



HAL
open science

Bruits et vibrations dus aux tramways : émission et perception

Marie-Agnès Pallas, Chrystèle Philipps-Bertin, Marc Maldonado, Thierry Legouis, Patricia Champelovier, Olivier Chiello, Jacques Lambert, Donatien Le Houède, Joël Lelong

► **To cite this version:**

Marie-Agnès Pallas, Chrystèle Philipps-Bertin, Marc Maldonado, Thierry Legouis, Patricia Champelovier, et al.. Bruits et vibrations dus aux tramways : émission et perception. édition INRETS, pp.250, 2010. hal-01002844

HAL Id: hal-01002844

<https://hal.science/hal-01002844v1>

Submitted on 17 Oct 2017

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.

Marie-Agnès Pallas
Chrystèle Philipps-Bertin
Marc Maldonado
Coordinateurs scientifiques

BRUIT ET VIBRATIONS
DUS AUX TRAMWAYS :
ÉMISSION ET PERCEPTION



RAPPORT N° 279



LES COLLECTIONS DE L'INRETS

Conformément à la note du 04/07/2014 de la direction générale de l'Ifsttar précisant la politique de diffusion des ouvrages parus dans les collections éditées par l'Institut, la reproduction de cet ouvrage est autorisée selon les termes de la licence CC BY-NC-ND. Cette licence autorise la redistribution non commerciale de copies identiques à l'original. Dans ce cadre, cet ouvrage peut être copié, distribué et communiqué par tous moyens et sous tous formats.



Attribution — Vous devez créditer l'Oeuvre et intégrer un lien vers la licence. Vous devez indiquer ces informations par tous les moyens possibles mais vous ne pouvez pas suggérer que l'Ifsttar vous soutient ou soutient la façon dont vous avez utilisé son Oeuvre.



Pas d'Utilisation Commerciale — Vous n'êtes pas autorisé à faire un usage commercial de cette Oeuvre, tout ou partie du matériel la composant.



Pas de modifications — Dans le cas où vous effectuez une adaptation, que vous transformez, ou créez à partir du matériel composant l'Oeuvre originale (par exemple, une traduction, etc.), vous n'êtes pas autorisé à distribuer ou mettre à disposition l'Oeuvre modifiée.

Le patrimoine scientifique de l'Ifsttar

Le libre accès à l'information scientifique est aujourd'hui devenu essentiel pour favoriser la circulation du savoir et pour contribuer à l'innovation et au développement socio-économique. Pour que les résultats des recherches soient plus largement diffusés, lus et utilisés pour de nouveaux travaux, l'Ifsttar a entrepris la numérisation et la mise en ligne de son fonds documentaire. Ainsi, en complément des ouvrages disponibles à la vente, certaines références des collections de l'INRETS et du LCPC sont dès à présent mises à disposition en téléchargement gratuit selon les termes de la licence Creative Commons CC BY-NC-ND.

Le service Politique éditoriale scientifique et technique de l'Ifsttar diffuse différentes collections qui sont le reflet des recherches menées par l'institut :

- Les collections de l'INRETS, Actes
- Les collections de l'INRETS, Outils et Méthodes
- Les collections de l'INRETS, Recherches
- Les collections de l'INRETS, Synthèses
- Les collections du LCPC, Actes
- Les collections du LCPC, Etudes et recherches des laboratoires des ponts et chaussées
- Les collections du LCPC, Rapport de recherche des laboratoires des ponts et chaussées
- Les collections du LCPC, Techniques et méthodes des laboratoires des ponts et chaussées, Guide technique
- Les collections du LCPC, Techniques et méthodes des laboratoires des ponts et chaussées, Méthode d'essai



Institut Français des Sciences et Techniques des Réseaux,
de l'Aménagement et des Transports
14-20 Boulevard Newton, Cité Descartes, Champs sur Marne
F-77447 Marne la Vallée Cedex 2

Contact : diffusion-publications@ifsttar.fr

www.ifsttar.fr



Marie-Agnès Pallas
Chrystèle Philipps-Bertin
Marc Maldonado
Thierry Legouis
Patricia Champelovier
Olivier Chiello
Jacques Lambert
Donatien Le Houedec
Joël Lelong

Bruit et vibrations des tramways : émission et perception

Rapport INRETS n° 279
Décembre 2009



Auteurs

Marie-Agnès Pallas, chargée de recherche à l'INRETS-LTE

Chrystèle Philipps-Bertin, chargée de recherche à l'INRETS-LTE

Marc Maldonado, enseignant, chercheur rattaché à l'École centrale de Nantes

Thierry Legouis, directeur du bureau d'études SerdB

Patricia Champelovier, ingénieur de recherche à l'INRETS-LTE

Olivier Chiello, chargé de recherche à l'INRETS-LTE

Jacques Lambert, directeur de recherche à l'INRETS-LTE

Donatien Le Houedec, professeur émérite à l'École centrale de Nantes

Joël Lelong, chargé de recherche à l'INRETS-LTE

INRETS-LTE, Laboratoire transports environnement
25 avenue François-Mitterrand, case 24, F-69675 BRON CEDEX

Contributeurs

Roger Chatagnon (INRETS), Jean-Michel Clairet (INRETS), Christine Trindade (INRETS), Laurent de Lalande (SerdB), Jean-Pierre Regoin (ECN), François Lejeune (SEMATAN).

Ce rapport a bénéficié des commentaires et remarques des référés suivants :

- **Annie Moch**, professeur émérite des universités, LPCCI, Université Paris X, Nanterre.
- **Michel Bérengier**, directeur de recherche au LCPC, Nantes.

Institut national de recherche sur les transports et leur sécurité – INRETS

Direction scientifique / politique éditoriale – Aude Lauby
25 avenue François-Mitterrand, case 24, F-69675 BRON CEDEX, France
Tél. : +33 4 72 14 23 00 – Fax : +33 4 72 37 68 37 – www.inrets.fr

© Les collections de l'INRETS
N° ISBN 978-2-85782-678-1 – N° ISSN 0768-9756

En application du code de la propriété intellectuelle, l'INRETS interdit toute reproduction intégrale ou partielle du présent ouvrage par quelque procédé que ce soit, sous réserve des exceptions légales

Table des matières

Synthèse.....	5
Introduction.....	9
Émission de bruit et sources acoustiques.....	13
1. Introduction.....	13
1.1. État de l'art.....	14
1.2. Objectifs et méthodologie	14
2. Mesure des paramètres d'émission	15
2.1. Campagne expérimentale	15
2.2. Analyse de l'émission.....	24
2.3. Des mesures à la modélisation.....	48
3. Modélisation de l'émission	48
3.1. Modèle d'émission	49
3.2. Contribution de la climatisation.....	56
3.3. Contribution du bruit de roulement	58
4. Conclusions.....	60
Vibrations dans le sol	67
1. Introduction.....	67
1.1. État de l'art.....	68
1.2. Objectifs et méthodologie	70
2. Campagne expérimentale	71
2.1. Comportement mécanique du système voie/sol.....	71
2.2. État de surface des rails	77
2.3. Mesures embarquées : vibrations des essieux	81
2.4. Mesures au passage : vibrations de la voie et du sol	86
3. Modélisation	94
3.1. Modèle de sol multicouche	95
3.2. Modèle d'interaction voie/sol pour une pose classique	99
3.3. Modèle d'interaction voie/sol pour une pose sur dalle flottante....	105
3.4. Modèle d'interaction voie/essieu.....	113
3.5. Simulation du passage d'une rame	121
4. Conclusions.....	128
Étude <i>in-situ</i> de la perception du bruit du tramway.....	133
1. Contexte et problématique.....	133
1.1. Gêne due au bruit de tramway et au bruit routier en milieu urbain.....	133
1.2. Relation « dose-réponse » pour l'exposition au bruit du tramway	135

1.3. Principaux enseignements de la revue de littérature.....	136
2. Méthodologie : enquête par questionnaire	136
2.1. L'élaboration du questionnaire	137
2.2. Le choix des sites d'enquête	145
2.3. Construction de l'échantillon	149
2.4. Le déroulement de l'enquête	149
2.5. Les mesures d'exposition au bruit et le calcul des indices acoustiques.....	150
3. Les résultats de l'enquête	155
3.1. Apurement et constitution du fichier de données.....	155
3.2. Description de l'échantillon enquêté	156
3.3. Le bruit du tramway au passage	159
3.4. Le bruit dû au trafic de tramways	172
4. Conclusions et perspectives	195
Bilan : de l'émission à la perception.....	199
1. Contribution des sources	199
1.1. Bruit de roulement.....	201
1.2. Bruit de traction.....	203
1.3. Bruit des auxiliaires.....	205
1.4. Bruits solidiens.....	205
1.5. Sources de bruit et logiciels de prévision	206
2. Gêne de long terme et réglementation	207
Conclusion et perspectives.....	209
1. Sur le plan de la recherche.....	209
1.1. Concernant les émissions de bruit.....	209
1.2. Concernant les vibrations dans le sol.....	210
1.3. Concernant la perception et la gêne.....	211
2. Sur le plan opérationnel et réglementaire.....	212
Bibliographie.....	215
Annexe 1 - Description des sites de mesurage acoustique et vibratoire	221
Annexe 2 - Description des rames	227
Annexe 3 - Antenne microphonique : principe et performances	231
Annexe 4 - Enquête de perception : fiches descriptives des sites.....	235
Annexe 5 - Questionnaire « Perception du tramway de Nantes »	249
Annexe 6 - Enquête de perception : exemple de fiche de mesurage acoustique.....	265
Fiche bibliographique / Publication data form	269

Synthèse

L'objet de cette recherche est de mettre en évidence les situations susceptibles de créer une gêne chez les riverains de lignes de tramway, sur le plan du bruit et des vibrations. Cette recherche propose deux approches complémentaires du bruit et des vibrations engendrés par la circulation des tramways :

- une approche physique, qui permet une caractérisation fine du bruit et des vibrations émis par le tramway ;
- une approche psychosociologique qui s'intéresse à la perception du bruit et des vibrations et à l'évaluation de la gêne qu'ils peuvent provoquer chez les riverains.

Problématique

L'expérience réussie de création ou de réintroduction de réseaux de tramways menée depuis une vingtaine d'années par des villes « pionnières » a favorisé le regain d'intérêt pour ce mode de transport au coût raisonnable, économe en énergie et peu polluant. Un des avantages environnementaux du tramway souvent mis en avant est le relatif « silence » qu'il procure comparativement aux autres moyens de transports publics. Cependant, à la lumière des réactions de riverains, on constate que l'introduction de lignes de tramway peut créer des situations particulièrement gênantes. D'où la nécessité de mieux connaître les situations à l'origine des réactions négatives des riverains, afin de mieux prendre en compte la perception et les effets du bruit et des vibrations dans les projets futurs, ainsi que dans l'élaboration de réglementations adaptées au cas du bruit des tramways.

Déroulement de l'étude

Les études conjointes des sources acoustiques, des vibrations dans le sol et de la perception du tramway ont chacune impliqué des campagnes de mesures ou un recueil de données réalisés sur le réseau de tramways de l'agglomération nantaise.

L'étude des sources acoustiques vise à caractériser le bruit émis par un tramway. Des mesures ont été réalisées, mettant en œuvre une antenne acoustique bidimensionnelle ainsi qu'un ensemble de microphones pour la mesure de la directivité verticale, et conduisant à une description des sources principales et de leur comportement. Une modélisation de type « champ libre » est réalisée.

Pour l'étude des vibrations dans le sol, des mesures accélérométriques sur les rames elles-mêmes, sur les rails et au niveau du sol ont été réalisées et analy-

sées, conjointement aux mesures acoustiques. Un modèle complet, allant de l'excitation au contact roue/rail jusqu'à la propagation des vibrations dans le sol est ensuite proposé. Les résultats théoriques sont discutés et comparés aux résultats expérimentaux.

Enfin l'étude *in situ* de la perception du tramway repose sur une enquête par questionnaire auprès de 370 riverains associée à une campagne de mesures acoustiques. Sur la base de cette campagne, des niveaux d'exposition au bruit ont été affectés à chaque personne interrogée. Les résultats obtenus concernent la perception et la gêne due au bruit du tramway au passage, la gêne due au bruit du trafic des tramways et les facteurs de modulation de la gêne.

Résultats

L'analyse acoustique des sources de bruit des tramways montre la part respective des zones bogies et de la voie dans l'émission de bruit de roulement, ainsi que l'influence du type de plateforme (pose de voie et revêtement). La vitesse de circulation est également un paramètre essentiel, agissant sur les niveaux et la répartition fréquentielle des bruits émis. Les sources situées en toiture concernent plutôt les riverains aux étages ; leurs contributions ne sont significatives que dans les sites peu bruyants.

Sur le plan vibratoire, la mise en évidence d'une excitation par les irrégularités des surfaces de roulement et l'identification des résonances voie/essieux permettent d'expliquer les écarts de niveaux observés sur les rails en fonction du type de matériel roulant et de l'état de surface des rails. Concernant la transmission des vibrations entre les rails et le sol, les travaux permettent de rendre compte plus précisément de l'efficacité de différents couples pose de voie/sol. La nécessité d'un modèle 3D avec flexion des dalles a été mis en évidence expérimentalement et bien confirmé par les calculs. Dans certains cas, il s'avère que la torsion des dalles doit être prise en compte.

La gêne exprimée au passage d'une rame est importante, notamment « fenêtres ouvertes ». Elle est renforcée dès lors que les bruits sont perçus comme un grincement, un crissement ou un grondement, autant d'aspects fréquentiels qui ne sont pas pris en compte par les descripteurs événementiels conventionnels (L_{Amax} , SEL). La capacité des descripteurs acoustiques énergétiques à expliquer ou prédire la gêne au passage ou la gêne de long terme est faible. Par ailleurs la gêne est co-déterminée par des facteurs non acoustiques (sensibilité au bruit, image du tramway, usager du tramway...). Enfin, la gêne due au bruit des tramways semble en partie « contaminée » par la gêne due au bruit de la circulation routière.

Exploitation des résultats

Parmi les dimensions environnementales du tramway, la dimension sonore constitue une composante importante de la qualité de l'environnement urbain ;

elle est parfois à l'origine de gêne pour les riverains. Certaines situations peuvent aggraver cette gêne, notamment celles qui sont cause de grincement ou crissement comme les virages, ou celles où des vibrations sont ressenties ; elles doivent être examinées et, le cas échéant, traitées en priorité.

En dehors de ces situations, le bruit de roulement peut être réduit par le choix d'une infrastructure appropriée, privilégiant fixation rigide des rails et propriétés acoustiques absorbantes du revêtement de surface. En cas de surfaces de roulement dégradées, il peut s'avérer nécessaire de réduire la vitesse en phase d'exploitation. Par ailleurs, les sources de bruit de traction et celles en provenance des auxiliaires ne doivent pas être négligées dans les efforts de réduction, pour les situations où le bruit de roulement reste modéré.

Le problème des vibrations induites au passage des tramways ne doit pas être analysé uniquement sous l'angle de l'atténuation apportée par un type de plate-forme, et de la distance entre l'infrastructure et les habitations : il doit être envisagé dès la conception des rames (masse, type d'essieux) et prendre en compte les caractéristiques du (sous-)sol pour déterminer l'efficacité d'une pose isolante.

Sur le plan réglementaire, pour ce qui concerne l'aspect bruit, l'utilisation actuelle du LAeq auquel sont associées des valeurs limites d'exposition, mériterait d'être complétée par des indicateurs événementiels (et des valeurs limites correspondantes) traduisant plus fidèlement la gêne ressentie par les riverains. Enfin, la définition des valeurs limites d'exposition devrait aussi mieux prendre en compte les niveaux sonores « préexistants » dus à la présence d'autres sources de bruit, notamment celui de la circulation automobile. Pour ce qui concerne l'aspect vibratoire, il n'existe pas de norme relative aux vibrations engendrées par les infrastructures de transport, ni pour évaluer l'émission vibratoire au passage d'un tramway, ni pour évaluer l'impact vibratoire au niveau d'un bâtiment. Il serait donc souhaitable de définir en premier lieu des méthodes de mesure et des indicateurs adaptés aux vibrations, puis de développer des méthodes de calcul normalisées pour les études d'impact vibratoire.

La recherche, présentée dans ce rapport, a été financée par l'ADEME dans le cadre de l'appel à proposition de recherche « Bruit et nuisances sonores » du Programme National de Recherche et d'Innovation dans les Transports Terrestres. (PREDIT) 2002-2007. Elle relève du groupe « Impacts énergétiques et environnementaux », et s'inscrit dans les thématiques « *bruit des transports ferroviaires, vibrations en milieu urbain émis par les transports guidés, propagation du bruit solidien* » ainsi que « *perception du bruit* ».

Elle a mobilisé les compétences pluridisciplinaires de :

- deux instituts de recherche : l'Institut national de recherche sur les transports et leur sécurité (INRETS) et l'École centrale de Nantes (ECN) ;
- un bureau d'études : Société d'études et de réalisations pour la diminution du bruit (SERDB), coordinateur du projet ;
- un industriel dans le domaine des systèmes d'isolation acoustique et vibratoire : Composite Damping System (CDM) ;
- un exploitant de lignes de tramway : Société d'économie mixte des transports en commun de l'agglomération nantaise (SEMITAN).

Introduction

L'expérience réussie de création ou de réintroduction de réseaux de tramways menée depuis une vingtaine d'années par des villes « pionnières » telles que Grenoble ou Nantes a favorisé le regain d'intérêt auprès de nombreuses collectivités locales pour ce mode de transport au coût raisonnable, économe en énergie et peu polluant. Ainsi, l'obligation de repenser, au travers des plans de déplacements urbains (et plus généralement dans le cadre d'une politique de transport durable), l'offre en matière de transport urbain public a incité de nombreuses villes à choisir le tramway (Montpellier, Valenciennes, Orléans, Bordeaux, Nice...).

Un des avantages environnementaux du tramway souvent mis en avant par les autorités locales est le relatif « silence » qu'il procure comparativement aux autres moyens de transports publics comme l'autobus. Cependant, à la lumière des réactions de riverains de lignes de tramway observées en France et à l'étranger (Sheffield, Düsseldorf...), force est de constater que la réaction est plus complexe et que l'introduction de lignes de tramway peut créer des situations particulièrement gênantes pour les riverains.

Or, il convient de noter qu'il n'existe à ce jour aucune méthode normalisée spécifique à ce mode de transport permettant d'évaluer l'impact environnemental en termes de bruit ou de vibrations, que cela soit à l'émission (caractérisation acoustique et vibratoire du système matériel roulant + infrastructure) ou au niveau du bâti (façade de bâtiment ou chez le riverain). En particulier, les vibrations basses fréquences générées dans le sol peuvent conduire à des nuisances importantes pour les populations riveraines, notamment dans le cas de rues étroites du fait de la proximité des immeubles environnants. L'Union internationale des chemins de fer (UIC) a reconnu la nécessité de travaux de recherche sur ce phénomène à tous les niveaux (normatif, perceptif, modélisation physique et moyens de réduction).

L'objet de cette recherche est de mettre en évidence les situations susceptibles de créer une gêne chez les riverains de ligne de tramway, sur le plan du bruit et des vibrations. Elle inclut une approche physique avec modélisation de l'émission ainsi qu'une démarche psychosociologique comprenant une enquête auprès de riverains associée à une campagne de mesures acoustiques et vibratoires. Son originalité et son ambition résident dans le fait qu'elle a pour objectif d'une part de décrire des situations-types de gêne due au bruit du tramway (gêne événementielle et gêne de long terme) et, d'autre part, de rechercher des concordances entre les modèles issus des études des sources acoustiques et vibratoires, et la perception du bruit du tramway par des riverains.

Le programme de recherche a comporté trois parties complémentaires, dont les résultats ont ensuite été exploités en synthétisant les différentes approches.

La **première partie** est relative à l'étude des sources acoustiques ; elle vise à caractériser le bruit émis par un tramway. Pour ce faire, des mesures ont été réalisées à Nantes, en trois sites, avec deux types de rame.

L'émission acoustique des tramways est appréhendée à deux échelles : à l'échelle de la rame globale, et à celle des sources. La première inclut des mesures de directivité dans un plan vertical, au passage des rames et à l'arrêt. Dans la seconde, les mesures mettant en œuvre une antenne acoustique bidimensionnelle ont pour but de localiser les principales sources sonores et de déterminer leur spectre d'émission, en fonction de la vitesse et dans chacune des configurations étudiées.

Une modélisation de type « champ libre » est ensuite réalisée et validée à partir des éléments déterminés expérimentalement. Elle permet de calculer la signature acoustique au passage du tramway, ainsi que les indicateurs acoustiques classiques. Le modèle développé peut ensuite être exploité pour caractériser la contribution de différentes catégories de sources (bruit de roulement, motorisation ou climatisation) au bruit émis et aux indicateurs classiques.

La **deuxième partie** est consacrée à l'étude des vibrations engendrées dans le sol, incluant la génération des vibrations aux contacts roue/rail, leur propagation dans la plate-forme puis dans le sol.

De façon similaire à la partie acoustique, des mesures ont été réalisées à Nantes, assurant ainsi le respect *de facto* des mêmes conditions expérimentales sur trois sites communs (rames employées, vitesse...). Les mesures mettent en œuvre des accéléromètres fixés sur le rail, sur la plate-forme et sur le sol au voisinage de la voie. Elles visent d'une part, à caractériser la pose de voie dans son environnement (effet couplé de la voie et du type de sol), et d'autre part, à localiser les principales sources vibratoires au passage en déterminant leur spectre, en fonction de la vitesse et dans chacune des configurations étudiées. Des capteurs embarqués permettent également de déterminer les vibrations des bogies.

Ces mesures sont ensuite utilisées pour modéliser d'une part les efforts aux contacts roue/rail, d'autre part la propagation au travers de la plate-forme et dans le sol.

La **troisième partie** concerne l'étude *in situ* de la perception du bruit du tramway. 370 riverains des 3 lignes de tramway de la ville de Nantes ont été interrogés en face à face à domicile par questionnaire. Les principaux thèmes abordés sont le quartier et la place du tramway, la perception et la gêne due au bruit du tramway et aux autres sources de bruits entendus au domicile.

En parallèle, une série de mesures de bruit de longue durée (24 heures) a été réalisée sur les 12 sites d'enquête. Elle a permis, après modélisation et calcul, d'affecter des niveaux d'exposition au bruit à chaque personne enquêtée.

L'analyse conjointe des données issues des questionnaires et des niveaux d'exposition au bruit vise l'établissement de relations dose/réponse pour la gêne au passage du tramway et la gêne de long terme due au trafic des tramways. Les réponses des riverains permettent également d'examiner l'influence de variables non acoustiques dans l'expression de la gêne due au bruit.

Enfin, la **dernière partie** dresse le bilan de cette étude. Elle s'appuie sur les principaux résultats obtenus précédemment et propose notamment des pistes de réflexion sur les descripteurs acoustiques pertinents de la gêne instantanée et de la gêne de long terme. Elle souligne également certains manques ou faiblesses réglementaires.

Émission de bruit et sources acoustiques

1. Introduction

Le tramway est un véhicule complexe, de grandes dimensions. Dans les modèles de prédiction actuels utilisés pour les calculs d'impact sonore, il est généralement représenté par une source linéique uniforme sur toute sa longueur. En réalité, le bruit reçu au passage d'un tramway résulte de la superposition des contributions sonores de différentes sources (roulement, moteurs, équipements électriques, climatisation...), compactes ou étendues, géométriquement dispersées le long de la rame, provenant de divers phénomènes physiques (mécanique, électrique, aéroacoustique...). Certaines sources sont exclusivement liées au matériel roulant (motorisation, auxiliaires), d'autres résultent de l'interaction du véhicule avec l'infrastructure (roulement). À ce titre, le type de pose de voie est déterminant pour ce qui concerne la mise en vibration des rails et de la plate-forme et, par suite, le bruit rayonné par l'infrastructure. Le type de revêtement agit en tant que surface plus ou moins absorbante pour la propagation des bruits en provenance des différentes sources. Enfin l'usage de plus en plus répandu de la climatisation, ainsi que le développement de rames à plancher bas nécessitant l'installation d'équipements en toiture, prédisposent à l'occurrence de sources affectant potentiellement les étages supérieurs des bâtiments.

Divers paramètres influencent le niveau et les caractéristiques fréquentielles des bruits émis, donc la prédominance (resp. le masquage) de certaines sources. Par exemple, outre les caractéristiques intrinsèques liées à la pose de voie, la qualité de l'état de surface des rails et des roues, due à l'usure et à l'entretien du matériel, influe sur les sources de bruit de roulement. Les conditions de circulation, en particulier la vitesse et l'allure, agissent également sur les caractéristiques des bruits émis.

Un certain nombre de questions méritent particulièrement d'être approfondies. Si l'importance du bruit de roulement est incontestable, quelle est la part des autres sources dans le bruit émis ? Notamment quelle est la contribution des sources situées en toiture, et leur importance est-elle plus grande en direction des riverains habitant dans les étages ? Quels sont les effets de la vitesse, du type de pose de voie, du type de rame sur les caractéristiques et la part des différentes sources dans le bruit émis ?

1.1. État de l'art

Si l'on ne tient pas compte de l'étude de phénomènes particuliers comme le crissement, il existe assez peu de littérature scientifique concernant l'émission et les sources de bruit d'un tramway en circulation, notamment sur les réseaux français. Dans les travaux publiés au niveau international, le tramway a généralement été considéré dans sa globalité, sans distinction des sources. À ce titre on peut citer une étude réalisée aux Pays-Bas dans les années 80, mettant en évidence les influences respectives de divers paramètres (type de rame, revêtement, vitesse...) sur le bruit global de la rame [1]. La plupart des autres études sont un constat comparatif du bruit moyen mesuré avant et après reconstruction d'une voie [2][3], avec généralement modification simultanée de différents paramètres : rail, fixation, revêtement, vitesse de passage... Par ailleurs, quelques modèles de prédiction spécifiques à un réseau donné pour un indicateur acoustique global au passage ont pu être déterminés [4], parfois sur des considérations purement statistiques [5]. Plus récemment, la directivité verticale d'émission a été mesurée sur un matériel roulant italien [6] et sur le réseau de Strasbourg [7].

Une première investigation sur la répartition horizontale des sources du tramway de Nantes a été réalisée par l'INRETS en 2000 dans le cadre du PREDIT 2 [8], mettant en évidence les différences de comportement entre bogies moteurs et porteurs, ainsi que les variations fréquentielles des comportements en fonction du type de pose de voie. Enfin le projet européen SILENCE [9], qui s'est achevé en 2008, s'est efforcé d'identifier les principales sources de différents modes de transport, dont le tramway, et de définir un modèle prédictif du bruit émis. Certains résultats ont été publiés concernant les transports guidés urbains, mentionnant le caractère secondaire des sources liées aux équipements électriques par rapport au bruit de roulement [10] : trois types de matériel roulant ont été mesurés sur des réseaux distincts, en France et en Belgique, incluant l'utilisation d'antennes microphoniques pour le matériel français [11]. Dans le projet SILENCE a également été développé un outil logiciel VAMPASS permettant de calculer, à partir d'une modélisation par sources d'un véhicule (routier ou ferroviaire), la signature acoustique au passage ainsi que le signal temporel pour une écoute binaurale [12].

1.2. Objectifs et méthodologie

La partie acoustique du projet PREDIT présenté dans le présent rapport a pour principal objectif de préciser la nature des bruits émis par le tramway susceptibles d'affecter le riverain. Ceci implique à la fois les contributions du matériel roulant et de l'infrastructure. On ne s'intéresse pas ici aux bruits liés aux situations particulières d'arrêt aux stations, ou transitoires (démarrage, freinage), ni aux bruits de crissement en courbe¹ ; on considère essentiellement les conditions de roulage à vitesse stabilisée en ligne droite. Ce volet acoustique comprend deux phases. La première phase vise à caractériser l'émission acoustique au passage d'une rame de tramway (§ 2), en considérant prioritairement le véhicule en champ libre

¹ Les bruits de crissement ont été étudiés dans un autre projet PREDIT qui s'est achevé en 2005.

(rame en circulation sur sa voie, sans bâtiment environnant). Ceci repose dans un premier temps sur une vaste campagne expérimentale réalisée à Nantes², visant à décrire d'une part les puissance et directivité globales des rames, et d'autre part les sources de bruit prépondérantes (localisation, niveau, fréquence). Différents paramètres sont considérés : type de rame, type de voie/revêtement, vitesse. Cette partie expérimentale est complétée par des mesures spécifiques ciblées sur la climatisation. La deuxième phase est une phase de modélisation (§ 3). Elle repose sur le développement d'un modèle expérimental, basé sur une description par sources élémentaires du tramway, afin de déterminer le bruit reçu par un observateur au passage d'une rame en champ libre et de le caractériser au moyen de descripteurs acoustiques comme la signature temporelle, le spectre fréquentiel, des indicateurs au passage. Ce modèle s'appuie en grande partie sur les analyses expérimentales de la première phase.

2. Mesure des paramètres d'émission

La détermination des paramètres d'émission d'une rame de tramway en circulation est basée sur une campagne expérimentale réalisée à Nantes, impliquant divers types de rames et de poses de voie (§ 2.1). Les caractéristiques de l'émission de bruit des tramways, pour une rame globale puis par sources, sont analysées (§ 2.2).

2.1. Campagne expérimentale

L'objectif des mesures est de fournir les données nécessaires aux analyses acoustiques. Elles ont été effectuées sur le réseau de tramway de l'agglomération nantaise, offrant diverses options de configurations de voies et de rames en usage sur les réseaux français. Les configurations sélectionnées ont impliqué :

- deux types de rames : rames dédiées, identiques pour tous les sites de mesure, représentatives de deux générations différentes (génération des années 1985-1990 – *rame A* – et nouvelle génération à plancher bas intégral et équipée de climatisation – *rame B* –). Les rames ont circulé à vide et non lestées ;
- trois types de pose de voie : pose classique avec revêtement gazon (site *Ferrière*), pose sur semelle souple avec revêtement pavé (site *Longchamp*), et pose classique ballast sur remblai (site *Souillarderie*) ;
- des vitesses de passage de 20 à 50 km/h suivant les possibilités de chaque site (contraintes de sécurité). Les paramètres cinématiques ont été mesurés à l'aide de cellules infrarouges fixes installées en bordure de voie et de plaques réfléchissantes disposées sur le flanc des rames.

Des descriptions détaillées des sites et des rames sont disponibles dans les annexes 1 et 2.

² Cette campagne expérimentale est commune aux volets acoustique et vibratoire.

Les mesures pour chaque site ont été réalisées de nuit, hors service commercial, autorisant de ce fait la circulation des rames dans les deux sens sur la voie mesurée. Sur la rame B, la climatisation n'était pas en fonctionnement.

Deux types de mesures acoustiques ont été effectuées en parallèle sur ces sites : puissance et directivité verticale de la rame, et localisation des sources par antenne microphonique.

Mesures complémentaires – Une campagne de mesures complémentaires a impliqué la seule mesure de la directivité verticale, ciblée vers l'analyse des caractéristiques d'émission des auxiliaires – et en particulier le dispositif de climatisation dont est équipé le matériel de type B – et la contribution de cette émission à l'émission totale du bruit de tramway. Cette campagne s'est déroulée à Nantes au dépôt de Dalby, l'un des deux dépôts/ateliers d'entretien dont dispose la Semitan. Ce site dispose de voies de remisage situées dans un environnement acoustiquement « calme ». Concernant l'infrastructure de ce site, la pose de voie est de type classique, complétée par un revêtement pavé. Les mesures ont été effectuées sur des rames non lestées avec de bonnes conditions météorologiques (absence de vent et d'intempéries). Elles ont été réalisées sur les rames A et B (pour cette dernière : système de climatisation arrêté puis en marche en régime maximal) dans deux configurations : mesures au niveau de chaque bogie et milieu de rame avec le tramway à l'arrêt.

2.1.1. Mesures de puissance et directivités

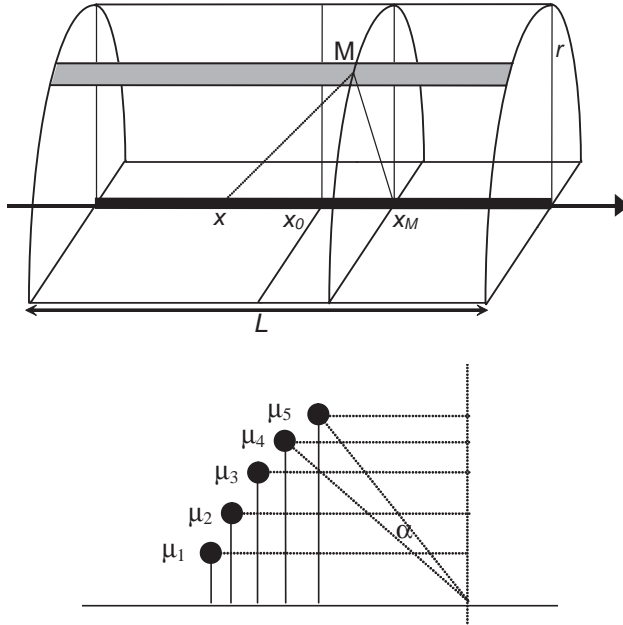
2.1.1.1. Principe

L'évaluation de la puissance acoustique émise par une rame de tramway est basée sur la mesure du champ de pression acoustique rayonné à travers la surface latérale d'un demi-cylindre fictif tel que le représente la Figure 1. Pratiquement, ce demi-cylindre est décrit par le déplacement du tramway sous un réseau de 5 microphones disposés en arc de cercle centré sur l'axe de la voie. L'hypothèse sous-jacente est que le tramway présente, du point de vue acoustique, une symétrie axiale, ce qui est justifié de par l'implantation des organes moteurs et des auxiliaires. Ce réseau de microphones permet par ailleurs de collecter l'information relative à la directivité verticale. L'approche théorique de la détermination de la puissance acoustique rayonnée à travers un demi-cylindre est exposée ci-dessous dans le cas d'une source linéaire.

Hypothèses : on assimilera dans ce qui suit le tramway à une source linéique uniforme de puissance acoustique unitaire $W_{l,m}$ (en W/m), de longueur L . La directivité est supposée constante autour de l'axe de la source. La pression est mesurée sur la surface latérale d'un demi-cylindre de rayon r , de même longueur que la ligne source. Le sol est supposé réfléchissant. On considère la pression quadratique produite par un élément de source de longueur dx situé en x , assimilé à une source ponctuelle. Cette pression, en un point M d'abscisse x_M situé à la distance r de l'axe de la voie, est :

$$p^2(x_M) = \frac{\rho c}{2\pi} \frac{W_{l,m}}{r^2 + (x - x_M)^2} dx \quad (1)$$

Figure 1 : schéma d'implantation des microphones pour la mesure de la directivité globale d'une rame de tramway. En haut : vue générale. En bas : vue en coupe



Pour la totalité de la rame de longueur L , considérée comme un ensemble de sources élémentaires ponctuelles incohérentes, et située entre les points $x_0 - L/2$ et $x_0 + L/2$:

$$p_L^2(x_M) = \frac{\rho c}{2\pi} \int_{x_0 - L/2}^{x_0 + L/2} \frac{W_{i,m}}{r^2 + (x - x_M)^2} dx \quad (2)$$

$$p_L^2(x_M) = \frac{\rho c W_{i,m}}{2\pi r} \left[\operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{x_M + L/2}{r} \right) - \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{x_M - L/2}{r} \right) \right] \quad (3)$$

où x_M est référencé ici par rapport au centre x_0 de la rame.

Application pratique : le calcul de la puissance émise est effectué en considérant la pression moyenne sur les 5 microphones et sur la longueur de la rame.

2.1.1.2. Configuration sélectionnée

Les mesures ont été effectuées sur les trois sites décrits au début du § 2.1. Les 5 microphones de la mesure de directivité ont été disposés en arc de cercle

(rayon : 5,1 m) et répartis selon un angle unitaire constant ($\alpha = 12^\circ$) (cf. Tableau 1 et Figure 2). Compte tenu de la topologie accidentée du site *Souillarderie*, cette disposition a été modifiée à cet endroit, de sorte à disposer les microphones dans un même plan vertical ; les hauteurs ont été calculées afin de conserver l'angle sectoriel unitaire α attribué à chaque microphone .

À l'exception du site *Souillarderie*, une mesure « classique » à 7,5 m de l'axe de la voie et à 1,2 m de hauteur a également été effectuée.

Tableau 1 : disposition des microphones pour la mesure de la directivité globale (sauf site Souillarderie)

Microphones	$\mu 1 (6^\circ)$	$\mu 2 (18^\circ)$	$\mu 3 (30^\circ)$	$\mu 4 (42^\circ)$	$\mu 5 (54^\circ)$
Hauteur	0,53 m	1,58 m	2,55 m	3,41m	4,13 m
Distance à l'axe	5,08 m	4,85 m	4,42 m	3,79 m	3,00 m

Lors de la campagne spécifique au bruit des auxiliaires, la configuration des microphones de directivité était identique aux autres sites (Tableau 1). Un microphone complémentaire a été installé dans les conditions normalisées habituelles de mesure du bruit au passage des véhicules (7,5 m de l'axe de la voie et 1,2 m de hauteur). De plus, ce microphone était situé à une distance latérale de 1,3 m sur la droite par rapport aux 5 autres microphones.

Figure 2 : mesure de la directivité d'une rame de tramway

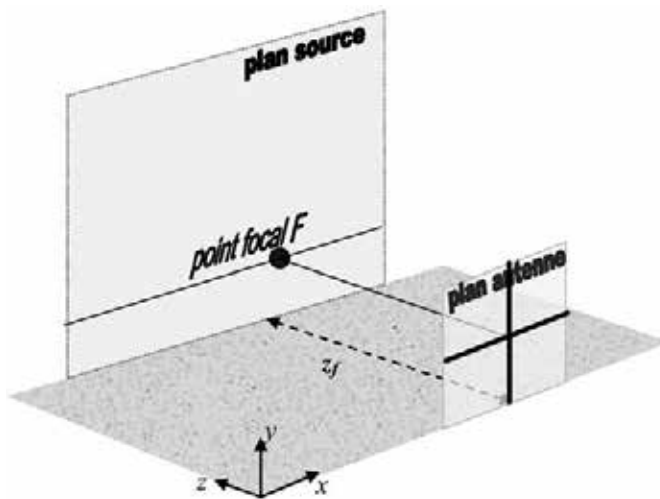


2.1.2. Localisation des sources

2.1.2.1. Principe

Antenne à 2 dimensions pour localiser les sources dans un plan – L'objectif est ici de caractériser les sources, en les identifiant et les localisant à la fois horizontalement (de l'avant à l'arrière de la rame) et verticalement (entre la voie et la toiture). À cette fin une antenne microphonique à deux dimensions a été utilisée : constituée de capteurs omnidirectionnels disposés dans un plan, et associée à un traitement approprié, elle se comporte comme un système de mesures directif permettant d'isoler les signaux en provenance d'une direction donnée³ [13]. Sur la base d'un compromis prenant en compte les performances du système (résolution spatiale), l'étendue de la gamme de fréquence et le coût matériel (acoustique et informatique), l'utilisation d'une antenne en croix a été retenue, reposant sur l'utilisation conjointe de deux branches linéaires perpendiculaires (Figure 3). En corollaire, on dispose au choix de deux antennes linéaires distinctes ou d'une antenne en croix.

Figure 3 : antenne et plan des sources

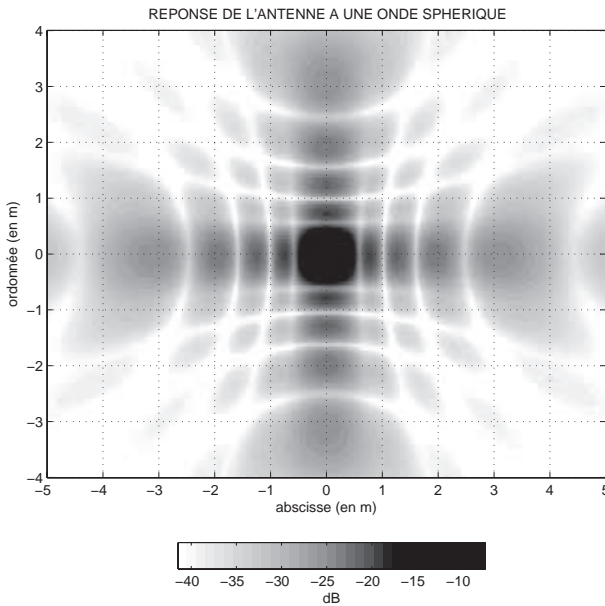


Focalisation pour une analyse en champ proche – Le traitement de l'antenne en croix repose sur le traitement préliminaire de chaque branche linéaire : chacune est d'abord focalisée sur un même point focal, lieu d'une source potentielle sur la rame. La méthode de focalisation est dérivée de la formation de voies classique, adaptée au champ proche ; elle agit comme un filtre spatial privilégiant les signaux de la zone source voisine du point focal, avec une forte sélectivité

³ Pour plus de détails, se reporter à l'annexe 3.

spatiale dans la seule direction parallèle à l'orientation de la branche. Le traitement de l'antenne en croix résulte ensuite de la corrélation des signaux focalisés issus des deux branches linéaires perpendiculaires, conférant à l'ensemble une sélectivité dans le plan (Figure 4).

Figure 4 : réponse de l'antenne en croix à 1000 Hz (espacement micros 15 cm)



Les performances d'une antenne en croix sont inférieures à celles d'une antenne linéaire, pour ce qui est de la largeur du lobe principal et du niveau des lobes secondaires. Sa réponse dans le plan présente des lobes plus importants dans la direction des deux branches, limitant ainsi la qualité de la séparation de sources voisines dans ces deux directions. Cependant, son intérêt réside dans l'utilisation d'un nombre réduit de microphones. Ceci devient d'autant plus sensible dans le cas où la bande d'analyse fréquentielle est relativement large : on peut alors adapter sur chaque branche plusieurs sous-antennes. Par ailleurs, elle offre l'intérêt, loin d'être anecdotique, de pouvoir disposer simultanément de deux antennes linéaires de façon à affiner certaines analyses dans une direction privilégiée. L'antenne en croix constitue en cela un compromis intéressant.

On peut choisir d'appliquer un coefficient de pondération à chaque capteur, de façon à augmenter la dynamique de détection des sources faibles. Ceci se fait toujours au prix d'une perte de résolution spatiale (capacité à séparer des sources proches). À dynamique donnée, c'est la pondération de Tchébycheff qui offre la meilleure résolution, et qui constitue pour ce critère un choix optimal.

Dédopplérisation pour analyser les sources mobiles – Lorsque la source se déplace, on peut choisir « d’attacher » le point focal à la source, i.e. de le déplacer en même temps que la source, et augmenter ainsi la durée d’observation. Cette opération nécessite de disposer d’informations suffisamment précises sur la cinématique de l’objet (trajectoire et vitesse). Le choix de la longueur du balayage horizontal attaché à la source résulte d’un compromis entre une bonne estimation statistique des propriétés de la source et des performances acceptables de l’antenne. La vitesse de déplacement de l’objet joue un rôle important dans ce compromis. Par ailleurs cette opération de « suivi des sources » dédopplérisé implicitement le signal source au point focal. Elle doit être renouvelée pour chaque point source potentiel du véhicule à scruter.

L’antenne est plus performante aux hautes qu’aux basses fréquences – Il faut enfin souligner que les performances de l’antenne, qu’elle soit linéaire ou en croix, ne sont pas uniformes sur toute la gamme de fréquence, ce qui perturbe l’observation de sources à bande large. Des études sont en cours pour améliorer les traitements sur cet aspect [14]. En attendant d’être opérationnelles, des compensations ont été introduites dans l’analyse des sources du tramway, sur la base de modèles supposés des sources. Ceci sera précisé lors des analyses du § 2.2.2.

2.1.2.2. Configuration et paramètres sélectionnés

Antenne et sites – Afin de garantir une excursion en fréquence suffisamment étendue pour chaque passage de la rame tout en restreignant le nombre de capteurs nécessaires, l’antenne est constituée de deux sous-antennes. Chaque sous-antenne consiste en un alignement de treize microphones équidistants (espacements respectifs de 5 cm et 15 cm pour chaque sous-antenne), disposés de façon à optimiser le nombre total de microphones nécessaires. Au total, l’antenne est formée de quarante et un capteurs (Figure 5). La gamme de fréquences de travail optimale s’étend des tiers d’octave 315 Hz à 4000 Hz. Elle sera exploitée du tiers d’octave 63 Hz au tiers d’octave 4000 Hz.

Les mesures par antenne microphonique pour l’analyse des sources de bruit ont été effectuées sur deux sites : le site en pose classique engazonnée et le site en pose sur semelle souple avec pavés (cf. annexe 1). La pose de voie influe sur le bruit de roulement, notamment via les vibrations du rail, tandis que le choix du revêtement de surface peut agir sur les bruits émis en fonction de ses qualités d’absorption. Ces deux paramètres (pose de voie et revêtement) varient simultanément entre les deux sites mesurés dans cette étude, avec des effets qui a priori devraient converger : fixation rigide du rail (limitant les vibrations donc le rayonnement acoustique du rail) et revêtement gazon (absorbant) pour le site *Ferrière*, fixation plus souple du rail et revêtement pavé (réfléchissant) pour le site *Longchamp*.

Le bruit de roulement est également fortement lié à l’état de surface des rails et des roues, notamment à leur rugosité dans le domaine des longueurs d’onde

Figure 5 : porte-antenne acoustique pour la localisation des sources



5–200 mm. Les mesures de rugosité réalisées à destination des analyses vibratoires du projet ne couvrent que très partiellement le domaine utile pour l'acoustique. Ceci correspond à l'intervalle 100–200 mm, qui concerne uniquement les bruits émis dans les très basses fréquences (< 140 Hz à 50 km/h). Sur ce domaine de longueur d'onde les deux sites *Ferrière* et *Longchamp* présentent un faible niveau de rugosité, similaire pour les deux sites, bien inférieur aux valeurs limites des réglementations (cf. Figure 55).

Pour les deux sites, trois positions d'antenne ont été utilisées :

- position basse, configuration en croix horizontale – verticale (désignée par *antenne +*) ;
- position basse, configuration en croix à 45° (désignée par *antenne X*) ;
- position haute, configuration en croix horizontale – verticale.

Les positions basses privilégient l'écoute des sources proches du sol, en particulier celles liées au bruit de roulement ; dans ce cas le centre de l'antenne se trouvait à une hauteur voisine de 1 mètre. La position haute vise à caractériser les sources situées en toiture ; le centre de l'antenne se trouvait dans ce cas à une hauteur voisine de 3 mètres. L'antenne en X apporte une performance en résolution accrue lorsqu'il y a alignement horizontal ou vertical de sources voisines. La configuration la plus employée concerne la disposition « + » en position basse (Figure 6).

La distance de mesure (distance entre le plan des microphones et le plan vertical contenant le rail le plus proche) était voisine de 2,30 mètres.

**Figure 6 : mesure sur le site « Longchamp »,
antenne en position basse**



Mesures cinématiques – L'utilisation conjointe d'une cellule infrarouge en bord de voie et de paires de plaques réfléchissantes placées sur le tramway au niveau de chaque bogie procure d'une part une mesure de la vitesse de passage pour chaque bogie, et d'autre part des informations sur la position de la rame synchrones avec les mesures acoustiques.

Traitement des signaux et édition des cartographies acoustiques – Les antennes sont focalisées dans le plan vertical incluant le rail le plus proche, avec suivi des sources. Les branches linéaires sont pondérées par des coefficients de Tchébycheff spécifiant une dynamique de 25 dB en onde plane (garantissant une dynamique minimale de 20 dB dans les conditions présentes en champ proche, et par suite 10 dB au minimum pour l'antenne en croix). Chaque passage a donné lieu à l'édition de cartographies, représentation de la distribution du niveau de bruit en sortie d'antenne en fonction de la position du point focal sur la rame. Ces représentations peuvent être réalisées par tiers d'octave pour toute la gamme de fréquence d'analyse (Figure 7), ou en niveau global (Figure 8). Dans le cas des analyses avec la branche linéaire horizontale, des traitements en bande fine (du type FFT) ont été effectués de façon à caractériser la répartition fréquentielle du bruit, notamment identifier la présence de raies spectrales ou de composantes à bande plus large⁴ (Figure 9). Les cartographies acoustiques constituent la base de l'analyse des sources qui sera détaillée au § 2.2.2.

⁴ Les analyses basées sur la seule branche horizontale de l'antenne permettent de localiser horizontalement les sources de l'avant à l'arrière de la rame, mais ne délivrent pas d'information sur leur localisation verticale.

