$. Les auteurs concluent cependant que pour des rails et des roues de rugosité usuelles (ce qui n'était pas le cas pendant les mesures, car le tramway sortait d'une longue période de tests de traction et de freinage), le bruit du bloc de traction pourrait dominer aux vitesses les plus élevées.

Ce point n'a pu être confirmé par d'autres articles, même si certaines mesures récentes de la RATP sembleraient confirmer le fait que d'autres sources que le bruit de roulement resteraient importantes, même au-delà de 20 km/h. Nous n'avons malheureusement pas réussi à en savoir plus.

1.2.4 Équipement de toiture : une influence négligeable, sauf peut-être à l'arrêt et pour les étages élevés des habitations riveraines

Lorsque le tramway est en mouvement, le bruit des appareils en toiture sont négligeables devant le bruit de roulement et bloc de traction [8]. Les équipements les plus bruyants sont les blocs de ventilation et d'air conditionné, celui du conducteur étant légèrement plus faible.

Lorsque le tramway est à l'arrêt, des mesures réalisées avec et sans climatisation font apparaître des écarts de 8 dB(A) [13]. Ce bruit devrait être pris en compte dans le modèle développé à l'INRETS pour la prévision des niveaux aux étages élevés [12].

1 Laboratoires Régionaux des Ponts et Chaussées.

2 Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité.

3 Le niveau de puissance sonore mesuré est de 94 dB(A) dans des conditions correspondantes à 40 km/h et de 103 dB(A) pour 60 km/h.

1.2.5 Conclusion

En conclusion, aux vitesses usuelles (supérieures à 15-20 km/h), le bruit de roulement peut être considéré comme prédominant. Certaines mesures récentes pourraient contrecarrer cette affirmation : d'autres sources resteraient importantes, même au-delà de 20 km/h. N'ayant aucun élément plus précis à ce sujet, nous nous cantonnerons à la modélisation du bruit de roulement.

Nous nous intéresserons tout d'abord à une modélisation de l'émission du bruit de roulement par des sources sonores équivalentes, qui est utilisée principalement dans les modèles d'ingénierie pour prédire les niveaux sonores relatifs à un projet. Nous verrons ensuite un modèle physique, qui dérive d'un modèle ferroviaire. Ce modèle physique, même s'il requiert des données d'entrées beaucoup plus précises, permet d'optimiser le matériel (roue/rail) pour diminuer le bruit. Il ne peut pas être utilisé comme modèle d'ingénierie.

1.3 Modélisation du bruit de roulement des tramways par des sources ponctuelles

Le bruit de roulement peut être modélisé par des sources sonores ponctuelles. Ce type de modélisation est utilisé dans les modèles d'ingénierie, car les données d'entrée ne sont pas trop exigeantes et les temps de calcul pas trop longs.

Le principal modèle développé dans cette partie est celui de l'INRETS [12]. Il donne des résultats satisfaisants pour des signatures de tramway (en $L_{Aeq,T=250ms}(t)$). Le microphone est situé à 7,5 m des voies et à 1,2 m de hauteur.

1.3.1 Localisation des sources

Le bruit de roulement semblant dominer dès 20 km/h, les principales sources sont situées au niveau des bogies, et très proches du sol (SerdB [9], LRPC de Strasbourg [10], INRETS [12]). Ce qui explique pourquoi on peut faire l'approximation du champ libre pour la propagation [12].

Deux types de mesure confirment la localisation au niveau du sol des sources bruit de roulement. Tout d'abord, il y a des mesures directes avec l'antennerie. La figure 2 présente des résultats de cette technique obtenus par l'INRETS avec une antenne 2D. Ensuite, une méthode indirecte basée sur la comparaison entre les spectres d'atténuation entre deux microphones mesurés et calculés a été développée pour le cas particulier du tramway par le LRPC de Strasbourg [14] [15] [16]. Cette méthode aboutit aussi à une hauteur de source très proche du sol, de l'ordre de 2-3 cm.

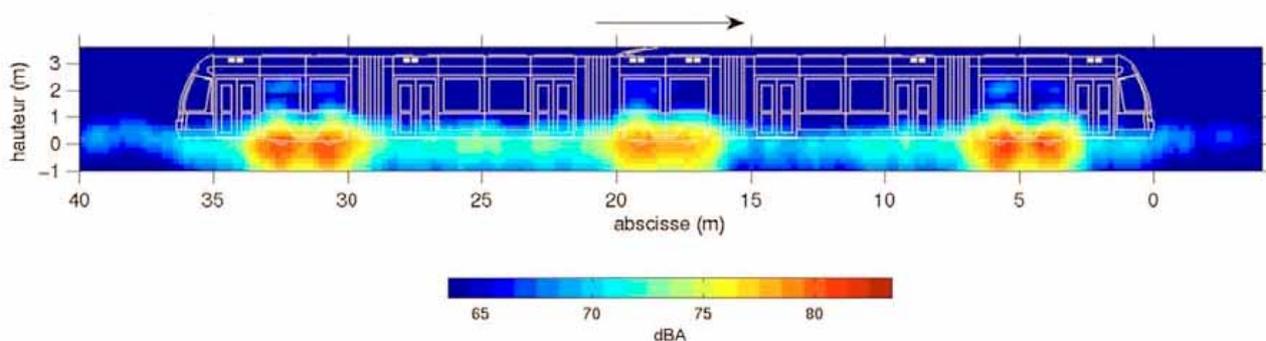


Figure 2: Exemple de cartographie acoustique réalisée sur un tramway à 40 km/h [13].

Les modèles les plus simples placent une source par boggie, située au milieu du boggie et au ras du sol. On peut aussi considérer une source par essieu (et donc deux sources par boggie), mais dès une distance de 1 m, on ne distingue plus les deux sources, comme le montre la Figure 4. Une source par essieu paraît donc suffisante pour la modélisation. On remarque par ailleurs, toujours sur cette figure, que même à partir d'une distance de 5 m, on distingue difficilement les boggies.

En plus d'une source par boggie, un modèle récent développé à l'INRETS place une série de sources ponctuelles sur la partie basse du tramway (voir figure 3).

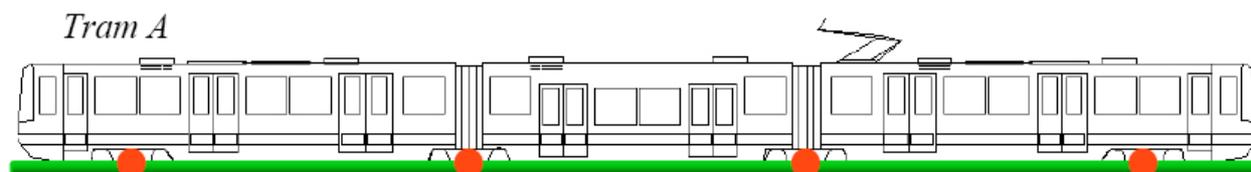


Figure 3: Positions des sources du modèle développé par l'INRETS sur un tramway français standard [12].

Pour mémoire, on peut noter que dans le modèle IMAGINE pour les trains [17], cinq hauteurs de sources sont utilisées, dont deux hauteurs pour le bruit de roulement : 0 m correspondant au contact roue/rail, et 0,5 m correspondant au centre d'une roue. IMAGINE ne traite pas le cas particulier du tramway. Par homologie, on peut cependant remarquer que le centre d'une roue de tramway est situé à une hauteur d'environ 0,3 m, mais les roues du tramway sont carénées.

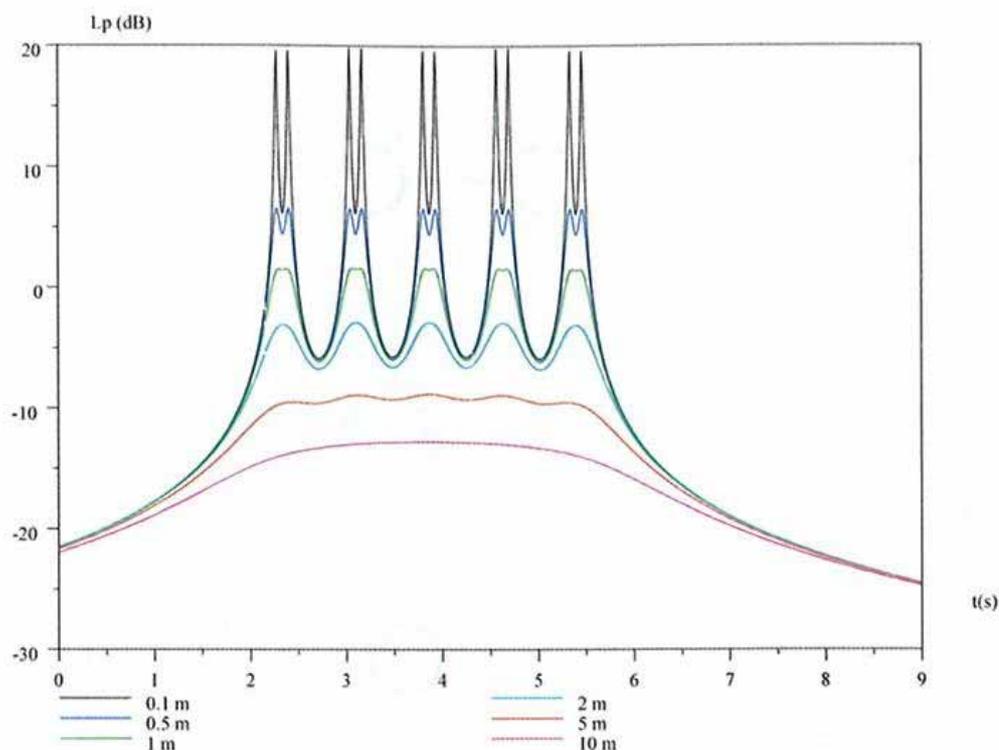


Figure 4: Signature temporelle simulée d'un modèle d'essieux adapté au tramway de Strasbourg, en mouvement uniforme sur une ligne droite, en fonction de la distance d'observation. LRPC de Strasbourg [18].

1.3.2 Spectres d'émissions

Les niveaux d'émissions sont principalement issus de mesures sur des tramways en fonctionnement. L'émission dépend d'une multitude de facteurs, même si la vitesse du tramway semble être le facteur principal. L'équation (1) présente un exemple type d'émission [19], avec les coefficients k_v à k_c les coefficients représentant respectivement l'effet de vitesse, l'effet de directivité, l'effet de type de pose de voie, l'effet d'appareil de voie, et l'effet de courbe. A titre indicatif, pour les niveaux mesurés, l'effet de distance est linéaire $\log_{10}(d)$ [20] [21]. Pour plus de précisions, le chapitre suivant détaille les différents paramètres d'émission recensés dans la littérature.

$$E = L_0 + k_v \log_{10}(v) + k_d + k_{tp} + k_{av} + k_c + \dots \quad \text{dB} \quad (1)$$

Les spectres d'émission varient suivant les configurations. Néanmoins, dans tous les cas, le spectre d'émission est assez plat entre 100 Hz et 1000 Hz puis décroît [22] [23] [24]. La figure 5 illustre un exemple de spectre d'émission en tiers d'octave. Dans le modèle développé à l'INRETS [12], les spectres d'émission sont distingués suivant les bogies moteurs ou porteurs, les premiers étant globalement plus bruyants à certains tiers d'octave. Certains tramways peuvent présenter un pic dans le tiers d'octave 4000 Hz, qui peut être attribué à un appareil électrique situé près des bogies moteurs.

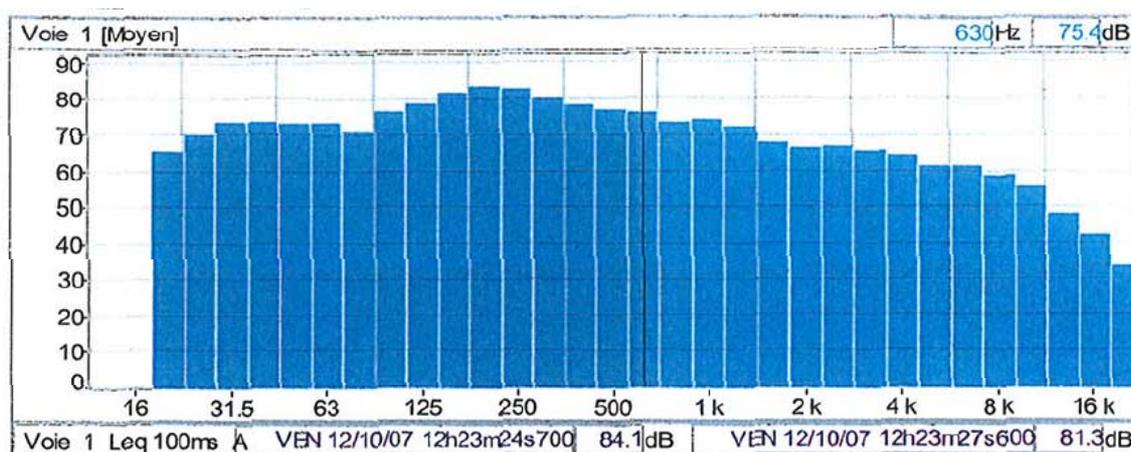


Figure 5: Spectre mesuré en dB(A) au passage d'un tramway [24].

1.3.3 Directivités

La directivité globale est scindée en deux composantes, supposées indépendantes l'une de l'autre : une directivité horizontale et une directivité verticale.

Pour la directivité horizontale, comme pour les trains [17], le bruit de roulement (sources localisées au niveau des bogies) est considéré comme ayant une directivité en cosinus [12], caractéristique d'un dipôle orienté perpendiculairement à l'axe de déplacement. La directivité, exprimée en dB, varie donc en $10 \log_{10}(\cos^2 \Phi)$, avec Φ l'angle entre la droite microphone-source et la droite orthogonale au déplacement de la source, passant par le microphone et parallèle au sol. Dans le modèle développé à l'INRETS, les sources ponctuelles modélisant la partie basse du tramway (hors zone des bogies) sont prises comme étant horizontalement omnidirectionnelles [12].

La directivité verticale, mesurée au passage du tramway avec des microphones formant un arc de cercle (cf. figure 6), est quant à elle quasiment omnidirectionnelle si on regarde les niveaux globaux en dB(A), entre 5° et 70° (LRPC de Strasbourg [25]¹, INRETS [13]²). La directivité verticale par tiers d'octave n'est par contre pas omnidirectionnelle. Pour un même tiers d'octave, des écarts d'au maximum 5-6 dB sont mesurés [25] [13] [12]. Dans le modèle développé à l'INRETS [12], les sources situées au niveau des bogies moteurs, porteurs et de la partie basse du tramway, ont tous les trois leur propre directivité verticale, déterminée à partir des mesures par antennerie.

1 Les mesures ont été faites sur un sol absorbant (herbe).

2 Les mesures ont été faites sur un sol réfléchissant.

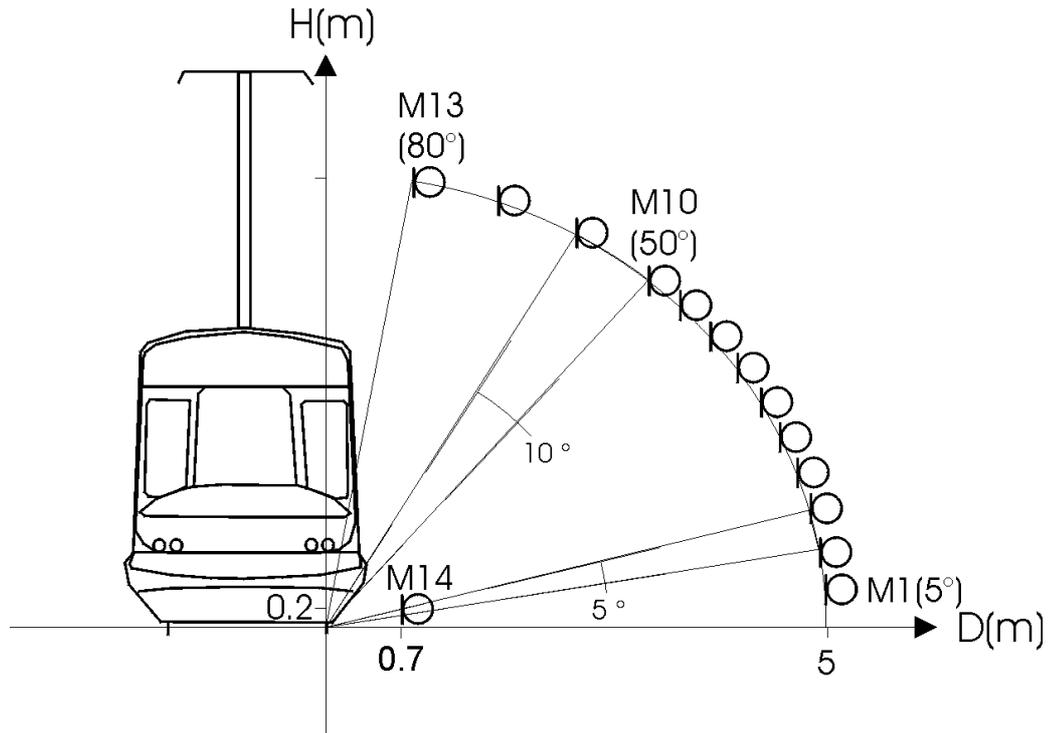


Figure 6: Disposition des capteurs dans un plan vertical perpendiculaire à la voie pour une mesure de directivité verticale [25].

1.4 Modèle physique du bruit de roulement : adaptation du modèle ferroviaire TWINS

1.4.1 L'exemple ferroviaire

La figure 7 montre l'importance relative des différentes sources d'un train, en fonction de la vitesse.

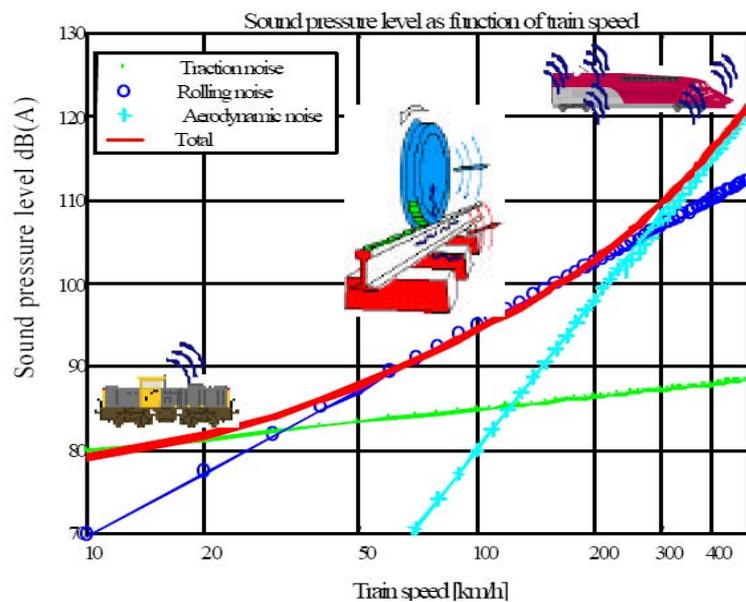


Figure 7: Niveau de pression en fonction de la vitesse des trains, et importance relative des différentes source de bruit, projet IMAGINE [26]

Le bruit de roulement pour les trains a fait l'objet de nombreuses études ces dernières années, et a atteint un stade de maturité [27] [28] [29] [30]. Un rappel bibliographique des principales étapes de l'étude du bruit de roulement est réalisé dans [31].

Le principe du mécanisme de génération du bruit de roulement est décrit figure 8. Le bruit est généré par les irrégularités de surfaces des roues et des rails : on appelle cela la rugosité. Les longueurs d'onde des défauts sont de l'ordre de 5-200 mm avec des amplitudes inférieures à 50 μm . Des irrégularités de longueur d'onde λ , produisent une excitation à la fréquence $f=v/\lambda$, où v est la vitesse du train en m/s [28]. Pour des vitesses de trains comprises entre 50 et 160 km/h et si l'on s'intéresse au spectre 100 Hz-5000 Hz, l'on doit mesurer une rugosité avec des longueurs d'ondes comprises entre 3-450 mm. En plus de sa rugosité, le comportement dynamique de la voie est caractérisé par le taux de décroissance dans le rail [32].

Le logiciel TWINS (Track-Wheel Interaction Noise Software) est la référence pour prédire le bruit de roulement. Son principe est décrit plus précisément dans l'annexe D. Du fait d'une surface de contact entre la roue et le rail (typiquement de l'ordre de 10 à 15 mm), on constate l'existence d'un filtre de contact qui atténue les longueurs d'onde les plus courtes. Pour plus de précisions sur le fonctionnement du logiciel TWINS lui-même, on pourra se reporter à [32]. Le logiciel TWINS est aujourd'hui validé pour un grand nombre de type de roues et de rails : la précision est inférieure à environ 2-3 dB(A). Les variations en tiers d'octaves sont plus importantes. Les incertitudes sur la rugosité sont les principales causes dans les écarts mesures-calculs au niveau fréquentiel. Si aucun contrôle de la rugosité n'est fait, des variations jusqu'à 5 dB(A) sont possibles pour un même type de roue sur un site donné [30].

Le logiciel TWINS permet de simuler l'émission sonore produite par les différents composants qui interviennent, en fonctions des configurations testées : roue, rail, traverse (cf. figure 9). Les traverses dominent en basses fréquences, les roues en hautes fréquences (typiquement au-dessus de 2000 Hz), et les rails aux moyennes fréquences.

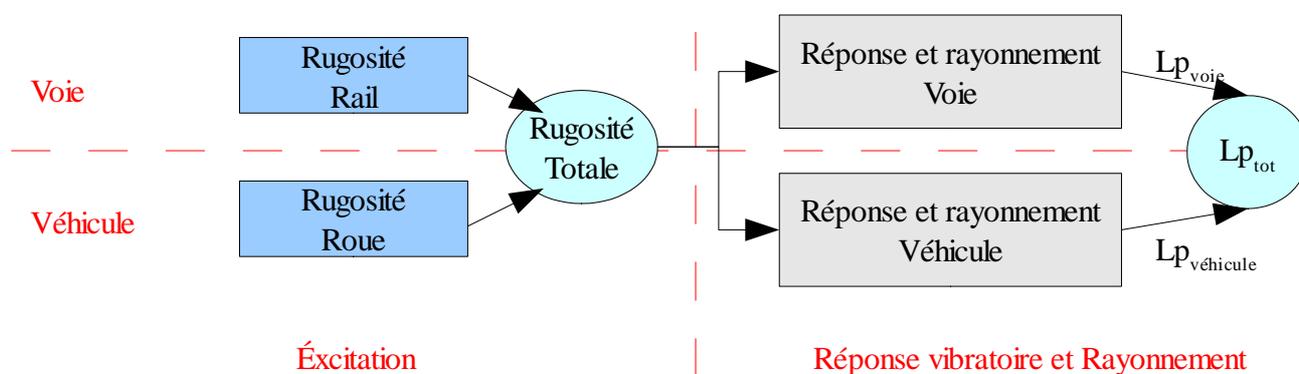
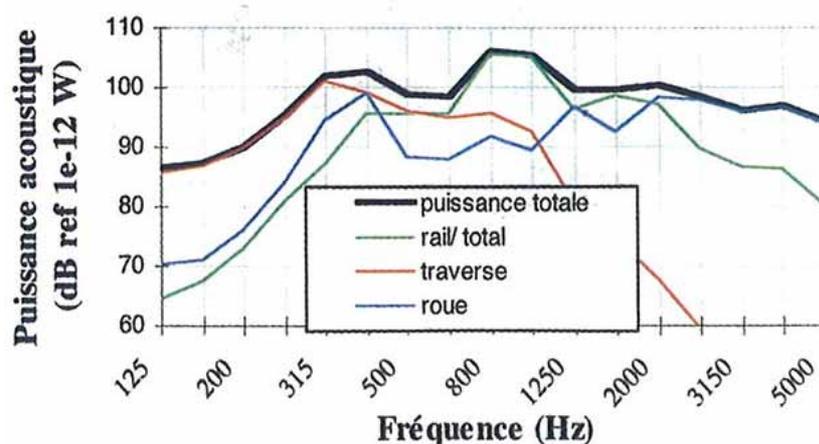


Figure 8: Schéma de principe de la modélisation du bruit de roulement [32].

Il peut cependant exister des non-linéarités et la modélisation linéaire de TWINS n'est alors plus valable. Dans TWINS, la rugosité à une fréquence particulière est liée linéairement au bruit à la fréquence correspondante, dépendant de la vitesse du train. Même si la théorie s'avère pertinente pour un large panel de rugosités différentes, elle montre ses limites quand le rail présente une usure ondulatoire¹ ou en présence de discontinuités (joints, plats de roues). Même si quelques modèles non linéaires ont commencé à être développés, il faut augmenter le domaine fréquentiel de prédictions jusqu'à 5000 Hz contre 1500 Hz maximum actuellement. Comparé au bruit de roulement, peu de travail a été réalisé sur les bruits d'impacts.

¹ Des bosses et des creux sont visibles à l'oeil nu sur la voie. On parle de « corrugation » en anglais.



I

Figure 9: Calcul TWINS de la puissance acoustique. Contributions respectives du rail, des traverses et de la roue [32].

De nos jours, la recherche porte non plus seulement sur l'excitation verticale mais aborde aussi l'excitation latérale. Enfin, même si la rugosité roue/rail est la principale source de bruit, d'autres mécanismes existent : en particulier pour les fréquences basses, l'influence des traverses peut être importante (mais l'enjeu se pose plus en terme de vibrations qu'en termes de bruits aériens). La vibration des roues est aujourd'hui assez bien connue. La vibration de la voie exige par contre encore des recherches plus poussées. Il s'agit de développer un modèle de vibrations pas seulement verticales, mais aussi latérales. Par ailleurs, l'amortissement le long du rail doit être déterminé plus précisément. Trois modèles de voie sont inclus dans TWINS. De nombreux modèles récents ont été développés depuis.

1.4.2 Application aux tramways

Aux faibles vitesses, il semble d'une part que le filtre de contact utilisé dans TWINS soit limité (besoin de prendre en compte des longueurs d'onde plus basses), et d'autre part que les données rugosité du rail ne sont pas disponibles (très difficilement mesurables) pour les grandes longueurs d'onde. Bombardier aurait modifié le filtre de contact et extrapolé les données de rugosité, et obtiendrait de « bons » résultats. Nous avons trouvé une seule référence qui fait explicitement référence à l'utilisation du modèle TWINS pour le tramway T3000 de Bruxelles (construit par Bombardier) [8].

1.5 Le crissement : un phénomène difficilement reproductible ... et donc difficilement modélisable

Le crissement lié à l'utilisation des freins, moins gênant, n'est pas abordé. Il est juste mentionné dans un article relatif aux tramways [33]. Le modèle IMAGINE relatif au bruit ferroviaire aborde le bruit de crissement lors du freinage [17], mais il ne traite pas le cas particulier du tramway.

1.5.1 Le crissement : qu'est-ce que c'est ?

Le crissement se caractérise par un haut niveau sonore (+20 dB(A)) de une ou plusieurs fréquences pures comprises entre 500 Hz et 5 000 Hz (selon [34]). Il se produit dans des virages étroits. D'après [35], « le crissement est un phénomène lié au glissement latéral de la roue sur le rail. Il se traduit pas l'excitation en vibrations de la roue, qui joue alors le rôle d'un haut-parleur, plus ou moins efficace acoustiquement selon sa constitution et son amortissement. » [36] confirme que généralement, la contribution de la roue dans l'émission sonore est la plus forte. Le crissement est (pour les trains en tout cas) un axe de recherche important [31] pour les années à venir.

La localisation du crissement dépend des mesures ([36] et [37]). Il semble cependant expérimentalement que le crissement est produit principalement sur le premier essieu d'un bogie et sur la roue intérieure au virage. Pour les bogies non moteurs à haute vitesse cependant, le crissement a lieu uniquement sur la roue extérieure au virage de l'essieu arrière du bogie.

Si l'on excepte les virages particulièrement serrés, le crissement apparaît comme un phénomène peu répétable à tous les observateurs : il est fortement influencé par de petites variations des conditions météo ou opératoires. La modélisation de ce phénomène en est rendue d'autant plus difficile.

Enfin, le crissement n'est pas :

- le frottement de boudin¹ : le contact boudin/rail modifie le contenu fréquentiel du bruit mais non son niveau [36] ;
- le glissement relatif entre deux roues d'un même essieu rigide ([35] et [36]). En effet, des crissements peuvent être observés sur certains essieux équipés de roues indépendantes.

Exemples de mesure de crissement :

- Le CETE de Lyon a réalisé des mesures de crissement sur le tramway lyonnais ([38], 2001). Le déclenchement du crissement paraît assez régulier. Il peut durer entre 15 et 30 secondes. L'émergence par rapport à un passage sans crissement est d'environ 20 dB(A). Deux tiers d'octave prédominant : 2000 Hz (pour les 2 sites), et 630 Hz (seulement pour un des sites). Les paramètres qui semblent jouer sur le crissement sont la vitesse et le rayon de la courbe.
- *Le CETE de l'Est a lui aussi réalisé des mesures de crissement, sur le tramway strasbourgeois [39]. Le crissement étant un phénomène aléatoire, peu de mesures avec crissement ont malheureusement pu être enregistrées. Le crissement se manifeste par l'émergence de raies fréquentielles harmoniques, éventuellement isolées. Pour la courbe étudiée, une suite harmonique de fondamental légèrement inférieure à 2000 Hz est mise en évidence jusqu'à au moins 15 kHz, ainsi qu'une raie isolée à 750 Hz (cf. figure 10). Il est prématuré de conclure que les fréquences du crissement sont indépendantes du site.*

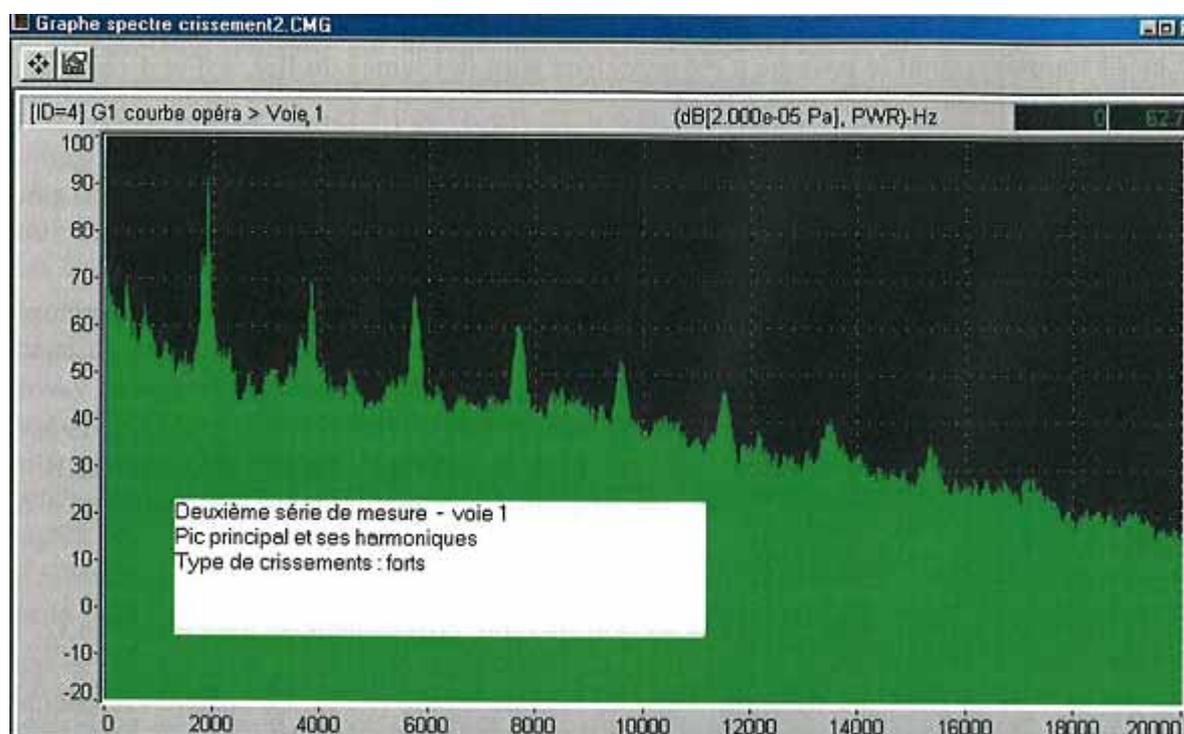


Figure 10: Spectre typique en situation de fort crissement calculé sur un échantillon d'1 seconde. En abscisse : les fréquences en Hz - en ordonnée : les niveaux en dB. [14]

¹ Le boudin est un disque circulaire sur la roue, orthogonal à la bande de roulement, et qui permet au train de rester sur la voie.

1.5.2 Modélisation du crissement : un sujet d'actualité

Les références présentées ici sont loin d'être exhaustives. Le but est uniquement de montrer que ce domaine de la recherche vieux d'au moins une dizaine d'années reste d'actualité.

1.5.2.1. Des modèles détaillés en cours de développement

Pour le cas particulier du tramway, un modèle a été développé par F. Périard en 1998 [34]. La génération du crissement est décomposée en six sous-modèles, qui forment un modèle global. Ce modèle est théorique et n'a pas été confronté à la réalité lors de son développement.

D.J. Thompson et C.J.C Jones [31] précisent en 2000 que des modèles existent mais qu'aucune campagne d'envergure n'a encore été entreprise. Les auteurs proposent de privilégier des méthodes statistiques, plutôt que des méthodes déterministes au vu du caractère très aléatoire de ce phénomène. En Angleterre [40] ou aux Pays-Bas [41], les recherches sur le crissement ferroviaire continuent, mais nous n'avons pas trouvé plus de précisions.

Très récemment (2007) O. Chiello et al. [42] ont proposé un nouveau modèle pour le crissement des matériels urbains (tramways+métros), à partir d'une campagne de mesures sur site et en laboratoire. Ses principales originalités sont la possibilité de déterminer le taux d'occurrence du crissement, ainsi que les niveaux et le spectre. La corrélation modèle/mesures est plutôt satisfaisante, surtout en terme de vibrations. Pour obtenir une bonne prévision du crissement, des recherches complémentaires sur la nature transitoire du coefficient de frottement de la zone de contact de roulement sont nécessaires.

1.5.2.2. Modélisation d'ingénierie du crissement pour les trains (IMAGINE)

Dans le cadre du projet européen IMAGINE [17], une modélisation du crissement des matériels ferroviaires en virage est proposée. Cette modélisation ne nécessite pas comme pour les autres modèles une connaissance fine des matériels, inimaginable pour des études opérationnelles (études statistiques de type rugosité des roues et du rail sur les différents trains en circulation...). Le cas particulier du tramway n'est pas abordé, mais nous allons tout de même détailler un peu la prise en compte du crissement pour les trains, pour mémoire.

Les paramètres influençant le crissement sont de nature complexe. Il est donc proposé d'utiliser les niveaux acoustiques moyennés sur la durée du passage d'un véhicule avec crissement. Le niveau d'émission est ensuite corrigé par le taux d'occurrence attendu. Par défaut, une valeur de 50% est proposée, ce qui correspond à une réduction de 3 dB des niveaux proposés. Les niveaux d'émission particuliers sont à prendre en compte pour des courbes de rayon inférieur à 1000 mètres ou pour des courbes et points de jonctions de rayon inférieur à 100 m. Les niveaux d'émission utilisés sont spécifiques pour chaque matériel roulant, étant donné que le crissement dépend en grande partie du type de roue.

Le niveau d'émission en condition de crissement dépend de la voie et du type de véhicule. La hauteur de source est fixée à 0.5 m (c'est bien la roue qui rayonne). Ce niveau d'émission noté $L_{\text{peq},i,\text{crissement}}(v, R)$ correspondant à une vitesse v et à une courbe de rayon R peut être estimé à partir du niveau $L_{\text{peq},i,\text{crissement}}(v_0, R_0)$ mesuré lors de passages de train à une vitesse v_0 dans une courbe de rayon R_0 .

$$L_{\text{peq},i,\text{crissement}}(v, R) = L_{\text{peq},i,\text{crissement}}(v_0, R_0) + 20 \log_{10} \frac{v}{v_0} - 20 \log_{10} \frac{R}{R_0} \quad (2)$$

Cette formule est à utiliser pour des vitesses et des rayons éloignées de moins d'un facteur 10 des valeurs de référence v_0 et R_0 .

1.6 Un petit mot sur les vibrations

Les vibrations ne font pas partie du champ d'étude de cette bibliographie. Néanmoins, il paraît intéressant de fournir quelques références sur le sujet.

La modélisation des vibrations causées par le tramway est par exemple étudiée actuellement dans le cadre d'un projet français, le PREDIT ([43] et [44]). Le modèle en cours de développement permet pour l'instant de prédire les vibrations jusqu'à 100 Hz pour certains types de sols. Les fréquences inférieures à 100 Hz sont les plus importantes et les plus nocives. La validité de ce modèle doit être élargie à d'autres types de sol et de tramways.

Ce travail a permis de détailler les données importantes pour le traitement des vibrations. Premièrement, il faut connaître de manière détaillée les paramètres dynamiques des sols jusqu'à une profondeur d'environ six mètres. Les sols au-delà de six mètres de profondeur, ainsi que les hétérogénéités sont reconnus d'une influence mineure. Deuxièmement, il faut caractériser l'excitation et modéliser l'influence des caractéristiques du matériel et de l'infrastructure.

Certains types de pose de voie permettent de diminuer les vibrations transmises au sol : pose sur dalle flottante ou Silent Rail (voir annexe 103), matériau absorbant posé continument sous le rail aux niveau de croisements de voies [45].

2 Paramètres d'émission

« *Le but de la science est de prévoir et non, comme on l'a dit souvent, de comprendre.* »
Lecomte du Noüy (Pierre)¹

Le tramway ayant connu un engouement relativement récent en France, les paramètres d'émission du tramway commencent seulement à être connus. Dans d'autres pays comme en Europe de l'Est, le développement des tramways est plus ancien. Nous essaierons de tirer profit de leur expérience, notamment avec le modèle développé en Slovaquie [1].

Un rapport intermédiaire² réalisé par le SerdB en 1998 dans le cadre du PREDIT 2 liste les paramètres influençant l'émission sonore [20]. L'annexe C reprend l'ensemble des paramètres identifiés comme importants. Cette grille peut être utile pour la constitution d'une base d'émission sur les tramways.

L'influence des paramètres d'émission n'est pas simple à mettre en évidence. Il est en effet souvent difficile d'isoler l'influence séparée de tel ou tel paramètre, car entre deux situations comparées, plusieurs paramètres sont modifiés. Par ailleurs, les indicateurs utilisés ne sont pas forcément les mêmes, et un nombre de mesure assez limité est disponible.

2.1 Les paramètres cinématiques : la vitesse le facteur d'émission principal

La vitesse est le paramètre principal de l'émission sonore des tramways.

2.1.1 La vitesse : une dépendance forte entre $20 \log_{10}(v)$ et $35 \log_{10}(v)$

A partir 15-20 km/h, la grande majorité des publications considèrent le bruit de roulement comme principale source d'émission (cf. 1.2 p.7 pour plus de précisions). De ce fait, les auteurs considèrent empiriquement l'influence de la vitesse sur l'émission sonore des tramways linéaire en $\log_{10}(v)$.

La pente en fonction du logarithme décimal de la vitesse peut varier très fortement suivant les mesures. Divers paramètres comme le type de pose des rails et du matériau de remplissage [23], l'état de la voie [22], ou le type de tramway semblent importants. Il est cependant parfois considéré que ces paramètres d'émission ont une influence sur le niveau émis indépendamment de la vitesse [19] (cf. 1.3.2 p.11).

La pente est comprise entre 16 [1] et 45 [37], même si la grande majorité des mesures sont comprises dans une fourchette entre 20 et 35 $\log_{10}(v)$. Le logiciel MITHRA a par exemple par défaut un coefficient de 29,5 pour les tramways [23]. Une ancienne norme allemande « Schall 03 1990 »³ [46], qui s'applique à tous les matériels ferroviaires (y compris aux tramways), considère que l'émission varie en $20 \log_{10}(v)$.

De plus, la pente ne semble pas varier suivant l'angle d'émission [21]. Sur la figure 11, on remarque en effet que les droites de régression correspondant à une même campagne de mesure (traits pleins ou pointillés), sont pratiquement parallèles, et ce quel que soit l'angle. La différence de pente entre les deux campagnes s'explique par le fait que le matériel était rodé lors de la deuxième campagne uniquement.

1 Pierre Lecomte du Noüy (1883-1947) est un mathématicien, biophysicien, écrivain et philosophe français.

2 Nous n'avons malheureusement pas réussi à obtenir le rapport définitif.

3 Nous n'avons malheureusement pas réussi à nous procurer la nouvelle norme « Schall 03 2006 ».

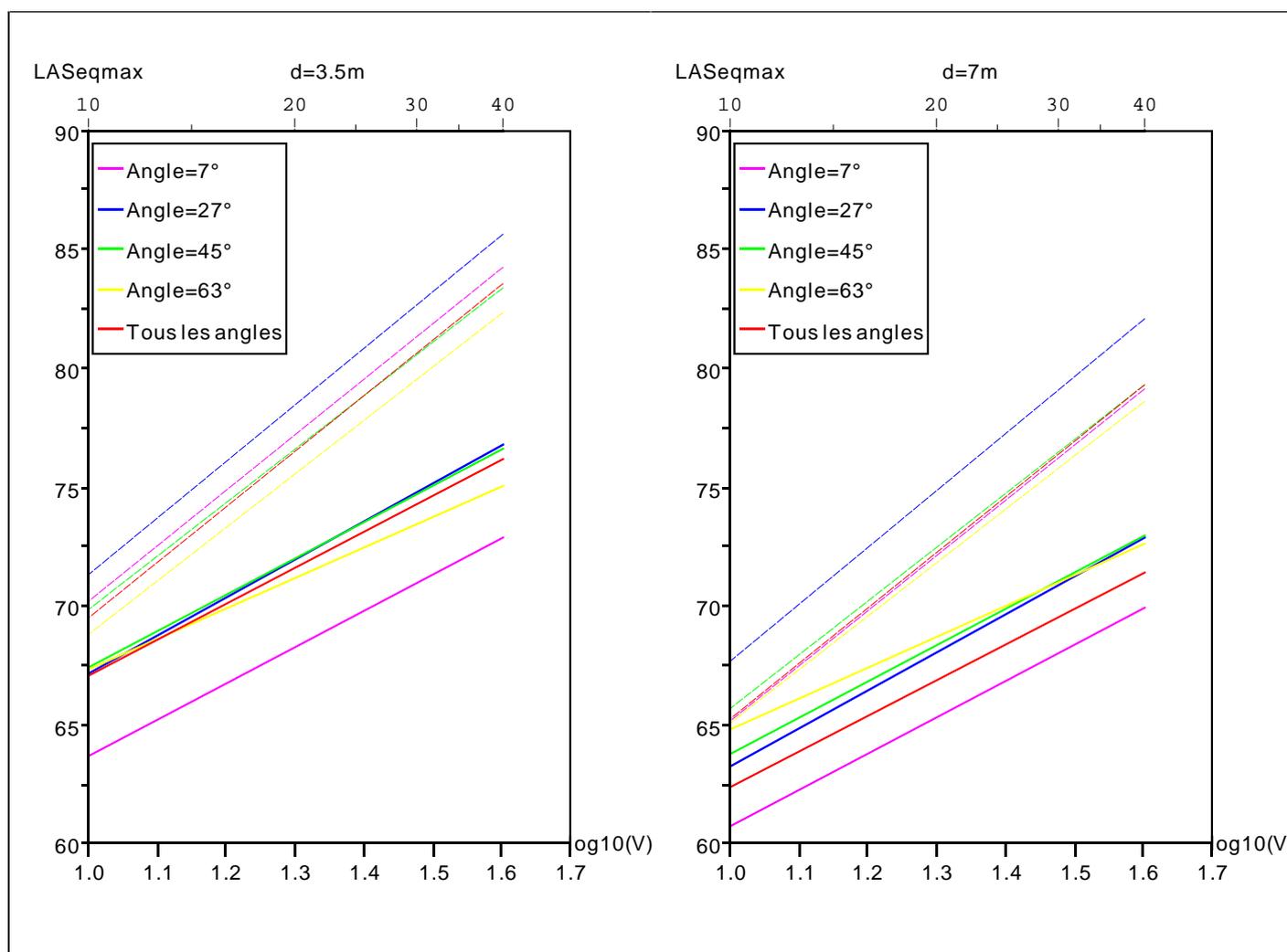


Figure 11 : Comparaison entre deux campagnes de mesures : l'une réalisée en 2004 avec un matériel non rôdé (traits pleins), l'autre réalisée en 2000 avec un matériel rôdé (en pointillés). Résultats des régressions multilinéaires du $L_{ASeqmax}$ en fonction de la vitesse et de la distance à la voie. Toutes les vitesses sont prises en compte pour la régression. LRPC de Strasbourg [21].

A titre de comparaison, pour les trains, la SNCF précise que l'émission varie en $30 \log_{10}(v)$ [47] ; alors que pour les PL, le bruit de roulement varie entre 26 et $32,6 \log_{10}(v)$ dans la révision des abaques du Guide du Bruit, en cours de finalisation [48].

2.1.2 L'accélération : une influence négligeable

L'effet de l'accélération a été étudié à la fois en fonction de simulations numériques et de mesures.

Côté simulations numériques, une étude réalisée par le SerdB dans le cadre du PREDIT 2 [9] étudie l'effet de l'accélération d'un point de vue théorique. L'émission est supposée varier en fonction de la vitesse en $30 \log_{10}(v)$. La figure 12 présente les courbes de variation du niveau équivalent maximum sur une seconde (L_{ASmax}) pour différentes valeurs de l'accélération, dans le cas d'une vitesse tramway variant de 10 km/h à 50 km/h (le tramway passe devant le microphone à une vitesse de 30 km/h). Le récepteur est situé à 2 m au-dessus du sol. On s'aperçoit que les écarts obtenus demeurent faibles et ce, d'autant plus que la distance microphone/tramway est petite. Pour une accélération de $0,4 \text{ m/s}^2$ et un piéton situé à 5 m des voies, la variation du L_{ASmax} est inférieure à $0,01 \text{ dB(A)}$.

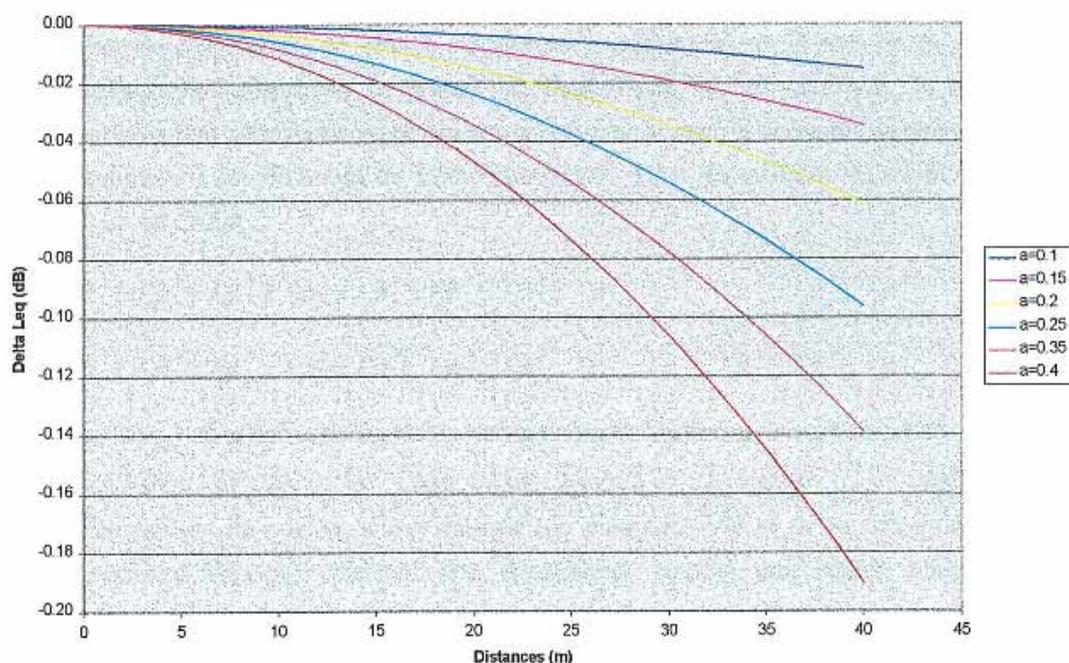


Figure 12: Variation du niveau équivalent pour différentes valeurs de l'accélération, dans le cas d'une vitesse tramway variant de 10 à 50 km/h. Étude SerdB [9].

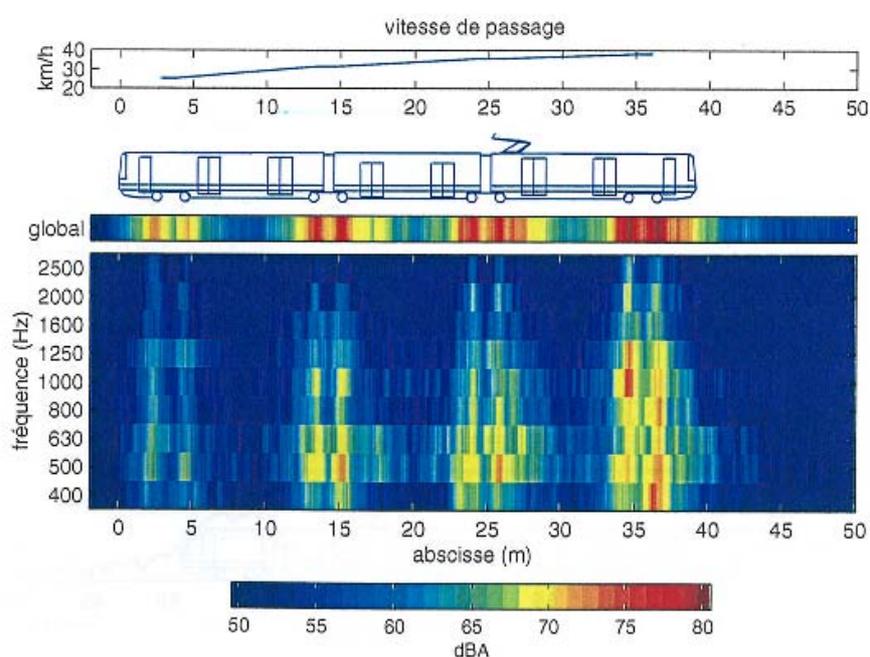


Figure 13: Cartographie acoustique du passage d'une rame sous accélération de 25 à 40 km/h. INRETS [37].

Côté mesures, l'INRETS [37] a étudié l'influence de l'accélération sur le passage d'un tramway. L'énergie acoustique est moyennée sur 60 à 100 ms selon les fréquences. Le tramway circulait à 25 km/h lors du passage du premier bogie et à 40 km/h lors du passage du dernier bogie. Les niveaux relevés au passage de chaque bogie sont du même ordre que ceux d'un bogie avec une vitesse constante. La figure 13 illustre les mesures réalisées.

2.2 Type de plateforme : une influence non négligeable

La plateforme comprend à la fois le revêtement (ou remplissage), ainsi que les rails, et leurs fixation sur le sol. Afin de comparer, plusieurs types de plateformes, il faut que tous les autres paramètres d'émissions soient identiques (type de rail, fixation, type de tramway...). Or il arrive souvent que plusieurs paramètres soient modifiés en même temps, ce qui rend ardu voire impossible tout travail de comparaison.

Heureusement, quelques grandes tendances peuvent être dégagées. Elles nécessiteront néanmoins d'autres mesures afin d'être affinées.

2.2.1 Revêtements

Les revêtements (ou remplissages) les moins bruyants sont par ordre décroissant¹ [19]:

1. herbe : l'influence est relativement forte par rapport à un revêtement réfléchissant [19]. La fourchette des effets dans la littérature est assez large. Le gain acoustique semble augmenter légèrement avec la vitesse. A 40 km/h : gain de 4 dB(A) sur les niveaux mesurés par le LRPC de Strasbourg² (cf. figure 29) à un peu plus de 10 dB(A) sur les niveaux d'émission calculés par le LRPC d'Autun [23]. La valeur de 10 dB(A) semble très forte si l'on considère le seul effet du revêtement. Dans [49] et [50], des écarts de 10 à 11 dB(A) sont aussi obtenus mais avec deux autres mesures complémentaires : le meulage des voies, l'ajout de blocs de caoutchouc le long du rail. Dans [50], il est aussi précisé que le fait d'entourer les rails d'un matériau élastique réduit significativement les niveaux sonores.
2. ballast : c'est une solution intermédiaire entre un revêtement herbeux, et un revêtement réfléchissant [23] [19]. Cette dernière solution permet néanmoins d'améliorer les coûts de maintenance [51].
3. sable ou terre tassée : aucune mesure n'étant disponible, ce type de revêtement est classé à titre indicatif.
4. béton, enrobé, pavés : c'est le revêtement le plus bruyant [23] [19].

La figure 14 présente la puissance acoustique linéaire équivalente en fonction de différents couples (type de sol, type de pose de voies) [23]. Elle permet de comparer pour la pose classique les revêtements pavés (rouge), ballast (jaune), et herbe (bleu).

1 Certains références sont moins tranchées[10]. Mais il s'agit en l'occurrence sans doute, comme le précise l'auteur, d'un problème de rodage. Les mesures ont en effet été réalisées lorsque le tramway était tout à fait opérationnelle, mais pas encore en exploitation commerciale.

2 En 2008.

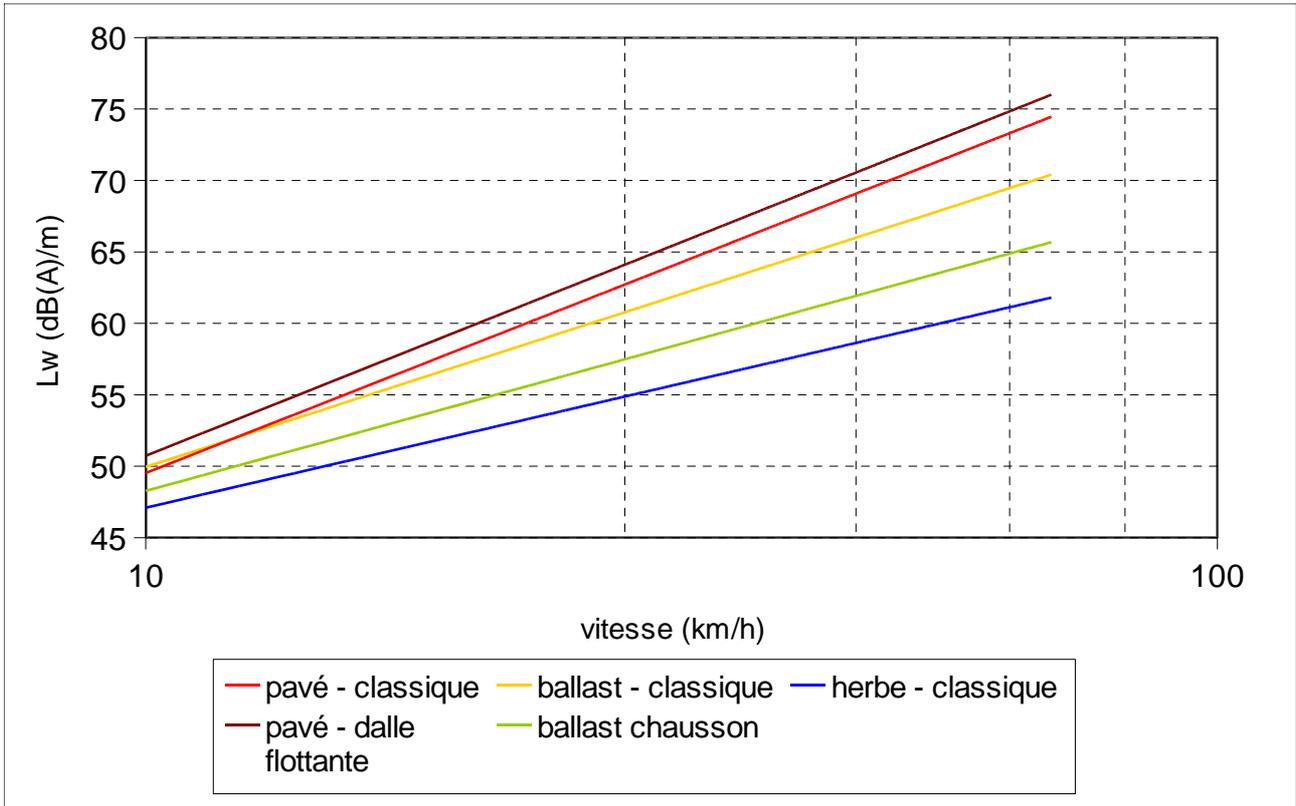


Figure 14: Puissance acoustique linéaire équivalente en fonction de différents couples (type de sol, type de pose de voies). LRPC d'Autun [23].

La figure 15 détaille la différence entre des remplissages herbe, ballast et pavés avec une pose classique en tiers d'octaves. Le maximum d'absorption acoustique a lieu à 1000 Hz.

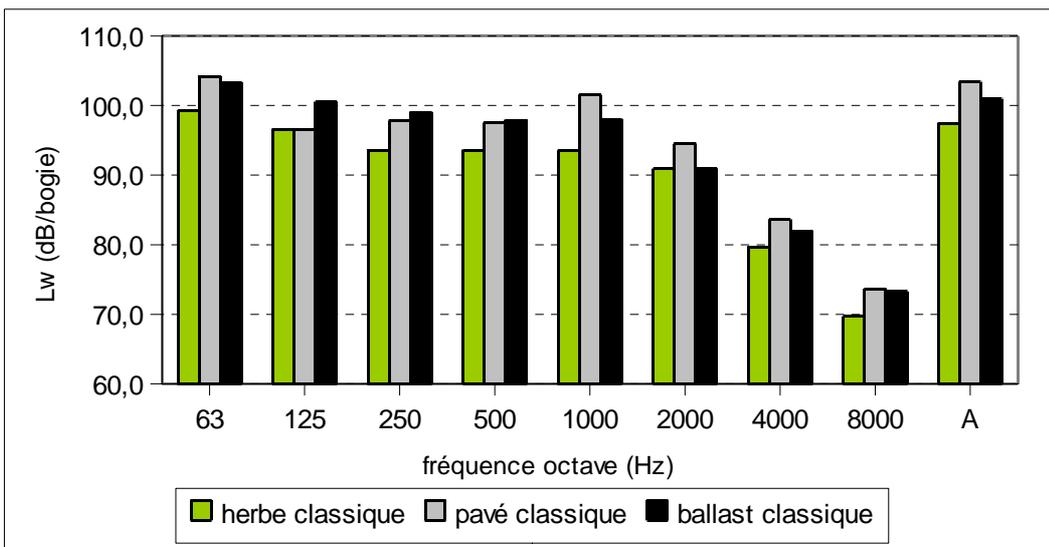


Figure 15: Puissance acoustique par bogie

Une autre étude, émanant de l'université de Zagreb en Croatie [51], considère un large panel de remplissages différents, pour un même type de pose de voie. L'influence de cinq remplissages est testée :

- MP1 : asphalte,
- MP2 : plaque de béton préfabriquée,
- MP3 : ballast (30/60 mm),
- MP4 : aucun revêtement,
- MP5 : herbe.

Les résultats sont indiqués figure 16. Les mesures sont issues de moyennes de L_{Amax} sur des véhicules du flot (pas de recalage en vitesse, vitesse moyenne de 25 km/h). Le microphone était situé à 1 m du rail extérieur et à 1,20 m de hauteur. Au moins cinq passages ont été réalisés sur chaque site.

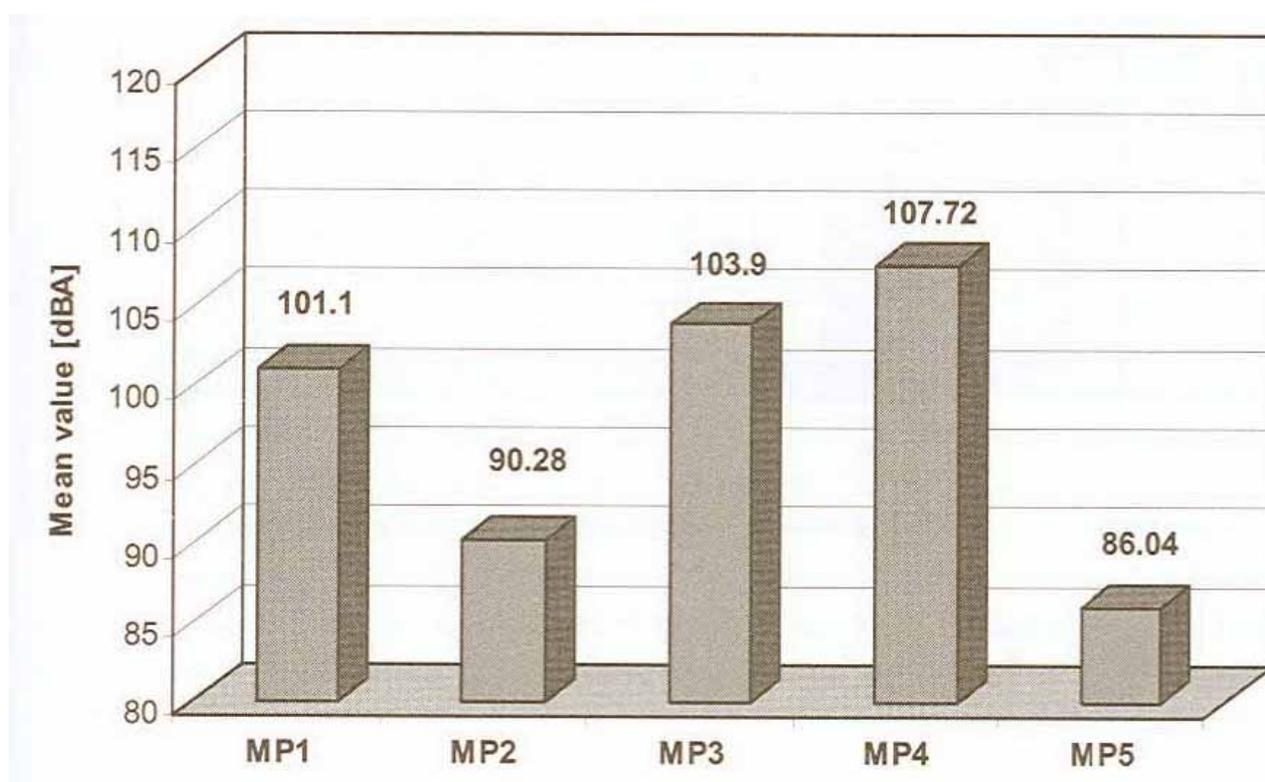


Figure 16: Influence du remplissage sur les L_{Amax} [51]

Ces résultats confirment que l'herbe est le remplissage pour lequel l'émission du tramway est moindre. La différence entre l'asphalte et les plaques de bétons préfabriquées paraît néanmoins surprenante.

2.2.2 Les fixations du rail

Différents types de fixation du rail existent [10] [23]. Outre la pose classique (figure 17), il existe différentes poses comprenant un matériau résilient (cf. figure 18). Il peut être placé directement sous le rail (c), sous les traverses (b), sous la dalle qui supporte les traverses (a). L'annexe B détaille les différentes fixations utilisées pour le tramway de Strasbourg, incluant une variante supplémentaire de pose (le Silent Rail) [10].

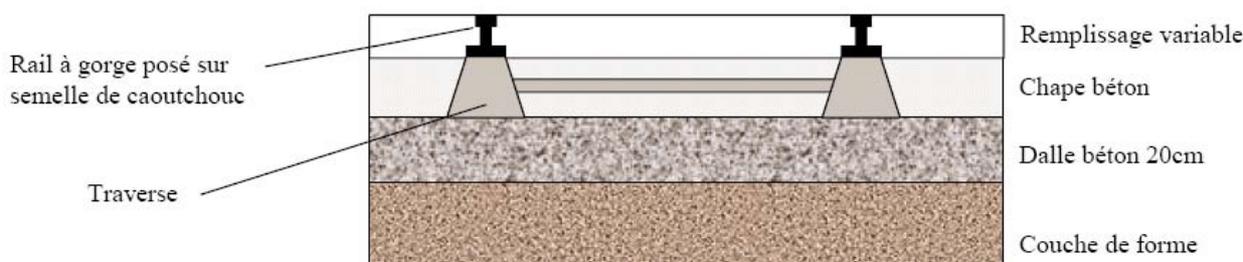


Figure 17: Pose classique sur le réseau grenoblois [23].

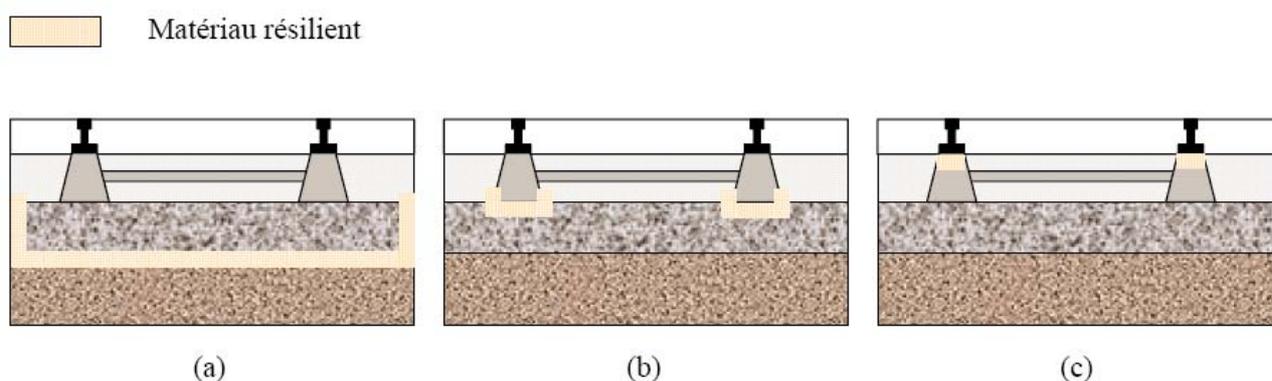


Figure 18: Autres poses utilisées sur le réseau grenoblois : (a) dalle flottante, (b) sous la traverse (pose sur chausson), (c) sous le rail [23].

Suite aux différentes mesures réalisées, on peut dégager les grandes tendances suivantes :

- les dispositifs anti-vibratile ne sont pas anti-bruit. Le LRPC de Strasbourg constate une augmentation d'environ 1,6 dB(A) à 40 km/h entre le Silent Rail et une pose classique [52]. C'est du même d'ordre de grandeur pour le LRPC d'Autun [23], qui constate que la pose dalle flottante conduit à une augmentation d'environ 2 dB(A) quelle que soit la vitesse (cf. figure 14).
- le dispositif chausson présente un gain de 4 dB(A) à 30 km/h par rapport à une pose classique [23] (cf. figure 14). Ce gain a tendance à légèrement augmenter en fonction de la vitesse. Dans [53], le même ordre de gain est trouvé : un gain de 1,5 à 3 dB(A) pour la fixation présentant une raideur de 40 N/m par rapport à celle avec une raideur de 160 N/m.

A titre indicatif, les figures 19 et 20 illustrent les modifications de spectres occasionnées par le changement de type de pose de voies.

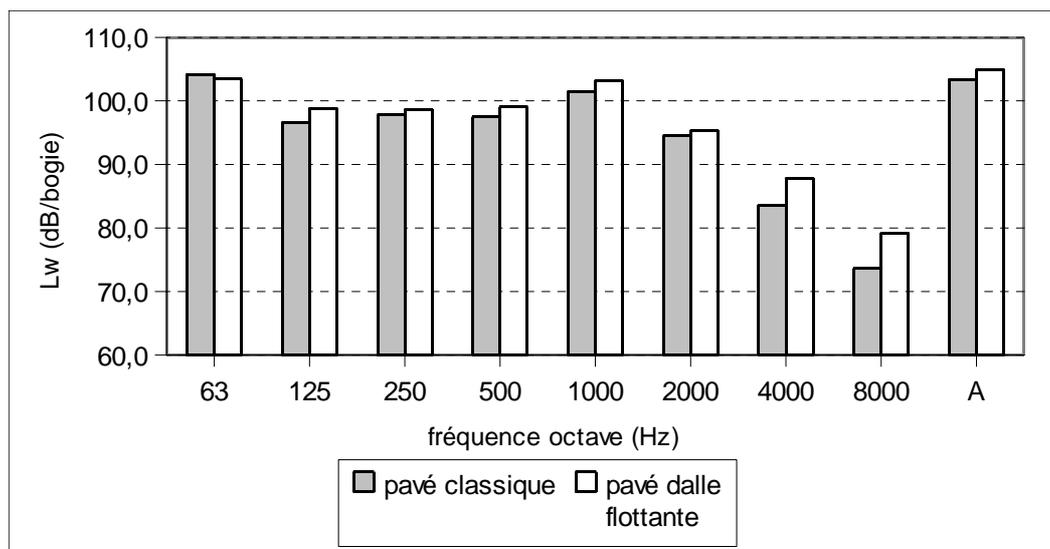


Figure 19: Évolution des spectres d'émission en fonction des poses de voie pour un revêtement pavé [23].

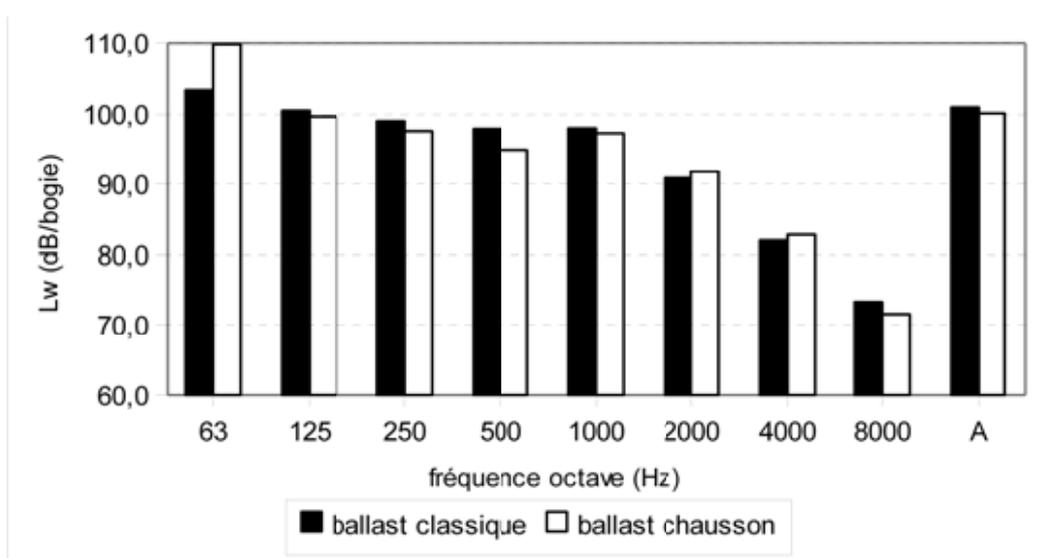


Figure 20: Évolution des spectres en fonction du type de pose de voies pour un revêtement ballast [23].

2.3 État des voies et entretien : une influence qui peut être prépondérante

2.3.1 Quelques définitions : usure ondulatoire des voies et rugosité

On utilise souvent deux termes pour qualifier l'usure du rail :

- l'usure ondulatoire ou « corrugation » en anglais : « sur la surface des rails concernés, on reconnaît facilement les sommets brillants et les creux plus sombres . Les amplitudes peuvent atteindre une valeur de 50 à 100 μm » [54]. Cet article fait le point sur un siècle de recherches. Au début du vingtième siècle, l'usure ondulatoire du rail était déjà un sérieux problème pour les tramways.

L'usure ondulatoire semble plus rapide dans les virages [22]. « Les observations montrent qu'un très grand nombre de facteurs ont une influence sur la tendance à l'usure ondulatoire du rail et sur la manifestation concrète du phénomène. [...] des rails identiques venant de fabricants différents peuvent développer une usure ondulatoire dont la longueur d'onde diffère » [54]. Le projet européen CORRUGATION [55] a permis de proposer des outils pour mesurer l'usure ondulatoire, et des solutions pour la réduire ou la supprimer. Il s'est intéressé aux véhicules de faible poids, roulant à faible vitesse dans des courbes avec un faible rayon. D'autres buts comme la diminution du bruit et des coûts de maintenance ont été atteints. Pour les tramways, un nouveau type de rail permettant de réduire (voire de supprimer) l'usure ondulatoire a été développé et est actuellement commercialisé.

- la rugosité : « défauts de surface de quelques microns d'amplitude présents sur les bandes de roulement (roue et rail) » [32].

2.3.2 Préliminaire : opérations d'entretiens sur les voies

Les principaux types d'entretien des voies sont les suivants [22] :

- le meulage : Le reprofilage des voies permet d'améliorer l'uni. Lors du meulage, les rails sont reprofilés de manière uniforme. Après le meulage, la surface de contact roue-rail est moins importante. La figure 21 montre une photo de rails avant et après meulage.
- le balayage sommaire : les saletés présentes dans les rails sont évacuées;
- le rechargement : cette technique consiste renforcer les rails existants par une nouvelle couche de métal.



Figure 21 : Photo de rail de tramway avant et après meulage [22].

Par ailleurs, une autre technique est employée : le graissage. Elle n'est pas vraiment une opération d'entretien. Elle a été étudiée pour connaître son effet sur le crissement [10].

Deux types de meulage peuvent être définis :

- le meulage normal : c'est le meulage couramment utilisé. Toutes les longueurs d'onde ne sont pas meulées.
- le meulage acoustique : ce meulage est plus fin, plus de longueurs d'ondes sont meulées. Des gains potentiels de l'ordre de 10 dB(A) sont annoncés par certains exploitants¹. Malheureusement, ce meulage a un coût de maintenance prohibitif.

En pratique, seul le meulage normal est réalisé.

¹ Nous n'avons malheureusement pas trouvé de référence écrite pour étayer cette affirmation.

2.3.3 Conditions de mesurages : le rodage, un paramètre à ne pas négliger

Des niveaux sonores plus importants sont mesurés si les critères de rodage ne sont pas respectés [8]. Dans [21], des écarts de 9 dB(A) sont mesurés entre des mesures avant et après rodage.

Avant toute mesure d'émission sonore, la norme NF EN ISO 3095 [56] précise que les roues des tramways doivent avoir parcouru 1000 km dans des conditions normales, et être dépourvues de défauts, tels que les méplats. Cette norme précise aussi que la voie doit être elle aussi dépourvue de défauts (impacts, soudures...) et présenter une rugosité inférieure à une courbe limite fournie avec la norme.

2.3.4 Usure ondulatoire : 3-9 dB(A)

L'usure ondulatoire peut amener des augmentations comprises entre 3 et 9 dB(A) par rapport à un rail normal.

Dans [1], l'auteur s'intéresse à l'usure ondulatoire. L'influence sur l'émission s'écrit en $-0,1(3+l)$, où l est la distance en cm entre deux bosses sur le rail. Si l est supérieure à 30 cm, la valeur maximale de 30 cm est retenue. Selon cette formule, l'influence de l'usure ondulatoire est donc de 3 dB(A) au maximum.

Dans [22], des mesures avant/après meulage sont réalisées sur une section en courbe, présentant une usure ondulatoire visible à l'œil nu, car situé en zone d'accélération/freinage. Les gains sont compris entre 4 et 9 dB(A) suivant la vitesse et la position des microphones. Par ailleurs, le spectre par tiers d'octave est différent avec ou sans usure ondulatoire, comme le montre la figure 22.

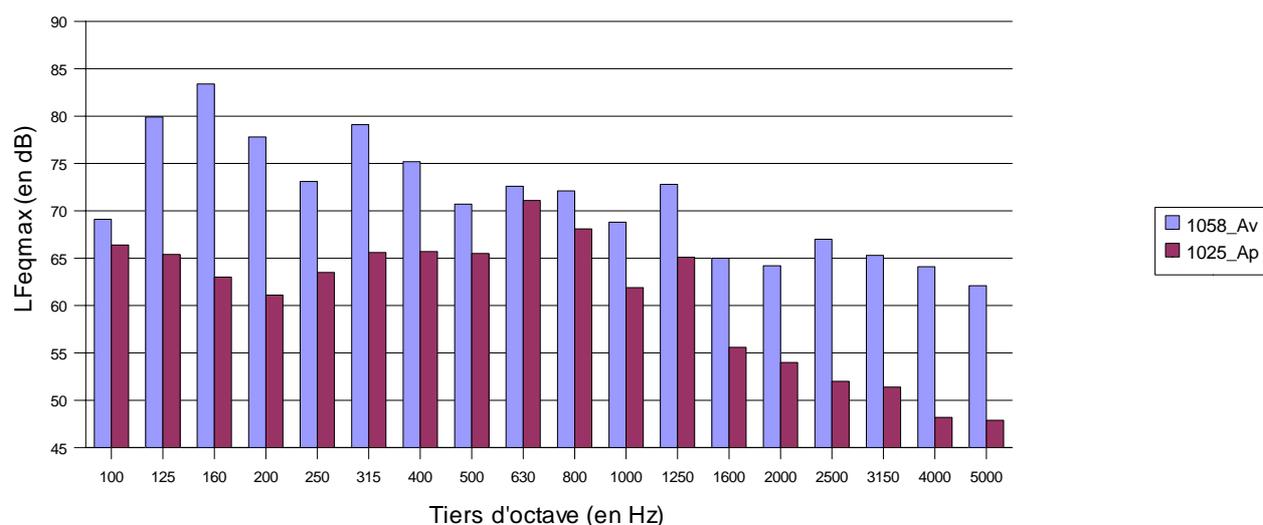


Figure 22: Comparaison du L_{Feqmax} à 30 km/h avant (en bleu) et après meulage (en bordeaux) par tiers d'octave, pour un site en courbe avec usure ondulatoire. LRPC de Strasbourg [22]. Attention, les passages comparés ne sont pas mesurés avec la même rame.

2.3.5 Meulage (sans usure ondulatoire) : gain de 1-2 dB(A)

L'annexe D (informative) de la norme NF EN ISO 3095 [56] précise que la rugosité du rail sans usure ondulatoire peut faire varier le niveau entre 0.7 et 3.9 dB pour les trains.

Pour les tramways, un suivi de l'émission sonore avant/après meulage des rails est réalisé dans [22] sur un peu moins d'une année sur une section en ligne droite. Les résultats (cf. figure 23) montrent que le meulage permet de diminuer les niveaux sonores. Une personne de la SNCF a indiqué oralement que la baisse n'atteint pas son minimum juste après meulage : ce phénomène est visible figure 23 à 30 km/h. Les spectres avant et après meulage sont quasiment identiques.

Cette réduction des niveaux dépend de la vitesse : elle s'exprime linéairement en $\log_{10}(v)$ dans [22], ou linéairement en fonction de la vitesse v dans [1]¹. Dans cette dernière référence, l'auteur précise néanmoins que ce résultat a été obtenu avec une seule mesure avant/après et est donc à prendre avec précaution. Par exemple pour un site en ligne droite [22], l'influence du meulage (écart entre l'émission juste avant et juste après meulage) serait d'environ de 1 dB(A) à 30 km/h, et de 2 dB(A) à 40 km/h. La figure 23 illustre les résultats obtenus. Les spectres par tiers d'octave mesurés avant et après meulage sont sensiblement identiques.

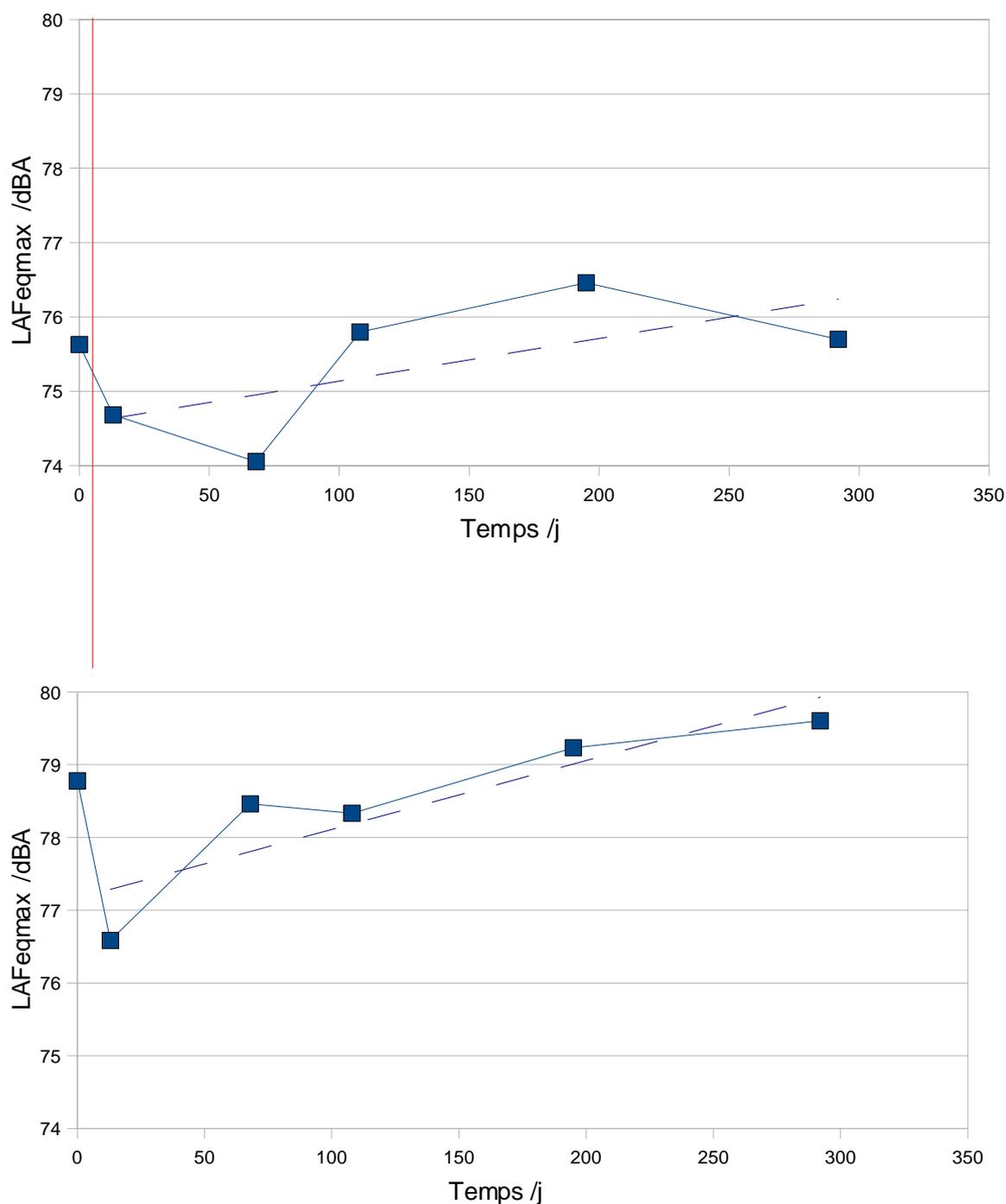


Figure 23: Évolution du LA_{Feqmax} en fonction du temps après meulage (droite verticale rouge) : mesure (en trait continu), et régression linéaire (en pointillés). En haut : à 30 km/h. En bas : à 40 km/h. LRPC de Strasbourg[22].

¹ Le gain du meulage est exprimé en $-0,002 v$, avec v la vitesse en km/h. Avec cette formulation, l'effet du meulage est presque inexistant.

2.4 La charge : une influence faible de 1-2 dB(A)

Le poids d'un tramway à vide est typiquement de l'ordre de 40 t, avec un poids maximal autorisé du véhicule de l'ordre de 52 t. La variation de charge est donc très importante, entre un tramway roulant à vide et un tramway rempli (de l'ordre de 30 %).

2.4.1 Comment mesurer la charge ?

L'évaluation de la charge d'un tramway n'est pas évidente à réaliser. Elle peut être faite soit à partir d'observations visuelles, soit à partir de mesures des déformations du rail. La seconde méthode est plus compliquée à installer (elle nécessite la pose de capteurs sur la voie), mais permet de réduire les incertitudes. C'est une méthode de ce type que nous allons détailler.

Une étude réalisée au LRPC de Strasbourg [57] donne un moyen de faire un pesage dynamique des rames, dans un souci de dimensionnement des infrastructures. Deux jauges de déformation à trame pelliculaire sont collées chacune d'un côté de l'âme¹ d'un rail. Les jauges sont positionnées entre deux blochets². La somme des déformations des deux jauges est linéaire en fonction de la charge (cf. figure 24), et dépend très faiblement de la vitesse (cf. figure 25). D'après la figure 25, on peut escompter une précision de l'ordre de 5-10 %.

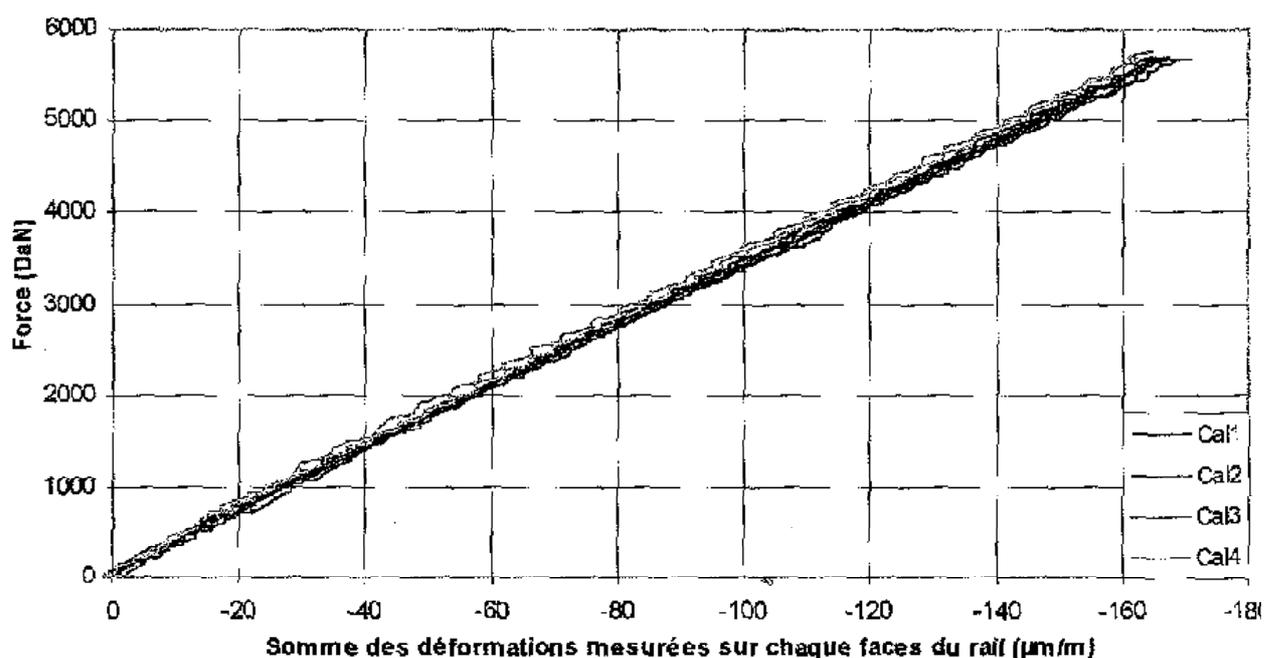


Figure 24: Relation linéaire entre la charge et la somme des déformations[57].

Une des difficultés de cette méthode consiste à avoir accès à l'âme des rails, ce qui n'est pas souvent évident pour des tramways, pour lesquels les rails sont souvent encastrés.

1 L'âme d'un rail est la partie verticale du rail, entre sa base et son sommet.

2 Les blochets sont des pièces longilignes situées perpendiculairement aux rails, et sur lesquels ces derniers reposent.

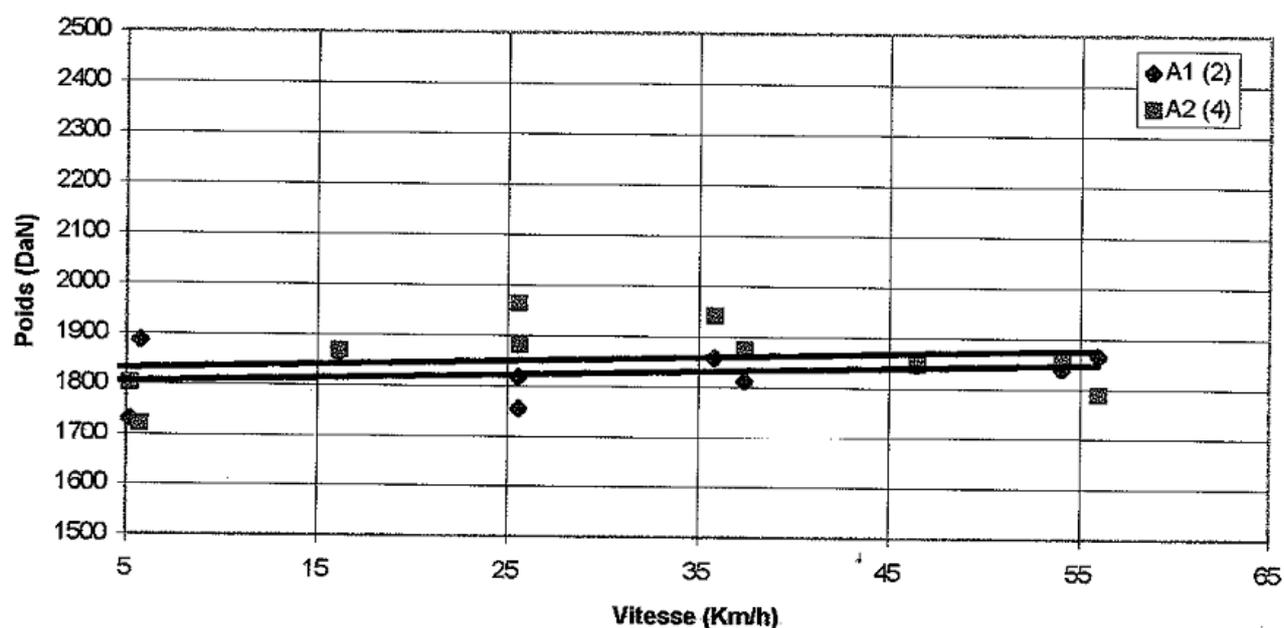


Figure 25: Évolution du poids mesuré en fonction de la vitesse[57].

2.4.2 Effets sur les niveaux sonores

L'annexe D informative de la norme [NF EN ISO 3095], qui s'applique à tous les matériels ferroviaires (y compris les tramways), précise que le chargement de la roue a une légère influence sur l'émission sonore : il peut varier de 1.1 dB entre une roue chargée à 25 t (niveau minimum) et une roue chargée à 10 t (niveau maximum)

Le Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Lille¹ a mené une campagne de mesures sur l'influence de la charge sur l'émission sonore pour le cas plus particulier des tramways. La vitesse de référence était 35 km/h. Les mesures montrent que la surcharge S du tramway a une influence linéaire sur le L_{AeqTp}^2 : $0.15 S$ (avec S la surcharge totale en tonnes). La figure 26 montre une des deux régressions réalisées. L'autre régression faite pour un microphone à une hauteur différente aboutit à la même relation. Les coefficients de corrélation sont un peu faibles ($R^2=0,77$ ou $0,76$) La charge a donc une influence de l'ordre de 1 à 2 dB(A) dans l'émission des tramways au cours de la journée. Des mesures complémentaires sur l'effet de la charge doivent être réalisées d'ici fin 2008 sur les tramways de Strasbourg et de Lille, afin de confirmer ces résultats.

¹ Ces mesures ont lieu dans le cadre de l'opération LCPC 11M061 sur le bruit urbain.

² Faute de mieux, les limites temporelles pour le calcul du L_{AeqTp} ont été déterminées à partir des émergences du tiers d'octave 10 kHz.

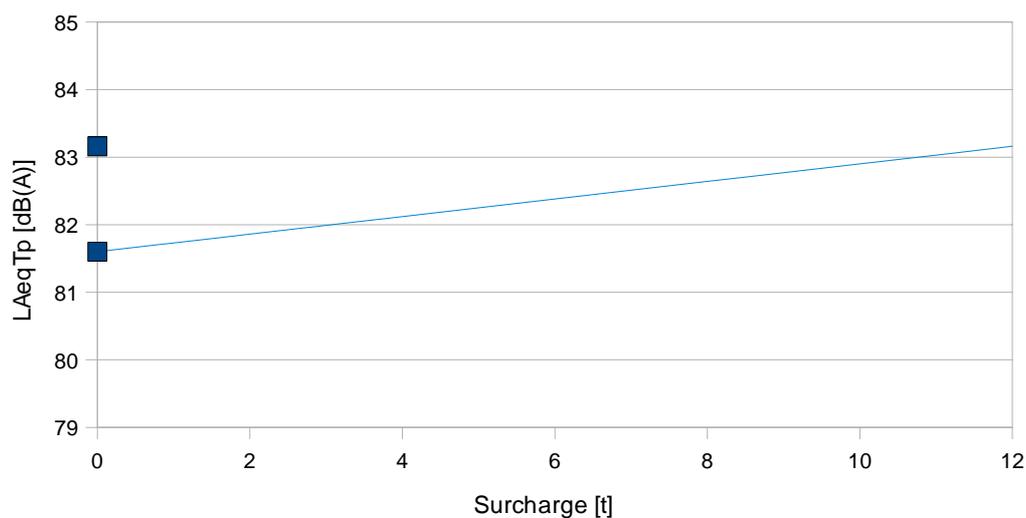


Figure 26: Influence de la surcharge sur l'émission sonore d'un tramway. LRPC de Lille [24].

2.4.3 Effets sur les spectres

L'effet de la charge sur l'allure du spectre d'émission en octave ou en tiers d'octave semble négligeable (cf. exemple figure 27).