Figure 7 : exemple de cartographie en tiers d'octave avec localisation bidimensionnelle des sources (passage à 32 km/h de la rame B, site de Ferrière)

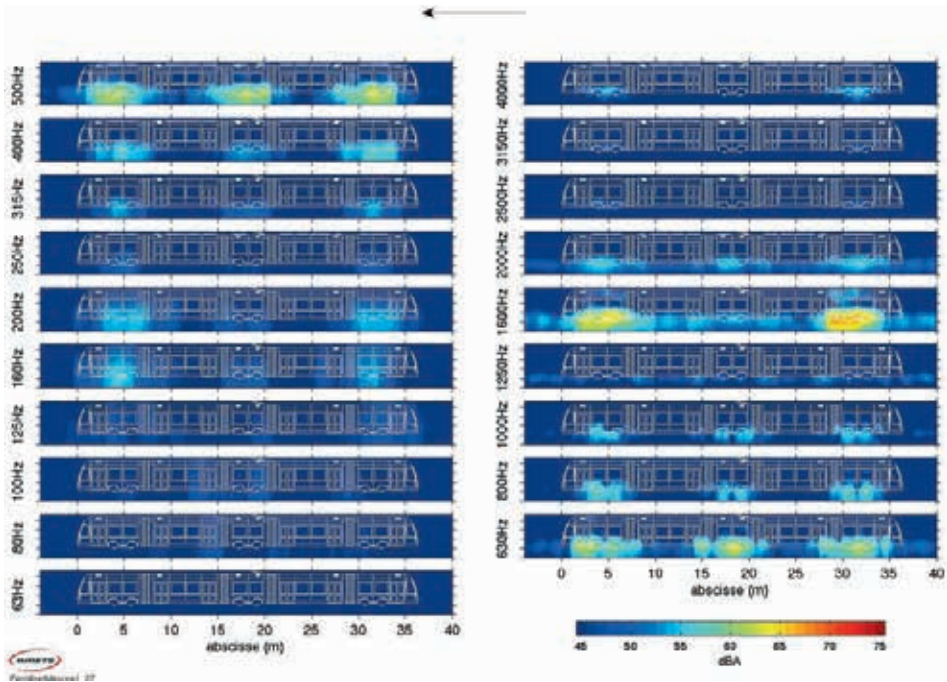
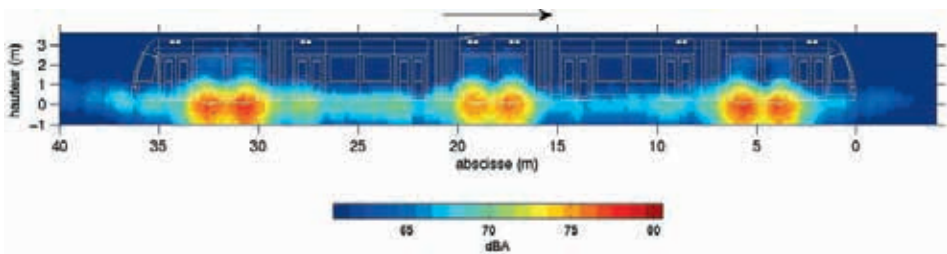


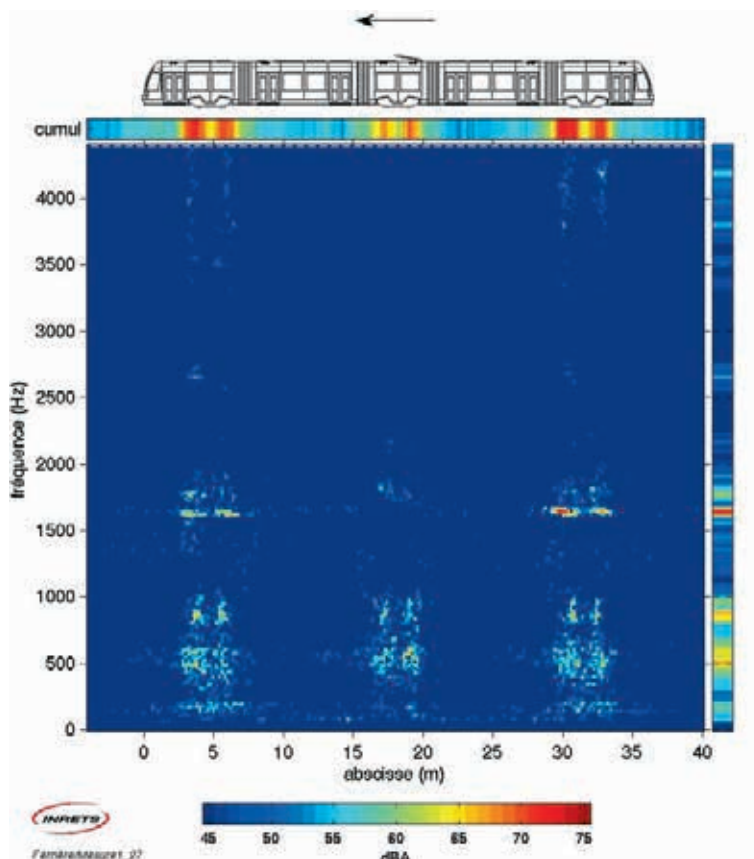
Figure 8 : exemple de cartographie globale (passage à 30 km/h de la rame B, site de Longchamp)



2.2. Analyse de l'émission

Les deux types de mesures acoustiques utilisées ont délivré des informations à des échelles différentes (resp. rame complète et sources). Elles ont également été employées de façon complémentaire, notamment pour la directivité verticale des sources.

**Figure 9 : exemple de cartographie en bande fine avec localisation horizontale des sources (passage à 32 km/h de la rame B, site de Ferrière).
Cumul fréquentiel : de 140 Hz à 4400 Hz**



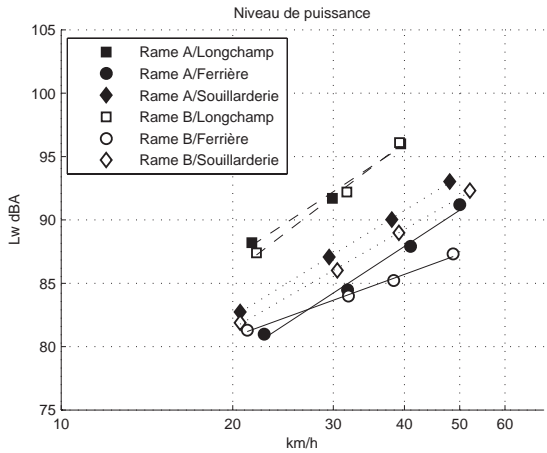
2.2.1. À l'échelle de la rame complète

La puissance acoustique a été évaluée à l'aide du dispositif décrit au § 2.1.1. La Figure 10 représente l'évolution de la puissance acoustique linéique globale $W_{l,m}$ émise par les deux types de rame circulant sur les trois sites sélectionnés. Les résultats obtenus sont commentés dans le § 2.2.1.3 consacré à l'analyse de quelques paramètres influençant l'émission acoustique des rames de tramway.

2.2.1.1. Validation de la puissance estimée à l'aide des mesures réalisées à 7,5 m

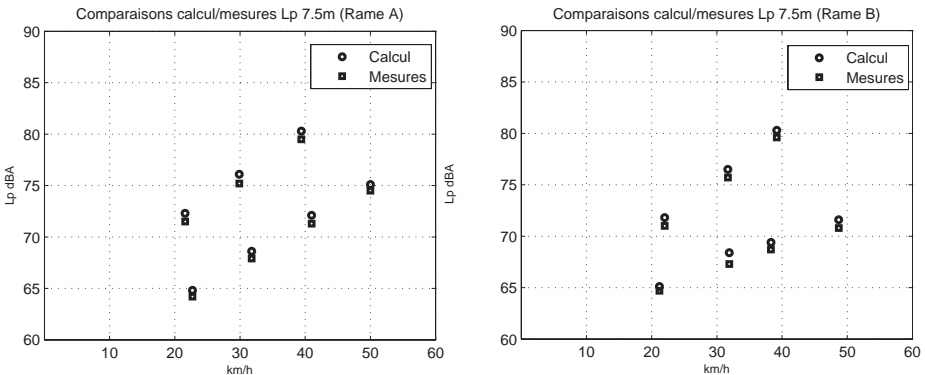
La puissance estimée est supposée être émise par une ligne source de longueur égale à celle de la rame de tramway considérée. Si l'on suppose que cette ligne source présente un rayonnement cylindrique, le niveau de pression est donné par la relation (3).

Figure 10 : évolution en fonction de la vitesse de la puissance linéique émise par les rames A et B circulant sur les sites *Ferrière*, *Longchamp* et *Souillarderie*



Les niveaux sont calculés à la distance $r = 7,5$ m en utilisant cette relation, puis comparés aux niveaux de bruit moyens effectivement mesurés à 7,5 m pendant la durée des passages de la rame pour une classe de vitesse donnée. Les écarts de niveaux entre le calcul et la mesure n'excèdent pas 0,8 dB, comme le montre la Figure 11.

Figure 11 : calcul de la pression acoustique attendue à 7,5 m en utilisant la puissance acoustique moyenne et comparaison avec les niveaux de bruits mesurés (à gauche : rame A – à droite : rame B)



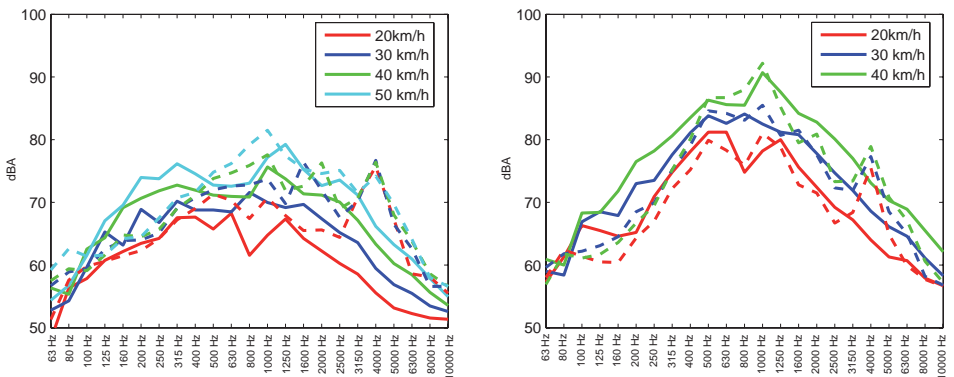
2.2.1.2. Analyse spectrale

La puissance moyenne a également été déterminée par bande de tiers d'octave, dans la gamme [63 Hz–10 kHz]. La Figure 12 représente les spectres des rames A et B circulant sur les sites *Ferrière* et *Longchamp*.

L'analyse de ces spectres appelle les commentaires suivants :

- Le comportement des rames A et B est sensiblement différent, quelle que soit la nature de la plateforme. Ainsi, pour les fréquences inférieures à 600 Hz, le niveau de puissance émis par la rame B varie peu avec la vitesse, contrairement à ce qui peut être observé pour la rame A, pour laquelle le niveau de puissance émis croît avec la vitesse sur toute la plage de fréquence. On notera par ailleurs que les niveaux de puissance dans cette gamme de fréquence sont plus élevés à *Ferrière* (site absorbant) qu'à *Longchamp* (site réfléchissant).
- Concernant plus particulièrement la rame A, les spectres de puissance affichent un pic marqué dans la gamme 800 Hz–1,2 kHz (*Ferrière*) et dans la gamme 800 Hz–1 kHz (*Longchamp*) dont l'amplitude varie avec la vitesse.

Figure 12 : spectres de puissance (en dB(A)) des rames A (traits continus) et B (traits pointillés) déterminés pour la classe de vitesse 30 km/h sur les sites de *Ferrière* (à gauche) et *Longchamp* (à droite)



2.2.1.3. Paramètres influençant l'émission acoustique des rames de tramway

Nous avons retenu dans cette analyse trois paramètres pouvant influencer l'émission acoustique des tramways. Les résultats présentés dans le Tableau 2 sont exprimés pour deux vitesses (20 et 40 km/h) en niveaux relatifs, 0 dB étant le niveau de référence pour la configuration la plus bruyante. Ceux présentés dans le Tableau 3 sont également exprimés en niveaux relatifs, 0 dB correspondant au niveau observé pour une configuration donnée à la vitesse de 20 km/h.

La lecture de ces tableaux permet de dégager les observations suivantes :

Longchamp : Effet de site important, la pose sur semelle souple associée au revêtement pavé s'avère de loin la plus bruyante. Ceci entraîne un fort bruit de roulement, ce qui a pour conséquence de « gommer » un éventuel effet de rame : celles-ci émettent sensiblement le même niveau de bruit sur toute la plage de vitesse observée.

Ferrière : Effet de site important, pour partie dû à la pose classique et à la nature absorbante du revêtement herbeux. Ce qui en fait la configuration de voie la moins bruyante parmi celles que nous avons sélectionnées. L'effet de rame est sensible et augmente sensiblement avec la vitesse. Ceci peut être expliqué par la présence, sur la rame B, d'une source liée à la traction, située près des essieux moteurs, émettant essentiellement dans le tiers d'octave centré sur 4 kHz, et devenant prépondérante lorsque la rame circule à basse vitesse.

Souillarderie : Type de pose de voie relativement silencieux, ce qui avait déjà été observé lors de la campagne expérimentale effectuée en 2000. Peu d'effet de rame sensible. L'écart observé entre rames est constant sur toute la plage de vitesse.

Tableau 2 : influence du type de pose de voie, du revêtement et du type de rame

Site		20 km/h			40 km/h		
		<i>Longch.</i>	<i>Ferr.</i>	<i>Souill.</i>	<i>Longch.</i>	<i>Ferr.</i>	<i>Souill.</i>
	Rame A	0	-8,0	-4,7	0	-8,4	-6,0
	Rame B	0	-6,0	-5,0	0	-10,6	-7,0
Rame		Rame A	Rame B		Rame A	Rame B	
	<i>Longchamp</i>	0	-1,1		0	-0,4	
	<i>Ferrière</i>	0	-1,0		0	-2,6	
	<i>Souillarderie</i>	0	-1,0		0	-1,3	

Tableau 3 : influence de la vitesse. Niveaux relatifs référencés par rapport à ceux observés, pour une configuration donnée, à la vitesse de 20 km/h

	20 km/h	40 km/h
Rame A / <i>Longchamp</i>	0	+6,3
Rame A / <i>Ferrière</i>	0	+5,9
Rame A / <i>Souillarderie</i>	0	+7,5
Rame B / <i>Longchamp</i>	0	+7,0
Rame B / <i>Ferrière</i>	0	+2,4
Rame B / <i>Souillarderie</i>	0	+7,3

2.2.1.4. Directivité globale

Par souci de concision, nous nous attacherons dans ce paragraphe à présenter uniquement les résultats obtenus en niveaux globaux. Le lecteur désirant obtenir des informations complémentaires sur la directivité des rames en bandes de tiers d'octave se reportera aux résultats expérimentaux consignés dans les références [15] et [16]. Pour une configuration de passage [rame/site] donnée, la directivité globale a été évaluée sur l'ensemble du passage de la rame devant le

dispositif microphonique, c'est-à-dire que le niveau de pression pris en compte pour un microphone donné est le niveau de pression moyen relevé sur le passage de la rame. Les niveaux indiqués sont relatifs : pour chaque diagramme de directivité, le niveau référencé à 0 dB correspond au niveau moyen relevé sur le microphone n° 1 (cf. Figure 1). Les mesures de directivité ont été exploitées pour construire le modèle d'émission des rames circulant sur les sites de *Longchamp* et *Ferrière*. Les diagrammes de directivité suivants concernent par conséquent les deux types de rames circulant sur ces sites.

On notera que la directivité globale des rames est peu marquée (notamment dans le cas du site *Ferrière*), ce qui a déjà été observé dans une précédente étude (Figures 13 et 14). Les directivités sont beaucoup plus marquées en bande de tiers d'octave, ainsi que pour certaines sources (cf. Figure 39).

Figure 13 : site de *Ferrière*. Diagrammes de directivité des rames A et B. Vitesse : 30 km/h

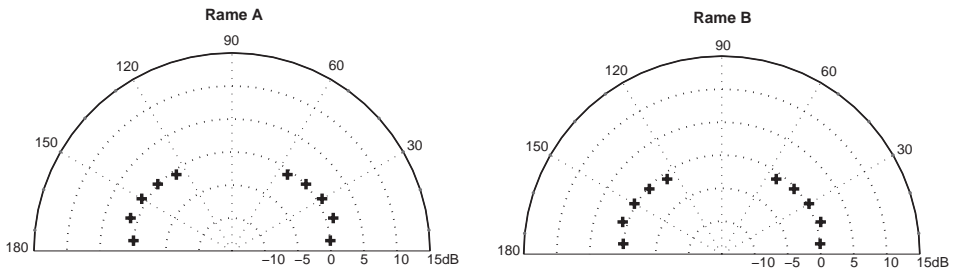
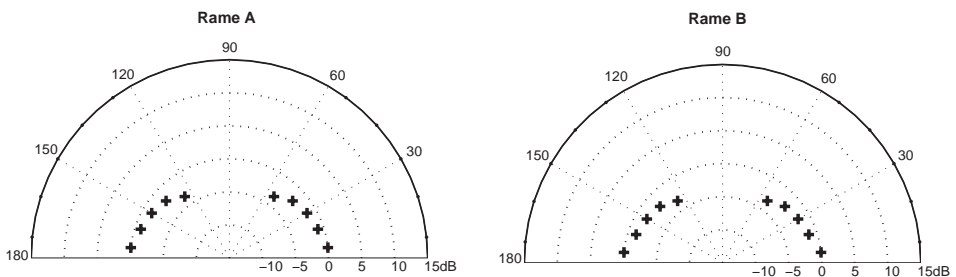


Figure 14 : site de *Longchamp*. Diagrammes de directivité des rames A et B. Vitesse : 30 km/h



2.2.2. À l'échelle des sources

Les mesures par antenne microphonique, et plus particulièrement les cartographies acoustiques qui en découlent, permettent de :

- localiser les zones sources principales ; une zone source correspond à une zone spatiale limitée de la rame, qui rayonne du bruit. Elle n'est pas néces-

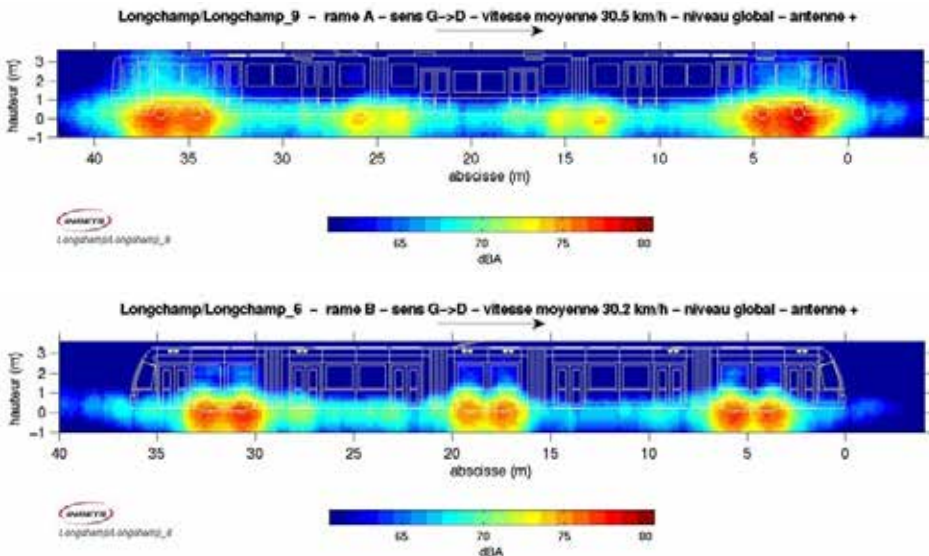
sairement associée à un élément ou phénomène physique unique, mais peut être la superposition de diverses contributions voisines ;

- extraire les caractéristiques de chaque zone source (niveau acoustique, caractéristiques fréquentielles) ;
- analyser le comportement des zones sources principales en fonction des paramètres de fonctionnement et de l'environnement (vitesse, pose de voie, rame).

Certaines anomalies observées avec l'antenne en croix, résultant notamment de différences de niveau inattendues et occasionnelles entre les résultats des deux branches linéaires, ainsi que la différence de nature entre les sources observées, ont conduit à adapter la procédure d'analyse au type de source (compacte ou étendue). D'une façon générale, l'antenne en croix a été utilisée pour la détection et l'analyse qualitative des zones sources et des comportements, l'analyse quantitative reposant sur l'exploitation individuelle des branches linéaires.

Localisation des zones sources principales – Les rames de type A et B présentent des différences locales liées à des choix technologiques distincts sur la motorisation ou les auxiliaires. Cependant elles ont un comportement général similaire qui peut être résumé ici. En premier lieu, l'essentiel des sources se trouve en partie basse de la rame (pour exemple Figure 15). Les sources de bruit principales sont pour une part localisées au voisinage des bogies et des roues,

Figure 15 : cartographie acoustique globale des deux types de rames sur le site Longchamp – haut : rame A, vitesse moyenne 30,5 km/h – bas : rame B, vitesse moyenne 30,2 km/h



avec des différences notables entre bogies moteurs et porteurs, et pour une autre part réparties sur toute la longueur de la rame via une *source étendue* proche du sol ; elles sont liées notamment au bruit de roulement. Le type de pose de voie est un paramètre essentiel pour ces sources. D'autres sources, secondaires et dépendant du type de rame, seront commentées brièvement. Les unités de ventilation/climatisation sont les seules sources détectées en partie haute des rames (rame B uniquement) ; lors des mesures au passage avec la climatisation arrêtée, elles se limitent au bruit résiduel de la ventilation. La *climatisation* a été étudiée au moyen d'une campagne dédiée.

2.2.2.1. Zones bogies moteurs et zones bogies porteurs

D'une façon générale, les sources de bruit se concentrent au passage des roues, sous la forme de bruit large bande. S'y ajoutent parfois des raies fréquentielles au voisinage des roues, dont la fréquence varie avec la vitesse, probablement dues à des contributions moteurs ou équipements électriques voisins (selon la rame).

Procédure d'analyse quantitative – Les caractéristiques de l'antenne permettent de différencier les roues d'un même bogie sur une grande partie de la gamme de fréquence. Cependant l'évaluation quantitative de la contribution de chaque roue peut être perturbée par celle de l'essieu voisin ainsi que d'éventuelles sources proches, au moins pour les fréquences basses de la gamme d'analyse ; l'importance de cette perturbation dépend de la fréquence. Considérant que les deux roues d'un même bogie ont un comportement similaire⁵, on choisit d'analyser le bogie dans son ensemble, en exploitant pour cela les mesures quantitatives issues de la seule branche verticale. La *zone bogie* étudiée ainsi comprend : la contribution des deux roues successives, de la portion de voie et de rail située sous le bogie, des éventuels équipements voisins du bogie (exemple : les moteurs-roues de la rame B).

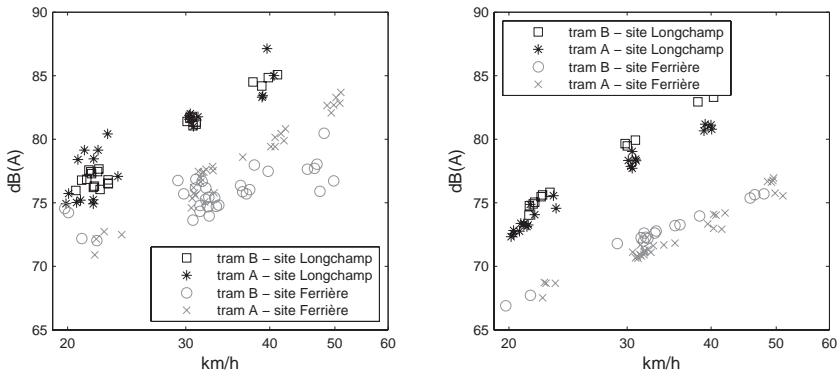
On recherche le niveau de bruit correspondant au monopôle équivalent, en notant le niveau de pression maximum détecté au passage de la zone bogie devant l'antenne verticale. Chaque passage de bogie délivre ainsi une valeur de niveau de pression au centre de l'antenne, pour chaque tiers d'octave. Le niveau global est calculé en sommant énergétiquement les tiers d'octave. Des différences peuvent apparaître entre bogies de même type sur une rame, notamment sur la rame A : on a pu vérifier que ceci est dû à des différences individuelles et non fonctionnelles (écarts entre droite et gauche, quel que soit le sens de passage). Il n'y a pas d'information disponible permettant de spécifier l'état de surface des différentes roues. Dans le but d'analyser le comportement moyen d'un type de bogie, tous les bogies d'un même type sont agrégés, de sorte à considérer sans autre distinction les comportements des *zones bogies moteurs* et ceux des *zones bogies porteurs*, pour chaque type de rame.

⁵ Ce sont deux réalisations d'une même famille de matériel, on s'intéresse ici à un comportement moyen.

Tous les résultats présentés, concernant l'émission des bogies, correspondent à des niveaux de pression mesurés au centre de l'antenne (soit une distance de 2,34 m du rail le plus proche et une hauteur de 1,01 m), lorsque la source se situe au droit du point de mesure.

La Figure 16 résume l'ensemble des résultats en niveau global pour les différents paramètres : vitesse, type de bogie, type de rame, type de pose de voie. On note une forte dispersion des valeurs pour la zone bogie moteur, due pour partie à la forte variabilité de niveau des raies fréquentielles.

Figure 16 : niveau global des zones sources bogies, au centre de l'antenne (gauche : bogies moteurs – droite : bogies porteurs)



Effet de la vitesse La vitesse est un paramètre essentiel pour le niveau de bruit des bogies. En niveau global on peut évaluer l'augmentation de l'ordre de 7,5 à 9 dB(A) entre 20 et 40 km/h (selon la rame, le site et le type de bogie). Cependant son effet varie avec la fréquence : on ne note aucun effet pour certains tiers d'octave, une croissance régulière pour d'autres. On remarque également la présence des raies, qui glissent d'un tiers d'octave à l'autre quand la vitesse augmente (pour exemple : Figure 17).

Pour la rame A, l'effet de la vitesse est important sur l'ensemble de l'axe des fréquences (Figure 18). Pour la rame B la vitesse agit sur le niveau de bruit principalement aux moyennes et hautes fréquences (sup. à 500 Hz) (Figure 19). Ce comportement est similaire pour les bogies moteurs et porteurs. On peut traduire ces remarques en indiquant que la vitesse ne modifie pas la répartition spectrale de la rame A, alors que comparativement elle renforce davantage les fréquences élevées pour la rame B.

Bogie moteur vs bogie porteur – La zone bogie moteur est généralement plus bruyante que la zone bogie porteur. Ceci peut s'expliquer en grande partie par la présence d'équipements liés à la traction. Rappelons que l'état de surface des roues n'est pas connu. La prédominance des zones bogies moteurs

Figure 17 : effet de la vitesse sur le niveau de bruit des zones sources bogies – rame B – site *Ferrière* (bogies moteurs – bogies porteurs)

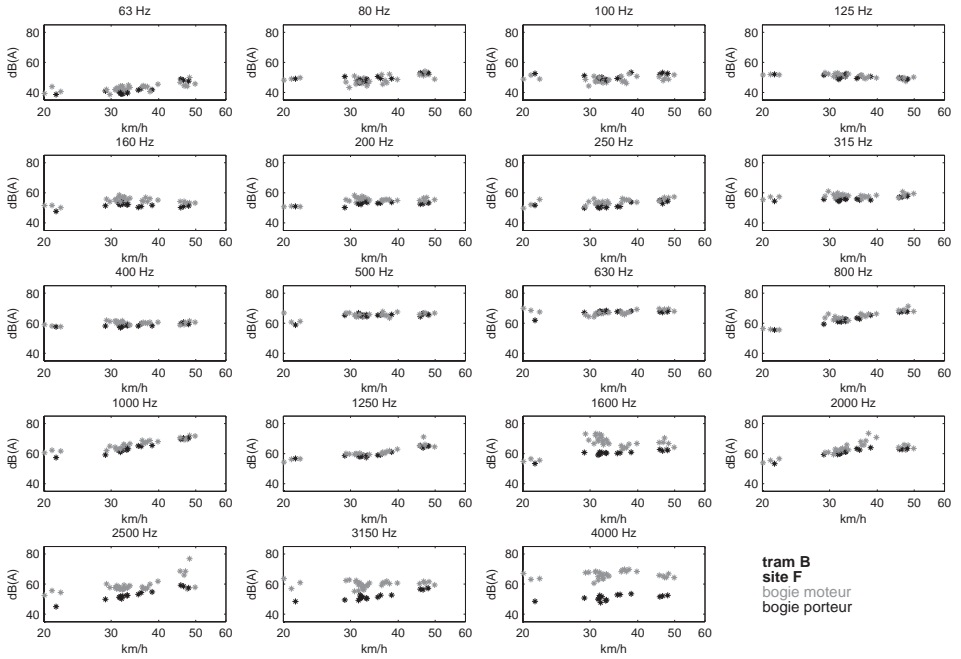


Figure 18 : effet de la vitesse sur le spectre des zones sources bogies moteurs – rame A – site *Longchamp*

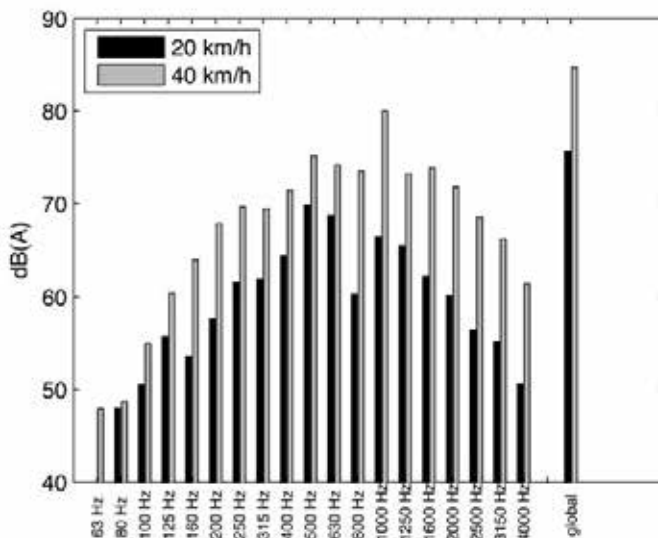
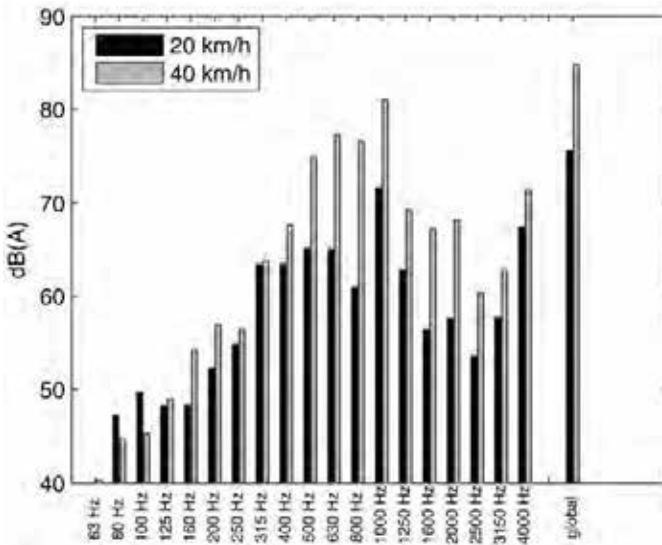


Figure 19 : effet de la vitesse sur le spectre des zones sources bogies moteurs – rame B – site Longchamp

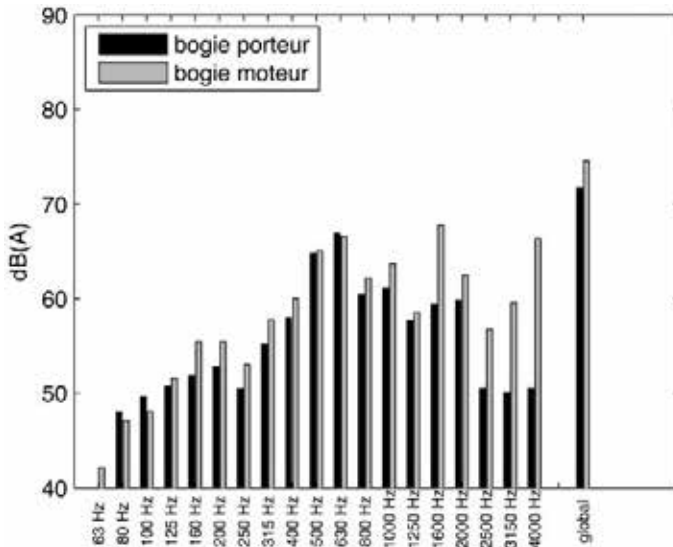


se produit, avec un écart variable, sur l'ensemble de la gamme de fréquence (exemple : Figure 20⁶), avec toutefois des différences entre les deux types de rames :

- rame A : les zones bogies moteurs sont plus bruyantes que les zones bogies porteurs, pour la plupart des tiers d'octave. Les composantes large bande s'amplifient avec la vitesse, sans toutefois modifier leur répartition spectrale. Des raies fréquentielles moyenne fréquence (530 Hz à 20 km/h, et sa première harmonique) et basse fréquence (120 Hz à 20 km/h), variables avec la vitesse, se superposent à l'ensemble sur les bogies moteurs uniquement. Des différences locales d'occurrence de ces raies peuvent apparaître entre le bogie moteur de droite et celui de gauche.
- rame B : tous les types de bogie comportent un spectre large bande similaire et de niveau équivalent depuis les basses fréquences jusqu'à 2000 Hz, avec prédominance des bandes 400-600 et 800-1000, sans influence de la vitesse sur cette répartition. En revanche les bogies moteurs présentent à toutes les vitesses un spectre large vers les hautes fréquences (dont le tiers d'octave 4000 Hz) qui coïncide avec la position des moteurs-roues. Enfin on note une raie fréquentielle, dont la fréquence dépend de la vitesse, sur les bogies moteurs uniquement (1030 Hz à 20 km/h), qui n'a été observée que lors des mesures sur le site *Ferrière*.

⁶ Les spectres sont tracés à partir d'une régression polynomiale effectuée sur les mesures pour chaque tiers d'octave en fonction de la vitesse.

Figure 20 : spectre de la zone bogie porteur (resp. moteur) – rame B – site *Ferrière* – 30 km/h



Effet du type de rame – Il ne s’agit pas ici de comparer à proprement parler les rames entre elles, mais plutôt de souligner une échelle de variation entre deux types issus de générations différentes, comportant des choix technologiques distincts, notamment sur le type de motorisation et l’implantation (moteurs-roues pour la rame B). En niveau global, la zone bogie moteur de la rame A tend à surpasser celle de la rame B, notamment sur le site *Ferrière* où l’écart peut atteindre 3 dB(A) aux vitesses élevées (voir Figure 16). Dans tous les cas cette prévalence pour la rame A se manifeste principalement aux basses fréquences (jusqu’à 400-500 Hz), alors que la rame B prédomine toujours fortement à 4000 Hz (Figure 21⁶).

En revanche la zone bogie porteur de la rame B prédomine légèrement, l’écart pouvant approcher 2 dB(A) sur le site *Longchamp*, notamment aux moyennes fréquences.

Effet du site (type de pose de voie/revêtement) – L’effet du site est primordial. Il agit tant sur la génération du bruit de roulement (rugosité des rails, pose de voie) que sur l’absorption des bruits émis (revêtement de surface).

Comme argumenté précédemment, on peut supposer que l’état de surface des rails est correct pour les deux sites. Les mesures indiquent que l’effet du site peut atteindre 8 dB(A) sur la zone bogie moteur et 9 dB(A) sur la zone bogie porteur, à même vitesse, en faveur du site en pose classique engazonné (*Ferrière*). Les écarts entre sites concernent essentiellement les fréquences supérieures à 200 Hz, pour les deux types de bogies. La Figure 22⁶ montre par exemple des écarts importants de 315 à 1250 Hz, pour la rame B. Ces écarts sont trop élevés

pour être simplement liés à l'atténuation due à l'absorption (revêtement de surface) ; on peut noter que cela coïncide avec la gamme de fréquence classique où le rayonnement d'un rail prédomine.

Figure 21 : effet du type de rame – zone bogie moteur – site Ferrière – 30 km/h

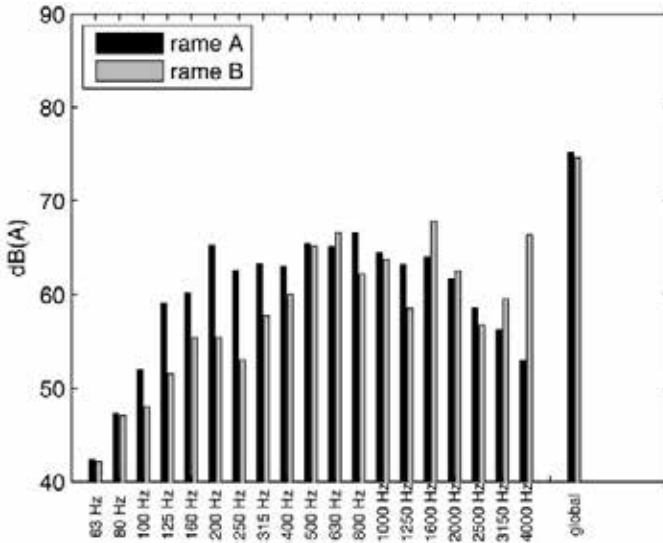
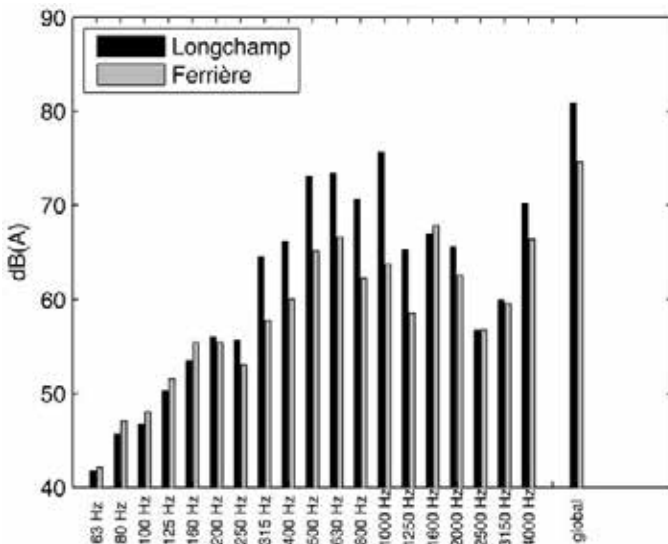


Figure 22 : effet du site – zone bogie moteur – rame B – 30 km/h



2.2.2.2. Zone source étendue voie/rail

Il apparaît clairement sur les cartographies qu'une zone source particulière se trouve en partie basse de la rame, « uniformément » étendue sur toute la longueur. Elle est présente dans certaines gammes de fréquences particulières, mais quasiment inexistante dans d'autres. On peut raisonnablement préjuger de la contribution du rayonnement du rail, de la plate-forme, ainsi que de sources situées sous la caisse après réflexion sol-caisse (éventuellement multiples).

L'origine du rayonnement du rail et de la plate-forme provient de la rugosité au contact roue/rail, génératrice de vibrations. Les vibrations transmises à la plate-forme sont susceptibles de rayonner dans le domaine des basses, voire très basses fréquences, en limite de la gamme d'analyse de l'étude acoustique (voir chapitre « Vibrations dans le sol »). Par ailleurs les vibrations générées aux contacts roue/rail se propagent dans le rail ; elles sont caractérisées par leur nombre d'onde et leur atténuation, directement reliés à la pose de voie via l'ensemble des paramètres mécaniques. Dans le cas des poses utilisées en section urbaine, seule la partie supérieure du rail peut rayonner. L'efficacité de rayonnement est liée au rapport du nombre d'onde dans le rail et du nombre d'onde dans l'air. À fréquence donnée, le rail est équivalent à une source étendue cohérente sur toute sa longueur, située de part et d'autre de la zone de contact, dont la longueur dépend du facteur d'atténuation de l'onde dans le rail.

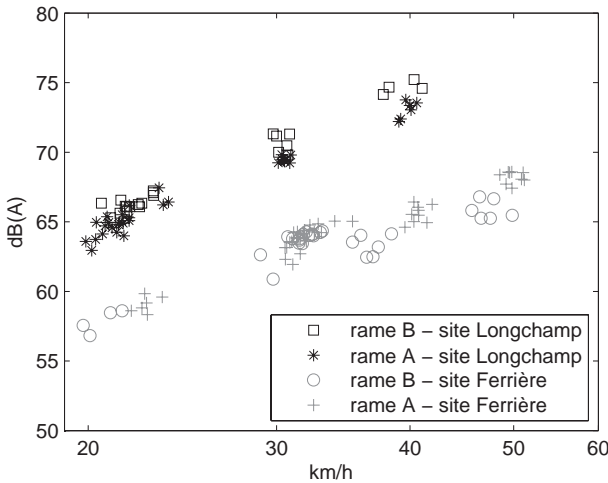
La procédure actuelle ne permet pas de séparer raisonnablement la contribution acoustique du rail de celle d'autres sources en partie basse. Par la suite l'ensemble sera désigné indifféremment par *zone source étendue* ou par l'appellation, un peu réductrice, *zone source voie/rail*.

Procédure d'analyse quantitative – T. Kitagawa [17] a montré que la procédure classique d'une antenne focalisée convient mal à une source cohérente comme le rail. Dans le cas présent en première approximation, la zone source voie-rail est considérée comme une source linéique, située sur le sol, dont l'émission peut être représentée par une fonction continue de la fréquence f et de l'abscisse x : $s(x, f)$. Considérant que sur la partie centrale des caisses et à distance suffisante des bogies, mesurée avec l'antenne en position basse, aucune autre source ne vient contribuer/perturber l'observation de la source étendue (en particulier pas de source en partie haute), l'analyse quantitative s'appuie sur la branche horizontale de l'antenne. Pour un point focal donné, l'antenne focalisée entend la portion de voie située dans la fenêtre spatiale d'écoute, au travers du filtre spatial équivalent. Après correction de l'étendue du filtre (variable avec la fréquence), on détermine un niveau de bruit en sortie de l'antenne, associé à l'émission d'un mètre linéaire de voie. Ce calcul est réitéré pour tout point focal dans un intervalle horizontal situé au centre de chaque voiture ; on délivre alors la valeur moyenne obtenue sur cet intervalle, c'est-à-dire un niveau de bruit moyen par mètre linéaire de voie pour chaque voiture, pour chaque tiers d'octave. L'intervalle d'analyse a été fixé respectivement à 3,4 et 6,2 m pour les voitures des rames A et B. La rame A est formée de trois voitures ; la voiture centrale repose uniquement sur des bogies porteurs, alors que les deux autres sont équipées d'un bogie moteur et d'un bogie porteur. La rame B est constituée de deux voitures identiques.

Tous les résultats présentés, concernant l'émission de la zone étendue voie-rail, correspondent à des niveaux de pression mesurés au centre de l'antenne (soit une distance de 2,34 m du rail le plus proche et une hauteur de 1,01 m), pour une section de la zone source de longueur 1 mètre et située au droit du point de mesure.

Les niveaux globaux pour l'ensemble des conditions de passage, pour les deux sites et les deux rames, sont synthétisés dans la Figure 23. On souligne à nouveau l'écart important entre les deux sites, dont l'effet est prépondérant sur celui du type de rame. On peut également noter que la prépondérance du bruit induit au passage d'une rame sur un site n'implique pas ici sa prépondérance sur l'autre site. Ces constatations en niveau global peuvent différer si on effectue une analyse fréquentielle.

Figure 23 : niveau global de la zone source étendue voie/rail, par mètre linéaire de voie, mesuré au centre de l'antenne



Effet de la vitesse – La vitesse joue un rôle important pour le bruit en provenance de la zone source étendue. En niveau global, la croissance est linéaire en fonction de $\log(\text{vitesse})$ pour le site *Longchamp*, elle est un peu moins régulière sur le site *Ferrière*. Cette croissance varie de 7 à 9,5 dB(A) entre 20 et 40 km/h, en fonction de la configuration rame/site.

En revanche le comportement diffère d'un tiers d'octave à l'autre (pour exemple Figure 24) : la loi de variation du niveau avec la vitesse (constant, linéaire, concave ou convexe) dépend de la bande de fréquence et de la configuration rame/site.

Le spectre de la rame B est faible au-dessous de 315 Hz pour les deux sites, et reste faible à toutes les vitesses : la vitesse renforce les moyennes et hautes fréquences (500 à 2500 Hz) (Figure 26). En revanche pour la rame A, l'effet de la vitesse s'applique sur l'ensemble du spectre, et la répartition spectrale du bruit est peu modifiée (Figure 25).

Figure 24 : effet de la vitesse sur le niveau de la zone source étendue voie/rail, mesuré au centre de l'antenne – rame B (site Longchamp – site Ferrière)

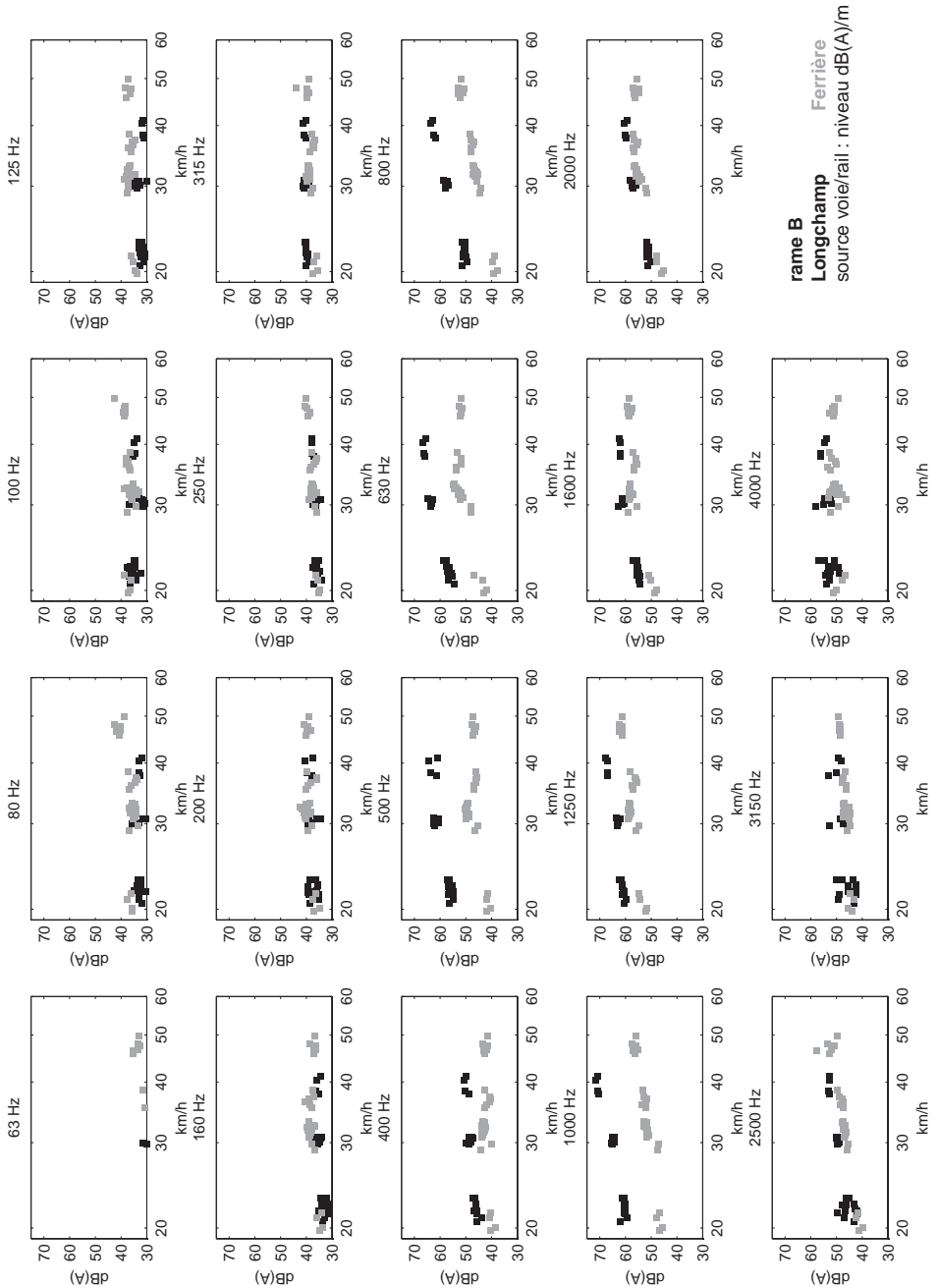
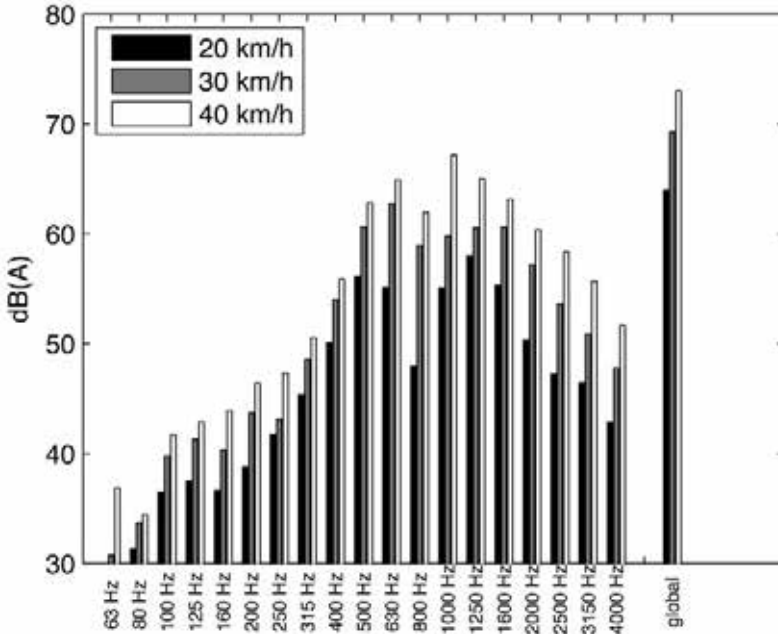


Figure 25 : effet de la vitesse sur le spectre de la zone étendue voie/rail – rame A – site Longchamp



Effet de la rame – En niveau global l’effet du type de rame est peu important à toutes les vitesses. La rame B est globalement légèrement plus bruyante sur le site *Longchamp*, mais avec un effet très inégal en fréquence. Les différences sont nettes aux basses fréquences jusqu’à 630-800 Hz avec une contribution plus forte de la rame A (Figure 27) ; mais leur implication sur le niveau global reste faible. On peut noter une contribution à 4000 Hz pour la rame B, qui peut être un résidu de la source observée au niveau des roues motrices.