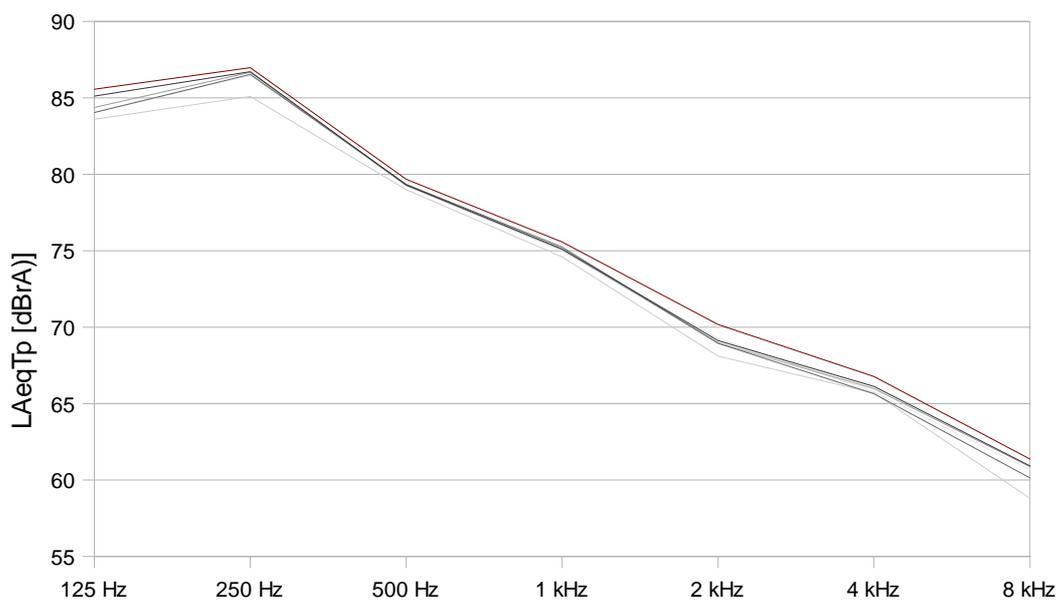


Figure 27: Spectre d'émission en octave d'une rame de tramway en fonction du nombre de personnes embarquées. Chaque courbe correspond à un nombre de personnes : 2 (très clair), 14, 23, 57, 61 (très foncé) et 122 (rouge). LRPC de Lille [24].

2.5 Type et état des matériels roulants

2.5.1 Les défauts de roue

Les mesures au passage montrent clairement l'influence des bogies sur l'émission sonore. Certains bogies présentent un niveau sonore plus élevé, mais pas sur tous les tramways, et pas forcément les mêmes bogies. C'est ce qu'illustre la figure 28. Cette influence en terme de L_{Amax} peut être de quelques dB(A). Suite au contacts roue-rail, les roues peuvent en effet présenter de nombreux défauts : méplats (suite à des freinages), défauts périodiques... L'annexe A présente la classification des défauts de roues issue du document UIC¹ DT405.

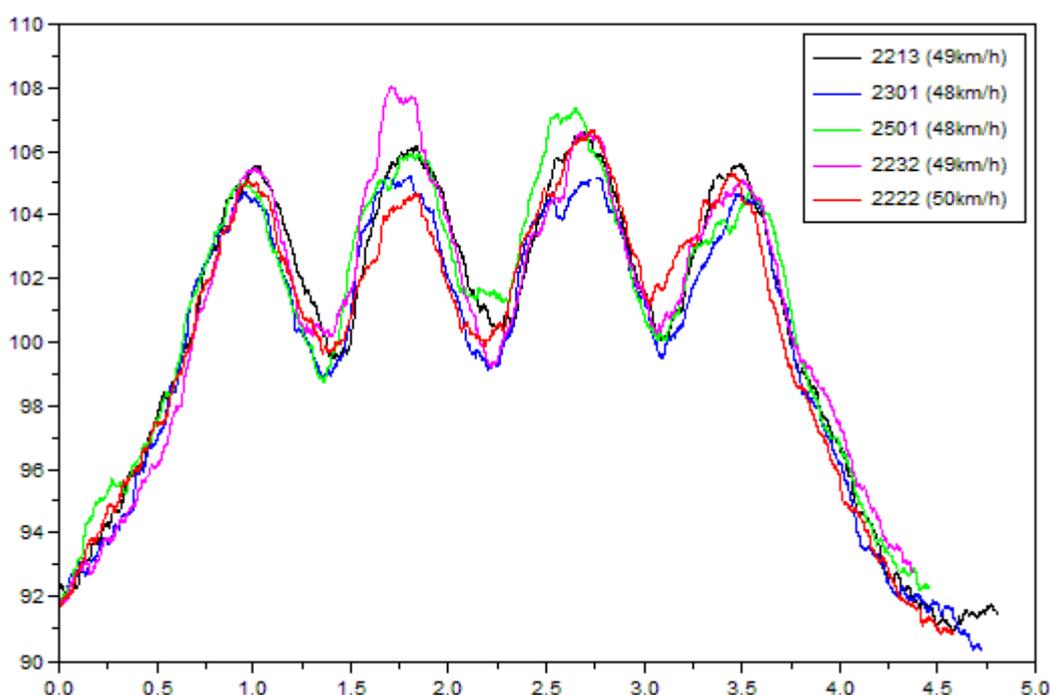


Figure 28: Signatures de tramways (L_{AFeq}). Tramway de Bordeaux. Rapport de stage de Guérolé Gapihan, septembre 2008, LRPC de Bordeaux [11].

Du côté des trains, les défauts de roue semblent avoir une influence négligeable sur les niveaux acoustiques : 0,6 dB(A) maximum sur le $L_{Aeq,T}$, en considérant que 2,5% de wagons présentent des défauts [58]. L'annexe D (informative) de la norme NF EN ISO 3095 [56] précise que la rugosité de la roue peut faire varier le niveau de 8.5 dB. On peut noter aussi qu'il existe des logiciels qui permettent de prédire l'usure des roues, afin de mieux cerner les coûts de maintenance [59].

¹ Union Internationale des Chemins de Fer.

2.5.2 Type et âge des matériels roulants : globalement, un paramètre de second ordre

Globalement, le type et l'âge des tramways semble avoir peu d'incidence sur les niveaux mesurés pour des tramways d'une vingtaine d'année.

En France, des mesures réalisées par l'INRETS sur deux rames du tramway de Nantes, datant de 25 ans (tram A) et de 10 ans (tram B) environ, montrent que l'influence du site est nettement plus importante que celle du type de tram [12]. Des mesures réalisées sur le tramway de Strasbourg en 2008¹, comparent les émissions de deux tramways : les tramways Citadis sont âgés de moins de 5 ans, contre 5 à 10 ans pour les Eurotram. Même si les spectres d'émission varient, les niveaux globaux sont très similaires (cf. figure 29).

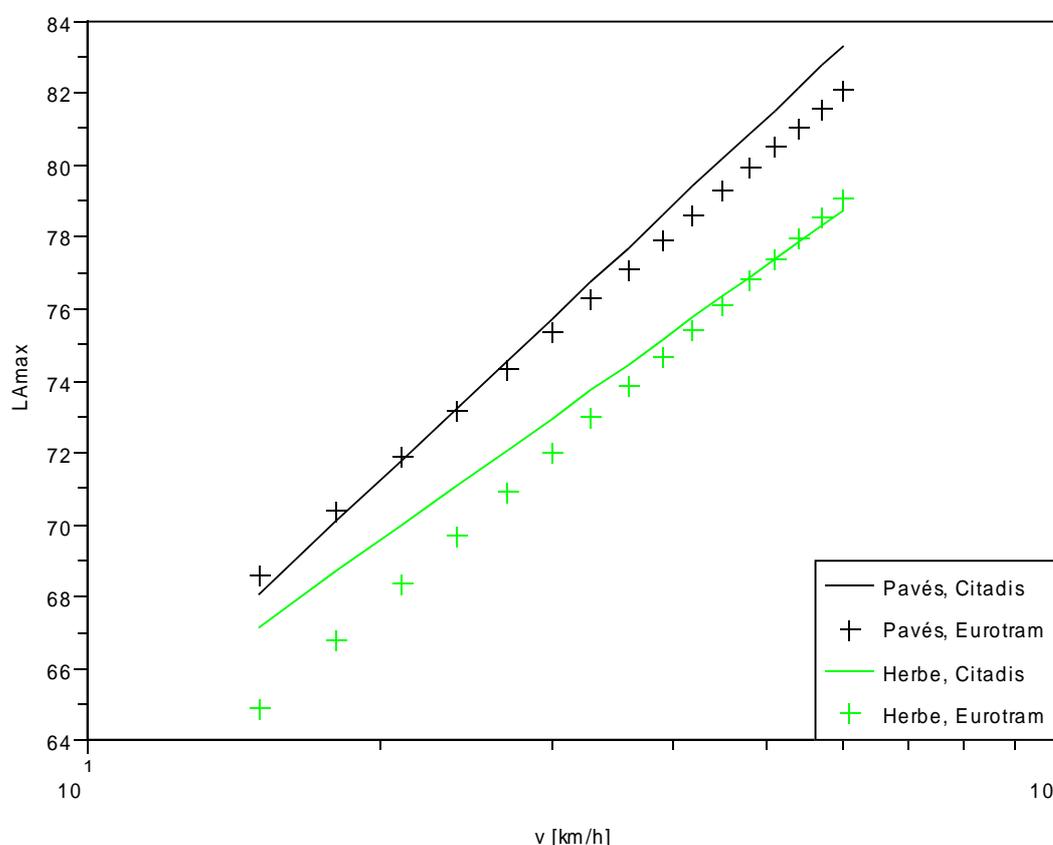


Figure 29: Comparaison du L_{Amax} (à 7,5 m de la voie et à 1,2 m de hauteur) entre les rames Citadis et Eurotram, sur deux sites différents, LRPC de Strasbourg.

En Slovaquie, des régressions multiparamètres [1] ont établi une variation des niveaux sonores en $0,8 \log_{10}(T_{tr})$ avec T_{tr} l'âge du tramway en années ($1 \leq T_{tr} \leq 15$ ans), soit une variation de l'ordre de 1 dB(A) au maximum. Cet écart est explicité par les changements de modèle, et pas par le vieillissement d'un certain type de rame.

Pour des écarts d'âge plus importants, des écarts jusqu'à 7 dB(A) semblent exister suivant les rames (certaines âgées de 25 à 30 ans comparées aux plus récentes) [60].

¹ Ces mesures ont été réalisées à l'occasion de l'élaboration de la carte de bruit de la ville de Strasbourg, en 2008.

2.6 Autres paramètres : une influence légère

2.6.1 Sens de la mesure : une très légère influence

Il semble que les niveaux mesurés soient différents suivant le côté de la voie où l'on fait la mesure [52]. Dans le cas d'une plateforme herbeuse, et d'un bas-côté herbeux (celui des mesures), les niveaux trouvés suivant les deux sens sont différents :

- sens 1 (le plus proche des microphones) : $L_{Amax}=85,8+29,1 \log_{10}(v/60)$,
- sens 2 (le plus éloigné des microphones) : $L_{Amax}=85,9+32,4 \log_{10}(v/60)$.

Quantitativement, la différence entre les deux côtés est de 0,5 dB(A) à 40 km/h.

2.6.2 Profil en long de la voie

Dans le modèle slovaque [1], une correction en $0,01 s$ du niveau d'émission est prise en compte en fonction de la pente de la voie. s est le gradient de la voie, compris entre 0 et 60‰.

2.6.3 Âge de la voie : un paramètre important ?

Dans le modèle slovaque [1], qui prend déjà en compte la rugosité, un terme correctif supplémentaire par rapport à l'âge de la voie est proposé : $6,2 \log_{10}(T_{trf})$, avec T_{trf} l'âge de la ligne de tramways entre 1 et 30 ans après la construction ou la reconstruction. Ce qui conduit à une augmentation du niveau de bruit de plus de 7 dB(A) au bout de 15 ans. Ce chiffre est peut-être valable uniquement si aucun entretien de la voie n'est effectué.

2.7 Les paramètres influençant le crissement : peu de certitudes

Pour terminer cette partie concernant les paramètres d'émission du tramway, nous allons traiter à part les paramètres influençant le crissement. C'est en effet un bruit particulier.

Les paramètres influençant le crissement sont nombreux et mal connus, tant à l'échelle microscopique et macroscopique. Leur influence relative varie d'ailleurs en fonction des situations, si bien que le crissement apparaît comme un phénomène peu répétable pour un observateur extérieur.

Comme le précise le SerdB dans une note sur le crissement [35] : « La seule influence des conditions climatiques sur la fréquence d'apparition du crissement et sur son niveau moyen fait qu'il est délicat de conclure sur l'évolution du caractère crissant d'une situation, après que l'on a apporté une modification à d'autres facteurs (vitesse, géométrie, bogie, état de surface,...). Seul un protocole expérimental lourd et rigoureux permet de réduire certains des effets de dispersion rencontrés. »

Selon [35], « Si l'on raisonne à tracé de ligne donné, seules la lubrification avec de l'eau et l'amortissement de roue peuvent être considérées comme des solutions fiables aboutissement à la suppression du crissement, mais au prix de contraintes fortes d'exploitation pour la première et de surcoût significatif pour la seconde ».

2.7.1 Tracé de la ligne de tramway

Le tracé de la ligne comprend le rayon de courbure, l'écartement entre les rails, le dévers, la pente.

[36] détaille l'influence du rayon de courbure sur le crissement dans la littérature. Normalement, le crissement ne se produit pas dans des courbes de rayon supérieure à 500 mètres. Le risque augmente pour des rayons inférieurs à 300 m.

D'après [36], plusieurs auteurs ont introduit le rapport R/W , avec R le rayon de la courbe et W la distance séparant les deux essieux d'un même bogie. Ce rapport est pertinent pour évaluer l'occurrence du crissement. Un ratio R/W inférieur à 100 engendre une forte probabilité de crissement si des mesures de protection particulières ne sont pas prises. Cette règle conduit à des rayons limites de 200 m pour des essieux espacés de 2 m (valeur courante pour les tramways).

L'écartement des rails semble être un paramètre important pour les tramways. Van Haaren et al. [61] enregistrent des écarts pour deux courbes identiques (rayon de 18 m) pour des différences d'écartement de 7 mm. C'est la voie la plus étroite qui produit le moins de bruit : aucun crissement n'a été enregistré sur cette courbe alors que dans le même temps, l'autre courbe produisait un crissement à chaque passage engendrant une augmentation des niveaux de 22 dB(A). Les mesures ont été réalisées sur le même tracé, avec les mêmes trams qui roulaient à des vitesses moyennes de 10 km/h.

Aucune précision sur le dévers et la pente n'ont été trouvées dans la littérature.

2.7.2 Rails

L'état du rail comprend : son profil, le matériau, le type de pose, la présence éventuelle d'appareil de voie, l'état de surface.

Le profil des rails semble être un paramètre important pour les tramways. Van Haaren et al. [61] ont comparé un profil de rail symétrique et un profil de rail asymétrique, obtenu par meulage du rail précédent. Le rail asymétrique permet non seulement de diminuer le taux d'occurrence du crissement (passage de 100% à 58%), mais diminue aussi le bruit de 23 dB(A) environ. L'angle d'attaque est en effet réduit si l'écartement entre les rails est réduit, même si le paramètre principal reste le rayon de la courbe [36].

L'état de surface du rail semble être un paramètre important : par temps de pluie en effet (ou avec un dispositif d'arrosage), il n'y a plus de crissement ([35] et [36]). Différents types de lubrification ont donc été testés : la lubrification consiste à appliquer un élément solide ou liquide permettant de modifier le coefficient de frottement au contact roue-rail. Même si l'efficacité de la lubrification sur le rail ou sur la roue ne semble pas totale, elle peut certainement permettre de réduire le crissement ([36] et [61]). Attention néanmoins, tous les lubrifiants ne semblent malheureusement pas efficaces [14].

Ce type de solution peut poser des problèmes environnementaux (pollution des sols), de coût de mise en place (si un système est installé sur chaque rame), de coût d'entretien (dégradation suite à des actes de vandalisme pour des installations fixes..).

Le SerdB [35] aborde aussi la problématique de changement de matériau. « L'efficacité des traitements sur le rail (cordon anti-crissement déposé dans une rainure usinée dans le rail, puis meulée) ne semble pas fermement établie, non plus que leur durabilité. » Les gestionnaires du tramway à Strasbourg ont aussi fait un essai, qui s'est révélé non concluant.

La position latérale des roues peut influencer le crissement [36] et [62]. Si le bord de la roue est en contact avec le rail, des mesures expérimentales et en laboratoire ont montré qu'il n'y a pas de crissement. Par exemple, la RATP revendique un taux d'efficacité sur le crissement de 100% sur les métros, seulement en aspergeant d'eau le rail intérieur des virages (le bord de la roue extérieure du premier bogie est alors toujours en contact avec le rail). Par contre si le bord de la roue n'est pas en contact avec le rail, la position de la zone de contact semble ne pas être importante.

Une expérience sur les tramways montre des gains sur le bruit de crissement généré par l'amortissement du rail [35]. Néanmoins, la pose d'absorbeurs sur le rail semble peu efficace d'après [61] : des mesures montrent qu'il n'y a pas de différences avec et sans absorbeurs pour des trains circulant dans un virage à 50 km/h .

2.7.3 Roues

L'état des roues comprend : leur géométrie, leur matériau, leur charge nominale, leur profil, leur amortissement, leur type de bandage, leur état de surface.

Pour amortir les vibrations des roues, le SerdB [35] distingue « les roues amorties, équipées de dispositifs limitant les vibrations par divers modes de dissipation de l'énergie vibratoire, des roues élastiques (encore appelées résilientes), limitant les vibrations dans la majeure partie de la roue en réalisant quasiment une suspension entre bandage et flasque, grâce à un couronnement d'élastomère. Les roues élastiques montrent des performances variables selon les expériences rapportées (efficacité nulle, partielle ou totale). Les roues amorties sont globalement conçues autour des deux principes suivants : 1. adjonction de matériaux judicieusement placés, consommateurs d'énergie vibratoire, transformée en chaleur. 2. adjonction de système résonants « aspirant » l'énergie vibratoire à certaines fréquences de résonance de la roue (absorbeur dynamique). Cest différents systèmes doivent être adaptés à chaque type de roue.[...] Les roues à absorbeur dynamique sont les plus efficaces (suppression du crissement pour des rayons supérieurs à 90 m), mais aussi les plus coûteuses (surcoût de 20 à 30% du coût de la roue). La réduction totale du crissement pour des faibles rayons (25 m) n'a pas été obtenue, même sur des roues équipées d'absorbeurs dynamiques. » La tenue dans le temps de telles solutions reste cependant à investiguer. En particulier, l'usure de la roue fait évoluer ses caractéristiques modales, et modifie donc l'efficacité des absorbeurs dynamiques. Une autre publication [61] présente des tests sur des roues amorties de train, mais les résultats ne sont pas concluants (les auteurs obtiennent un taux d'occurrence du crissement moindre avec les roues amorties, mais le niveau sonore est le même lorsqu'il y a crissement : les auteurs en concluent que d'autres paramètres que l'amortissement des roues ont influé.

Thierry Legouis [35] aborde aussi la problématique de changement de matériau. Certains bandages de roue se sont montrés efficaces mais coûteux, et sensibles à l'usure. D'autres tests en laboratoire ont permis de diminuer la fréquence d'apparition du crissement, mais aucun essai en grandeur réelle n'a été réalisé.

2.7.4 Véhicule

Les principaux paramètres concernent : la géométrie des bogies, la nature des essieux (fixe, orientable), le nombre de voitures, la distance entre bogies.

L'angle d'attaque, entre les roues et les rails s'avère un paramètre très important [36]. Une valeur limite de 7-9 mrad est souvent citée dans la littérature : au-dessus de cette valeur, et sans moyens particuliers mis en œuvre, le crissement a de grandes chances de se produire. Cette valeur limite correspond assez bien avec le ratio R/W (un ratio R/W de 100 correspond à un angle d'attaque de 10 mrad). Toujours dans [36], une campagne de mesures a montré que le crissement ne se produit pas pour des angles d'attaque inférieurs à 25 mrad. En laboratoire cependant, les mêmes auteurs constatent qu'un crissement est possible dès 8 mrad [62]. Des bogies avec des essieux dirigeables peuvent permettre de limiter l'angle d'attaque.

Différentes campagnes de mesures aboutissent à la conclusion qu'un modèle d'essieu avec des roues indépendantes ne permet pas de supprimer le crissement ([35] et [36]). Par contre, le contrôle en lacet¹ des essieux de bogie permet de repousser les conditions d'apparition du crissement, et de diminuer le niveau de bruit du crissement [35].

La charge verticale du véhicule ne semble pas avoir d'impact sur l'amplitude du crissement. Dans [62], des mesures sont réalisées en laboratoire sur un essieu, à l'échelle ¼. L'influence de la charge verticale (variant entre 25 et 60 kN à l'échelle réelle) est négligeable sur l'amplitude du crissement.

1 Le lacet est le mouvement de rotation horizontal autour d'un axe vertical. Le contrôle en lacet des essieux consiste donc à bouger l'axe des essieux (de manière à ce qu'ils restent perpendiculaires aux voies lors d'un virage).

2.7.5 Cinématique du véhicule

La vitesse est un paramètre important, car elle peut changer l'occurrence et l'amplitude du crissement (et en particulier la vitesse latérale [36]). Une autre campagne de mesures [37] indique que le crissement ne se produit que pour une certaine plage de vitesse (10 km/h), mais ni pour des vitesses inférieures, ni pour des vitesses supérieures.

2.7.6 Conditions climatiques

Les conditions climatiques (température de l'air, température du rail et humidité relative) sont un facteur explicatif du crissement [35].

3 Réglementation et déroulement d'une étude d'impact

« Une chose n'est pas juste parce qu'elle est loi ;
mais elle doit être loi parce qu'elle est juste. »

Montesquieu¹

Cette partie présente la réglementation française applicable aux projets de tramways, qu'il s'agisse de la création ou de la transformation significative d'une voie. Ni la réglementation sur les bruits de chantier, ni les modalités du classement de l'infrastructure créée ne sont abordées.

3.1 Les textes en vigueur

3.1.1 Niveaux sonores admissibles : une réglementation récente et floue

Le contexte réglementaire est défini dans le Code de l'environnement par l'article L 571-9², complété par ses textes d'application :

- les articles R571-44 à R571-52³, relatifs à la limitation du bruit des aménagements et infrastructures de transports terrestres,
- l'arrêté du 8/11/1999, relatif au bruit des infrastructures ferroviaires,
- la circulaire du 28/02/02, relative aux politiques de prévention et de résorption du bruit ferroviaire, et son instruction relative à la prise en compte du bruit dans la conception, l'étude et la réalisation de nouvelles infrastructures ferroviaires ou l'aménagement d'infrastructures ferroviaires existantes.

Cette réglementation n'est pas prévue explicitement pour les tramways, mais pour les infrastructures ferroviaires. Dans le début de l'instruction associée à la circulaire du 28/02/02, il est même explicitement précisé qu'elle ne « concerne que le bruit généré par la circulation des trains sur ces infrastructures ». Au vu du flou de la réglementation correspondant aux tramways, la réglementation sur les infrastructures routières pourrait aussi être utilisée. Par la suite, nous avons tout de même décidé de privilégier la réglementation relative aux infrastructures ferroviaires pour les tramways.

Ces textes précisent les indicateurs utilisés et les niveaux sonores qui devront être respectés par le projet. Ces niveaux sonores admissibles dépendent de la nature des locaux exposés, du type de travaux réalisés et du niveau sonore ambiant préexistant. Tous ces textes sont accessibles sur le web aux adresses suivantes : <http://www.legifrance.gouv.fr> ou <http://aida.ineris.fr/>.

Dans ces textes réglementaires, deux indicateurs ferroviaires sont utilisés :

- $I_{f, \text{jour}} = L_{Aeq}(6h-22h) - 3 \text{ dB(A)}$,
- $I_{f, \text{nuit}} = L_{Aeq}(22h-6h) - 3 \text{ dB(A)}$.

Pour le bruit routier, c'est l'indicateur énergétique L_{Aeq} qui est utilisé. Le terme correctif de -3 dB(A) pour l'indicateur ferroviaire (hors TGV) traduit le caractère moins gênant du bruit ferroviaire (toujours hors TGV) par rapport au bruit routier, pour un même niveau acoustique L_{Aeq} . Par commodité, on peut utiliser le L_{Aeq} comme indicateur avec des objectifs majorés de 3 dB(A). L'instruction associée à la circulaire du 28/02/02 donne d'ailleurs des contraintes maximum admissibles en L_{Aeq} .

1 Charles-Louis de Secondat, baron de La Brède et de Montesquieu, connu sous le nom de Montesquieu (1689-1755). moraliste, penseur politique, précurseur de la sociologie, philosophe et écrivain français des Lumières.

2 Plusieurs articles de la loi n°92-1444 ont été abrogés en l'an 2000 et sont remplacés par le Code de l'Environnement livre V titre VII *Prévision des nuisances acoustiques et visuelles*. Il ne s'agit là que d'une réorganisation d'une législation inchangée.

3 Ces textes remplacent le décret 95-22 du 9 janvier 1995.

Maintenant que les indicateurs sont précisés, voyons quels sont les niveaux sonores réglementairement admissibles associés. Deux cas sont distingués : la construction d'une voie nouvelle, et la modification ou la transformation significative d'une infrastructure existante.

3.1.1.1. Construction d'une voie nouvelle

Pour une **infrastructure ferroviaire nouvelle**, les niveaux maxima sont indiqués dans le tableau 1. Ils dépendent de l'ambiance sonore avant travaux.

USAGE ET NATURE DES LOCAUX	Ambiance sonore avant réalisation du projet, en dB(A)		Contribution maximale de l'infrastructure après travaux, en dB(A)	
	L _{Aeq} (6h-22h)	L _{Aeq} (22h-6h)	I _{f,jour}	I _{f,nuit}
Établissement de santé, de soins, et d'action sociale	-	-	60	55
• cas particulier des salles de soins et des salles réservées au séjour de malades	-	-	57	55
Établissements d'enseignement (à l'exclusion des ateliers bruyants et des locaux sportifs)	-	-	60	-
Logements				
• Zone modérée	≤65	≤60	60	55
• Zone modérée de nuit	>65	≤60	65	55
• Zone non modérée	-	>60	65	60
Locaux à usage de bureaux	-	-	65	-

Tableau 1: Niveaux maxima admissibles pour la construction d'une voie nouvelle de tramway

3.1.1.2. Modification ou transformation significative d'une voie existante

Une modification ou une transformation est considérée comme significative si la contribution sonore à terme (en général à l'horizon de 20 ans) qui résulte du projet est supérieure de plus de 2 dB(A) à la contribution sonore à terme de l'infrastructure sans cette modification ou cette transformation. Ne sont pas considérés comme significatifs les travaux d'entretien, de réparation, d'électrification ou de renouvellement des infrastructures.

Dans le cas où la modification ou la transformation est jugée significative, les niveaux maxima admissibles devront respecter les prescriptions suivantes :

- si la valeur des indicateurs de gêne ferroviaire, I_f, avant travaux, est inférieure aux valeurs prévues dans le tableau 1, elle ne pourra excéder ces valeurs après travaux,
- dans le cas contraire, la valeur de ces indicateurs de gêne, I_f, ne doit pas dépasser, après travaux, la valeur existant avant travaux, sans pouvoir excéder 65 dB(A) en période diurne et 60 dB(A) en période nocturne.

3.1.2 Cas particulier des Points Noirs bruits : aucune obligation réglementaire

Les Points Noirs Bruit (PNB) et leurs modalités de résorption sont définis dans les circulaires du 12 juin 2001 et du 25 mai 2004. Un PNB respecte deux critères : un critère acoustique et un critère d'antériorité.

Le tableau 2 indique les valeurs limites de bruit caractéristiques des points noirs. Il suffit qu'une seule valeur soit dépassée pour que le bâtiment soit qualifié de point noir.

Indicateurs de bruit	Route et/ou LGV	Voie conventionnelle	ferrée	Cumul route et/ou LGV + voie conventionnelle ferrée
$L_{Aeq}(6h-22h)$	70	73		73
$L_{Aeq}(22h-6h)$	65	68		68
L_{den}	68	73		73
L_{night}	62	65		65

Tableau 2: Valeurs limites relatives aux contributions sonores en façade en dB(A) pour la définition d'un point noir bruit

Lorsqu'un logement se construit, le critère d'antériorité peut s'appliquer dans certains cas. Par exemple pour la construction d'un logement en zone déjà bruyante, ou dans une zone qui deviendra bruyante une fois un projet inscrit sur les documents d'urbanisme réalisé. L'Etat n'est alors pas tenu de protéger les bâtiments exposés.

A l'occasion d'un projet, il est recommandé de résorber les PNB, même s'il n'existe aucune obligation réglementaire.

3.1.3 Normes

Les normes suivantes constituent les références méthodologiques à suivre pour appliquer les prescriptions réglementaires en vigueur :

- la norme NF S 31-110 « Acoustique - Caractérisation et mesurage des bruits dans l'environnement – Grandeurs fondamentales et méthodes générales d'évaluation » de novembre 2005,
- la norme NF S 31-088 « Acoustique - mesurage du bruit dû au trafic ferroviaire en vue de sa caractérisation » d'octobre 1996 , qui constitue la méthode de mesurage du bruit dû au trafic ferroviaire : l'application de cette norme est exigée par l'article 5 de l'arrêté du 8 novembre 1999 pour le contrôle in situ des contributions sonores de long terme en façade,
- la norme NF S 31-085 « Acoustique - Caractérisation et mesurage du bruit dû au trafic routier - Spécifications générales de mesurage » de novembre 2002,
- la norme NF S 31-010 « Acoustique - Caractérisation et mesurage du bruit dans l'environnement - Méthodes particulières de mesurage » de décembre 1996,
- la norme NF S 31-133 « Acoustique - Bruit des infrastructures de transports terrestres - Calcul de l'atténuation du son lors de sa propagation en milieu extérieur, incluant les effets météorologiques » de février 2007, qui constitue la méthode nationale de référence pour la prévision des niveaux sonores en milieu extérieur : cette méthode est conforme aux spécifications exigées par l'article 6 de l'arrêté du 8 novembre 1999,
- la norme NF EN ISO 10052¹ (classement français NF S 31-077), « Acoustique – Mesurage de l'isolement dû aux bruits aériens et de la transmission des bruits de choc ainsi que du bruit des

¹ C'est bien cette norme qui s'applique, même si les textes de loi français (par exemple, l'article 5 de l'arrêté du 8 novembre 1999) font toujours référence à la norme NF S 31-057 « Acoustique - Vérification de la qualité acoustique des bâtiments » d'octobre 1982.

équipements – Méthode de contrôle », de septembre 2005, complétée par la norme NF EN ISO 717-1 d'août 1997 (classement français NF S 31-032-1), qui constituent les références pour la mesure et l'évaluation de l'isolement acoustique standardisé pondéré $D_{nT,A,tr}$ des bâtiments,

- la norme NF EN ISO 3095. « Applications ferroviaires. Acoustique. Mesure du bruit émis par les véhicules circulant sur rail. » de novembre 2005. Cette norme européenne spécifie les conditions requises pour obtenir des résultats de mesure reproductibles et comparables des niveaux et des spectres du bruit émis par tous les types de véhicules circulant sur rails ou tous autres véhicules à déplacement guidé, excepté les véhicules de maintenance de la voie en fonctionnement.

3.2 Traitement d'une étude opérationnelle de tramway

Au sein du RST, plusieurs laboratoires ont mené des études d'impact acoustiques pour des projets de tramways. C'est à partir des textes réglementaires, et de ces travaux que cette partie est présentée.

3.2.1 Études réalisées au sein du RST

Deux CETE (Centre d'Etudes Techniques de l'Équipement) ont réalisé des études d'impact sur le tramway. Il s'agit du CETE de l'Est et du CETE de Lyon. Le tableau 3 présente les différentes études réalisées. Les études en italiques ont été réalisées avant la publication de l'arrêté fer du 8/11/1999.

	CETE de l'Est	CETE de Lyon
Projets réalisés	Ligne B à Strasbourg : <ul style="list-style-type: none"> • <i>Identification des sites et caractérisation de l'état initial</i> ([63]), • <i>étude d'impact</i> ([64]), • <i>rapport complémentaire (dépôt de Cronembourg et pont de Paris)</i> ([65]) • mesures acoustiques après mise en service (ligne B et C) [52] 	Lignes 1 et 2 à Lyon : <ul style="list-style-type: none"> • <i>état initial et étude d'impact</i> [66] • Mesures acoustiques après mise en service [67]
Projets	Prolongement des lignes B, C, D et création de la ligne E à Strasbourg : <ul style="list-style-type: none"> • état initial et étude d'impact [68] 	
	Tram-train ouest (ligne F) à Strasbourg : <ul style="list-style-type: none"> • état initial et étude d'impact [69] 	

Tableau 3: Études d'impact acoustiques de tramways réalisées au sein du RST

3.2.2 Caractérisation de l'état initial

Afin de calculer les niveaux sonores maxima admissibles pour la future infrastructure, il est nécessaire de caractériser l'ambiance sonore initiale. Pour ce faire, les normes NF S 31-085 (bruit routier), NF S 31-088 (bruit ferroviaire) et la procédure de « contrôle » de la NF S 31-010 (bruit de l'environnement si aucune source routière ou ferroviaire n'est prépondérante) sont applicables réglementairement.

Pour les normes NF S 31-085 et NF S 31-088, les mesures de longue durée sont réalisées sur au

moins une journée, pour couvrir les deux périodes réglementaires : JOUR (6h-22h) et NUIT (22h-6h). Des mesures complémentaires de courte durée peuvent aussi être réalisées ; elles sont alors couplées avec des mesures de longue durée. Parallèlement à ces mesures acoustiques, des comptages de trafic ont lieu. Des recalages en fonction du trafic le jour de la mesure, permettent de caractériser l'ambiance acoustique moyenne par rapport à des trafics de référence. Les conditions météo doivent être détaillées si la distance de la source au récepteur est supérieure à 100 m. Enfin, pour s'assurer que le trafic mesuré est bien soit routier, soit ferroviaire, des tests statistiques doivent être réalisés.

La figure 30 montre les différents types de mesures possibles avec ces deux normes.

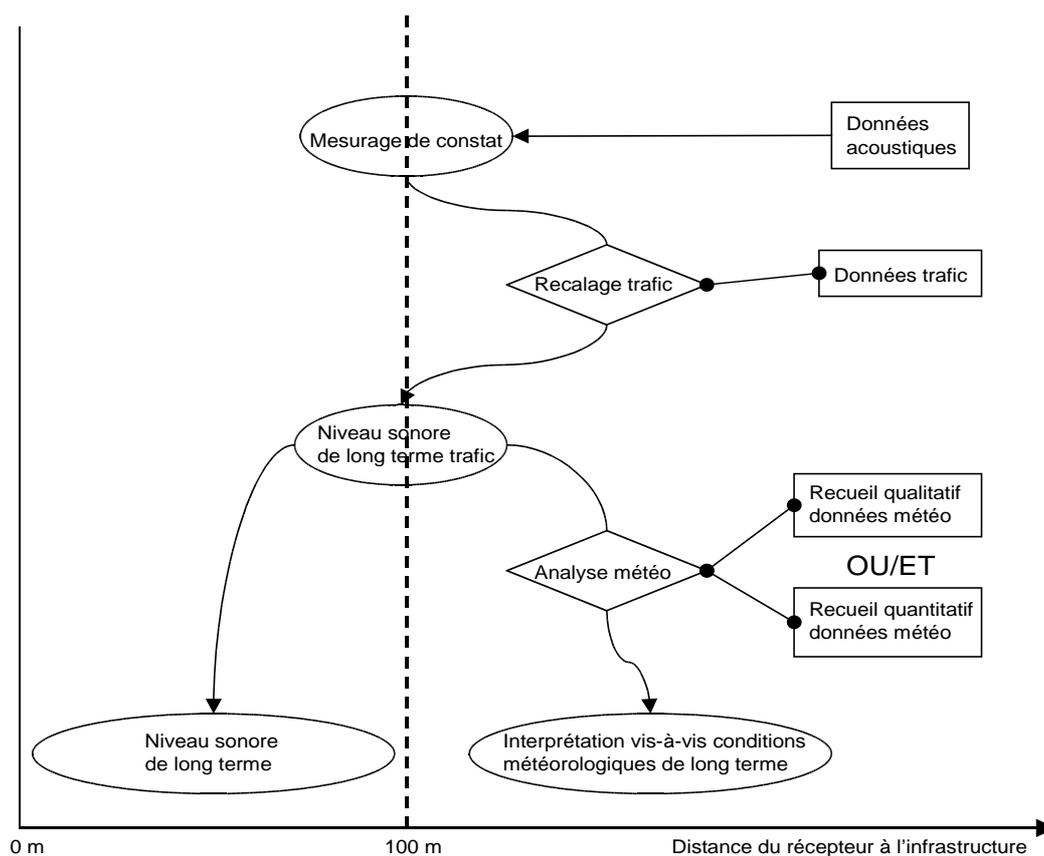


Figure 30: Types de mesures au sens des normes NF S 31-085 et NF S 31-088

Quant à la norme NF S 31-010 pour les bruits de l'environnement, les mesures sont réalisées sur une période d'au moins 30 minutes.

3.2.3 Définition des objectifs réglementaires

3.2.3.1. Cas des études antérieures à l'arrêté fer du 8/11/1999

Pour certains projets de tramway (c'est par exemple le cas à Lyon pour les lignes 1 et 2 ou à Strasbourg pour les lignes B et C), en l'absence d'un arrêté traitant le cas des infrastructures ferroviaires ou mixtes, seule l'étude d'une transformation d'infrastructure existante était envisageable. Cela supposait de prendre pour référence les seuils définis pour les infrastructures routières.

3.2.3.2. Études actuelles : besoin d'explicitation de la réglementation applicable aux tramways

Une fois l'état initial caractérisé acoustiquement, il faut déterminer si le projet consiste soit en la création d'une voie nouvelle, soit en la transformation ou modification d'une voie existante. Dans ce dernier cas, l'étude acoustique devra déterminer si la modification est significative, c'est-à-dire si la modification de l'émission de la voie de tramway est supérieure à 2 dB(A).

Dans le cas particulier du tramway, un projet consiste bien souvent en l'aménagement d'une rue, accompagné d'une suppression ou d'une diminution de l'emprise de la voie routière. Première hypothèse, on peut considérer qu'il s'agit de la création d'une voie nouvelle de tramway. Seconde hypothèse, on peut envisager qu'il s'agit d'une transformation de voie routière (le tramway n'étant pas considérée comme un train).

Néanmoins, la réglementation sur les infrastructures ferroviaires (première hypothèse) semble plus proche et est privilégiée dans ce chapitre. Si l'on considère le nombre sans cesse croissant de lignes de tramways, **une explicitation de la réglementation applicable aux tramways serait la bienvenue.**

Les objectifs réglementaires sont alors définis conformément au paragraphe 3.1.1. La réglementation acoustique n'impose pas de limite globale sur les différentes sources (par exemple route plus tramway), mais uniquement sur chaque source séparément.

Dans [52] G. Dutilleul remarque que « Par rapport à l'approche « transformation de voie existante » avec seuils routiers¹ (seconde hypothèse), l'approche « voie nouvelle » (première hypothèse) avec seuils ferroviaires semble plus favorable aux maîtres d'ouvrage – le seuil décalé de 3 dB(A) donnant une marge confortable -, tout en rendant les campagnes de mesure de réception plus délicates à cause de la nécessité de séparer les contributions de la route et du fer lorsque les deux trafics coexistent dans une même rue. ». C'est surtout vrai pour les rues où l'ambiance sonore initiale est non modérée. Il peut en effet arriver que l'approche « transformation de voie existante » avec seuils routiers soit plus favorable aux maîtres d'ouvrage que l'approche « voie nouvelle » avec seuils ferroviaires.

3.2.4 Modélisation du projet

Tout un chapitre de ce document est consacré à la modélisation du tramway. Ne seront abordés ici que les aspects les plus pratiques liés à l'étude d'impact.

3.2.4.1. Bruit en section courante

La norme NF S 31-133 : 2007, qui constitue la méthode nationale de référence pour la prévision des niveaux sonores en milieu extérieur, s'applique aussi bien aux sources routières que ferroviaires. Le cas particulier des tramways est peu abordé. Il est juste indiqué que « dans le cas particulier des tramways, la hauteur de source est dépendante du type de rail, de leur mode de pose, ainsi que de la nature de la plate-forme. Dans ce cas, la hauteur de source est déterminée par des études spécifiques. »

Cependant, le tramway semble généralement modélisé par une source au ras du sol à l'emplacement de chaque bogie, et de spectre d'émission identique². Le bruit principale émis par le tramway (au-delà de 20 km/h) est le bruit de roulement. Pour plus de précisions sur l'émission sonore, on peut se reporter aux deux premiers chapitres.

Pour déterminer l'émission des tramways, deux possibilités existent :

- soit prendre en compte l'émission maximale précisée dans le **cahier des charges** annexé à un appel d'offres. Cette solution présente l'avantage de la simplicité pour des études qui se déroulent, alors que le matériel n'a pas encore été livré, et que par conséquent aucune mesure n'est possible. Dans ce cas précis, il faut cependant avoir conscience que les mesures qui vérifient cette émission exigent en général des roues qui soient parfaitement meulées et des rails en bon état, ce qui n'est pas forcément

1 Cette observation résulte de l'étude des lignes B et C à Strasbourg.

2 C'est ce qui semble par exemple être le cas pour le logiciel MITHRA, couramment utilisé au sein du RST avec une hauteur de source de 5 cm, ou par des études réalisées par le SerdB lors du PREDIT 2.

le cas pour des tramways circulant tous les jours (méplats sur les roues, rails présentant une rugosité plus ou moins importante...).

Exemple:

C'est le choix fait par le CETE de Lyon dans [66]. Il est par ailleurs vérifié que les émissions exigées dans le cahier des charges correspondent à des mesures réalisées sur le tramway de Grenoble (avec différents types de pose de voie, de plate-forme et de vitesse) : c'est ce que montre la figure 31. La même émission est prise quel que soit le type de plateforme ou de fixation, car les différences ne semblent pas nettes. Seule la variable vitesse influe clairement sur l'émission. Les données visualisées figure 31 datent de 10 ans et sont fournies uniquement à titre indicatif.

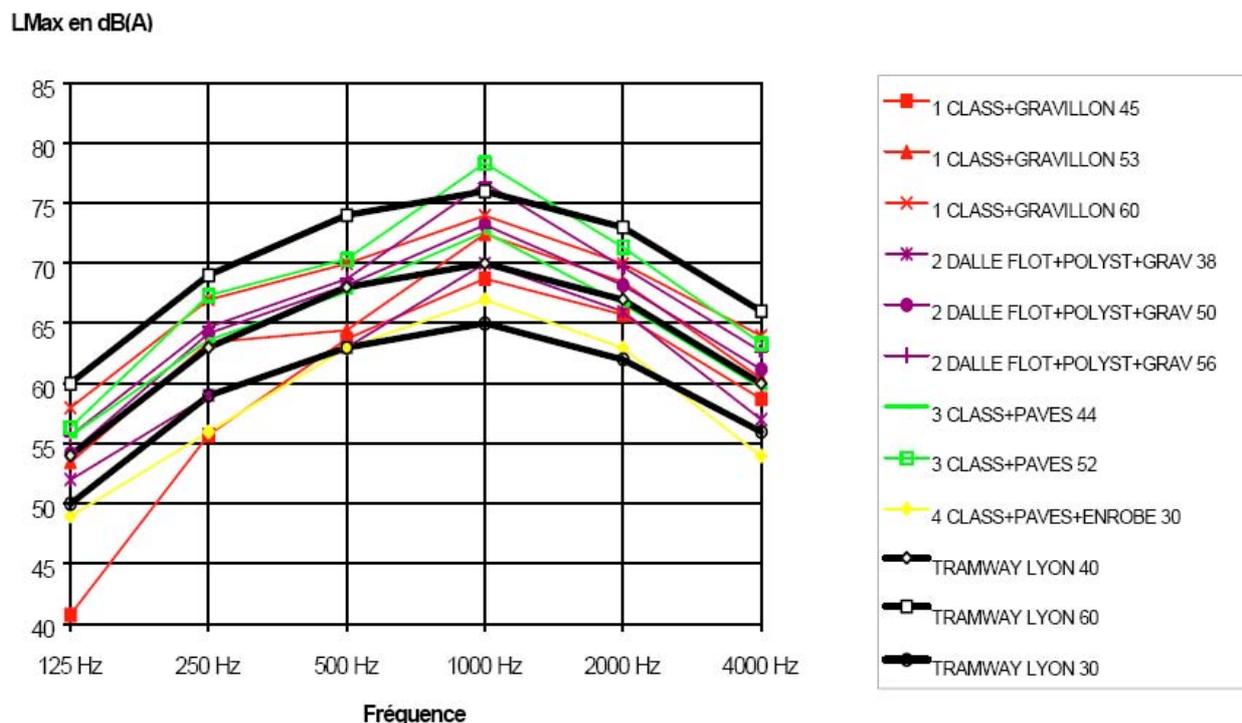


Figure 31: Comparaison des mesures de l'émission du tramway grenoblois et des niveaux maxima exigés par le cahier des charges du tramway lyonnais (issu de l'étude du CETE de Lyon en 1997 [66])

- soit réaliser des **mesures** sur un matériel similaire.

Exemple:

Dans l'étude du CETE de l'Est [69], c'est l'hypothèse retenue, profitant du fait qu'au moment de cette étude, des lignes de tramways existaient déjà sur Strasbourg. Tout d'abord, une campagne importante de mesure est réalisée : différents sites sont instrumentés (différents types de pose de voie et différents types de plateformes). Pour chaque site est mise en évidence une dépendance multilinéaire du L_{Amax} ou du L_{ASmax} en $\log_{10}(v)$ et $\log_{10}(d)$ avec v la vitesse du tram et d la distance du microphone à la voie. Par ailleurs, la campagne de mesures met en avant des différences faibles de niveaux en fonction du type de pose de voie et une hiérarchie floue en fonction du revêtement de la plateforme. L'état de la voie semble par contre jouer un rôle prépondérant.

Une émission acoustique moyenne dépendant uniquement de la vitesse en $\log_{10}(v)$ est retenue. Une campagne de mesures sur deux sites a permis de valider la modélisation avec des mesures en façade. Les résultats des mesures sont en effet inférieurs d'un peu moins de 2 dB(A) par rapport aux simulations. L'écart est jugé satisfaisant et va dans le sens des riverains.

Attention, l'utilisation de l'indicateur L_{AeqTp} , au lieu du L_{AFmax} ou du L_{ASmax} pour déterminer l'émission d'un matériel existant est plus robuste. En effet, les bogies d'un tramway sont plus ou moins bruyants. La figure 28 p.32 et le tableau 4 illustrent ce point. La figure 28 montre qu'il existe parfois un bogie plus bruyant que les autres (2 à 3 dB(A)). Si l'on utilise le L_{AFmax} ou le L_{ASmax} pour le calcul de l'émission des

tramways, le niveau d'émission moyen est par conséquent surestimé. Le tableau 4 exprime quand à lui les résultats d'une régression sur les niveaux sonores en fonction du logarithme de la vitesse, pour différents microphones. Plus la régression est de bonne qualité, meilleur est le coefficient r présenté dans le tableau. On constate que les meilleurs indicateurs par ordre décroissant sont : L_{AeqTp} , L_{ASmax} , et L_{AFmax} .

	Micro1	Micro2	Micro3	Micro4	Micro5	Micro6
L_{AFmax}	0,869	0,884	0,902	0,942	0,914	0,851
L_{ASmax}	0,912	0,925	0,952	0,951	0,954	0,936
$L_{Aeq,Tp}$	0,982	0,982	0,982	0,984	0,983	0,971

Tableau 4: Comparaison du coefficient r issu des régressions linéaires en fonction de $\log_{10}(v)$ entre les différents indicateurs. Rapport du LRPC de Strasbourg [21].

3.2.4.2. Bruit en station

Comment prendre en compte le bruit en station ? Il existe en moyenne en effet environ une station tous les kilomètres. La vitesse indiquée dans les études d'impact correspondant souvent à la vitesse maximale entre deux stations.

Dans [64], P. Demizieux effectue deux mesures : l'une au niveau d'une station et l'autre en section courante au milieu de deux stations (la vitesse est alors considérée comme constante et proche de 30 km/h environ). L'analyse des résultats montre que les niveaux sonores générés par le tramway au niveau des points de mesure sont sensiblement équivalents (0.5 dB(A) seulement de différence entre des $L_{Aeq,T=30s}$). En effet, la diminution de l'émergence maximum que l'on constate hors station est compensée par l'augmentation de la durée de la présence du tramway avec l'apparition de nouveaux bruits en station (manoeuvre des portes, passagers, message...).

Il est globalement conseillé de ne pas considérer une baisse de l'émission au droit de la station, et ce même sur un tronçon où la vitesse est supérieure à 30 km/h. En effet, entre les études projets et les travaux, l'emplacement des stations peut être modifié.

3.2.4.3. Création d'un dépôt : nécessité d'une étude particulière

La création d'un dépôt doit faire l'objet d'une étude particulière : la réglementation en vigueur est celle des établissements classés, avec prise en compte des émergences. P. Demizieux et G. Sutter [70] ont réalisé une étude de ce type à Strasbourg en 1996. Ils ont modélisé les sources acoustiques suivantes : les trafics des bus, tramways, et véhicules du personnel, les équipements de lavage des bus et des tramways.

3.2.5 Des moyens de protection à la source difficiles à mettre en place

Pour assurer la réduction des nuisances sonores, la réglementation en vigueur demande qu'un traitement "à la source" soit choisi en priorité, dans la mesure du possible. Toutefois, pour des zones urbaines, les configurations de site limitent les solutions disponibles.

3.2.5.1. Écrans acoustiques : une solution peu adaptée dans un milieu urbain même si des pistes existent

Ce type de protection consiste à insérer un obstacle (mur ou butte de terre) entre la (les) source(s) de bruit et les bâtiments à protéger, d'une hauteur minimale de 2 mètres en général.

L'avantage de cette solution est sa pérennité. Mais, en zone urbaine, elle est souvent difficile à mettre en œuvre pour des raisons d'insertion dans le site (place, compatibilité avec les mouvements piétonniers et routiers, dégradations...). Le gain peut aller de 5 à 12 dB(A) environ.

Toutefois, de récents travaux ouvrent des perspectives intéressantes [71]. L'ajout d'écrans de hauteur inférieure à 1 m pourrait permettre des gains de l'ordre de 6 dB(A). Par ailleurs, en jouant sur l'optimisation de la forme de l'écran, on améliore de manière significative l'efficacité de l'écran en basses fréquences (entre 50 Hz et 315 Hz). Ces travaux de recherches, menés sur des modèles numériques et des maquettes, sont à poursuivre par une expérimentation grandeur réelle. Il reste aussi à s'assurer de la faisabilité et des coûts de fabrication.

3.2.5.2. Mise en place d'une plate-forme moins bruyante

Dans le cas d'un projet de tramway, on peut jouer sur un des deux aspects suivants (ou même les deux) :

- la plate-forme du tramway : une plate-forme herbeuse par exemple permet de diminuer les niveaux sonores de plusieurs dB(A)¹.
- la plate-forme routière : un revêtement routier peu bruyant (enrobé drainant ou BBTM par exemple) pour apporter une réduction des niveaux sonores. Néanmoins, cette amélioration n'est intéressante que si le bruit de roulement est prédominant (vitesse continue assez élevée, peu de poids lourds). Cette solution n'est donc pas forcément adéquate en milieu urbain, où les bruits moteurs dominent souvent (bruit pulsés) et la vitesse est réduite. D'autant plus que la durabilité du gain n'est pas assurée. Cette solution peut donc être considérée comme complémentaire. On peut atteindre temporairement au moins un gain de 3-4 dB(A) par rapport à un enrobé classique dans une section à 50 km/h, qui comporte peu de camions. Ce gain est à relativiser, car le moindre aménagement urbain (dos d'âne, plaque d'égoût, tranchée pour faire passer des évacuations,...) peut diminuer ce gain.

3.2.5.3. Réduction des vitesses

Pour diminuer le bruit, les vitesses peuvent être réduites :

- soit les vitesses du tramway : cette mesure est difficile à prendre. Pour augmenter l'attrait des transports en commun, il s'agit en effet de garder une vitesse commerciale importante. Elle peut cependant s'envisager sur un faible linéaire, ou à certaines heures (tôt le matin ou en soirée). La figure 32 présente l'évolution des niveaux en fonction de la vitesse par rapport à une vitesse de 50 km/h : par exemple si l'on passe de 50 à 40 km/h, le gain attendu est d'environ 3 dB(A)², si l'on passe de 30 à 20 km/h, le gain attendu est d'environ 5 dB(A). Attention néanmoins, car les gains présentés ici ne prennent en compte que le bruit de roulement : en dessous de 20 km/h, d'autres sources peuvent apparaître et le gain lié à la diminution de vitesse se trouve ainsi réduit,

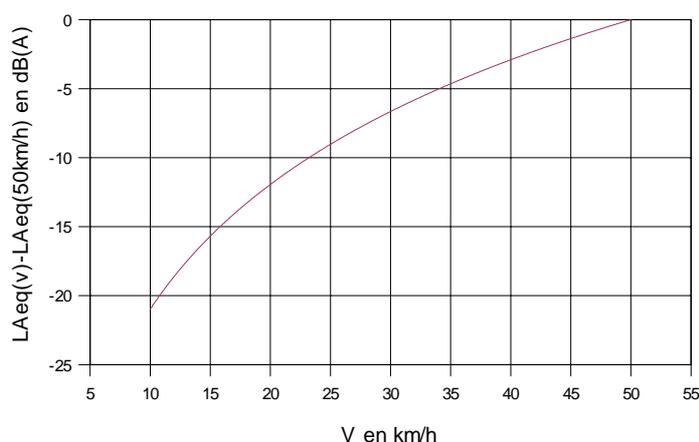


Figure 32: Évolution du L_{Aeq} en fonction de la vitesse en section courante. Seul le bruit de roulement est pris en compte.

1 Pour plus de précisions, on se reportera au chapitre sur les paramètres d'émission.

2 Une évolution simplifiée des niveaux en $30 \times \log_{10}(v)$ est prise en compte.

- soit les vitesses des véhicules : si cette solution est retenue, on fera attention à ne pas accompagner cette décision d'aménagements qui réduisent la vitesse localement mais qui peuvent en fait se révéler plus bruyants (comme certains dos d'âne ponctuels, propices aux accélérations/décélérations).

3.2.5.4. Traitement acoustique des bâtiments

En cas d'action au niveau des bâtiments, les objectifs réglementaires portent sur l'isolation acoustique vis à vis des bruits extérieurs. Cette isolation doit être renforcée en fonction des niveaux de bruit prévisibles à l'extérieur.

Ces valeurs d'isollements à atteindre se calculent à l'aide de la formule (3) spécifiée dans l'arrêté du 5 mai 1995.

$$D_{nAT} \geq L_{Aeq} - \text{object.} + 25 \text{ dB (A)} \quad (3)$$

Où :

- D_{nAT} représente l'isollement acoustique normalisé de la fenêtre
- L_{Aeq} représente la contribution sonore de la voie évaluée à 2 mètres en avant de la façade
- object. représente l'objectif visé
- 25 dB(A) représente l'isollement courant d'une façade

Dans la majeure partie des cas, le renforcement de l'isolation consiste à changer les fenêtres et à traiter les autres points faibles de la façades (entrées d'air et caissons de volets roulants).

3.2.5.5. Tableau synthétique et coût approximatif des principales solutions de protection

Le tableau 5 présente les différentes mesures compensatoires envisageables, ainsi que leur coût estimatif moyen. Une note du SETRA, rédigée par le CETE de l'Est, devrait prochainement donner des précisions sur ces coûts.

	Moyen de protection	Coût estimatif	Commentaire
Protection à la source	Mise en place d'obstacles : <ul style="list-style-type: none"> • écrans • buttes 	<ul style="list-style-type: none"> • 250-400 €/m² • 4,5-8 €/m³ 	Ce type de solution est souvent inadapté en milieu urbain du fait, notamment, des problèmes d'insertion dans le site, de l'accès des riverains à la voirie, des distances faibles entre la route et les maisons...
	Réduction des vitesses		Cette mesure est difficile à prendre sur les transports en commun, afin de ne pas en diminuer l'attrait. Pour les voitures, la réduction de la vitesse doit être étudiée en détail afin de ne pas être source d'augmentation du bruit (cas pour une route pavée, accélération/décélération).
	Fourniture, transport et mise en place d'une couche de roulement peu bruyante (épaisseur 2,5 cm)	<ul style="list-style-type: none"> • Surcoût moyen de 2,40 €/m², soit un surcoût de 40 % environ 	La circulaire du 12 décembre 1997 envisage cette solution comme un complément de traitement mais déconseille de l'utiliser en traitement de base car il est difficile de garantir la pérennité des qualités acoustiques. Par ailleurs, cette mesure n'est vraiment intéressante que pour des vitesses supérieures à 50 km/h.
Autres protections	Traitement acoustique des façades (qui consiste le plus souvent à poser du double-vitrage)	<ul style="list-style-type: none"> • 1 000 € fenêtre • 6 700 € par façade 	Cette solution est adaptée au milieu urbain, même si elle est moins intéressante qu'une protection à la source (il faut fermer les fenêtres pour être protégé du bruit).

Tableau 5: Mesures compensatoires envisageables et coût estimatif moyen

3.2.6 Recommandations : ce que doit comporter l'étude d'impact

En plus des différentes étapes acoustiques abordées précédemment (mesures acoustiques pour déterminer l'état initial, simulations pour connaître les impacts du projet et dimensionnement des moyens de protection), l'étude d'impact réalisée à l'occasion d'un projet doit comporter d'autres parties acoustiques.

Les principaux textes relatifs à la rubrique bruit d'une étude d'impact pour la construction d'une nouvelle infrastructure de transports terrestres ou la modification d'une infrastructure existante, sont explicités dans [72], fiche synthétique réalisée par la mission bruit à la DPPR¹. On peut citer en particulier l'article R122-3 du code de l'environnement, la circulaire 93-73 du 27 septembre 1993 relative aux études d'impact pour les dispositions générales. La fiche réalisée par la mission bruit s'appuie aussi largement sur la circulaire équipement/écologie du 22/11/2004, relative à la concertation entre les services de l'environnement et les services de l'équipement pour l'élaboration et l'instruction des projets routiers du réseau national, ainsi que l'instruction qui lui est associée.

Néanmoins, il faut avoir conscience que la réglementation pour les tramways n'est pas explicite. Dans cette partie sur ce que doit comporter une étude d'impact, il s'agit de recommandations fortes.

1 Direction de la Prévention des Pollutions et des Risques.

3.2.6.1. Soigner la présentation de l'étude

Un soin particulier doit être appliqué à la rédaction de l'étude d'impact :

- les hypothèses et méthodes employées doivent être explicitées clairement,
- des cartes présentant les niveaux sonores ambiants existants, futurs ou provisoires doivent être réalisées.
- l'analyse de l'état initial devra localiser les zones d'ambiance sonore préexistante modérée, ainsi que les zones urbanisées les plus calmes,
- les bâtiments à protéger, les protections envisagées (nature, localisation et coût prévisible) doivent être explicités.

3.2.6.2. Prise en compte des effets indirects

L'impact acoustique d'un projet ne se limite pas à la zone des travaux. En effet, le trafic routier et même des tramways peuvent être modifiés. D'un point de vue purement réglementaire, ces impacts indirects ne sont pas limités sur la plan acoustique. Cependant, il convient de les faire figurer dans l'étude d'impact. Par ailleurs, l'existence d'un projet peut être une occasion de supprimer des points noirs bruits existants.

Dans [69], P. Demizieux a calculé les effets indirects engendrés par le projet du tramway. Ceux-ci sont à la fois routiers et ferroviaires (le réseau de tramway de Strasbourg est en effet maintenant le plus interconnecté de France). Des variations du bruit inférieures à 2 dB(A) ne sont pas perceptibles.

Pour le calcul des effets indirects, on peut par exemple utiliser la formule simplifiée (4).

$$Impact = 10 * \log_{10} \left(\frac{Trafic_{après\ projet}}{Trafic_{avant\ projet}} \right) \quad (4)$$

Exemple:

*Si avant la réalisation d'un projet, on a un trafic de 2000 VL/jour, et que l'on passe après la réalisation du projet à un trafic de 4000 VL/jour, l'augmentation des niveaux sonores est de $10 * \log_{10} \left(\frac{4000}{2000} \right) = 3 \text{ dB (A)}$.*

Pour un calcul plus compliqué incluant des VL et des PL, on peut utiliser un trafic acoustiquement équivalent (par exemple, à 50 km/h sur un terrain plat, un PL est équivalent à 10 VL).

La formule (4) reste très simple. Même si elle permet de donner un ordre de grandeur, des précautions sur son utilisation doivent être prises. En effet, les modifications de débits de véhicules entraînent des modifications des vitesses et des allures. Le débit horaire n'est plus alors très bien corrélé avec les niveaux sonores mesurés. La figure 33 présente un exemple des relations niveaux/débits (courbe en rouge), issu d'une expérimentation dans les rues de Lyon menée par le LICIT [73]. On remarque des non-linéarités pour certains débits, avec une variation de 5 à 10 dB(A) pour un même débit.

Cependant, la formule (4) reste sans doute globalement satisfaisante si l'on s'en tient aux périodes réglementaires, et que l'on ne descend pas à un niveau plus précis comme le niveau horaire.

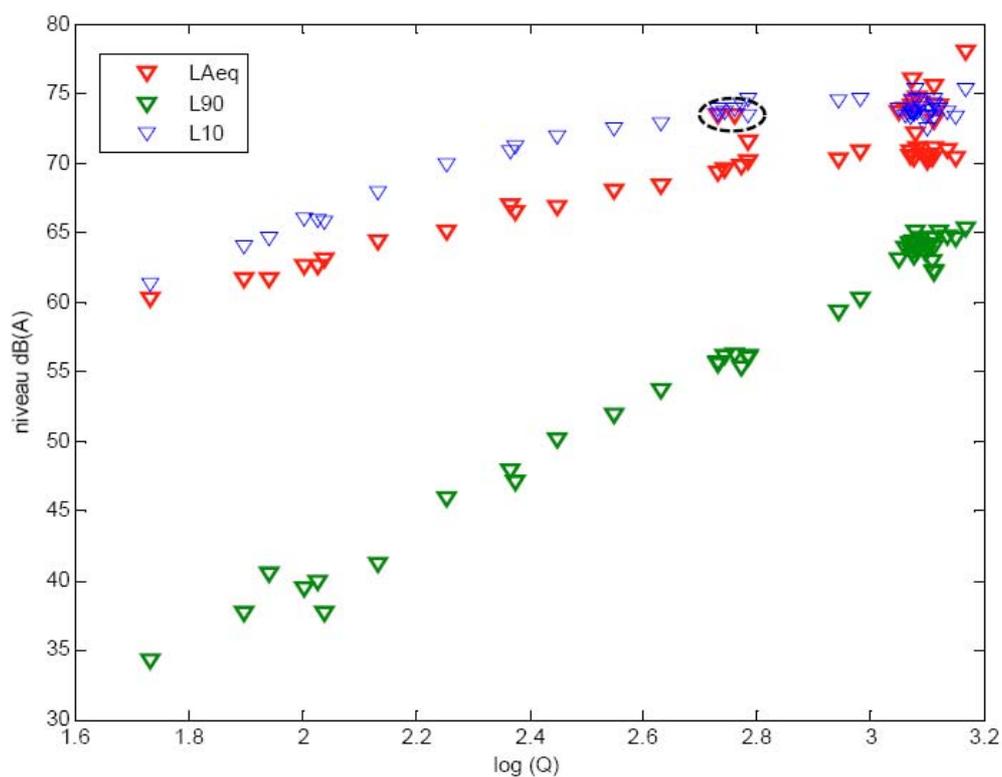


Figure 33: Relation horaire entre niveaux de bruit (L_{Aeq} : courbe en rouge) et débits (Q), correspondants à différentes plages horaires de la journée en circulation urbaine [73]

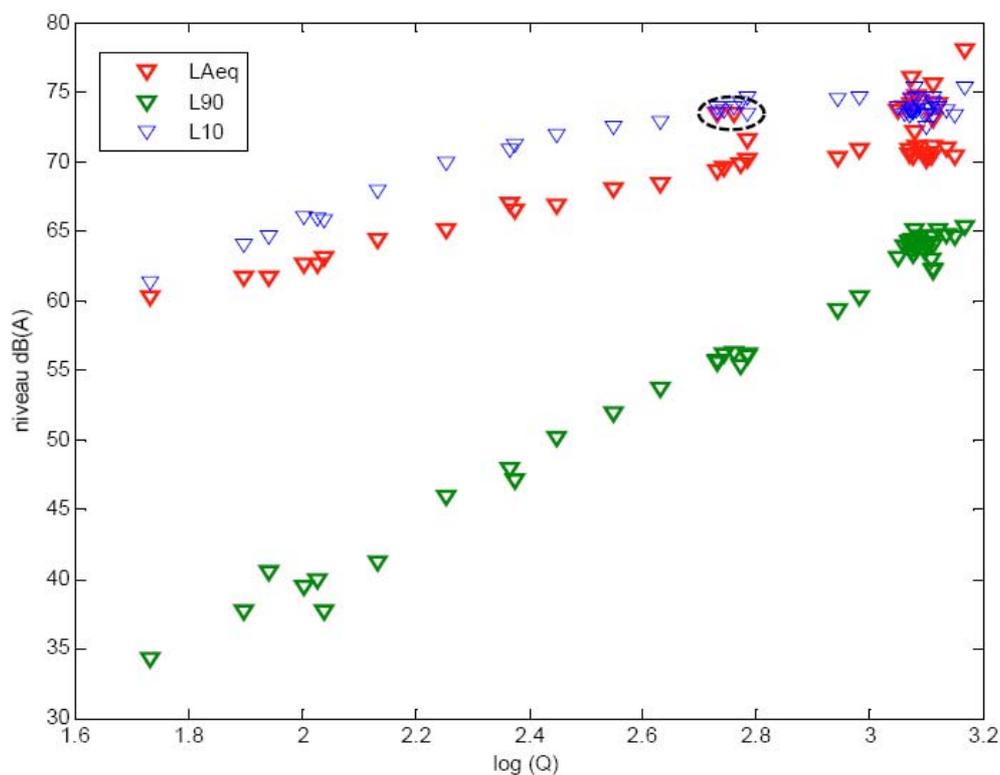


Figure 34: Relation horaire entre niveaux de bruit (L_{Aeq} : courbe en rouge) et débits (Q), correspondants à différentes plages horaires de la journée en circulation urbaine [73]

3.2.6.3. Les effets socio-économiques et leurs limites

Pour monétariser les effets du bruit, deux grandes familles de méthode sont décrites dans [44].

Les méthodes indirectes permettent à partir de l'observation de certains effets indirects d'en déduire le coût social du bruit des transports. On peut citer par exemple la méthode des prix hédoniques (basée sur l'évolution du prix des habitations en fonction de l'exposition au bruit) ou de la méthode du coût des dommages (basée par exemple sur l'évolution des coûts de santé en fonction de l'exposition au bruit).

Toutes ces méthodes d'évaluation indirectes butent néanmoins sur des limites parfois importantes : les coûts chiffrés sont-ils dûs uniquement à l'effet du bruit des transports ?

Pour essayer de contourner ces limites, une autre famille de méthodes existe : les méthodes directes. Elles visent à monétariser l'effet du bruit des transports à partir de consentements à payer d'individus soumis à un scénario donné. Contrairement à la famille de méthodes indirectes, basées sur l'évaluation de l'évolution des comportements réels, ces méthodes sont basées sur des comportements hypothétiques.

Mais là encore, des limites surgissent. Les consentements à payer déclarés lors des sondages sont-ils fiables ?

Pour les projets ferroviaires, aucun texte ne détaille la manière de calculer les effets socio-économiques. Pour les projets routiers par contre, l'instruction relative aux « méthodes d'évaluation économique des projets interurbains »¹, demande le calcul des effets socio-économiques du bruit. En pratique, cela consiste à :

- regarder l'évolution de l'empreinte sonore,
- évaluer les bâtiments exposés suivant certaines tranches de niveaux sonores.

3.2.6.4. Les effets sur la santé : un peu de qualitatif et peu de quantitatif

Les effets du bruit sur la santé sont mal connus. Pour plus de précisions, on se reportera au chapitre 4. Dans les études d'impact, la partie bruit se limite donc souvent à une recherche bibliographique sur le sujet.

3.2.6.5. Prise compte globale des effets directs (multi-exposition)

Afin de connaître les obligations de protections réglementaires lors d'un projet, il est nécessaire de simuler l'impact acoustique particulier engendré par l'infrastructure projeté. Pour l'étude d'impact, les niveaux globaux (engendrés par les sources routières et ferroviaires comme c'est souvent le cas pour une étude de tramways) doivent être calculés.

3.2.7 Ce que peut inclure l'étude d'impact

La partie suivante essaie de recenser ce que l'on peut inclure dans l'étude d'impact, en plus des obligations réglementaires.

3.2.7.1. Prévision des zones potentielles de crissements

Suite à la construction d'une ligne de tramway, des problèmes de crissements générés dans certaines courbes de petit rayon peuvent apparaître. L'apparition et les niveaux sonores générés sont fortement aléatoires, rendant la mesure délicate et peu représentative. Ils dépendent entre autres des conditions météorologiques, du rayon de la courbe... Le niveau sonore n'est pas un indicateur pertinent dans ce cas.

Du fait de leur caractère aléatoire, ces bruits parasites ne peuvent pas être simulés pour les impacts du tramway. L'exploitant peut s'engager à mettre en œuvre des solutions existantes si le problème se pose. Le problème du crissement peut parfois être évité en amont au stade du tracé.

Quoiqu'il en soit, il est intéressant de spécifier les zones potentielles de crissement. C'est dans ces zones qu'il conviendra d'être particulièrement vigilant après la mise en service du tramway.

¹ La dernière version provisoire date de mai 2007 et est disponible sur le site intranet de la direction générale des routes http://intra.dr.i2.rubrique.php3?id_rubrique=239.

Pour déterminer les secteurs où des crissements risquent d'apparaître, on peut par exemple lister les zones problématiques :

- Les zones à risque de crissements important : courbes de rayon inférieur ou égal à 50 mètres,
- Les zones où les crissements sont possibles : courbes de rayon compris entre 50 et 150 mètres.

Les valeurs des rayons limites sont celles utilisées dans une étude d'impact réalisée pour le tramway de Strasbourg [69].

3.2.7.2. Cartes sonores verticales

La plupart des cartes sonores présentées sont des cartes à hauteur constante (couramment à 5 m de hauteur). Des cartes verticales permettent de s'assurer que les niveaux sont respectés sur tout la façade d'un immeuble. Ces cartes verticales sont particulièrement pertinentes en milieu urbain.

Exemple:

Dans [66], des cartes verticales sont réalisées pour chacun des points de mesure. Un exemple est joint figure 35.

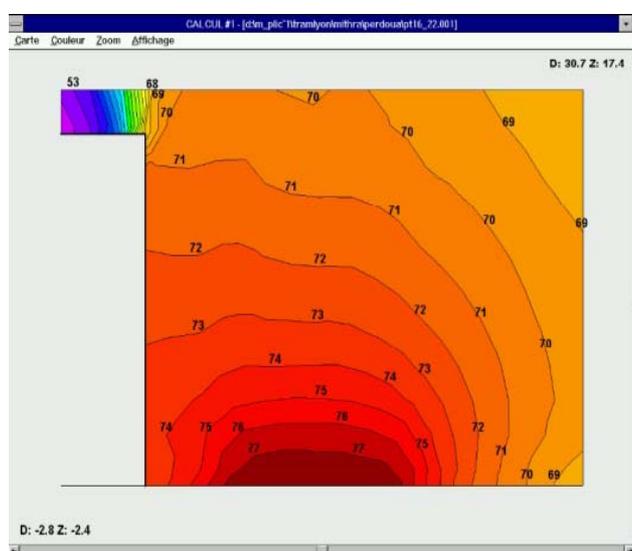


Figure 35: Exemple de vue en coupe des isophones pour un projet de tramway (tiré de l'étude du CETE de Lyon [66])

3.2.7.3. Utilisation d'indicateurs supplémentaires

D'autres indicateurs sont utilisés dans certaines études d'impact :

- L_{Amax} : cet indicateur permet de s'assurer que les niveaux maxima au passage ne sont pas trop forts. Le CETE de Lyon a par exemple pris une valeur limite de 80 dB(A) dans une étude datant de 1997 [66]. La mission bruit¹, organisme central du ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durables et de l'Aménagement du territoire, recommande quant à elle une valeur de 70 dB(A) [72]². Si l'on reprend l'étude réalisée par le CETE de Lyon, on s'aperçoit que la valeur de 70 dB(A) semble très souvent dépassée en milieu urbain.
- L_{Aeq} calculés sur des périodes plus courtes : cela permet une meilleure prise en compte de l'évolution des niveaux de bruit soir et matin, afin de tenir compte de la spécificité des rythmes de circulation des tramways (pas de trafic de nuit, démarrage matinal pour mise en place du service,...). Par exemple dans des études réalisées par le CETE de l'Est et le CETE de Lyon, les indicateurs $L_{Aeq}(20h-22h)$ et $L_{Aeq}(4h-6h)$ dans [66] et $L_{Aeq}(22h-24h)$ et $L_{Aeq}(6h-8h)$ dans [63] sont utilisés.

1 La mission bruit fait partie de la DPPR (Direction de la Prévention des Pollutions et des Risques), qui fait elle-même partie de la l'administration centrale du ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire.

2 Si l'on considère que l'isolement moyen d'une façade est de 25 dB(A).

3.2.8 Les lacunes courantes des études d'impact

D'après la fiche faite par la mission bruit [72], les lacunes fréquemment rencontrées dans les dossiers soumis à étude d'impact sont :

- « manque de clarté quant aux hypothèses et méthodes employées pour conduire les évaluations acoustiques,
- absence de cartes indiquant : l'état initial des niveaux sonores ambiants (avant travaux), l'état prévisible à long terme des contributions sonores de l'infrastructure en façade des bâtiments (sans protection à la source, avec protection à la source), les bâtiments à protéger au titre de la réglementation, ainsi que la localisation et la nature des protections envisagées,
- absence d'évaluation des impacts acoustiques indirects le long des infrastructures connectées au projet,
- absence d'information sur les pics sonores prévisibles : il est recommandé d'examiner les contributions, sonores L_{Amax} entre 22h et 6h en façade des bâtiments sensibles, et d'indiquer les mesures envisagées pour les limiter significativement en visant si possible 45 dB(A) en L_{Amax} à l'intérieur des chambres exposées (voir les obligations de contenu des études d'impact citées précédemment),
- absence d'évaluation en terme de population exposée,
- insuffisance des évaluations en terme de monétarisation des effets du bruit, au sein des coûts collectifs,
- manque d'information sur la prise en compte des impacts cumulés en cas d'exposition au bruit de plusieurs infrastructures. »

3.2.9 Mesures après mise en service : un bilan globalement positif

D'après [72], bien que la réglementation ne l'impose pas, il est vivement recommandé de réaliser des mesures acoustiques après mise en service. L'instruction associée à la circulaire équipement/écologie du 22/11/2004, certes relative aux infrastructures routières, indique d'ailleurs qu'il faut pendant toute la durée de l'infrastructure « réaliser des campagnes de mesure des niveaux sonores quelques mois après la mise en service de l'infrastructure, puis de façon régulière en phase d'exploitation (dans le cadre des suivis-bilans notamment), pour vérifier le respect des objectifs acoustiques réglementaires. »

Au sein du RST, deux campagnes de mesures après mise en service ont été réalisées : l'une à Strasbourg [52], l'autre à Lyon [67]. C'est à partir de ces deux campagnes que certaines remarques sont faites.

Il apparaît tout d'abord délicat de comparer les mesures après réalisation et les prévisions :

- entre les études projets et la réalisation, les tracés sont modifiés à certains endroits. Parfois, même la rue peut être modifiée,
- certaines hypothèses de calcul ne correspondent pas à la réalité : par exemple l'aménagement conduit à une baisse plus importante que prévue de la vitesse moyenne des véhicules.

Dans les deux études considérées, la réalisation du tramway semble globalement positive sur le plan acoustique pendant la période jour (6h-22h). En effet, une voie routière est alors remplacée par une voie de tramway moins bruyante en général, avec ou sans une voie routière moins large à côté. Une baisse moyenne de 3 dB(A) est constatée à Lyon pour les lignes 1 et 2 [67]. A Strasbourg pour les lignes B et C, une baisse générale des niveaux est constatée [52]. Elle est parfois très importante grâce à la baisse du trafic et à la réduction de la vitesse v , due à des rétrécissements de largeur de chaussée.

Pour la période nuit (22h-6h), par contre, le bilan est un peu moins positif. A Lyon, on constate globalement une baisse, mais un peu plus faible qu'en période jour, avec quelques points en augmentation (ceci est imputé à des bruits parasites de type sonnerie d'ambulances). A Strasbourg, une tendance à une légère augmentation des niveaux de bruits est constatée, de +1dB(A) à +2 dB(A). Cette augmentation est imputée à la différence de répartition entre les trafics routiers et les trafics de tramway. Ces derniers restent importants au début et à la fin de la période nuit (entre 22h et 6h).

Le bilan semble globalement positif le long des itinéraires de tramways sur le plan acoustique, d'autant plus que nous avons raisonné ici en terme de niveaux de bruit, alors que l'on sait que le bruit ferroviaire est moins gênant qu'un bruit routier. Des études de voisinage auprès des riverains, juste après la réalisation d'un projet, permettrait d'avoir le ressenti réel des riverains.

Enfin les deux études considérées soulignent que les mesures après mises en services n'ont concerné que les effets directs de l'aménagement. Une évaluation globale, englobant l'impact de la modification du plan des trafics dans les zones adjacentes au projet, serait intéressante.

4 Besoin de nouveaux indicateurs : oui, mais lesquels ?

« Les experts, ce sont les riverains »
Brigitte Schulte-Fortkamp¹

Dans la réglementation française, comme dans les principales réglementations européennes, l'indicateur de bruit utilisé pour fixer des contraintes aux projets d'infrastructures est relativement simple. Il s'agit d'un bruit moyenné sur une longue période de temps (6h-22h pour la période JOUR et 22h-6h pour la période NUIT). Les pics de bruit ne sont donc pas pris en compte, alors que dans certaines configurations, ils peuvent se révéler particulièrement gênants.

Le besoin d'un nouvel indicateur pour mieux traduire les effets sur la santé et la gêne imputables au bruit est manifeste aussi bien en France qu'en Europe. Cet enjeu s'avère cependant relativement complexe, et aucun indicateur miracle ne semble exister, ne serait-ce que parce que la variabilité entre individus semble importante. De plus, pour un indicateur donné, les seuils de gêne ou d'incidence sur la santé sont souvent sujets à discussions.

Tout d'abord, les connaissances actuelles sur les impacts du bruit sur la santé et la gêne sont présentés de façon générale. Puis, quelques-uns des principaux indicateurs acoustiques sont détaillés : l'utilisation de certains d'entre eux en plus des indicateurs réglementaires pourrait éventuellement permettre une meilleure corrélation entre la gêne et le bruit. Enfin, une enquête réalisée sur le bruit du tramway présente les premiers résultats de corrélation entre gêne et niveaux de bruit.

4.1 Effets du bruit : santé et gêne

Parmi, les effets du bruit, on distingue ceux qui ont un effet direct sur la santé et ceux occasionnant une gêne. Pour un approfondissement de ces sujets, le lecteur pourra consulter les références suivantes : [74], [75] et [76].

4.1.1 Effets du bruit sur la santé

Il est tout d'abord utile de rappeler la définition de la santé suivant l'OMS : « La santé est une état de complet bien-être physique, mental et social et pas seulement un état d'absence de maladie ou d'infirmité. » [74].

4.1.1.1. Effets auditifs

Les effets auditifs sont détaillés dans un rapport de l'Agence Française de Sécurité Sanitaire Environnementale² publié en novembre 2004 [76]. Les effets auditifs suite à une exposition au bruit sont relativement bien connus.

Les effets du bruit sur l'audition dépendent de la nocivité de ces bruits. Une multitude de paramètres interviennent : la qualité du bruit (grave, aigu), la pureté (bruit large-bande ou pas), l'intensité du bruit, l'émergence et le rythme du bruit, la durée d'exposition, la vulnérabilité individuelle (âge...), association à d'autres expositions (vibrations, agents chimiques).

Les conséquences d'une exposition au bruit peuvent être d'une part la fatigue auditive, et d'autre part la perte auditive. « La fatigue auditive correspond à un déficit temporaire d'audition qui se caractérise par une diminution de la sensibilité auditive pendant un temps limité après la fin de la stimulation acoustique » [76]. Les pertes acoustiques quant à elles sont caractérisées par leur irréversibilité.

¹ Membre de l'université technique de Berlin. Ces propos ont été prononcés à l'occasion du colloque « Bruit des transports terrestres : de la connaissance à l'action » le 19 juin 2007 à Nantes (organisé par le PREDIT).

² L'AFSSE est devenue AFSSET (avec un T pour Travail) en 2005.

D'autres effets existent, même s'ils sont moins connus : il s'agit des acouphènes (ou tinnitus en anglais) et de l'hyperacousie. « L'acouphène chronique est un bruit subjectif, entendu sans cesse, jour et nuit, " dans l'oreille " ou " dans la tête ", sans aucun stimulus sonore extérieur. [...] La plupart du temps, l'étiologie de l'acouphène n'est pas clairement identifiée. »¹ Le choc auditif est une des causes reconnues des acouphènes. Il en existe d'autres (tumeur, infection virale...). « Le terme " hyperacousie " désigne quant à lui une intolérance aux bruits, même les plus banals. L'hyperacousie est souvent la séquelle d'un traumatisme acoustique et accompagne l'acouphène dans 40% des cas. »

A notre connaissance, aucune étude n'impute d'effets auditifs dûs aux bruits émis par les tramways.

4.1.1.2. Effets non-auditifs

Une bibliographie synthétise les principaux effets non auditifs relevés dans la littérature [74], ainsi que les maladies vibroacoustiques². Les expérimentations mettent en évidence une variabilité individuelle importante.

Tout d'abord, les effets sur les organes et les systèmes humains. Les effets cardio-vasculaires sont souvent mentionnés. Ils restent cependant controversés, en particulier par rapport aux études épidémiologiques réalisées. Des essais en laboratoire ont cependant mis en évidence les effets suivants : perturbation de la pression artérielle, accélération du rythme respiratoire, modifications du système endocrinien, troubles de la vision.

Le bruit peut aussi engendrer du stress. Néanmoins, pour que ce stress se transforme en pathologie, l'exposition au bruit doit être à la fois longue et intense. Le bruit agit aussi sur les performances intellectuelles d'un individu. Au travail, on peut noter une baisse des performances (réactivité, vigilance...). Chez les enfants, le bruit journalier peut influencer les conditions du développement intellectuel, et perturber l'apprentissage à l'école.

Le bruit peut aussi perturber le sommeil. La structuration du sommeil peut par exemple se modifier ainsi : augmentation du nombre de réveils pendant la nuit, diminution de la durée du sommeil profond, disparition des phases de sommeil paradoxal... Des expériences ont montré par exemple que des pics de bruit rapprochés étaient moins gênants que des pics de bruits éloignés [76]. Par rapport au bruit de l'environnement, on parle parfois d'une accommodation : les individus n'ont plus conscience d'être dérangés pendant leur sommeil (par le passage d'un train par exemple). Cependant, même après plusieurs années d'exposition à un bruit, les réactions physiologiques à ces bruits peuvent être mesurées, indépendamment du fait que l'individu se réveille ou pas [76].

Même si les perturbations sur le sommeil dépendent fortement des individus, l'OMS (Organisation mondiale de la santé) recommande les valeurs suivantes à proximité de la tête du dormeur (référence présentant un résumé [77] ou texte intégral [78]) :

- 30 dB(A) en L_{Aeq} ,
- 45 dB(A) en L_{Amax} . Une étude [78] précise que ce seuil ne doit pas être dépassé plus de 10 à 15 fois par nuit³. Cette précision n'est toutefois pas reprise dans les conclusions générales.

Une des conclusions principales de l'OMS [78] est aussi qu'il faut poursuivre la recherche dans ce domaine.

Plus récemment, le problème spécifique de l'effet des basses fréquences (0-500 Hz) s'est posé [79]. Depuis 1999, on parle de maladies vibroacoustiques (VAD - VibroAcoustic Diseases - en anglais). Ces dernières ont été diagnostiquées dans plusieurs catégories professionnelles dont l'industrie aéronautique. Elles constituent un problème de santé publique et doivent faire l'objet d'études complémentaires.

Enfin, et pour terminer sur une note moins pessimiste, n'oublions pas que le bruit peut avoir un impact positif ou neutre s'il n'est pas subi (le sujet peut par exemple tirer un bénéfice d'un équipement bruyant en terme de travail, revenu ou de déplacement). C'est néanmoins rarement le cas pour le bruit issu des moyens de transport terrestres.

1 http://www.france-acouphenes.org/acou/acouphenes/quesque_lacouphene.htm

2 Les maladies vibroacoustiques sont notées VAD en anglais, pour VibroAcoustic Disease.

3 p.28 de [78].

4.1.2 Gêne : le bruit est seulement un des facteurs explicatifs

Une bibliographie synthétise les principales publications sur la gêne due au bruit [75].

4.1.2.1. Facteurs importants vis-à-vis de la sensation de gêne : les facteurs acoustiques ne sont pas les seuls

Deux types d'indicateurs sont souvent distingués : les facteurs acoustiques et les facteurs non acoustiques.

Les **facteurs acoustiques** peuvent être étudiés suivant trois grandes classes. Premièrement, les facteurs liés à la nature¹ et au bruit de la source étudiée, comme : le type de source (avion, route, train), la puissance de la source, la fluctuation dans le temps, le nombre d'événements, la présence de fréquences marquées... Deuxièmement, les facteurs liés au bruit ambiant. Plus l'écart entre le bruit ambiant et le niveau sonore d'une source particulière est important, plus cette source est gênante. Troisièmement, les facteurs liés aux aspects qualitatifs des sons. Des indices psychoacoustiques ont été définis (par exemple par Zwicker [80]), qui prennent en compte la fluctuation des sons ainsi que leur spectre.

Cependant, aucun d'eux pris séparément, ne suffit pour décrire la gêne ressentie. La plupart des études acoustiques réalisées sur la gêne mettent en évidence le manque de corrélation entre la gêne exprimée et les indicateurs acoustiques utilisés. Néanmoins des courbes « dose-réponse » ont pu être réalisées entre niveaux d'exposition au bruit et gêne individuelle. Par exemple la figure 36 montre la courbe produite par la commission européenne en 2002. On constate que le rail bénéficie d'un « bonus » significatif par comparaison avec les transports routiers et aériens. Cependant les corrélations entre niveaux d'exposition et gêne individuelle, bien que significatives, sont relativement faibles. Ainsi, le bruit n'expliquerait que 30 à 40 % de la gêne exprimée.

Parmi les facteurs acoustiques enfin, de nombreuses études existent sur le bruit généré par les grandes infrastructures, mais peu d'études se préoccupent des autres sources de bruit qui affectent l'intérieur ou l'extérieur d'une habitation.

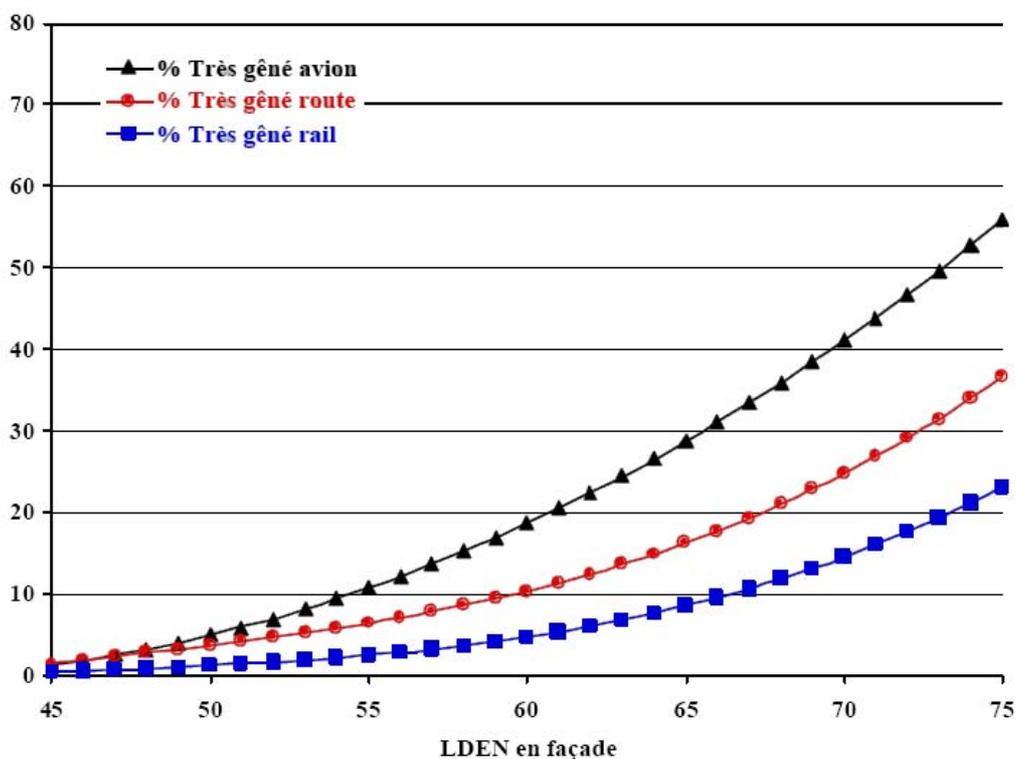


Figure 36: Gêne due au bruit des différents moyens de transports, European Commission, 2002 [76]

¹ La nature (la perception de la source dépend du sujet).

ustique (la

Les **facteurs non acoustiques** sont découpés en deux grandes classes. Premièrement, les facteurs d'attitude : le bruit est-il imposé ? Quelle est la sensibilité du sujet au bruit ? Le sujet peut-il se protéger du bruit ? Quelle est l'activité du sujet durant l'exposition au bruit ? Quelle perception le sujet a-t-il de son voisinage ? Deuxièmement, les facteurs socio-démographiques et de situation sexe, situation maritale, niveau d'éducation, activité, type de maisons, temps passé à la maison... La hiérarchie parmi ces facteurs non acoustiques est floue. Par exemple, certaines études montrent que le niveau d'éducation influe sur la gêne alors que pour d'autres, il n'influe pas.

La complexité de l'étude des facteurs non acoustiques est évidente. Non seulement, ces facteurs sont très nombreux, mais en plus, les différentes études utilisent des moyens d'enquête différents et sont donc difficilement comparables. Il est souvent difficile d'obtenir des conclusions transposables à tous les cas rencontrés.

4.1.2.2. Cas particulier de la gêne dans un environnement sonore complexe : multi-exposition et co-exposition

La plupart des études réalisées sur la gêne sonore s'intéressent à une source de bruit en particulier. Il est en effet difficile de prendre simultanément en compte toutes les sources de bruit à la fois, qui par nature sont différentes. On parle alors de multi-exposition.

La commission européenne, au sujet du choix d'indicateurs acoustiques appropriés pour les futures cartes de bruit, recommande d'étudier chaque source (avion, route, fer...) séparément [81]. Le groupe de travail remarque en effet que vu le temps limité et la complexité du sujet, il ne peut pas formuler une proposition pour évaluer l'impact combiné de deux sources différentes.

Réglementairement, le rapport de l'AFSSE ([76]) précise que « Actuellement, sur le plan réglementaire, mais aussi dans les cartes de bruit¹, les sources de bruit ne sont prises en compte que de façon séparée (même si la notion de bruit ambiant préexistant a été introduite récemment dans la réglementation française), ce qui laisse pour l'instant sans réponse la question du niveau global (valeur limite) à ne pas dépasser tenant compte de la nature, mais aussi des interactions possibles entre les différentes sources de bruit. »

La co-exposition demeure elle aussi un sujet complexe. La co-exposition consiste en l'exposition au bruit combinée à différentes nuisances : par exemple bruit et agents toxiques, bruit et température ambiante... (pour plus de précisions, se référer à [76]).

L'étude de la multi-exposition et de la co-exposition, est un domaine relativement peu étudié. Des études particulières ont certes permis de développer des modèles variés basés soit sur des modèles acoustiques soit sur des modèles perceptifs. Cependant, aucun de ces modèles n'est entièrement satisfaisant jusqu'à maintenant ([75] et [76]).

4.2 Principaux indicateurs existants

En dehors des indicateurs réglementaires, une myriade d'indicateurs complémentaires existe et peut présenter un intérêt pour la détermination d'un nouvel indicateur. Nous nous contenterons d'en examiner quelques-uns.

4.2.1 Indicateurs énergétiques

La plupart des indicateurs utilisés sont d'origine énergétique. Cette grandeur est en effet assez robuste, comparée à des indicateurs basés sur des signaux temporels.

1 Les cartes de bruit ressentent entre autre les infrastructures les plus bruyantes. Elles font l'objet de la directive 2002/49/CE du 25 juin 2002.

4.2.1.1. L_{Aeq} et I_f : les indicateurs réglementaires français

Le niveau continu équivalent pondéré A, noté $L_{Aeq,T}$ s'écrit (5).

$$L_{Aeq,T}(t) = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{T} \int_t^{t+T} \frac{p_A^2(t)}{p_0^2} dt \right) \quad (5)$$

Avec :

- $p_A(t)$: pression acoustique instantanée pondérée A,
- p_0 : pression acoustique de référence. Elle correspond à peu près au seuil d'audition (situé vers 1 kHz), soit $p_0 = 2 \times 10^{-5}$ Pa.

Le niveau de pression est souvent exprimé en dB(A). La pondération A permet de tenir compte de la réponse physiologique d'une oreille humaine moyenne, qui perçoit moins intensément les basses fréquences et les hautes fréquences. D'autres pondérations existent, car la sensation d'un son dépend non seulement de la fréquence mais aussi de l'intensité du son. La pondération A sous-estime par exemple les basses fréquences pour un son intense. L'utilisation du logarithme (dB) est due quant à elle à Fechner, qui au milieu du XIX^{ème} siècle montra que l'homme est sensible au logarithme de la pression acoustique efficace.

Dans la réglementation française, les indicateurs réglementaires sont le $L_{Aeq}(6h-22h)$ et le $L_{Aeq}(22h-6h)$, ou le $I_f(6h-22h)$ et $I_f(22h-6h)$ pour les bruits d'origine ferroviaire¹. L'énergie acoustique est alors moyennée sur des périodes de 16h (JOUR) ou 8 h (NUIT).