Effet du type de voiture (pour rame A uniquement) – Il y a globalement très peu de différences entre les deux types de voitures (Figure 29). On peut toutefois noter des écarts à 40 km/h, dans la bande de fréquence 160 à 400 Hz avec une prédominance des voitures « motrices » sur la voiture « porteuse », qui peut être liée au voisinage des équipements de traction.

Effet du site – Le site de *Longchamp* génère toujours un niveau de bruit global nettement supérieur au site *Ferrière*, aux moyennes et hautes fréquences (400-4000 Hz). On remarque cependant que le site *Ferrière* est légèrement plus bruyant aux basses fréquences 80-200 Hz pour les deux types de rames (Figure 24 et Figure 28).

Figure 26 : effet de la vitesse sur le spectre de la zone étendue voie/rail – rame B – site Longchamp

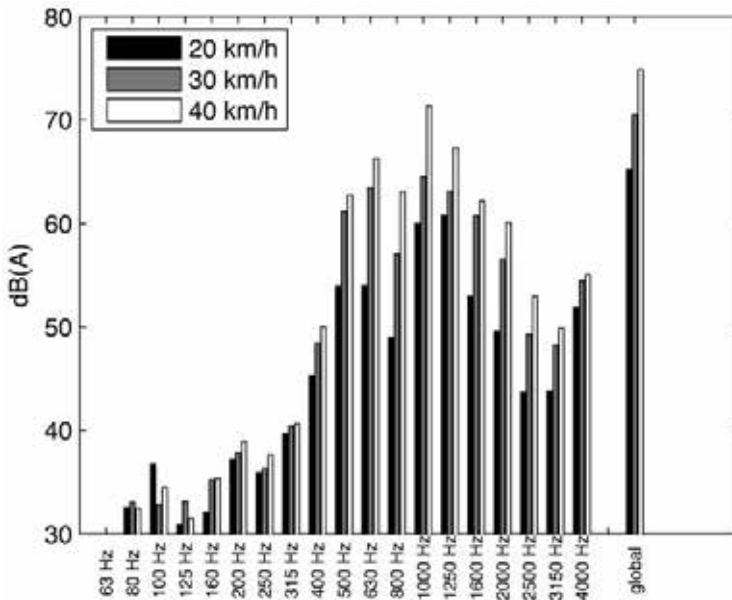


Figure 27 : effet du type de rame – zone source voie/rail – site Ferrière – 30 km/h

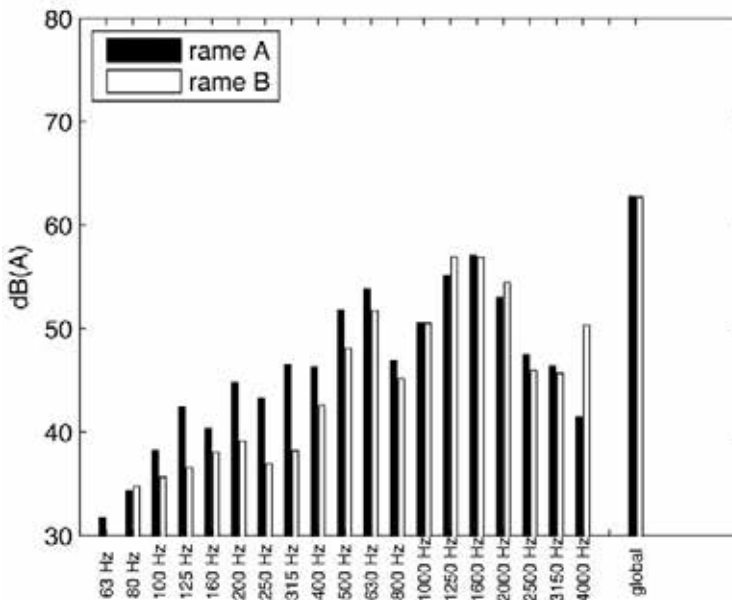


Figure 28 : effet du site – zone source voie/rail – rame B – 30 km/h

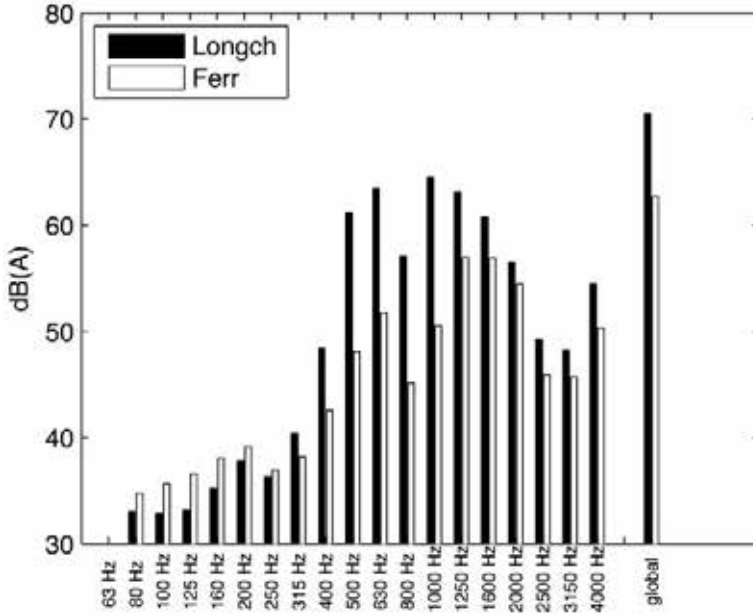
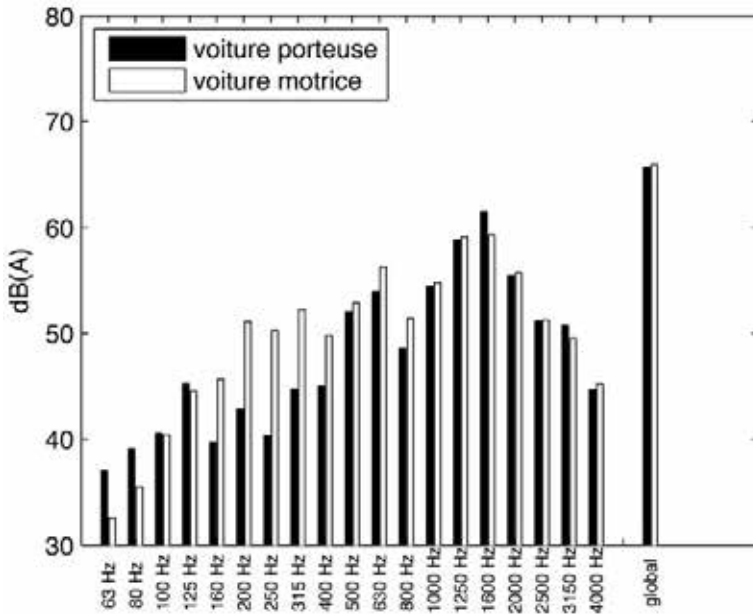


Figure 29 : effet du type de voiture (rame A) sur le bruit de la zone source voie/rail – site Ferrière – 40 km/h



2.2.2.3. Climatisation

La contribution de la climatisation concerne la rame de type B uniquement. Lors de la campagne de mesure au passage des rames sur les différents sites, le système de climatisation n'était pas en fonctionnement. Les mesures effectuées avec l'antenne en position haute montrent cependant la présence d'un bruit résiduel, faible, lié à la ventilation.

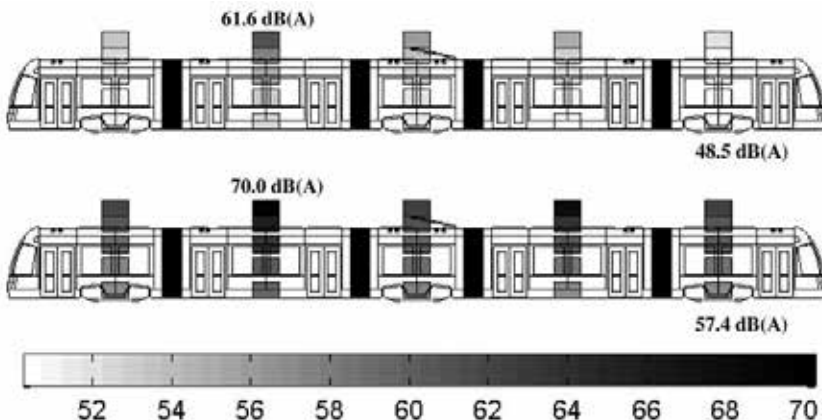
L'émission du bruit lié à la climatisation a été mesurée lors de la campagne complémentaire au moyen des 5 microphones de directivité, avec la rame à l'arrêt, au niveau de chaque bogie et en milieu de chaque voiture (cf. § 2.1). Les mesures ont été effectuées successivement avec le système de climatisation arrêté, puis en marche en régime maximal. Dans ce dernier cas, on évalue donc la contribution maximale en provenance de l'unité de climatisation. L'ensemble des résultats de mesure est consigné dans [16]. Leur analyse permet de faire ressortir les conclusions ci-dessous.

Niveau global

Les niveaux de bruit globaux du tramway de type B avec et sans le système de climatisation en fonctionnement sont représentés sur la Figure 30. Les microphones sont schématisés par des « pavés » dont le centre possède les coordonnées des capteurs au moment de la mesure.

La valeur maximale du niveau de bruit mesurée sur le tramway de type B avec le système de climatisation arrêté est de 61,6 dB(A), alors que la valeur minimale est de 48,5 dB(A), ce qui représente une dynamique de mesure de 13,1 dB(A). Les valeurs maximale et minimale relevées avec le système de climatisation en fonctionnement, sont respectivement de 70 et 57,4 dB(A), soit une dynamique de 12,5 dB(A).

Figure 30 : niveau de bruit global moyen (en dB(A)) – tramway de type B.
En haut : climatisation arrêtée, en bas : climatisation en marche



Lors de la prise de mesure, il avait été constaté la présence d'un bruit provenant des systèmes de ventilation situés sous les systèmes de climatisation des compartiments passagers, et ce dans les deux cas de figure (avec ou sans climatisation). Le niveau de bruit engendré par ces ventilateurs avait été identifié comme plus élevé lorsque le système de climatisation était en marche. Ces remarques sont confirmées par la Figure 30 puisque les niveaux globaux maxima mesurés correspondent aux microphones situés en toiture au milieu des caisses porteuses R1 et R2, et sont plus importants lorsque le système de climatisation fonctionne que lorsqu'il est arrêté. De plus, sur toute la longueur de la rame, le niveau de bruit est plus élevé sur le microphone situé le plus en hauteur (microphone 5).

Rame arrêtée, le fonctionnement du système de climatisation provoque une hausse du niveau de bruit de l'ordre de 9 dB(A), face au microphone le plus élevé. Cette hausse est également significative sur toute la longueur de la rame (y compris au centre de la rame, à distance du système de climatisation).

L'influence du bruit de ventilation n'est pas limitée à la toiture du tramway puisqu'une hausse relativement importante (minimum de 6 dB(A)) est observée pour les microphones les plus bas (1, 2 et 3). En effet, pendant la campagne de mesures, le bruit des ventilateurs était clairement audible sur le côté du tramway. Ceci montre une certaine directivité latérale par rapport au plan du tramway.

Comportement fréquentiel

Comportement fréquentiel climatisation arrêtée

Les spectrogrammes du tramway climatisation arrêtée sont composés de nombreuses raies, mais ils ne permettent pas d'identifier un comportement fréquentiel caractéristique. Une dissymétrie semble exister puisque l'on peut souligner la présence d'une raie de fort niveau pour les microphones les plus élevés de la partie droite du tramway : cette fréquence (1587 Hz pour le milieu de caisse R2 et 1400 Hz pour le bogie 3) n'apparaît pas sur les spectrogrammes du côté gauche du tramway (cf. Figure 32).

Comportement fréquentiel climatisation en fonctionnement

La mise en marche du système de climatisation semble provoquer l'apparition de trois fréquences caractéristiques : 290 Hz, et ses deux harmoniques 580 Hz, et 870 Hz (cf. Figure 31). Alors qu'aucune de ces fréquences n'est clairement identifiée sur les spectrogrammes obtenus avec la climatisation arrêtée, ces trois raies sont présentes pour toutes les positions du système de mesure, c'est-à-dire sur toute la longueur de la rame, et plus particulièrement sur les microphones situés en hauteur. Suivant la position observée, les spectrogrammes font apparaître de nombreuses raies différentes de celles décrites ci-dessus. Cependant, cette première analyse ne permet pas de mettre en évidence un comportement fréquentiel caractéristique pour une position particulière du tramway (bogie moteur, porteur...).

Figure 31 : exemples de spectrogrammes du microphone 5 en milieu de caisse R2

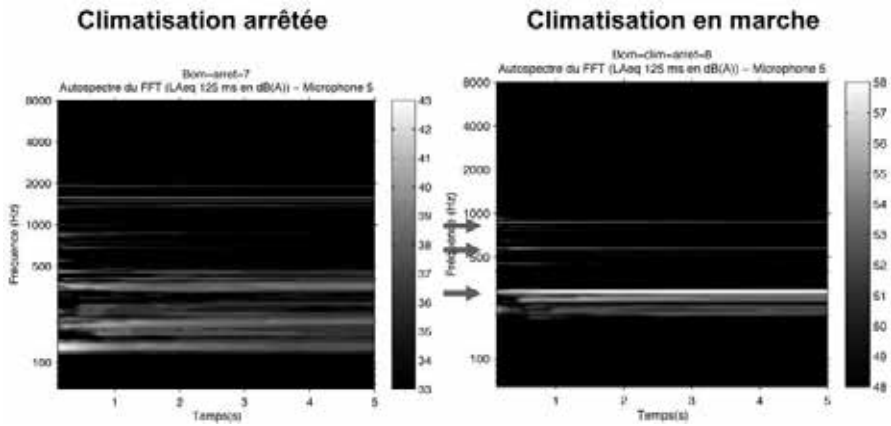
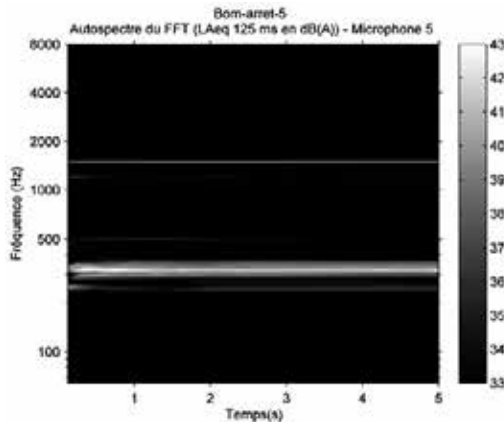


Figure 32 : spectrogramme obtenu sur le microphone 5 au droit du bogie 3 (climatisation arrêtée)



2.2.2.4. Autres sources

En plus des zones sources principales décrites précédemment interviennent quelques sources d'importance secondaire. Elles ont généralement une étendue spectrale très réduite. Certaines d'entre elles peuvent être intermittentes. Elles sont situées en partie basse de la rame A ; dans ce cas, elles sont détectables prioritairement sur le site *Ferrière*, pour lequel la contribution de la zone source étendue voie/rail reste faible et le masquage réduit. En revanche, d'autres sont situées en partie haute (toiture) pour la rame B. Elles coïncident donc avec la situation d'implantation des divers équipements et auxiliaires.

Rame A – Plusieurs sources secondaires sont à signaler sur la rame A. Certaines ont été détectées lors des mesures au passage (antenne), d'autres lors des mesures à l'arrêt (microphones de directivité). Tous les résultats présentés provenant des mesures par antenne, concernant l'émission des sources secondaires, correspondent à des niveaux de pression mesurés au centre de l'antenne (soit une distance de 2,34 m du rail le plus proche et une hauteur de 1,01 m) lorsque la source se situe au droit du point de mesure.

Une première source se situe à l'extrémité gauche de la rame, en partie basse, entre le nez de la rame et le bogie moteur, visible lors des passages à 20 et 30 km/h (Figure 33). Le spectre indique une raie, dont la fréquence varie avec la vitesse (env. 120 Hz à 30 km/h). Cette source n'existe pas à l'extrémité opposée de la rame. Son origine n'est pas expliquée, il n'existe pas a priori d'équipement susceptible de faire du bruit à cet emplacement.

Une seconde source se situe au-dessous de la porte d'accès de la voiture de droite, du côté du bogie porteur (Figure 34). Il s'agit d'une raie fréquentielle indépendante de la vitesse (600 Hz) ; sa contribution devient négligeable aux vitesses élevées ou lorsque les sources de bruit de roulement sont importantes.

Figure 33 : visualisation d'une source secondaire sur la rame A – 30 km/h – tiers d'octave 125 Hz

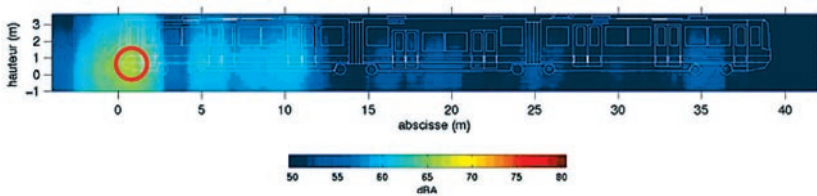
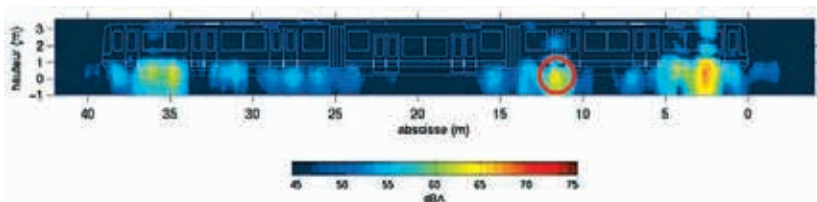
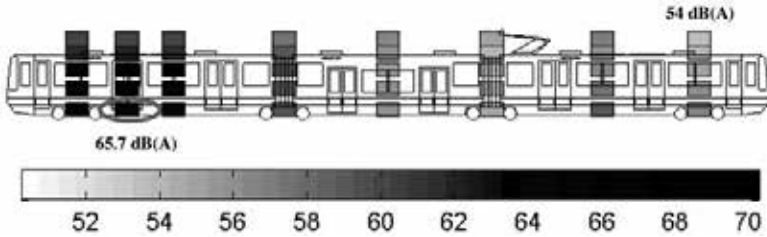


Figure 34 : visualisation d'une source secondaire sur la rame A – 20 km/h – tiers d'octave 630 Hz



Enfin, une dernière source secondaire a été observée à l'arrêt. La Figure 35 représente les niveaux de bruit global du tramway de type A mesurés à 5 m de l'axe de la voie. La valeur maximale est de 65,7 dB(A), alors que la valeur minimale est de 54 dB(A), ce qui représente une dynamique de mesure de 11,7 dB(A). Les éléments auxiliaires sont situés sous la caisse, ce qui explique les niveaux de bruit plus élevés constatés sur les microphones les plus bas.

Figure 35 : niveau de bruit global moyen – tramway de type A



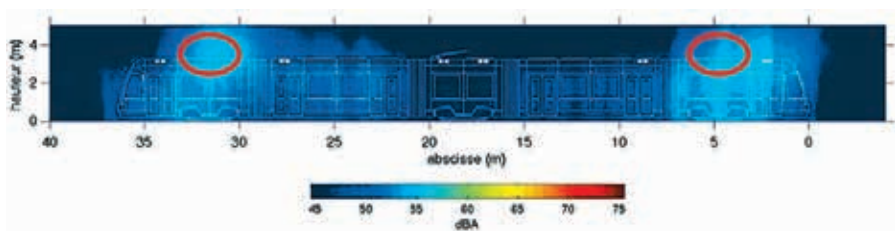
Un bruit de fort niveau provenant d'un boîtier situé sous les portes des rames motrices (cerclé en gris sur la Figure 35) a été identifié. Ce bruit provient du système de ventilation permettant de refroidir le convertisseur de puissance à IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor). La mesure complémentaire réalisée au niveau de ce boîtier confirme que les niveaux de bruits les plus élevés sont obtenus pour les microphones les plus bas.

On remarque une dissymétrie relativement marquée des niveaux de bruit entre les rames motrices gauche et droite (cf. Figure 35). Deux hypothèses peuvent être formulées pour expliquer ceci :

- Les ventilateurs ne fonctionnent que lorsqu'un refroidissement des blocs de puissance est nécessaire. Dans ce cas, seuls les ventilateurs de la rame motrice gauche étaient en fonctionnement lors de la mesure.
- Si les ventilateurs sont utilisés de manière continue, cela signifie que la différence de niveau de bruit est due à une disparité entre les blocs de puissance. Cependant, les différences constatées (de l'ordre de 6 dB(A)) rendent cette deuxième hypothèse moins plausible.

Rame B – Au niveau de la toiture, on note la présence d'une source au-dessus de chacun des deux bogies moteurs (mesures au passage avec l'antenne en position haute, Figure 36). Ceci coïncide avec l'emplacement des convertisseurs de traction. Cette source n'est visible qu'aux vitesses élevées (40 et 50 km/h). Sa fréquence est voisine de 145 Hz, et ne semble pas varier avec la vitesse.

Figure 36 : visualisation d'une source secondaire sur la rame B – 39 km/h – tiers d'octave 160 Hz



2.3. Des mesures à la modélisation

Les campagnes expérimentales ont permis de disposer d'un vaste ensemble de mesures de niveaux de bruit, décrivant les rames et leurs sources, pour les deux types de sites mesurés. Il a été noté dans certains cas une variabilité des observations. Ces variations peuvent être dues à une dispersion des mesures entre passages similaires, mais qui diffèrent cependant légèrement quant à la vitesse et la régulation des vitesses, induisant des différences de sollicitation des différents éléments mécaniques ou électriques (reproductibilité). Pour une autre part, les variations sont liées aux différences de comportement individuel d'éléments de même type sur la rame (par exemple différences entre les deux bogies moteurs) ; elles peuvent donc avoir un caractère plus systématique.

Pour une description moyenne des comportements d'un type de source, toutes ces mesures ont été agrégées et des courbes de régression (polynômes de degré 2 pour les niveaux acoustiques ou de degré 3 pour les directivités verticales) ont été déterminées, la variable essentielle étant la vitesse. Pour chaque source principale, on dispose ainsi des caractéristiques moyennes d'émission en champ libre :

- le niveau de puissance $L_W(v; f) \Big|_{\text{rame, voie}}$, fonction de la vitesse v pour chaque tiers d'octave f ;
- la directivité verticale $D(v, \theta; f) \Big|_{\text{rame, site}}$, où θ est l'angle d'émission

qui constitueront l'entrée du modèle d'émission au passage d'une rame de tramway.

L'utilisation des polynômes de régression doit être limitée au domaine des intervalles de mesure pour les variables vitesse et angle, à savoir environ 20 à 50 km/h pour la vitesse (40 km/h pour le site avec semelle souple), et environ 5 à 55° pour les angles d'émission. L'extrapolation à d'autres valeurs nécessiterait une validation complémentaire ou l'introduction d'hypothèses additionnelles.

3. Modélisation de l'émission

L'objectif du modèle proposé est de délivrer des indicateurs acoustiques, permettant de prévoir en moyenne le bruit reçu par un observateur (un riverain) dans une configuration déterminée où le tramway circule en champ libre. La configuration est spécifiée par le type de matériel roulant, le type de pose de voie et la vitesse de circulation de la rame.

Le modèle proposé est un modèle expérimental (par opposition à un modèle mathématique basé exclusivement sur des lois physiques) ; il s'appuie sur les connaissances expérimentales acquises, notamment sur la base des données mesurées décrites précédemment. Le modèle d'émission en champ libre exclut la présence de bâtiments environnants. Il repose sur une représentation par sources de la rame, et d'un calcul dynamique du bruit au passage. Sont présentées ici successivement la description (§ 3.1.1) et la validation du modèle (§ 3.1.2).

Celui-ci est ensuite exploité pour mettre en évidence la contribution des sources dans les descripteurs acoustiques au passage (§ 3.2 et 3.3).

3.1. Modèle d'émission

3.1.1. Développement du modèle

Le modèle a été développé dans l'environnement Matlab ; il est construit à partir d'une interface graphique facilitant son utilisation, notamment la saisie de la configuration (Figure 37). Les paramètres permettent de spécifier :

- la configuration (type de rame, pose de voie + revêtement) ;
- les sources à inclure pour la rame spécifiée (sélectionnables par type de source) ;
- la cinématique (actuellement : vitesse stabilisée à saisir) ;
- la position de l'observateur (coordonnées) ;
- les spécifications de la simulation (fréquence d'échantillonnage, position initiale de la rame et durée du passage, célérité du son).

Le calcul de modélisation permet d'obtenir la signature acoustique temporelle à la position de l'observateur, ainsi que quelques indicateurs acoustiques :

- signature temporelle par tiers d'octave, pour chaque type de source individuellement et pour l'ensemble des sources sélectionnées ;
- signature temporelle globale, pour chaque type de source individuellement et pour l'ensemble des sources sélectionnées ;
- indication du niveau maximum $L_{A,max}$, du temps d'exposition T^7 , du niveau équivalent $L_{eq,T}$, du niveau d'exposition SEL ;
- spectre tiers d'octave moyen pendant la durée d'exposition T , pour l'ensemble des sources sélectionnées.

Le noyau du modèle repose sur la représentation de la rame et le calcul du rayonnement acoustique en champ libre.

Représentation de la rame – La rame est considérée comme un ensemble de sources indépendantes, chacune étant décrite par : sa position sur la rame, son spectre d'émission par tiers d'octave, sa directivité horizontale, sa directivité verticale. Dans la version actuelle, il existe quatre types de sources, associées aux zones sources principales identifiées lors de la campagne de mesures, à savoir : les zones bogies moteurs, les zones bogies porteurs, la zone étendue voie/rail, la climatisation (proposée en fonction du choix de la rame) (Figure 38). Pour une description plus détaillée de la composition physique de chaque zone source, se reporter au paragraphe 2.2.2.

Actuellement, les rames sont décrites conformément à la réalité, à savoir leur composition et les caractéristiques des sources sont conformes aux situa-

⁷ Associé à $L_{A,max}-10$ dB(A)

tions mesurées. Il sera possible ultérieurement d'étendre le logiciel à des cas fictifs, permettant par exemple d'inclure une voiture supplémentaire, d'ajouter une source, ou de modifier le spectre d'un type de source.

Le modèle de rame de type A est constitué de sources ponctuelles au niveau des bogies, et d'une source linéique sur toute la longueur de la rame. Celui des rames de type B contient ces mêmes sources, ainsi que le climatisation en toiture. Chaque type de source est implémenté selon un modèle spécifique, détaillé ci-dessous.

Figure 37 : interface graphique du modèle d'émission du tramway (TramNoise), saisie des paramètres



Figure 38 : représentation schématique des sources dans les modèles des rames

- : points sources bogies moteurs et porteurs
- : source linéique voie/rail
- : climatisation



Description des sources bogies – Les zones bogies sont représentées dans le modèle par une source ponctuelle située au niveau du sol, à l'abscisse du centre de chaque bogie. On distingue les bogies moteurs situés aux extrémités des

rames, et le(s) bogie(s) porteur(s) aux positions intermédiaires. À chaque type de bogie est attribué un spectre, une directivité horizontale, une directivité verticale.

Le spectre de la source est défini par tiers d'octave, sur la base des valeurs expérimentales moyennes dans la direction du centre de l'antenne. À partir des polynômes de régression ajustés aux mesures, décrivant un comportement moyen sur la gamme de vitesses disponibles pour la configuration rame/pose de voie considérée (pour illustration, se reporter à la Figure 16), le niveau de bruit à la vitesse de passage spécifiée est calculé pour chaque tiers d'octave.

Une directivité horizontale est attribuée à chaque source. En l'absence de données expérimentales, elle est spécifiée ici sur la base d'indications disponibles dans la littérature par exemple [18]), selon une loi en cosinus de l'angle⁸ (analogie avec un dipôle), identique pour tous les tiers d'octave.

La directivité verticale de la source est déterminée à partir de la base de données de mesures au passage par les cinq microphones de directivité. On considère qu'au passage d'un bogie devant les microphones, l'influence des autres sources peut être négligée en première approximation, et que la directivité mesurée concerne essentiellement ce bogie. Ceci s'effectue en plusieurs étapes, pour la configuration rame/pose de voie sélectionnée :

- 1) détermination du niveau de bruit moyen sur chacun des cinq microphones au passage du bogie à la vitesse spécifiée, à partir des polynômes de régression pour chaque tiers d'octave ;
- 2) détermination du niveau de bruit dans la direction de l'observateur, à partir du polynôme de régression angulaire ajusté sur les 5 microphones ;
- 3) idem à l'étape précédente pour la direction du centre de l'antenne.

On dispose ainsi du facteur de correction en niveau dB(A) à appliquer au spectre de la source pour chaque tiers d'octave, pour la vitesse de passage et la configuration rame/site (Figure 39). Cette procédure permet ainsi de corriger le spectre tiers d'octave de la source pour la direction d'émission considérée.

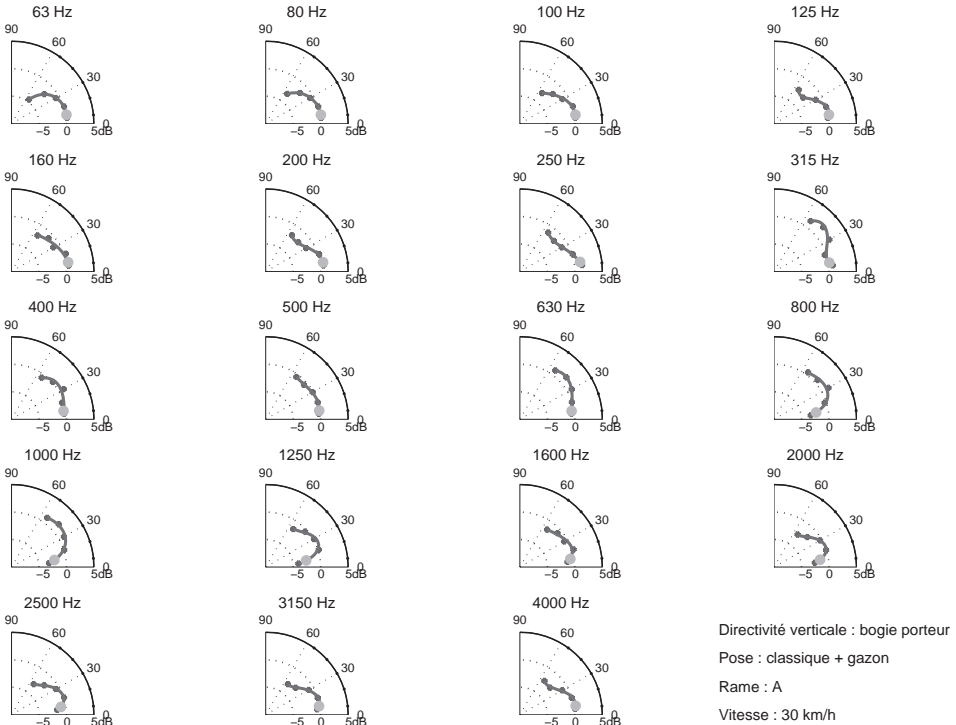
Observations critiques : il est clair que cette modélisation est simplifiée ; on peut par exemple souligner qu'elle ne prend qu'imparfaitement en considération la présence des raies spectrales et leur basculement d'un tiers d'octave à l'autre selon la vitesse. La prise en compte spécifique des raies sera intégrée dans une version ultérieure du logiciel.

Description de la source étendue voie-rail – La source étendue voie-rail est modélisée par une source linéique uniforme sur toute la longueur de la rame. Pratiquement elle est constituée d'une ligne de sources ponctuelles incohérentes (de type monopôles) identiques et équidistantes. Le pas séparant deux sources ponctuelles consécutives est un paramètre à saisir. En pratique, un espacement de 50 cm se révèle suffisant pour un observateur situé au minimum à quelques mètres de la voie. Chaque source ponctuelle est caractérisée par son spectre, une directivité horizontale et une directivité verticale.

⁸ Angle référencé par rapport à la normale à la direction de la voie.

**Figure 39 : facteur correctif de la directivité verticale pour le bogie porteur
– rame A – pose classique + gazon – vitesse 30 km/h**

- : Microphones de mesure de directivité
- : Direction de l'observateur



Le spectre de la source élémentaire est déduit de la base de données de mesures de la zone source étendue voie/rail évaluée par mètre linéaire, en tenant compte d'une part de la densité des sources ponctuelles, et d'autre part de la configuration rame/pose de voie pour la vitesse de passage. Pour ce dernier aspect on procède de la même façon que pour les bogies, au moyen des polynômes de régression par tiers d'octave (voir plus haut).

À chaque source élémentaire, on attribue une directivité horizontale uniforme. Quant à la directivité verticale, on procède suivant le même principe que pour les bogies : on utilise les mesures des cinq microphones de directivité au moment où le centre d'une rame se trouve au droit des microphones. Ceci peut être effectué en première approximation, sachant qu'aucune autre source ne se trouve dans le voisinage (la climatisation n'était pas en fonctionnement). La procédure de détermination du facteur correctif pour chaque tiers d'octave dans la direction de l'observateur suit les trois étapes qui avaient été décrites pour les bogies (voir plus haut). Ce facteur correctif est attribué à chaque source élémentaire.

Observations critiques : On peut souligner que ce modèle de source étendue ne fait pas apparaître de décroissance (en particulier au-delà de l'extrémité de la rame). Par ailleurs la contribution de la zone voie/rail se trouve également incluse dans la contribution des bogies, ce qui peut faire craindre une surévaluation au voisinage des bogies. Enfin la représentation par sources ponctuelles indépendantes peut paraître très approximative au regard des caractéristiques de la propagation des vibrations dans le rail, notamment aux fréquences où le taux de décroissance est faible. Malgré ces approximations, on verra que les résultats du modèle sont satisfaisants.

Source climatisation – Toujours dans un esprit de conformité avec la réalité, cette source est optionnelle, proposée uniquement pour la rame B. Elle consiste en une source ponctuelle située en toiture au centre de chaque voiture, sur l'axe longitudinal central de la rame. Dans la version actuelle, seul le trajet direct entre le module de climatisation et l'observateur est pris en compte (pas de réflexion sur le sol).

L'émission acoustique de la climatisation est caractérisée par son spectre tiers d'octave. Elle est indépendante des paramètres de vitesse et de type de pose de voie. Le spectre de référence est déterminé à partir des mesures réalisées à l'arrêt pour les mesures de directivité avec le microphone 5 (microphone le plus proche de la source).

En fonction de la direction de l'observateur par rapport à la position de la source, un facteur correctif est appliqué au spectre (directivité verticale) : il est déterminé pour chaque tiers d'octave par régression polynomiale angulaire basée sur les mesures de la directivité verticale à l'arrêt.

À chaque unité de climatisation est associée une directivité horizontale uniforme : l'observation des niveaux mesurés à l'arrêt pour plusieurs positions de la rame devant le point de mesure indique qu'une directivité en cosinus ne serait pas du tout justifiée.

Remarque, pour tous les types de sources – Le modèle d'émission d'une rame n'est valide que sur les gammes de paramètres mesurés : il n'est pas souhaitable pour le moment d'extrapoler son utilisation en dehors des intervalles de vitesse et d'angle vertical mesurés.

3.1.2. Validation du modèle

Avant toute exploitation du modèle, il convient de le valider, en contrôlant la qualité des résultats des calculs. Ceci est réalisé par comparaison calcul – mesures, les mesures utilisées pour cela proviennent non pas de l'antenne, mais des mesures acoustiques réalisées une vingtaine de mètres plus loin (micro à 7,5 m et microphones de directivité). Cette validation est effectuée en deux temps, de façon à découpler la contribution des différentes composantes du modèle :

- comparaison calcul – mesures, pour tous les paramètres de configuration (rame, site, vitesse), sur le microphone à 7,5 m ; on ne modifie pas ici la hauteur de l'observateur ;

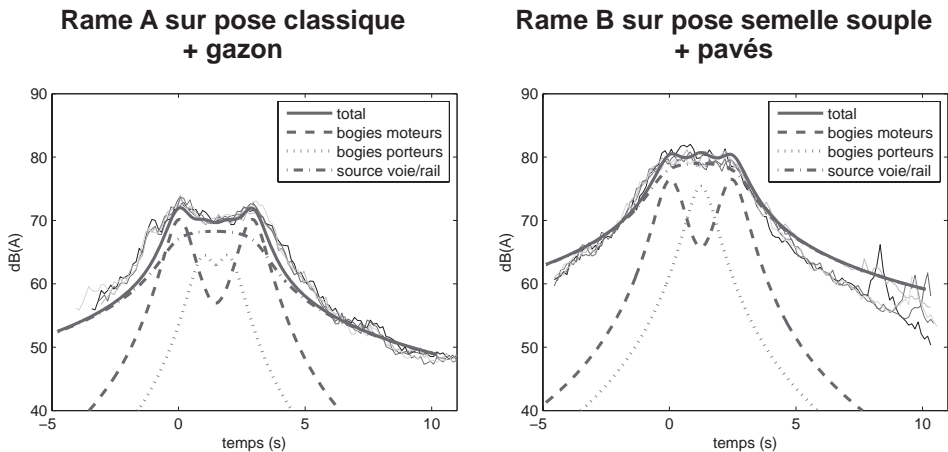
- comparaison calcul – mesures pour d'autres directions d'émission, en utilisant les microphones de directivité ; on explore ici la prise en compte de la directivité verticale.

Étant donné les conditions de mesures disponibles, la validation est effectuée hors contribution de la climatisation pour la rame B.

Validation à 7,5 m – L'observateur se trouve à la distance de 7,5 mètres de l'axe de la voie, et à une hauteur de 1,2 mètre. Le modèle TramNoise est exécuté successivement pour différentes valeurs de configuration : vitesse, rame, pose de voie. Les signatures globales et par tiers d'octave calculées sont comparées aux signatures mesurées.

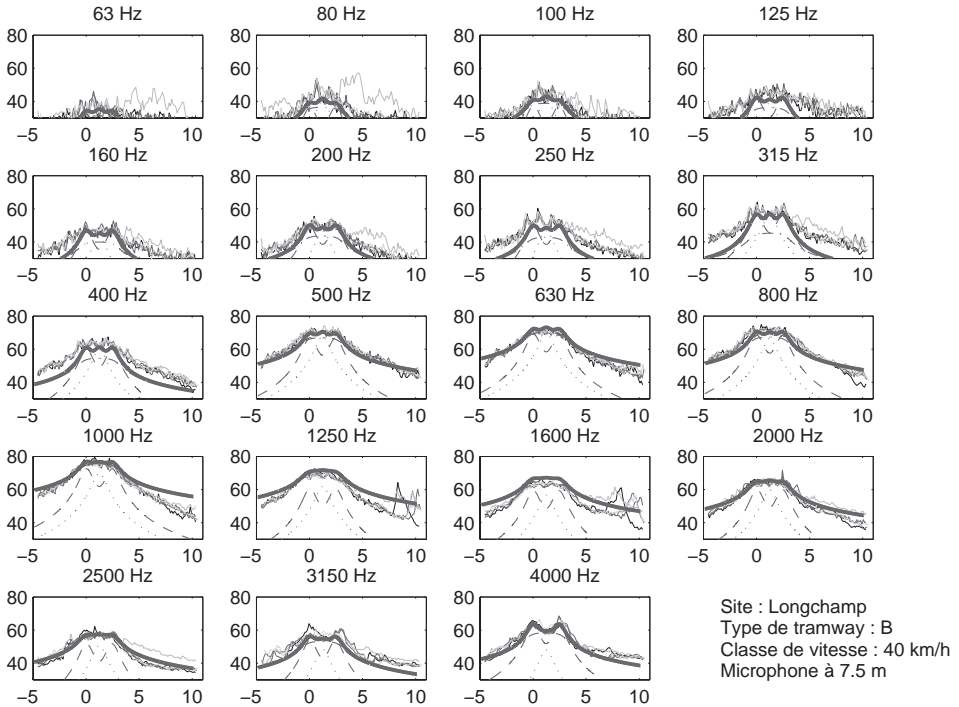
Pour l'ensemble des cas mesurés, la correspondance des signatures globales est très satisfaisante (pour exemple Figure 40⁹). Quelques écarts calcul/mesures peuvent cependant apparaître sur les signatures par tiers d'octave (Figure 41) ; de façon assez constante on retrouve les différences suivantes : croissance et décroissance un peu trop rapides aux basses fréquences (jusqu'à 400 Hz), croissance et décroissance un peu trop lentes de 1000 à 1600 Hz, ponctuellement sous ou surévaluation du niveau pendant le passage. Ceci nécessite probablement une adaptation des directivités horizontales et/ou une prise en compte des décroissances de la source voie/rail avant et après le passage (au moyen d'études complémentaires).

Figure 40 : signatures globales sur microphone à 7,5 m (hauteur 1,2 m), comparaison calcul (trait continu épais)/mesures (traits continus fins) – signatures globales par type de source (traits discontinus) – classe de vitesse 40 km/h



⁹ A noter sur site *Ferrière*, changement temporaire de revêtement en amont du point de mesure à 5, 5 m, qui génère un pic dans la montée des signatures mesurées.

Figure 41 : signatures par tiers d'octave sur microphone à 7,5 m (hauteur 1,2 m), comparaison calcul (trait continu épais)/mesures (traits continus fins) – signatures globales par type de source (traits discontinus) – classe de vitesse 40 km/h - rame B sur pose semelle souple + pavés



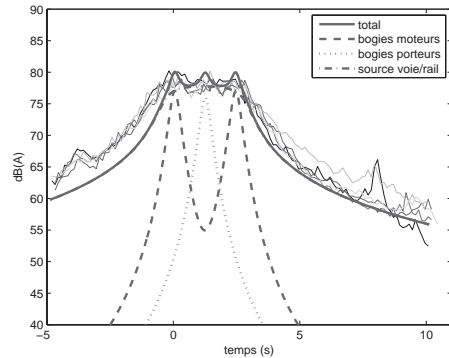
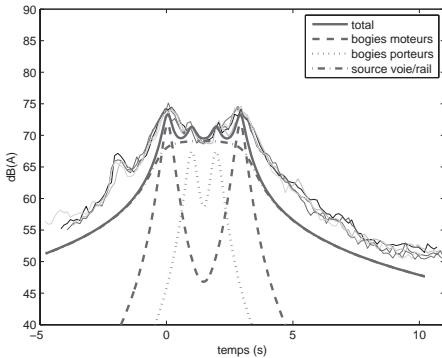
Validation dans des directions différentes – On place l'observateur successivement en différentes positions correspondant à celles des microphones de directivité. Les signatures globales restent proches des signatures mesurées (Figure 42⁹). On note toutefois une croissance et une décroissance un peu trop rapides sur les signatures calculées à mesure que l'observateur prend de la hauteur, ce que confirment les comparaisons par tiers d'octave. À nouveau une action sur les directivités horizontales et/ou la contribution de la voie et du rail de part et d'autre de la rame est à explorer.

On peut donc considérer que le modèle reproduit de façon satisfaisante les mesures réalisées en champ libre, au moins pour les directions d'émission inférieures à 30° relativement au sol. Pour les angles supérieurs, les niveaux moyens (*Leq* ou *SEL*) peuvent être légèrement sous-estimés. Le modèle sera utilisé dans ce qui suit pour analyser la contribution en champ libre de certains types de sources, notamment la climatisation (§ 3.2) et le bruit de roulement (§ 3.3).

Figure 42 : signatures globales sur micro 5 (distance 3,0 m, hauteur 4,13 m), comparaison calcul (trait continu épais)/mesures (traits continus fins) – signatures globales calculées par type de source (traits discontinus) – classe de vitesse 40 km/h

Rame A sur pose classique + gazon

Rame B sur pose semelle souple + pavés



3.2. Contribution de la climatisation

La climatisation se distingue des autres sources principales par différents aspects, d'une part sa localisation en toiture, d'autre part son fonctionnement a priori indépendant des conditions de circulation (vitesse) et d'environnement (pose de voie). En utilisant le modèle d'émission développé précédemment, on analyse la contribution de la climatisation dans le bruit émis en champ libre par le tramway seul (pas de bruit de fond environnant). Cette contribution est évaluée par comparaison du bruit émis lors des circulations de la même rame, climatisation arrêtée ou en fonctionnement à son plein régime. Les grandeurs acoustiques considérées sont la signature, ainsi que les indicateurs au passage. Les L_{Amax} , Leq et SEL ayant des variations très similaires, seuls les L_{Amax} sont présentés dans les illustrations.

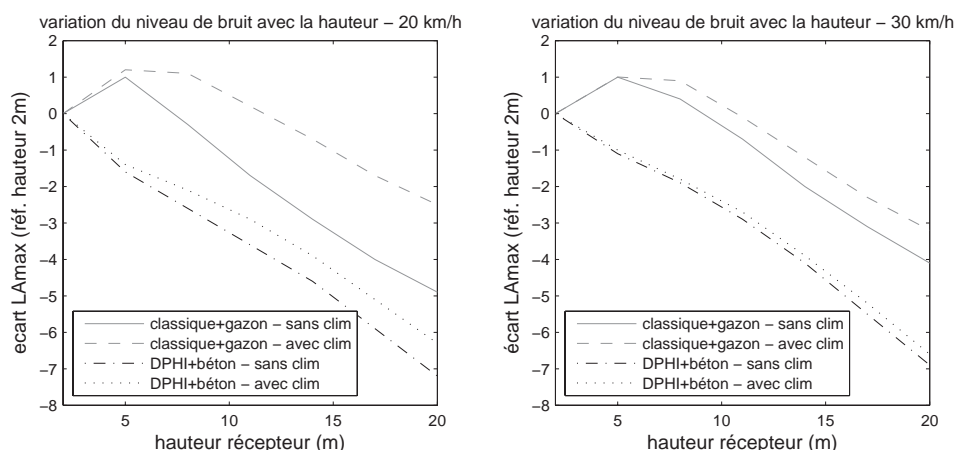
On considère un observateur situé à une distance de 15 mètres de l'axe de la voie¹⁰, et à différentes hauteurs pour examiner l'émission en direction des étages (de 2 à 20 m, par pas de 3 mètres, soit approximativement d'un rez-de-chaussée à un 6^e étage). Dans le cas où l'angle d'émission θ pour la climatisation se trouve être supérieur au domaine valide ($\theta > \theta_{max}$), on suppose en première approximation que la directivité reste constante au-delà de θ_{max} . Pour les sources de bruit de roulement, les angles d'émission sont conformes aux

¹⁰ Cette distance correspond à la distance moyenne pour toutes les personnes enquêtées dans l'étude perceptive du chapitre « Étude in-situ de la perception du bruit du tramway ».

domaines de validité du modèle. On analyse les cas d'une voie peu bruyante (pose classique, revêtement gazon) et d'une voie plus bruyante (semelles souples, revêtement béton).

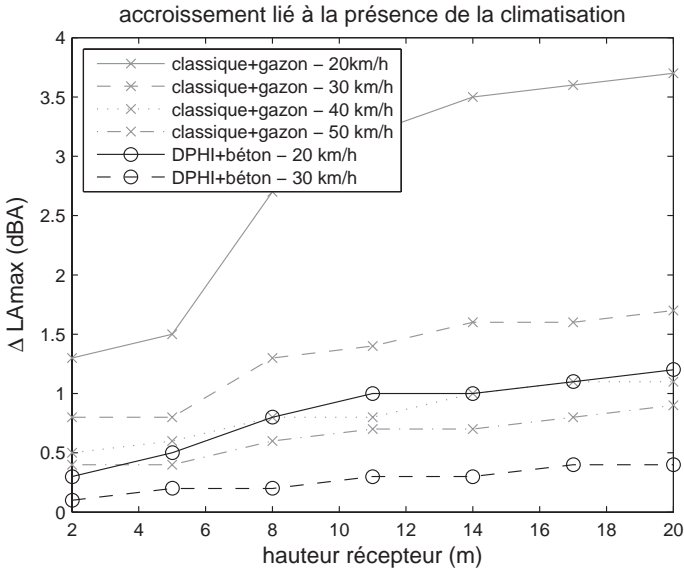
Les niveaux de bruit reçus à différentes hauteurs dépendent notamment des puissances et des directivités verticales respectives des différentes sources. À mesure que la hauteur augmente, on note une différence de comportement sur le site « peu bruyant », où le niveau d'émission croît vers les tout premiers étages pour décroître ensuite, par rapport au site plus bruyant où la décroissance est continue, ceci pour toutes les vitesses (Figure 43).