4.2.1.2. Indicateurs avec pondérations horaires

C'est par exemple le cas de l'indicateur L_{den} retenu dans le cadre de la directive européenne de 2002 (directive 2002/49/CE du 25 juin 2002), et explicité dans l'équation (6). Le bruit est plus pénalisant en soirée, et encore plus la nuit quand les gens dorment. C'est pour cette raison que des pondérations pénalisantes de +5 et +10 sont attribués à ces périodes.

$$L_{den} = 10 \log_{10} \frac{1}{24} \left(12 \times 10^{\frac{L_{Aeq}(JOUR)}{10}} + 4 \times 10^{\frac{L_{Aeq}(SOIR)+5}{10}} + 8 \times 10^{\frac{L_{Aeq}(JOUR)+10}{10}} \right) \quad (6)$$

4.2.1.3. Niveaux de crête : L_{Amax} (ou $L_{AFeqmax}$)

Le L_{Amax} , noté parfois aussi L_{AFmax} , permet de mesurer un niveau de crête. Il est défini dans (7).

$$L_{Amax} = \max_t \left\{ 20 \times \log_{10} \left(\frac{1}{p_0} \left[\frac{1}{\tau} \int_{-\infty}^t p_A^2(\xi) e^{-(t-\xi)/\tau} d\xi \right]^{1/2} \right) \right\} \quad (7)$$

Avec :

- $\tau = 125$ ms.

Cet indicateur est utilisé réglementairement dans certains pays scandinaves. Néanmoins, les contraintes supplémentaires pour un projet neuf sont rarement prépondérantes. L'utilisation de cet indicateur présente en fait des enjeux réels pour des routes à faible trafic (TMJA < 1500 véhicules par jour). Le L_{ASmax} est défini par (7) en prenant $\tau = 1$ s.

¹ L'indicateur I_f n'est autre que le L_{Aeq} minoré de 3 dB(A).

Certaines études utilisent aussi un autre indicateur dont la valeur est très proche du L_{Amax} , le $L_{AFeqmax}$ [22]. Il est défini par :

$$L_{AFeqmax} = \text{Max}_{t_i \in T_\tau} \left[10 \log_{10} \left(\frac{1}{\tau} \int_{t_i}^{t_i+\tau} \frac{p_A^2(t)}{p_0^2} dt_i \right) \right] \quad (8)$$

Avec :

- $\tau = 125$ ms. , durée pendant laquelle on moyenne l'énergie acoustique,
- T_τ : ensemble des intervalles contigus et disjoints de τ ms qui composent le passage d'un tramway,
- t_i : une des période de T_τ ,
- p_0 : pression acoustique de référence ($p_0 = 20 \mu\text{Pa}$),
- $p_A(t)$: pression acoustique instantanée pondérée A.

Le $L_{ASeqmax}$ est parfois aussi utilisé [21]. Il est défini par l'équation (8), en prenant $\tau = 1$ s.

4.2.1.4. L_{AE} ou SEL

Le niveau d'exposition au bruit L_{AE} (encore appelé SEL « Sound Exposure Level »), est défini pour un événement acoustique donné par (9). Il s'agit du niveau de pression équivalent acoustique pondéré A d'un son fictif qui, maintenu constant pendant 1 seconde, aurait la même énergie que l'événement acoustique considéré.

$$L_{AE} = \text{SEL} = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{t_0} \int_{t_1}^{t_2} \frac{p_A^2(t)}{p_0^2} dt \right) \quad (9)$$

Avec :

- $t_{\text{passage}} = t_2 - t_1$: temps de passage du véhicule défini entre deux instants t_1 et t_2 ,
- t_0 : durée de référence, généralement égale à 1 s.

4.2.1.5. $L_{Aeq,tp}$ et $L_{Aeq,te}$: événements acoustiques ferroviaires

Ces deux indicateurs sont utilisés dans le domaine ferroviaire [82] [83]. Ce sont des niveaux de pression acoustique continu équivalent pondéré A déterminé sur le temps de passage du train.

Le $L_{Aeq,tp}$ est défini par (10). Le temps d'intégration t_p correspond au temps de passage du train, c'est-à-dire que c'est le rapport de la longueur du train sur la vitesse de circulation.

$$L_{Aeq,tp}(t) = 10 \times \log_{10} \left(\frac{1}{t_p} \int_{t_0}^{t_0+t_p} \frac{p_A^2(t)}{p_0^2} dt \right) \quad (10)$$

Le $L_{Aeq,te}$ est défini par (11). Le temps d'intégration t_e est le temps d'exposition, qui englobe le temps de passage : il est défini comme la durée pendant laquelle le niveau sonore instantané dépasse le niveau sonore maximum moins 10 dB(A).

$$L_{Aeq,te}(t) = 10 \times \log_{10} \left(\frac{1}{t_e} \int_{t_0}^{t_0+t_e} \frac{p_A^2(t)}{p_0^2} dt \right) \quad (11)$$

La figure 37 illustre sur une mesure les périodes correspondant au temps de passage t_p et au temps d'exposition t_e .

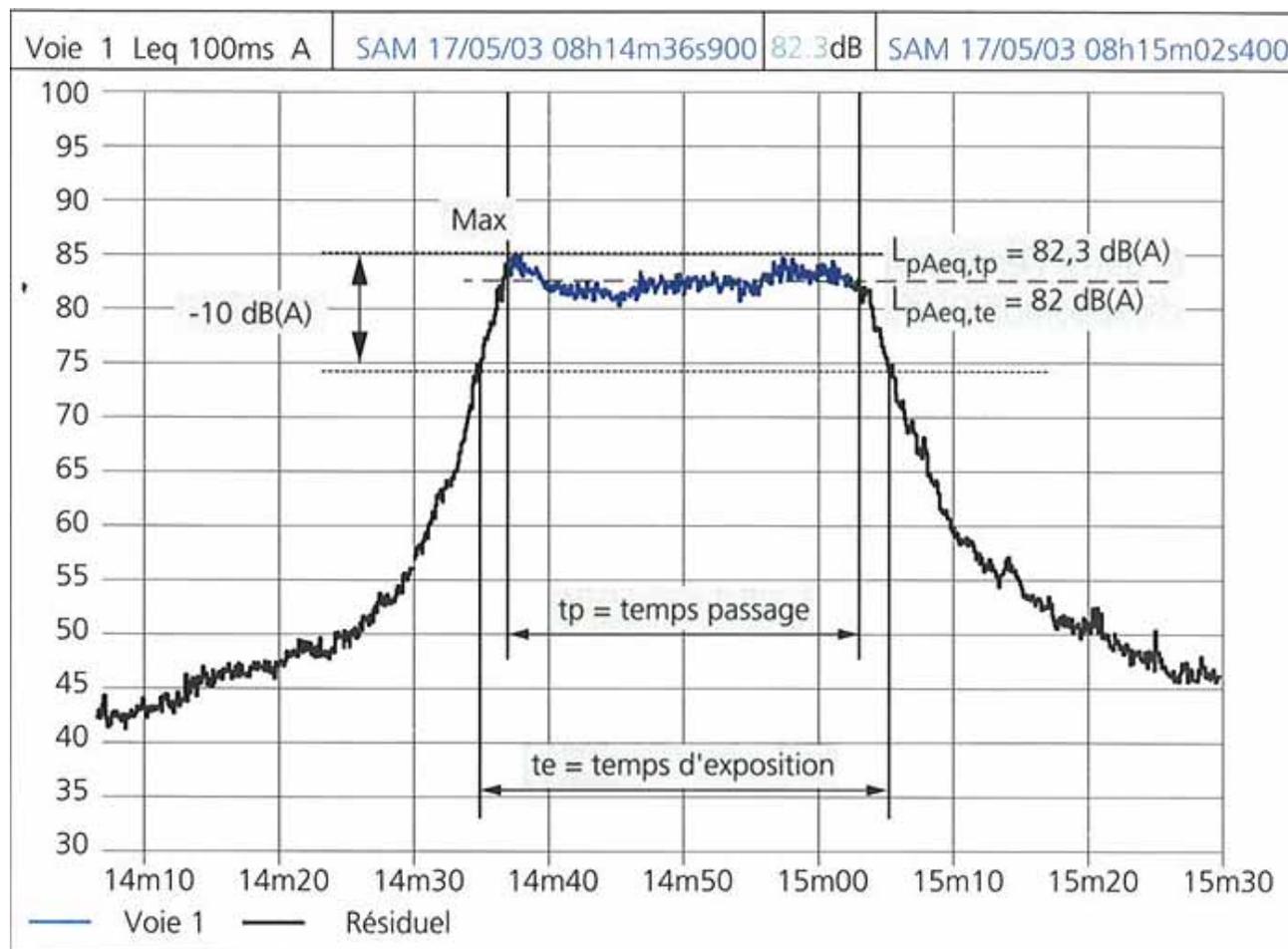


Figure 37: Exemple d'une signature acoustique d'un train, et définition des temps de passage et d'exposition [82]

4.2.1.6. Indicateurs statistiques

Les niveaux statistiques sont définis à partir des niveaux de pression instantanée, exprimés en dB(A). Par exemple :

- le L_{10} : niveau dépassé 10% du temps. Il est représentatif des pointes de bruit.
- le L_{90} : niveau dépassé pendant 90% du temps. Il est représentatif du bruit de fond.
- le L_{50} : niveau dépassé pendant 50% du temps. Il est égal au niveau médian.

Ces indices statistiques ne sont adaptés que si la durée sur laquelle les indices sont calculés est suffisamment longue pour justifier une description statistique. Par ailleurs, la distribution doit être proche d'une loi normale.

4.2.2 Autres indicateurs physiques

De nombreux autres indicateurs, développés pour des usages particuliers, ont été développées. Nous nous contenterons d'en citer quelques exemples pour illustrer le foisonnement de ces nouveaux indicateurs suite à une préoccupation ancienne de trouver un indicateur satisfaisant. Pour plus de précisions sur ces indicateurs, on pourra se référer au travail mené par A. Can, L. Leclercq, J. Lelong et J. Defrance [73].

4.2.2.1. Niveau de pollution sonore : L_{np}

Le L_{np} ou Level Noise Pollution (niveau de pollution sonore) permet de prendre en compte la gêne engendrée par la fluctuation d'un bruit. Il est défini dans (12). Pour plus de précisions, on pourra se reporter à [84].

$$L_{np} = L_{Aeq} + 2,56 \sigma \quad (12)$$

Avec :

- σ : écart-type de la distribution statistique du niveau de bruit instantané, sur la période déterminée.

4.2.2.2. Indice du bruit du trafic

Le Traffic Noise Index ou TNI (Indice du bruit du trafic) traduit l'exposition des riverains habitant à proximité de routes supportants un trafic important. Par définition, il accentue les bruits dont le niveau s'écarte grandement du bruit de fond. Cet indice est défini dans (13). Pour plus de précisions, on pourra se reporter à [84].

$$TNI = L_{90} + 4(L_{10} - L_{90}) - 30 \quad (13)$$

Des indicateurs associés à des modèles d'estimation dynamique du bruit routier ont été aussi définis.

4.2.2.3. Indicateurs renseignant sur la répartition statistique des niveaux

On calcule les niveaux de bruit enregistrés au cours d'une période de temps définie, sur des intervalles de temps courts. On répartit ensuite ces niveaux en différentes classes de niveaux (par tranche de 5 dB(A) par exemple). Un échantillonnage fin de 1 seconde est couramment utilisé : il permet de capter les pics de bruit.

D'autres indicateurs dérivent de cette répartition : nombre et occurrence des événements dépassant un seuil donnés, séquences de calme...

4.2.2.4. Indicateurs renseignant sur la structure du bruit

« Ces indicateurs renseignent sur le caractère dynamique du bruit sur une plage horaire donnée davantage que sur son évolution temporelle. Ils sont appropriés pour connaître la structure du bruit et la qualité d'un environnement sonore à un instant donné. » [73]

On peut citer :

- le $\delta L_{eq,A}$: c'est la répartition des écarts entre des valeurs successives de niveaux. A partir de cet indicateur, on peut en calculer d'autres : la valeur moyenne, la valeur maximum...
- le spectre de modulation du $L_{Aeq,1s}$, obtenu par transformation de Fourier du $L_{Aeq,1s}$. Il renseigne sur le caractère cadencé, répétitif, ou non du bruit. Il est en particulier utile pour détecter des cycles de feux tricolores.

4.2.2.5. Émergence et indicateurs complémentaires

L'émergence E est définie comme [76] « une modification temporelle du niveau de bruit ambiant induite par l'apparition ou la disparition d'un bruit particulier. E est obtenue en comparant le niveau de pression acoustique continu équivalent du bruit ambiant, en présence du bruit particulier à caractériser, au niveau de pression acoustique continu équivalent du bruit résiduel tel que déterminé sur l'intervalle d'observation. »

D'autres indicateurs complémentaires à E existent :

- composition des émergences : un seuil est fixé, au-delà duquel on évalue à quels types de bruit les émergences sont dues,
- niveau des émergences ($L_{émerg.}$) : c'est le niveau moyen des événements dépassant un seuil donné,
- durée moyenne des événements : c'est le temps moyen des événements dépassant un seuil donné.

4.2.2.6. Notion de tonalité marquée

Cette notion peut par exemple être particulièrement utile pour le cas du crissement du tramway.

Selon la norme NF S 31-010, de décembre 1996, relative aux méthodes particulières de mesurage (acoustique – caractérisation et mesurage des bruits de l'environnement), « la tonalité marquée est détectée dans un spectre non pondéré de tiers d'octave quand la différence de niveaux entre la bande de 1/3 d'octave et les quatre bandes de 1/3 octave les plus proches (les deux bandes immédiatement inférieures et les deux bandes immédiatement supérieures) atteint ou dépasse les niveaux » suivant : 10 dB pour les tiers d'octave de 63 Hz à 315 Hz, et de 5 dB pour les tiers d'octave entre 400 Hz et 6,3 kHz. Cette analyse se fait à partir d'une acquisition minimale de 10 secondes.

4.2.2.7. Pente α des spectres du son

Des travaux sont actuellement en cours à l'université de Gand en Belgique [85]. La pente α des spectres du son est calculée par période de 15 minutes. Cet indicateur provient de l'étude des spectres de pièces musicales : ces dernières avaient une pente majoritaire en 1/f. Donc, la musicalité des sons a été associée à cette pente en 1/f. La pente α est censée décrire le caractère plaisant ou pas des sons.

4.2.3 Indicateurs psycho-acoustiques

Les indicateurs psycho-acoustiques permettent de prendre en compte à la fois la physiologie de l'oreille humaine, et le processus de perception sonore. Les indicateurs psycho-acoustiques sont nombreux. Ils exigent une harmonisation internationale, afin de faciliter les comparaisons dans ce domaine très complexe. Peu d'études concernant l'impact du bruit sur des populations sont basées sur des indicateurs psycho-acoustiques, qui sont plutôt utilisés dans le domaine de la qualité sonore [74].

L'intensité du son calculée selon Zwicker [80] est l'exemple d'indicateur psycho-acoustique le plus connu. Le spectre du son étudié est divisé en bandes critiques (exprimées en Bark), dans lesquelles l'intensité du son est calculé (en sonnes). Ce qui conduit à l'intensité totale du son. Cet indicateur est difficile à introduire en pratique, car les temps de calculs sont très long, et en particulier pour des bruits non stationnaires tel que le trafic dû aux infrastructures de transport. Par ailleurs l'avantage sur les niveaux pondérés A n'est pas toujours évident [81].

4.3 Quel(s) indicateur(s) pour le bruit des tramways?

4.3.1 Quel critère pour choisir des indicateurs de bruit ?

Le rapport réalisé pour la commission européenne [81] nous fournit des critères de choix pour un nouvel (ou de nouveaux) indicateur(s) de bruit plus réaliste(s) :

- validité : le(s) indicateur(s) choisi(s) doit(doivent) traduire le mieux possible les effets ressentis,
- applicabilité pratique : facilité de calcul ou de mesure avec les équipements actuels,
- transparence : facile à comprendre. En particulier, il faudrait qu'il y ait le moins d'indicateurs possibles,
- robustesse : les paramètres de variation de l'indicateur doivent être bien maîtrisés,
- cohérence : ne pas bouleverser dans la mesure possible les indicateurs existants, et n'utiliser de nouveaux indicateurs que si leurs avantages sont indiscutables.

4.3.2 Quelques indicateurs non réglementaires déjà utilisés dans des études d'impacts de tramway

Différents indicateurs non réglementaires ont été utilisés avant la publication des textes officiels. Ils peuvent constituer des pistes de travail vers la définition d'un nouvel indicateur.

4.3.2.1. L_{Aeq} calculé sur une période plus courte

Le trafic des tramways n'est pas constant pendant la journée. La figure 38 présente par exemple les trafics sur le réseau lyonnais prévus en 1997. Le trafic peut être plus importants aux heures de pointes (matin et soir) sur les parties les plus sollicitées du tracé. Mises à part ces périodes de pointe, le nombre de tramways est assez constant le long de la journée pour la période JOUR (6h-22h). Pour la période NUIT (22h-6h) par contre, le trafic des tramways présente la particularité d'être interrompu quelques heures (3 heures pleines sur notre exemple).

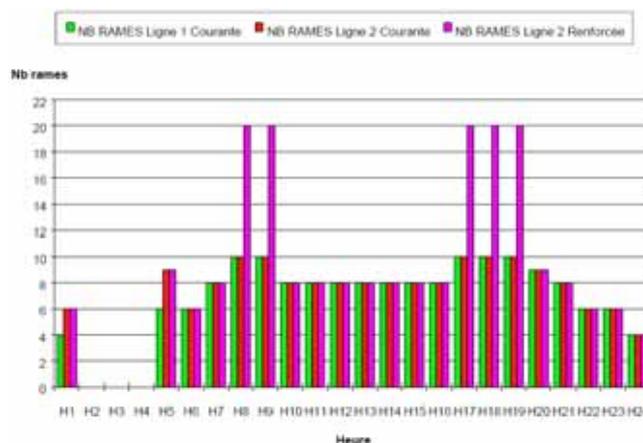


Figure 38: Répartition horaire des rames de tramway sur le réseau Lyonnais, CETE de Lyon, 1997 [66]

Comme en plus, les gens sont différemment gênés suivant les périodes de la journée (en particulier le matin et la soirée, alors que la nuit est moins pénalisante [33]), le calcul des niveaux de bruit (L_{Aeq}) sur des périodes plus courtes peut s'envisager.

Exemple :

Différentes études prennent en compte des périodes non réglementaires en plus des périodes réglementaires pour caractériser l'état initial (22h-24h, 0h-6h et 6h-8h [63], 20h-22h et 4h-6h dans [66]), voire même pour les simulations des impacts acoustiques [66].

4.3.2.2. Prise en compte du bruit de crête

Le CETE de Lyon a pris en compte le bruit de crête, sous la forme du L_{Amax} [66]. Les simulations vérifient pour les points de mesure que les niveaux maximum au passage (L_{Amax}) restent inférieurs à 80 dB(A). La figure 39 présente un exemple de calcul de signature au passage et le calcul du L_{Amax} .

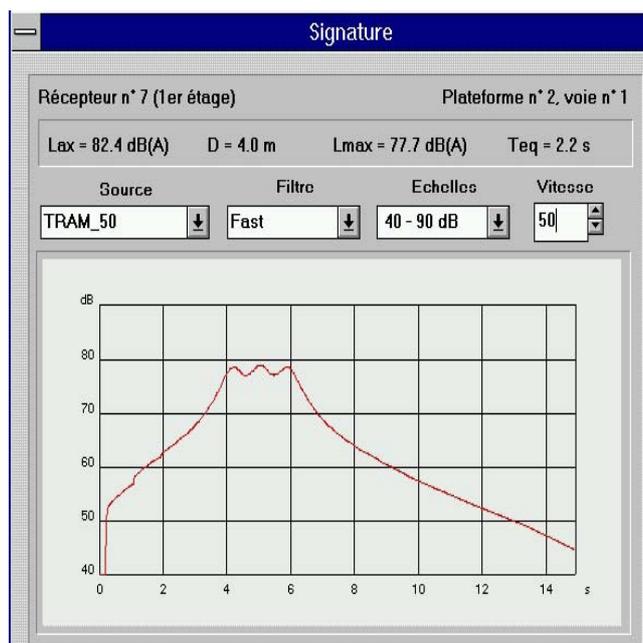


Figure 39: Calcul du L_{Amax} pour une étude d'impacts sur un projet de tramway à Lyon, CETE de Lyon [66]

4.3.3 Les indicateurs acoustiques expliquent une faible part de la gêne ressentie

Peu d'études sur l'impact du bruit des tramways existent, et celles qui ont été réalisées ne mettent pas en évidence de relation fiable entre le niveau d'exposition au bruit et la gêne de long terme (gêne moyenne sur une journée entière). La dernière étude connue pour le bruit spécifique des tramways provient d'une recherche française financée par l'ADEME dans le cadre du PREDIT [33]. Nous allons la citer abondamment dans cette partie. Chrystèle Philipps-Bertin et al. ont mené une enquête sur plus de 370 personnes habitants le long d'une ligne de tramway, en 2006 à Nantes. En parallèle, des mesures de 24 heures, ont permis de remonter par calculs aux niveaux d'exposition auxquels sont soumis chaque résident ont été calculés. Les résultats présentés ici sont partiels.

Dans [33], Chrystèle Philipps-Bertin et al. distingue la gêne au passage de la gêne de long terme (à l'échelle de la journée).

4.3.3.1. Gêne au passage d'un tramway

Afin d'établir des relations dose-réponse pour des mesures au passage de tramways, trois indicateurs acoustiques sont utilisés : L_{Amax} , L_{Aeq} et SEL. Les niveaux mesurés sont indiqués figure 40.

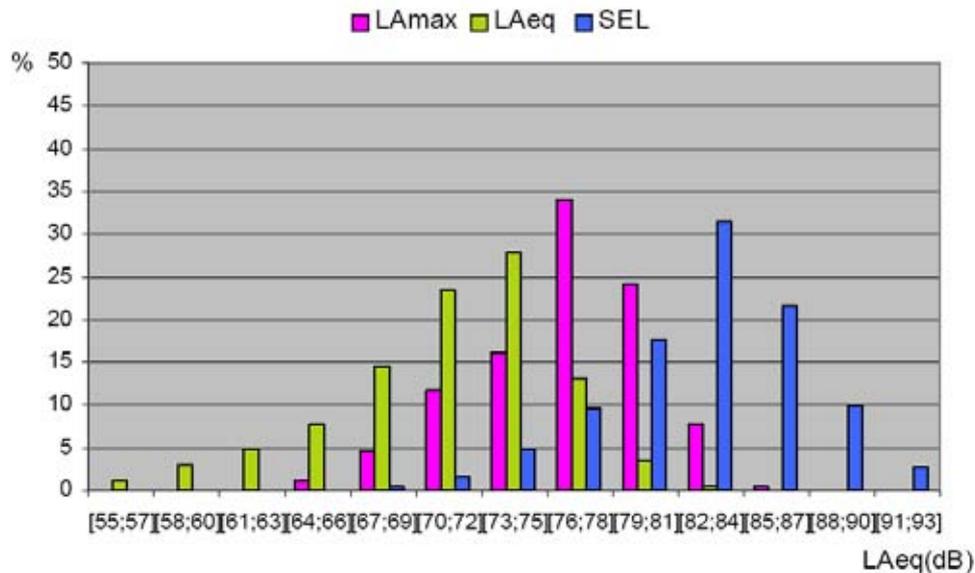


Figure 40: Distribution des LAmox, LAeq, SEL au passage des tramways, Chrystèle Philipps-Bertin et al. [33]

A partir d'enquêtes chez les riverains, le pourcentage de gens gênés est établi. Les courbes dose-réponse en sont déduites figure 41. Ces résultats sont à regarder avec précaution. En effet, selon un traitement statistique, Chrystèle Philipps-Bertin et al. remarquent que le LAeq, le LAmox et le SEL n'expliquent respectivement seulement que 9, 8 et 10% de la gêne.

Pour améliorer la corrélation entre niveaux de bruit et gêne exprimée, une analyse est réalisée en prenant en compte des paramètres qualitatifs exprimés par les gens interrogés. Une grille de paramètres a été définie et les personnes doivent mettre une note pour chacun de ces paramètres. En ajoutant au LAeq quelques paramètres de l'enquête (bruit court/long, grave/aigu, loin/près, bourdonnement, crissement) le taux de personnes gênées s'explique alors à 42%.

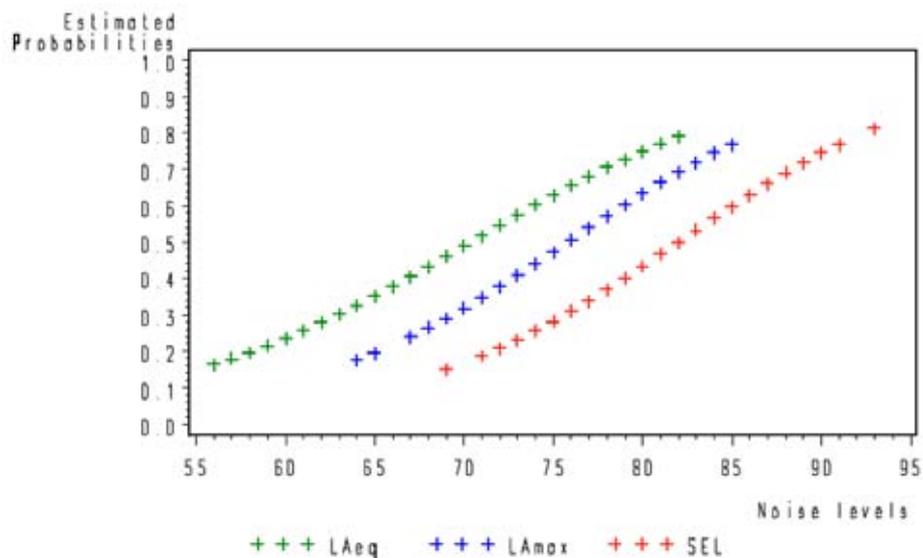


Figure 41: Courbes dose-réponse entre les mesures acoustiques au passage et la gêne, Chrystèle Philipps-Bertin et al. [33]

4.3.3.2. Gêne de long terme

Pour évaluer la gêne sonore de long terme dû au tramway, le L_{Aeq} est calculé pour chaque période : matin, jour, soir, nuit et 24 heures. Les niveaux obtenus pour chaque période sont indiqués figure 42.

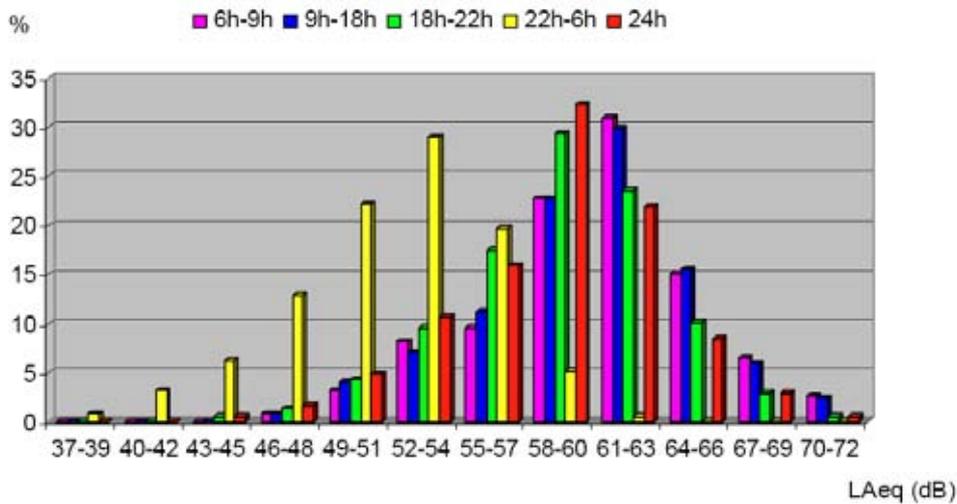


Figure 42: Distribution des niveaux d'exposition en fonction des périodes de la journée, Chrystèle Philipps-Bertin et al. [33]

La soirée est sans conteste la période perçue comme la plus gênante de la journée : 21% des personnes interrogées se déclarent comme très gênées contre 16% pour le matin, et 11% pour la journée. La gêne exprimée pour la période nuit est très faible, et n'est pas détaillée dans l'article. Dans [86], Priscille Laneyrie confirme ces résultats. Les périodes les plus gênantes sont effectivement la soirée et le matin. Le bruit en journée ne semble pas problématique : soit parce que le bruit ambiant est élevé, soit parce que les gens sont concentrés sur une activité. De plus, certaines parties du tracé du tramway semblent, selon cette étude, plus pénibles que d'autre : les accélérations dans les lignes droites, et le bruit des freins avant les virages¹. Le bruit de crissement, les circulations la nuit (entretien des voies), et les vibrations sont aussi mal ressentis par les riverains.

A partir d'enquêtes chez les riverains, le pourcentage de gens gênés est établi. Les courbes dose-réponse en sont déduites figure 43. Ces résultats sont à regarder avec précaution. En effet, selon un traitement statistique, Chrystèle Philipps-Bertin et al. remarquent que le L_{Aeq} n'explique qu'au mieux 4% de la gêne pendant la période étudiée.

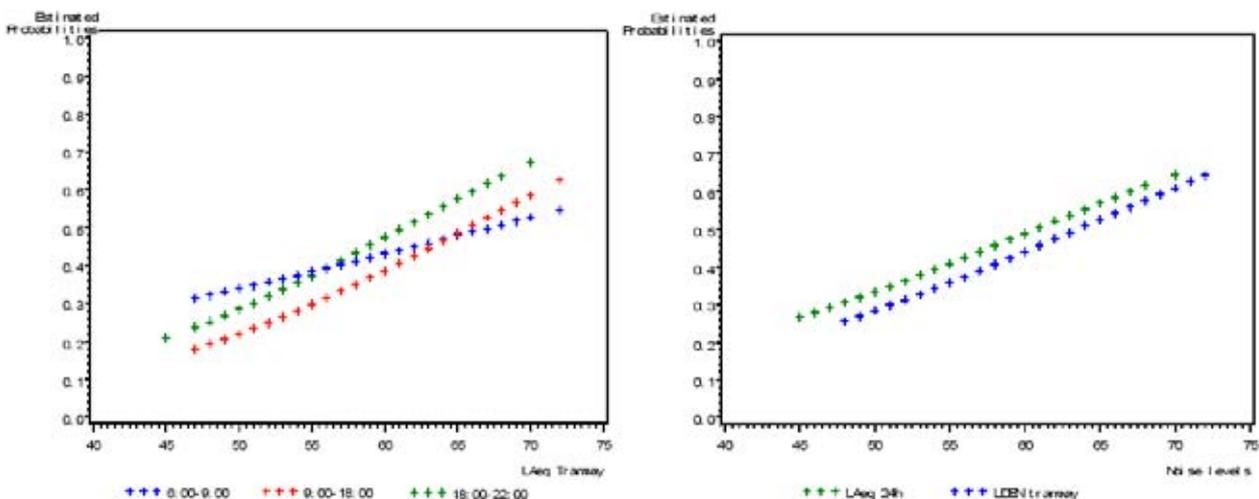


Figure 43: Courbes dose-réponse entre les niveaux de bruit générés par le tramway et la gêne de long-terme, Chrystèle Philipps-Bertin et al. [33]

¹ [33] confirme que les gens gênés par le crissement se trouvent soit dans des zones de virages, soit à proximité d'arrêt.

Dans un second temps, une analyse est réalisée en prenant en compte des paramètres qualitatifs exprimés par les gens interrogés. En ajoutant au L_{Aeq} trois paramètres issus de l'enquête, le taux de personnes gênées s'explique alors à 31%.

4.3.3.3. Une enquête en cours de dépouillement

Une exploitation plus approfondie devrait permettre d'améliorer le modèle en considérant d'autres indicateurs (temporels et qui incluent des caractéristiques spectrales). Enfin, une attention particulière sera accordée aux effets du bruit ambiant, et à des facteurs plus personnels (âge, sexe...).

4.3.4 Vers un nouvel indicateur?

Depuis quelques années, la demande d'une alternative au L_{Aeq} est posée. Pour le cas du tramway, comme pour les autres sources, l'utilisation d'un nouvel (ou de nouveaux) indicateurs ne paraît pas évidente. Tout d'abord, la gêne exprimée ne reflète pas nécessairement les risques sur la santé. Ensuite, de nombreux facteurs acoustiques (temporalité du bruit et spectres) ainsi que de facteurs très personnels interviennent. Le nombre des paramètres en jeu, tant sur les sources que sur les personnes, rend une approche globale très difficile. Certains prônent une approche interdisciplinaire : ethnologues, sociologues, géographes, économistes, psychologues... [44].

Même si l'on conserve le L_{Aeq} , il serait intéressant que la réglementation définissent de nouvelles périodes pour le tramway. L'analyse réglementaire sur la période nuit ($L_{Aeq}(22h-6h)$) n'est pas pertinente puisque le trafic de tramway est interrompu pour une période d'environ quatre heures (typiquement entre 0h30 et 4h30). L'énergie acoustique mesurée (pendant les quatre heures du trafic réel de tramway entre 22h et 0h30 puis entre 4h30 et 6h) est moyennée sur une durée deux fois plus grandes (huit heures entre 22h et 6h). Cela revient à donner un bonus de « 3 dB ». On pourrait donc calculer le L_{Aeq} nuit entre 22h et 6h, mais uniquement sur la période circulée.

En conclusion, même si d'autres indicateurs supplémentaires paraissent alléchants (tel le L_{AFmax}), aucun ne semble améliorer la corrélation avec la gêne exprimée. Le L_{Aeq} seul, malgré toutes ses limites, sera difficile à remplacer. Les périodes sur lesquelles il est calculé peuvent néanmoins être utilement adaptées dans le cas du tramway.

Conclusion

Suite à l'engouement des grandes et moyennes agglomérations françaises pour le tramway, ce travail s'est focalisé sur quatre aspects du bruit des tramways : premièrement, la modélisation de l'émission, deuxièmement, les paramètres d'émission, troisièmement, la réglementation française et le traitement des études d'impacts, et enfin des réflexions sur la possibilité d'un nouvel indicateur acoustique. Les types de tramways étant nombreux, seul le tramway sur rails a été abordé.

Le premier point concerne la modélisation des tramways. Aux vitesses usuelles (supérieures à 15-20 km/h), les niveaux sonores évoluent linéairement en $\log_{10}(v)$: le bruit de roulement domine. Quelques sources documentaires non étayées semblent néanmoins contester cette systématité.

Le bruit de roulement peut être modélisé de deux manières. Soit à partir de modèles phénoménologiques, qui s'appuient sur des mesures des niveaux sonores, et qui modélisent le tramway par des sources ponctuelles directives. Soit à partir d'un modèle physique, adaptation du modèle de référence pour le bruit de roulement ferroviaire (le logiciel TWINS). Cette dernière approche exige des données d'entrée très précises (sur la rugosité des roues et des rails en particulier), mais permet en contrepartie des études paramétriques sur le matériel, afin d'optimiser le rayonnement acoustique.

Pour le crissement, phénomène sonore caractérisé par une ou plusieurs fréquences pures assez aiguës et particulièrement gênant pour les riverains, différents modèles existent. Le caractère imprévisible de ce bruit nécessite une approche statistique, et non pas déterministe.

Le deuxième point concerne les paramètres de l'émission sonore. La difficulté principale consiste à les étudier séparément. Souvent, on doit comparer deux situations où plusieurs facteurs sont modifiés. Une autre difficulté importante est la différence des indicateurs utilisés suivant les références.

Le premier des paramètres de l'émission sonore est sans conteste la vitesse. Les niveaux d'émission peuvent s'exprimer sous la forme $L = A + B \log_{10}(v)$, avec A et B des constantes et v la vitesse. Grâce à différentes mesures, on constate majoritairement que B est compris entre 20 et 35, ce qui correspond à une différence de 4,5 dB(A) pour un doublement de la vitesse. L'accélération quant à elle a très peu d'influence sur les niveaux sonores.

Les autres paramètres d'émission peuvent jouer à la fois sur les constantes A et B .

L'état des bandes de roulement peut aussi influencer grandement sur les niveaux sonores. Avant toute mesure, il convient de vérifier que les véhicules et les voies soient rodés. Par ailleurs, la présence d'une usure ondulatoire sur les rails peut augmenter les niveaux de 4 à 9 dB(A). Une trop forte rugosité des rails ou des roues peut engendrer une augmentation de 1 à 2 dB(A). Un meulage régulier des roues et des rails est donc appréciable.

Le type de pose de voie peut aussi jouer de quelques dB(A). Par rapport à la pose classique, certaines poses permettraient de gagner jusqu'à 4 dB(A) semblent possibles. De plus, les dispositifs anti-vibratile (type dalle flottante) ne sont malheureusement pas aussi anti-bruit : on note une légère augmentation des niveaux de l'ordre de 1,5 dB(A).

Au niveau du crissement, pour un type de tracé donné, seules la lubrification à l'eau et l'amortissement des roues peuvent être considérées comme des solutions éprouvées pour supprimer le crissement. D'autres paramètres influencent le taux d'occurrence et/ou les niveaux des crissements : contrôle des roues en lacet, vitesse, conditions climatiques...

Le troisième point de ce travail concerne la réglementation et le déroulement des études d'impact.

Au niveau réglementaire, une clarification de la loi est nécessaire pour le cas particulier des tramways, qui n'est pas mentionné explicitement. Un projet de tramway consiste bien souvent en l'aménagement d'une rue, accompagné d'une suppression ou d'une diminution de l'emprise de la voie routière. Première hypothèse, qui est la plus naturelle, on peut considérer qu'il s'agit de la création d'une voie nouvelle ferroviaire. Seconde hypothèse, on peut envisager qu'il s'agit d'une transformation de voie routière.

Pour la modélisation des tramways, on peut considérer une source par bogie au niveau du sol avec une directivité horizontale spécifique et une directivité verticale omnidirectionnelle. Pour la détermination des niveaux de puissance, l'indicateur $L_{Aeq,Tp}$ est à privilégier par rapport au L_{Amax} ou au L_{ASmax} . Il est plus adapté à un véhicule très étendu, et permet de moyenniser les défauts présents éventuellement sur quelques roues.

Les protections à la source à proposer dans les études acoustiques ne sont pas évidentes. On peut jouer principalement sur le choix de la plate-forme (herbeuse par exemple), la vitesse ou le type de pose de voies. La pose d'écrans acoustiques normaux (deux mètres de hauteur au minimum) n'est pas adaptée au contexte urbain, mais des écrans plus petits pourraient constituer une solution alternative d'ici quelques années.

L'étude des impacts acoustiques d'un projet de tramway doit inclure : l'étude des effets indirects (report de trafic sur d'autres voies extérieures au projet), le calcul des effets socio-économiques, une évaluation des effets sur la santé, et la prise en compte globale des effets directs (cartes avec le bruit total engendré par les sources routières et tramways quand c'est le cas). L'étude d'impact peut aussi inclure une localisation des zones potentielles de crissement, des cartes verticales de bruit dans des profils de rue type.

Les mesures d'impact acoustique après mise en service d'un tramway ne sont pas imposées par la loi, mais sont vivement recommandées. Globalement, la réalisation d'un projet de tramway conduit à la baisse des niveaux sonores. Il est souvent difficile de comparer les niveaux prévus et les mesures après réalisation car certaines hypothèses ont souvent été modifiées : déplacement du tracé, changement de place des stations, vitesses VL revues à la baisse suite à des aménagements spécifiques.

Le dernier point n'est pas le plus simple, et n'est pas spécifique aux tramways : le même type de problématique peut se poser en acoustique routière (en particulier pour les faibles débits). Le besoin d'un nouvel indicateur acoustique émerge si l'on étudie les effets du bruit sur la santé, ou la corrélation de la gêne exprimée en fonction des indicateurs réglementaires. C'est ce que confirme une étude sur la gêne provoquée par le bruit des tramways. Malheureusement, le chemin vers un nouvel indicateur est semé d'embûches. A l'heure actuelle, il est plus facile de mettre en lumière les limites des indicateurs existants, que de proposer un nouvel indicateur.

Ce travail a permis de recueillir quelques informations sur l'émission des tramways. Les connaissances en la matière ne sont pas figées : il s'agit d'un point d'étape. Preuve en est les nombreux articles récents, et les travaux encore en cours. Par exemple en France la recherche menée par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) avec l'opération de recherche 11M061 « Prévoir le bruit en milieu urbain », ou dans le cadre du Programme de Recherche et d'Innovation dans les Transports terrestres (PREDIT). Preuve en est aussi les nombreuses variétés de tramways qui s'insèrent progressivement dans le paysage urbain : tramway sur rails, tramway sur pneus, tram-train, train léger, tramway suburbain, train-tram.

Le chargé d'étude,

Le responsable de groupe,

F. GOLAY

G. DUTILLEUX

5 Références

- [1] MANDULA Jan, SALAIOVA Brigita, KOVAL'AKOVA Maria. Prediction of noise from trams. *Applied Acoustics*, 2002, 63, p.373-389
- [2] Aujourd'hui en France. *Journal français*. Dossier de 10 pages sur « La vogue du tram ». Samedi 16 décembre 2006, n°1838.
- [3] Ville & Transports, magazine français. Spécial tram-train. 25/04/07, p.28-47
- [4] BRISOU F. Rail 21. <http://pagesperso-orange.fr/florent.brisou/>
- [5] BERTRAND G. <http://leportailferroviaire.free.fr/urbain/>
- [6] TRANS'BUS. <http://www.transbus.org/dossiers/tramway.html>
- [7] TRICOIRE J. Le tramway en France. La vie du rail, Paris, 2007, 160 p., ISBN 978-2-915034-73-8
- [8] FRID A., OGNAR M., et LUNDBERG E. Noise from trams – source identification and effects of noise mitigation measures. Actes ICSV (13ème : 2 juillet 2006 : Viennes (Autriche)), 8 p.
- [9] LEGOUIS T. PREDIT 2 1997-2000. Émission acoustique des tramways. Rapport du SerdB, n°RP/99-050/LGS, 13/10/1999, 37 p.
- [10] DUTILLEUX G. Émission acoustique des tramways. Commande CERTU. Rapport du LRPC de Strasbourg, janvier 2001, n°00-76-031, 23 p.
- [11] GAPIHAN G. Caractérisation de l'émission sonore du tramway de la communauté urbaine de Bordeaux. Rapport de stage au LRPC de Bordeaux, 2008.
- [12] PALLAS M.-A., LELONG J., CHATAGNON R. Noise emitted by trams. Part II : development of a tram noise emission model. Actes Internoise (36^{ème} : août 2007 : Istanbul (Turkey)), 10 p.
- [13] LELONG J., PALLAS M.-A., CHATAGNON R. Noise emitted by trams. Part I : investigations on emitted noise power, vertical directivity and localization of noise sources. Actes Internoise (36^{ème} : août 2007 : Istanbul (Turkey)), 10 p.
- [14] DUTILLEUX G. Modélisation acoustique des sources de transport en commun – Application de la méthode de hauteur de source au tramway. Rapport du LRPC de Strasbourg, juillet 2004, n°03-76-050, 48p.
- [15] DUTILLEUX G. Modélisation acoustique des sources de transport en commun – Application de la méthode de hauteur de source au tramway. Rapport du LRPC de Strasbourg, juillet 2004, n°03-76-050, 28 p.
- [16] ECOTIERE D. Modélisation acoustique des sources de transport en commun – Méthode de mesurage de la hauteur d'une source ponctuelle : optimisation et étude paramétrique. Programme F de recherche au LCPC – opération 11F022. Rapport du LRPC de Strasbourg, janvier 2005, n°03-76-050/04-76-032, 38 p.
- [17] DITTRICH M. The IMAGINE source model for railway noise prediction, 2007, vol. 93, 185-200 p
- [18] DUTILLEUX G. Modélisation acoustique des sources de transport en commun – Détermination de la vitesse d'un tramway à partir de sa signature acoustique. Rapport du LRPC de Strasbourg, novembre 2003, n°02-76-049-2, 36 p.
- [19] LEGOUIS Thierry. Bruit des tramways. Support de présentation à Bouguenais (44). 24/01/06, 29 p.
- [20] LEGOUIS T. PREDIT 1997-2000. Emission acoustique des tramways. Rapport intermédiaire (SerdB), 14/11/1998, 12 p.
- [21] GOLAY F. Bruit des tramways – Cas du tramway de Strasbourg – Lois de vitesse et de distance en site plan ouvert. Programme CERTU. Rapport du LRPC de Strasbourg, septembre 2005, n°02-76-036, 78 p.

- [22] GOLAY F. Bruit des tramways – Cas du tramway de Strasbourg – Évolution du $L_{AFeqmax}$ après meulage au cours du temps. Programme CERTU. Rapport du LRPC de Strasbourg, septembre 2005, n°02-76-036, 34 p.
- [23] FOURNIER M. Connaissance sur l'acoustique des tramways – Analyse du réseau grenoblois : campagne de mesure et simulations. Programme CERTU. Rapport du LRPC d'Autun, septembre 2006, Affaire 18402, 26 p.
- [24] DUNEZ Philippe. Impact acoustique d'un tramway suivant sa charge. Tramway de Lille (Nord). Rapport du Laboratoire Régional de Lille, 15/05/2008, dossier n°07-641-45884, 92 p. + environ 200 p. pour l'annexe 2 (fiches de mesures) qui fait l'objet d'un rapport séparé.
- [25] ECOTIERE D. Modélisation acoustique des sources de transport en commun – Étude expérimentale de la directivité d'un tramway. Programme F de recherche au LCPC – opération 11F022. Rapport du LRPC de Strasbourg, octobre 2004, n°04-76-032, 16 p.
- [27] REMINGTON Paul J. Wheel/rail rolling noise, I : theoretical analysis. JASA, juin 1987, 81(6), p. 1805-1823
- [28] THOMPSON D.J., HEMSWORTH B., VINCENT N. Experimental validation of the TWINS prediction program for rolling noise, part 1 : description of the model and method. Journal of Sound and Vibration, 1996, 193(1),123-135
- [29] THOMPSON D.J., FODIMAN P., MAHE H. Experimental validation of the TWINS prediction program for rolling noise., part 2 : results, 1996, 193(1),137-147
- [30] THOMPSON D.J. On the relationship between wheel and rail surface roughness and rolling noise. 1996, 193(1),149-160
- [26] IMAGINE, projet de la communauté européenne, (2003-2006), www.imagine-project.org
- [31] THOMPSON D.J., JONES C.J.C. A review of wheel/rail noise generation. Journal of Sound and Vibration, 2000, 231(3),519-536
- [32] MARGIOCCHI F., GAUTIER P.-E.. Caractérisation vibro-acoustique d'une voie ferrée. Acoustique&Techniques, n°46-47, 2006, p. 23-32, ISSN 1263-8072
- [33] PHILIPPS-BERTIN Chrystèle, CHAMPELOVIER Patricia, LAMBERT Jacques, TRINDADE Christine, LEGOUIS Thierry. Perception and annoyance due to tramway noise. Actes Internoise (36 : août 2007 : Istanbul (Turkey)), 6 p.
- [34] PERIARD F.J. Wheel/rail noise generation : curve squealing by trams. Thesis technische universiteit Delft, 1998, 276 p., ISBN 90-9011964-7
- [35] CHARLES-PAUVERS P. et LEGOUIS T. Note de synthèse sur le bruit des crissements de tramways. Rapport technique du SerdB pour le CETE de Lyon, n°RP/97-066/PCP, 12/12/1997, 10 p.
- [36] VINCENT N, KOCH J.R., CHOLLET H., GUERDER J.Y. Curve squeal of urban rolling stock - Part 1 : state of the art and field measurements. Journal of Sound and Vibration, 2006, 293,691-700
- [37] PALLAS M.A. Localisation et analyse des sources de bruit d'un tramway : cas du tramway de Nantes. Rapport LTE (INRETS), juillet 2001, n° 0117, 109 p.
- [38] CETE de Lyon. Tramway de Lyon. Rapport sur les bruits de crissement produits dans les courbes. 2001, 40 p.
- [39] DUTILLEUX G. Crissement du tramway de Strasbourg – Spectre de crissement sur le site de la place de la République – Évaluation de l'effet du graissage de la table de roulement. Rapport du LRPC de Strasbourg, décembre 2004, n°03-76-022, 17 p.

- [40] Railway Research UK (THOMPSON D.J. et al). Railway noise : curve squeal, roughness growth, friction and wear. Juin 2003, 59 p., <http://portal.railresearch.org.uk/RRUK/Site%20Pages/ThemeA3.aspx>
- [41] VAN DEN BRINK J.W., VAN HAAREN E., DE BEER F.G., WEENER J.J. Curve squeal noise research programme for rail bound vehicles in the Netherlands (31^{ème} : août 2002 : Dearborn (USA)), 6 p.
- [42] CHIELLO O., AYASSE J.-B., VINCENT N, KOCH J.R. Curve squeal of urban rolling stock - Part 3 : Theoretical model. Journal of Sound and Vibration, 2006, 293,710-727
- [43] MALDONADO M., CHIELLO O. et LE HOUEDDEC D. Propagation of vibrations due to tramway line. International Workshop on Railway Noise (9^{ème} : Munich : 2007), 12 p.
- [44] FABUREL Guillaume, POLACK Jean-Dominique, BEAUMONT Jacques. Bruit des transports. État et perspectives scientifiques. La documentation française (collection Transports Recherche Innovation), Paris, 2007, 115 p., ISBN 978-2-11-006385-4
- [45] LAKUSIC Stjepan, MLADENKO Rak, BOGUT Marijan. Analysis of tram tracks noise and vibration depending on rail fastenings. GESTS (International Transactions on Computer Science and Engineering), octobre 2006, vol. 9 (n°1), 12 p.
- [46] Deutsche Bundesbahn. Richtlinie zur Berechnung der Schallimmissionen von Schienenwegen. Schall03, 1990, 59 p.
- [47] SNCF. Méthode et données d'émission sonore pour la réalisation des études prévisionnelles du bruit des infrastructures de transport ferroviaire dans l'environnement. Document SNCF, version du 30/01/2006, 35 p.
- [48] BESNARD F. et al. Révision de la nouvelle méthode de prévision du bruit. SETRA. En cours de finalisation.
- [49] SPACKOVA H. Reduction of tram transport noise by the way of grass-covered track. Université technique tchèque de Prague, documents transmis par mels, 4 p.
- [50] SPACKOVA H. Noise Reducing devices in the construction of tram permanent way in Prague. Actes Internoise (33^{ème} : août 2004 : Prague (République Tchèque)), 6 p.
- [51] LAKUSIC Stjepan, DRAGCEVIC Vesna, RUKAVINA Tatjana. The influence of tram track closure system on the noise level in urban areas. GESTS¹ International Transactions on Computer Science and Engineering, 2005, vol. 4 (n°1), 10p.
- [52] DUTILLEUX Guillaume et al. Compagnie des transports strasbourgeois. Lignes B et C du tramway de Strasbourg. Impact acoustique pour les riverains. Mesures après mise en service. Rapport du Laboratoire Régional de Strasbourg, 2001?, n°01-76-031, 11 p.
- [53] LAKUSIC Stjepan. The impact of tram track fastening systems on noise level. WIT transactions on the built environment, 2005, vol. 77, www.witpress.com, ISSN 1743-3509, 11 p.
- [54] OOSTERMEIJER K. H. L'usure ondulatoire du rail après un siècle de recherches. LE RAIL, n°126, mai 2006, p. 24-25
- [55] CORRUGATION. Projet européen sur l'usure ondulatoire. 2002-2006. www.corrugation.eu.
- [56] NF EN ISO 3095. Applications ferroviaires. Acoustique. Mesure du bruit émis par les véhicules circulant sur rail. Novembre 2005, ISSN 0335-3931.
- [57] DUVAL D. Compagnie des transports strasbourgeois – Tramway de Strasbourg – Pesage dynamique des rames. Rapport du Laboratoire Régional de Strasbourg, 09/04/1998, n°97-I-273, 37 p.
- [58] LETOURNEAUX Fabien, CORDIER Jean-François. Impact des défauts de circularité des roues des matériels roulants sur le bruit de trafic ferroviaire. CFA (: novembre 2006 : Paris (France)),4 p.

1 Global Engineering, Science, and Technology Society . Organisme fondé le 01/08/02. www.gests.org.

- [59] KÄMPFER B. O. Prédiction de l'usure du profil des roues. LE RAIL, n°126, mai 2006, p. 24-25
- [60] LAKUSIC Stjepan, RUKAVINA Tatjana, DRAGCEVIC Vesna. The influence of the reconstruction of the tram tracks on the level of noise. Actes Internoise (34^{ème} : août 2005 : Rio (Brésil)), 9p.
- [61] VAN HAAREN E., VAN DEN BRINK J.W., VAN KEULEN G.A., LEFRANC B.R.J. Full scale measurements in the curve squeal noise research program (31^{ème} : août 2002 : Dearborn (USA)), 6 p.
- [62] KOCH J.R., VINCENT N, CHOLLET H., CHIELLO O. Curve squeal of urban rolling stock - Part 2 : parametric study on a ¼ scale test rig. Journal of Sound and Vibration, 2006, 293,701-709
- [63] DEMIZIEUX Patrick et al. Communauté urbaine de Strasbourg. Projet de tramway – ligne B. Étude de l'impact acoustique. Rapport N°1 : identification des sites et caractérisation de l'état initial. Rapport du Laboratoire Régional de Strasbourg, 25/11/1996, n°96-G-249, 171 p.
- [64] DEMIZIEUX Patrick. Communauté urbaine de Strasbourg. Projet de tramway – ligne B. Étude de l'impact acoustique. Rapport N°2 : prévisions des niveaux sonores, impact du projet. Rapport du Laboratoire Régional de Strasbourg, 29/11/1996, n°96-G-249, 47 p.
- [65] DEMIZIEUX Patrick et al. Communauté urbaine de Strasbourg. Projet de tramway – ligne B. Étude de l'impact acoustique. Rapport complémentaire : dépôt de Cronembourg, pont de Paris. Rapport du Laboratoire Régional de Strasbourg, 25/11/1996, n°96-G-249bis, 22 p.
- [66] SAMPIC et al. Agglomération lyonnaise. Création de deux lignes de tramway. Étude d'environnement acoustique. Rapport du CETE de Lyon, octobre 1997, référence documentation : 97.194, 25 p. (sans compter les nombreuses annexes).
- [67] SAMPIC et al. Agglomération lyonnaise. Suivi des changements acoustiques liés à la mise en service des 2 lignes de tramway. Rapport du CETE de Lyon, octobre 2001, référence documentation : 01.202, p.
- [68] DEMIZIEUX Patrick et TOUSSAINT Loïc. Ville de Strasbourg. Tramway : prolongement des lignes – horizon 2007-2008. Étude acoustique : évolution des impacts. Rapport du Laboratoire Régional de Strasbourg, 08/08/2007, n°2004-76-077, 88 p.
- [69] DEMIZIEUX Patrick. Ville de Strasbourg. Tram – Train Ouest / ligne F : horizon 2007-2008. Étude acoustique : évolution des impacts. Rapport du Laboratoire Régional de Strasbourg, 08/08/2007, n°2004-76-043, 47 p.
- [70] DEMIZIEUX P. et SUTTER G. Compagnie des transports strasbourgeois. Projet de tramway – ligne B. Dépôt mixte Elsau/Montagne Verte. LRPC de Strasbourg, rapport n°97-D-220, 43 p.
- [71] BAULAC Marine. Optimisation des protections anti-bruit routières de forme complexe. Thèse de doctorat de l'université du Maine, spécialité acoustique, préparée au LCPC, octobre 2006, 175 p.
- [72] DPPR/Mission bruit (LARIVE Jérôme). La prévention du bruit des infrastructures – construction d'une nouvelle infrastructure de transports terrestres ou modification d'une infrastructure existante. Novembre 2005, 5 p., <http://www.ecologie.gouv.fr/Transports-terrestres.html>
- [73] CAN Arnaud, LECLERCQ Ludovic, LELONG Joël, DEFRANCE Jérôme. Réflexion sur la définition d'indicateurs acoustiques pour une caractérisation de la dynamique du bruit en milieu urbain. Rapport LICIT, août 2007, n° 0704, 94 p.
- [74] MARQUIS-FAVRE C., PREMAT E., AUBREE D., VALLET M. Noise and its effects – a review on qualitative aspects of sound. Part I : notions and acoustic ratings. Acta Acustica united with Acustica, 2005, 91, p. 613-625
- [75] MARQUIS-FAVRE C., PREMAT E., AUBREE D. Noise and its effects – a review on qualitative aspects of sound. Part II : noise and annoyance. Acta Acustica united with Acustica, 2005, 91, p. 626-642
- [76] AFSSE (Agence Française de Sécurité Sanitaire de l'Environnement). Impacts sanitaires du bruit. État des lieux. Indicateurs bruit-santé. Novembre 2004, 345 p., http://www.afsset.fr/upload/bibliotheque/731096103331826363717461694944/impacts_sanitaires_bruit.pdf

- [77] TSCHUDY Eric. Effets du bruit routier sur la santé. Bibliographie. Laboratoire du CETE de l'Est, août 2000, 31 p.
- [78] WHO (World Health Organization). Guidelines for community noise. 1999, 161 p., <http://whqlibdoc.who.int/hq/1999/a68672.pdf>
- [79] ALVES-PEREIRA Mariana, A.A. CASTELO BLANCO Nuno. Vibroacoustic disease : biological effects of infrasound and low-frequency noise explained by mechanotransduction cellular signalling. ScienceDirect, Progress in biophysics and molecular biology, 2007, 93, p. 256-279
- [80] ZWICKER E. and FASTL H. Psycho-acoustics. Facts and models. Second Updated Edition. Editions SPRINGER (Information Sciences), ISBN 3-540-65063-6, 1999, 420 p.
- [81] European Commission. Position paper on EU noise indicators. 2000, ISBN 92-828-8953-X, 80 p.
- [82] Revue Générale des Chemins de Fer. Numéro spécial. Bruit – 1^{ère} partie. Editions DELVILLE, ISSN-0035-3183, octobre 2003, 116 p.
- [83] Revue Générale des Chemins de Fer. Numéro spécial. Bruit – 2^{ème} partie. Editions DELVILLE, ISSN-0035-3183, octobre 2003, 140 p.
- [84] LEONATE Aurélie. Analyse du comportement d'indicateurs acoustiques en milieu urbain pour la validation expérimentale d'un modèle d'estimation dynamique du bruit routier. mémoire de mastère recherche de génie civil, école doctorale MEGA (Lyon), 2005, 126 p.
- [85] DE COENSEL B., BOTTELDOOREN D., DE MUER T. 1/f noise in rural and urban soundscapes. Acta Acustica united with Acustica, 2003, vol.89, p. 287-295
- [86] LANEYRIE Priscille. Caractérisation d'ambiance sonore urbaine. Conséquences acoustiques de l'implantation du tramway de l'agglomération lyonnaise sur l'habitat environnant. Travail de fin d'étude, ENTPE, 2006, 77 pages
- [87] THOMPSON David. Wheel/rail rolling noise. The effects of non-linearities in the contact zone. Actes International Congress on Sound and Vibration (10^{ème} : july 2003 : Stockholm (Sweden)), 20 p.
- [88] NF S 31-133. Acoustique-Bruit des infrastructures de transports terrestres-Calcul de l'atténuation du son lors de sa propagation en milieu extérieur, incluant les effets météorologiques, février 2007, 36 p.
- [89] FODIMAN P. Le bruit des infrastructures de transport ferroviaires : nouvelles données et perspectives. SNCF-direction de la stratégie, janvier 2004, 23 p.
- [90] VAN LEEUVEN Hans. Noise emission of light-rail vehicles – state of the art. Actes Euronoise (: 2003 : Naples (Italy)), 4 p.
- [91] LUI W.K., Li K.M. An experimental study of the vertical directivity parttern of wheel/rail rolling noise. Acta Acustica united with Acustica, 2007, vol.93, p. 742-749
- [92] MOEHLER U., KURZE U.J., LIEFERT M., ONNICH H. The new german prediction model for railway noise « Schall 03 2006 » : an alternative method for the harmonized calculation method proposed in the EU directive on environmental noise.. Acta Acustica united with Acustica, 2008, 94, p. 5d48-552
- [93] HAMOU MAMAR Zahra, CHAINAIS Pierre, AUSSEM Alexandre. Probabilistic classifiers and time-scale representations : application to the monitoring of a tramway guiding system. Internet, postérieur à 2006, 6 p.
- [94] LAKUSIC Stjepan, MLADENKO Rak. Experimental analysis of the rail behaviour in the case with irregularity on running surface and without it. Internet, postérieur à 2001, 2 p.
- [95] LAKUSIC Stjepan. Impact of tram traffic on noise and vibrations. University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering. Electronic Journal « Technical Acoustics » (www.ejta.org), 10 p.
- [96] VINCENT N et BOUVET P., THOMPSON D.J. et GAUTIER P.E. Theoretical optimization of track components to reduce rolling noise. Journal of Sound and Vibration, 1996, 193(1), p. 161-171

6 Références et résumés

[1] MANDULA Jan, SALAIOVA Brigita, KOVAL'AKOVA Maria. Prediction of noise from trams. *Applied Acoustics*, 2002, 63, p.373-389

Le modèle slovaque existant est de la forme $L_{Aeq,1h} = L_{Aeq,1h}^r + \sum_{k=1}^6 \Delta L_{Ak}$. La distance de référence est de 7.5 m. Les corrections prises en comptes sont : la distance et hauteur du récepteur (avec un terrain absorbant ou réfléchissant), ceinture verte (arbustes de part et d'autre de la voie ?), faible densité des zones bâties, « screening » et topographie, zones bâties adjacentes, longueur totale de la section de tramway.

Le présent article ne porte que sur la valeur de référence, qui est affinée suivant différents paramètres.

$$L_{Aeq,1h}^r = 10 \log \left(m^{1.24} \prod_{i=1}^n F_i \right) .$$

Les facteurs identifiés sont : le nombre de trams, vitesse, gradient de la voie, usure ondulatoire des rails et crissement, âge de la rame, âge de la voie, composition des tramways.

Le modèle slovaque existant a été précisé grâce à l'envoi de deux articles (en slovaque).

[2] Aujourd'hui en France. Journal français. Dossier de 10 pages sur « La vogue du tram ». Samedi 16 décembre 2006, n°1838.

Ce dossier sur le train permet de prendre la température sur l'engouement du tramway en France : réseau existants, en construction, en projet...

[3] Ville & Transports, magazine français. Spécial tram-train. 25/04/07, p.28-47

Ce dossier présente la naissance du tram-train en France, tout en s'appuyant sur ce qui se fait à l'étranger (Karlsruhe en particulier où est né le tram-train). Un point de lexique est fait pour distinguer tram-train, train léger, tramway suburbain, train-tram.

[4] BRISOU F. Rail 21. Site internet : <http://pagesperso-orange.fr/florent.brisou/>

Ce site présente de nombreuses informations techniques sur les trains, et sur les tramways. Type de rames, numéros des rames, masses, nombre de bogies moteurs... Ce site est écrit par un passionné de trains, qui travaille chez Alstom. La dernière mise à jour date du 28/1/07.

[5] BERTRAND G. <http://leportailferroviaire.free.fr/urbain/>

Ce site présente les réseaux existants, en projet de véhicules ferroviaires, y compris les tramways et les tram-trains. Le site comprend aussi quelques informations techniques essentielles.

[6] TRANS'BUS. <http://www.transbus.org/dossiers/tramway.html>

Comme son nom l'indique, ce site est plutôt dédié aux bus. Il contient néanmoins un dossier sur les tramways.

[7] TRICOIRE J. Le tramway en France. La vie du rail, Paris, 2007, 160 p., ISBN 978-2-915034-73-8

Ce livre, riche en photos, retrace l'histoire des tramways en France. Dans chaque ville, la vie des projets est décrite, avec ses aléas. Quelques détails techniques sont fournis : longueur des voies, coût des projets, type de tramways...

[8] FRID A., OGNAR M., et LUNDBERG E. Noise from trams – source identification and effects of noise mitigation measures. Actes ICSV (13ème : 2 juillet 2006 : Viennes (Autriche)), 8 p.

Dans le cadre du projet européen « Silence », une identification détaillée des sources est réalisée sur le tram T3000 livré en 2005 à Bruxelles. C'est un tramway à plancher bas, équipé de roues résilientes. Le bruit de roulement est modélisé par le modèle TWINS avec la rugosité des roues et des rails en entrées. Attention, le tramway sort d'une longue période de tests de traction et de freinage, si bien que la piste et les roues présentent une rugosité plus importante que la normale : les résultats des mesures acoustiques sont donc à prendre avec prudence.

Les mesures sur le tramway à l'arrêt montrent que la ventilation, l'air conditionné et le convertisseur sont négligeables devant le bruit de roulement et le bruit moteur. Pour le bruit de traction Les mesures en laboratoire (moteur + vitesse) montrent une dépendance très claire en $50 \log_{10}(rpm)$.

A partir des mesures sur des véhicules en mouvement, le bruit de roulement et le bruit de moteur sont quantifiés. Pour le bruit de roulement, la dépendance en vitesse varie entre $28 \log_{10}(v)$ et : la dépendance en vitesse est plus faible pour les bogies non moteurs. L'influence de casquettes est de l'ordre de 1-2 dB(A). En plus, des points particuliers tels des courbes, croisements, aiguillages sont instrumentés. Le spectre basse-fréquences (50-200 Hz) sont plus importants pour de tels points particuliers.

Il n'y a pas eu de crissement au cours de la campagne, fait attribué au temps plutôt humide. Les critères habituels attribués au crissement sont : le coefficient de friction au point de contact, l'angle d'attaque, le décatissage des roues (« action d'enlever l'apprêt, le brillant d'une étoffe »). Les auteurs font référence à une étude à Nottingham où l'installation d'absorbants sur les roues a permis de résoudre le problème dans les courbes.

De ces premières mesures (projet en cours), découle un modèle de prédiction global. Il permet de prévoir le bénéfice de mesures de réductions du bruit, comme la couverture des bogies, des absorbants sur les roues, le crissement...

[9] LEGOUIS T. PREDIT 2 1997-2000. Émission acoustique des tramways. Rapport du SerdB, n°RP/99-050/LGS, 13/10/1999, 37 p.

Le tramway est modélisé par N sources équidistantes posées sur le sol, mobiles avec une vitesse v , en présence d'un sol homogène (réfléchissant ou absorbant). Les sources directes et images sont supposées décorréelées¹.

Tout d'abord, le choix d'un indicateur acoustique est discuté. Deux types d'indicateurs sont proposés : d'une part le niveau maximum $L_{p_{max}}$, mesuré par exemple à partir de L_{eq} courts ; et d'autre part, le L_{eq} ou la dose calculés à partir d'une coupure à 10 dB(A). Théoriquement, la dose s'avère un meilleur indicateur que le niveau équivalent L_{eq} : le L_{eq} dépend en effet trop de la valeur de coupure. Une relation linéaire liant la dose et le $L_{p_{max}}$ est approximée : il est donc pratiquement équivalent de travailler sur l'un ou l'autre des deux indicateurs. Par ailleurs, chacun des deux indicateurs peut s'exprimer, par une légère approximation, comme une fonction affine en fonction du logarithme décimal de la distance entre la source et le récepteur.

Puis, un modèle général est proposé. Il prend en compte l'effet de distance (en $\log_{10}(d)$), l'effet de la vitesse (en $\log_{10}(v)$) et la directivité.

A partir du modèle général défini, l'influence de divers paramètres est ensuite étudiée. La présence d'un virage modifie le bruit perçu au récepteur et ce, essentiellement lorsque le récepteur se situe à l'intérieur du virage. L'écart entre ligne droite et virage est faible lorsque la distance du récepteur est faible². L'influence de l'allure est négligeable : de l'ordre de 0,2 dB au maximum. Les formes urbaines modifient de manière

1 Cette hypothèse est utilisée sans être mentionnée par l'auteur. Elle peut pourtant porter à discussions, puisque les normes actuelles de modélisation des véhicules (européennes ou françaises) prennent en compte des sources directes et images corrélées.

2 Environ 1 dB pour un rapport distance/rayon du virage égal à 0,3.

sensible les niveaux sonores (jusqu'à 10 dB). L'écart de niveaux avec un site ouvert est d'autant plus faible que le récepteur se situe près de la voie.

La configuration de mesurage proposée est la suivante : une distance de 2 m entre la source et les récepteurs. Les niveaux maximum peuvent être mesurés sur une seconde pour s'affranchir des bruits parasites. Une méthode basée sur une mesure simultanée en différents récepteurs et sur une méthode d'optimisation sera utilisée.

Les premières expérimentations sur le tramway nantais montrent que les bogies sont les sources principales de bruit, pour des vitesses supérieures à 20 km/h. Pour des vitesses inférieures, d'autres sources sonores apparaissent (hacheurs, captation d'énergie ...). Ces sources feront l'objet d'études ultérieures.

[10] DUTILLEUX G. Émission acoustique des tramways. Commande CERTU. Rapport du LRPC de Strasbourg, janvier 2001, n°00-76-031, 23 p.

Les mesures réalisées à Strasbourg apportent 600 signatures de tramway à la base de données émission développée dans le cadre du PREDIT.

Une exploitation sommaire a permis d'extraire une loi d'évolution du niveau sonore engendré par un passage de tramway, en fonction de sa vitesse et de la distance du point d'observation, pour une voie en ligne droite, sur un site plan ouvert. La dépendance en fonction de l'angle de l'effet de vitesse est quasi-inexistante ; c'est le contraire pour l'effet de sol : le niveau décroît plus rapidement à proximité du sol. Ce point est attribué à l'absorption du sol. Par ailleurs, toujours pour ce site, la forte corrélation entre la dose et le L_{ASmax} est établie.

L'analyse en vue de la détermination de termes d'ajustement de cette loi en fonction du type de pose et du revêtement de voie suggère que ces correctifs sont secondaires par rapport au facteur état de la voie (rodage, entretien), et rappelle que les dispositifs anti-vibratiles ne sont pas nécessairement anti-bruit.

La mesure en courbe a montré l'augmentation considérable de niveau sonore que provoque le crissement. L'analyse fréquentielle met en évidence que cette augmentation est concentrée dans le tiers d'octave 800 Hz.

[11] GAPIHAN G. Caractérisation de l'émission sonore du tramway de la communauté urbaine de Bordeaux. Rapport de stage au LRPC de Bordeaux, 2008.

Le niveau d'émission du tramway de Bordeaux est calculé. Un cinémomètre acoustique a aussi été testé.

[12] PALLAS M.-A., LELONG J., CHATAGNON R. Noise emitted by trams. Part II : development of a tram noise emission model. Actes Internoise (36^{ème} : août 2007 : Istanbul (Turkey)), 10 p.

Cet article est la suite d'un article associé, qui décrit entre autres une campagne de mesures acoustiques sur Nantes. La partie concernant l'utilisation d'une antenne acoustique 2D est ici développée. Elle aboutit à la proposition d'un modèle d'émission acoustique.

L'antenne acoustique utilisée permet de dresser des cartographies acoustiques par tiers d'octave jusque 4000 Hz. Les principales sources qui sont observés sont :

* les bogies et les roues. Les bogies moteurs et porteurs sont différenciés. Cependant, les appareils électriques près des bogies ne peuvent pas être distingués. Seule l'antenne verticale est utilisée pour calculer l'émission correspondante. Les bogies peuvent être modélisés par une seule source dès que le microphone est éloigné de quelques mètres.

* la partie basse étendue du tram, qui comprend les rails et les bruits émanants du tram à faible hauteur, mais sans les zones correspondant aux bogies. C'est uniquement l'antenne horizontale qui est alors utilisée pour calculer l'émission correspondante à ces zones. La climatisation n'est pas encore prise en compte dans les analyses. Toutes les valeurs utilisées sont moyennées sur 250 ms. Les sources sont supposées incohérentes (par exemple, toutes les roues d'un même bogie).

Globalement, il est constaté que les mesures de niveaux globaux en dB(A) s'expriment en fonction du logarithme de la vitesse, et que l'influence du site est beaucoup plus importante que celle du type de tram.

Un modèle est développé à partir des mesures précédentes, par sommation fréquentielle sur des zones choisies. Pour chaque source, une directivité est définie : de manière arbitraire pour la directivité horizontale, et à partir des mesures réalisées sur l'arc de cercles des microphones pour la directivité verticale. C'est un modèle en champ libre : l'atténuation due au sol est considérée comme prise en compte dans les données d'émission. Le modèle s'articule autour de trois type de sources. Premièrement, un bogie est modélisé par une source ponctuelle. Les données d'émission des bogies porteurs et moteurs sont différenciées. La directivité horizontale de ces sources est prise arbitrairement de type cosinus. Deuxièmement, la partie basse du train est modélisée par une série de sources ponctuelles équidistantes et réparties sur la longueur du tram. Chacune des sources a une directivité horizontale omnidirectionnelle. La directivité verticale est déterminée au passage des sources.

Pour valider le modèle, on compare les calculs et les mesures réalisées pour le microphone situé à 7,5 m de la voie et à 1,2 m de hauteur. La comparaison en niveaux globaux est tout à fait satisfaisante. Par contre, si l'on s'intéresse aux tiers d'octave, des différences apparaissent lors des décroissances : peut-être la directivité horizontale à modifier pour certaines bandes de fréquences ?

Le modèle doit encore s'enrichir du bruit de la climatisation. Le couplage de ce modèle d'émission avec un modèle de propagation est aussi prévu. Enfin, le modèle pourra être enrichi avec divers types de trams, de rails et de plateforme.

[13] LELONG J., PALLAS M.-A., CHATAGNON R. Noise emitted by trams. Part I : investigations on emitted noise power, vertical directivity and localization of noise sources. Actes Internoise (36^{ème} : août 2007 : Istanbul (Turkey)), 10 p.

Une campagne de mesures est réalisée sur le tramway de Nantes. Deux tramways (une vieille génération sans climatisation et une jeune génération avec climatisation) et trois sites (pose normale et herbe, pose acoustique et surface réfléchissante, pose avec traverses et ballast) sont choisis. Des mesures acoustiques, de vibrations, sont réalisées, ainsi qu'une évaluation psycho-acoustique. Seuls les résultats des mesures sont abordés dans cet article.

Trois sous-ensembles microphoniques sont utilisés pour les mesures acoustiques : un arc vertical de 5 microphones et de 7,5 m de rayon, une antenne 2D, un microphone à 7,5 m de distance et 1,2 m de hauteur. Trois cellules infrarouges permettent d'acquérir les données cinématiques.

Le niveau de puissance est calculé à partir des cinq microphones en arc de cercle. L'expression analytique est donnée pour une source omnidirectionnelle à travers un cylindre (la puissance s'échappant par le haut et les bouts du cylindre est négligée). Les niveaux de puissances sont plus faibles pour le site herbeux. Dans le cas de la plate-forme réfléchissante, le type de train n'influe pas. La présence d'un pic à 4000 Hz dans le spectre mesuré du tramway le plus récent s'explique par une appareil électrique au niveau des bogies : son niveau est indépendant de la vitesse. Pour évaluer le bruit de la climatisation, des mesures à l'arrêt sont réalisées sur une surface réfléchissante. L'influence de la climatisation sur le bruit émis atteint 8 dB(A).

L'antenne 2D a par ailleurs permis de réaliser des cartographies 2D des tramways. C'est à partir de cette antenne qu'est défini un modèle d'émission dans [12].

[14] DUTILLEUX G. Modélisation acoustique des sources de transport en commun – Application de la méthode de hauteur de source au tramway. Rapport du LRPC de Strasbourg, juillet 2004, n°03-76-050, 48p.

Le laboratoire régional de Strasbourg propose une méthode de mesure de la hauteur d'un ensemble de sources ponctuelles alignées sur une parallèle à un sol plan homogène. C'est une généralisation de la méthode proposée par D. Gaulin (cas d'une seule source ponctuelle). A partir de deux microphones, le problème de calcul de hauteur de source est ramené à un problème inverse. On doit minimiser une fonction coût (comparaison mesures - calculs) qui dépend uniquement de la hauteur de source. Les hypothèses de

modélisation acoustique sont les suivantes : modèle de propagation de Rudnick, modèle de sol de Delany et Bazley, n sources ponctuelles omnidirectionnelles incohérentes et de même amplitude, prise en compte de l'absorption atmosphérique dans la propagation.

[15] DUTILLEUX G. Modélisation acoustique des sources de transport en commun – Application de la méthode de hauteur de source au tramway. Rapport du LRPC de Strasbourg, juillet 2004, n°03-76-050, 28 p.

Le laboratoire régional de Strasbourg applique la méthode décrite dans au cas du tramway, afin de mesurer la hauteur de source. Une source est modélisée au niveau de chaque bogie. Les acquisitions sont faites sur un sol très réfléchissant (pavés autobloquants). Les mesures traitées couvrent la plage de vitesse 20-40 km/h. Les mesures indiquent une hauteur de source très proche du sol, de l'ordre de quelques centimètres. On note une très bonne répétabilité dans les mesures. La modélisation assez grossière du site, tant sur le plan de la géométrie (petite bordure en béton négligée) que de l'absorption, ne semble pas préjudiciable. La possibilité de mesurer l'absorption du sol (considéré ici comme parfaitement réfléchissant) devrait permettre d'affiner encore la mesure.

[16] ECOTIERE D. Modélisation acoustique des sources de transport en commun – Méthode de mesurage de la hauteur d'une source ponctuelle : optimisation et étude paramétrique. Programme F de recherche au LCPC – opération 11F022. Rapport du LRPC de Strasbourg, janvier 2005, n°03-76-050/04-76-032, 38 p.

La méthode de mesurage de la hauteur d'une source ponctuelle sur sol plan homogène décrite par D. Gaulin fait l'objet de deux analyses : une optimisation de la position des deux microphones et une étude paramétrique sur l'influence de la précision des variables d'entrée. Dans cette étude, seul le cas monosource est traité. Le sol est considéré comme parfaitement réfléchissant et d'épaisseur infinie. La recherche d'un positionnement optimal des microphones de mesure aboutit à recommander la configuration $(d_1, h_1) = (2\text{m}, 1\text{m})$ et $(d_2, h_2) = (4\text{m}, 1\text{m})$. Cette configuration présente l'avantage d'être adéquate pour la majorité des utilisations opérationnelles et d'assurer une bonne convergence de la méthode pour une gamme de hauteur de source allant de 0,01 m à 3 m.

L'étude paramétrique se base sur la méthodologie des plans d'expérience. L'incertitude sur la valeur de l'estimation de la hauteur de source augmente quasi linéairement avec l'erreur relative de positionnement des capteurs. Au seuil de confiance 95%, l'erreur relative totale est comprise entre 2% et 6% pour un positionnement précis (1% d'erreur maximum sur le positionnement) et entre 10% et 30% pour un positionnement peu précis (5% d'erreur sur le positionnement). Pour des hauteurs de source supérieures à 0.5 m, seul le positionnement du deuxième microphone influe sur la valeur de l'estimation de la hauteur de source. Faute de temps, l'influence du rapport signal/bruit n'est pas testée dans ce rapport. Cependant, les premiers résultats sont encourageants.

[17] DITTRICH M. The IMAGINE source model for railway noise prediction, 2007, vol. 93, 185-200 p

HARMONOISE, suivi de IMAGINE doivent permettre d'harmoniser les modèles de prévision du bruit dans les états membres de l'union européenne. Le modèle d'émission pour le train est maintenant finalisé. Le modèle se veut avant tout physique, et indépendant des matériels utilisés dans les différents pays de l'union. Il est basé sur la description physique ou des mesures directes sur les différents types de sources (avec des fonctionnements où la source étudiée est la plus bruyante). Le crissement, le bruit de traction et le bruit de freinage demandent encore des développements. Des campagnes de mesures doivent être menées pour acquérir suffisamment de données.

Cinq hauteurs de sources sont définies dans ce modèle : 0, 0.5, 2, 3 et 4 m. Lors de l'étude des différentes sources, l'énergie provenant d'une source à une hauteur intermédiaire peut être répartie entre deux hauteurs. Apparemment, la directivité prise en compte pour ces sources est uniquement horizontales et seulement deux types de directivité sont prévus : soit de type monopolaire (source omnidirectionnelle), soit de type dipolaire

(en cosinus). Pour le bruit du freinage deux types de sources sont proposées : larges-bandes et de type sinusoïdale. Une formule pour le crissement est proposé : un taux d'occurrence de 50% est proposé.

Un des enjeux est maintenant de convertir les données existantes dans les différents modèles nationaux sous la forme du modèle IMAGINE. La simplification du modèle proposé pour les cas usuels est aussi nécessaire, afin de limiter l'effort de modélisation (besoin de la rugosité, de mesures sur chaque source, dans des conditions de fonctionnement particulières). Enfin l'auteur conclut pour relativiser que la précision des prévisions de bruits dépend aussi grandement de la précision des données d'exploitation (nombre de trains, de wagons, type de train, vitesse).

[18] DUTILLEUX G. Modélisation acoustique des sources de transport en commun – Détermination de la vitesse d'un tramway à partir de sa signature acoustique. Rapport du LRPC de Strasbourg, novembre 2003, n°02-76-049-2, 36 p.

A partir de mesures acoustiques, le but est de remonter à la vitesse d'un tramway (puis à l'accélération). En particulier, on cherche à mesurer les vitesses faibles, pour lesquelles un radar Mesta ne fournit pas toujours de mesure. Plusieurs sites sont instrumentés. Les vitesses couvrent la plage 10 à 50 km/h. Le microphone qui sert à la mesure de la vitesse est placé très proche de la voie. La distance entre boggies des rames des tramways sont connues. A partir du signal de pression, trois procédés permettent de déterminer une vitesse : une méthode $v=d/t$, l'auto-corrélation, un ajustement de modèles.

La première méthode consiste à tracer la signature du tramway en $L_{Aeq,T=10ms}$ et en faisant positionner par un opérateur, le passage des premier et dernier boggies. La distance entre boggies étant connue, la vitesse se calcule directement par la formule : $v=d/t$. Cette méthode donne des résultats très satisfaisants (écarts de 4% au maximum). Néanmoins, le calcul de la vitesse dépend d'un opérateur, et la courbe étudiée est assez chahutée ce qui complique la tâche de l'opérateur.

La deuxième méthode consiste à calculer l'auto-corrélation du signal, afin de supprimer les fluctuations parasites. L'intervention d'un opérateur est là aussi nécessaire pour isoler la partie quasi-périodique du signal. Le programme calcule alors les maximaux locaux et en déduit la vitesse par la formule $v=d/t$. Cette méthode donne des résultats satisfaisants à basse vitesse (jusqu'à 20 km/h), mais cesse de fonctionner au-delà (écarts atteignant 7%). Par ailleurs, l'influence de l'opérateur n'est pas négligeable.

La troisième et dernière méthode, recommandée par l'auteur, consiste à comparer un modèle de signature dépendant de la vitesse à la signature mesurée. Par optimisation, on calcule la vitesse. Le modèle utilisé ici est très simple : une source par bogie en champ libre, toutes les sources ont la même amplitude. Quant à l'optimisation, deux méthodes sont testées. L'une exhaustive : on teste alors tout un panel de vitesses ; l'autre avec un algorithme d'optimisation global, le recuit simulé. Cette méthode est robuste : bonne répétabilité et écarts avec le Mesta inférieurs à 4%, même si c'est la plus gourmande en temps de calcul.

[19] LEGOUIS Thierry. Bruit des tramways. Support de présentation à Bouguenais (44). 24/01/06, 29 p.

Cette présentation générale dresse la problématique du bruit des tramways. Elle traite à la fois des bruits aériens (principales sources du tramway) et des bruits solidiens. La réglementation en vigueur est explicitée. L'aspect perceptif est aussi abordé en fin d'exposé.

[20] LEGOUIS T. PREDIT 1997-2000. Émission acoustique des tramways. Rapport intermédiaire (SerdB), 14/11/1998, 12 p.

Ce document recense l'ensemble des paramètres influençant l'émission acoustique des tramways. Les informations à recueillir lors de mesures acoustiques sur des tramways sont précisées.

Les grandes familles de paramètres définies sont : le type de matériel roulant (motorisation¹, dimensions, carénages ...), le type d'exploitation (vitesse, allure), le contact roue-rail (profils, matériaux, usure), la voie

1 L'auteur remarque que pour certains tramways comme celui de Strasbourg, tous les bogies sont moteurs.

(type de pose, travelage, profil en long, usure de la table de roulement,...), les singularités (appareils de voies, raccordements, ...).

[21] GOLAY F. Bruit des tramways – Cas du tramway de Strasbourg – Lois de vitesse et de distance en site plan ouvert. Programme CERTU. Rapport du LRPC de Strasbourg, septembre 2005, n°02-76-036, 78 p.

Une campagne de mesure en 2004 (notée C2004) se déroule à Strasbourg sur des rames du flot. Le site est plan ouvert, et le sol homogène. Les vitesses varient de 10 à 40 km/h. 12 microphones placés jusqu'à 16 m de la voie et 4 mètres de hauteur permettent d'acquérir les mesures.

Cette campagne est similaire à une partie de la campagne faite en 2000 (notée C2000). A cette époque, le matériel (voie + rame) n'était pas rôdé, et l'exploitation commerciale n'avait pas commencé. Les mesures avaient été faites sur une rame dédiée.

Au niveau exploitation des résultats, C2004 permet de comparer trois indicateurs. Les voici classés par ordre croissant : $L_{AFeqmax}$, $L_{ASeqmax}$ et $L_{Aeq,Tp}$. Le $L_{Aeq,Tp}$ est l'indicateur permet les meilleures régressions.

Ensuite, des régressions linéaires du $L_{ASeqmax}$ en fonction de $\log_{10}(v)$, et des régressions multi-linéaires en fonction de $\log_{10}(v)$ et $\log_{10}(d)$ sont réalisées. Tout d'abord, les niveaux sonores en C2004 sont nettement plus faibles que lors de C2000 (de l'ordre de 7,5 dB(A) à 30 km/h à 8 m des voies et 1 m de hauteur). Par ailleurs, la dépendance en vitesse est plus forte si l'on prend en compte uniquement les vitesses supérieures à 20 km/h : le bruit de roulement semble prédominant à partir de 20 km/h. De plus, les effets de vitesse sont indépendants de l'angle d'émission. Par contre, les effets de distance sont dépendants de l'angle d'émission : en particulier, les niveaux correspondants à un angle d'émission 7° sont plus faibles. Un effet de sol explique sans doute ce phénomène.

Enfin, des calculs de vitesses à partir de signatures acoustiques sont réalisés. Un seul microphone sert. La signature récoltée s'exploite sous forme de $L_{Aeq,T=0,5s}$: on peut alors facilement localiser les pics correspondant au passage des bogies. La distance entre les bogies est connue. La vitesse se calcule par la formule $v=d/t$. Les résultats sont satisfaisants, d'après une comparaison avec un Mesta 208.

[22] GOLAY F. Bruit des tramways – Cas du tramway de Strasbourg – Évolution du $L_{AFeqmax}$ après meulage au cours du temps. Programme CERTU. Rapport du LRPC de Strasbourg, septembre 2005, n°02-76-036, 34 p.

Des mesures acoustiques avant/après meulage sont réalisées sur deux sites. L'un est en virage (forte usure des rails) et l'autre en ligne droite. Un suivi sur une période d'un an est réalisé sur le site en ligne droite. L'influence du meulage est significative, et dépend de la vitesse.

[23] FOURNIER M. Connaissance sur l'acoustique des tramways – Analyse du réseau grenoblois : campagne de mesure et simulations. Programme CERTU. Rapport du LRPC d'Autun, septembre 2006, Affaire 18402, 26 p.

L'objectif des mesures réalisées par le CSTB sur le tramway de Grenoble est d'une part de déterminer l'influence du type de pose de voie, et du type de remplissage de la voie ; d'autre part de constituer une base de données implémentée dans le logiciel MITHRA. Les types de pose de voies étudiés sont : classique, dalle flottante, chausson. Les types de remplissage étudiés sont : pavés, ballast et herbe.

Les mesures sont faites avec un véhicule maîtrisé, dans les deux sens de circulation. Un microphone est placé à 1.20 m de hauteur et à 3 m du centre de la voie la plus proche. Les sites choisis respectent les contraintes suivantes : la voie est rectiligne et peu pentue. La contrainte de type champ libre est moins importante car les effets de sites sont modélisés.

Même si les conclusions suivantes demandent à être étayées par des campagnes complémentaires, on peut remarquer :

- à type de pose donnée (classique), il existe un enjeu de l'ordre de 10 dB(A) à 30 km/h entre un remplissage pavé et un remplissage herbe. Les matériaux de remplissage absorbants (herbe, dans une moindre mesure ballast) permettent d'abaisser significativement les niveaux de bruit.
- A remplissage donné, le type de pose semble également avoir un enjeu. Par rapport à la pose classique, la pose sur chausson présente un gain d'environ 4 dB(A) à 30 km/h. A contrario, la pose dalle flottante présente une dégradation d'environ 2 dB(A) à 30 km/h.

Les valeurs calculées pour la modélisation à partir de sites tests, ont servi pour faire des prévisions sur deux autres sites. Les écarts sont de 0,3 dB(A) et 3,5 dB(A).

[24] DUNEZ Philippe. Impact acoustique d'un tramway suivant sa charge. Tramway de Lille (Nord). Rapport du Laboratoire Régional de Lille, 15/05/2008, dossier n°07-641-45884, 92 p. + environ 200 p. pour l'annexe 2 (fiches de mesures) qui fait l'objet d'un rapport séparé.

Une campagne de mesures a été réalisée en 2007 sur le tramway de Lille. Des mesures de $L_{Aeq,T=100ms}$ sont réalisées en fonction de la charge estimée visuellement des tramways. Deux microphones sont utilisés. Le dépouillement des mesures, réalisé en L_{AeqTp} , fait apparaître une augmentation linéaire de l'émission en fonction de la surcharge totale S du tramway (calculée par rapport à une circulation à vide) : $0,15 S$ (S est exprimée en tonnes), pour les deux microphones. Un correctif constant lié à la vétusté du tramway est aussi proposé. L'estimation de la charge par des capteurs de vibration ne s'est malheureusement pas révélée concluante.

[25] ECOTIERE D. Modélisation acoustique des sources de transport en commun – Étude expérimentale de la directivité d'un tramway. Programme F de recherche au LCPC – opération 11F022. Rapport du LRPC de Strasbourg, octobre 2004, n°04-76-032, 16 p.

Deux campagnes de directivité sur le tramway de Strasbourg sont menées en 2004 sur des véhicules du flot. La vitesse varie de 33 à 43 km/h. Le site des deux campagnes est identique, relativement dégagé, absorbant (herbe). Un arc de 13 microphones est constitué, à 5 m du rail le plus proche. D'une campagne à l'autre, les résultats sont tout à fait semblables.

En niveau global, l'émission sonore des tramways est sensiblement omnidirectionnelle. En effet, la variation du niveau sonore en fonction du point d'observation est faible : 2,5 dB(A) au maximum. Par ailleurs, entre 20° et 70° , la variation d'amplitude est de 1 dB(A) seulement. C'est aux limites des angles étudiés (près du sol et dans une moindre mesure du côté du tramway) que les niveaux sont les plus faibles. Le niveau faible à l'angle de 5° peut être imputé à un effet de propagation en incidence rasante au voisinage d'un sol absorbant.

En tiers d'octave, la directivité est relativement omnidirectionnelle, sauf aux angles extrêmes, pour les tiers d'octave entre 100 et 315 Hz ; pour les fréquences supérieures, le niveau tend à être plus important sur la partie centrale du dièdre (sol, côté du tramway). L'écart maximal de niveaux est observé à 1600 Hz. Il atteint 6 dB entre les angles 5° et 50° .

[27] REMINGTON Paul J. Wheel/rail rolling noise, I : theoretical analysis. JASA, juin 1987, 81(6), p. 1805-1823

Un modèle analytique modélise le bruit de roulement. Il est fondé sur l'analyse de la rugosité.

L'exploitation de ce modèle montre que la radiation sonore de la roue domine à hautes fréquences (2500 Hz est typiquement un pic de résonance), et le rail dans les basses et moyennes fréquences. A noter que même à basses fréquences, les vibrations de la roue ne sont pas négligeables car les roues sont un résonateur basses-fréquences plus efficace que les rails.

[28] THOMPSON D.J., HEMSWORTH B., VINCENT N. Experimental validation of the TWINS prediction program for rolling noise, part 1 : description of the model and method. *Journal of Sound and Vibration*, 1996, 193(1),123-135

Le modèle TWINS est tout d'abord rappelé. Puis le protocole expérimental d'une campagne de validation est présenté : cette campagne fait l'objet d'un autre article.

La rugosité roue/rail est la cause du bruit de roulement. Des irrégularités de longueur d'onde λ , produisent une excitation à la fréquence $f=V/\lambda$, où V est la vitesse du train en m/s. Pour des vitesses de trains comprises entre 50 et 160 km/h et si l'on s'intéresse au spectre 100 Hz-5000 Hz, l'on doit mesurer une rugosité avec des longueurs d'ondes comprises entre 3-450 mm. La rugosité des rails et celle des roues est supposée décorrélée. Pour alimenter TWINS, la rugosité est mesurée sur une série de ligne parallèles sur la zone de contact. Le modèle utilisé dans TWINS combine trois aspects : premièrement, on suppose qu'il y a toujours contact entre la roue et le rail (les trous ne sont donc pas pris en compte) ; deuxièmement, les longueurs d'ondes qui sont courte par rapport à la zone de contact sont atténuées et troisièmement, les variations de la rugosité suivant la largeur de la zone de contact peuvent être prises en compte.

La rugosité provoque la mise en vibration à la fois de la roue et de la voie. La roue est un corps raisonnant faiblement amorti. Il est montré que les calculs fréquentiels doivent être faits en bande fines, surtout à proximité des fréquences de résonance. La voie quant à elle est un corps infini : les vibrations consistent en des ondes mouvantes. L'atténuation en fonction de la distance est un paramètre primordial. A basses fréquences, des résonances peuvent se produire à cause des fondations, mais les amortissements sont plus forts que ceux de la roue. Dans TWINS, trois modèles sont proposés pour simuler les mouvements de la voie. Le premier est le plus simple, le deuxième permet de prendre en compte les effets dus à la périodicité des traverses, et le dernier beaucoup plus complexe modélise le rail par éléments finis.