Figure 43 : variation du niveau de bruit avec la hauteur du récepteur, pour une rame avec climatisation en toiture, à 20 et 30 km/h – distance horizontale 15 m – champ libre



La contribution de la climatisation est plus importante lorsque les sources de bruit de roulement sont modérées, à savoir aux vitesses faibles et/ou sur site peu bruyant. La Figure 44 montre l'accroissement du niveau maximum au passage pour différentes positions de l'observateur, lorsque la climatisation est en fonctionnement, par rapport aux mêmes situations avec climatisation arrêtée. La contribution de la climatisation est plus forte en direction des grandes hauteurs, en raison de la moindre part des sources de bruit de roulement qui présentent une directivité plus marquée vers les faibles hauteurs. Sur site peu bruyant et à faible vitesse, la présence de la climatisation se fait sentir à toutes les hauteurs, l'augmentation pouvant être supérieure à 3,5 dBA à 20 km/h ; elle atteint 1,5 dBA à 30 km/h, mais ne dépasse pas 1 dBA aux vitesses plus élevées. Sur site plus bruyant, la contribution reste modérée à toutes les vitesses.

Figure 44 : augmentation du L_{Amax} avec climatisation par rapport à un passage sans climatisation, en fonction de la hauteur du récepteur – distance horizontale 15 m – champ libre



3.3. Contribution du bruit de roulement

Le bruit de roulement est une composante importante du bruit émis par le tramway. Comme cela a été évoqué précédemment, il prend naissance au contact roue/rail : des vibrations se propagent dans la roue, le rail puis la plateforme, qui rayonnent des ondes sonores. Parmi les zones sources identifiées, les zones bogies moteurs, les zones bogies porteurs et la zone étendue voie-rail sont particulièrement affectées par le bruit de roulement. Les zones bogies moteurs incluent également la contribution des composants voisins liés à la traction (moteurs et auxiliaires, en fonction de la technologie de la rame). En première approximation, on peut faire l'hypothèse que les bruits de roulement associés respectivement au bogie moteur et au bogie porteur sont similaires (en supposant un même état de surface des roues), les différences de masse ayant un effet secondaire sur le bruit rayonné. On propose ici d'évaluer les contributions à l'émission du bruit de roulement et du bruit lié à la traction en comparant les configurations suivantes, sans climatisation :

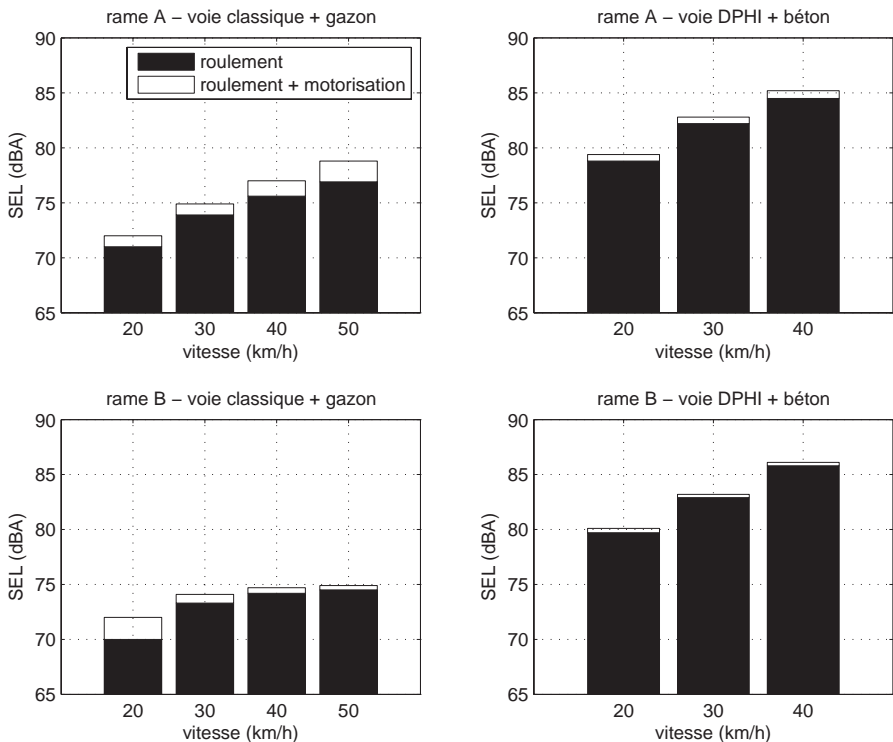
- bruit de roulement seul : en affectant à tous les bogies d'une rame les caractéristiques d'émission des zones bogies porteurs, et en incluant la zone étendue voie-rail ;
- bruit de roulement + traction : en considérant une configuration de rame conforme à la réalité, avec bogies moteurs, bogies porteurs et zone voie-rail.

On place un observateur à 7,5 m de l'axe de la voie et à 1,2 m de hauteur. Pour chaque cas calculé, les indicateurs au passage L_{Amax} , L_{Aeq} et SEL sont évalués et comparés. Pour exemple, la Figure 45 représente les SEL « bruit de roulement seul » et « bruit de roulement + traction » pour chaque configuration rame – pose de voie, à différentes vitesses. Les différences de SEL, caractérisant l'accroissement lorsqu'il y a contribution du bruit de traction, sont indiquées dans la Figure 46, en fonction de la vitesse. Les tendances observées pour les trois types d'indicateurs au passage conduisent à des conclusions similaires :

- pour la rame A, de génération plus ancienne, la contribution du bruit de traction croît plus vite que le bruit de roulement avec la vitesse, sur site de configuration peu bruyante ;
- pour la rame B, plus récente, la contribution du bruit de traction croît moins vite que celle du bruit de roulement avec la vitesse, sur site de configuration peu bruyante.

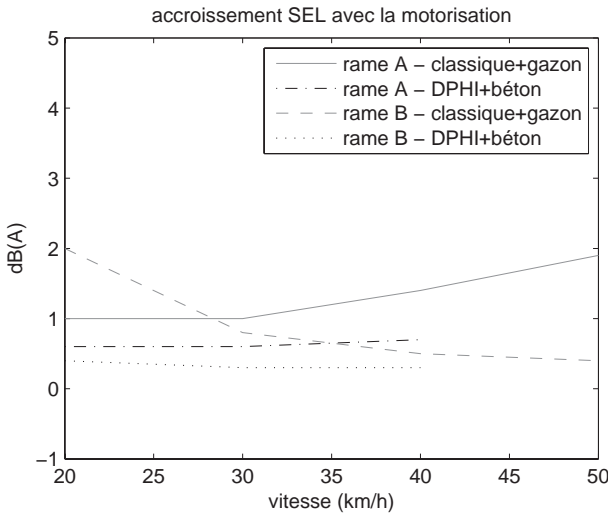
Sur site de configuration bruyante, l'accroissement dû à la traction reste faible, voire négligeable pour la rame B, à toutes les vitesses.

Figure 45 : comparaison du SEL à 7,5 m (hauteur 1,2 m) au passage d'un tramway, avec bruit de roulement seul ou bruit de roulement + motorisation



On peut ainsi conclure que, pour un site dont la pose de voie et le revêtement induisent des caractéristiques acoustiques favorables, il est nécessaire de prendre en compte dans la modélisation la contribution des éléments liés à la traction. En revanche, pour un site à caractéristiques acoustiques peu favorables, la prise en compte de la traction peut être négligée quand on considère les indicateurs globaux comme le L_{Amax} , le L_{Aeq} ou le SEL ; ceci n'est a priori pas le cas si une analyse fréquentielle doit être conduite.

Figure 46 : accroissement du SEL avec prise en compte de la motorisation, par rapport au bruit de roulement seul



4. Conclusions

Conclusions sur l'émission globale des rames

Pour ce qui concerne la puissance globale émise par une rame en circulation à vitesse constante :

1. Le site en pose classique avec revêtement gazon est le moins bruyant des sites testés. L'effet de rame y est sensible et augmente avec la vitesse : la contribution plus faible du bruit de roulement implique une plus grande part du bruit de traction, spécifique à chaque type de rame.
2. Le site en pose sur semelle souple associé à un revêtement pavé se révèle le plus bruyant (+6 à +10,6 dB(A) suivant la vitesse, par rapport au site le moins bruyant). L'effet de rame est très faible sur ce site.
3. Le site en pose classique sur ballast est moyennement bruyant (+4,7 à +7 dB(A) suivant la vitesse, par rapport au site le moins bruyant). L'effet

de rame est faible sur ce site (différences de 1 à 1,5 dB(A), en faveur de la rame B).

Pour ce qui concerne la répartition fréquentielle de la puissance moyenne :

4. Le comportement des rames A et B est sensiblement différent, quelle que soit la nature de la plate-forme.
5. Pour la rame B, le niveau de puissance émis varie peu avec la vitesse pour les fréquences inférieures à 600 Hz.
6. Pour la rame A, le niveau de puissance émis croît avec la vitesse sur toute la plage de fréquence.
7. Pour les fréquences inférieures à 600 Hz, le niveau de puissance est plus élevé sur le site *Ferrière* (pourtant globalement le moins bruyant) que sur le site *Longchamp* (globalement bruyant).
8. La rame de type B présente une forte contribution du tiers d'octave 4 kHz, lié à la motorisation (cf. infra *sources de bruit*), qui est prépondérant à basse vitesse sur le site le moins bruyant. Son amplitude ne varie pas ou très peu avec la vitesse.

Pour ce qui concerne la directivité globale verticale, c'est-à-dire la directivité verticale moyenne sur toute la longueur de la rame (sans climatisation pour la rame B) :

9. La directivité verticale globale est peu marquée de 0 à 60° pour le site *Ferrière*, pour les deux types de rame : elle est proche d'un rayonnement isotrope dans le plan vertical.
10. La directivité verticale globale est relativement similaire pour les deux types de rame sur le site *Longchamp* : maximale vers le sol, elle diminue à mesure que l'angle s'éloigne du sol, pour atteindre une réduction de l'ordre de -4 dB(A) à 60°.
11. Les directivités verticales peuvent être beaucoup plus marquées dans certaines bandes tiers d'octave. C'est également le cas lorsqu'on s'intéresse à certaines zones sources sur la rame.

Conclusions sur les sources de bruit, leurs caractéristiques et leur contribution

Pour ce qui concerne les sources de bruit des tramways, les mesures et les analyses ont mis en évidence les éléments suivants :

1. Pour les deux types de rame, l'essentiel des sources est situé en partie basse des rames, à toutes les vitesses et pour les deux types de site étudiés.
2. L'effet du site est un paramètre essentiel pour les sources situées en partie basse. Son influence dépend du type de pose de voie, de l'état de surface des rails et du type de revêtement.
3. Les zones des bogies sont des zones sources importantes, avec des différences notables entre bogies moteurs et bogies porteurs. Les sources de

bruit se concentrent plus particulièrement au passage des roues, sous la forme de bruit large bande. Les zones sources bogies moteurs incluent le bruit de roulement (rayonnement roue, rail et voie) et la contribution des éléments de motorisation et auxiliaires situés au voisinage. Les spectres font apparaître la présence de raies fréquentielles, spécifiques à chaque type de rame, qui se superposent aux composantes à large bande.

- a. La zone bogie moteur est généralement plus bruyante que la zone bogie porteur, sur une grande part de la bande de fréquence. La présence d'équipements liés à la motorisation des bogies moteurs explique cette différence. On note des différences locales entre bogies de même type.
 - b. Les zones bogies moteurs de la rame B montrent une contribution importante des hautes fréquences, notamment dans le tiers d'octave 4000 Hz. Ceci n'est pas lié à la présence d'une raie, mais d'un bruit dont le spectre s'étale sur l'ensemble du tiers d'octave. La localisation précise des sources associées coïncide avec la position des moteurs-roues sur le bogie.
 - c. La vitesse est un paramètre essentiel pour le niveau de bruit des bogies : l'augmentation en niveau global peut atteindre 7,5 à 9 dB(A) entre 20 et 40 km/h. Cependant ce comportement n'est pas uniforme pour tous les tiers d'octave. Il dépend également du type de rame : pour la rame B la vitesse renforce les moyennes et hautes fréquences, alors que pour la rame A le niveau global augmente sans modification majeure de la répartition fréquentielle.
 - d. Les différences de bruit mesuré entre bogies du même type entre les rames A et B n'excèdent pas 2 à 3 dB(A). Cependant une méconnaissance de l'état des roues ne permet pas de tirer de conclusions précises à ce sujet.
 - e. Des différences entre sites de 8 à 9 dB(A) ont été relevées sur les zones bogies à même vitesse. Le site en pose classique engazonnée est le moins bruyant. Les écarts concernent essentiellement les fréquences supérieures à 200 Hz pour les zones bogies.
4. Les analyses ont montré la présence d'une source étendue sur toute la longueur des rames, dans une zone proche du sol. Elle inclut la contribution de la plate-forme et du rail dans l'émission sonore, ainsi que la présence éventuelle de sources situées sous la rame.
- a. L'effet de la vitesse sur le niveau de bruit global en provenance de la zone-source étendue voie-rail est important ; il augmente linéairement de 7 à 9 dB(A), entre 20 et 40 km/h, en fonction de la configuration rame/site. Cependant, ce comportement peut varier d'un tiers d'octave à l'autre. Pour la rame B, la vitesse renforce les moyennes et hautes fréquences.
 - b. L'effet du type de rame ou du type de voiture est peu important. C'est un paramètre secondaire.
 - c. L'effet du type de pose de voie est prépondérant. Les différences mesurées entre les deux sites sont de l'ordre de 7 dB(A) à plus de 10 dB(A)

- en niveau global (pour une même rame à même vitesse). L'état de la rugosité des rails n'est connu que très partiellement, l'influence de ce paramètre dans cet écart ne peut pas être précisé.
5. Pour la rame B, équipée d'unités de ventilation/climatisation et d'auxiliaires en toiture :
 - a. Sur les mesures à l'arrêt, le fonctionnement de la climatisation, réglée à son régime maximum, produit une hausse du niveau de bruit global de l'ordre de 6 à 9 dB(A), selon la hauteur d'observation.
 - b. La mise en marche de la climatisation fait apparaître trois raies fréquentielles : 290 Hz (très puissante), et ses deux harmoniques 580 et 870 Hz (plus modérées). Ces raies sont inexistantes lorsque la climatisation est arrêtée.
 - c. Aux vitesses élevées, une source secondaire en toiture coïncide avec l'emplacement des convertisseurs de traction (env. 145 Hz).
 6. Pour la rame A, où les auxiliaires sont situés sous la caisse :
 - a. La rame A présente quelques comportements dissymétriques entre l'une et l'autre de ses deux extrémités, indépendamment du sens de circulation, indiquant une singularité de certains éléments. L'origine de ces anomalies n'a pas toujours pu être identifiée.
 - b. À l'arrêt, les systèmes de ventilation des boîtiers IGBT (rame A) localisés sous la caisse sont générateurs de bruit.

Conclusions tirées de la phase de modélisation en champ libre

L'exploitation du modèle d'émission en champ libre a permis de tirer les conclusions suivantes :

1. Pour ce qui concerne l'émission de bruit d'un matériel roulant équipé de climatisation en toiture :
 - a. Pour le site avec une pose de voie sur semelle souple et un revêtement pavé, le niveau de bruit décroît de façon monotone en fonction de la hauteur de l'observateur, à distance horizontale donnée.
 - b. Pour le site en pose classique avec gazon, lorsque la hauteur de l'observateur augmente, le niveau de bruit croît d'abord d'environ 1 dB(A), puis décroît de façon monotone.
 - c. La contribution de la climatisation relativement aux autres sources est plus forte en direction des grandes hauteurs, en raison de la moindre part des sources de bruit de roulement qui présentent une directivité plus marquée vers les faibles hauteurs.
 - d. La contribution de la climatisation est plus importante lorsque les sources de bruit de roulement sont modérées, à savoir aux vitesses faibles et/ou sur site peu bruyant. Dans ce cas, l'augmentation peut être supérieure à 3,5 dB(A) aux basses vitesses, mais ne dépasse pas 1 dB(A) aux vitesses élevées.

- e. Sur site plus bruyant (bruit de roulement important), la contribution de la climatisation reste modérée à toutes les vitesses.
- 2. Pour ce qui concerne la contribution du bruit de roulement et du bruit de traction :
 - a. Pour la rame A, de génération plus ancienne, la contribution du bruit de traction croît plus vite que le bruit de roulement avec la vitesse, sur site de configuration peu bruyante.
 - b. Pour la rame B, plus récente, la contribution du bruit de traction croît moins vite que celle du bruit de roulement avec la vitesse, sur site de configuration peu bruyante.
 - c. Sur site de configuration bruyante, l'accroissement du niveau de bruit dû à la traction reste faible, voire négligeable pour la rame B, à toutes les vitesses.
 - d. Pour un site dont la pose de voie et le revêtement induisent des caractéristiques acoustiques favorables, il est nécessaire de prendre en compte dans la modélisation à la fois la contribution des éléments liés à la traction et ceux liés au bruit de roulement.
 - e. Pour un site à caractéristiques acoustiques peu favorables, la prise en compte de la traction peut être négligée quand on considère les indicateurs globaux comme le LAmax, le LAeq ou le SEL ; ceci n'est a priori pas le cas si une analyse fréquentielle doit être conduite.

Conclusions pratiques

L'étude a montré que la réduction de l'émission de bruit émis au passage d'un tramway doit avant tout reposer sur une réduction du bruit de roulement, notamment par le biais de la voie et de la plateforme. Ceci doit être pris en compte dès la conception d'une ligne lors du choix de la pose de voie et de la plate-forme, mais également pendant l'exploitation des lignes (entretien des voies).

Sur le plan acoustique, le rayonnement de la plate-forme elle-même reste peu important, contrairement à la contribution du rail. Pour réduire le rayonnement du rail, il est recommandé de privilégier une fixation rigide des rails sur leur support (traverse ou dalle), de façon à atténuer la propagation des vibrations dans le rail. On peut souligner au passage que ce choix est contraire aux exigences relatives à la génération et la transmission de vibrations dans le sol, un compromis au regard de contraintes acoustiques et vibratoires simultanées peut passer par une fixation rigide des rails conjointement à l'isolation du support par rapport au sol, via l'utilisation d'une dalle flottante.

Parallèlement, le choix d'un revêtement de surface absorbant (par exemple gazon) favorise la réduction du bruit, en agissant d'une part au niveau de l'émission de bruit de la plate-forme et du rail, et d'autre part en limitant la contribution des réflexions des sources de bruit de la rame.

Enfin, le bruit de roulement trouvant son origine dans la rugosité du rail et des roues respectivement, l'entretien de la voie et des roues est primordial, de façon à garantir un état de surface de roulement de bonne qualité.

Réduire le bruit au passage, c'est aussi agir sur le bruit des équipements de traction. Dans un contexte acoustique peu favorable (pose de voie bruyante et/ou vitesse élevée), la contribution des équipements de traction reste limitée, voire négligeable. En revanche si le bruit de roulement est réduit, la part du bruit de traction doit être prise en compte. Les caractéristiques du bruit de traction sont liées au type de rame et aux choix technologiques concernant la motorisation. Dans le cas de l'étude par exemple, la rame de conception plus ancienne (sans plancher bas pour les caisses motrices, moteurs à courant continu avec un moteur par bogie) introduit des composantes de bruit de traction à des fréquences basses, alors que la rame de conception plus récente (plancher bas, moteurs asynchrones, 4 moteurs-roues par bogie) influence le spectre émis aux fréquences élevées.

Enfin le choix d'une configuration à plancher bas intégral conduit à placer des équipements électriques en toiture, notamment la climatisation. Si le bruit de roulement et le bruit des équipements de traction sont émis plutôt latéralement, les équipements en toiture présentent une directivité vers le haut. Dans le cas d'une pose de voie favorisant un bruit de roulement élevé, la contribution de la climatisation (prépondérante par rapport aux autres sources en toiture) est très faible, même en hauteur. En revanche dans le cas d'une pose de voie acoustiquement favorable vis-à-vis du bruit de roulement, la présence de la climatisation peut occasionner un accroissement du niveau de bruit émis vers le haut qui peut dépasser 3 dB(A) à faible vitesse ; cette contribution décroît quand la vitesse augmente en raison de l'augmentation des autres sources (en particulier le bruit de roulement).

Perspectives

Le modèle d'émission d'une rame de tramway en champ libre, développé dans ce projet, est basé sur des données expérimentales. Il repose sur l'exploitation d'une base de données de mesures représentative de configurations existantes du matériel roulant et de caractéristiques de sites (pose de voie, revêtement de la plate-forme). Les validations réalisées se sont révélées prometteuses quant à la représentativité du modèle et les exploitations possibles. Plusieurs améliorations sont envisagées pour une meilleure description des sources et des situations dans le modèle, notamment :

1. la prise en compte séparée des raies spectrales dans les caractéristiques des sources, en complément d'un spectre continu ;
2. la prise en compte de l'état des surfaces de roulement ;
3. une meilleure connaissance des directivités horizontales des sources compactes, le choix des directivités horizontales reposant actuellement sur des postulats ;
4. une meilleure description du rayonnement de la plate-forme et des rails, incluant en particulier leurs contributions décroissantes de part et d'autre de la rame. Ceci passe par une meilleure caractérisation expérimentale de ce type de source, les traitements d'antenne utilisés actuellement étant mal adaptés à ce cas.

La richesse des situations modélisables repose sur l'étendue des ressources disponibles dans la base de données expérimentales des sources. Les points suivants méritent d'être étoffés :

5. en premier lieu, un enrichissement de la base de données de façon à élargir les cas de matériels roulants et de plates-formes disponibles ;
6. une caractérisation de la directivité verticale au-delà de 60° pour mieux prendre en compte l'émission vers les étages supérieurs dans des rues étroites.

Enfin, un intérêt supplémentaire du modèle de calcul est de pouvoir conduire par la suite à un outil prédictif, permettant d'analyser des situations fictives et réalistes, découlant de situations réelles, par modification des caractéristiques de sources et/ou de configurations de rame.

Vibrations dans le sol

1. Introduction

Les vibrations générées dans le sol par les transports guidés urbains peuvent conduire à des nuisances importantes pour les populations riveraines, en particulier dans le cas de rues étroites. La propagation de ces vibrations, de la voie aux bâtiments, puis la régénération de ces vibrations à l'intérieur des bâtiments peut être la source d'un bruit de grondement audible dans la bande de fréquence 30-200 Hz. Des vibrations sensibles par l'homme dans la gamme 5-80 Hz peuvent également être présentes. L'Union internationale des chemins de fer (UIC) a reconnu le besoin de travaux de recherche sur ces phénomènes il y a quelques années seulement [19] :

- du point de vue normatif, en particulier pour l'évaluation des vibrations et du bruit de grondement au niveau des bâtiments ;
- du point de vue perceptif, à travers le doute que les niveaux identifiés comme acceptables dans certaines réglementations nationales constituent une protection suffisante ;
- au niveau de la modélisation, en raison du manque d'outils de prédiction permettant aux opérateurs et constructeurs d'aboutir aux objectifs environnementaux envisagés ;
- au niveau des moyens de réduction eux-mêmes.

Ce manque de référentiels techniques communs tels que des critères vibratoires ou des méthodes de prévision peut s'avérer très pénalisant, en particulier lors de la construction d'une nouvelle ligne de tramway. En France, par exemple, le choix du type de pose de voie est parfois effectué à partir de règles très simplifiées dont la justification n'est pas toujours évidente¹¹.

Le problème des vibrations générées dans le sol soulève en effet de nombreuses questions dont les plus fréquentes portent sur la manière de les atténuer, en particulier au niveau de la plate-forme, ou sur leur aptitude à se propager dans le sol sur une longue distance. Dans quelle mesure le type de sol influence-t-il sur la propagation des vibrations ? Quelle est l'atténuation apportée par une pose de voie ? Est-elle indépendante du type du sol ? De la vitesse de la rame ? Du type de rame ? Peut-on la mesurer à l'aide d'impacts au marteau sur le rail ? Toutes

¹¹ On peut notamment évoquer la règle usuelle suivante : si la distance façade de bâtiment – axe de voie est supérieure à 12 m, aucune isolation vibratoire n'est à prévoir ; si la distance est comprise entre 7 et 12 m, on retient une pose permettant une réduction vibratoire de 10 dB ; enfin, si la distance est inférieure à 7 m, cela nécessite une réduction à prévoir de l'ordre de 20 dB.

ces questions sont cruciales pour bien appréhender le problème des vibrations dans le sol et développer des outils de simulation et des méthodes de mesures permettant de proposer des poses de voies adaptées.

Par ailleurs, la question de l'origine des vibrations, pourtant primordiale, est en général peu approfondie. Les vibrations générées au niveau du rail sont-elles liées au type de rame ? À sa vitesse ? Quels paramètres de la rame influent sur l'intensité des vibrations ? D'autres facteurs sont-ils en cause ? La compréhension du mécanisme de génération peut permettre de répondre à ces questions et de proposer des moyens de réduction substitutifs ou complémentaires à l'atténuation par la plate-forme, que ce soit dès la conception, au niveau de la maintenance, ou dans le cadre d'un projet de traitement curatif.

1.1. État de l'art

À l'origine des vibrations générées dans le sol au passage d'un véhicule guidé sur rail, réside une interaction dynamique globale véhicule/voie/sol, liée au déplacement sur la voie des efforts au contact roue/rail. Dans la littérature scientifique, de nombreux travaux de modélisation prennent en compte le système complet, mais une démarche souvent adoptée est de dissocier les problèmes de génération et de propagation. La première étape (génération) consiste à estimer les efforts au contact roue/rail au passage d'un véhicule. À partir de ces efforts, on évalue ensuite les vibrations dans la voie puis dans le sol (propagation). L'intérêt d'une telle démarche est d'élaborer des modèles plus simples pour chacune des deux étapes (véhicule/voie puis voie/sol par exemple).

Du point de vue de la génération, les modèles existants vont donc d'un simple traitement statistique de données expérimentales à des outils couplant rigoureusement la dynamique du véhicule et celle de la voie et du sol *via* le contact roue/rail. Plusieurs mécanismes ont été proposés dont les principaux sont [20] :

- une excitation quasi statique, liée au déplacement des charges d'essieux sur la voie ;
- une excitation paramétrique, liée au support discret de la voie par les traverses ;
- une excitation dynamique large bande, liée aux irrégularités de surface des rails et des roues.

Dans le cas de véhicules circulant à basse vitesse, c'est-à-dire lorsque la vitesse du véhicule est très inférieure à la vitesse de propagation des ondes dans le sol, l'excitation quasi-statique seule ne semble pas être en mesure d'engendrer des ondes se propageant à grande distance [21, 22]. Toujours à basse vitesse, l'excitation paramétrique liée à la fréquence de passage des roues sur les traverses (proportionnelle à la vitesse) ne devrait agir que dans la partie inférieure du spectre [23, 24]. L'excitation dynamique large bande, liée aux irrégularités de surface des roues et des rails, apparaît donc comme prépondérante pour ce type de véhicules. Pour ce dernier mécanisme, il semble que la prise en compte des masses non suspendues (essieux montés) soit suffisante pour expliquer l'interaction voie/véhicule et estimer les efforts au contact. Des travaux récents [24] met-

tent en évidence l'importance de la résonance du système voie/essieu (fréquence dite « P2 ») dans l'excitation. Toutefois, les études dans lesquelles des mesures de vibrations sur les essieux et des mesures d'irrégularités de surfaces des roues et des rails permettent de valider de tels modèles sont rares. La question de la corrélation entre les efforts induits par les différents essieux d'une rame est également peu abordée.

En ce qui concerne la propagation, de nombreux modèles voie/sol ont été récemment développés (voir par exemple [25, 26, 27]). Deux types d'approches peuvent être utilisés pour modéliser la voie [28] : d'une part des méthodes entièrement numériques basées sur une représentation par éléments finis des différents éléments de la voie, d'autre part des méthodes semi-analytiques où les équations sont résolues dans le domaine des nombres d'onde. Le deuxième type d'approches induit des temps de calcul assez courts, sachant en contrepartie que la complexité des modèles est limitée (éléments linéaires, structure homogène, périodique, etc.). L'autre avantage des méthodes par décomposition en nombres d'onde est qu'elles sont bien adaptées à une structure quasi-infinie comme la voie (pas de problèmes de conditions aux limites). En général (voir article de synthèse [29]), dans ce type d'approches, les rails et la dalle de béton constituant la voie sont ainsi modélisées par des poutres infinies en flexion, sur appuis continus dans le cas des rails. Bien que peu réaliste (le rail est souvent fixé de manière discontinue) cette notion d'appui continu pour le rail est bien adaptée en basses fréquences, comme le montrent les auteurs dans [30] et [24]. Quant au sol, les modèles sont souvent basés sur une hypothèse de massif multicouche, chacune des couches ayant un comportement isotrope, homogène et élastique. Les méthodes semi-analytiques par décomposition dans le domaine des nombres d'onde sont également bien adaptées. Dans l'article [31], on peut trouver par exemple plusieurs types d'écritures matricielles du comportement des différentes couches du sol (*thick layer method – thin layer method*) sous la forme de matrices de flexibilité. On peut également citer l'approche très répandue qui correspond à l'utilisation d'éléments de frontière pour l'établissement des fonctions de Green et l'écriture dans le domaine des nombres d'onde de la raideur ponctuelle du sol (*point load solution*). Enfin, des méthodes simplifiées, basées sur une grande expérience théorique et expérimentale sont proposées par des auteurs comme Auersch [32].

À l'aide de ces modèles, la plupart des recherches ont porté sur des applications du type train, se focalisant principalement sur l'effet des grandes vitesses vis-à-vis des vitesses de propagation des ondes dans le sol [24]. Pour les études « complètes », à titre d'exemple, on peut citer les travaux importants réalisés sur le site argileux de Ledsgard (en Suède, près de Goteborg) [33, 34, 35, 36] en vue de l'implantation d'une ligne à grande vitesse. En France, une étude menée dans le cadre du PREDIT 2¹² a permis de conduire une campagne d'essais expérimentaux sur une voie SNCF et de proposer un modèle de simulation numérique [21, 37]. Globalement, les études vibratoires sur le tramway sont assez peu développées [38]. Dans ce cas, en prévision de l'implantation d'une nouvelle ligne,

¹² Deuxième programme de recherche et d'innovation dans les transports terrestres (1996-2000)

des méthodes plus ou moins simplifiées (semi-analytiques ou numériques avec des hypothèses nécessairement restrictives) peuvent déjà apporter des éléments intéressants de réponse, même si la validation ne vient qu'a *posteriori* après la réalisation de la voie. En 2004, le projet du tramway d'Athènes a, par exemple, été mené en suivant cette démarche [39, 40].

1.2. Objectifs et méthodologie

Il existe ainsi de très nombreux modèles et résultats concernant les vibrations induites par un véhicule ferroviaire au niveau de la voie et du sol. En revanche, peu d'études sont finalement disponibles sur le sujet précis du tramway (véhicule lent, en zone urbaine et utilisant des poses de voies spécifiques) et les poses sur dalle de béton sont relativement peu étudiées (on trouve principalement des poses sur ballast, celle-ci étant la plus répandue à l'heure actuelle). Dans ce contexte, l'objectif est de développer des outils de simulation du comportement de l'ensemble de la structure tramway/voie/sol.

Le choix de la méthode se pose alors. Concernant la génération des vibrations, au regard de la bibliographie effectuée, il paraît nécessaire de prendre en compte l'excitation liée à la rugosité des roues et des rails. Un modèle de véhicule incluant seulement les masses non suspendues excitées par la rugosité combinée roue/rail peut sembler dès lors suffisant, ce qu'il conviendra de vérifier. Pour la propagation, il est proposé de conserver le modèle semi-analytique de sols multicouches développé par l'ECN pour le trafic ferroviaire, sachant qu'il permet des calculs rapides et que son efficacité a déjà été validée. Pour la voie, le choix de modèles analytiques permet une écriture dans le domaine du nombre d'onde correspondant à l'axe de la voie et ainsi un couplage facilité avec le modèle retenu pour le sol. Ces modèles permettent par ailleurs une résolution rapide, la contrepartie étant qu'ils ne rendent pas aussi bien compte des comportements réels des structures que les modèles éléments finis par exemple. Une question est de savoir dans quelle mesure cette simplification est appropriée dans le cas du tramway (sols hétérogènes, poses de voie complexes, etc.).

La stratégie générale retenue est la suivante :

- réalisation d'une campagne de mesures à Nantes visant à caractériser les vibrations émises au passage d'une rame de tramway (au niveau du véhicule, de la voie et du sol) dans des configurations diverses en termes de type de rame, de site (type de pose de voie/type de sol) et de vitesse ; en parallèle, réalisation de mesures complémentaires visant à caractériser les sites (comportement mécanique du système voie/sol, état de surface des rails).
- développement de modèles adaptés aux différentes configurations (type de rame et site) et validation des modèles à partir de confrontations avec les mesures à tous les niveaux (comportement mécanique du système voie/sol, vibrations au passage de la rame).

Ces deux phases sont décrites dans les deux sections suivantes.

2. Campagne expérimentale

La campagne a été réalisée à Nantes en septembre 2005, puis complétée en mars 2006, sur quatre sites différents. Chaque site propose une pose de voie particulière (voir les descriptions détaillées en annexe 1) : classique pour le premier (site dit « *Ferrière* »), isolante pour les deux suivants (semelle souple pour « *Longchamp* », dalle flottante pour « *Libération* »), proche d'une voie ferroviaire (ballastée) pour le dernier site (« *Souillarderie* »). Comme pour les mesures d'émission de bruit, deux types de rames, notées A et B, ont été utilisées (voir également les descriptions détaillées en annexe 2). Elles se distinguent principalement par leur poids total, leur nombre et leur type de bogie. Sur la rame A, les véhicules sont en effet constitués de bogies avec essieux monoblocs, tandis que la rame B est équipée de roues indépendantes. Les mesures au passage ont été effectuées en ligne droite et vitesse stabilisée, avec des rames sans passagers, de nuit (de manière à réduire les interactions avec d'autres sources vibratoires, en particulier le trafic routier) et pour plusieurs vitesses (20, 30, 40 et 50 km/h). Deux types de mesures peuvent être distingués :

- des mesures de vibrations embarquées sur les essieux d'un bogie porteur ;
- des mesures de vibrations au passage au niveau du rail et du sol, à plusieurs distances de la voie.

Comme indiqué plus haut, des mesures complémentaires visant à caractériser les sites ont également été réalisées :

- la caractérisation du comportement mécanique du système voie/sol à partir de mesures au marteau d'impact ;
- la caractérisation de l'état de surface des rails (irrégularités) au niveau de la bande de roulement.

2.1. Comportement mécanique du système voie/sol

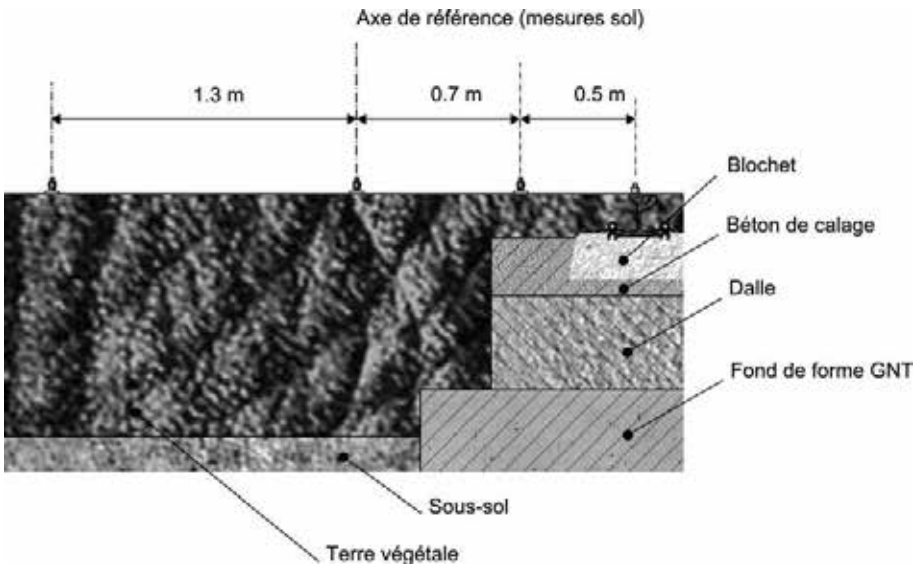
La détermination des caractéristiques physiques et mécaniques des voies et des sols constitue une étape délicate. L'exploitant du réseau des tramways nantais (Semitan) dispose certes d'informations pour les sites concernés (coupes transversales des voies, caractérisation et sondage des sols) mais celles-ci restent incomplètes et, la réalisation d'un chantier ne respectant pas toujours les directives du cahier des charges, relativement incertaines (semelles de voie et dispositifs d'isolation en particulier). Par conséquent, pour disposer de données crédibles en vue de les utiliser par la suite dans le cadre de la simulation numérique, des mesures au marteau d'impact ont été réalisées sur les différents sites.

2.1.1. Description des mesures

Sur chacun des sites¹³, deux séries de mesures ont été effectuées à l'aide d'accéléromètres fixés sur les rails et sur le sol :

- des mesures de mobilité ponctuelle de voie (*ratio* vitesse verticale du rail/force d'impact sur le rail) et de mobilités de transfert voie/sol (*ratio* vitesse verticale du sol/force d'impact sur le rail) à différentes distances de la voie (0,5 m, 1,20 m et 2,50 m, cf. Figure 47) ;
- des mesures de mobilités de transfert sol/sol (*ratio* vitesse verticale du sol/force d'impact sur le sol) suivant la procédure de la méthode SASW (*Spectral Analysis of Surface Waves*), par exemple décrite dans [41], pour des distances allant de 0,25 m à 16 m, parallèlement et perpendiculairement à la voie (cf. Figure 48)

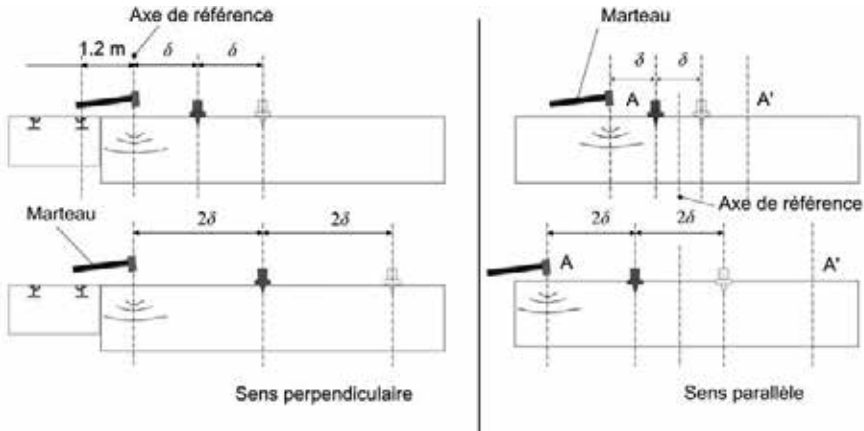
Figure 47 : placement des capteurs pour la mesure des mobilités voie/sol (exemple sur le site Ferrière)



La première série permet surtout de caractériser les types de pose de voie et a été utilisée pour recalibrer les paramètres mécaniques correspondants dans la phase de modélisation. La seconde série permet quant à elle de caractériser les sols via l'estimation de leur courbe de dispersion (vitesse des ondes de surface en fonction de la fréquence). Les caractéristiques des différentes couches de terrain (épaisseur et paramètres mécaniques) peuvent alors être déduites moyennant certaines hypothèses (voir également la phase de modélisation).

¹³ Sur le site en remblai de Souillarderie, seules les mesures de mobilité de transfert voie/sol ont pu être réalisées.

Figure 48 : placement des capteurs pour la mesure des mobilités sol/sol suivant la procédure SASW



2.1.2. Mobilités ponctuelles de voie et mobilités de transfert voie/sol

La Figure 49 présente les résultats concernant les mobilités ponctuelles de voie et les mobilités de transfert voie/sol pour les différents sites.

Mobilités ponctuelles – Les amplitudes des mobilités ponctuelles sont conformes aux valeurs attendues pour les poses classique et dalle flottante. En particulier pour ce dernier site, la résonance de dalle est bien visible autour de 20 Hz. Il semble que les raideurs de semelle associées à ces deux poses soient assez proches puisque les mobilités ponctuelles sont similaires en dehors de la résonance de la dalle flottante. En revanche, l'amplitude plus faible de la mobilité ponctuelle mesurée sur le site *Longchamp* est surprenante, puisque ce type de pose comporte théoriquement une semelle plus souple que la semelle utilisée en pose classique.

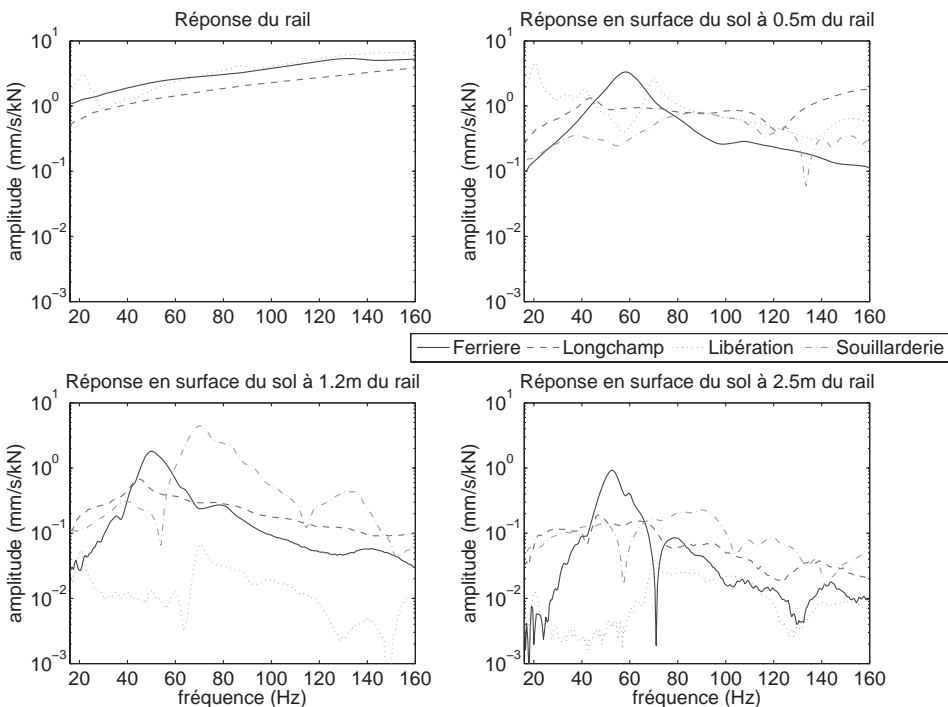
Mobilités de transfert à 0,5 m – Dans le cas des poses sur dalle, ce capteur est situé « au dessus » de la dalle de béton utilisée pour la voie. Par conséquent, le couplage dalle/revêtement de surface est à prendre en considération pour l'analyse des mesures de mobilité de transfert correspondantes. Ainsi, le site *Ferrière* présente un découplage net, et les niveaux vibratoires sont atténués, sauf autour de la fréquence de 60 Hz où il apparaît probablement une résonance voie/sol. La gamme de fréquences prépondérante pour la transmission des vibrations sur *Ferrière* se situe ainsi approximativement entre 40 et 80 Hz. Le site *Longchamp* présente des niveaux vibratoires certes atténués, mais moins que le site en pose classique, ce qui montre un couplage dalle/revêtement de surface plus fort que sur le site précédent. Par ailleurs, encore une fois, les niveaux de *Longchamp* ne sont pas conformes à ceux attendus pour une pose sur semelle souple. Pour le site *Libération*, on obtient des niveaux vibratoires plus élevés que pour une pose classique, ce qui est en accord avec le comportement d'une dalle flottante ; jusqu'à 45 Hz environ, les niveaux vibratoires sont comparables à ceux du rail (la résonance de dalle étant toujours visible), puis il apparaît une atténuation ; autour

de 70 Hz une résonance voie/sol semble visible, phénomène similaire à celui rencontré sur *Ferrière*. Enfin pour le site sur voie ballastée (*Souillarderie*), on note une bonne atténuation des vibrations de la part du ballast.

Mobilités de transfert à 1,2 m – Ce capteur est situé « en dehors » de la dalle de béton pour les voies sur dalle. Ainsi, on trouve une atténuation très forte des vibrations mesurées sur le sol pour le site sur dalle flottante. En revanche, pour la voie ballastée, on note une « reprise » des vibrations avec une résonance probable voie/sol assez marquée ; ceci est probablement dû à la position du capteur, situé sur le rebord de la voie limitant le ballast.

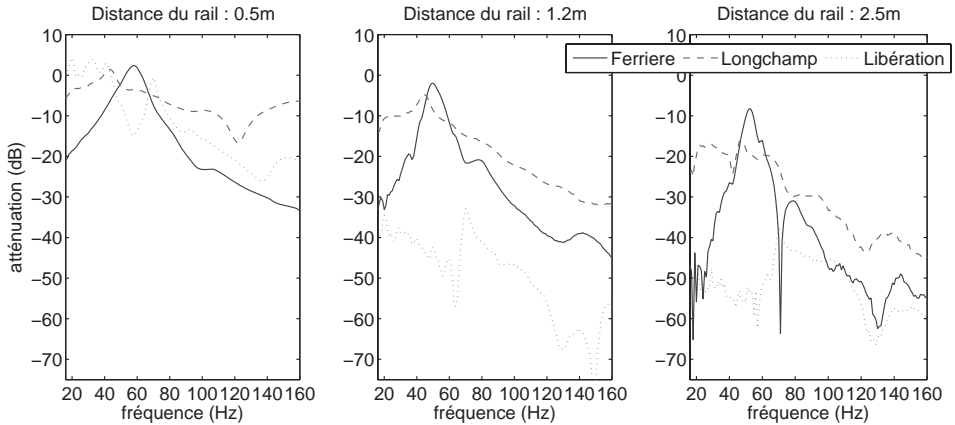
Mobilités de transfert à 2,5 m – Les niveaux vibratoires sur le site Libération restent les plus faibles, surtout pour la gamme de fréquences 20-70 Hz ; ceci confirme l'efficacité de la pose avec dalle flottante. Par ailleurs, la pose isolante sur semelle souple semble peu efficace, mais son efficacité est à prendre en compte avec le type de sous-sol sur lequel repose la structure de voie.

Figure 49 : mobilités voie/sol sur les différents sites



2.1.3. Mobilités de transfert sol/sol

Les résultats des mesures de mobilité de transfert sol/sol sont présentés sur la Figure 50. Il apparaît que la gamme de fréquences de transmission des vibrations en champ libre se situe pour ces sols entre 40 et 140 Hz.

Figure 50 : mobilités sol/sol sur les différents sites

Pour le site *Ferrière*, l'allure de la réponse (palier sur les amplitudes pour la gamme de fréquences 50-130 Hz) est caractéristique d'un sol constitué d'au moins une couche souple, et reposant sur un sous-sol plus rigide. De plus, la progression rapide des amplitudes autour de 40-50 Hz indique que la variation de raideur du sol avec la profondeur est bien marquée.

Pour le site *Longchamp*, en partant de la fréquence de 20 Hz, la réponse du sol présente une première zone où les amplitudes augmentent avec la fréquence ; ensuite elles diminuent quand la fréquence augmente (entre 60 et 110 Hz environ à 2 m, la zone se déplaçant vers les fréquences plus élevées lorsque la distance considérée du point d'impact augmente) ; enfin, les amplitudes des vibrations augmentent à nouveau pour les fréquences supérieures, phénomène caractéristique d'un sol constitué d'une première couche rigide, reposant sur un sous-sol plus souple.

Pour le site *Libération*, on retrouve un sol certainement constitué d'une (ou plusieurs) couches souples reposant sur un sous-sol plus rigide. En effet, il apparaît une résonance assez marquée autour de 60-70 Hz.

En termes d'atténuation des vibrations avec la distance, on peut noter que les sols des sites *Ferrière* et *Libération* présentent un comportement assez similaire jusqu'à 100 Hz, fréquence au-delà de laquelle les vibrations sont plus atténuées à *Ferrière*. Pour le site *Longchamp*, les vibrations sont peu atténuées avec la distance. Au final, le comportement des 3 sols peut se résumer de manière schématique comme suit :

Ferrière : sol « souple » fortement amorti ;

Libération : sol « mi-dur » moyennement amorti ;

Longchamp : sol « dur » faiblement amorti.