Après les modèles de vibrations, TWINS propose un modèle d'émission sonore. Il comprend l'émission de la roue, du rail, des traverses. Les radiations du ballast sont négligées.

Afin de comparer les mesures et le modèle, un modèle de propagation simpliste est défini. Les roues sont modélisées par des sources ponctuelles en mouvement, la voie comme une ligne source à hautes fréquences et comme une ligne de sources ponctuelles en mouvement à basses fréquences puisque l'amortissement des rails est plus fort. Des directivités très simples sont utilisées de type monopolaire ou dipolaire. La réflexion du sol partiellement réfléchissant est prise en compte, mais la corrélation entre les rayons directs et réfléchis est négligée. Enfin l'effet Doppler est négligé.

Pour la validation du modèle, différents types de voies, de rails, de trains (passager ou marchandise) sont testés, avec un large panel de vitesses. Non seulement, des mesures acoustiques sont réalisées, mais aussi des mesures intermédiaires (vibratoires en particulier). Bien sûr, pour assurer les paramètres d'entrée du modèle, des paramètres tels que la rugosités sont mesurés.

[29] THOMPSON D.J., FODIMAN P., MAHE H. Experimental validation of the TWINS prediction program for rolling noise., part 2 : results, 1996, 193(1),137-147

La campagne de validation pour des trains passagers de TWINS s'avère concluante. Il en ressort qu'un soin tout particulier doit être pris pour obtenir les données d'entrée, et spécialement pour la rugosité et l'atténuation des vibrations du rail.

Une relation linéaire lie le bruit calculé et mesuré, sur un large panel de vitesse (50-160 km/h) et de rugosité. Les valeurs calculées dépassent de 2 dB(A) les valeurs mesurées, avec un écart type de 2 dB environ. Cet écart est imputable à une surestimation aux alentours de 500 Hz et une sous-estimation en-dessous de 250 Hz, que l'on peut attribuer aux simplifications dans le modèle de propagation.

Si l'on raisonne en tiers d'octave, l'écart moyen calculs/mesures n'est plus que de 1 dB, même si en bandes fines, il est de 3 à 5 dB. Ces écarts sont imputables aux incertitudes de la rugosité mesurée. En effet, de

grandes variations ont été mesurées sur des roues et rails de même type. Le profil latéral des roues et du rail auraient aussi pu être enregistrées pour diminuer les incertitudes sur la zone de contact.

Au niveau modélisation, les auteurs considèrent les rayons directs et réfléchis décorrélés. Cette hypothèse est jugée satisfaisante pour les hautes fréquences. Pour les fréquences plus faibles (en-dessous de 500 Hz), la prise en compte d'une corrélation permettrait de diminuer les écarts fréquentiels entre mesures et calculs.

Lors d'une seconde campagne de mesures sur des véhicules de fret, les résultats ont à nouveau été validés pour des vitesses comprises entre 60 et 100 km/h sur deux voies. Dans ce cas précis, c'est le rail qui a contribué de manière prépondérante au bruit total.

[30] THOMPSON D.J. On the relationship between wheel and rail surface roughness and rolling noise. 1996, 193(1),149-160

L'hypothèse utilisée dans TWINS selon laquelle il existe une relation linéaire entre le bruit et la rugosité est confirmée, ainsi que l'hypothèse qui consiste à ajouter la rugosité des rails et des roues.

Les incertitudes sur les données d'entrée sont nombreuses. C'est le cas en particulier de la mesure de la rugosité. D'autres paramètres peuvent aussi jouer : variations de la zone de contact, le fait de considérer une surface lisse ou bien encore la méthode statistique utilisée.

Si aucun contrôle de la rugosité n'est fait, des variations jusqu'à 5 dB(A) sont possibles pour un même type de roue sur un site donné. Même si la rugosité est mesurée et considérée comme correcte, des écarts de 2-3 dB(A) peuvent exister.

[26] IMAGINE, projet de la communauté européenne, (2003-2006), www.imagine-project.org

Le projet IMAGINE (2003-2006) fait suite au projet HARMONOISE (2001-2004). Le but de ces projets est de fournir une méthode (et non un logiciel) de modélisation commune à tous les états membres de l'union européenne.

La modélisation des sources de bruit ferroviaires fait l'objet du work package 6. Le principal document qui présente le modèle d'émission s'intitule « IMAGINE railway noise source model » et date du 12 septembre 2005.

[31] THOMPSON D.J., JONES C.J.C. A review of wheel/rail noise generation. Journal of Sound and Vibration, 2000, 231(3),519-536

Une bibliographie de la modélisation de la génération du bruit par les roues et le rail pour les trains est réalisée. Elle inclut le bruit de roulement principalement, ainsi que les bruits d'impacts et les crissements.

Le bruit de roulement est relativement bien connu, et en particulier par le biais du logiciel TWINS (Track-Wheel Interaction Noise Software). Ce logiciel est aujourd'hui validé pour un grand nombre de type de roues et de rails : la précision est inférieure à environ 2 dB. Les variations en tiers d'octaves sont plus importantes. Le bruit est généré par les irrégularités de surfaces des roues et des rails : on appelle cela la rugosité. Les longueurs d'onde des défauts sont de l'ordre de 5-200 mm avec des amplitudes inférieures à 50 µm. Les incertitudes sur la rugosité sont les principales causes dans les écarts mesures-calculs au niveau fréquentiel. Un filtre de contact entre la roue et le rail est pris en compte, typiquement de 10 à 15 mm de long. De nos jours, la recherche porte plus seulement sur l'excitation verticale mais aborde aussi l'excitation latérale. Enfin, même si la rugosité roue/rail est la principale source de bruit, d'autres mécanismes existent : en particulier pour les fréquences basses, l'influence des traverses peut être importante (mais l'enjeu se pose plus en terme de vibrations qu'en termes de bruits aériens). La vibration des roues est aujourd'hui assez bien connue. Son analyse nécessite d'utiliser des bandes fines, surtout pour la région où se trouvent les résonances, c'est-à-dire au-delà de 1000 Hz. La vibration de la voie exige par contre encore des recherches plus poussées. Il s'agit de développer un modèle de vibrations pas seulement verticales, mais aussi latérales.

Par ailleurs, l'amortissement le long du rail doit être déterminé plus précisément. Trois modèles de voie sont inclus dans TWINS. De nombreux modèles récents ont été développés depuis.

Du point de vue du bruit, c'est l'émission des rails qui dominant en-dessous de 1000 Hz et celle de la roue au-dessus de 1000 Hz. Cette valeur de 1000 Hz dépend en fait de la roue.

Il peut cependant exister des non-linéarités et la modélisation linéaire de TWINS n'est alors plus valable. C'est en particulier le cas quand le rail est ondulé « corrugated » ou en présence de discontinuités (joints, plats de roues). Même si quelques modèles non linéaires ont commencé à être développés, il faut augmenter le domaine fréquentiel de prédictions jusqu'à 5000 Hz contre 1500 Hz maximum actuellement. Comparé au bruit de roulement, peu de travail a été réalisé sur les bruits d'impacts.

Enfin, le crissement est un bruit très particulier, aux antipodes du bruit de roulement ou du bruit d'impacts. Des modèles ont été développés mais aucune validation d'envergure n'a été entreprise. Le crissement est en effet d'occurrence, de niveaux et de fréquences variables pour des conditions apparemment identiques. L'utilisation de méthodes statistiques est sans doute à privilégier sur des méthodes purement déterministes. L'étude plus poussée du crissement est importante, car ce phénomène est assez caractéristique des zones habitées.

[32] MARGIOCCHI F., GAUTIER P.-E.. Caractérisation vibro-acoustique d'une voie ferrée. *Acoustique&Techniques*, n°46-47, 2006, p. 23-32, ISSN 1263-8072

Cet article présente de manière détaillée la mise en équation et l'interprétation des phénomènes physiques qui gouvernent le comportement vibratoire de la voie. En particulier, le modèle TWINS est détaillé.

[33] PHILIPPS-BERTIN Chrystèle, CHAMPELOVIER Patricia, LAMBERT Jacques, TRINDADE Christine, LEGOUIS Thierry. Perception and annoyance due to tramway noise. *Actes Internoise (36 : août 2007 : Istanbul (Turkey))*, 6 p.

Une enquête sur plus de 370 personnes habitant le long d'une ligne de tramway a été réalisée en 2006 à Nantes. Ce travail a été financé par l'ADEME. En parallèle, des mesures de 24 heures, ont permis de remonter par calculs aux niveaux d'exposition auxquels sont soumis chaque résident ont été calculés. Peu d'autres études sur l'impact du bruit des tramways existent.

Les premiers résultats montrent clairement les limites du L_{Aeq} pour traduire la gêne des personnes interrogées : seulement 10% de la gêne est expliquée par cet indicateur. Ce chiffre monte à 30% si l'on prend en compte des variables perceptives basées sur les caractéristiques acoustiques du tramway et exprimées par les riverains.

Une exploitation plus approfondie devrait permettre d'améliorer le modèle en considérant d'autres indicateurs (temporels et qui incluent des caractéristiques spectrales). Enfin, une attention particulière sera accordée aux effets du bruit ambiant, et des facteurs plus personnels.

[34] PERIARD F.J. Wheel/rail noise generation : curve squealing by trams. *Thesis technische universiteit Delft*, 1998, 276 p., ISBN 90-9011964-7

Le crissement se produit lorsqu'un tramway s'engage dans une courbe serrée. Les niveaux engendrés sont de 60 à 80 dB(A) dans les hautes fréquences (500 Hz-5 kHz). De nombreux efforts ont déjà été tentés pour essayer de lutter contre le crissement, ce qui a conduit à en limiter les impacts, sans le faire disparaître.

C'est pourquoi, un modèle sur le crissement généré par les tramways est proposé. Il est composé de six sous-modèles, formant un modèle globale. Ce travail reste théorique et demande des validations pratiques. Grâce à la réalisation de ce modèle, l'influence de différents éléments a été testée. Les paramètres suivants sont à prendre en compte : géométrie de la voie, rugosité roues et rails, géométrie du contact, la roue. Par ailleurs, la roue arrière produit un niveau de crissement plus important que la roue avant ; de même, c'est la roue intérieure au virage qui engendre le plus de bruit.

[35] CHARLES-PAUVERS P. et LEGOUIS T. Note de synthèse sur le bruit des crissements de tramways. Rapport technique du SerdB pour le CETE de Lyon, n°RP/97-066/PCP, 12/12/1997, 10 p.

Ce document synthétise les principales informations relatives au bruit de crissement des tramways. Le crissement est par nature complexe : il dépend de nombreux paramètres tant macroscopiques que microscopiques, qui rendent le phénomène peu répétable.

Les principaux paramètres influençant le crissement sont l'état des véhicules, l'état des roues, les caractéristiques de motorisation, le tracé de la ligne, les conditions météo, l'état du rail.

Physiquement, le crissement n'est pas dû au frottement du boudin sur les rails. Il n'est pas non plus imputable au glissement relatif entre les deux roues d'un essieu. Il se produit pour des rayons faibles (inférieurs à 100 m), peut-être préférentiellement sur la roue intérieure du virage.

Trois principes généraux de prévention du crissement ont été testés. Ils consistent premièrement à changer certaines conditions du contact roue/rail (lubrification, changement de matériaux des roues ou des voies). Deuxièmement, à limiter le glissement latéral (modifications des profils de roues et de voies, des rayons, dévers, roues indépendantes ou contrôle des roues en lacet). Enfin, à amortir les vibrations des roues et/ou du rail pour en réduire le rayonnement acoustique (dispositifs anti-vibratils sur les roues ou la voie, roues résilientes).

Seules la lubrification avec de l'eau et l'amortissement de roue peuvent être considérées comme des solutions fiables aboutissant à la suppression du crissement, mais au prix de contraintes fortes d'exploitation pour la première et de surcoût significatif pour la seconde.

D'autres solutions sont envisageables pour réduire le bruit du crissement, même si on ne dispose que de très peu de résultats d'essais, voire que de pure conjectures. Il s'agit de : la lubrification roue/rail, l'ajout d'une bande en alliage spécial, l'augmentation du rayon des courbes, des essieux orientables, l'amortissement des roues par des matériaux, l'amortissement du rail.

[36] VINCENT N, KOCH J.R., CHOLLET H., GUERDER J.Y. Curve squeal of urban rolling stock - Part 1 : state of the art and field measurements. *Journal of Sound and Vibration*, 2006, 293,691-700

C'est le premier article d'une série de trois sur le crissement de matériel roulant urbain, tels que métros ou tramways. A partir d'un travail bibliographique, les paramètres intervenant dans le crissement sont discutés. Puis le protocole d'une campagne de mesure sur des tramways et des métros est explicité. Des microphones embarqués sont placés à proximité des roues.

Le crissement ne se produit pas sur la roue extérieure du premier axe, dont le flanc est en contact avec le rail. Les niveaux les plus forts sont généralement mesurés sur la roue avant intérieure. Des fréquences pures reliées aux modes axiaux des roues émergent. Le crissement est aussi observé sur un bogie avec des roues indépendantes.

[37] PALLAS M.A. Localisation et analyse des sources de bruit d'un tramway : cas du tramway de Nantes. Rapport LTE (INRETS), juillet 2001, n° 0117, 109 p.

Une campagne de mesures acoustique est conduite en 2000 à Nantes avec une antenne linéaire posée sur le sol. Elle a lieu de nuit, avec une rame dédiée. Quatre sites sont instrumentés. Trois sont en ligne droite, mais les poses de voie diffèrent : ASP (semelle anti-vibratil sous le rail), dalle flottante sur pont, voie sur ballast (avec ou sans semelles anti-vibratiles). Le dernier site est un site en virage afin d'étudier le bruit de crissement.

Les sources principales identifiées sont les roues, les bogies et l'ensemble rail/voie. Les bogies moteurs apparaissent plus bruyants que les bogies porteurs. La zone de fréquences prédominantes s'élargit et s'élève : limitée aux bandes 400 Hz à 630 Hz à 10 km/h, elle s'étend de 500 Hz à 1250 Hz pour 50 km/h (site ASP). Le type de pose de voie semble avoir une influence prépondérante sur l'ensemble des sources. Toutes les sources présentent une loi d'évolution linéaire en fonction du logarithme de la vitesse (coefficient qui varie

entre 35 et 45). Des sources secondaires, visibles à faibles vitesses uniquement apparaissent : les hacheurs et un bruit de motorisation.

Les mesures sous accélération sur un des sites ont montré qu'il n'y avait pas d'effet d'accélération.

Suite à ces mesures, une modélisation est proposée. Dans ce modèle, les roues sont représentées par des dipôles (directivité en $\cos \theta$), les bogies par une source linéique de longueur limitée au bogie, et la voie par une source linéique sur toute la longueur de la rame. La corrélation modèle/mesure est bonne à faible distance de la voie. Des mesures complémentaires à grande distance permettront de valider ce modèle. Certains éléments du modèle peuvent être affinés : l'atténuation du rail en fonction de la distance au point d'excitation par exemple (particulièrement sensible pour la voie ballast).

Pour le site en virage, l'antenne est modifiée afin de couvrir une plus large plage de fréquence. Le crissement est apparu comme un phénomène très difficile à quantifier car il n'est pas répétable : chaque événement est unique. Le crissement se produit principalement aux vitesses moyennes (10 km/h) et pas à des vitesses supérieures ni inférieures. De plus, seul l'essieu d'attaque des bogies crisse, à l'exception du premier bogie de la rame.

[38] CETE de Lyon. Tramway de Lyon. Rapport sur les bruits de crissement produits dans les courbes. 2001, 40 p.

Suite à des plaintes de riverains concernant le crissement en courbe, deux points de mesure sont instrumentés. Le déclenchement du crissement paraît assez régulier. Il peut durer entre 15 et 30 secondes. L'émergence par rapport à un passage sans crissement est d'environ 20 dB(A). Deux tiers d'octave prédominant : 2000 Hz (pour les 2 sites), et 630 Hz (seulement pour un des sites). Les paramètres qui semblent jouer sur le crissement sont la vitesse et le rayon de la courbe. Un des sites présente d'ailleurs la particularité que seul le sens de circulation ayant un rayon un peu plus faible produise un bruit de crissement.

[39] DUTILLEUX G. Crissement du tramway de Strasbourg – Spectre de crissement sur le site de la place de la République – Évaluation de l'effet du graissage de la table de roulement. Rapport du LRPC de Strasbourg, décembre 2004, n°03-76-022, 17 p.

A partir d'une campagne de mesures sur le crissement sur un site à Strasbourg, l'auteur tire plusieurs conclusions. Le crissement est un phénomène aléatoire qui ne se prête qu'à des évaluations de longue durée, non surveillées. Le crissement se manifeste par l'émergence de raies fréquentielles harmoniques, éventuellement isolées. Pour la courbe étudiée, une suite harmonique de fondamental 2000 Hz est mise en évidence, ainsi qu'une raie isolée à 750 Hz. Il est prématuré de conclure que des fréquences sont indépendantes du site.

Une autre campagne de mesures est effectuée sur différents sites, afin de mieux appréhender l'effet du graissage de la table du roulement sur le crissement. Malheureusement, aucune conclusion claire ne peut être tirée : le crissement apparaît aussi bien avec ou sans graissage.

Par contre, il semble que dans certains cas, le crissement ne soit pas audible grâce à un effet de masque. Ce dernier est constaté sur un des passages. Il ouvre des perspectives intéressantes de masques maîtrisés.

[40] Railway Research UK (THOMPSON D.J. et al). Railway noise : curve squeal, roughness growth, friction and wear. Juin 2003, 59 p.,
<http://portal.railresearch.org.uk/RRUK/Site%20Pages/ThemeA3.aspx>

Ce rapport présente une bibliographie sur les modèles de crissement existants, ainsi que sur les moyens existants pour mener des expérimentations en laboratoire. C'est la première partie d'un projet, dont le but est la modélisation du crissement. Les rapports ultérieurs ne sont pas disponibles.

[41] VAN DEN BRINK J.W., VAN HAAREN E., DE BEER F.G., WEENER J.J. Curve squeal noise research programme for rail bound vehicles in the Netherlands (31^{ème} : août 2002 : Dearborn (USA)), 6 p.

Un modèle est développé sur la base du logiciel TWINS, en prenant pour hypothèse que seul le glissement latéral engendre le crissement. Ce modèle nécessite des validations expérimentales. Le but à terme est d'inclure différents paramètres.

[42] CHIELLO O., AYASSE J.-B., VINCENT N., KOCH J.R. Curve squeal of urban rolling stock - Part 3 : Theoretical model. *Journal of Sound and Vibration*, 2006, 293,710-727

C'est le troisième et dernier article d'une série de trois sur le crissement de matériel roulant urbain, tels que métros ou tramways. Un modèle de génération du crissement est développé. Ses principales originalités sont la possibilité de déterminer le taux d'occurrence du crissement, ainsi que les niveaux et le spectre. La corrélation modèle/mesures est plutôt satisfaisante, surtout en terme de vibrations. Pour obtenir une bonne prévision du crissement, des recherches complémentaires sur la nature transitoire du coefficient de frottement de la zone de contact de roulement sont nécessaires.

[43] MALDONADO M., CHIELLO O. et LE HOUEDDEC D. Propagation of vibrations due to tramway line. *International Workshop on Railway Noise* (9^{ème} : Munich : 2007), 12 p.

Un modèle complet de calcul de vibrations pour l'ensemble véhicule-rails-sol est proposé. Confronté à des mesures, il s'avère pertinent jusqu'à 100 Hz. Les recherches s'orientent maintenant vers l'élargissement du modèle pour d'autres types de sol et de tramways, ainsi que vers la prise en compte des irrégularités des roues et des rails.

[44] FABUREL Guillaume, POLACK Jean-Dominique, BEAUMONT Jacques. *Bruit des transports. État et perspectives scientifiques. La documentation française (collection Transports Recherche Innovation)*, Paris, 2007, 115 p., ISBN 978-2-11-006385-4

Ce livre vulgarise les connaissances acquises dans le cadre du PREDIT 2 (1996-2000).

La première partie traite des sources et moyens techniques de réduction du bruit. Pour les tramways, les principaux résultats concernent les vibrations étudiées dans un cadre général (matériels ferroviaires). Par ailleurs, des études sont en cours pour le crissement. La seconde partie traite des impacts (psycho-acoustique, sémio-acoustique...) et des outils d'aide à la décision.

En conclusion, les auteurs prônent une meilleure connaissance du bruit à la source et militent vers la création de nouveaux indicateurs. Ce travail futur d'une grande ampleur doit être un travail interdisciplinaire (éthnologues, sociologues, géographes, économistes, psychologues...).

[45] LAKUSIC Stjepan, MLADENKO Rak, BOGUT Marijan. Analysis of tram tracks noise and vibration depending on rail fastenings. *GESTS (International Transactions on Computer Science and Engineering)*, octobre 2006, vol. 9 (n°1), 12 p.

Le bruit et les vibrations augmentent particulièrement à certains endroits, comme les croisements entre plusieurs voies. Après trois à cinq ans d'usure, les tramways peuvent même rouler sur le flanc des roues.

L'objectif de cette étude est de comparer deux types d'attaches : une attache classique de type Zg 3/2, et une autre avec en plus un matériau élastique entre les attaches. Une section test est créée de deux mètres de long. Une masse de 3,5 kg est lâchée à 30 cm ou 100 cm.

Aux vu des résultats tant acoustiques que vibratoires sur la section test, la seconde solution avec un support continu semble la meilleure. Un des croisements existants sur le réseau doit bientôt être équipé de ce système.

[46] Deutsche Bundesbahn. Richtlinie zur Berechnung der Schallimmissionen von Schienenwegen. Schall03, 1990, 59 p.

Ce document présente le modèle allemand Schall 03, qui s'applique aux matériels ferroviaires. Les tramways sont explicitement prévus. La méthode permet aussi bien de calculer l'émission que la propagation.

[47] SNCF. Méthode et données d'émission sonore pour la réalisation des études prévisionnelles du bruit des infrastructures de transport ferroviaire dans l'environnement. Document SNCF, version du 30/01/2006, 35 p.

Les mesures de bruit sont effectuées selon la norme NF EN ISO 3095 sur les trains ferroviaires français. L'indicateur $L_{Aeq,Tp}$ est utilisé. La variation du niveau en fonction de la vitesse est en $30 \log_{10}(v)$. Cette dépendance reste valable pour l'expression d'un tiers d'octave ou un octave donné, dans une gamme de vitesse de 60 à 300 km/h, où le bruit de roulement est la source principale de bruit.

[48] BESNARD F. et al. Révision de la nouvelle méthode de prévision du bruit. SETRA. En cours de finalisation.

Cette nouvelle norme française, qui s'appliquera aux bruits des transports terrestres, devrait être publiée en 2008-2009.

[49] SPACKOVA H. Reduction of tram transport noise by the way of grass-covered track. Université technique tchèque de Prague, documents transmis par mels, 4 p.

Des mesures avant/après sont réalisées à Prague dans une rue assez large, bordée de deux voies de circulation de chaque côté. Avant, les voies ne présentent aucun remplissage particulier, et les rails sont à nu. Après, des blocs de caoutchouc sont placés le long des rails, un revêtement herbeux est ajouté et les rails ont été meulé. Des gains de l'ordre de 10 dB(A) sont obtenus.

[50] SPACKOVA H. Noise Reducing devices in the construction of tram permanent way in Prague. Actes Internoise (33^{ème} : août 2004 : Prague (République Tchèque)), 6 p.

L'émission du bruit de roulement des tramways en fonction des caractéristiques de la plateforme est étudiée. Elle dépend avant tout de la qualité géométrique de la surface des rails. Si l'on compare les types de voies, la voie avec ballast est la moins bruyante. Si une couverture est nécessaire, c'est l'herbe la moins bruyante, tandis que les surfaces pavées augment le bruit.

Des matériaux élastiques englobant le rail réduisent de manière sensible le bruit. L'influence des matériaux sous le ballast n'est pas évidente : les mesures sont surprenantes et il est trop tôt pour tirer des conclusions.

[51] LAKUSIC Stjepan, DRAGCEVIC Vesna, RUKAVINA Tatjana. The influence of tram track closure system on the noise level in urban areas. GESTS (International Transactions on Computer Science and Engineering), 2005, vol. 4 (n°1), 10p.

Cinq surfaces différentes entourant les voies du tramway sont étudiées : herbe, plaque de béton préfabriquées, asphalte, ballast (30/60 mm), rien. Des mesures de L_{max} sur des véhicules au passage sont réalisées. Il n'existe qu'un seul site par type de plate-forme. Un faible nombre de passages de véhicules du flot sont utilisés (seulement cinq avec deux types de véhicules). Les vitesses mesurées ne sont pas les mêmes, même si elles oscillent autour de 25 km/h et aucun recalage n'est réalisé.

La surface la moins bruyante est l'herbe, puis les plaques de béton préfabriquées. L'herbe n'est cependant pas conseillée pour des raisons de coût de maintenance. En ville, si la voie de tramway n'est pas séparée du reste de la circulation, la pose de plaque de bétons préfabriquées est conseillée, tandis que pour des voies séparées, c'est le ballast.

[52] DUTILLEUX Guillaume et al. Compagnie des transports strasbourgeois. Lignes B et C du tramway de Strasbourg. Impact acoustique pour les riverains. Mesures après mise en service. Rapport du Laboratoire Régional de Strasbourg, 2001?, n°01-76-031, 11 p.

Des mesures après la mise en service des lignes B et C du tramway de Strasbourg permettent de juger la qualité des études prévisionnelles. Quoique les incertitudes pesant sur le projet lors de l'étude prévisionnelle aboutissent à des écarts parfois importants par rapport à la mesure, l'étude prévisionnelle fournit un majorant assez fin des niveaux de bruit mesurés.

Par ailleurs, une comparaison entre l'approche « transformation de voie existante » (la seule possible au moment de l'étude prévisionnelle) et l'approche « voie nouvelle » (arrêté du 8/11/1999) montre que l'évolution de la réglementation est plus intéressante pour le maître d'ouvrage dans ce cas précis. D'un point de vue pratique, elle est plus compliquée, car elle nécessite de séparer les contributions de la route et du fer lorsque les deux trafics coexistent dans la même rue (en particulier pour les mesures après mise en service).

[53] LAKUSIC Stjepan. The impact of tram track fastening systems on noise level. WIT transactions on the built environment, 2005, vol. 77, www.witpress.com, ISSN 1743-3509, 11 p.

Principalement deux types d'attaches de rail sur plate-forme de béton sont utilisés à Zagreb en Croatie. D'une part le Zg 3/2 qui comprend une seule plaquette élastique (la raideur est de 140 MN/m), et d'autre part le DEPP qui comprend deux plaquettes élastiques (la raideur est de 40 MN/m). Des mesures de L_{\max} permettent de comparer les deux dispositifs.

Le système DEPP s'avère le plus performant tant sur le plan acoustique (des gains de l'ordre de 1,5 à 3 dB sont indiqués) que vibratoire. C'est par ailleurs ce type de système qui est préconisé par la commission européenne, spécialement dans le cas de voies installées sur une plate-forme de béton.

[54] OOSTERMEIJER K. H. L'usure ondulatoire du rail après un siècle de recherches. LE RAIL, n°126, mai 2006, p. 24-25

Cet article relativement succinct, permet de mieux appréhender le phénomène qu'est l'usure ondulatoire.

[55] CORRUGATION. Projet européen sur l'usure ondulatoire. 2002-2006. www.corrugation.eu.

Ce projet européen a permis de proposer des outils pour mesurer l'usure ondulatoire, et des solutions pour la réduire ou la supprimer. Il s'est intéressé aux véhicules de faible poids, roulant à faible vitesse dans des courbes avec un faible rayon. D'autres buts comme la diminution du bruit et des coûts de maintenance ont été atteints. Pour les tramways, un nouveau type de rail a été développé et est commercialisé.

[56] NF EN ISO 3095. Applications ferroviaires. Acoustique. Mesure du bruit émis par les véhicules circulant sur rail. Novembre 2005, ISSN 0335-3931.

La présente norme européenne spécifie les conditions requises pour obtenir des résultats de mesure reproductibles et comparables des niveaux et des spectres du bruit émis par tous les types de véhicules circulant sur rails ou tous autres véhicules à déplacement guidé, excepté les véhicules de maintenance de la voie en fonctionnement.

[57] DUVAL D. Compagnie des transports strasbourgeois – Tramway de Strasbourg – Pesage dynamique des rames. Rapport du Laboratoire Régional de Strasbourg, 09/04/1998, n°97-I-273, 37 p.

Une méthode est développée pour le pesage dynamique des rames, dans un souci de dimensionnement des infrastructures. Deux jauges de déformation à trame pelliculaire sont collées chacune d'un côté de l'âme d'un rail. Les jauges sont positionnées entre deux blochets. La somme des déformations des deux jauges est linéaire en fonction de la charge. Elle dépend très faiblement de la vitesse de la rame. Des mesures en laboratoire, statiques, et avec vitesse sont réalisées.

[58] LETOURNEAUX Fabien, CORDIER Jean-François. Impact des défauts de circularité des roues des matériels roulants sur le bruit de trafic ferroviaire. CFA (: novembre 2006 : Paris (France)), 4 p.

La classification des défauts de circularité des roues les plus péjorants sur le plan acoustique est explicitée. Elle est issue du document de l'UIC. L'influence des défauts est évaluée en terme de $L_{Aeq, Tp}$. Avec un taux d'occurrence de défauts de 2,5%, l'impact sur le $L_{Aeq, Tp}$ n'est que de 0.6 dB.

Une base de données acoustiques sur ces défauts a été réalisée. Elle sera utilisée ultérieurement pour évaluer l'impact de ces défauts sur le bruit de trafic ferroviaire à partir de données statistiques acquises sur leur occurrence.

[59] KÄMPFER B. O. Prédiction de l'usure du profil des roues. LE RAIL, n°126, mai 2006, p. 24-25

Cet article présente un logiciel développé pour prédire l'usure des profils des roues. Ce logiciel permet de chiffrer le coût du cycle de vie d'un bogie ferroviaire.

[60] LAKUSIC Stjepan, RUKAVINA Tatjana, DRAGCEVIC Vesna. The influence of the reconstruction of the tram tracks on the level of noise. Actes Internoise (34^{ème} : août 2005 : Rio (Brésil)), 9p.

Des mesures sont faites sur une voie, avant et après reconstruction. Avant la reconstruction, aucun traitement entre 1978 et 2004, sauf meulage occasionnel et soudure. Avant la reconstruction des attaches de rails Zg 3/2 étaient utilisées (raideur de 160 MN/m), contre des DEPP après (raideur de 40 MN/m).

Les indicateurs utilisés sont le L_{eq} , L_{max} , L_{min} . Des routes sont en bordure de part et d'autre de la ligne de tram. L'indicateur L_{max} est donc retenu pour l'analyse.

La reconstruction consiste à utiliser un matériau résilient entre les rails et la plaque de béton. Par ailleurs, les écartements des rails sont revus. L'article précise que le meilleur encapsulement des rails pour des voies isolées du trafic acoustique est du « crushed stone gravel », à la fois du point de vue du coût initial et de la facilité de maintenance.

Les mesures ont lieu sur des véhicules du flot quelques jours avant et quelques jours après la reconstruction. Les gains sont de l'ordre de 3 dB pour des vitesses équivalentes. Le gain réel n'est que de 1,5 dB car la vitesse a augmenté, passant de 20-25 km/h à 35-40 km/h. Par ailleurs, de grandes disparités suivant les modèles de trams existent, les plus vieux âgés de 25-30 ans étant à remplacer.

La Croatie utilise le métro depuis longtemps. C'est un mode de déplacement très répandu dans la population. La ville de Zagreb remplace actuellement 5-8 km de voies tous les ans. La fréquence peut être inférieure à la minute et couramment inférieure à deux minutes.

[61] VAN HAAREN E., VAN DEN BRINK J.W., VAN KEULEN G.A., LEFRANC B.R.J. Full scale measurements in the curve squeal noise research program (31^{ème} : août 2002 : Dearborn (USA)), 6 p.

Le crissement est un phénomène imprévisible et par conséquent difficile à étudier. Différentes expérimentations sur des moyens de réduire le crissement ont cependant permis d'aboutir à certaines conclusions.

Tout d'abord, la modification de l'écartement des rails, ainsi que le changement du profil des rails permettent de réduire significativement le crissement. Un écartement des rails minimum, ainsi qu'un rail asymétrique permettent de contrôler la zone de contact. Par ailleurs, des tests limités sur des amortisseurs de rail ou de roues ont été testés : aucun résultat concluant pour les premiers alors que les amortisseurs sur roue ont un certain potentiel. Enfin, la modification du coefficient de frottement permet une très légère diminution du crissement ; avec une lubrification, les gains sont plus importants.

[62] KOCH J.R., VINCENT N, CHOLLET H., CHIELLO O. Curve squeal of urban rolling stock - Part 2 : parametric study on a 1/4 scale test rig. *Journal of Sound and Vibration*, 2006, 293,701-709

C'est le deuxième article d'une série de trois sur le crissement de matériel roulant urbain, tels que métros ou tramways. Des mesures sont réalisées sur une maquette à l'échelle 1/4, en prenant en compte des variations du monobloc roue et des tests de solutions anti-crissement.

La relation qui lie le fort niveau acoustique avec la vitesse et l'angle d'attaque est confirmée expérimentalement. Le test de diverses solutions aboutit à la détermination de la valeur d'amortissement du mode principale de la roue afin de supprimer le crissement.

[63] DEMIZIEUX Patrick et al. Communauté urbaine de Strasbourg. Projet de tramway – ligne B. Étude de l'impact acoustique. Rapport N°1 : identification des sites et caractérisation de l'état initial. Rapport du Laboratoire Régional de Strasbourg, 25/11/1996, n°96-G-249, 171 p.

Ce rapport présente la campagne de mesures réalisée pour l'état initial de la ligne B à Strasbourg. En plus des niveaux réglementaires $L_{Aeq}(6h-22h)$ et $L_{Aeq}(22h-6h)$, les niveaux supplémentaires $L_{Aeq}(22h-24h)$ et $L_{Aeq}(0h-6h)$ et $L_{Aeq}(6h-8h)$ sont donnés pour information. Ils correspondent respectivement aux phases d'endormissement, de sommeil et de réveil.

[64] DEMIZIEUX Patrick. Communauté urbaine de Strasbourg. Projet de tramway – ligne B. Étude de l'impact acoustique. Rapport N°2 : prévisions des niveaux sonores, impact du projet. Rapport du Laboratoire Régional de Strasbourg, 29/11/1996, n°96-G-249, 47 p.

Ce rapport présente l'impact acoustique prévisionnel de la ligne B à Strasbourg. L'arrêté sur concernant les infrastructures ferroviaires n'était pas encore sorti : c'est les textes relatifs au bruit routier qui ont servi de base. Des mesures compensatoires pour certains sites sont proposées.

Pour simuler le bruit du tramway, la méthodologie employée est détaillée : en particulier, mesure de l'émission sonore du tramway existant à différentes vitesses, et émission au droit d'une station.

[65] DEMIZIEUX Patrick et al. Communauté urbaine de Strasbourg. Projet de tramway – ligne B. Étude de l'impact acoustique. Rapport complémentaire : dépôt de Cronembourg, pont de Paris. Rapport du Laboratoire Régional de Strasbourg, 25/11/1996, n°96-G-249bis, 22 p.

Des mesures complémentaires pour évaluer l'impact de la ligne B à Strasbourg sont réalisées : au dépôt de Cronembourg, en ligne droite et en courbe.

L'étude du crissement montre qu'il existe une différence entre 15 et 25 dB(A) entre une rame avec et sans crissement pour le L_{Amax} . Il semble que la graisse ait une influence non négligeable sur le crissement : elle a permis de diminuer fortement à la fois le taux d'occurrence et le niveau des crissements enregistrés.

[66] SAMPIC et al. Agglomération lyonnaise. Création de deux lignes de tramway. Étude d'environnement acoustique. Rapport du CETE de Lyon, octobre 1997, référence documentation : 97.194, 25 p. (sans compter les nombreuses annexes).

Ce rapport présente l'étude d'impact pour les lignes de tramway 1 et 2 à Lyon (y compris l'état initial). Cette étude est faite avant l'arrêté du 8/11/1999. Elle présente deux particularités : d'une part, pour tenir compte du trafic spécifique des tramways, les périodes 20h-22h et 4h-6h sont considérées en plus des périodes réglementaires 6h-22h et 22h-6h ; d'autre part, il est vérifié si la limite au passage dépasse 80 dB(A). Enfin, quelques éléments acoustiques du cahier des charges sont précisés.

[67] SAMPIC et al. Agglomération lyonnaise. Suivi des changements acoustiques liés à la mise en service des 2 lignes de tramway. Rapport du CETE de Lyon, octobre 2001, référence documentation : 01.202, p.

Ce rapport présente les résultats d'une campagne de mesures après la création des deux lignes de tramway. L'ambiance acoustique dans les rues empruntées par le tramway s'est majoritairement améliorée, et plus que ne le suggère l'évolution des trafics : les allures est vitesses ont sans doute été modifiées.

[68] DEMIZIEUX Patrick et TOUSSAINT Loïc. Ville de Strasbourg. Tramway : prolongement des lignes – horizon 2007-2008. Étude acoustique : évolution des impacts. Rapport du Laboratoire Régional de Strasbourg, 08/08/2007, n°2004-76-077, 88 p.

Ce rapport présente l'évaluation des impacts à Strasbourg de l'extension des lignes de tramway B, C, D, la création de la ligne E, et d'une voie routière qui accompagne les travaux sur le tramway. C'est la deuxième version, suite à une annulation de la première déclaration d'utilité publique. Une des particularités de ce projet de tramway est un projet routier mené en accompagnement. Pour l'étude de la réglementation, les émissions de la route et du tramway sont étudiées séparément. Les impacts globaux (tramway+route) sont toutefois indiqués.

Certaines zones nécessitent des mesures particulières : une liste des différentes mesures compensatoires possibles est dressée. De plus, les effets indirects du tramway (modification du plan de circulation dans les rues parallèles) sont évalués, même si la réglementation ne l'exige pas. Par ailleurs, les zones dans lesquelles le tramway est susceptible de crisser sont recensées.

[69] DEMIZIEUX Patrick. Ville de Strasbourg. Tram – Train Ouest / ligne F : horizon 2007-2008. Étude acoustique : évolution des impacts. Rapport du Laboratoire Régional de Strasbourg, 08/08/2007, n°2004-76-043, 47 p.

Ce rapport présente l'évaluation des impacts du tram – train ouest / ligne F. L'évaluation des impacts directs montre d'une part que pour la majorité des points étudiés, les incidences ne dépassent pas 2 dB(A) et d'autre part que pour tous les secteurs, les objectifs réglementaires sont respectés. L'évaluation des impacts indirects montre que les modifications ne sont pas significatives. Enfin, certains virages où le risque de crissement est élevé du fait de leur faible rayon sont recensés.

[70] DEMIZIEUX P. et SUTTER G. Compagnie des transports strasbourgeois. Projet de tramway – ligne B. Dépôt mixte Elsau/Montagne Verte. LRPC de Strasbourg, rapport n°97-D-220, 43 p.

Ce rapport présente l'étude de l'impact acoustique de l'installation d'un dépôt bus/tramway, à partir de mesures sur des dépôts existants. Les sources acoustiques prises en compte sont : les trafics des bus, tramways, et véhicules du personnel, les équipements de lavage des bus et des tramways. La réglementation en vigueur est celle des établissements classés, avec prise en compte des émergences.

[71] BAULAC Marine. Optimisation des protections anti-bruit routières de forme complexe. Thèse de doctorat de l'université du Maine, spécialité acoustique, préparée au LCPC, octobre 2006, 175 p.

Des écrans acoustiques de formes complexes sont étudiées. Les résultats à la fois numériques et issus de mesures sur maquette semblent prometteurs. En particulier la possibilité d'utiliser des écrans bas (inférieurs à 1 m) est intéressante pour le milieu urbain.

[72] DPPR/Mission bruit (LARIVE Jérôme). La prévention du bruit des infrastructures – construction d'une nouvelle infrastructure de transports terrestres ou modification d'une infrastructure existante. Novembre 2005, 5 p., <http://www.ecologie.gouv.fr/Transports-terrestres.html>

[73] CAN Arnaud, LECLERCQ Ludovic, LELONG Joël, DEFRANCE Jérôme. Réflexion sur la définition d'indicateurs acoustiques pour une caractérisation de la dynamique du bruit en milieu urbain. Rapport LICIT, août 2007, n° 0704, 94 p.

Afin de définir des indicateurs acoustiques pertinents pour la caractérisation de la dynamique du bruit du trafic en milieu urbain, une campagne de mesure est réalisée dans Lyon. Cette campagne de mesures associe des mesures acoustiques et de trafics. Trois zones différentes sont instrumentées : une zone à proximité d'un feu de signalisation, un point calme et un point à proximité d'un arrêt de bus. L'expérimentation est réalisée dans le cadre du PREDIT. Certains partenaires ont participé à l'expérimentation mais pas à la rédaction de ce rapport.

Les lacunes des indicateurs traditionnels (L_{eq} , indicateurs statistiques et d'émergence) sont montrées. Même en considérant des temps d'intégration plus courts que les périodes réglementaires, ces indicateurs montrent des limites. Devant ce constat, de nouveaux indicateurs et de nouvelles combinaisons d'indicateurs sont proposées afin de caractériser les trois zones différentes. La méthode proposée doit maintenant être confrontée à des situations de trafic plus complexes.

[74] MARQUIS-FAVRE C., PREMATE E., AUBREE D., VALLET M. Noise and its effects – a review on qualitative aspects of sound. Part I : notions and acoustic ratings. Acta Acustica united with Acustica, 2005, 91, p. 613-625

La bibliographie présentée ne se veut pas exhaustive, mais permet d'avoir un bon aperçu sur le bruit et ses effets qualitatifs. Seule la première partie est résumée ici.

Tout d'abord, les effets du bruit sur les humains sont présentés : les effets sur le système auditif (bien connus et rapidement évoqués) et les autres effets. Parmi ces derniers sont distingués : les effets sur les organes humains, le stress, la gêne pendant le sommeil, le bruit au travail et le bruit pour les enfants.

Une seconde partie présente les indicateurs existants, qui permettent de quantifier et de qualifier le bruit : d'une part, des indicateurs physiques, basés sur le niveau de pression, l'énergie ou la répartition statistique ; et d'autre part, les indicateurs psychoacoustiques, dont quelques-uns seulement sont mentionnés du fait de leur multitude. De nombreux efforts aujourd'hui sont consacrés à la production de nouveaux indicateurs, qui soient applicables à de nombreuses sources différentes.

[75] MARQUIS-FAVRE C., PREMATE E., AUBREE D. Noise and its effects – a review on qualitative aspects of sound. Part II : noise and annoyance. Acta Acustica united with Acustica, 2005, 91, p. 626-642

La bibliographie présentée ne se veut pas exhaustive, mais permet d'avoir un bon aperçu sur le bruit et ses effets qualitatifs. Seule la seconde partie est résumée ici.

Premièrement, les facteurs participant à la gêne sont développés : d'une part, les facteurs acoustiques tels que ceux liés à la source de bruit, ceux liés au contexte sonore, à la nature de la source et à des aspects qualitatifs ; d'autre part, les effets non acoustiques, tels que le comportement, ou des facteurs socio-démographiques.

Les méthodes permettant d'étudier la gêne et les aspects qualitatifs des sons sont ensuite précisées.

La dernière partie est consacrée à la gêne dans un environnement sonore complexe (on parle alors de multi-exposition). Ce problème a fait l'objet de nombreuses tentatives de modélisations. Cependant, à l'heure actuelle, aucune ne donne entièrement satisfaction.

Sur tous ces sujets, il est difficile de tirer des conclusions claires qui soient transposables à toutes les situations étudiées. L'importance d'autres aspects sensoriels devraient se révéler dans une méthodologie d'évaluation plus générale.

[76] AFSSE (Agence Française de Sécurité Sanitaire de l'Environnement). Impacts sanitaires du bruit. État des lieux. Indicateurs bruit-santé. Novembre 2004, 345 p.,
http://www.afsset.fr/upload/bibliotheque/731096103331826363717461694944/impacts_sanitaires_bruit.pdf

Ce rapport très complet sur les impacts sanitaires du bruit a été rédigé par un groupe d'experts. Une première partie présente des généralités sur le bruit. La deuxième partie traite des impacts sanitaires du bruit, à la fois les effets directs qui sont bien connus, et les effets indirects pour lesquels beaucoup d'études restent à faire (par exemple sur la multi-exposition ou la co-exposition). Puis, les descripteurs de bruit sont analysés : d'une part, ceux qui existent ; et d'autre part, ceux qui seraient souhaitables. Enfin, le rôle des différents acteurs est étudié (état et collectivités locales).

[77] TSCHUDY Eric. Effets du bruit routier sur la santé. Bibliographie. Laboratoire du CETE de l'Est, août 2000, 31 p.

Les effets non auditifs du bruit sont difficiles à appréhender. Les facteurs psychologiques occupent en effet une grande part dans ces effets. Les effets non auditifs possibles sont décrits. Une des principales source documentaire est l'Organisation Mondiale de la Santé. La bibliographie met en évidence des seuils acoustiques pour la gêne, les maladies cardio-vasculaires, les perturbations pendant les sommeil (seuils différents suivant les phases). Les scientifiques rappellent que ces valeurs sont des premières estimations à partir des connaissances actuelles.

[78] WHO (World Health Organization). Guidelines for community noise. 1999, 161 p.,
<http://whqlibdoc.who.int/hq/1999/a68672.pdf>

Depuis 1980, l'OMS (WHO en anglais) s'intéresse à la problématique du bruit. Le présent document constitue une réponse pratique dans les domaines liés au bruit : action au niveau local, besoin d'un changement des réglementations, politiques de résorption des nuisances. Il traite en particulier des sujets suivants : perturbations du sommeil, effets cardiovasculaires et physiologiques, effets sur la santé mentale, effets sur les performances...

[79] ALVES-PEREIRA Mariana, A.A. CASTELO BLANCO Nuno. Vibroacoustic disease : biological effects of infrasound and low-frequency noise explained by mechanotransduction cellular signalling. ScienceDirect, Progress in biophysics and molecular biology, 2007, 93, p. 256-279

Les infrasons (0-20 Hz) et les sons basses-fréquences (20-500 Hz) sont les causes des maladies vibroacoustiques. Ces dernières ont été diagnostiquées dans plusieurs catégories professionnelles dont l'industrie aéronautique. Cet article fait le point sur les connaissances actuelles, et leurs limites : les effets propres à certaines fréquences ne sont pas encore identifiés, les courbes doses-réponses sont difficiles à déterminer et des enquêtes épidémiologiques à grande échelle font défaut.

[80] ZWICKER E. and FASTL H. Psycho-acoustics. Facts and models. Second Updated Edition. Editions SPRINGER (Information Sciences), ISBN 3-540-65063-6, 1999, 420 p.

Ce livre présente différentes notions importantes en psychoacoustique. En particulier, le calcul de l'indice Zwicker est explicité.

[81] European Commission. Position paper on EU noise indicators. 2000, ISBN 92-828-8953-X, 80 p.

Cette réflexion a permis de fixer les indicateurs retenus par la commission européenne pour les cartes de bruit. Il est recommandé entre autre, de traiter chaque source de bruit séparément. Le groupe de travail remarque que vu le temps limité et la complexité du sujet, ils ne peuvent pas formuler une proposition pour évaluer l'impact combiné de deux sources différentes.