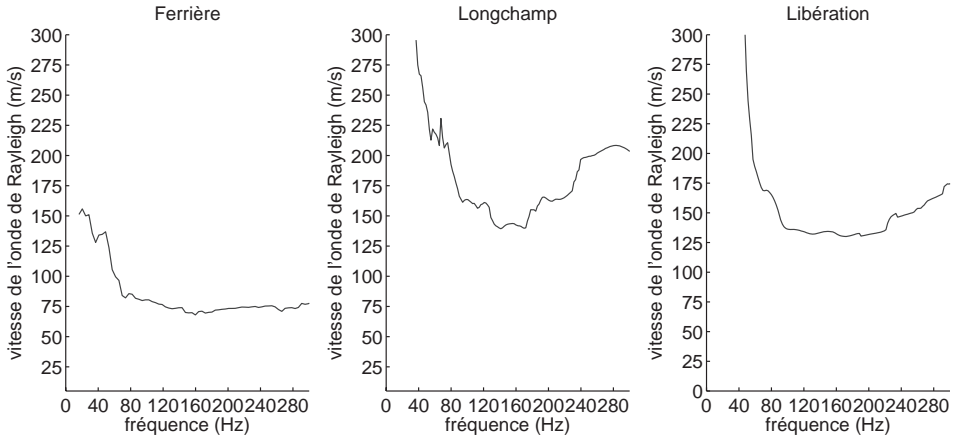
2.1.4. Estimation de la courbe de dispersion des sols

La dispersion géométrique des ondes, c'est-à-dire la dépendance vis-à-vis de la fréquence de la vitesse des ondes se propageant à la surface d'un sol, est liée directement aux caractéristiques du sous-sol. Ainsi, dans le cas d'un massif homogène, la vitesse de l'onde de surface est indépendante de la fréquence. À l'opposé, dans le cas d'un sol hétérogène, la vitesse de l'onde résultante provient d'une combinaison des propriétés mécaniques des différentes couches mises en jeu. Finalement, l'allure de la courbe de dispersion est classée, en général, suivant le critère de variation de la raideur du sol avec la profondeur : dans le cas d'un sol pour lequel la raideur augmente de façon continue et monotone avec la profondeur, la courbe de dispersion est dite normale, et la vitesse décroît lorsque la fréquence augmente ; dans le cas d'un sol pour lequel la raideur diminue avec la profondeur, la courbe de dispersion est dite inversée, et la vitesse de l'onde de surface augmente avec la fréquence. Évidemment, ces considérations théoriques ne reflètent pas souvent le comportement global du sol étudié, mais cette classification de la courbe de dispersion (normale ou inversée) permet néanmoins d'appréhender plus précisément le type de sol en analysant uniquement l'allure de la courbe de dispersion obtenue pour un sol donné.

Pour les trois sites pour lesquels les mobilités de transfert sol/sol ont été mesurées, des courbes de dispersion ont pu être estimées. Deux méthodes ont été utilisées. La première, dite SASW (*Spectral Analysis of Spectral Waves*), consiste à calculer le déphasage, en fonction de la fréquence, entre les ondes mesurées par le capteur le plus éloigné de l'impact et celles obtenues par le capteur le plus proche [41]. Une autre méthode, équivalente, consiste à estimer le temps nécessaire à l'onde pour parvenir aux deux capteurs en analysant les vitesses de phase [32]. Les résultats sont présentés sur la Figure 51. Pour les sites *Ferrière* et *Longchamp*, la méthode SASW a été utilisée, alors que pour le site *Libération* la méthode d'analyse des vitesses de phase a été privilégiée pour des problèmes de dispersion dans les résultats. L'analyse rapide des courbes de dispersion pour les trois sols confirme leurs caractéristiques déjà mises en avant lors de l'étude des fonctions de transfert en champ libre :

- le sol du site *Ferrière* est bien le plus souple, sa raideur augmentant avec la profondeur¹⁴ ;
- le sol du site *Longchamp* est bien le plus raide et l'allure de la courbe de dispersion qui s'infléchit à partir de 160 Hz montre qu'il existe une ou plusieurs couches rigides en surface, reposant sur un sol plus souple, lui-même reposant sur un sol dont la raideur augmente avec la profondeur ;
- le site *Libération* présente un sol déjà qualifié précédemment de « mi-dur », pour lequel là aussi la raideur augmente avec la profondeur si l'analyse se réduit à la gamme de fréquences allant de 0 à 200 Hz.

¹⁴ La vitesse de l'onde de surface estimée dans la gamme de fréquences 0-50 Hz est toutefois à considérer avec précaution étant donné la dispersion importante des différentes courbes.

Figure 51 : courbes de dispersions des sols sur les différents sites

2.2. État de surface des rails

Comme indiqué dans l'état de l'art, les irrégularités de surface des rails et des roues sont susceptibles d'être à l'origine des vibrations du véhicule et donc des efforts dynamiques au contact roue/rail. En ce qui concerne les rails, ces irrégularités peuvent être définies comme la variation du profil longitudinal du rail au niveau de la bande de roulement. Plusieurs termes sont utilisés pour nommer ces défauts. On parle parfois d'ondulations ou encore d'usure ondulatoire. Le terme de rugosité est également employé même si, en français, il est plutôt réservé à usage tribologique, c'est-à-dire à des échelles de longueur beaucoup plus petites. La caractéristique principale de ces irrégularités est en effet leur gamme de longueur d'onde. À un défaut de longueur d'onde λ correspond une fréquence de vibration

$$f = v / \lambda \quad (4)$$

où v est la vitesse de passage du véhicule. Pour des fréquences variant entre 10 et 200 Hz et des vitesses comprises entre 5 et 15 m/s (de 20 à 50 km/h environ), on obtient des « grandes » longueurs d'onde allant de 2 à 150 cm. Pour comparaison, les longueurs d'onde à l'origine du bruit de roulement aérien sont plutôt comprises entre 5 et 200 mm, les fréquences concernées étant plus élevées. La deuxième caractéristique de ces défauts est leur amplitude. Selon la longueur d'onde, la gamme d'amplitude est très variable et on a l'habitude d'utiliser une échelle logarithmique c'est-à-dire des niveaux en dB avec une amplitude de référence fixée à 1 μm . Enfin, on fait souvent l'hypothèse que ces irrégularités constituent un signal aléatoire spatialement stationnaire. En introduisant la notion de fréquence spatiale (nombre d'onde), inverse de la longueur d'onde, on parle alors de densité spectrale de « rugosité » ou encore de niveaux de « rugosité » par bande de fréquence (octave ou 1/3 d'octave) centrée sur une longueur d'onde donnée. C'est cette grandeur statistique que l'on cherche à mesurer.

2.2.1. Principe de la mesure

Il existe plusieurs méthodes (et donc différents outils) pour mesurer la variation du profil longitudinal d'un rail [42]. Aux très grandes longueurs d'onde (supérieures à 1 m) intervenant au niveau de la dynamique globale du véhicule, des méthodes de mesures en continu permettent de reconstituer le profil du rail à partir de un ou plusieurs capteurs de déplacement fixés sur un chariot (ou même un véhicule) mobile. Aux petites longueurs d'onde, à l'origine du bruit de roulement aérien, on utilise plutôt des « règles fixes » munies de capteurs de déplacement mobiles. Il existe également des systèmes de type chariot mobile, utilisant des accéléromètres, et pouvant s'adapter à plusieurs gammes de longueurs d'onde.

Dans le cadre du projet, un instrument spécifique a été utilisé par l'INRETS. Le chariot CATA (Computer Aided Track Analysis), développé à l'origine par le Laboratoire des Technologies Nouvelles de l'INRETS et destiné à l'étude de la dynamique des véhicules ferroviaires, a en effet été adapté pour gagner en précision (capteurs, chaîne d'acquisition) d'une part et rouler dans les rails à gorges des tramways d'autre part. Pour les longueurs d'onde supérieures à 10 cm, soit environ la moitié de la gamme cible, l'instrument permet aujourd'hui de mesurer des irrégularités d'une amplitude au moins égale à 5 μm .

Le dispositif est basé sur le principe d'une règle qui prend appui sur le rail à ses deux extrémités. On mesure la flèche en un point intermédiaire fixe. Afin d'avoir une mesure en continu de cette flèche, on adapte des roues aux deux points d'appui, et le dispositif est alors déplacé sur le rail (cf. Figure 52). En faisant l'hypothèse que la courbure longitudinale du rail est faible, on peut établir une relation linéaire entre la flèche mesurée et le profil du rail en fonction de l'abscisse mobile. Cette relation se traduit par un filtre (ou fonction de transfert) dans le domaine des longueurs d'onde. En raison du bruit inhérent à toute mesure, l'estimation du profil par inversion directe de la fonction de transfert peut conduire à des erreurs importantes, surtout pour les faibles longueurs d'onde où la fonction de transfert présente de fortes variations. Pour limiter cet effet on procède à la « recoloration » du signal [43] en corrigeant la fonction de transfert inverse de façon à minimiser la variance globale entre le signal estimé et le signal réel (filtre de Wiener). Le chariot CATA est constitué de deux règles de ce type qu'un opérateur pousse sur les rails (cf. Figure 53). Ce système permet la mesure des profils des deux rails au cours du même déplacement.

Figure 52 : principe d'une règle de mesure de profil mobile

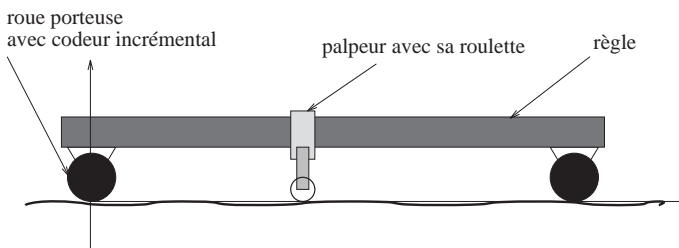


Figure 53 : chariot CATA sur le site de *Ferrière*

2.2.2. Description des mesures

Les mesures de profils ont été réalisées sur les 4 sites, sur une distance de 40 m de part et d'autre du point fixe de mesure des vibrations de la voie. Le réglage de l'instrument a été effectué de manière à rouler sur les bandes de roulement visibles sur les rails. Avant chaque mesure, les différentes roues du chariot et des palpeurs ont été tournées de façon aléatoire afin de minimiser, d'un passage à un autre, l'apparition d'un motif particulier lié aux différents défauts des roues et à leurs combinaisons possibles. Deux allers et retours complets ont été effectués sur les 4 sites de mesures. Pour les sites de *Ferrière*, *Longchamp* et *Libération*, une mesure supplémentaire a été effectuée en retournant le chariot sur lui-même. Chaque mesure est dépouillée séparément et la comparaison des résultats a permis d'évaluer leur répétabilité.

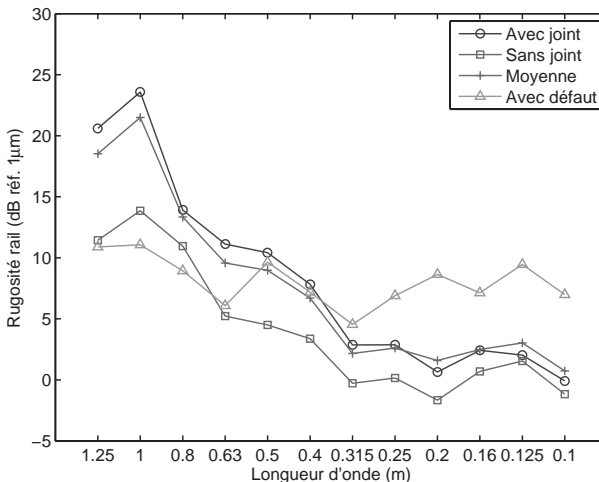
Des niveaux de rugosité par tiers d'octave ont été calculés à partir de spectres en bandes fines obtenus par FFT des signaux spatiaux. Pour obtenir assez de points dans les tiers d'octaves correspondant aux plus grandes longueurs d'onde, les FFT ont été réalisées sur des intervalles de 10 m. La longueur totale de mesure étant de 80 m, quinze spectres environ ont été calculés en choisissant un recouvrement de 50 % et en appliquant une fenêtre de Hanning sur chaque intervalle pour lisser les spectres. Ce découpage présente l'avantage d'obtenir une représentation espace/fréquence des signaux permettant de repérer des événements transitoires éventuels et de vérifier ainsi la stationnarité du signal. Il permet également de réaliser des moyennes avec une variance correcte, même pour les grandes longueurs d'onde.

2.2.3. Tendances générales, répétabilité, stationnarité

De façon générale, les niveaux de rugosités moyens augmentent tous uniformément avec la longueur d'onde à partir de 10 cm et les ordres de grandeur sont conformes à ce qu'on peut trouver dans la littérature (entre 0 et 30 dB μ m par tiers d'octave). La répétabilité est bonne (moins de 3 dB d'écart entre les mesures) pour les niveaux de rugosité par tiers d'octave supérieurs à 5 dB μ m. Pour les niveaux inférieurs à cette limite, des différences allant jusqu'à 6 dB peuvent apparaître. En plus du bruit inhérent à la mesure, un éventuel décalage latéral du chariot de mesure peut expliquer ces différences. Sur le site de *Libération* (légère courbe), où la dispersion des mesures est la plus grande, on a en effet pu observer à l'œil nu une variation de l'usure des rails avec la bande de roulement.

Les signaux sont assez stationnaires mais deux types d'évènements transitoires sont à signaler : les joints des rails et les défauts localisés. Les joints sont caractérisés par un abaissement doux du profil de l'ordre du millimètre sur une distance d'environ 2 cm. Ils sont régulièrement espacés, en vis-à-vis sur les rails droit et gauche et affectent les spectres de rugosité dans les grandes longueurs d'onde uniquement. L'effet des joints sur le niveau de rugosité des rails est en effet supérieur à 3 dB pour les longueurs d'onde supérieures à 31,5 cm seulement (cf. Figure 54). Les défauts localisés sont caractérisés par une variation beaucoup plus abrupte du profil. Leur apparition est très sporadique (1 à 2 occurrences sur 80 m) et concerne souvent un seul rail. Leur effet sur les spectres de rugosité est significatif pour les moyennes et petites longueurs d'onde, inférieures à 25 cm environ.

Figure 54 : niveaux de rugosité du rail par tiers d'octave sur le site de Longchamp pour différentes portions de rail

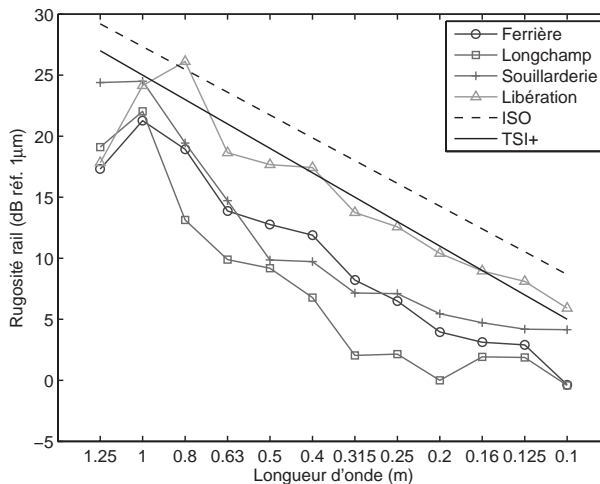


2.2.4. Comparaison entre les sites

La variation des niveaux de rugosité moyens (sur les intervalles sans défauts localisés) avec le site est importante et peut atteindre jusqu'à 10 dB entre *Longchamp* et *Libération* (cf. Figure 55). Sur le site de *Libération*, il est probable que les niveaux de rugosité élevés soient dus aux phénomènes d'usure supplémentaire des rails dans la courbe. À *Longchamp*, les niveaux de rugosité sont faibles puisqu'ils sont de l'ordre du μm à partir de 25 cm de longueur d'onde. Sur les deux autres sites, les niveaux sont intermédiaires et assez comparables. On observe toutefois une légère élévation de la rugosité dans les tiers d'octaves 12,5 et 10 cm à *Souillarderie* contre un abaissement du spectre dans les mêmes tiers d'octave à *Ferrière* et *Longchamp*.

On note également que dans cette gamme de longueur d'onde, les rugosités mesurées sont bien inférieures (à part à *Libération*) aux courbes limites de rugosité caractérisant le rail de référence dans la norme ISO EN 3095-2005 [44] et dans la réglementation européenne sur les spécifications techniques d'interopérabilité du matériel roulant conventionnel (TSI+) [45]. La variation avec la longueur d'onde est toutefois similaire, autour de 6 dB par octave en moyenne.

Figure 55 : niveaux de rugosité du rail par tiers d'octave en fonction du site et comparaison avec les courbes limites de référence pour le ferroviaire



2.3. Mesures embarquées : vibrations des essieux

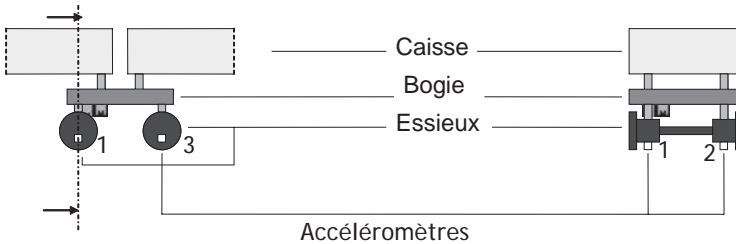
Les sollicitations dynamiques auxquelles la voie est soumise sont liées aux vibrations du véhicule au passage. Pour des fréquences variant entre 10 et 200 Hz, on suspecte que les vibrations des masses non suspendues (essieux montés) en constituent la part prépondérante, les fréquences de résonance des suspensions premières ne dépassant pas 5 Hz en règle générale. De plus, dans

cette gamme de fréquence, on peut supposer que les masses non suspendues se comportent encore essentiellement comme des solides rigides. La mesure des vibrations des essieux au passage apparaît donc comme la manière la plus directe d'estimer les efforts dynamiques au contact roue/rail.

2.3.1. Description des mesures

Les vibrations verticales des essieux ont été caractérisées expérimentalement à l'aide d'accéléromètres placés sur les parties fixes (boîtes d'essieux) des essieux d'un bogie porteur. Sur la rame A, trois accéléromètres ont été utilisés, dont deux sur les boîtes droite et gauche de l'essieu avant et un sur une boîte de l'essieu arrière du bogie (cf. Figure 56). Sur la rame B, deux accéléromètres seulement ont été fixés sur les boîtes droite et gauche de l'essieu avant.

Figure 56 : placement des capteurs pour la mesure des vibrations des essieux



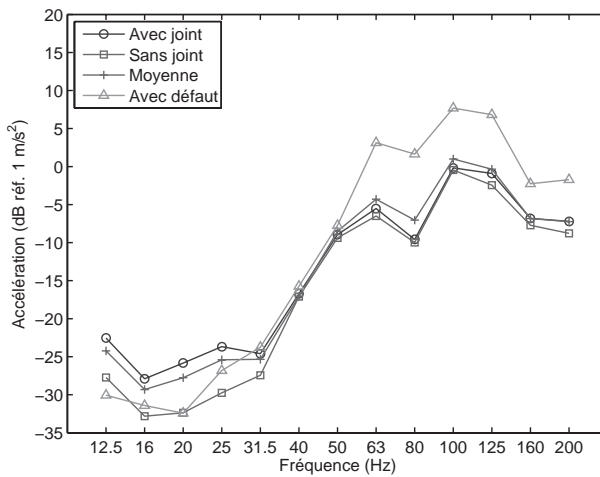
Les mesures ont été réalisées sur une période variable avec la vitesse mais constante en ce qui concerne la distance parcourue par le véhicule, soit 40 m de part et d'autre du point fixe de mesure des vibrations de la voie, à l'instar des mesures de profil des rails. Les niveaux par tiers d'octave ont été calculés à partir de spectres en bandes fines obtenus par FFT des signaux temporels selon un découpage identique à celui effectué dans le cas des mesures de profil de rails. Un grand nombre de combinaisons site/type de rame/vitesse ont été analysées. Par ailleurs, des calculs complémentaires de cohérence ont été effectués entre les accélérations fournies par les différents capteurs (boîte droite/boîte gauche, essieu avant/essieu arrière).

2.3.2. Tendances générales, répétabilité, stationnarité

De façon générale, les niveaux d'accélération mesurés à proximité des roues du bogie augmentent avec la fréquence de 12,5 à 63 Hz. Entre 63 et 125 Hz, on observe un plateau avec un ou deux pics plus ou moins marqués puis les niveaux redescendent dans les derniers tiers d'octave du spectre. Les niveaux maximums peuvent atteindre 10 à 15 dB réf. 1 m/s² par tiers d'octave. La répétabilité est très bonne (moins de 2 dB d'écart entre les mesures) sauf sur le site de *Libération* où les mesures varient avec le sens de circulation, en particulier dans le tiers d'octave 50 Hz. Ce phénomène marginal est probablement lié à la légère courbe caractérisant le site.

Les signaux sont globalement stationnaires. Les événements transitoires visibles semblent liés aux défauts de surface localisés sur les rails. L'effet de ces défauts est significatif dans la partie supérieure du spectre à partir d'une fréquence qui varie avec la vitesse mais qui correspond à une longueur d'onde de 20 cm environ, soit à peu près la limite à partir de laquelle les spectres de rugosité sont affectés. En comparaison, les niveaux de vibrations mesurés sur les portions avec et sans joints sont relativement similaires sauf pour les premiers tiers d'octaves du spectre correspondant aux grandes longueurs d'onde affectées (cf. Figure 57).

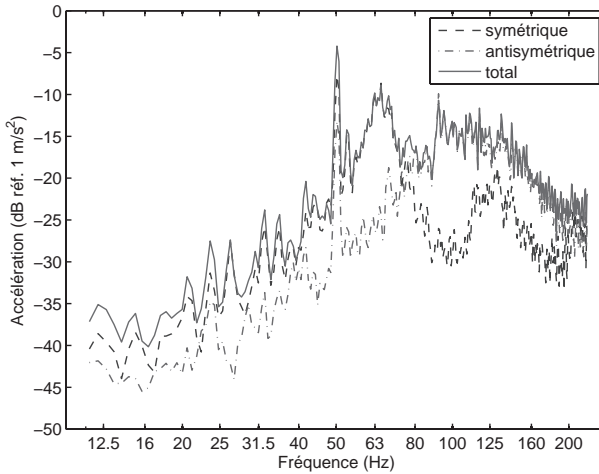
Figure 57 : niveaux d'accélération par tiers d'octave de l'essieu de la rame A à 30 km/h sur le site de Longchamp pour différentes portions de rail



2.3.3. Comparaisons et corrélations entre différentes roues

Les niveaux d'accélération à proximité des différentes roues d'un même bogie sont très proches. La corrélation entre les accélérations à proximité des roues droite et gauche d'un même essieu est différente selon qu'il s'agit d'une rame de type A ou d'une rame de type B. Pour la rame de type A, on observe deux fréquences pour lesquelles la cohérence est très proche de l'unité. À ces fréquences, les spectres d'accélération présentent des maximums d'amplitude correspondant probablement à la résonance de modes du système essieu/voie. La décomposition des accélérations mesurées sur un mode symétrique et un mode antisymétrique permet d'ailleurs de retrouver assez bien les deux pics dans le spectre (cf. Figure 58, pics autour de 63 et 125 Hz). Pour la rame de type B, la cohérence est toujours assez faible, ce qui semble en accord avec le fait que les roues d'un même essieu sont indépendantes pour ce type de rame (2 demi-essieux). Cependant, les spectres d'accélération présentent tout de même deux pics qu'on peut retrouver par décomposition sur un mode symétrique et un mode antisymétrique (autour de 80 et 120 Hz). Quant aux cohérences entre deux roues adjacentes (c'est-à-dire sur le même rail), elles sont toujours assez faibles.

Figure 58 : niveaux d'accélération (DSP) de l'essieu de la rame A à 20 km/h sur le site de Souillarderie



2.3.4. Effet de la vitesse

L'effet de la vitesse sur les niveaux de vibrations est faible. Les niveaux ont tendance à croître légèrement avec la vitesse mais principalement dans les premiers tiers d'octave. En bandes fines, on peut observer le décalage de nombreux pics avec la vitesse, probablement liés à la rugosité. La coïncidence entre un pic de rugosité et les fréquences de résonance voie/essieu peut alors conduire à des niveaux importants dans certains tiers d'octave supérieurs (voir Figure 59 à 50 km/h et 125 Hz).

2.3.5. Effet du site

L'effet du site sur les vibrations est assez important dans certains tiers d'octave (cf. Figure 60). Sur le site de *Libération* en particulier, on observe des niveaux de 3 à 10 dB plus élevés que sur les autres sites. La forte rugosité des rails sur ce site est très probablement en cause. D'ailleurs, les différences observées sur les niveaux de rugosité entre les sites se retrouvent assez bien sur les niveaux d'accélération : c'est à *Longchamp* que les niveaux sont les plus faibles tandis que sur les sites de *Ferrière* et de *Souillarderie*, les spectres se distinguent surtout dans les tiers d'octave supérieurs c'est-à-dire pour les petites longueurs d'onde. La rugosité des rails semble donc bien être l'excitation prépondérante.

2.3.6. Effet du type de rame

L'allure générale des spectres, l'effet de la vitesse et celle des sites sur les vibrations sont assez semblables entre la rame de type A et la rame de type B. Seules les fréquences de résonance voie/essieu changent comme indiqué plus haut. Par ailleurs, la résonance du mode antisymétrique de la rame de type B est faible et est souvent noyée dans la résonance du mode symétrique notamment

dans la représentation en tiers d'octave, d'où un spectre globalement plus lisse et un peu moins élevé dans les tiers d'octave supérieurs (cf. Figure 61). Dans les spectres en bandes fines, on peut également observer quelques pics se décalant avec la vitesse mais distincts selon la rame. Il pourrait s'agir de pics de rugosité des roues.

Figure 59 : effet de la vitesse sur les niveaux d'accélération par tiers d'octave de l'essieu de la rame A sur le site de Souillarderie

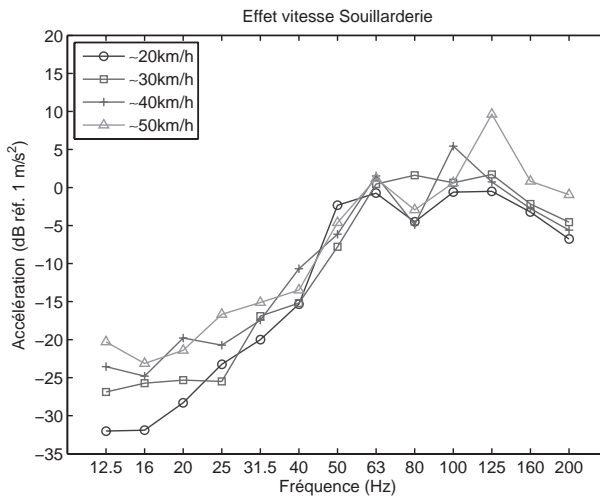


Figure 60 : effet du site sur les niveaux d'accélération par tiers d'octave de l'essieu de la rame A à 30 km/h

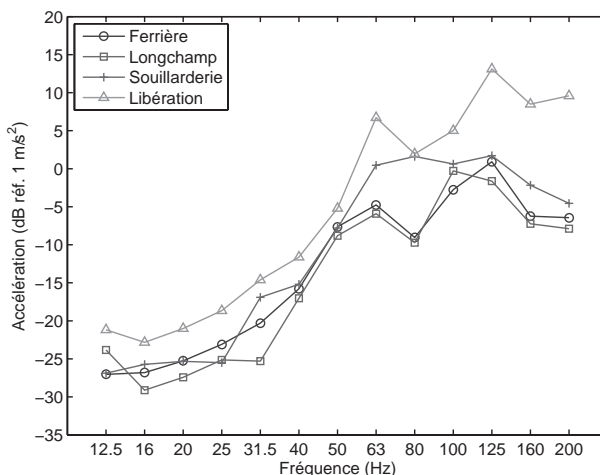
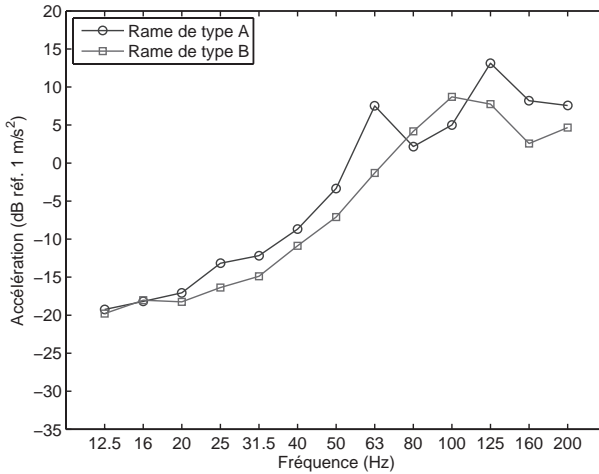


Figure 61 : effet du type de rame sur les niveaux d'accélération des essieux par tiers d'octave sur le site de Libération à 40 km/h



2.4. Mesures au passage : vibrations de la voie et du sol

2.4.1. Description des mesures

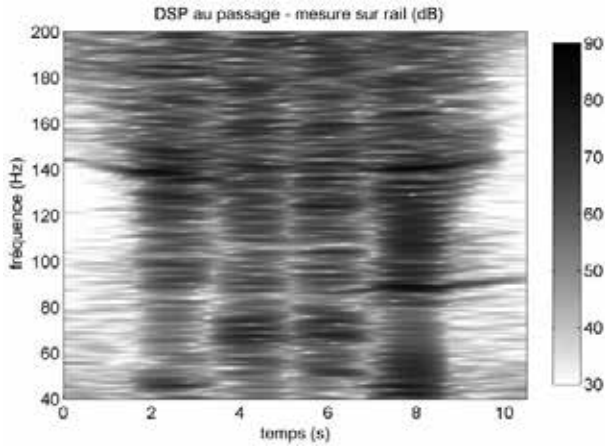
Les mesures de vibrations au passage ont été effectuées à l'aide d'accéléromètres placés au niveau d'un rail et du sol, dans une configuration semblable à celle définie pour la mesure des mobilités voie/sol (cf. Figure 47). Les vitesses de passage précises sont connues à l'aide du dispositif mis en place pour la caractérisation des sources de bruit (cellules infrarouges fixes installées en bordure de voie et plaques réfléchissantes disposées sur le flanc de la rame). Les signaux temporels sont enregistrés puis traités *a posteriori* suivant une analyse par FFT successives. Chaque FFT est réalisée sur une durée variable avec la vitesse, correspondant au passage complet d'un bogie (de 1,9 à 0,8 s pour des passages allant de 20 à 50 km/h). Le pas de temps utilisé étant constant avec la vitesse (125 ms), le recouvrement est variable mais toujours assez important (> 90 %). Une fenêtre de Hanning est utilisée pour lisser les spectres. Ce processus d'analyse est similaire à celui proposé dans la norme allemande [46]. Des spectrogrammes (représentations temps/fréquence) de passage sont alors obtenus, comme ceux proposés sur la Figure 62.

L'étude comparative, pour les deux types de rames, des spectres maximums au droit des bogies a montré que les niveaux sont assez similaires pour une même rame, quel que soit le bogie considéré. Néanmoins, la rame A présente des différences plus marquées, en particulier pour un bogie qui génère des vibrations importantes à certaines fréquences (cf. Figure 63). Les différences sont probablement liées à des défauts de surface plus importants sur les roues correspondantes. Dans un esprit de simplification, nous avons toutefois choisi ici de ne plus

faire de distinction entre les différents bogies d'une même rame. Deux indicateurs seulement sont utilisés :

- les niveaux *maximums* au passage, généralement au droit d'un des bogies ;
- les niveaux *moyens* au passage, pour des valeurs seuil égales aux niveaux maximums au passage moins 20 dB.

Figure 62 : exemple de spectrogrammes vibratoires du passage (DSP) – rail – 20 km/h – Ferrière – rame A



Pour chacun de ces indicateurs, le spectre en bandes fines (DSP), les niveaux par bandes de tiers d'octave et le niveau global ont été calculés.

Le nombre d'enregistrements (en général au moins 3 pour chaque vitesse et chaque rame) a permis d'étudier la répétabilité des mesures. Plusieurs éléments peuvent en effet expliquer une dispersion des mesures, en particulier :

- la vitesse de passage d'une rame, même stabilisée, est soumise à des variations entre le début et la fin du passage de la rame, et la vitesse moyenne estimée n'est jamais exactement égale à la vitesse précise voulue (20, 30, 40 ou 50 km/h) ;
- le sens de passage d'une rame peut influencer sur les niveaux mesurés.

Sur ce dernier point, il ressort des analyses que, de façon générale, le sens de passage ne change pas significativement l'allure des réponses vibratoires. Par ailleurs, en écartant un petit nombre de mesures présentant des différences très importantes par rapport aux autres, on obtient des écarts inférieurs à 3 dB sur les niveaux par tiers d'octave vis-à-vis de la valeur moyenne.

L'ensemble des spectres en bandes fines des niveaux moyens au passage sont donnés sur la Figure 63 pour la rame A et la Figure 64 pour la rame B. Étant

Figure 63 : niveaux vibratoires (DSP) maximums au passage de la rame A

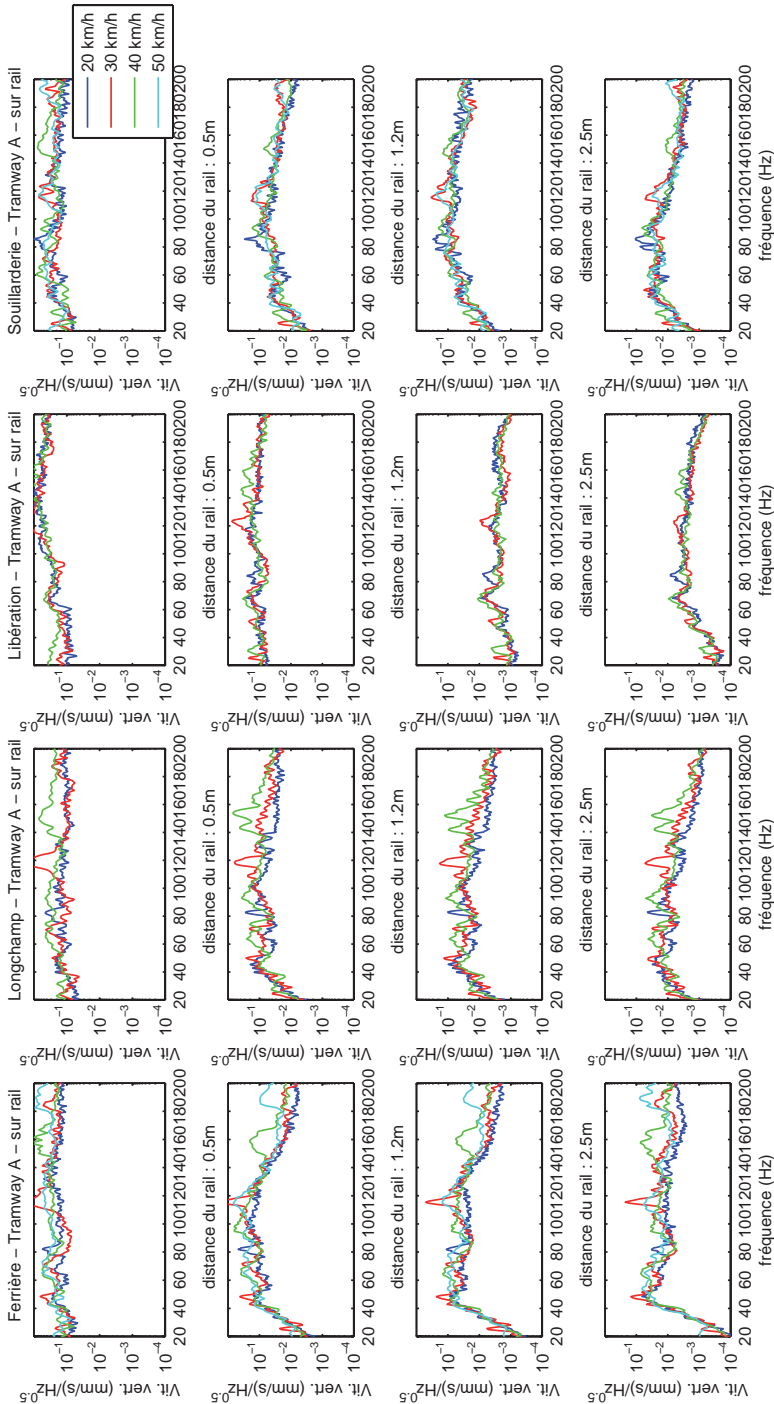
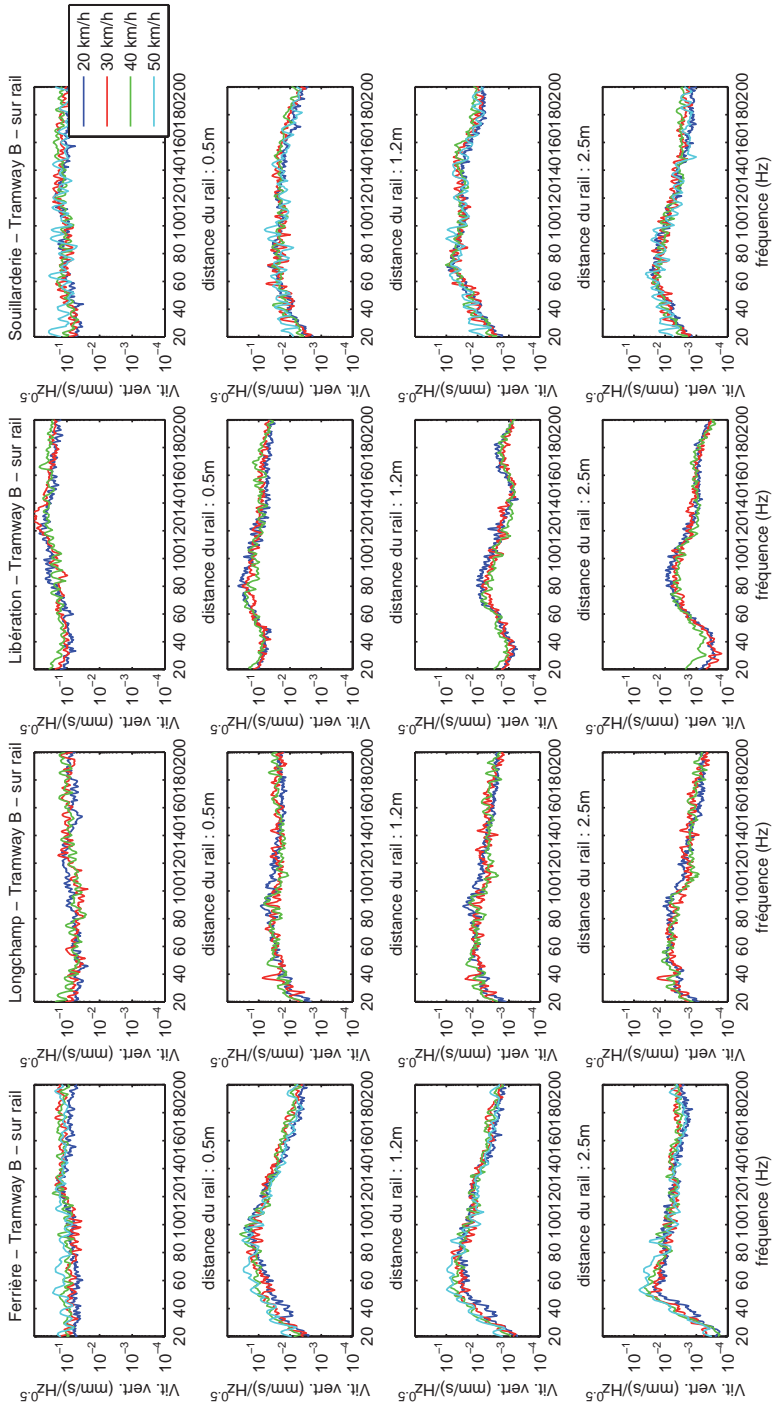


Figure 64 : niveaux vibratoires (DSP) maximums au passage de la rame B



donné le nombre de paramètres et de résultats, nous avons opté pour une analyse en deux phases :

- premièrement, analyse des vibrations relevées au niveau du rail ;
- deuxièmement, analyse des atténuations entre le rail et le sol.

Les vibrations au niveau du sol peuvent ainsi être interprétées en combinant les deux analyses.

2.4.2. Vibrations du rail – Tendances générales

Pour la rame A, sur le rail, on distingue les niveaux de vibrations les plus significatifs pour les fréquences situées dans les gammes de fréquences 50-70 Hz et 110-130 Hz. Ceci correspond probablement à une excitation liée aux deux premiers modes de vibrations des essieux (mode symétrique autour de 65 Hz et mode antisymétrique autour de 125 Hz) mis en évidence plus haut. Pour la rame B, les niveaux vibratoires sont maximums dans une gamme de fréquences comprises entre 80 et 160 Hz, variable en fonction des sites. Certains pics visibles sont probablement dus à des défauts de surface des roues, car ils se décalent avec la fréquence et sont distincts selon la rame. La coïncidence entre un défaut et une fréquence de résonance voie/essieu peut conduire à des niveaux importants dans certains tiers d'octave (voir la rame A, à 50 km/h sur *Souillarderie* qui présente un pic à 120 Hz déjà vu sur la Figure 59). En ce qui concerne la pose sur semelle souple (*Longchamp*) le problème déjà entrevu lors de la mesure de la mobilité ponctuelle de voie est confirmé¹⁵.

2.4.3. Vibrations du rail – Effet de la vitesse

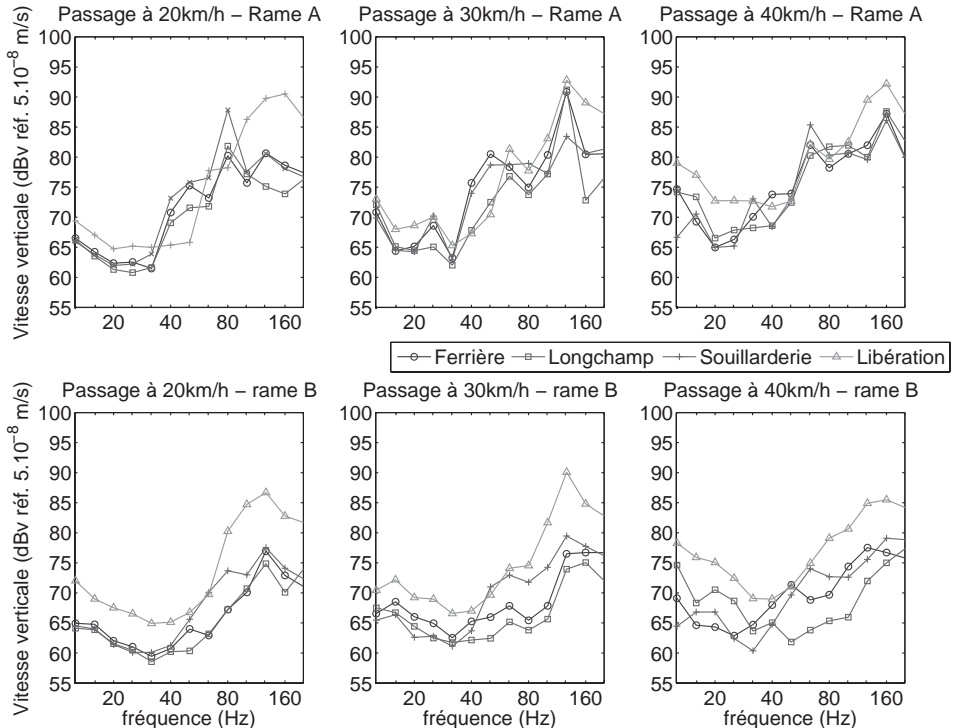
La vitesse ne peut pas être considérée comme un facteur déterminant : l'allure spectrale des réponses vibratoires est assez stable, quelle que soit la vitesse de passage envisagée. Il faut noter que la vitesse d'une rame reste très inférieure, quel que soit le sol considéré, à la vitesse de propagation des ondes de surface dans le sol, ce qui peut expliquer la faible influence de la vitesse sur les réponses vibratoires. Au bilan, l'examen de ces résultats ne permet pas de mettre en évidence une loi de variation des vibrations obtenues en fonction de la vitesse de passage du tramway. Il semble néanmoins que la rame A induise des niveaux vibratoires qui augmentent avec la vitesse pour certaines gammes de fréquences. Il apparaît en outre une raie pour la rame A, dépendante directement de la vitesse de déplacement de la rame. Précisément, pour une vitesse moyenne de 20 km/h, la raie est située autour de 80 Hz environ (visible sur le rail et le sol), et elle se déplace autour de 120 Hz à 30 km/h, et 160 Hz à 40 km/h. Cette raie est donc caractéristique d'un défaut situé au niveau des roues, et dont la longueur d'onde serait voisine de 7 cm. L'analyse des spectrogrammes a montré que le défaut se localise sur un essieu d'un bogie porteur.

¹⁵ Après inspection locale du site, il apparaît qu'un caniveau d'assainissement est situé au droit des points de mesures. Celui-ci constitue peut-être un point dur dans la liaison entre le rail et la dalle de béton. Il peut s'agir aussi d'un vieillissement de la pose engendrant une modification du comportement de l'élastomère de la semelle et sa rigidification.

2.4.4. Vibrations du rail – Effet du site

L'effet du site sur les vibrations du rail est analysé sur la Figure 65. Pour la rame A il faut distinguer sur cette figure les niveaux générés par le défaut de rugosité signalé plus haut. Ainsi, à 20 km/h, le pic sur la fréquence 80 Hz est bien visible pour tous les sites, hormis le site *Libération* où le pic est atténué. Ce pic se déplace sur la fréquence centrale 125 Hz pour la vitesse de 30 km/h puis 160 Hz à 40 km/h. Si on « retire » ce pic de l'analyse des niveaux vibratoires, il ressort que sur les trois sites *Ferrière*, *Longchamp* et *Souillarderie* les niveaux sont comparables, et pour le site *Libération* on obtient des niveaux plus élevés à partir de 80 Hz, parfois avec une différence supérieure à 10 dB. De plus, pour les fréquences centrales de 40 et 50 Hz, les niveaux vibratoires sur *Ferrière* et *Souillarderie* à 20 et 30 km/h présentent des amplitudes plus élevées que sur *Libération*. Pour la rame B, la différence sur les niveaux mesurés à *Libération* et les trois autres sites est plus franche que pour la rame A, cette différence allant de 5 à 15 dB à partir de la fréquence 80 Hz. L'analyse de l'effet de site sur les vibrations du rail confirme bien les conclusions obtenues à l'aide des mesures d'accéléérations des roues et semble donc bien lié à l'état de surface des rails.

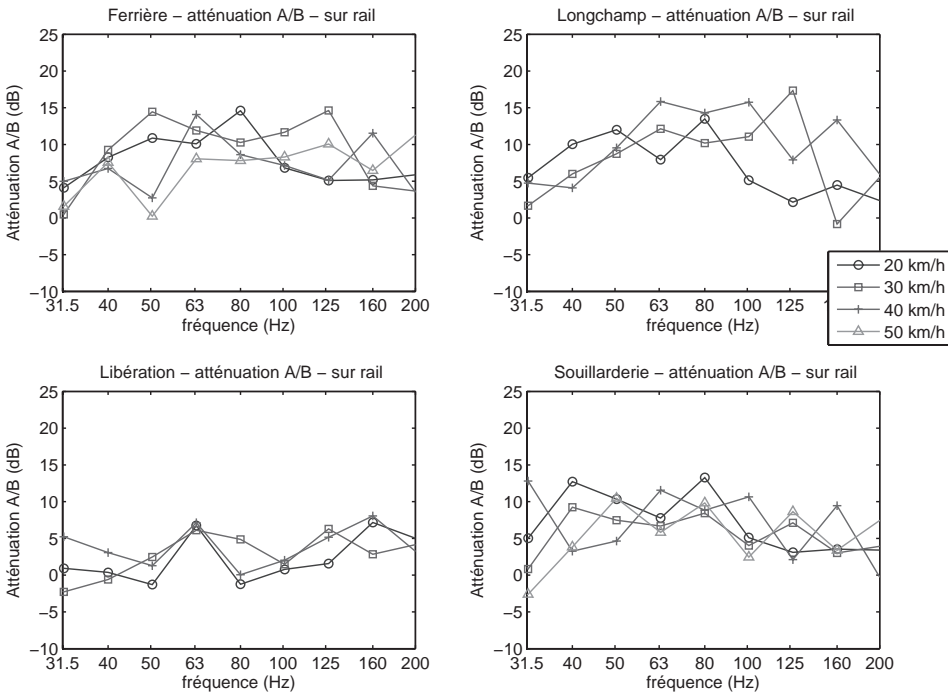
Figure 65 : effet du site sur les niveaux vibratoires moyens par tiers d'octave sur le rail



2.4.5. Vibrations du rail – Effet du type de rame

Les niveaux de vibrations générées par la rame B sont de 1,5 à 2 fois plus faibles que ceux dus à la rame A, pour tous les sites sauf *Libération*. Ceci revient à une différence de l'ordre de 5 à 6 dB, comme l'illustre la Figure 66, qui présente la différence des niveaux entre le tramway A et le tramway B. On vérifie bien par tiers d'octave que globalement le tramway A produit plus de vibrations que le tramway B, mais ceci est à relativiser puisque, en fonction de la fréquence centrale considérée, la différence peut fortement évoluer. Sur les sites *Libération* et *Ferrière*, on remarque que la différence des niveaux entre les rames A et B est importante autour de 63 et 125 Hz, correspondant aux fréquences de résonance voie/essieu de la rame A (autour de ces fréquences, le tramway A génère plus de vibrations que le tramway B, de l'ordre de 5 dB) et moindre autour de 80 Hz, correspondant à la fréquence de résonance voie/essieu de la rame B (autour de cette fréquence, le tramway B génère plus de vibrations que le tramway A).

Figure 66 : effet du type de rame sur les niveaux vibratoires moyens par tiers d'octave sur le rail



2.4.6. Atténuation des vibrations entre le rail et le sol

La Figure 67 et la Figure 68 présentent l'atténuation des vibrations dans le sol vis-à-vis d'une part des niveaux mesurés sur le rail pour les passages des rames A et B et d'autre part des mesures effectuées au marteau (déjà présentées sur

Figure 67 : atténuation des niveaux vibratoires (DSP) maximums entre le rail et le sol au passage de la rame A

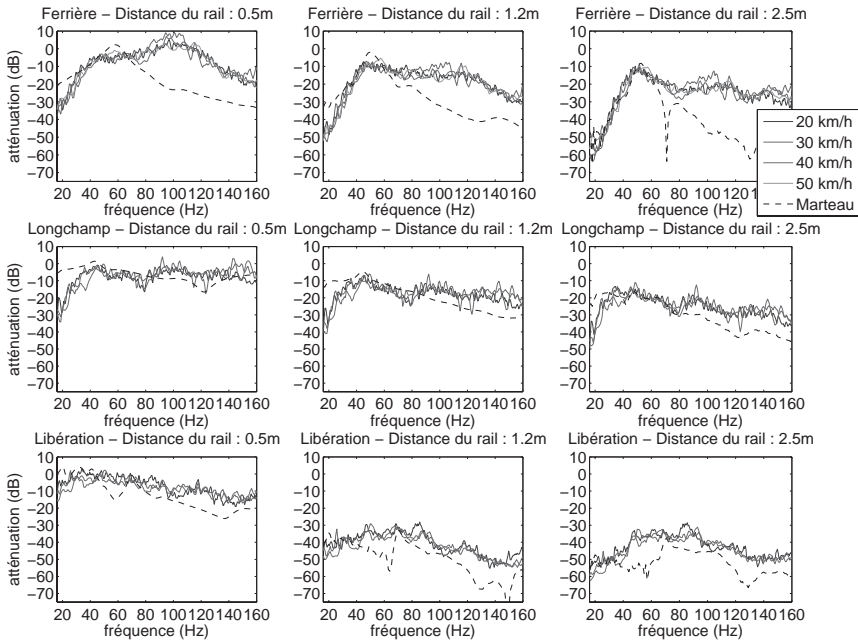
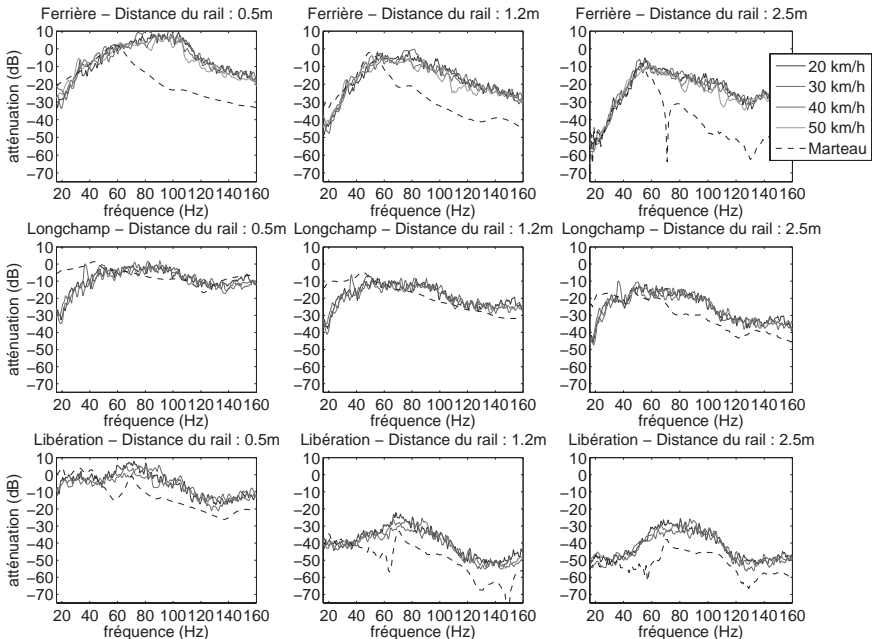


Figure 68 : atténuation des niveaux vibratoires (DSP) maximums entre le rail et le sol au passage de la rame B



la Figure 49). Elles permettent en particulier de comparer le comportement de la voie lors du passage réel d'un tramway avec le comportement de la voie lors d'un impact au marteau sur un rail. Les atténuations obtenues avec ces deux types d'excitation vibratoire présentent des différences notables, mais ceci était prévisible, puisque les excitations sont de nature très différente. L'atténuation des vibrations dans le sol par rapport aux niveaux générés sur le rail est assez similaire pour les deux types de rames et pour les différentes vitesses. Cette atténuation dépend donc principalement du type de pose de voie et du type de sol.

L'analyse de la propagation des vibrations dans le sol à 0,5, 1,2 et 2,5 m indique que l'excitation issue du rail se transmet dans le sol principalement dans la gamme 40-140 Hz (la rame A générant en outre des vibrations au-delà de 140 Hz qui se retrouvent dans le sol de façon non négligeable). Cette gamme correspond bien à celle obtenue pour les réponses en champ libre. Lorsque la distance à la voie augmente, les niveaux maximums ont tendance à se décaler vers les fréquences les plus faibles.

3. Modélisation

On présente ici les outils de simulation développés dans le cadre du projet, intégrant la génération des vibrations au niveau du contact roue/rail et la propagation des vibrations dans la voie puis dans le sol. Les choix de modélisation sont principalement basés sur l'état de l'art présenté en introduction à savoir, en ce qui concerne la propagation des vibrations :

- un modèle de sol multicouche, isotrope et élastique ;
- des modèles de voie uniformes dans l'axe de la voie, basés sur des hypothèses de poutres pour les dalles et les rails reliés par des éléments de types masse ou ressorts ;
- un modèle de véhicule, de type corps rigide, réduit aux masses non suspendues ;
- une formulation semi-analytique par passage dans le domaine des nombres d'onde pour la détermination des réponses vibratoires voie/sol, sans prise en compte de la mobilité des efforts ;
- une excitation de type déplacement relatif roue/rail imposé, lié aux irrégularités de surface des rails et des roues, pour la détermination de l'interaction voie/véhicule.

D'autres choix sont issus des observations réalisées lors de la campagne expérimentale, à savoir :

- la prise en compte du comportement antisymétrique du système voie/véhicule (roulis de l'essieu, torsion des dalles), qui d'ailleurs donne lieu à des modèles originaux par rapport à ceux existant dans la littérature¹⁶ ;

¹⁶ En dehors de l'originalité liée au champ d'application « tramway » qui, comme on l'a vu, est très peu traité dans la littérature.

- la prise en compte d'excitations décorréliées au niveau des différents contacts roue/rail.

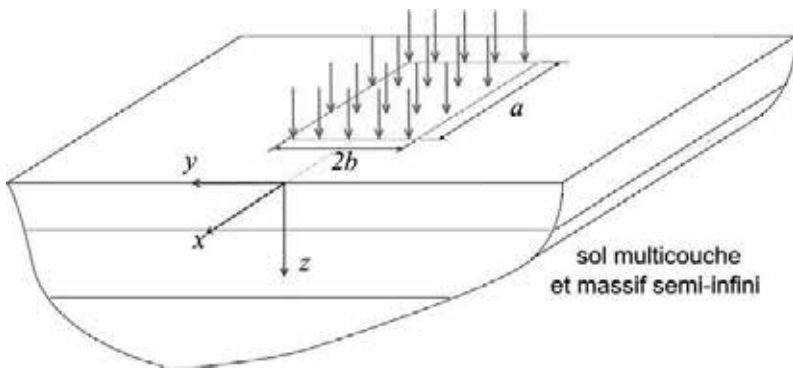
Par ailleurs, dans cette phase de modélisation, les travaux se sont surtout concentrés sur les deux sites *Ferrière* (pose classique) et *Libération* (pose sur dalle flottante), en particulier en ce qui concerne le développement des modèles de propagation voie/sol.

3.1. Modèle de sol multicouche

3.1.1. Description du modèle

On considère donc un sol multicouche composé de couches supposées homogènes, élastiques et isotropes et reposant sur un massif semi-infini (cf. Figure 69). Le sol est soumis à une excitation harmonique fixe de pulsation ω sur une surface rectangulaire de longueur a et de largeur $2b$. Dans le cas d'impacts au marteau, ce chargement correspond à une zone rectangulaire réduite pour laquelle a et b sont des distances très faibles. Dans le cas de l'étude du comportement couplé voie/sol, le chargement vient de l'action de contact entre la dalle d'assise de la voie et le sol. La distance a est alors infinie et la distance $2b$ correspond à la largeur de la dalle d'assise.

Figure 69 : sol multicouche chargé en surface



L'utilisation d'une variation temporelle implicite en $\exp(i\omega t)$ et de la transformée de Fourier à deux dimensions définie par :

$$\tilde{f}(\beta, \gamma, z) \equiv \tilde{f}(z) - \int_{-x}^{+x} \int_{-y}^{+y} f(x, y, z) \exp(-i\beta x - i\gamma y) dx dy \quad (5)$$

permet d'écrire les équations d'équilibres dynamiques dans le domaine des nombres d'onde β (dans la direction x) et γ (dans la direction y)¹⁷. Les dépla-

¹⁷ Dans la suite, un tilde \sim au dessus d'une variable dénote donc sa représentation dans le domaine des nombres d'onde et, généralement, β et γ sont omis.

cements et les contraintes sur les surfaces inférieures et supérieures des couches et la surface supérieure du massif semi-infini peuvent alors être reliés par l'intermédiaire de matrices de raideurs dynamiques (voir [37] par exemple). La matrice de flexibilité globale $[Q]$ du sol multicouche peut alors être déterminée par assemblage des matrices élémentaires et l'on obtient une relation entre les déplacements et les contraintes dans le domaine transformé du type :

$$\begin{Bmatrix} \bar{U} \end{Bmatrix} = [Q] \begin{Bmatrix} \bar{\Sigma} \end{Bmatrix} \quad (6)$$

avec

$$\begin{Bmatrix} \bar{U} \end{Bmatrix}^T = \{\bar{u}(0), \bar{v}(0), i\bar{w}(0), \bar{u}(h_1), \bar{v}(h_1), \dots, i\bar{w}(h_n)\}^T \quad (7)$$

$$\begin{Bmatrix} \bar{\Sigma} \end{Bmatrix}^T = \{-\bar{\sigma}_{xz}(0), -\bar{\sigma}_{yz}(0), -i\bar{\sigma}_{zz}(0), 0, 0, \dots, 0\}^T$$

où $u(x,y,z)$, $v(x,y,z)$ et $w(x,y,z)$ représentent respectivement les deux champs de déplacements horizontaux et le champ de déplacement vertical, $\sigma_{xz}(x,y,z)$, $\sigma_{yz}(x,y,z)$ et $\sigma_{zz}(x,y,z)$ sont respectivement les deux contraintes de cisaillement et la contrainte normale, et h_i est la profondeur de la surface supérieure de la P couche. A la surface du sol ($z = 0$), on a en particulier :

$$\bar{w}(0) = -Q_{33}\bar{\sigma}_{zz}(0) \quad (8)$$

où Q_{33} est le terme de la troisième ligne, troisième colonne de la matrice $[Q]$.

Le champ de déplacement vertical à la surface du sol est alors calculé à l'aide d'une transformée de Fourier inverse du terme de droite de l'équation ci-dessus, sous réserve de connaître l'expression du champ de contraintes appliqué sur le sol dans le domaine des nombres d'onde. Dans le cas d'une excitation ponctuelle (essais au marteau par exemple) d'amplitude P , ce champ de contrainte est constant et égal à P (transformée de Fourier d'un dirac). Pour le calcul par transformée de Fourier inverse, un nombre de points $N = 2048$ assure en général une réponse en surface calculée précise, sachant que le nombre d'onde de coupure associé est fixé à $Q_c = 20 \text{ m}^{-1}$. Le domaine plan associé est alors discrétisé suivant une zone rectangulaire de côté 320 m.

3.1.2. Estimation des profils de sol par inversion

Deux procédures d'inversion ont été utilisées pour identifier les paramètres mécaniques des sols. Dans un premier temps, un algorithme développé par Lai et Rix [47], basé sur une routine d'optimisation par les moindres carrés, a été mis en œuvre. Les épaisseurs h_i , masses volumiques ρ_i et coefficients de Poisson ν_i des différentes couches et du massif semi-infini, ainsi que le nombre de couches doivent être estimés en amont de la procédure, ce qui a été fait à partir des informations disponibles concernant les sols (résultats de sondages, notes techniques, etc.). L'algorithme permet alors de trouver les modules d'Young E_i optimums per-

mettant d'obtenir les courbes de dispersion les plus proches des courbes expérimentales, les facteurs d'amortissement η_i des différentes couches devant être estimés par ailleurs. La méthode finalement retenue consiste à optimiser simultanément les modules d'Young et les amortissements à partir non seulement des courbes de dispersion (pour les vitesses de phase) mais aussi des mobilités de transfert (pour les amortissements). Il s'agit donc d'un recalage global du modèle de sol multicouche. Les valeurs obtenues correspondant aux sites de *Ferrière* et de *Libération* sont données dans le Tableau 4 et le Tableau 5. Les comparaisons entre les courbes obtenues avec ces paramètres et les courbes expérimentales sont données sur la Figure 70 et la Figure 71.

Tableau 4 : paramètres mécaniques retenus pour le sol sur le site de *Ferrière*

		Couche 1	Couche 2	Massif
E_i	MN/m ²	26	56,5	207
ν_i	-	0,4	0,35	0,33
ρ_i	kg/m ³	1600	1700	1800
η_i	-	0,15	0,10	0,06
h_i	m	0,4	0,6	∞

Tableau 5 : paramètres mécaniques retenus pour le sol sur le site de *Libération*

		Couche 1	Couche 2	Couche 3	Couche 4	Massif
E_i	MN/m ²	101	157	341	667	50000
ν_i	-	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
ρ_i	kg/m ³	2000	2000	2000	2000	2000
η_i	-	0,4	0,2	0,2	0,1	0,05
h_i	m	0,6	0,4	1	1	∞

On peut noter que deux couches sont nécessaires sur le site de *Ferrière* contre quatre sur le site de *Libération*. Par ailleurs, les deux sols ont une raideur croissante avec la profondeur mais le sol de *Libération* est plus raide, comme attendu. Au final, on constate que les procédures d'inversion donnent des résultats corrects au niveau des mobilités de transfert. Toutefois, pour le site de *Libération*, la valeur du module d'Young pour le massif semi-infini est difficile à déterminer et celle retenue est assez arbitraire. Ce problème connu est lié aux incertitudes de l'allure de la courbe expérimentale dans la bande de fréquence 0-50 Hz [48]. Pour de grandes profondeurs en effet, il faudrait effectuer des mesures très loin du point d'impact pour obtenir plus de précision.

Figure 70 : comparaison des mobilités de transfert sol/sol et des courbes de dispersion mesurées et calculées sur le site de *Ferrière*

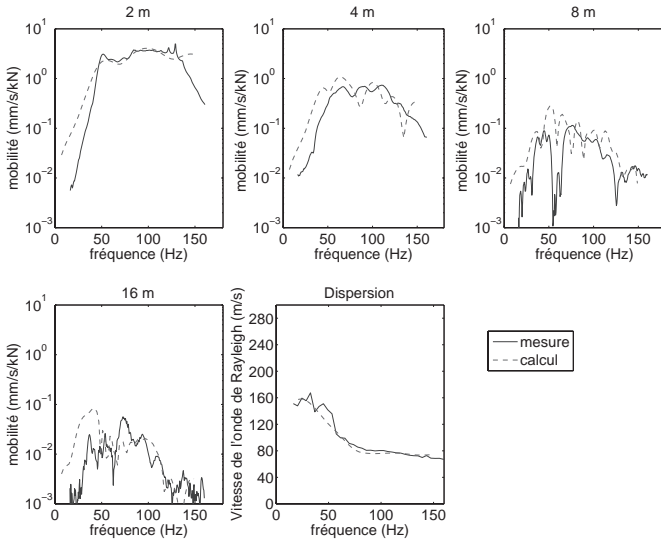
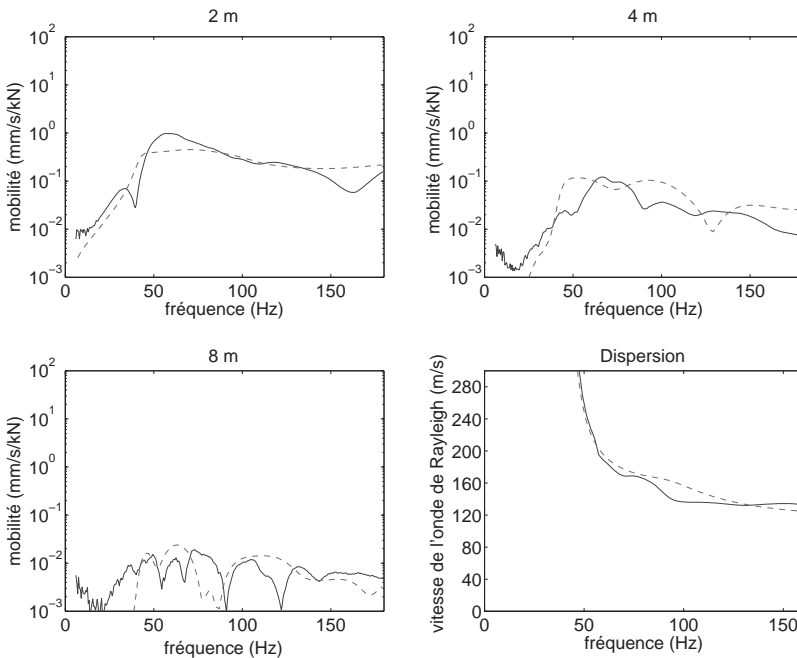


Figure 71 : comparaison des mobilités de transfert sol/sol et des courbes de dispersion mesurées et calculées sur le site de *Libération*



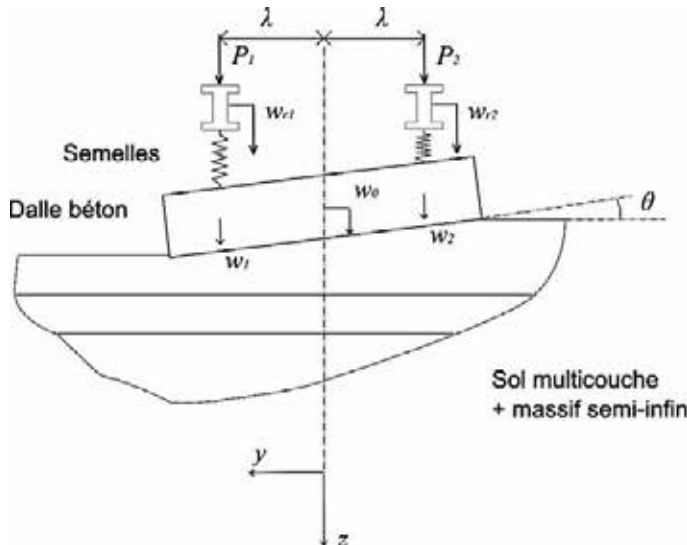
3.2. Modèle d'interaction voie/sol pour une pose classique

Dans le cadre du projet, plusieurs modèles de voie ont été développés. Un premier type de modèle ne permettait que la prise en compte de sollicitations identiques exercées sur chaque rail (efforts symétriques). Comme nous le verrons par la suite, cette modélisation simplifiée n'est pas suffisante pour prévoir correctement le comportement du système au-delà de 80 Hz, en particulier pour la voie sur dalle flottante (site de *Libération*). Des modèles de voie « non symétriques », faisant intervenir la torsion de la dalle ont donc été développés. Celui correspondant à la pose classique est présenté ici.

3.2.1. Description du modèle de voie

On considère la voie reposant sur un sol multicouche comme le montre la Figure 72. L'axe de symétrie de la pose est situé entre les deux rails. Chaque rail est soumis à une force ponctuelle harmonique de pulsation ω en x_0 . Les rails sont assimilés à des poutres (hypothèses d'Euler) sollicitées en flexion, caractérisées par une masse par unité de longueur m_r et une raideur en flexion B_r . La dalle de béton est représentée par une poutre sollicitée en flexion et en torsion, de masse par unité de longueur m_c , de moment quadratique polaire I_{0c} , de raideur de flexion B_c et de raideur de torsion D_c . Les semelles entre les rails et la dalle sont prises en compte par des liaisons élastiques (ressorts) de raideurs k_p par unité de longueur.

Figure 72 : modèle de voie pour une pose classique



Sous ces hypothèses et en supposant une variation temporelle implicite en $\exp(i\omega t)$, les champs de déplacement vertical $w_{r1}(x)$ et $w_{r2}(x)$ des rails ainsi que

les champs de déplacement vertical $w_0(x)$ et de rotation $\theta(x)$ de la dalle satisfont les équations d'équilibre dynamique suivantes :

$$\begin{aligned}
 \hat{B}_r \frac{\partial^2 w_{r1}}{\partial x^4}(x) - \omega^2 m_r w_{r1}(x) + \hat{k}_p (w_{r1}(x) - w_1(x)) - P_1 \delta(x - x_0) \\
 \hat{B}_r \frac{\partial^2 w_{r2}}{\partial x^4}(x) - \omega^2 m_r w_{r2}(x) - \hat{k}_p (w_{r2}(x) - w_2(x)) - P_2 \delta(x - x_0) \\
 \hat{B}_c \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^4}(x) - \omega^2 m_c w_0(x) + \hat{k}_p (w_1(x) - w_{r1}(x) - w_2(x) - w_{r2}(x)) = -F(x) \\
 -\hat{D}_c \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2}(x) - \omega^2 I_{0c} \theta(x) - d \hat{k}_p (w_1(x) - w_{r1}(x) - w_2(x) - w_{r2}(x)) = -C(x)
 \end{aligned} \tag{9}$$

avec

$$\begin{aligned}
 w_1(x) - w_0(x) + d\theta(x) \\
 w_2(x) - w_0(x) - d\theta(x)
 \end{aligned} \tag{10}$$

où P_1 et P_2 sont les amplitudes des efforts appliqués sur les rails, $F(x)$ et $C(x)$ représentent les champs de forces exercées par la dalle sur le sol, et d est la distance entre les rails et l'axe de symétrie de la voie. Par ailleurs, les phénomènes d'amortissement sont pris en compte par l'intermédiaire de raideurs complexes telles que :

$$\begin{aligned}
 \hat{B}_r &= B_r (1 - \eta_r) \\
 \hat{B}_c &= B_c (1 - \eta_c) \\
 \hat{D}_c &= D_c (1 + \eta_c) \\
 \hat{k}_p &= k_p (1 + \eta_p)
 \end{aligned} \tag{11}$$

où η_r , η_c et η_p sont les facteurs de perte correspondant respectivement aux rails, à la dalle et aux semelles. Dans le domaine des nombres d'onde les équations précédentes deviennent :

$$\begin{aligned}
 (\hat{B}_r \beta^4 - \omega^2 m_r - \hat{k}_p) \bar{w}_{r1} - \hat{k}_p \bar{w}_0 - d \hat{k}_p \bar{\theta} - P_1 \\
 (\hat{B}_r \beta^4 - \omega^2 m_r - \hat{k}_p) \bar{w}_{r2} - \hat{k}_p \bar{w}_0 - d \hat{k}_p \bar{\theta} - P_2 \\
 (\hat{B}_c \beta^4 - \omega^2 m_c + 2 \hat{k}_p) \bar{w}_0 - \hat{k}_p \bar{w}_{r1} - \hat{k}_p \bar{w}_{r2} = -\hat{F} \\
 (\hat{D}_c \beta^2 - \omega^2 I_{0c} + 2 d^2 \hat{k}_p) \bar{\theta} - d \hat{k}_p \bar{w}_{r1} + d \hat{k}_p \bar{w}_{r2} = -\hat{C}
 \end{aligned} \tag{12}$$



On obtient ainsi un système de 4 équations avec 6 inconnues dont les deux champs de forces exercées par la dalle sur le sol. Les deux équations manquantes sont donc celles caractérisant le couplage entre la voie et le sol.

3.2.2. Couplage voie/sol

On considère un couplage faible entre la dalle et le sol (voir par exemple [31] pour plus de précisions et d'autres types de couplage), c'est-à-dire seulement au niveau de l'axe de symétrie de la voie ($y = 0$). On obtient alors les équations de couplage suivantes :

$$\begin{aligned} w_0(x) &= w(x, 0, 0) \\ \theta(x) &= \frac{\partial w}{\partial y}(x, 0, 0) \end{aligned} \quad (13)$$

auxquelles il faut rajouter des hypothèses concernant la distribution des contraintes sur le sol selon l'axe y dans la largeur de la dalle. On suppose que ces contraintes peuvent se décomposer en une composante uniforme (reliée à la flexion de la dalle) et une composante triangulaire (reliée à la torsion de la dalle) telles que (b étant la demi-largeur de la dalle) :

$$\sigma_{zz}(x, y, 0) = \begin{cases} \frac{1}{2b} \cdot F(x) + \frac{3}{2b^3} \cdot C(x)y & \text{si } -b < y < b \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (14)$$

En passant dans le domaine des nombres d'onde et en utilisant la relation entre les contraintes et les déplacements à la surface du sol, on obtient l'expression du déplacement et de la rotation de la dalle en fonction des efforts au contact :

$$\begin{aligned} \bar{w}_0 &= H_0 \bar{F} \\ \bar{\theta} &= \frac{3}{b^2} H_1 \bar{C} \end{aligned} \quad (15)$$

Dans ces équations, H_0 et H_1 sont les réceptances du sol dans le domaine des nombres d'onde (respectivement pour des distributions transversales uniforme et triangulaire d'efforts) définies par :

$$\begin{aligned} H_0(\beta) &= -\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} Q_{33}(\beta, \gamma) \text{sinc}(\gamma b) d\gamma \\ H_1(\beta) &= -\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} Q_{33}(\beta, \gamma) g(\gamma) i\gamma d\gamma \end{aligned} \quad (16)$$

où

$$g(\gamma) = \frac{j}{\gamma} (\cos(\gamma b) - \text{sinc}(\gamma b)) \quad (17)$$

et sinc correspond à la fonction sinus cardinal. Les intégrales des équations précédentes sont calculées numériquement avec un nombre d'onde de coupure $Q_s = 20 \text{ m}^{-1}$ et un nombre de points $N = 2048$, ce qui suffit à assurer une convergence correcte. Au final, les équations du mouvement du système couplé voie/sol dans le domaine des nombres d'onde deviennent :

$$\begin{pmatrix} A_1 & 0 & A_2 & A_4 \\ & A_1 & A_2 & -A_4 \\ & & A_3 + H_0^{-1} & 0 \\ \text{sym.} & & & A_5 + \frac{b^2}{3} H_1^{-1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{w}_{r1} \\ \tilde{w}_{r2} \\ \tilde{w}_0 \\ \tilde{\theta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (18)$$

où

$$\begin{cases} A_1 = B_r \beta^4 - \omega^2 m_r - \hat{k}_p \\ A_2 = -\hat{k}_p \\ A_3 = B_c \beta^4 - \omega^2 m_c - 2\hat{k}_p \\ A_4 = -d\hat{k}_p \\ A_5 = D_c \beta^4 - m^2 J_{0c} - 2d^2 \hat{k}_p \end{cases} \quad (19)$$

Le système est alors résolu dans le domaine transformé puis les champs spatiaux (déplacements de la voie, contraintes sur le sol et déplacements à la surface du sol) sont reconstruits par transformée de Fourier inverse (FFT) en utilisant les mêmes nombre de points N et nombre de coupure Q_s que précédemment.

3.2.3. Recalage et validation

Même si certaines données techniques sont bien définies (dimensions des dalles, type de semelles sous rail, etc.), il est intéressant de procéder à un recalage de certains paramètres, en particulier concernant les semelles (raideur, amortissement) mais aussi la dalle (raideurs en flexion et torsion) compte-tenu des simplifications dues aux modèles. Il faut en effet rappeler qu'elle inclut une dalle d'assise sur laquelle reposent les traverses bi-blocs noyées dans le béton de calage. Or les deux blocs de chaque traverse sont reliés par une entretoise métallique. Dès lors, la dalle « de béton » modélisée n'est pas constituée d'un matériau homogène et de ce fait n'est pas isotrope. Ceci indique que les relations définies sur un modèle de poutre sollicitée en flexion et torsion peuvent être discutables, non seulement par rapport aux dimensions de la section droite mais aussi vis-à-vis de l'homogénéité de la dalle prise comme modèle.

Deux types de résultats expérimentaux ont été utilisés pour cette analyse :

- la réceptance du rail en amplitude et en phase (*ratio* déplacement vertical du rail/force d'impact sur le rail) est examinée pour le recalage des paramètres des semelles ;
- les mobilités de transfert voie/sol (mesures à 2,5 m) sont exploitées pour recalculer les données concernant la dalle de béton.

Le Tableau 6 indique les paramètres retenus après recalage.

La réceptance mesurée sur un rail nous renseigne principalement sur la semelle de rail. Les caractéristiques du rail étant connues (rail à gorge 35GP) et indiquées dans le tableau précédent, la confrontation modèle/mesures peut se faire en faisant appel aux modèles semi-analytiques proposés. Notons que dans le cas d'une pose classique, un modèle plus simple à deux dimensions et sol rigide suffit pour calculer la réponse du rail. En effet, la raideur de la fondation influence très peu la réponse du rail dès lors que le sol ainsi modélisé est suffisamment rigide, ce qui est généralement le cas. La Figure 73 présente les résultats obtenus pour l'amplitude et la phase de la réceptance, en comparaison avec les mesures. Les calculs sont menés à l'aide des modèles suivants :

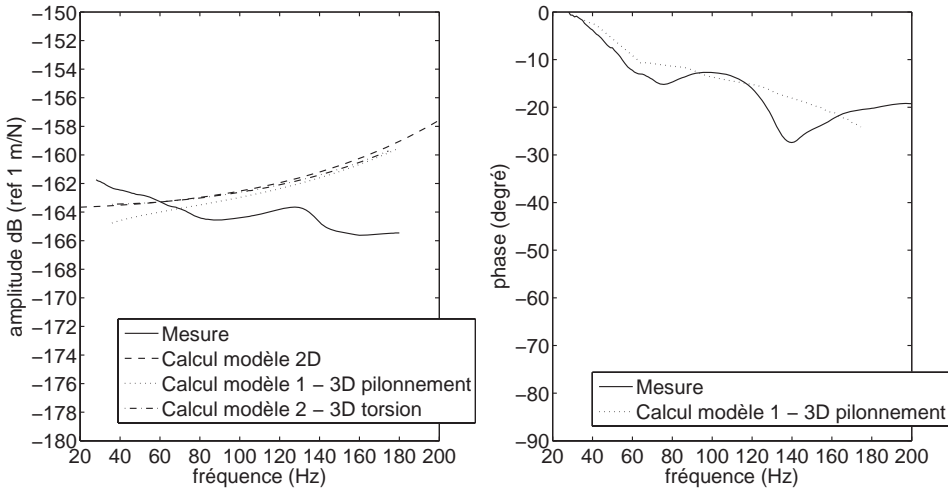
- un modèle simplifié 2D où le sol est parfaitement rigide ;
- le modèle proposé prenant en compte un chargement symétrique (identique sur les deux rails) ;
- le modèle proposé prenant en compte un chargement non symétrique (effort appliqué nul sur le second rail, ce qui correspond à la situation expérimentale).

Tableau 6 : paramètres mécaniques retenus pour la voie sur le site de Ferrière

Rails	m_r	kg/m	55
	B_r	MN/m ²	4,326
	η_r	-	0,1
Semelles	k_p	MN/m ²	90
	η_p	-	0,3
Dalle	b	m	1,55
	m_c	kg/m	4728
	B_c	MN/m ²	1759
	$I_{\rho c}$	kg.m	3930
	D_c	MN/m ²	2580
	η_c	-	0,1

La raideur et l'amortissement de la semelle ont été recalés respectivement vis-à-vis de l'amplitude et de la phase de la réceptance mesurée, dans la gamme de fréquences 20-200 Hz. La raideur trouvée pour la semelle rentre bien dans la gamme de valeurs classiquement rencontrées pour ce type de poses. On note que la réceptance théorique est assez uniforme : dans la bande de fréquences

Figure 73 : comparaison des réceptances de voies mesurées et calculées sur le site de *Ferrière*



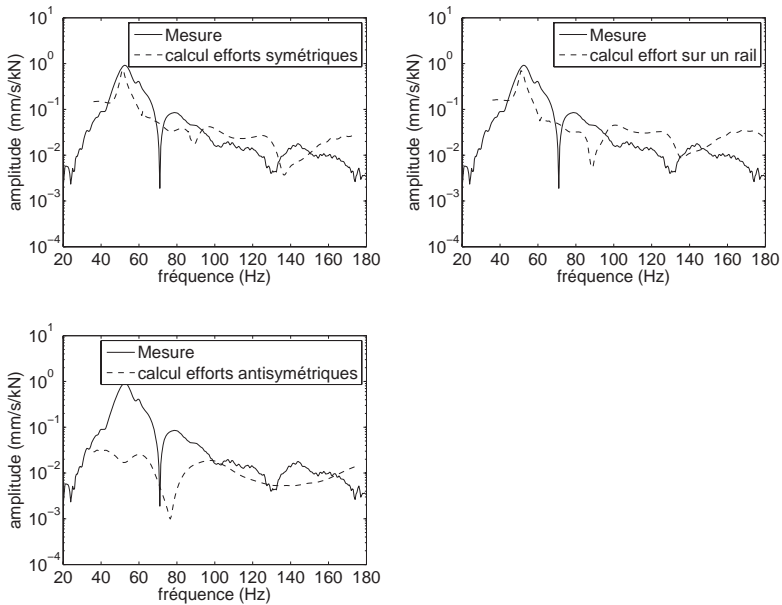
20-200 Hz, elle est presque uniquement liée à la raideur et à l’amortissement de la semelle sous rail (le sol influe en fait légèrement pour le cas du sol souple rencontré sur le site *Ferrière*). Elle croît en haute fréquence, la fréquence de résonance rail/semelle étant située au dessus de la gamme étudiée. Compte tenu des différences entre la mesure et le calcul (de l’ordre de 6 dB à 200 Hz), la raideur de la semelle pourrait éventuellement être rendue dépendante de la fréquence, avec une augmentation de la raideur lorsque la fréquence augmente.

Dans le cas du site *Ferrière*, le sol sur lequel repose alors la voie est relativement « souple », les deux premières couches ayant des vitesses pour l’onde de cisaillement valant respectivement 77 et 111 m/s. Néanmoins, la raideur du sol équivalente reste suffisamment importante pour que la rotation de la dalle, lors d’une excitation au marteau, soit négligeable (compliance statique estimée autour de 10^{-8} m/N conforme à la gamme généralement mesurée). La Figure 74 présente trois comparaisons entre la mesure de la mobilité de transfert voie/sol à 2,5 m du rail et les calculs pour :

- une excitation symétrique identique sur les deux rails ($P_1 = P/2, P_2 = P/2$) ;
- une excitation non symétrique sur un seul rail ($P_1 = 0, P_2 = P$), correspondant à la situation expérimentale ;
- une excitation antisymétrique opposée sur les deux rails ($P_1 = P/2, P_2 = -P/2$).

Les amplitudes vibratoires sont toutes rapportées au module de l’excitation P . L’analyse des résultats obtenus amène plusieurs commentaires. D’une part, les réponses calculées pour le cas d’une excitation symétrique et sur un seul rail sont très proches. Ceci constitue la preuve de l’influence faible de la rotation de la dalle pour ce type de pose. D’autre part, lorsque l’excitation devient antisymétrique, la réponse calculée change. La résonance voie/sol n’est plus visible, ce qui paraît physiquement cohérent. En dessous de 90 Hz la réponse du sol est alors

Figure 74 : comparaison des mobilités de transfert voie/sol à 2,50 m mesurées et calculées sur le site de *Ferrière*



nettement plus faible pour le cas d'une excitation antisymétrique par rapport aux autres modes d'excitations.

3.3. Modèle d'interaction voie/sol pour une pose sur dalle flottante

En ce qui concerne la pose sur dalle flottante correspondant au site de *Libération*, deux variantes ont été étudiées dans le projet : l'une ne prenant en compte que la dynamique de la dalle flottante située sous la voie considérée, l'autre prenant en compte la dynamique de la dalle adjacente, les deux dalles « flottant » sur une même dalle d'assise. La deuxième variante est décrite ici car il s'avère que la deuxième dalle flottante joue un rôle important dans la dynamique globale du système. Par ailleurs, comme indiqué précédemment le modèle présenté est un modèle « non symétrique », caractéristique qui semble être nécessaire pour bien s'approcher de la réalité dans ce cas.

3.3.1. Description du modèle de voie

On considère donc une voie « double » reposant sur un sol multicouche comme illustré sur la Figure 75. Chacune des voies est modélisée de manière similaire à la voie « simple » présentée dans le cas d'une pose classique. Toutefois, au lieu de reposer directement sur le sol, les deux dalles « flottent » sur une dalle d'assise commune, modélisée par une poutre caractérisée par sa masse par unité de longueur m_{of} , son moment quadratique polaire I_{of} , sa raideur de flexion B_d et sa raideur de torsion D_b . Le découplage entre les dalles flottantes et la dalle

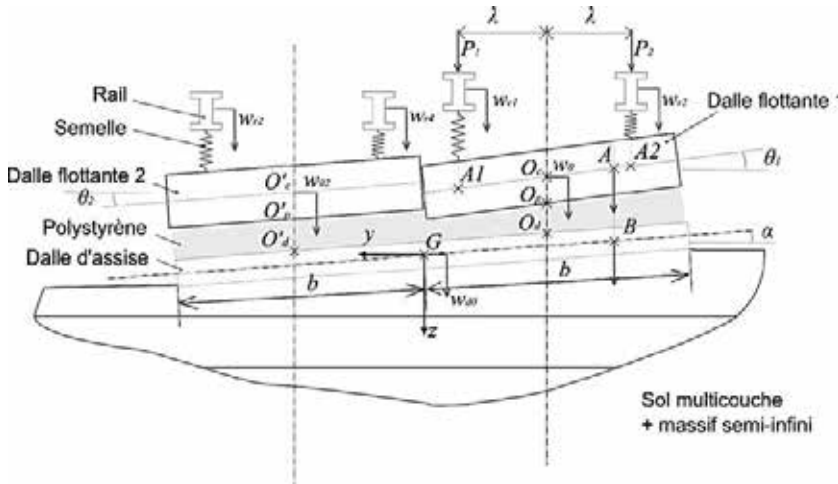
d'assise (une couche de polystyrène dans le cas de la pose correspondant au site de *Libération*) est pris en compte par l'intermédiaire d'une liaison élastique (tapis de ressorts) de raideur surfacique k_0 .

Sous ces hypothèses et en supposant une variation temporelle implicite en $\exp(i\omega t)$, les champs de déplacement vertical $w_{r1}(x)$ et $w_{r2}(x)$ des rails ainsi que les champs de déplacement vertical $w_{01}(x)$ et de rotation $\theta_1(x)$ de la dalle correspondants à la voie excitée satisfont les équations d'équilibre dynamique données pour la pose classique, en remplaçant l'effort $F(x)$ et le moment $C(x)$ de la dalle sur le sol par l'effort $F_{01}(x)$ et le moment $C_{01}(x)$ sur la dalle d'assise tels que :

$$F_{01}(x) = \hat{k}_0 b \left(w_{01}(x) - w_{d0}(x) + \frac{b}{2} \alpha(x) \right)$$

$$C_{01}(x) = \frac{\hat{k}_0 b^3}{12} (\theta_1(x) - \alpha(x))$$
(20)

Figure 75 : modèle de voie pour une pose sur dalle flottante



De manière similaire, les champs de déplacement vertical $w_{r3}(x)$ et $w_{r4}(x)$ des rails ainsi que les champs de déplacement vertical $w_{02}(x)$ et de rotation $\theta_2(x)$ de la dalle correspondant à la voie non excitée satisfont les équations d'équilibre dynamique données pour la pose classique, en annulant les efforts P_1 et P_2 appliqués sur les rails et en remplaçant l'effort $F(x)$ et le moment $C(x)$ de la dalle sur le sol par l'effort $F_{02}(x)$ et le moment $C_{02}(x)$ sur la dalle d'assise tels que :

$$F_{02}(x) = \hat{k}_0 b \left(w_{02}(x) - w_{d0}(x) - \frac{b}{2} \alpha(x) \right)$$

$$C_{02}(x) = \frac{\hat{k}_0 b^3}{12} (\theta_2(x) - \alpha(x))$$
(21)

Par ailleurs, les champs de déplacement vertical $w_{d0}(x)$ et de rotation $\alpha(x)$ de la dalle d'assise satisfont les équations d'équilibre dynamique suivantes :

$$\begin{aligned} \hat{B}_d \frac{\partial^2 w_{d0}}{\partial x^4}(x) - \omega^2 m_d w_{d0}(x) &= F_{01}(x) ; F_{02}(x) \quad F(x) \\ -\hat{D}_d \frac{\partial^2 \alpha}{\partial x^2}(x) - \omega^2 I_{0d} \alpha(x) &= \frac{b}{2} \{ F_{02}(x) - F_{01}(x) \} - C_{01}(x) + C_{02}(x) - C(x) \end{aligned} \quad (22)$$

Dans toutes ces équations, les phénomènes d'amortissement sont pris en compte par l'intermédiaire de raideurs complexes telles que :

$$\begin{aligned} \hat{k}_0 &= k_p (1 - \eta_0) \\ \hat{B}_d &= B_d (1 + \eta_d) \\ \hat{D}_d &= D_d (1 + \eta_d) \end{aligned} \quad (23)$$

où η_0 et η_d sont les facteurs de perte correspondant respectivement au matériau de découplage (ici le polystyrène) et à la dalle d'assise.

3.3.2. Couplage voie/sol

Comme dans le cas de la pose classique, on peut écrire les équations dans le domaine des nombres d'onde puis effectuer le couplage avec le sol (cette fois au niveau de la dalle d'assise en remplaçant $w_0(x)$ par $w_{d0}(x)$ et $\theta(x)$ par $\alpha(x)$). Au final, les équations du mouvement du système couplé voie/sol dans le domaine des nombres d'onde peuvent se mettre sous la forme :

$$\left(\begin{array}{cccccccccccc} A_1 & 0 & A_2 & A_4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & A_1 & A_2 & -A_4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & A_B & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\hat{k}_0 b & k_1 & \hat{w}_{r1} & P_1 \\ & & & A_9 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -k_2 & \hat{w}_{r2} & P_2 \\ & & & & A_1 & 0 & A_2 & A_4 & 0 & 0 & \hat{w}_{01} & 0 \\ & & & & & A_1 & A_2 & -A_4 & 0 & 0 & \hat{\theta}_1 & 0 \\ & & & & & & A_B & 0 & -\hat{k}_0 b & -k_1 & \hat{w}_{r3} & 0 \\ & & & & & & & A_9 & 0 & -k_2 & \hat{w}_{r4} & 0 \\ & & & & & & & & A_6 + H_0^{-1} & 0 & \hat{w}_{02} & 0 \\ & & & & & & & & & & \hat{\theta}_2 & 0 \\ & & & & & & & & & & \hat{w}_{d0} & 0 \\ \text{sym.} & & & & & & & & & & \hat{\alpha} & 0 \\ & & & & & & & & & & & & A_7 - \frac{b^2}{3} H_0^{-1} \end{array} \right) \left. \begin{array}{l} \hat{w}_{r1} \\ \hat{w}_{r2} \\ \hat{w}_{01} \\ \hat{\theta}_1 \\ \hat{w}_{r3} \\ \hat{w}_{r4} \\ \hat{w}_{02} \\ \hat{\theta}_2 \\ \hat{w}_{d0} \\ \hat{\alpha} \end{array} \right\} = \left. \begin{array}{l} P_1 \\ P_2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{array} \right\} \quad (24)$$

où

$$\begin{aligned}
 A_5 &= \hat{B}_d \beta^4 - \omega^2 m_d + 2b \hat{k}_0 \\
 A_7 &= \hat{D}_d \beta^2 - \omega^2 I_{0d} + \frac{2b^3}{3} \hat{k}_0 \\
 A_8 &= A_3 + b \hat{k}_0 \\
 A_9 &= A_5 + \frac{b^3}{12} \hat{k}_0 \\
 k_1 &= \frac{b^2}{2} \hat{k}_0 \\
 k_2 &= \frac{b^3}{12} \hat{k}_0
 \end{aligned} \tag{25}$$

Le système est alors résolu dans le domaine transformé puis les champs spatiaux (déplacements de la voie, contraintes sur le sol et déplacements à la surface du sol) sont reconstruits encore une fois par transformée de Fourier inverse (FFT).

3.3.3. Recalage et validation

Les remarques faites pour les paramètres de la dalle dans le cas d'une pose classique sont applicables pour la dalle flottante : la dalle réelle n'est pas homogène, elle inclut en particulier des barres d'acier comme renforts. De plus, le fond de forme bétonné admet une largeur de 6,2 m pour une épaisseur de 0,1 m, ce qui indique que le modèle « poutre » associé n'est pas tout à fait approprié. De plus, la dalle flottante étant isolée latéralement (polystyrène posé verticalement), le couplage voie/sol se fait principalement sur le sous-sol où repose la dalle d'assise. Par conséquent, et de façon à mieux rendre compte du réel, les premières couches du sol sont retirées sur une épaisseur correspondant à la profondeur de la voie. Ainsi, l'épaisseur de la pose complète étant d'environ un mètre, les deux premières couches définies sur le Tableau 5 sont retirées. Le Tableau 7 indique les paramètres mécaniques retenus pour la voie après recalage.

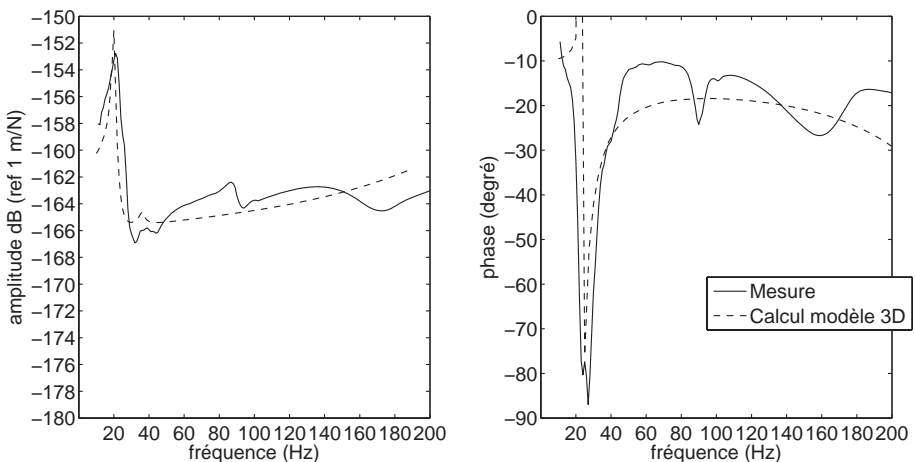
Le calcul de la réceptance de voie dans ce cas nécessite la modélisation de la couche isolante, de façon à rendre compte de la résonance située autour de 20 Hz. En revanche, un modèle à deux dimensions incluant uniquement le rail, les semelles de rails, la dalle flottante, et le polystyrène reposant sur un massif rigide suffit pour estimer précisément la réponse vibratoire du rail. On présente les résultats obtenus sur la Figure 76. L'amplitude de la résonance rail-semelle-dalle flottante/polystyrène est pilotée par l'amortissement recalé en conséquence, alors que la raideur du polystyrène contrôle la fréquence de résonance. Sur la gamme 40-200 Hz, la raideur de la semelle est recalée par rapport au niveau d'amplitude de la réceptance, et l'amortissement à l'aide de la phase. La raideur trouvée pour la semelle et ce type de pose est conforme à ce qui se trouve dans la littérature. Le comportement de la réceptance théorique est similaire à celui de la pose clas-

sique, à la différence de la zone basse fréquence. Pour la gamme 0-30 Hz, l'effet de la couche isolante se concrétise en effet par un pic autour de 20 Hz, correspondant à la résonance de la dalle flottante.