[82] Revue Générale des Chemins de Fer. Numéro spécial. Bruit – 1^{ère} partie. Editions DELVILLE, ISSN-0035-3183, octobre 2003, 116 p.

La Revue Générale des Chemins de Fer a consacré en 2003 deux numéros au bruit ferroviaire. Ce premier présente en particulier la définition des indicateurs acoustiques utilisés dans le ferroviaire. Le modèle d'émission de bruit de roulement TWINS est aussi présenté (au détour d'un article sur la voie de référence). Les autres articles plus spécifiques au train (optimisation des roues, mise en place d'absorbeurs dynamiques...).

[83] Revue Générale des Chemins de Fer. Numéro spécial. Bruit – 2^{ème} partie. Editions DELVILLE, ISSN-0035-3183, octobre 2003, 140 p.

Ce second numéro spécial contient en particulier un article sur la modélisation acoustique d'une rame de métro. Il traite à la fois du bruit intérieur et extérieur. Il parle aussi de la cartographie, de l'insonorisation des roues, du bruit au freinage, de la logistique urbaine.

[84] LEONATE Aurélie. Analyse du comportement d'indicateurs acoustiques en milieu urbain pour la validation expérimentale d'un modèle d'estimation dynamique du bruit routier. mémoire de mastère recherche de génie civil, école doctorale MEGA (Lyon), 2005, 126 p.

Le choix d'un indicateur acoustique pertinent pour décrire la dynamique du bruit urbain n'est pas simple. Ce travail recense un large panel d'indicateurs acoustiques : énergétiques, statistiques, appliqués à la dynamique du trafic. Des références dans le domaine psycho-acoustique sont fournies.

Une partie expérimentale permet d'entrevoir le potentiel des indicateurs définis, leurs limites,... et la difficulté de la caractérisation subjective du bruit.

[85] DE COENSEL B., BOTTELDOOREN D., DE MUER T. 1/f noise in rural and urban soundscapes. Acta Acustica united with Acustica, 2003, vol.89, p. 287-295

Certains auteurs ont déjà constaté de manière surprenante que les différents types de musiques étudiés avaient la même relation en 1/f pour les variations de niveaux et de dynamique. Les auteurs du présent article constatent que pour les paysages sonores ruraux et urbains, cette relation en 1/f est encore vérifiée. Ce critère pourrait servir à qualifier les dynamiques de différentes ambiances sonores.

[86] LANEYRIE Priscille. Caractérisation d'ambiance sonore urbaine. Conséquences acoustiques de l'implantation du tramway de l'agglomération lyonnaise sur l'habitat environnant. Travail de fin d'étude, ENTPE, 2006, 77 pages

Ce travail a pour base l'étude réalisée par le CETE de Lyon avant et après la construction du tramway. Des mesures complémentaires sont couplées avec un questionnaire semi-directif, afin de connaître le ressenti des personnes. Le questionnaire n'est pas focalisé que sur le bruit pour ne pas éveiller les soupçons.

Le bruit en journée ne semble pas problématique : soit parce que le bruit ambiant est élevé, soit parce que les gens sont concentrés sur une activité. Par contre, les bruits du matin et du soir sont les plus dérangeants. De plus, certaines parties du tracé du tramway semblent plus pénibles que d'autre : les accélérations dans les lignes droites, et le bruit des freins avant les virages.

Suite à la construction du tramway, la baisse de 3 dB(A) mesurée semble ressentie par les habitants. Le bruit de crissement, les circulations la nuit (entretien des voies), et les vibrations sont aussi mal ressentis par les riverains.

[87] THOMPSON David. Wheel/rail rolling noise. The effects of non-linearities in the contact zone. Actes International Congress on Sound and Vibration (10^{ème} : july 2003 : Stockholm (Sweden)), 20 p.

En utilisant des méthodes simplifiées de la roue et du rail, les effets des non-linéarités sont déterminés. Pour des rugosités considérées comme normales, le modèle linéaire donne des résultats satisfaisants. Cependant, pour des défauts plus importants, comme des plats sur les roues ou les joints des rails, les effets des non-linéarités deviennent importants.

[88] NF S 31-133. Acoustique-Bruit des infrastructures de transports terrestres-Calcul de l'atténuation du son lors de sa propagation en milieu extérieur, incluant les effets météorologiques, février 2007, 36 p.

Contient spécificités sources ferroviaires : hauteur de source et directivité.

[89] FODIMAN P. Le bruit des infrastructures de transport ferroviaires : nouvelles données et perspectives. SNCF-direction de la stratégie, janvier 2004, 23 p.

Ce document trace une stratégie sur le bruit en environnement des trains. Certains éléments sont intéressants dans le cas des tramways. Il va au-delà de l'aspect technique en insistant sur la nécessaire collaboration de tous les acteurs (gestionnaires d'infrastructures, entreprises ferroviaires, constructeurs et équipementiers) et sur le besoin de la définition d'indicateurs qui permettent de développer la compétition entre entreprises européennes. Il insiste sur la nécessité de continuer les recherches pour continuer à développer ce mode de transports.

Au niveau des indicateurs de la gêne sonore, les indicateurs énergétiques (tels le $L_{Aeq,T}$) sont recommandés. L'approche événementielle, fondée sur le L_{Amax} ou le SEL s'avère moins pertinente, car trop peu reproductible.

Les mécanismes de génération du bruit de roulement sont aujourd'hui bien connus. Les premières recherches datent du milieu des années 1980. Des défauts microscopiques (rugosité) sur les surfaces des roues et des rails génèrent des vibrations. Le rayonnement acoustique des roues devient prépondérant entre 2000 et 4000 Hz. Le rail a quant à lui sa contribution principale autour de 1000 Hz. Enfin, les traverses rayonnent en dessous de 400 Hz.

Le bruit de roulement constitue la source principale du bruit ferroviaire dans la gamme des vitesses de circulation classiques jusqu'à 300 km/h. Le bruit aérodynamique n'est un enjeu qu'à partir de vitesses d'exploitation supérieures à 320 km/h. Enfin les autres sources qui interviennent sont : les sources mécaniques comme les ventilateurs ou les moteurs de traction, le crissement au freinage ou en courbe, les ponts métalliques.

Le développement des modèles a permis de développer des solutions pour diminuer l'émission acoustique. Certaines solutions visent à limiter la rugosité combinée roue/rail (meulage des rails, mise en place de freins à disque ou de semelle en matériau composite). D'autres visent à minimiser la réponse vibratoire (géométrie des composants, raideurs, système d'absorption d'énergie). D'autres visent à diminuer le rayonnement acoustique (réduction des surfaces émissives, contrôle actif acoustique).

Il s'agit toutefois de trouver des solutions qui soient rentables économiquement, qui valident tous les tests d'homologation (sécurité...), et enfin dont la maintenance soit réalisable¹. Les solutions techniques les plus prometteuses sont le remplacement des freins, et la pose d'absorbeurs dynamiques sur les rails.

1 En plus, dans le contexte de séparation des opérateurs et des infrastructures au niveau européen, il faut aussi pouvoir se mettre d'accord sur la contribution respective des rails et des matériels.

[90] VAN LEEUVEN Hans. Noise emission of light-rail vehicles – state of the art. Actes Euronoise (: 2003 : Naples (Italy)), 4 p.

Un état de l'art très partiel sur les véhicules légers est réalisé. Le principale mécanisme d'émission est le bruit de roulement, les autres sources sont de seconde importance. Des graphiques montrent que l'émission des trams, des véhicules légers et des trains est comparable. Pour une voie recouverte d'asphalte ou de béton, les variations semblent importantes. Enfin, des gains acoustiques sur l'émission à l'aide de différentes techniques sont chiffrés.

[91] LUI W.K., Li K.M. An experimental study of the vertical directivity pattern of wheel/rail rolling noise. Acta Acustica united with Acustica, 2007, vol.93, p. 742-749

La directivité du bruit émis par différents trains électriques sur différentes surfaces et à différentes vitesses (inférieures à 120 km/h) peut-être modélisé par un même modèle, où les niveaux augmentent avec l'angle d'élévation pour atteindre un maximum aux alentours de 30°, puis redescendre à son minimum à 90°. Cette directivité peut être modélisée par une combinaison de monopoles, dipôles et quadripôles : après calcul on obtient une directivité fonction d'un polynôme du quatrième ordre en $\sin(\theta)$, où θ est l'angle d'élévation.

[92] MOEHLER U., KURZE U.J., LIEFERT M., ONNICH H. The new german prediction model for railway noise « Schall 03 2006 » : an alternative method for the harmonized calculation method proposed in the EU directive on environmental noise.. Acta Acustica united with Acustica, 2008, 94, p. 5d48-552

Une version préliminaire de la méthode de prédiction allemande pour le bruit ferroviaire et des lignes de tramways est proposée. La partie propagation suit les méthodes de l'ISO 9613-2. Une procédure pour le cas de nouveaux véhicules ou type de voies est décrite. Des comparaisons avec la nouvelle méthode européenne en cours de préparation sont à réaliser, afin éventuellement de l'améliorer.[Cet article n'est pas très détaillé].

[93] HAMOU MAMAR Zahra, CHAINAIS Pierre, AUSSEM Alexandre. Probabilistic classifiers and time-scale representations : application to the monitoring of a tramway guiding system. Internet, postérieur à 2006, 6 p.

Le but est de détecter de manière automatique les défauts de la roue de guidage du Translohr sur pneu. Des signaux de vibrations mesurés sur le rail sont utilisés. Trois techniques sont utilisées. Les résultats sont encourageants. Des développements sont en cours pour essayer de fiabiliser la méthode.

[94] LAKUSIC Stjepan, MLADENKO Rak. Experimental analysis of the rail behaviour in the case with irregularity on running surface and without it. Internet, postérieur à 2001, 2 p.

Les déplacements et accélération du rail sont mesurés avec le rail droit, et avec un rail présentant une cannelure (longueur 3 cm et chute de la roue de 0.322 mm).

Les mesures montrent que les déplacements du rail sont 25% à 35% plus larges avec des irrégularités.

[95] LAKUSIC Stjepan. Impact of tram traffic on noise and vibrations. University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering. Electronic Journal « Technical Acoustics » (www.ejta.org), 10 p.

Les irrégularités sur les rails, l'influence du type d'encapsulation et le système de fixation sont étudiées du point de vue acoustique pour différents tramways à Zagreb. L'indicateur retenu est L_{max} . De ces trois paramètres, c'est sans conteste le premier qui a le plus grand impact sur le bruit mesuré. Des irrégularités de l'ordre de 0,33 mm conduisent à des augmentations de 1,5 à 10 dB(A) en comparaison avec une surface lisse. Le bruit d'impact relevé contribue en plus à augmenter la détérioration des rails, augmentant les coûts de maintenance.

Les vibrations des rails sont aussi étudiées. Les vibrations selon les axes x et y n'étant pas significatives, seules les vibrations selon l'axe z sont étudiées.

[96] VINCENT N et BOUVET P., THOMPSON D.J. et GAUTIER P.E. Theoretical optimization of track components to reduce rolling noise. *Journal of Sound and Vibration*, 1996, 193(1), p. 161-171

A partir du logiciel TWINS, la voie est optimisée afin de produire un minimum de bruit. Globalement, pour une voie en ballast avec des traverses bibloc en béton, une réduction de 2 à 6 dB(A) peut être obtenue grâce à l'optimisation de l'attache des rails sur les traverses, et/ou l'ajout d'absorbeurs dynamiques sur les rails.

En réduisant la raideur de l'attache du rail, la radiation des traverses est réduite, mais celle du rail est augmentée, et vice versa. Un optimum est trouvé quand les composantes sont égales. L'ajout d'absorbeurs dynamiques sur une voie optimisée permet un gain supplémentaire de l'ordre de 2-3 dB(A).

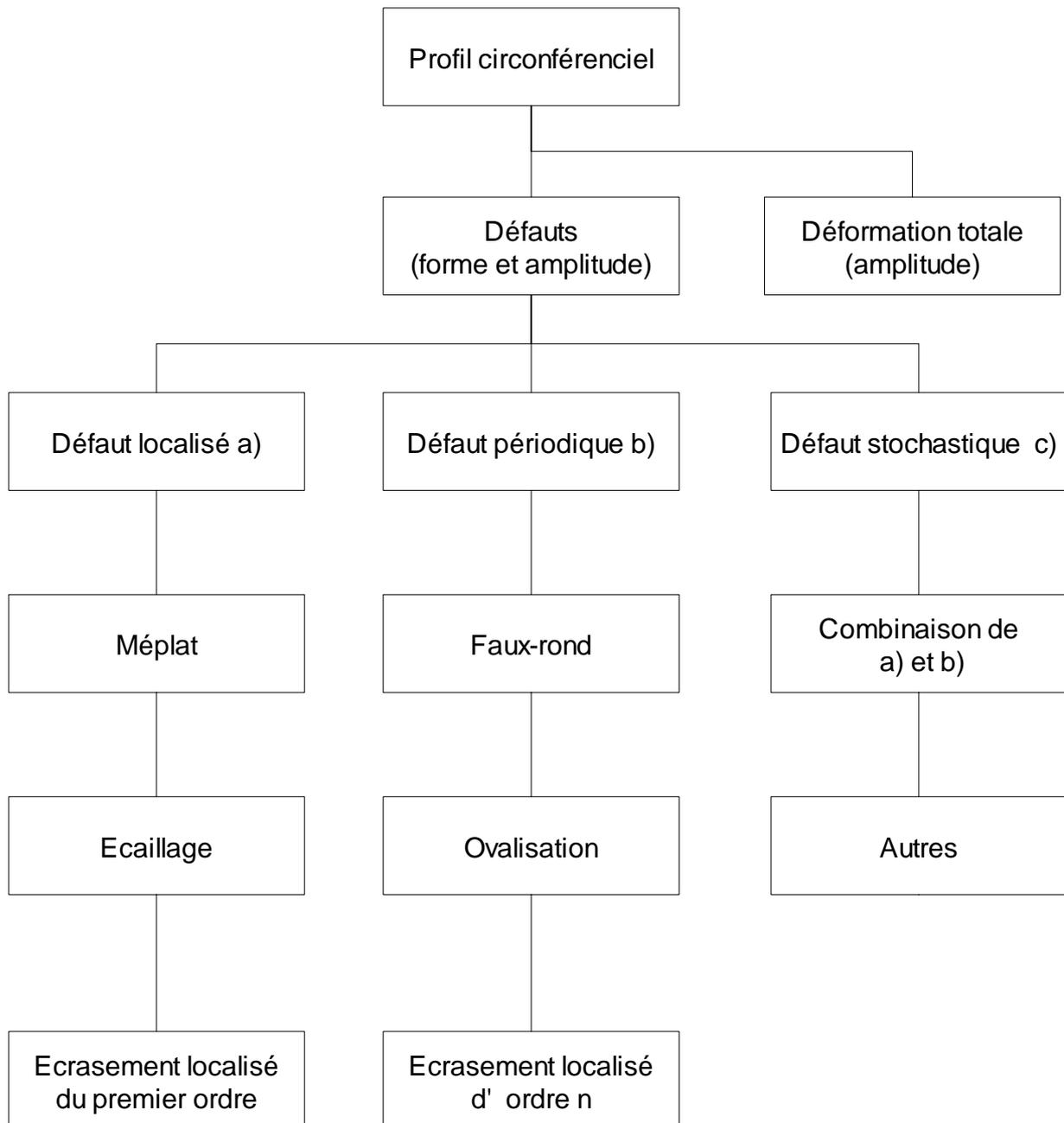
Annexes

Sommaire des annexes

Annexe A :	
Classification des défauts de circularité des roues.....	103
Annexe B :	
Type de poses de voies.....	104
B.1. Pose classique.....	104
B.2. Pose ASP.....	105
B.3. Pose flottante.....	106
B.4. Pose Silent Rail.....	107
Annexe C :	
Liste des paramètres importants pour l'émission acoustique des tramways.....	108
Annexe D :	
Bruit de roulement ferroviaire : principe du logiciel TWINS.....	110

Annexe A : Classification des défauts de circularité des roues

Cette classification est issue du document UIC¹ DT405 [58].



¹ Union Internationale des Chemins de Fer.

Annexe B : Type de poses de voies

Cette annexe présente les différents type de poses de voies utilisés à Strasbourg [52]. Des variations sur le choix du matériau résilient ou sur son placement peuvent exister, mais ces différentes poses donnent néanmoins un bon aperçu de ce qui se fait.

B.1. Pose classique

Le rail repose, par l'intermédiaire d'une butée isolante, sur une traverse semblable à celles des voies TGV – deux blocs de béton reliés par une barre métallique. La traverse est prise dans un béton de calage, reposant sur une couche de fondation en béton. La profondeur de fouille est de 0.70 m.

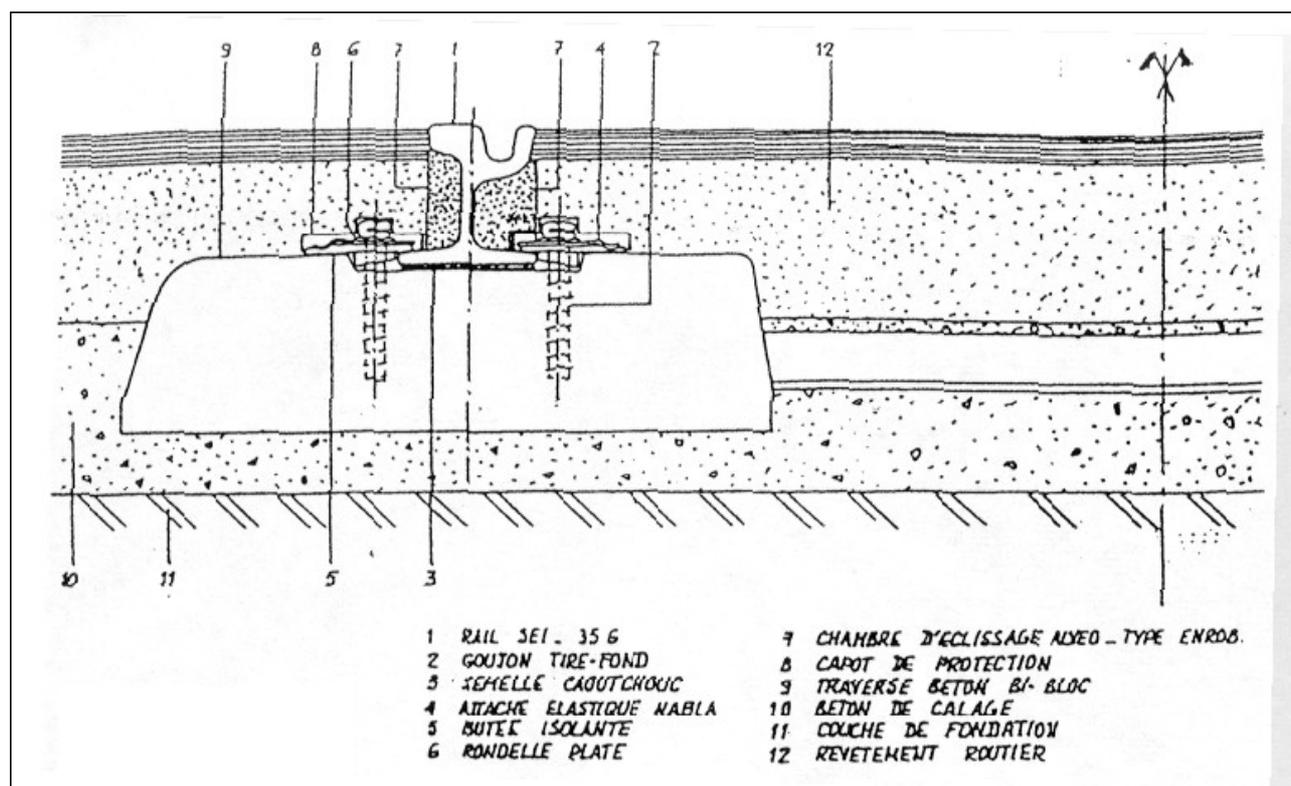


Figure 44: Pose classique

Une variante à la pose classique est aussi utilisée. Il s'agit de la pose allégée. C'est une pose expérimentale présente à proximité du terminus nord de la ligne B. Elle ressemble à la pose classique mais la couche de fondation est réalisée cette fois en enrobé, le but étant de réduire la quantité de matériau mis en œuvre au mètre linéaire de voie.

B.2. Pose ASP

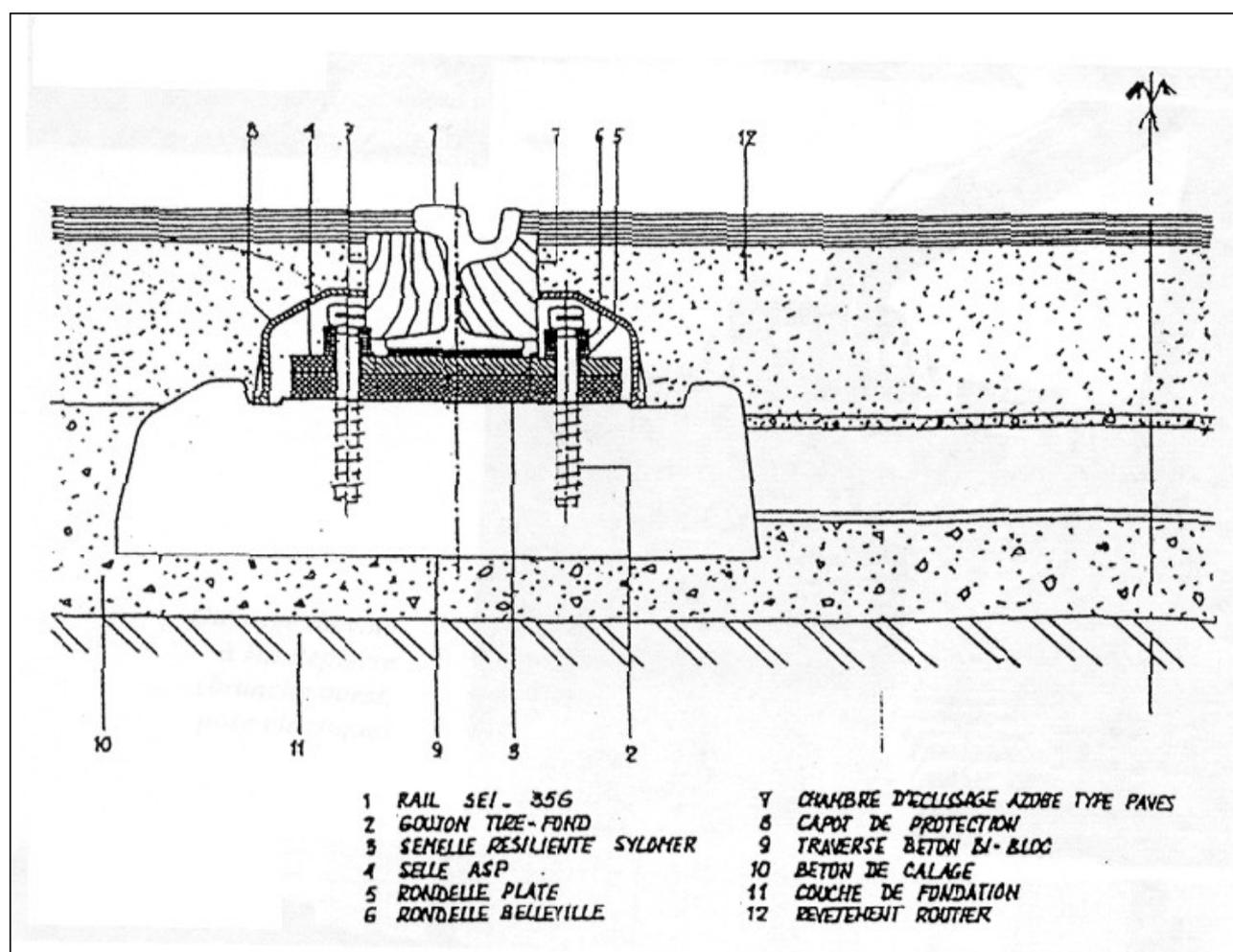


Figure 45: Pose ASP

La pose ASP (Anti-vibratile Sylomer Précontraint) est mise en oeuvre lorsque la distance entre la voie et la façade la plus proche est comprise entre 7 et 12 mètres. Elle introduit une atténuation des vibrations d'au moins 10 dB par rapport à la pose classique. Par rapport à cette dernière, la pose ASP est réalisée en intercalant une semelle résiliente en Sylomer surmontée d'une plaque de métal, entre la butée isolante et la traverse (cf. figure 44). La plaque de métal comprime la semelle résiliente contre la traverse par vissage – d'où le sens de l'appellation Sylomer précontraint -, laissant le rail relativement libre en translation verticale. La profondeur de fouille est de 0.70 m.

B.3. Pose flottante

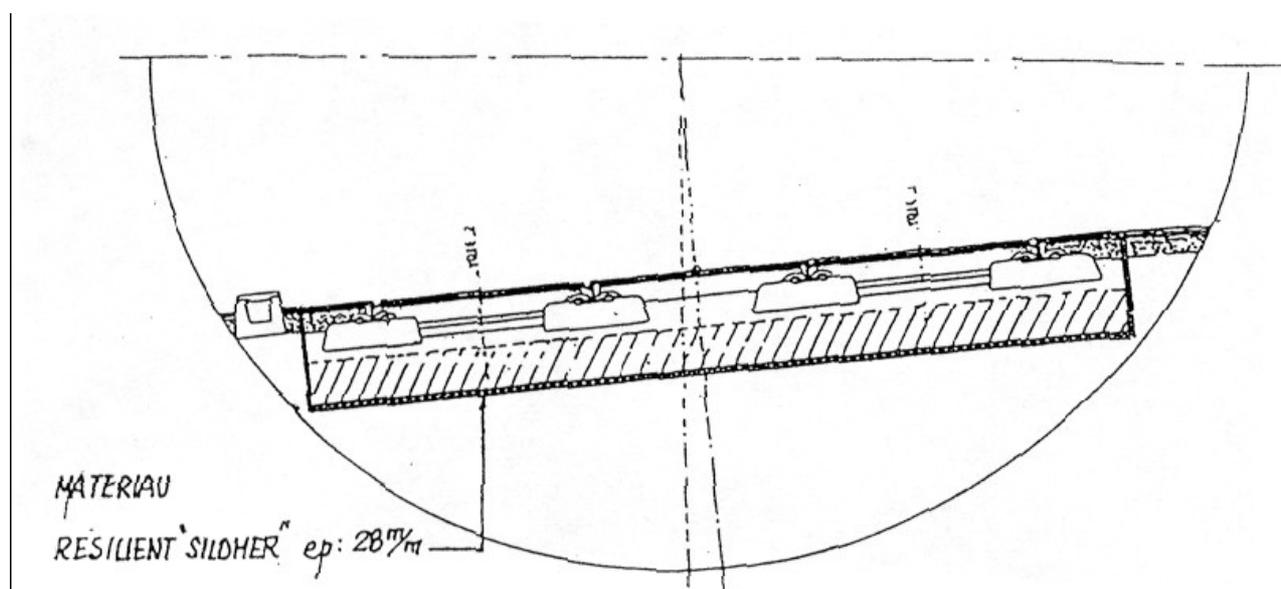


Figure 46: Pose flottante

La pose flottante devient obligatoire lorsque des atténuations de plus de 20 dB sont requises, réglementairement pour des distances entre voie et façade inférieures à 7 m. Il s'agit d'une pose classique réalisée sur une dalle de la largeur de la plate-forme du tramway, cette dalle étant découplée du sol par une couche de matériau résilient Sylomer (cf. figure 46). La fixation du rail par rapport à la plate-forme est donc nettement plus rigide que dans le cas de la pose ASP. La profondeur de fouille passe à 0.85 m.

B.4. Pose Silent Rail

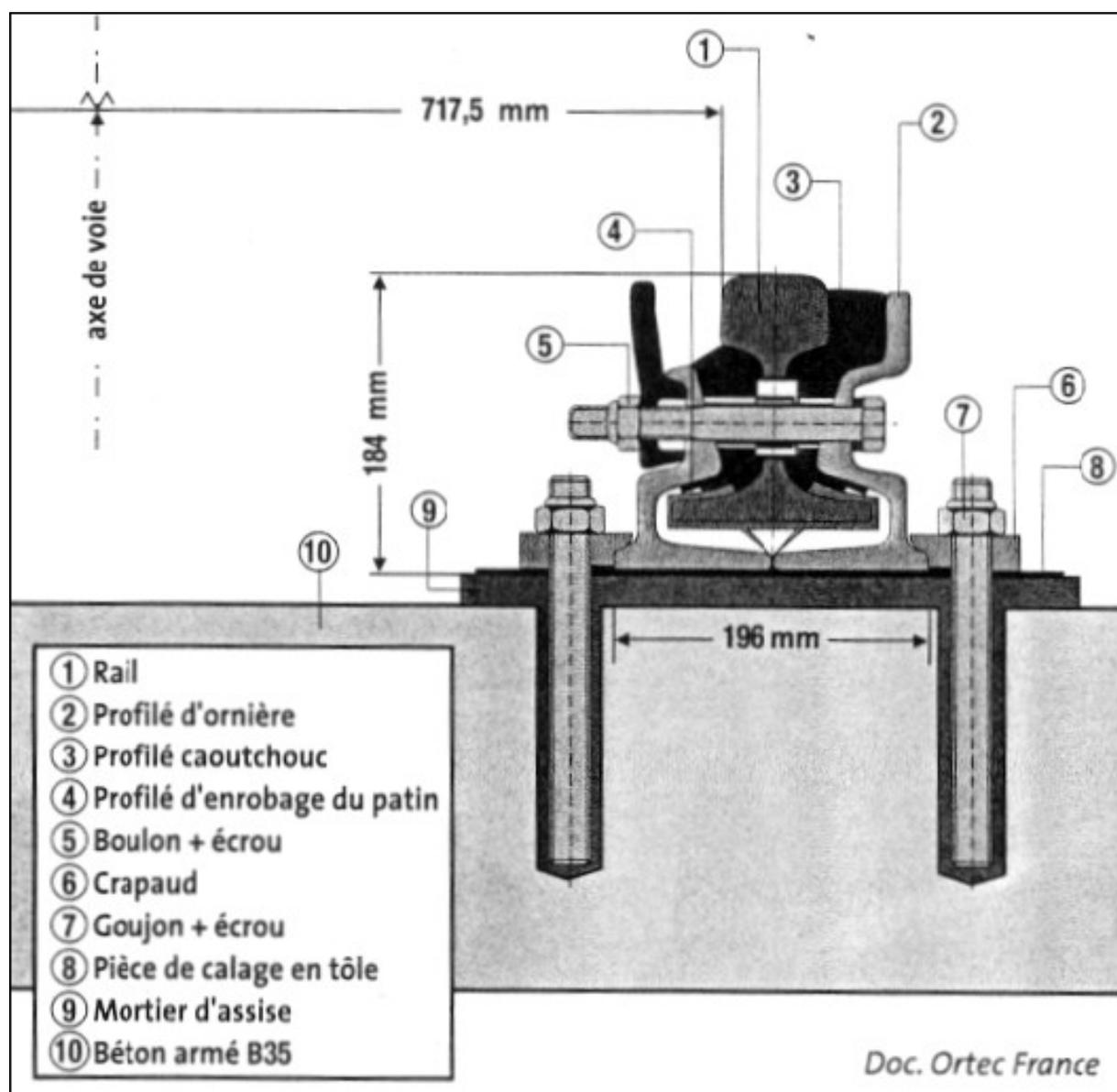


Figure 47: Pose Silent Rail

Le Silent Rail apporte une atténuation comparable à celle d'une dalle flottante avec des terrassements nettement moins importants. Un rail de profil classique Vignolle – du type rail SNCF - est suspendu à l'intérieur d'un profilé métallique, l'espace entre rail et profilé étant rempli par un profilé en caoutchouc (cf figure 45). Le profilé métallique est quant à lui fixé rigidement à une dalle en béton armé. La suspension autorise une déflexion maximale de 8 mm au passage d'un tramway.

Annexe C :
Liste des paramètres
importants pour l'émission
acoustique des tramways

Cette liste de paramètres a été dressée par la société SerdB dans le cadre d'un PREDIT[20].

Paramètres	Valeurs
dimensions totales (longueur, largeur, hauteur)	valeurs numériques (m)
bidirectionnalité	cas à cocher (oui/non)
niveau du plancher	liste (normal/bas intégral/mixte)
nombre de modules	valeur numérique
nombres de bogies	valeur numérique
nombre de bogies moteurs / nombre de bogies porteurs	valeur numérique
carénage des bogies	case à cocher (oui/non)
nombre d'essieux	valeur numérique
roues indépendantes	case à cocher (oui/non)
charge à l'essieu	valeur numérique (N)
nombre et puissance des moteurs	valeurs numériques
type de roue	liste (monobloc, élastique) nom du fournisseur (facultatif)
présence de matériau amortissant	case à cocher (oui/non)
diamètre des roues	valeur numérique (m)
vitesse	valeur numérique (km/h)
allure	liste (vitesse stabilisée, acc., déc.)
profil de rail	valeur alphanumérique
profil de roue	valeur alphanumérique
nature des matériaux	valeur alphanumérique
usure moyenne des roues	liste (faible, moyenne, forte)
type de pose	liste (classique, découplé, suspendu)
travelage	valeur numérique (m)

écartement	valeur numérique (m)
dévers	case à cocher (oui/non)
profil en plan	liste (ligne droite, courbe) si courbe, préciser le rayon (m)
profil en long	liste (horizontal, montée, descente)
usure moyenne des rails	liste (faible, moyenne, forte)
appareil de voie	case à cocher (oui/non) si oui, distance point de mesure (m)
station	case à cocher (oui/non) si oui, distance point de mesure (m)
crissement	case à cocher (oui/non)

Annexe D :
Bruit de roulement
ferroviaire :
principe du logiciel TWINS

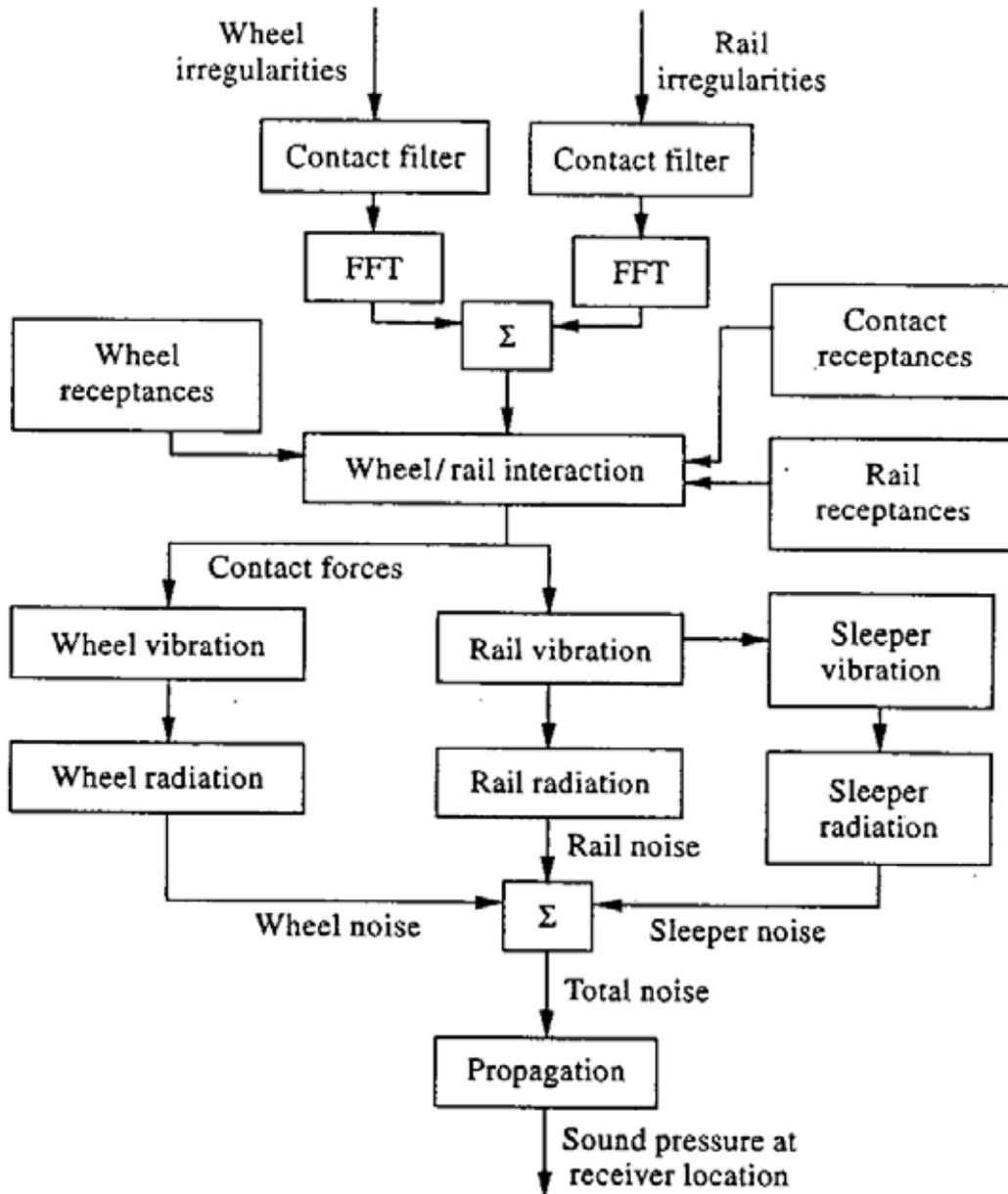


Table des matières

Notice.....	3
Sommaire.....	4
Introduction.....	5
1. Modèles existants et en cours de développement.....	6
1.1 Le tramway : qu'est-ce que c'est ?.....	6
1.1.1 Le tramway : une définition pas si simple.....	6
1.1.2 Quelques sources de données sur les tramways : caractéristiques techniques et réseaux.....	7
1.2 Les principales sources du tramway : le bruit de roulement et peut-être le bloc moteur.....	7
1.2.1 Les différentes sources du tramway.....	7
1.2.2 Le bruit de roulement : principale source à partir de 15-20 km/h.....	8
1.2.3 Blocs moteurs (moteurs + vitesses) : non négligeable même à haute vitesse ?.....	8
1.2.4 Équipement de toiture : une influence négligeable, sauf peut-être à l'arrêt et pour les étages élevés des habitations riveraines.....	8
1.2.5 Conclusion.....	9
1.3 Modélisation du bruit de roulement des tramways par des sources ponctuelles.....	9
1.3.1 Localisation des sources.....	9
1.3.2 Spectres d'émissions.....	11
1.3.3 Directivités.....	11
1.4 Modèle physique du bruit de roulement : adaptation du modèle ferroviaire TWINS.....	12
1.4.1 L'exemple ferroviaire.....	12
1.4.2 Application aux tramways.....	14
1.5 Le crissement : un phénomène difficilement reproductible ... et donc difficilement modélisable.....	14
1.5.1 Le crissement : qu'est-ce que c'est ?.....	14
1.5.2 Modélisation du crissement : un sujet d'actualité.....	16
1.5.2.1. Des modèles détaillés en cours de développement.....	16
1.5.2.2. Modélisation d'ingénierie du crissement pour les trains (IMAGINE).....	16
1.6 Un petit mot sur les vibrations.....	17
2. Paramètres d'émission.....	18
2.1 Les paramètres cinématiques : la vitesse le facteur d'émission principal.....	18
2.1.1 La vitesse : une dépendance forte entre $20 \log_{10}(v)$ et $35 \log_{10}(v)$	18

2.1.2 L'accélération : une influence négligeable.....	19
2.2 Type de plateforme : une influence non négligeable.....	21
2.2.1 Revêtements.....	21
2.2.2 Les fixations du rail.....	24
2.3 État des voies et entretien :	
une influence qui peut être prépondérante.....	25
2.3.1 Quelques définitions : usure ondulatoire des voies et rugosité.....	25
2.3.2 Préliminaire : opérations d'entretiens sur les voies.....	26
2.3.3 Conditions de mesurages : le rodage, un paramètre à ne pas négliger.....	27
2.3.4 Usure ondulatoire : 3-9 dB(A).....	27
2.3.5 Meulage (sans usure ondulatoire) : gain de 1-2 dB(A).....	27
2.4 La charge : une influence faible de 1-2 dB(A).....	29
2.4.1 Comment mesurer la charge ?.....	29
2.4.2 Effets sur les niveaux sonores.....	30
2.4.3 Effets sur les spectres.....	31
2.5 Type et état des matériels roulants.....	32
2.5.1 Les défauts de roue.....	32
2.5.2 Type et âge des matériels roulants : globalement, un paramètre de second ordre.....	33
2.6 Autres paramètres : une influence légère.....	34
2.6.1 Sens de la mesure : une très légère influence.....	34
2.6.2 Profil en long de la voie.....	34
2.6.3 Âge de la voie : un paramètre important ?.....	34
2.7 Les paramètres influençant le crissement : peu de certitudes.....	34
2.7.1 Tracé de la ligne de tramway.....	34
2.7.2 Rails.....	35
2.7.3 Roues.....	36
2.7.4 Véhicule.....	36
2.7.5 Cinématique du véhicule.....	37
2.7.6 Conditions climatiques.....	37
3. Réglementation et déroulement d'une étude d'impact.....	38
3.1 Les textes en vigueur.....	38
3.1.1 Niveaux sonores admissibles : une réglementation récente et floue.....	38
3.1.1.1. Construction d'une voie nouvelle.....	39
3.1.1.2. Modification ou transformation significative d'une voie existante.....	39
3.1.2 Cas particulier des Points Noirs bruits : aucune obligation réglementaire.....	40
3.1.3 Normes.....	40
3.2 Traitement d'une étude opérationnelle de tramway.....	41
3.2.1 Études réalisées au sein du RST.....	41
3.2.2 Caractérisation de l'état initial.....	41
3.2.3 Définition des objectifs réglementaires.....	42
3.2.3.1. Cas des études antérieures à l'arrêté fer du 8/11/1999	42

3.2.3.2. Études actuelles : besoin d'expliciter la réglementation applicable aux tramways.....	43
3.2.4 Modélisation du projet.....	43
3.2.4.1. Bruit en section courante.....	43
3.2.4.2. Bruit en station.....	45
3.2.4.3. Création d'un dépôt : nécessité d'une étude particulière.....	45
3.2.5 Des moyens de protection à la source difficiles à mettre en place.....	45
3.2.5.1. Écrans acoustiques : une solution peu adaptée dans un milieu urbain même si des pistes existent.....	45
3.2.5.2. Mise en place d'une plate-forme moins bruyante.....	46
3.2.5.3. Réduction des vitesses.....	46
3.2.5.4. Traitement acoustique des bâtiments.....	47
3.2.5.5. Tableau synthétique et coût approximatif des principales solutions de protection.....	47
3.2.6 Recommandations : ce que doit comporter l'étude d'impact.....	48
3.2.6.1. Soigner la présentation de l'étude.....	49
3.2.6.2. Prise en compte des effets indirects.....	49
3.2.6.3. Les effets socio-économiques et leurs limites.....	51
3.2.6.4. Les effets sur la santé : un peu de qualitatif et peu de quantitatif.....	51
3.2.6.5. Prise compte globale des effets directs (multi-exposition).....	51
3.2.7 Ce que peut inclure l'étude d'impact.....	51
3.2.7.1. Prévision des zones potentielles de crissements.....	51
3.2.7.2. Cartes sonores verticales.....	52
3.2.7.3. Utilisation d'indicateurs supplémentaires.....	52
3.2.8 Les lacunes courantes des études d'impact.....	53
3.2.9 Mesures après mise en service : un bilan globalement positif.....	53
4. Besoin de nouveaux indicateurs : oui, mais lesquels ?.....	55
4.1 Effets du bruit : santé et gêne.....	55
4.1.1 Effets du bruit sur la santé.....	55
4.1.1.1. Effets auditifs.....	55
4.1.1.2. Effets non-auditifs	56
4.1.2 Gêne : le bruit est seulement un des facteurs explicatifs.....	57
4.1.2.1. Facteurs importants vis-à-vis de la sensation de gêne : les facteurs acoustiques ne sont pas les seuls.....	57
4.1.2.2. Cas particulier de la gêne dans un environnement sonore complexe : multi-exposition et co-exposition.....	58
4.2 Principaux indicateurs existants.....	58
4.2.1 Indicateurs énergétiques.....	58
4.2.1.1. LAeq et If : les indicateurs réglementaires français.....	59
4.2.1.2. Indicateurs avec pondérations horaires.....	59
4.2.1.3. Niveaux de crête : LAmx (ou LAFeqmax).....	59
4.2.1.4. LAE ou SEL.....	60
4.2.1.5. LAeq,tp et LAeq,te : événements acoustiques ferroviaires.....	60
4.2.1.6. Indicateurs statistiques.....	61

4.2.2 Autres indicateurs physiques.....	61
4.2.2.1. Niveau de pollution sonore : Lnp.....	62
4.2.2.2. Indice du bruit du trafic.....	62
4.2.2.3. Indicateurs renseignant sur la répartition statistique des niveaux.....	62
4.2.2.4. Indicateurs renseignant sur la structure du bruit.....	62
4.2.2.5. Émergence et indicateurs complémentaires.....	62
4.2.2.6. Notion de tonalité marquée.....	63
4.2.2.7. Pente α des spectres du son.....	63
4.2.3 Indicateurs psycho-acoustiques.....	63
4.3 Quel(s) indicateur(s) pour le bruit des tramways?.....	63
4.3.1 Quel critère pour choisir des indicateurs de bruit ?.....	63
4.3.2 Quelques indicateurs non réglementaires déjà utilisés dans des études d'impacts de tramway.....	64
4.3.2.1. LAeq calculé sur une période plus courte.....	64
4.3.2.2. Prise en compte du bruit de crête.....	64
4.3.3 Les indicateurs acoustiques expliquent une faible part de la gêne ressentie.....	65
4.3.3.1. Gêne au passage d'un tramway.....	65
4.3.3.2. Gêne de long terme.....	67
4.3.3.3. Une enquête en cours de dépouillement.....	68
4.3.4 Vers un nouvel indicateur?.....	68
Conclusion.....	69
5. Références.....	71
6. Références et résumés.....	76
Annexes.....	101

© ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire
centre d'Études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques

Toute reproduction intégrale ou partielle, faite sans le consentement du Certu est illicite (loi du 11 mars 1957).
Cette reproduction par quelque procédé que ce soit, constituerait une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du code pénal.

Dépôt légal: 2^e trimestre 2009
ISSN: 1263-2570
ISRN: Certu/RE -- 09-06 -- FR

Certu
9, rue Juliette-Récamier
69456 Lyon cedex 06
☎ (+33) (0) 4 72 74 59 59
Internet <http://www.certu.fr>

Certu

*Service technique placé sous l'autorité
du ministère chargé de l'Écologie, de l'Énergie,
du Développement durable et de l'Aménagement du territoire,
le Certu (centre d'Études sur les réseaux, les transports,
l'urbanisme et les constructions publiques)
a pour mission de contribuer au développement
des connaissances et des savoir-faire et à leur diffusion
dans tous les domaines liés aux questions urbaines.
Partenaire des collectivités locales
et des professionnels publics et privés,
il est le lieu de référence où se développent
les professionnalismes au service de la cité.*