Tableau 7 : paramètres mécaniques retenus pour la voie sur le site de Libération

Rails	mr	kg/m	55
	Br	MN/m ²	4,326
	ηr	-	0,1
Semelles	kp	MN/m ²	90
	ηp	-	0,3
Dalles flottantes	mc	kg/m	4024
	Bc	MN/m ²	796
	$l0c$	kg.m	3339
	Dc	MN/m ²	1224
	ηc	-	0,1
Dalle d'assise	b		3,1
	md	kg/m	1364
	Bd	MN/m ²	7,75
	$l0d$	kg.m	11,9
	Dd	MN/m ²	800
	ηd	-	0,1

Figure 76 : comparaison des réceptances de voie mesurées et calculées sur le site de Libération



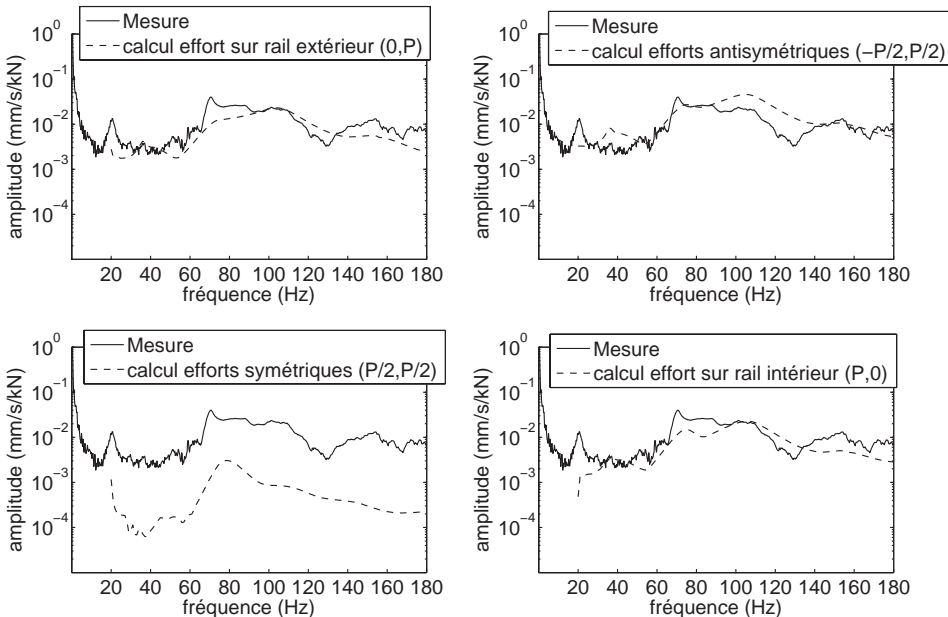
La Figure 77 présente quatre comparaisons entre la mesure de mobilité de transfert voie/sol à 2,5 m du rail et les calculs effectués à l'aide du modèle proposé :

- une excitation non symétrique sur le rail extérieur ($P_1 = 0, P_2 = P$) (correspondant à la situation expérimentale) ;
- une excitation symétrique identique sur les deux rails ($P_1 = P/2, P_2 = P/2$) ;
- une excitation antisymétrique opposée sur les deux rails ($P_1 = P/2, P_2 = -P/2$) ;
- une excitation non symétrique sur le rail intérieur ($P_1 = P, P_2 = 0$).

Les amplitudes vibratoires sont toutes rapportées au module de l'excitation P . Le modèle semi-analytique utilisé correspond bien au modèle prenant en compte les mouvements des deux dalles. En effet, comme indiqué précédemment, la variante supposant que la dalle non excitée reste immobile ne donne pas des résultats satisfaisants : en particulier la réponse au delà de 70 Hz est largement sous-estimée. Ceci peut s'expliquer par le fait que l'amplification nette de la réponse dans la gamme 70-120 Hz est probablement due à un mouvement de corps rigides des trois dalles (flottantes et d'assise) sur le sol.

L'étude des courbes de comparaison mesure/calculs amène plusieurs autres remarques. L'excitation sur le rail extérieur (correspondant directement au cas expérimental) donne des résultats acceptables par rapport à la mesure. Notons

Figure 77 : comparaison des mobilités de transfert voie/sol à 2,5 m mesurées et calculées sur le site de Libération



en revanche que la résonance visible à 20 Hz sur la mesure se retrouve de façon très atténuée par le calcul. La reprise de niveaux vibratoires importants autour de 70 Hz est, quant à elle, assez bien prédite. Le résultat du calcul pour le cas d'une excitation symétrique montre que les vibrations induites dans le sol sont nettement moins importantes que pour une excitation non symétrique. L'efficacité de la pose est donc optimisée si l'excitation de l'essieu sur la voie est symétrique. Pour le calcul avec une excitation antisymétrique, on note une amplification de la réponse du sol. Ce résultat est intéressant parce qu'il signifie qu'une excitation antisymétrique peut produire plus de vibrations dans le sol qu'une excitation symétrique ou localisée sur un seul rail, pour une même amplitude de la source d'excitation (dans le cas d'une dalle flottante). Le cas d'excitation du rail intérieur donne des résultats très proches du cas d'excitation (0, P).

3.3.4. Efficacité de la pose sur dalle flottante

L'efficacité d'une pose doit être considérée en fonction du sol sur lequel elle repose. À titre d'exemple, sur le site *Libération*, l'efficacité annoncée pour la pose de la fondation élastique doit atteindre un niveau minimal de 20 dB par rapport à la pose classique à partir de la fréquence 63 Hz. Il est donc intéressant d'examiner comment les outils de simulation que nous avons mis au point peuvent confirmer ou infirmer ce résultat sur le site en question. Bien entendu, dans ce cadre, on se limite à une analyse relative aux résultats théoriques car on ne dispose évidemment pas de résultats expérimentaux en pose classique sur le site *Libération*. Pour analyser l'impact du type de sol vis-à-vis de l'efficacité de la pose, on se propose d'utiliser les deux types de sol définis précédemment et d'analyser les réponses vibratoires obtenues, sur la voie et dans le sol, lorsqu'une pose classique ou une pose sur dalle flottante est choisie. Le sol du site *Ferrière* sera qualifié de souple, et celui du site *Libération* de raide. La pose classique correspond à celle présentée pour le site *Ferrière*, et la pose isolante à la voie reposant sur une dalle flottante (site *Libération*). On examine par conséquent quatre cas :

- pose classique sur sol souple (cas du site de *Ferrière*) ;
- pose isolante sur sol souple ;
- pose classique sur sol raide ;
- pose isolante sur sol raide (cas du site de *Libération*).

L'objectif est de définir l'atténuation des vibrations depuis la voie jusqu'au sol, non seulement au droit de l'excitation mais aussi en des points distants du plan d'excitation, directement sous la pose ou sur le sol à une certaine distance (cf. Figure 78).

La Figure 79 présente l'atténuation des vibrations à l'aide de l'indicateur « perte par insertion » défini par :

$$iL = 20 \log \frac{v_{classique}}{v_{isolée}} \quad (26)$$

Figure 78 : points de calcul pour l'évaluation de l'efficacité de la pose - Excitation sur le rail (point O) – Calcul sous le point O(0, 0) à l'interface dalle/sol, et sur le sol aux points A(0 ; 3, 2), B(-8 ; 3, 2) et C(-16 ; 3, 2)

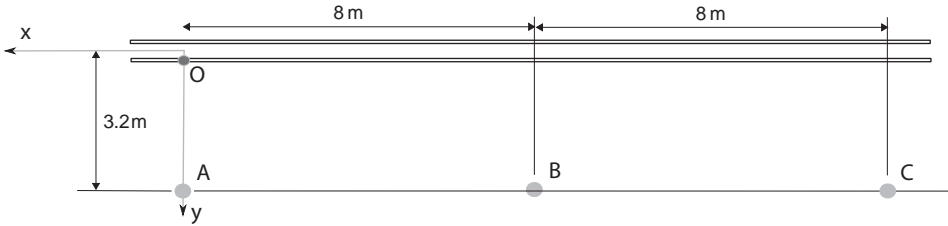
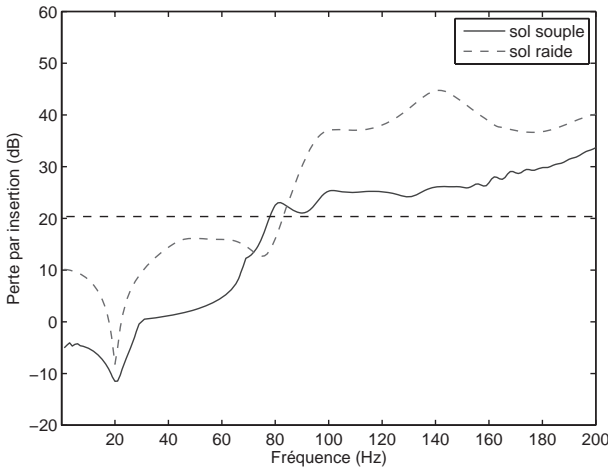


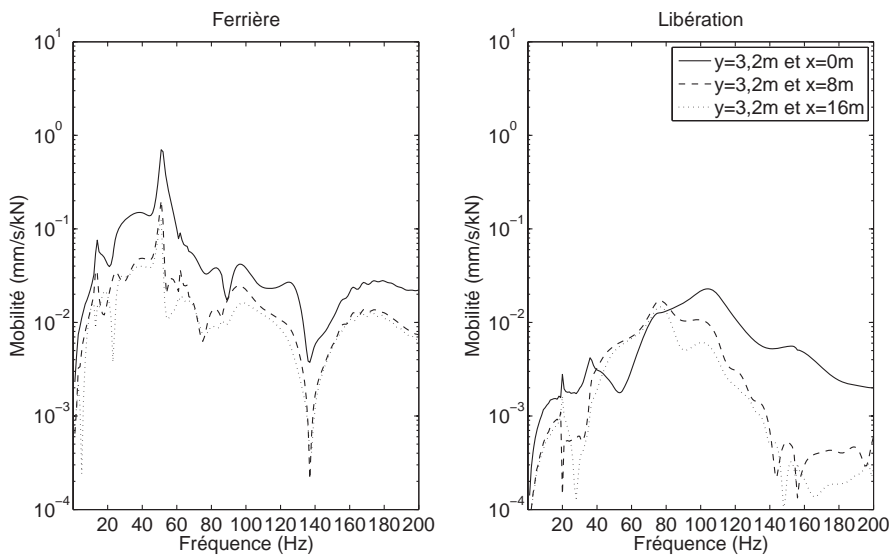
Figure 79 : comparaison de perte par insertion de la pose sur dalle flottante pour deux types de sol



où $v_{classique}$ et $v_{isolée}$ représentent les vitesses vibratoires efficaces du sol au point A, correspondant respectivement à la pose classique et à la pose sur dalle flottante. En basses fréquences, on constate que l'atténuation existe peu et provient essentiellement de l'effet de la semelle du rail qui répartit le chargement (ponctuel) sur une surface importante. La perte par insertion atteint environ -10 dB autour de 20 Hz (correspondant à la fréquence de résonance de la dalle flottante) puis l'efficacité de la pose isolante apparaît. Globalement l'efficacité de la pose est plus grande si elle est utilisée sur un sol raide. Rappelons que ce type de pose sur dalle flottante est censé produire une atténuation d'au moins -20 dB à partir de 63 Hz (sur la fréquence centrale de tiers d'octave). Sur les résultats obtenus, on observe ce niveau d'atténuation plutôt à partir de 80 Hz (à 60 Hz la perte par insertion est faible pour le sol souple – moins de 5 dB, et de l'ordre de 15 dB environ pour le sol raide). En fait, on peut montrer que la raideur du sol intervient dans la réponse vibratoire de la dalle située à l'interface avec le sol. Lorsque la raideur du sol augmente, les vibrations à l'interface diminuent.

La Figure 80 présente les réponses du sol aux trois points A, B et C pour les deux configurations voie/sol rencontrées sur *Libération* et *Ferrière*. Pour la pose classique, l'atténuation des vibrations avec la distance est visible. Par contre, pour la pose isolante, les amplitudes vibratoires s'atténuent peu dans la gamme 40-80 Hz, et vont même jusqu'à augmenter autour de 60 Hz. Cette étude est à mettre en parallèle avec celle proposée dans [29]. Les auteurs concluent qu'une analyse d'efficacité de pose isolante ne peut se réduire à un modèle 2D. En effet, lorsque la vitesse de l'onde de flexion dans la dalle est plus élevée que la vitesse des ondes superficielles dans le sol (ce qui est souvent le cas), l'onde se propage dans la dalle et l'effet de l'atténuation avec la distance s'estompe. Ceci explique que les vibrations ne s'atténuent pas uniformément avec la distance et que l'efficacité de la pose est meilleure si on l'étudie dans le plan perpendiculaire à l'axe de la voie contenant l'excitation plutôt qu'ailleurs.

Figure 80 : comparaison des mobilités voie/sol parallèlement à l'axe de la voie pour les sites de *Ferrière* et *Libération*



3.4. Modèle d'interaction voie/essieu

Le modèle de génération des vibrations développé est présenté ici. Dans un premier temps, les fonctions de transfert reliant les efforts dynamiques au contact roues/rails et les vibrations des essieux aux irrégularités de surface des roues et des rails (rugosité combinée) sont données dans le cas d'un essieu rigide et d'une voie caractérisée par sa réceptance. Le modèle est ensuite validé, d'abord directement en utilisant les mesures de rugosités des rails, puis indirectement par l'identification des rugosités combinées.

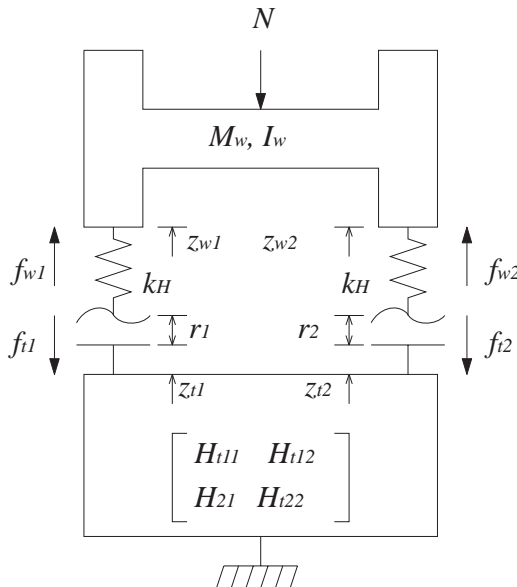
3.4.1. Description du modèle

Au regard de la gamme de fréquences étudiée, on considère d’abord les deux hypothèses suivantes :

- les vibrations des masses non suspendues (essieux) constituent la part prépondérante des vibrations du véhicule ;
- les fréquences de résonance des suspensions premières ne dépassant pas 5 Hz en règle générale, les masses non suspendues se comportent essentiellement comme des solides rigides.

On considère un essieu rigide de masse M_w et d’inertie I_w (masses non suspendues), soumis à un effort statique N (poids des masses suspendues et non suspendues), roulant à une vitesse constante v sur une voie dont le comportement est supposé élastique (cf. Figure 81). On se place en régime harmonique de pulsation ω dans un repère mobile se déplaçant avec l’essieu. Les réceptances verticales (ratio déplacement/effort) ponctuelles et croisées au niveau des rails sont notées respectivement $H_{t11}(\omega) = H_{t22}(\omega)$ et $H_{t12}(\omega) = H_{t21}(\omega)$. On fait l’hypothèse que ces réceptances en repère mobile sont identiques aux réceptances en repère fixe¹⁸. Les déformations localisées au contact roue/rail sont prises en compte par une raideur de contact k_H ne dépendant que de l’effort statique N et des courbures de la roue et du rail au point de contact (modèle de Hertz linéarisé).

Figure 81 : modèle d’interaction voie/essieu



¹⁸ Cette hypothèse est justifiée si les vitesses des ondes dans le rail, la plate-forme et le sol sont bien supérieures à la vitesse de l’essieu, ce qui est le cas pour les tramways.

On note respectivement $z_w = \{z_{w1} \ z_{w2}\}^T$, $z_t = \{z_{t1} \ z_{t2}\}^T$, $f_w = \{f_{w1} \ f_{w2}\}^T$, $f_t = -\{f_{t1} \ f_{t2}\}^T$ les déplacements de l'essieu et des rails ainsi que les efforts appliqués sur l'essieu et les rails aux points de contact roues/rail. Ce sont les déplacements relatifs imposés par les irrégularités de surface des rails et des roues, pris en compte *via* une rugosité combinée, notée $r(\omega) = \{r_1 \ r_2\}^T$, qui constituent l'excitation du système. À chaque longueur d'onde de rugosité λ correspond une excitation de pulsation $\omega = 2\pi v/\lambda$. La mise en équation d'un tel système permet d'exprimer directement les déplacements de l'essieu et les efforts au contact en fonction des rugosités :

$$\begin{aligned} z_{wS} - \frac{z_{w1} + z_{w2}}{2} - H_{wrS} \frac{r_1 - r_2}{2} - H_{wrS} f_S \\ z_{wA} - \frac{z_{w1} - z_{w2}}{2} - H_{wrA} \frac{r_1 - r_2}{2} - H_{wrA} f_A \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} f_{wS} = f_{w1} + f_{w2} = -\omega^2 M_w z_{wS} \\ f_{wA} = f_{w1} - f_{w2} = -\omega^2 \frac{I_w}{d^2} z_{wA} \end{aligned}$$

où $H_{wrS}(\omega)$ et $H_{wrA}(\omega)$ sont les fonctions de transfert entre la rugosité combinée et les parties symétrique et antisymétrique des déplacements de l'essieu données par :

$$\begin{aligned} H_{wrS} &= \left(1 - \frac{\omega^2 M_w}{2} \left(H_{t11} + H_{t12} \cdot \frac{1}{k_H} \right) \right)^{-1} \\ H_{wrA} &= \left(1 - \frac{\omega^2 I_w}{2d^2} \left(H_{t11} - H_{t12} \cdot \frac{1}{k_H} \right) \right)^{-1} \end{aligned} \quad (28)$$

Elles font chacune apparaître une zone fréquentielle de résonance caractérisée par une inertie de l'essieu proche de la raideur dynamique de la voie :

- en dessous de cette résonance, la fonction de transfert est proche de l'unité ; le déplacement de l'essieu est proche de la rugosité imposée ;
- autour de la résonance, le déplacement de l'essieu est maximal et son amplitude est contrôlée par l'amortissement de la voie ;
- au-dessus de la résonance, le déplacement de l'essieu décroît et c'est la voie qui reprend l'essentiel de la rugosité imposée.

On considère de plus des rugosités spatialement aléatoires, stationnaires et ergodiques. On note $S_{rr1}(f_s)$ et $S_{rr2}(f_s)$ les densités spectrales (en espace) de puissance des rugosités où $f_s = 1/\lambda$ est la fréquence spatiale. Lorsque l'essieu se déplace à une vitesse v , et si l'on considère que les rugosités des deux rails ne sont pas corrélées, les densités spectrales de puissance $S_{wwS}(f, v)$, $S_{wwA}(f, v)$,

$S_{ffS}(f, v)$ et $S_{ffA}(f, v)$ des parties symétriques et antisymétriques des déplacements de l'essieu et des efforts au contact roue/rail peuvent alors s'écrire :

$$\begin{aligned}
 S_{wvS}(f, v) &= \frac{1}{v} \cdot H_{wrS}^2 S_{rrS} \left(\frac{f}{v} \right) = \frac{1}{4v} \left\| H_{wrS} \right\|^2 \left(S_{rr1} \left(\frac{f}{v} \right) + S_{rr2} \left(\frac{f}{v} \right) \right) \\
 S_{vrvA}(f, v) &= \frac{1}{v} \left\| H_{wrA} \right\|^2 S_{rrA} \left(\frac{f}{v} \right) = \frac{1}{4v} \left\| H_{wrA} \right\|^2 \left(S_{rr1} \left(\frac{f}{v} \right) - S_{rr2} \left(\frac{f}{v} \right) \right) \\
 S_{ffS}(f, v) &= \omega^4 M_w^2 S_{vrvS}(f, v) \\
 S_{ffA}(f, v) &= \omega^4 \frac{I_w^2}{d^4} S_{vrvA}(f, v)
 \end{aligned} \tag{29}$$

On constate que l'effet de la vitesse est lié à la variation de la rugosité avec la longueur d'onde. Si l'on considère, par exemple, un spectre de rugosité combinée (roue + rails) donné par l'expression générale suivante :

$$S_{rr0} = S_{r0} \left(\frac{\lambda}{\lambda_0} \right)^{-m} = S_{r0} \left(\frac{f_s}{f_{s0}} \right)^{-m} \tag{30}$$

les niveaux de rugosité en octave ou tiers d'octave varient avec la longueur d'onde selon des pentes respectives de $3(m - 1)$ dB par octave ou $(m - 1)$ dB par tiers d'octave et la densité spectrale des efforts au contact varie en $v^{(m-1)}$ soit des niveaux d'effort en $10(m - 1) \log v$. En prenant par exemple $S_{r0} = 1 \mu\text{m}^2/\text{Hz}$, $\lambda_0 = 2 \text{ m}$ et $m = 3$, la courbe est proche de la rugosité des rails mesurée sur le site de *Ferrière* et on retrouve donc bien la pente de 6 dB par octave observée expérimentalement. La loi de variation avec la vitesse est alors théoriquement en $20 \log v$.

3.4.2. Recalage et validation

La validation du modèle n'est que partielle, la rugosité des roues étant inconnue et la rugosité des rails étant connue sur la moitié seulement de la plage de longueur d'onde. Par ailleurs, les masses et inerties des essieux (masses non suspendues) sont mal connues et ont été recalées en utilisant les fréquences de résonance voie/essieux symétriques et antisymétriques mesurées. Sur la rame, les demi-essieux situés sur un même axe de rotation sont indépendants, et donc théoriquement décorrélés. Toutefois, comme on l'a vu précédemment, il semble que la superstructure du tramway modifie le comportement des masses non suspendues et on peut observer un mode antisymétrique. On conserve donc une procédure de recalage similaire à la rame A. Les valeurs obtenues sont $M_w = 1500 \text{ kg}$, $I_w = 240 \text{ kg.m}^2$ pour la rame de type A et $M_w = 700 \text{ kg}$, $I_w = 250 \text{ kg.m}^2$ pour la rame de type B, soit un rapport de plus de 2 entre les deux rames pour la masse globale et des inerties comparables.



En ce qui concerne le mode symétrique, la comparaison entre, d'une part, les niveaux de vibrations mesurés et, d'autre part, ceux calculés à partir de la rugosité des rails est satisfaisante jusqu'à 100 Hz environ, en particulier sur le site de *Libération* où la rugosité des rails est élevée (cf. Figure 82). Dans ce cas, la rugosité des roues peut en effet être négligée. Au dessus de 100 Hz, le spectre des vibrations mesurées sur la rame A fait apparaître un deuxième pic correspondant probablement à un mode élastique d'essieu non pris en compte dans le modèle. Sur le site de *Ferrière* et pour la rame A, un pic de rugosité de roues produit des différences importantes entre la mesure et le modèle dans certaines bandes de fréquences. La Figure 82 présente également les niveaux calculés pour la rame B à *Ferrière* (pas de mesure correspondante), utilisés pour l'estimation des efforts à la section suivante.

La comparaison entre les niveaux de vibrations mesurés et ceux calculés dans le cas antisymétrique à partir de la rugosité des rails (Figure 83) est satisfaisante sur le site *Libération* à partir de 40 Hz environ. En revanche, pour le site *Ferrière* pour la rame A, les niveaux calculés sont surestimés : sur la gamme 30-65 Hz, la différence peut atteindre 4,5 dB ; le pic de résonance est moins diffus dans le cas théorique, et l'amplitude estimée largement surestimée, de l'ordre de 6,5 dB. Néanmoins, l'allure générale des niveaux estimés reste acceptable.

Figure 82 : comparaison des accélérations des essieux (DSP) mesurées et calculées à partir de la rugosité des rails (mode symétrique)

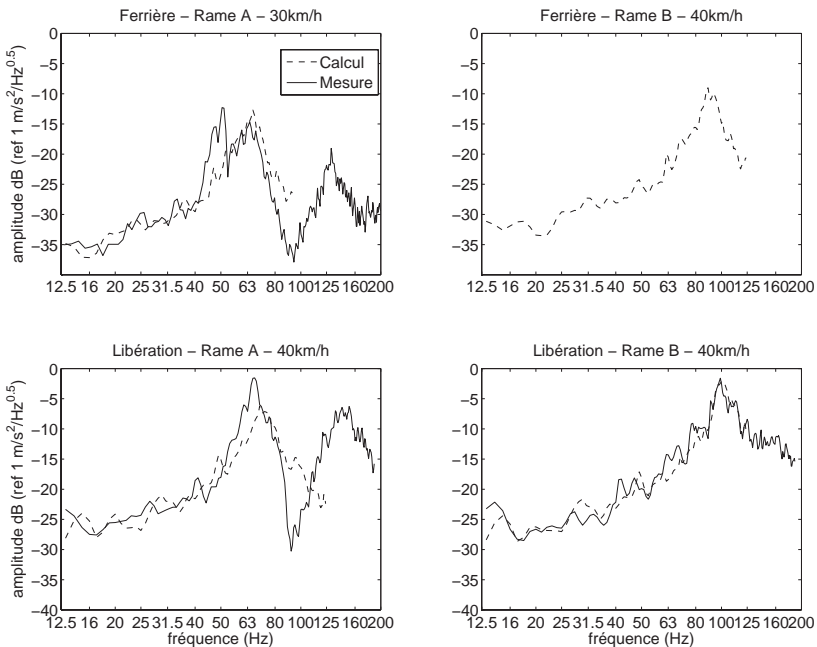
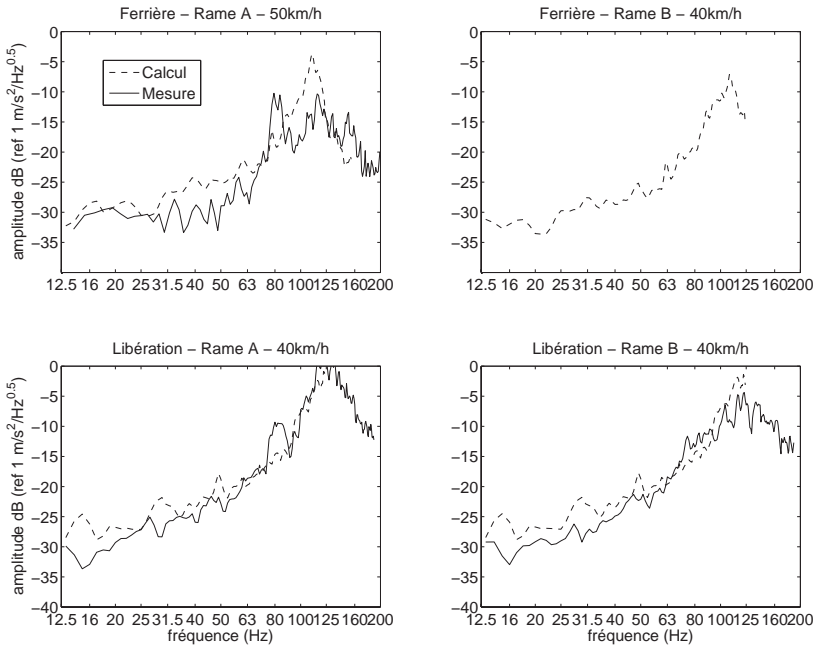


Figure 83 : comparaison des accélérations des essieux (DSP) mesurées et calculées à partir de la rugosité des rails (mode antisymétrique)



3.4.3. Identification de la rugosité combinée

Une deuxième manière de valider le modèle consiste à identifier la rugosité combinée à partir des mesures de vibrations des essieux. La validité du modèle peut alors être évaluée en comparant les courbes obtenues pour plusieurs vitesses de passage. Un exemple d'identification est présenté sur la Figure 84. On constate que les courbes sont très proches, en particulier pour les grandes longueurs d'onde. Pour les longueurs d'onde plus petites, les écarts sont plus importants mais acceptables. On peut également noter la présence d'un large pic aux longueurs d'onde comprises entre 10 et 20 cm, correspondant au pic observé dans le niveau de vibrations de l'essieu autour de 50 Hz à 20 km/h et non retrouvé par le modèle. Ce pic est donc très probablement un pic de rugosité d'une roue de l'essieu de la rame de type A.

Sur la Figure 85, plusieurs courbes de niveaux de rugosité combinée identifiés (cette fois en tiers d'octave) sont comparées aux courbes de niveaux de rugosité des rails mesurés. Pour le site de *Libération* on note très peu de différence entre les rugosités combinée et rail, et ce quel que soit le type de rame. Sur ce site, on constate donc encore une fois que la rugosité des rails est assez élevée et que la rugosité des roues peut être négligée. Pour le site de *Ferrière*, les courbes sont également assez proches sauf dans les tiers d'octave centrés sur les longueurs d'onde 10 et 20 cm. On observe donc bien le pic de rugosité de roues évoqué plus haut. On retrouve d'ailleurs ce pic dans la courbe de rugosité combinée identifiée

Figure 84 : identification de la rugosité combinée symétrique (DSP) au passage de la rame A sur le site de Ferrière

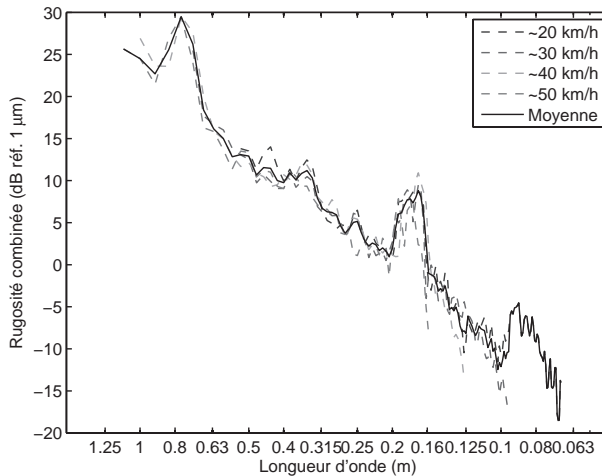
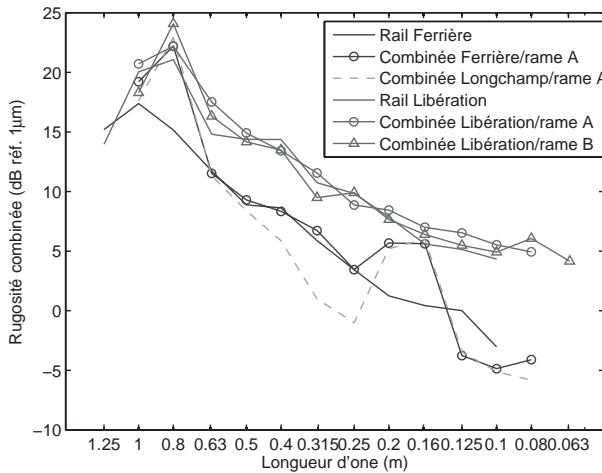


Figure 85 : comparaison des niveaux de rugosité identifiés (combinée roues/rails) et des niveaux de rugosité mesurés (rails seulement) par tiers d'octave en fonction des sites et du type de rame



sur le site de *Longchamp*¹⁹, ce qui confirme que la rugosité correspondante est liée à la rame et non à la voie. De manière générale, la variation des niveaux de rugosités combinées identifiés en fonction de la longueur d'onde est nettement

¹⁹ La modélisation pour le site de *Longchamp* n'a pas été effectuée entièrement et n'est pas présentée dans ce rapport mais des rugosités combinées ont pu être identifiées de la même manière que pour les autres sites.

moins uniforme que celle des niveaux mesurés directement sur les rails pour deux raisons :

- les roues présentent des pics de rugosités importants dans certains tiers d'octaves ;
- aux petites longueurs d'onde (à partir de 10 cm environ), les courbes se stabilisent et on perd la décroissance de 6 dB par octave observée aux grandes longueurs d'onde.

Ces différentes caractéristiques de la rugosité combinée expliquent que la variation des niveaux de vibrations de l'essieu en fonction de la vitesse n'est pas uniforme.

3.4.4. Définition des efforts au contact roue/rail

Dans la bande de fréquences 0–100 Hz, l'assimilation de l'essieu à un solide rigide semble correcte. Il en résulte que la partie symétrique des efforts au contact peut être estimée directement en multipliant la partie symétrique des accélérations (pilonnement) par la masse de l'essieu :

$$P_1 - P_2 = \frac{P}{2} - \frac{-\omega^2 M_w z_{wS}}{2} \quad (31)$$

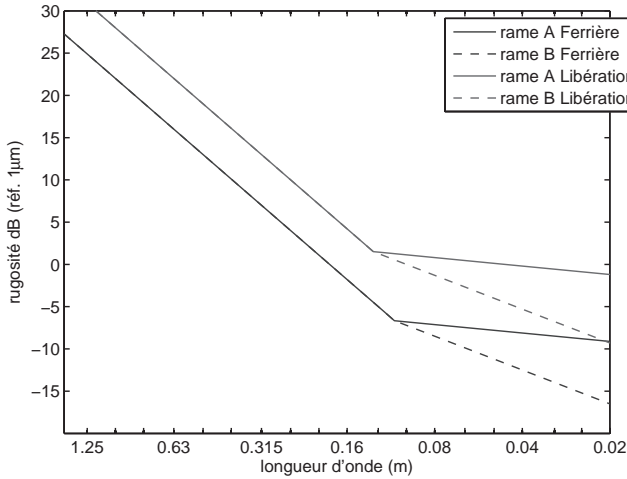
Pour la partie antisymétrique, les efforts au contact peuvent être calculés en utilisant la partie antisymétrique des accélérations (roulis) et l'inertie recalée :

$$P_1 - -P_2 = \frac{P}{2} - \frac{-\omega^2 I_w z_{wA}}{2d^2} \quad (32)$$

Il est alors possible d'estimer les efforts de trois manières différentes :

- à partir des accélérations mesurées (jusqu'à 100 Hz seulement pour la partie symétrique) ;
- à partir des rugosités de rails mesurées (la gamme de longueurs d'onde s'interrompant autour de 10 cm, les efforts sont estimés sur une bande de fréquence réduite, par exemple jusqu'à 120 Hz à 40 km/h) ;
- à partir de courbes de rugosités combinées simplifiées définies à partir des rugosités combinées identifiées et tracées sur la Figure 86.

Les niveaux de rugosités simplifiées diffèrent peu des niveaux de rugosités identifiées mais les pics sont gommés. L'objectif est d'obtenir des valeurs de rugosité assez générales pour une gamme de longueurs d'onde allant jusqu'à 3 cm environ, ceci étant nécessaire pour le calcul des vibrations associées dans la gamme 0-200 Hz et par la suite des efforts aux contacts roue/rail.

Figure 86 : courbes de rugosités combinées simplifiées (DSP)

3.5. Simulation du passage d'une rame

Dans cette dernière partie, le calcul simulé d'un passage de tramway est envisagé. Les réponses vibratoires du rail et du sol en un point donné sont estimées en fonction de la position du tramway vis-à-vis de ce point. Les données d'entrées nécessaires pour cette simulation ont été définies dans les sections précédentes et correspondent :

- aux caractéristiques géométriques du tramway (positions relatives des essieux) et à sa vitesse de passage ;
- aux paramètres mécaniques du sol et de la voie ;
- aux efforts aux contacts roue/rails définis ci-dessus.

3.5.1. Principe de calcul

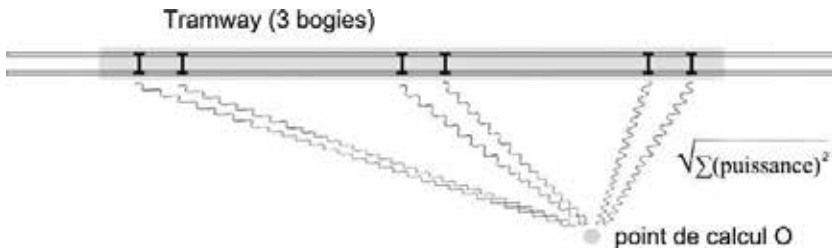
Rappelons d'abord que la campagne de mesures n'a pas permis d'établir une variation cohérente des réponses vibratoires en fonction de la vitesse du tramway (de 20 à 50 km/h, ou moins selon les sites), les écarts obtenus étant du même ordre de grandeur que ceux observés pour des passages à conditions supposées identiques. D'un point de vue théorique, ceci apparaît d'ailleurs tout à fait logique car les vitesses de déplacement (6 à 14 m/s) sont très inférieures aux vitesses de propagation des ondes de surface pour le sol. Dans le calcul présenté ici, le paramètre vitesse du tramway intervient donc seulement dans le positionnement temporel des bogies, qu'il est nécessaire de connaître pour définir la localisation des sources vibratoires, et au niveau des efforts générés au contact roue/rail qui, comme on l'a vu, peuvent évoluer avec la vitesse.

La simulation du passage à une distance y_0 de la voie est menée en trois temps (cf. Figure 87) :

- la réponse voie/sol à une excitation unitaire ponctuelle sur les rails est estimée pour tout x du domaine de calcul (variant de -160 à $+160$ m) à la distance y_0 de la voie (le calcul est effectué pour des fréquences allant de 20 à 200 Hz et pour les deux modes d'excitation, pilonnement et roulis de l'essieu) ;
- la réponse voie/sol pour une position de la rame au temps t donné, est calculée par sommation énergétique des réponses dues aux différents essieux supposées décorrélées, la réponse à un essieu étant obtenue en multipliant les mobilités de transfert estimées à l'étape précédente par les efforts au contact correspondants puis, le cas échéant, en sommant énergétiquement les contributions des deux modes d'excitation (pilonnement et roulis de l'essieu) supposés également décorrélés ;
- la réponse au passage est déterminée de manière incrémentale en considérant une position initiale de la rame suffisamment éloignée et en choisissant un pas de temps identique à celui utilisé pour le dépouillement des mesures au passage (125 ms).

Par ailleurs, les résultats discutés par la suite correspondent à des niveaux mesurés et calculés maximum. Ils sont obtenus généralement lorsqu'un bogie est situé au droit du point de mesure. Les résultats disponibles pour les niveaux de vibrations moyens n'amènent pas d'informations complémentaires par rapport aux niveaux maxima et ne sont pas présentés ici.

Figure 87 : principe de calcul de la réponse au passage



3.5.2. Résultats pour la pose classique

La contribution des excitations symétrique et antisymétrique est analysée sur la Figure 88 pour le cas de la rame A. Les résultats sont obtenus sur ces graphiques pour des efforts déterminés à partir des accélérations d'essieux mesurées. L'effort dynamique de pilonnement est pris en compte sur les deux premières colonnes de la figure jusqu'à 100 Hz. En effet, au-delà de cette fréquence, l'effort ne peut raisonnablement pas être estimé *via* les accélérations mesurées, qui font

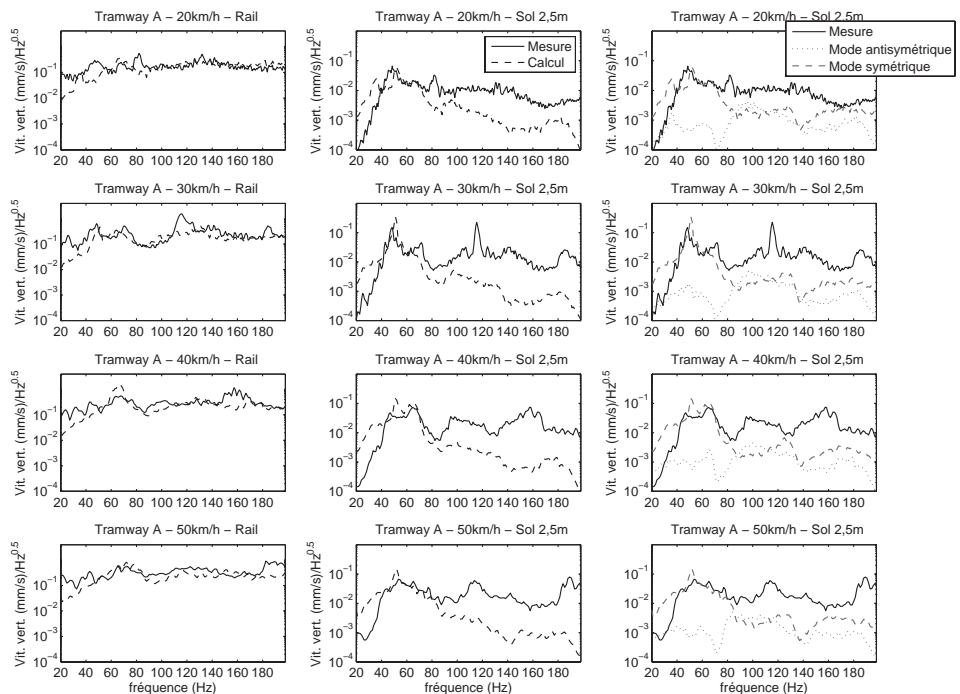
apparaître un mode élastique d'essieu. La colonne de droite permet de noter la contribution des deux modes d'excitation. Il ressort de ces premiers calculs les remarques suivantes :

- les niveaux sont estimés correctement sur le rail ;
- la contribution antisymétrique est négligeable, sauf sur la gamme de fréquences entre 90 et 130 Hz environ ;
- les niveaux sur le sol sont correctement estimés uniquement jusqu'à 100 Hz environ.

Notons d'abord que les bons résultats obtenus sur le rail sont encore meilleurs si l'on considère uniquement le troisième bogie, pour lequel les mesures d'accéléérations d'essieux ont été effectuées.

Concernant la contribution antisymétrique, il n'est pas surprenant qu'elle intervienne faiblement dans la réponse du sol, même en champ proche. En effet, les ondes induites dans le sol par chaque côté de la dalle sont en opposition de phase, et la distance les séparant est faible (par rapport aux longueurs d'onde dans le sol). Par conséquent, chaque onde induite d'un côté de la dalle admet une onde en quasi-opposition de phase sur l'autre côté, créant alors très peu de vibrations en dehors de la dalle. En fait, il semblait intéressant lors de l'étude de ce site de

Figure 88 : comparaison des vibrations voie/sol (DSP) mesurées et calculées au passage de la rame A sur le site de Ferrière

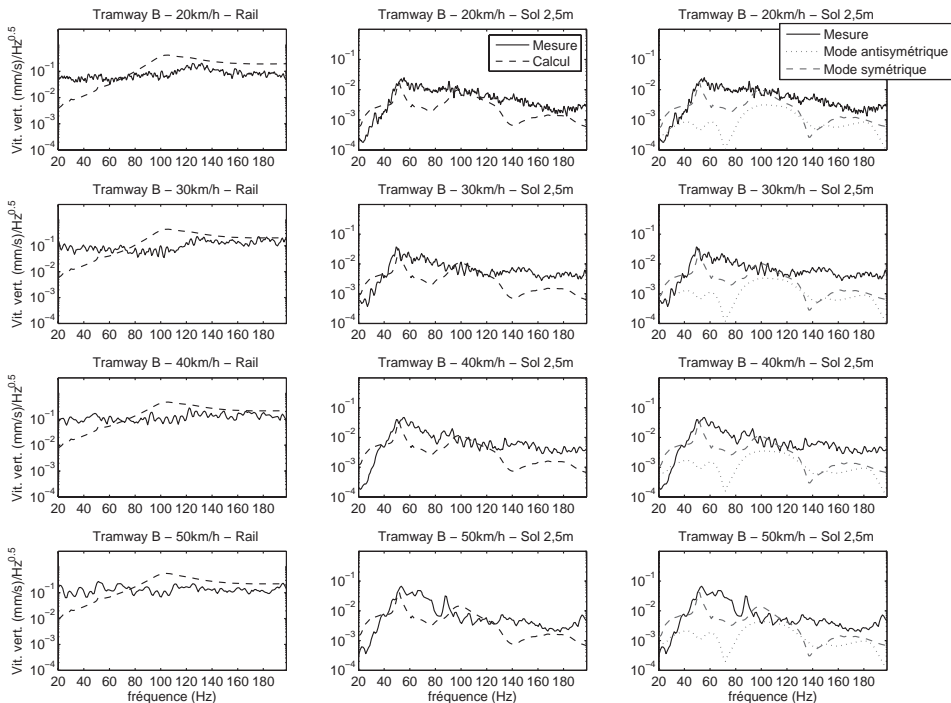


prendre en compte une rotation de la dalle de béton, en particulier parce que les simulations de réponses vibratoires du sol ne correspondent pas bien aux mesures. Finalement, les calculs effectués montrent que la rotation de la dalle n'intervient que très peu dans la réponse du sol, et qu'un modèle incluant uniquement le mode symétrique de l'excitation donne sensiblement les mêmes résultats.

La sous-estimation des niveaux vibratoires sur le sol après 100 Hz est en revanche difficile à expliquer. Elle semble liée au passage puisqu'on ne la retrouve pas sur les comparaisons avec les mesures au marteau mais les niveaux estimés sur le rail sont plutôt corrects ce qui laisse penser que l'excitation est bien prise en compte. Ce point reste donc à approfondir. À ce sujet, dans la littérature il ressort généralement que les niveaux vibratoires mesurés au-delà de 100 Hz sont faibles sur le sol (voir par exemple l'article présentant des mesures à 3 m pour le cas d'un tramway à roues indépendantes [38]), ceci confirmant bien la particularité des mesures obtenues sur le site de *Ferrière*.

Pour le tramway de type B, les résultats sont présentés sur la Figure 89. Étant donné que les mesures embarquées n'ont pas été effectuées dans ce cas, on présente les résultats obtenus à l'aide des rugosités combinées simplifiées. Ceci peut expliquer que les résultats au niveau du rail sont moins bons que pour la rame A. De plus, sur le sol, les niveaux sont globalement sous-estimés, notamment autour

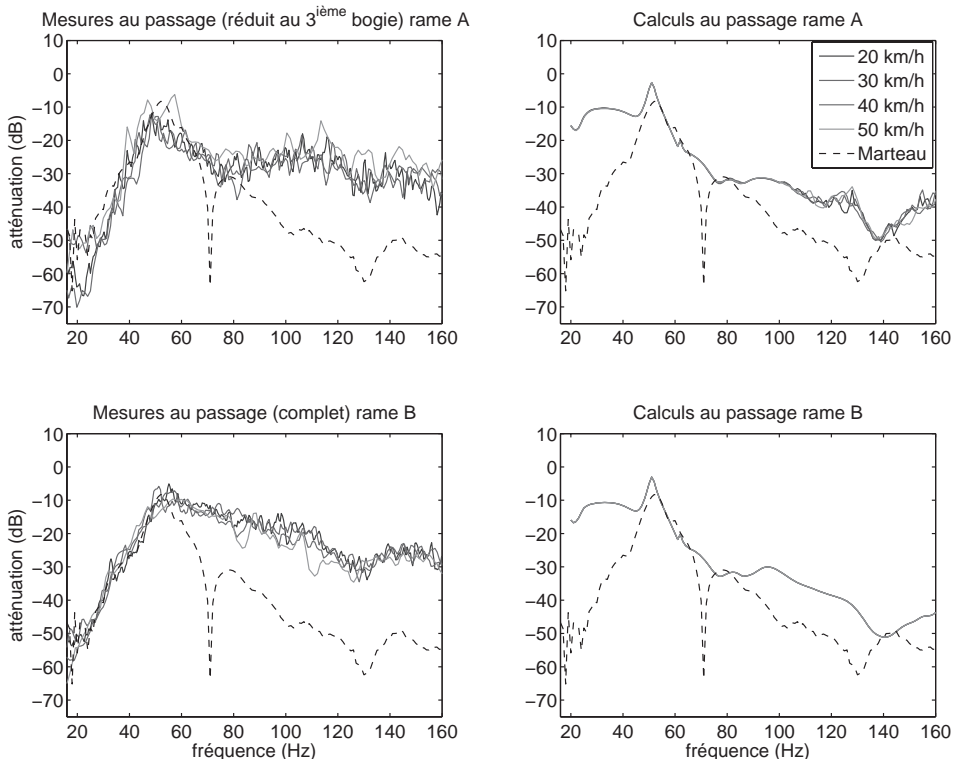
Figure 89 : comparaison des vibrations voie/sol (DSP) mesurées et calculées au passage de la rame B sur le site de *Ferrière*



de 70 et 140 Hz. L'effort calculé pour cette rame est peut-être mal considéré. Il est aussi possible qu'une combinaison des contributions des essieux existe dans la réalité. En effet, aucune analyse de corrélation n'a été effectuée pour la rame B entre les essieux situés sur deux essieux différents d'un même bogie. Malgré ces différences, les réponses calculées restent correctes. La contribution du mode symétrique est prédominante, comme pour la rame A sur ce même site.

Un autre point possible de comparaison peut être fait à l'aide des atténuations voie/sol (cf. Figure 90). Le fait que l'atténuation au passage ne correspond pas à l'atténuation au marteau se retrouve donc en partie par le calcul (en partie seulement en raison du problème déjà évoqué de la sous-estimation des niveaux au-delà de 100 Hz pour la rame A). L'explication qui peut être donnée à cette situation est la suivante. Dans le cas d'une excitation ponctuelle unitaire, l'atténuation des ondes dans le plan vertical contenant l'excitation et perpendiculaire à l'axe de la voie correspond aux mesures effectuées au marteau. Lorsque l'excitation devient multi-source, et que les sources ne sont plus dans le plan précédent contenant le point de mesure, l'atténuation des ondes est modifiée. Chaque source vibratoire sur le rail contribue à la réponse du sol de façon différente, notamment au regard

Figure 90 : comparaison des atténuations voie/sol (DSP) mesurées et calculées à 2,5 m au passage sur le site de Ferrière



de la distance parcourue par chaque contribution. De plus, la référence sur le rail ne tient pas compte directement de l'excitation multi-source, puisqu'elle n'est considérée qu'en un seul point. Il apparaît à ce stade qu'une étude de l'atténuation des ondes dans le sol depuis la voie (lors du passage d'une rame) ne peut se limiter à des modèles à deux dimensions. En outre, pour la validation d'un modèle à trois dimensions, il est bien sûr nécessaire d'effectuer des mesures de réponses voie/sol au droit du point d'impact, mais il peut être aussi intéressant d'effectuer des mesures parallèlement à la voie pour les essais au marteau.

3.5.3. Résultats pour la pose sur dalle flottante

Pour le cas de pose sur dalle flottante la Figure 91 et la Figure 92 présentent les résultats pour les réponses vibratoires du rail, du sol à 2,5 m du rail extérieur et à 5 m. Le modèle numérique utilisant les deux dalles flottantes en vibrations est exploité pour ces calculs. Les simulations présentées sont effectuées à l'aide des accélérations mesurées pour l'obtention des efforts symétrique et antisymétrique. Par ailleurs, les contributions de ces deux modes sont aussi présentées, mais à l'aide d'un calcul utilisant les rugosités combinées. Pour les deux rames, les approches, à l'aide des accélérations mesurées ou des rugosités combinées pour l'obtention des efforts, donnent des niveaux vibratoires similaires. Les résultats

Figure 91 : comparaison des vibrations voie/sol mesurées et calculées au passage de la rame A sur le site de Libération

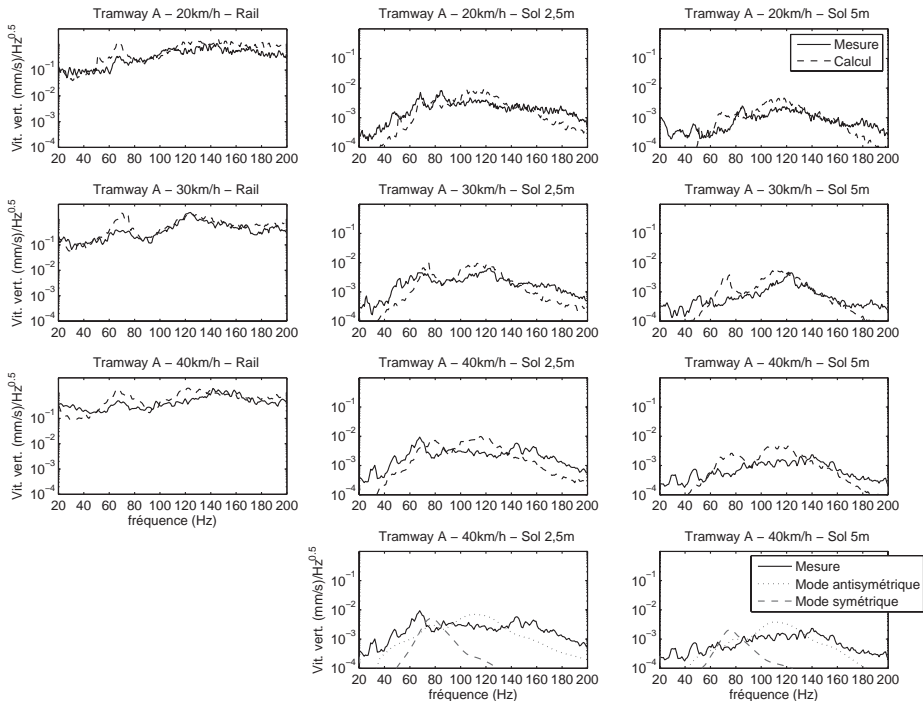
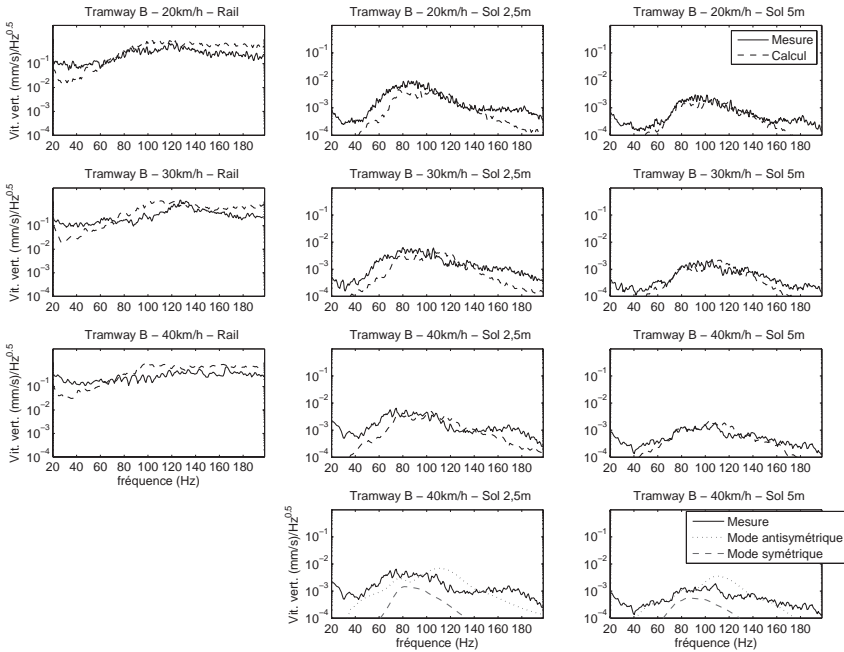


Figure 92 : comparaison des vibrations voie/sol (DSP) mesurées et calculées au passage de la rame B sur le site de *Libération*



tats sont satisfaisants, en particulier sur le rail et à 5 m. Les différences sont plus marquées pour la rame A. On note qu'à l'inverse de la pose classique, ce sont les vibrations dues au mode de pilonnement qui sont fortement atténuées dans le sol (ce qui était déjà vu avec la fonction de transfert voie/sol). Les calculs en bas des figures, effectués à l'aide des rugosités combinées, montrent en effet que la contribution du mode symétrique existe de façon non négligeable uniquement autour de 80 Hz. Globalement, à 5 m du rail les niveaux sont bien estimés sur la gamme de fréquences 60-160 Hz, avec des résultats moins bons pour la rame A. Inversement, sur le rail les calculs sont meilleurs pour la rame A, et on retrouve pour la rame B des différences identiques à celles observées pour cette même rame sur le site *Ferrière*. Globalement, la comparaison mesures/simulation sur le site de *Libération* est plus satisfaisante que pour le site *Ferrière*.

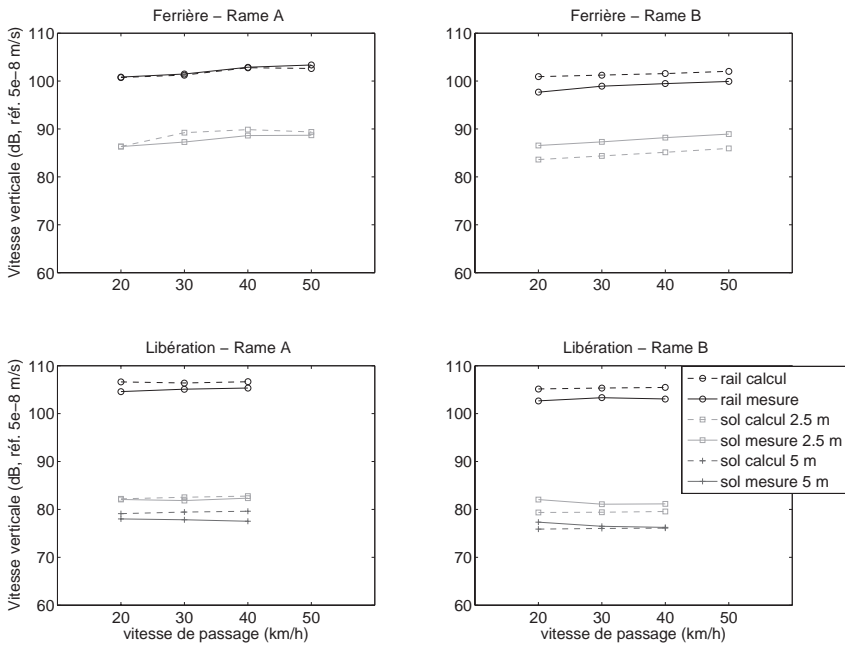
3.5.4. Bilan concernant les niveaux estimés

Les niveaux vibratoires estimés en bandes fines présentent des écarts avec les mesures généralement inférieurs à 10 dB. Ce niveau est à comparer avec la précision des mesures en bandes fines, de l'ordre de ± 5 dB environ. Pour simplifier l'analyse, la Figure 93 présente les écarts entre les niveaux simulés et mesurés sous la forme d'une niveau vibratoire global dans la gamme de fréquences 20–200 Hz. La comparaison est faite pour chaque vitesse de passage et pour les trois points de mesures : sur le rail, à 2,5 m et à 5 m du rail (*Libération*). Il ressort

deux points essentiels de ces dernières comparaisons, qui pourraient faire l'objet de recherches ultérieures :

- compte tenu des écarts observés, et comme cela a déjà été indiqué, la modélisation de l'interaction essieux/voie au passage doit être améliorée (prise en compte de plusieurs essieux, corrélations entre essieux, etc.) ;
- la résonance essieu/voie est peu visible au passage sur le rail (quelle que soit la rame), et les niveaux au passage sont souvent surestimés sur le rail : il est possible que l'effet local de raidissement de la voie, dû au chargement du tramway induise une réponse vibratoire globale du rail plus faible que la réponse estimée ce qui constitue également un point à approfondir.

Figure 93 : écarts mesures/calcul sur le niveau vibratoire global dans la bande 20-200 Hz



4. Conclusions

Conclusions tirées de la campagne expérimentale

En ce qui concerne la génération des vibrations, la campagne de mesures a permis de mettre en évidence les principaux points suivants :

1. Pour les longueurs d'onde comprises entre 10 cm et 1,5 m, les niveaux de rugosité des rails varient selon les sites dans un intervalle de 10 dB environ. Les plus forts niveaux, observés sur le site de *Libération* (en courbe), sont proches

de la courbe limite TSI+ caractérisant le rail de référence dans la réglementation européenne.

2. L'analyse des vibrations mesurées sur les boîtes d'essieux d'un bogie porteur fait apparaître deux résonances dans la gamme 10-200 Hz. La première correspond à un mode symétrique, la deuxième est celle d'un mode antisymétrique. Les vibrations des roues appartenant à des essieux différents sont très faiblement corrélées.

3. Les niveaux de vibrations mesurés sur les deux types de rame sont globalement comparables, mais les fréquences de résonance sont différentes (63/125 Hz pour la rame de type A contre 80-100/125 Hz pour la rame de type B). Pour la rame de type B, la résonance du mode antisymétrique est de plus très peu marquée.

4. Les niveaux de vibrations mesurés varient avec le site dans un intervalle de 10 dB environ. C'est sur le site de *Libération*, qui présente les plus forts niveaux de rugosité, que l'on observe les niveaux de vibrations les plus élevés.

5. L'effet de la vitesse sur les vibrations mesurées n'est pas monotone et est donc difficile à évaluer. Les écarts peuvent atteindre 7 à 8 dB dans certains tiers d'octaves pour des vitesses comprises entre 20 et 50 km/h.

En ce qui concerne la propagation au niveau de la voie et du sol, l'analyse des mesures a permis de tirer les principales conclusions suivantes :

6. Le type de rame a une influence importante sur les vibrations mesurées sur le rail et dans le sol : on retrouve les gammes de fréquences prépondérantes relevées sur les essieux pour les deux rames mais les niveaux vibratoires générés par la rame de type A sont de façon générale plus élevés que ceux induits par la rame de type B (5 dB en moyenne).

7. La vitesse de la rame ne peut pas être considérée comme un paramètre essentiel. Des écarts sont constatés, surtout pour la rame A, mais ils sont généralement de l'ordre de grandeur de la variation des mesures (2 à 3 dB) pour des conditions expérimentales identiques.

8. L'analyse de l'effet de site sur les vibrations du rail confirme les conclusions obtenues à partir des mesures sur les essieux (niveaux plus importants à *Libération*) et cet effet semble lié à l'état de surface des rails.

9. L'atténuation des vibrations dans le sol par rapport au rail dépend principalement du site (type de pose de voie et type de sol) mais varie peu avec le type de rame et la vitesse. La variation des niveaux dans le sol avec le type de rame et la vitesse est donc surtout liée à des différences de vibrations au niveau du rail.

10. L'utilisation d'une pose sur dalle flottante joue effectivement un rôle de réduction du niveau des vibrations transmises au sol, avec une efficacité conforme en moyenne aux préconisations annoncées par le constructeur et relativement indépendante du type de la rame et de la vitesse de passage (voir point précédent). En revanche, aucune conclusion n'a pu être tirée concernant la pose sur semelle souple, compte-tenu des incohérences apparues lors des mesures.

11. L'atténuation des vibrations dans le sol avec la distance n'a pas pu être caractérisée au passage des rames (capteurs trop près de la voie). Toutefois, pour des impacts au marteau, des différences notables ont été mises en évidence entre les différents sols.

Conclusions tirées de la phase de modélisation

En ce qui concerne la génération des vibrations, la phase de modélisation a permis de mettre en évidence les principaux points suivants :

1. L'excitation dynamique due aux irrégularités de surface des roues et des rails (rugosité combinée) est prépondérante. La variation des efforts au contact roue/rail avec la vitesse est principalement liée à la variation de ces irrégularités avec la longueur d'onde (variation non monotone en raison des pics de rugosité des roues et de stabilisation des courbes de rugosité aux petites longueurs d'onde).

2. Dans la première moitié de la bande de fréquence (10-100 Hz environ), les efforts au contact roue/rail sont symétriques et résultent de la résonance des masses non suspendues sur la raideur dynamique de la voie (pilonnement de l'essieu), ces deux paramètres contrôlant la fréquence et l'amplitude de la résonance. Les efforts sont par ailleurs proportionnels à la masse de l'essieu.

3. Dans la deuxième moitié de la bande de fréquence (100-200 Hz environ), les efforts au contact roue/rail présentent une composante antisymétrique (roulis de l'essieu). Des résonances de modes élastiques d'essieu peuvent également apparaître.

4. L'effet du type de rame sur les efforts s'explique donc en grande partie en considérant la masse et l'inertie des essieux (en particulier une masse presque deux fois supérieure pour la rame de type A). Notons au passage que les niveaux d'efforts estimés pour la rame de type A sont, par conséquent, environ 6 dB plus élevés que ceux estimés pour la rame de type B.

5. L'effet du site sur les efforts au contact roue/rail s'explique plutôt en considérant les niveaux de rugosité des rails, les raideurs dynamiques étant sensiblement équivalentes.

Les principales conclusions tirées de la phase de modélisation de la propagation des vibrations dans la voie et le sol sont les suivantes :

6. Les modèles linéaires semi-analytiques de sol multicouches et de voie développés donnent des résultats corrects pour l'évaluation des réponses à des excitations ponctuelles (mobilités) sous réserve d'un recalage fin des paramètres mécaniques²⁰.

7. Pour la voie, un modèle symétrique est suffisant dans le cas de la pose classique. Dans le cas de la pose sur dalle flottante, un modèle non symétrique avec torsion des dalles est nécessaire pour bien représenter la réponse à une

²⁰ Recalage qui peut s'avérer difficile voire impossible dans une phase de conception par exemple.

excitation sur un seul rail (la réponse du sol est en effet fortement atténuée si l'excitation est symétrique sur les deux rails).

8. À l'aide de ces modèles, deux phénomènes ont été mis en évidence. D'une part l'atténuation voie/sol est différente selon qu'on la considère dans un plan perpendiculaire à la voie ou non. D'autre part, le sol a un effet important sur cette atténuation et donc sur l'efficacité d'une pose isolante sur dalle flottante.

9. Les simulations au passage donnent des résultats corrects en ce qui concerne les niveaux vibratoires sur les rails, validant le modèle de génération discuté ci-dessus. Toutefois, des écarts sont observés (résonance voie/essieu peu marquée, essieu rame B moins bien représenté) qui sont à étudier à l'aide de modèles d'interaction voie/véhicule au passage plus évolués.

10. En ce qui concerne l'atténuation des vibrations dans le sol au passage par rapport aux rails, les simulations donnent des résultats acceptables pour le site sur dalle flottante. Dans le cas de la pose classique, des différences apparaissent avec les mesures, au-delà de 100 Hz environ. Cette différence, visible pour les deux types de rames, est difficile à expliquer et ce point est à approfondir.

11. Les écarts entre les niveaux estimés et mesurés peuvent paraître importants mais doivent être mis en parallèle avec d'autres travaux de même nature, qui donnent des écarts dont l'ordre de grandeur est similaire (pour des environnements généralement plus homogènes – trains sur voies ferrées par exemple). Les résultats sont donc globalement satisfaisants compte tenu des incertitudes concernant les données d'entrée (type de sol, hétérogénéité du sol, données précises pour la voie, état de surface des roues).

Conclusions pratiques

D'un point de vue pratique, les vibrations générées au niveau des rails au passage d'une rame de tramway sont assez différents d'une configuration à l'autre. Ils varient surtout en fonction du type de rame et de l'état de surface des rails et dans une moindre mesure, de la vitesse de la rame et du type de pose de voie. La réduction des vibrations générées au passage de la rame peut donc être envisagée en amont de l'atténuation par la plate-forme :

- dès la conception des rames, la masse, l'inertie et le type d'essieux sont des paramètres sur lesquels il est possible d'agir pour limiter les efforts dynamiques au contact roue/rail ;
- en ce qui concerne la voie, la raideur dynamique (et en particulier l'amortissement) peut éventuellement être ajusté pour contrôler la résonance voie/essieu ;
- au niveau de l'entretien, la maîtrise des irrégularités de surface des roues et des rails est un moyen sûr de réduire les vibrations.

L'atténuation des vibrations entre les rails et le sol dépend, quant à elle, surtout du type de pose de voie mais aussi du sol. La réduction des vibrations générées

au passage de la rame peut donc être envisagée au niveau de la plate-forme, en utilisant des modèles du type de ceux présentés ici et en veillant à :

- bien considérer l'atténuation au passage de la rame, qui est différente de l'atténuation correspondant à une excitation ponctuelle (mesurée au marteau d'impact par exemple), c'est-à-dire utiliser un modèle en trois dimensions ;
- prendre en compte les caractéristiques du (sous-)sol pour déterminer l'efficacité d'une pose isolante ;
- vérifier l'effet du type de pose de voie sur les niveaux générés au niveau des rails.

En ce qui concerne l'atténuation des vibrations dans le sol avec la distance, il est clair qu'elle dépend fortement du type de sol et en particulier des phénomènes d'amortissement. Ainsi les règles simplifiées usuelles du type « -1 dB/m » ne sont pas très fiables (elles ne prennent souvent en compte que l'atténuation géométrique) et imposent une forte surestimation des niveaux vibratoires. Pour comparaison, dans les cas étudiés ici on peut estimer l'atténuation à 8-10 dB/m jusqu'à 2 m de la voie puis autour de 5 dB/m ensuite mais ceci reste très approximatif et ne constitue absolument pas une règle.

Perspectives

Pour aller plus loin, deux pistes de travail peuvent être envisagées. D'un point de vue expérimental d'abord, il serait intéressant de caractériser la réponse vibratoire du sol à de plus grandes distances de la voie (au marteau d'impact et au passage) et pas seulement dans le plan contenant l'excitation mais également sur une ligne parallèle à la voie. Ceci permettrait notamment d'approfondir la question de la sous-estimation des niveaux vibratoires à partir de 100 Hz lors des simulations au passage.

La deuxième perspective, déjà discutée plus haut, concerne l'amélioration du modèle d'interaction entre la voie et le véhicule (prise en compte de plusieurs essieux, corrélations entre essieux, modèles multi-corps pour le véhicule, etc.). L'effet de la charge due aux essieux sur les caractéristiques mécaniques de la voie (différences chargé/non chargé) pourrait également être étudié de plus près.

Étude in-situ de la perception du bruit du tramway

1. Contexte et problématique

La connaissance fine des situations à l'origine des réactions négatives des riverains de ligne de tramway (gêne en général, perturbation de la communication et du sommeil, plaintes...) est encore insuffisante et de ce fait peu valorisée dans les cahiers des charges des projets de ligne de tramway, mais aussi dans l'élaboration des réglementations relatives au bruit ferroviaire [49].

Peu de travaux scientifiques [50] ont en effet été menés jusqu'à présent sur cette question spécifique du bruit de tramway. On notera cependant ceux de Rylander en 1976 à Göteborg [51], Miedema en 1983 à Rotterdam, La Haye et Amsterdam [52], Alim à Alexandrie en 1992 [53]. Tous utilisent une méthodologie d'enquête associée à des mesures acoustiques. Les travaux de Vogt (1996) [54] portent sur l'évaluation psychoacoustique de différentes technologies de tramway et ont été réalisés en laboratoire.

Deux articles traitant spécifiquement de la gêne due au bruit du tramway sont particulièrement en relation avec l'objectif des travaux menés dans le cadre de cette recherche : celui de R. Rylander et al de 1977 et celui de H.M. Miedema de 1988.

1.1. Gêne due au bruit de tramway et au bruit routier en milieu urbain

Les travaux menés par R. Rylander, M. Björkman et U. Ahrlin avaient pour objectif d'étudier la gêne due au bruit du tramway et de la comparer à la gêne due aux véhicules automobiles dans le cadre du trafic urbain.

Cette étude a été réalisée à Göteborg (Suède). Six sites ont été sélectionnés dans des rues où circulait le tramway et présentant différentes densités de trafic automobile. L'échantillon est constitué de personnes âgées de 18 à 75 ans occupant leur logement depuis plus d'un an, et ayant au moins une fenêtre de leur domicile donnant sur la rue sélectionnée.

464 personnes ont été interrogées sur l'ensemble des sites retenus. Elles ont répondu à un questionnaire abordant : les activités perturbées par le bruit, la gêne due au bruit du tramway et au bruit de la circulation automobile. Le bruit dans les différents sites a été enregistré puis grâce au comptage des véhicules, les niveaux moyens (L_{Aeq}) et les niveaux maximums en dB(A) du bruit en général, du tramway et des véhicules (camions pour les niveaux maximums) ont été calculés pour chaque personne enquêtée.

Les résultats montrent que dans les réponses au questionnaire, la gêne due au bruit du tramway se distingue de celle due au bruit du trafic par le type d'activités perturbées. Ainsi, « écouter la radio/TV » est une activité plutôt perturbée par le bruit du tramway (25 % des personnes interrogées, soit le pourcentage le plus élevé parmi les activités perturbées par le bruit du tramway) tandis que « se reposer, se relaxer » est plutôt une activité sensible au bruit du trafic (citée par 11 % des personnes interrogées, soit le pourcentage le plus élevé parmi les activités perturbées par le bruit du trafic).

Les auteurs ne sont pas parvenus à établir une relation « dose-réponse » bien tranchée pour le bruit du tramway ; en d'autres termes, une relation entre une « dose de bruit » définie comme la valeur du L_{Aeq} tramway, et la gêne exprimée par les riverains, caractérisée par le pourcentage de personnes « très gênées », n'a pas pu être clairement établie.

Les auteurs ont alors recherché une relation entre la gêne due au bruit du tramway et celle due au bruit des véhicules routiers, et respectivement le nombre de tramway et le nombre de camions sur les sites exposés à un niveau sonore maximum d'environ 80 dB(A). Les résultats ont montré que :

- La relation « dose-réponse » pour le bruit des véhicules automobiles est relativement bonne : une augmentation du nombre de camions entraîne une augmentation du nombre de personnes « très gênées ».
- En revanche, en fonction des sites, les relations « dose-réponse » pour le bruit du tramway et pour le bruit des véhicules routiers se distinguent :
 - sur 3 sites caractérisés par des trafics mixtes où la vitesse du tramway est basse, avec une augmentation comparable du nombre de camions et du nombre de tramway, la gêne due au bruit routier augmente plus vite que la gêne due au bruit du tramway.
 - Sur les 3 autres sites, caractérisés par une vitesse plus élevée des tramways et une différence importante entre le bruit de fond et les niveaux maximum en dB(A) du tramway, la pente de la courbe dose-réponse tramway, à l'inverse, augmente plus vite que celle du trafic routier.

En conclusion, les auteurs n'ont pas pu mettre en évidence une relation nette entre la gêne due au bruit du tramway et les valeurs du L_{Aeq} tramway. Ils estiment que la différence entre le type d'activités perturbées par le bruit du tramway et celles perturbées par le bruit du trafic routier est une indication sur l'impossibilité de synthétiser, par un même indice, l'exposition à des sources de bruit différentes. L'analyse des données recueillies n'a pas permis d'expliquer la différence dans les niveaux de gêne engendrée par le bruit du trafic et du tramway à des niveaux équivalents en dB(A) et avec le même nombre de véhicules/jour. L'hypothèse serait qu'en milieu urbain, où plusieurs sources de bruit co-existent, les niveaux sonores ne suffisent pas à expliquer la variabilité de la gêne exprimée. Les auteurs proposent comme piste de recherche de s'orienter vers des analyses fréquentielles du bruit auquel les riverains sont exposés.

1.2. Relation « dose-réponse » pour l'exposition au bruit du tramway

H.M. Miedema et R. van den Berg ont réalisé une enquête par questionnaire associée à une campagne de mesures, en 1983 à Rotterdam, La Haye, et Amsterdam. L'objectif de cette recherche est d'établir une relation dose-réponse pour le bruit du tramway. Les sites d'enquête sont caractérisés par un environnement sonore auquel contribuent principalement le bruit du trafic routier et le bruit du tramway. 5 types de situation d'exploitation du tramway sont représentés : en courbe, à l'arrêt, à une intersection, en ligne droite où le tramway est séparé des autres trafics, aux voies d'arrivée ou de départ du dépôt. 69 mesures de bruit ont été réalisées sur les 29 sites retenus. Des indices de bruit ont ensuite été calculés pour chacune des 685 personnes interrogées.

Les résultats de l'enquête montrent que :

- 11 % des personnes interrogées citent le bruit du tramway comme principale caractéristique environnementale désagréable de leur quartier ;
- sur 391 personnes qui se déclarent gênées par du bruit extérieur à leur logement, 44 % citent comme première ou unique source, le tramway ;
- pour une même valeur de L_{Aeq} (24 heures), le pourcentage de personnes « très gênées » par le bruit du tramway est plus important dans les sites en courbes et dans les intersections que dans les sections droites. Cette différence est expliquée par la présence de bruits particuliers comme les bruits de crissement, d'impact et probablement de sonnettes.

L'analyse des données permet de conclure que la gêne totale due au bruit extérieur, toutes sources confondues, ne dépend pas uniquement du bruit routier mais qu'il existe bien une contribution du bruit du tramway. Pour 76 % des personnes interrogées, la gêne due au bruit du tramway est supérieure ou équivalente à la gêne due au bruit du trafic routier. De plus, il apparaît que si la gêne due au bruit du tramway est supérieure ou égale à la gêne due au trafic routier, la gêne totale diminue si la gêne due au tramway diminue (la gêne due au trafic routier ne changeant pas).

Pour les auteurs, le niveau de bruit est un déterminant du niveau de gêne, mais les différences observées en fonction des configurations de sites tendent à montrer une contribution importante des bruits spécifiques comme les crissements par exemple. Ce résultat confirme les conclusions de R. Rylander sur l'intérêt d'une analyse fréquentielle pour examiner la composition du bruit perçu par les riverains.

Ils ont également observé que le pourcentage de gens « très gênés » était plus élevé dans les sites autour des dépôts, où le nombre de passages de tramways pendant la nuit est plus important que sur les autres sites. Sur ces sites, un plus grand nombre de personnes se déclarent gênées au moment de l'endormissement ou pendant leur sommeil. Ils en ont donc déduit que la gêne ressentie pendant la période d'endormissement ou nocturne a une incidence sur l'expression de la gêne sur 24 heures.

Ils concluent que les descripteurs principaux de la gêne due au bruit du tramway sont : le L_{Aeq} (24heures), la présence de bruits spécifiques comme les crissements et bruits d'impact et le L_{Aeq} (23h-7h).

1.3. Principaux enseignements de la revue de littérature

Ces deux recherches n'ont pas explicité totalement la gêne due au bruit du tramway en milieu urbain. Ainsi R. Rylander et H.M. Miedema ne sont pas parvenus à établir une relation claire entre le pourcentage de gens gênés et un indice acoustique, le L_{Aeq} (24heures), qui représente une moyenne énergétique du bruit dû au tramway sur une période de 24 heures. Ils ont cependant montré que la présence d'événements sonores particuliers comme des bruits de crissement dans les virages peuvent être une variable explicative de la variation du niveau de gêne pour un niveau global équivalent. Il semblerait que pour expliquer la variabilité de la gêne due au bruit du tramway, la gêne instantanée, en d'autres termes celle ressentie au passage du tramway, et la gêne de long terme due à la circulation des tramways doivent être considérées.

Les auteurs ont clairement établi que la présence simultanée de plusieurs sources de bruit, en règle générale, le tramway et la circulation automobile, complexifie l'établissement d'une relation dose-réponse. Rylander conclut qu'il n'existe pas de relation entre le niveau de gêne dû au tramway et celle due au trafic. Il montre, dans son étude, qu'en fonction de ce que l'on pourrait nommer le bruit de fond, en d'autres termes le bruit de la circulation routière, la pente de la relation dose-réponse est plus forte lorsque le bruit du tramway est dominant. Cela nous amène à poser l'hypothèse d'un descripteur acoustique de la gêne due au bruit du tramway qui tienne compte à la fois des niveaux du bruit du tramway mais aussi de celui du bruit de fond et de ses fluctuations au cours de la journée en fonction de la densité du trafic.

À la lumière des conclusions obtenues par ces auteurs, cette recherche s'efforce d'appréhender non seulement le bruit du tramway et la gêne occasionnée mais aussi le contexte sonore dans lequel il se situe. Il s'agit donc également de détailler un peu plus que ce qu'ont fait Miedema et Rylander dans leurs recherches respectives, les caractéristiques du bruit de fond.

Par ailleurs, cette recherche intègre aussi des variables non acoustiques pour aborder la gêne due au bruit du tramway. Les personnes interrogées sont riveraines de la ligne du tramway mais également, pour une partie d'entre elles, usagers. Il paraît donc important d'explorer comment cette dualité peut avoir une incidence sur la variabilité de la gêne exprimée. D'autres éléments comme l'intégration du tramway dans le quartier et les changements que la ligne a pu impliquer en termes, par exemple, d'aménagements sont également pris en compte.

2. Méthodologie : enquête par questionnaire

Le choix méthodologique d'une enquête par questionnaire s'impose dès lors qu'il s'agit de recueillir l'avis d'un échantillon important d'individus. En revanche, elle nécessite la définition rigoureuse d'un ensemble d'éléments qui garantiront

la pertinence et la fiabilité du recueil de données. Il s'agit notamment du lieu où les personnes seront interrogées mais aussi de la constitution de l'échantillon lui-même.

L'élaboration d'un questionnaire d'enquête nécessite préalablement la réalisation puis l'analyse d'entretiens exploratoires conduits in situ. En effet, les items proposés dans le questionnaire doivent couvrir toute la diversité existante des perceptions, des sentiments, des attitudes et des comportements propres à la situation étudiée. L'objectif est que chaque personne enquêtée puisse exprimer son opinion, relater son expérience par le biais des items proposés dans le questionnaire d'enquête.

2.1. L'élaboration du questionnaire

2.1.1. La réalisation des entretiens exploratoires

La méthode de l'entretien semi-directif a été choisie, pour cette phase exploratoire. En effet, elle incite à la construction d'un discours sur un thème donné sans imposer pour autant un cadre de référence. Elle permet d'obtenir des informations qualitatives mais ordonnées sur un certain nombre de thèmes. Elle utilise une grille et propose les thèmes à aborder, tout en respectant l'ordre du discours de la personne interrogée.

Les entretiens exploratoires préalables à la rédaction du questionnaire permettent non seulement d'explorer la multiplicité des situations, mais aussi de relever le vocabulaire et les expressions utilisés par la population enquêtée.

L'objectif de ces entretiens était d'identifier les principales dimensions à prendre en compte lors de l'élaboration du questionnaire de l'enquête. En conséquence, la grille d'entretien utilisée dans cette phase aborde quatre thèmes principaux :

- **le quartier** : ancienneté, critères de choix, satisfaction, avantages/inconvénients, place du tramway dans le quartier ;
- **le bruit du tramway** : description, différences de perception en fonction du moment de la journée, de la météo, réactions comportementales, évaluation de la gêne ;
- **les autres bruits entendus au domicile** : nature, moments, fréquence, effets sur les comportements, gêne ressentie, comparaison des sources de bruits ;
- **les améliorations souhaitées** : changements imaginés en réponse à des nuisances éventuelles causées par la ligne de tramway.

Trente-huit entretiens ont été réalisés, en face à face, au domicile des riverains des 3 lignes de tramway de Nantes.

Les entretiens ont été réalisés le long des trois lignes de tramway existantes à Nantes : treize sur la ligne n° 1, dix sur la ligne n° 2 et quinze sur la ligne n° 3. Une contrainte concernant le choix des sites de ces entretiens exploratoires portait sur la nécessité que les différentes configurations d'exploitation du tramway soient représentées. Ainsi, trois entretiens ont été réalisés dans des logements situés

dans une courbe, et cinq à proximité d'une station. Les trente autres personnes résidaient sur des sites en ligne droite, y compris au niveau d'une station. Les trois principaux types de revêtements existants (pavés, goudron, gazon) figurent également sur les sites.

La diversité des distances à la voie a également été observée. La distance entre les bâtiments et la voie de tramway varie de moins de 10 mètres à environ 30 mètres. Les entretiens ont eu lieu en centre-ville, et dans des zones résidentielles et populaires. 22 personnes résident en immeuble et 16 en maison ou pavillon.

Tous les entretiens ont été enregistrés, après accord des personnes, puis retranscrits. La durée moyenne des entretiens est de 20 minutes. L'objectif n'est pas, à ce stade, d'être représentatif des riverains des lignes de tramway à Nantes, mais de couvrir la plus grande diversité possible des situations d'exploitation du tramway et des individus. La méthode employée pour la sélection des personnes interrogées a été celle du « porte à porte ».

2.1.2. L'analyse de contenu des entretiens

L'analyse de contenu peut être définie comme un examen objectif, exhaustif d'un discours en vue d'en dégager un contenu significatif. Plus spécifiquement, une analyse thématique permet une description rigoureuse des entretiens suivant un cadre de référence ou une grille d'analyse. Dans le cadre de l'élaboration du questionnaire, l'objectif est d'extraire des discours recueillis, matière à écrire les items, mais aussi de valider les thèmes généraux à aborder. Une fois retranscrits, les entretiens ont été analysés en fonction des thèmes fixés dans la grille d'entretien.

Vingt-cinq femmes et treize hommes âgés de dix-neuf à soixante-dix-huit ans ont été interviewés. La moyenne d'âge est de 44 ans. La répartition par classe d'âges est la suivante : 3 hommes et 3 femmes ont moins de 25 ans, 8 hommes et 7 femmes sont âgés de 25 à 45 ans, 2 hommes et 7 femmes de 45 à 60 ans et 8 femmes sont âgées de plus de 60 ans. Les « actifs » constituent près de la moitié de l'échantillon, ce qui est proche du pourcentage qui est généralement visé dans les échantillons constitués par quotas.

Le logement et le quartier

Tous les entretiens ont débuté par une description générale du cadre de vie, les avantages et inconvénients du quartier, les critères de choix du lieu de résidence. Les nuisances sonores ne sont pas annoncées comme étant le thème de l'entretien. Une introduction de l'entretien par une description du cadre de vie permet d'observer si le tramway est décrit spontanément comme un élément du quartier, et s'il apparaît comme un avantage ou un inconvénient.

Le premier avantage du quartier de résidence pour 15 personnes est le fait d'avoir des commerces ainsi qu'une station de tramway à proximité. Viennent ensuite, pour 10 personnes, la proximité du centre ville ou le fait de résider en centre-ville et 5 personnes mettent en avant le calme de leur quartier.

Toutes les personnes interrogées citent des avantages à leur quartier. 17 ne lui trouvent aucun inconvénient et sont donc globalement satisfaites de leur cadre de vie. En revanche, 12 personnes, soit près d'une sur trois, incriminent spontanément le bruit en général « *rue bruyante* » et certaines plus particulièrement celui de la circulation automobile ou du tramway lorsqu'elles parlent de leur quartier de manière générale. Par ailleurs, des problèmes de « *mauvaise ambiance* » ou « *mauvaise fréquentation* » dans le quartier sont évoqués par quelques personnes.

12 personnes occupaient leur logement avant la mise en place de la ligne de tramway. Elles ont donc été interrogées sur les changements occasionnés dans leur quartier par l'implantation de la ligne de tramway en faisant abstraction de la période de travaux :

- Pour 4 personnes, le bilan avant/après est relativisé par le fait d'être usager du tramway. Les avantages vécus en tant qu'usager modèrent les inconvénients ressentis en tant que riverain : « *ça dessert bien le quartier, mais bon le seul inconvénient c'est le bruit* ».
- 2 personnes n'ont rien à dire sur les situations avant /après le tramway ;
- 4 personnes n'évoquent que des aspects positifs à l'installation du tramway dans leur rue. Il peut s'agir :
 - d'une impression générale : « *depuis qu'ils ont fait le tramway je trouve que l'on est plus tranquille* »,
 - d'une approbation de l'intégration de la ligne de tramway dans la rue d'un point de vue esthétique « *le gazon a embelli la rue* », ou de la redistribution de l'espace entre les différents modes « *il y a moins de circulation* » et de ses répercussions sur l'environnement « *il y a moins de pollution* » ;
- 2 personnes ne soulignent que les aspects négatifs « *ça a amené du bruit* », « *j'ai l'impression que la circulation est plus dense* ».

Description du bruit du tramway

Il est très difficile de faire décrire un bruit. La description du bruit du tramway, tel qu'il est perçu au domicile, se limite très souvent à celle du contact roues/rails : « *le bruit du tramway sur les rails* », « *un bruit de fer contre fer* », « *comme un bruit de ferraille* ».

Il était donc demandé aux personnes interviewées d'imaginer comment elles présenteraient le bruit perçu au passage du tramway à quelqu'un qui ne l'aurait jamais entendu. Les interviewés ont alors utilisé différents types de mots ou d'expressions pour essayer de décrire plus précisément le bruit du tramway :

Des qualificatifs :

- « *roulement* » 6 citations ;
- « *des vibrations* » 5 citations ;
- « *sifflement* » 3 citations ;

- « *grincement* » 3 citations ;
- « *grondement* », « *crissement* », « *vrombissement* » sont également des termes utilisés de manière plus contextuelle. Ils sont liés à des configurations de sites en virage et en pente.

Des adjectifs :

- « *sourd* » 9 citations ;
- « *grave* » 5 citations et à l'inverse « *aigu* » 3 citations ;
- « *court* » 3 citations ;
- « *fort* » 2 citations et « *faible* » 4 citations.

La comparaison avec d'autres sources de bruit a également été utilisée par les personnes interrogées pour rendre compte du type de bruit et de son intensité :

- « c'est pas plus bruyant qu'une voiture qui passe dans la rue » ;
- « un passage de train » ;
- « comme un avion qui passe rapidement, un gros bruit » ;
- « un camion qui passe » ;
- « ça fait le bruit d'une tondeuse » ;
- « on croyait que c'était un orage, le tram qui arrive ».

À travers ces comparaisons, apparaissent des différences importantes de perception de l'intensité du bruit du tramway. Les mesures acoustiques effectuées sur les sites d'enquêtes permettront d'objectiver des écarts de niveaux de bruit.

Peu de personnes sont capables de donner une origine précise au bruit émis par le tramway. Celles qui le font sont en général riveraines d'une station de tramway, et citent des opérations propres à l'arrêt plutôt que des sources de bruit :

- « j'entend les portes s'ouvrir et se fermer » ;
- « on entend quand il sonne au départ et à l'arrivée » ;
- « le claquement du marche pied sur le trottoir » ;
- « la tension qui passe dans les batteries ».

Le bruit n'est pas toujours perçu de la même façon, et les causes de variations peuvent être dues :

- **au sens de circulation du tramway** : 10 riverains le reconnaissent au bruit qu'ils entendent « *au son avant de le voir, j'arrive à dire s'il monte ou s'il descend* » ;
- **aux jours de la semaine** : 5 personnes parlent du nombre de passages moins important le week-end « *samedi et dimanche il y en a moins* » ;
- **aux moments de la journée** : 4 personnes l'entendent plus la nuit « *quand tout est calme* », 4 personnes font référence au matin et à la soirée soit « *parce que la fréquence du tramway est importante* », soit parce que « *tout est calme* » à l'intérieur du logement ;

- **au type de tramway** : 5 personnes pensent que les tramways « *nouvelle génération* » sont moins bruyants que les « *anciens* », et 3 personnes au contraire pensent que les tramways « *nouvelle génération* » sont plus bruyants. Les autres personnes n'ont pas parlé de cette cause de variation de perception du bruit ;
- **aux conditions météorologiques** : 2 personnes entendent moins de bruit lorsqu'il pleut et deux autres évoquent les « *crépitements des petites étincelles quand il pleut* » ;
- **aux croisements de 2 rames** : une personne évoque le bruit plus important lorsque deux tramways se croisent.

Le questionnaire intègre dans les items l'ensemble de ces éléments que ce soit les différents moments de la journée, les conditions d'exploitations du tramway et météorologiques.

La gêne due au bruit du tramway

28 personnes sur les 33 interviewées ont attribué une note entre 1 et 10 à la gêne due au bruit du tramway. La note minimum attribuée est de 1 et la note maximum est égale à 9, la moyenne étant de 4,30. 17 notes sont inférieures à 5, et 11 notes sont supérieures ou égales à 5. La médiane de la distribution des notes est égale à 4.

L'évocation des activités perturbées par le bruit du tramway se fait toujours lorsque les fenêtres sont ouvertes ou lorsque les individus sont dans leur jardin :

- 6 personnes disent ne pas pouvoir suivre une conversation téléphonique « *dès que c'est ouvert, le tram c'est une catastrophe quand on est au téléphone* » ;
- 7 personnes ne peuvent pas entendre la télévision et sont donc contraintes de « *mettre la télé un peu plus fort* » ou de « *fermer la fenêtre* » ;
- 5 personnes, lorsqu'elles sont dans leur jardin, ont leurs conversations perturbées lors du passage du tramway : « *si le tramway passe on arrête de parler* » ;
- 4 personnes « *ferme la fenêtre tout le temps* », ne peuvent « *pas ouvrir les fenêtres l'été* », ne peuvent « *pas dormir la fenêtre ouverte* » à cause du bruit du tramway ;

22 personnes se disent habituées au bruit du tramway ; « *quand je suis arrivée ça me dérangeait, après on s'habitue* », « *je n'y fais plus attention maintenant, c'est dans l'environnement* », « *on s'habitue comme on peut rien faire de toute façon* ».

Pour expliquer ce processus d'habituation, l'importance du bruit ou le temps d'occupation du logement ne sont pas les seuls arguments cités :

- 10 individus expliquent leur habituation au bruit du tramway par l'usage qu'ils ont du tramway et ses avantages en tant qu'usager : « *le tram est indispensable parce qu'on s'en sert, donc on accepte la gêne* », « *ça fait un*

peu de bruit mais ça m'emmène où je veux, donc je ne peux pas me focaliser que sur le bruit » ;

- 2 personnes évoquent le bruit incontournable en milieu urbain « *dès lors que l'on habite en ville* » ;
- 2 personnes relativisent le bruit du tramway par la diminution d'une autre nuisance « *il y a moins de pollution* ».

Le tramway engendre cependant d'autres nuisances que le bruit :

- 5 personnes évoquent le « vis-à-vis » avec la ligne de tramway « *les voyageurs regardent* », « *tout le monde voit ce qu'il y a dans le jardin et dans la maison* » ;
- 4 personnes ressentent des vibrations par le sol : « *des vibrations énormes dans la maison, je les ressens physiquement* » ;
- les problèmes d'insécurité, et en particulier de cambriolage, sont cités deux fois « *ils viennent par la ligne de tramway* ».

Les revendications concernant des améliorations par rapport aux nuisances liées à la proximité de la ligne de tramway sont rares. 3 personnes revendiquent « *une réduction du bruit* » de manière générale et une du bruit de « *crissement dans le virage* » plus particulièrement.

Autres bruits perçus au domicile des riverains

D'autres sources de bruits extérieures au logement sont entendues. Il s'agit principalement du bruit de la circulation automobile pour 26 personnes et plus précisément du bruit des deux roues pour 3 personnes. 3 autres personnes citent les bruits de voisinage et deux autres des bruits d'avions.

Comme pour le bruit du tramway, une partie des interviewés a donné une note comprise entre 1 et 10 à la gêne due aux autres bruits. Les notes concernant la gêne due aux bruits de la circulation routière varient entre 1 et 8, la moyenne est de 4,7 et la médiane de la distribution est 5. 11 notes sont inférieures à 5 et 15 notes sont supérieures ou égales à 5.

Pour 7 personnes le bruit du tramway est toujours dominant par rapport aux autres sources de bruit ; pour 11 personnes au contraire les bruits de la circulation sont toujours prépondérants « *le bruit du tramway est couvert par le bruit de la circulation* ». Enfin, d'autres sont plus précis et expliquent que la dominance de l'une ou l'autre source de bruit varie en fonction des moments de la journée et notamment des fluctuations du trafic automobile « *on l'entend plus le matin et en soirée quand la circulation est moins importante* ».

Conclusion des entretiens exploratoires

« *Il faudrait mettre la ligne de tramway un peu plus loin, d'accord pas trop loin, mais pas juste ici* », cette citation reflète bien l'impression générale à l'issue de l'analyse de ces entretiens et l'ambiguïté entre le fait d'être à la fois usager et riverain. En effet, elle est une expression du syndrome NIMS « Not In My Street » interprétation localisée du NIMBY « Not In My Back Yard ». L'acronyme NIMBY

traduit en français par PDMC (pas dans ma cour), reflète l'opposition d'une population locale vis-à-vis d'une installation lorsque celle-ci est susceptible d'entraîner des nuisances réelles ou supposées [55]. Mais en même temps l'opinion est nuancée par le fait d'utiliser le tramway pour ses déplacements. En effet, seules 3 personnes n'utilisent jamais ou rarement le tramway, toutes les autres sont aussi usagers du tramway : 10 personnes utilisent le tramway tous les jours, 13 : une fois pas semaine, 12 : 1 à 2 fois par mois. Ils relativisent donc l'expression de la gêne due au bruit du tramway par le service qu'il leur rend en tant qu'usager.

L'usage du tramway n'est cependant pas la seule variable non acoustique qui est envisagée pour tenter d'expliquer la variabilité de la gêne exprimée. Le questionnaire comprendra également des questions qui permettent de cerner l'image du tramway. Les entretiens ont par exemple montré que pour les personnes interrogées qui occupaient leur logement avant l'installation de la ligne de tramway, les avis sont partagés sur les améliorations apportées au quartier. Alors que pour certaines personnes ayant emménagé après la mise en place du tramway, ce dernier avait constitué un critère de choix du logement.

Pour les 11 personnes qui ont donné une note de gêne due au bruit du tramway supérieure ou égale à 5, les temps d'occupation du logement sont très variables. Ce ne sont donc pas seulement des individus qui sont riverains de la ligne de tramway depuis peu de temps, 3 personnes habitaient dans leur logement avant la mise en circulation du tramway dans leur rue. Enfin on retiendra que la moitié de ces 11 personnes se dit habituée au bruit du tramway.

La description du bruit du tramway, tel qu'il est perçu au domicile s'est faite à l'aide d'adjectifs, ce qui permet d'envisager l'utilisation de différenciateurs sémantiques dans le questionnaire. Des qualificatifs pourront sans doute ensuite être mis en relation avec des types de sites par exemple : « crissement » avec les sites en virage et « grincement » pour le freinage à proximité des stations.

Ces entretiens ont également permis de confirmer que les situations de bruits urbains sont complexifiées par l'existence de différentes sources de bruit. Le tramway est rarement la seule source de bruit ; elle est le plus souvent associée au trafic routier qui présente des caractéristiques différentes en fonction des sites mais aussi en fonction des moments de la journée. Il est donc apparu important d'interroger les personnes enquêtées sur les autres bruits entendus au domicile et sur la gêne qu'ils engendrent.

Les sites d'enquête ont été choisis avec le souci de couvrir les différents types de situations. Une difficulté est donc apparue lors du croisement avec les données d'exposition au bruit sur les sites avec des situations de masquage important du bruit du tramway par le bruit de la circulation routière. La pertinence d'indices traduisant des émergences a donc été explorée.

2.1.3. Présentation du questionnaire

L'objectif de cette recherche est de pouvoir mettre en relation des données subjectives issues des réponses au questionnaire à des données objectives que sont les données d'exposition au bruit afin d'expliquer la variabilité de la gêne et si

possible d'établir des relations dose-réponse. Il s'agit de déterminer une relation entre des niveaux de gêne exprimée par les riverains et des indices acoustiques. Dans cette perspective, le questionnaire offre la possibilité d'interroger un échantillon important d'individus et de recueillir des données directement intégrables, puisque pré-codées, dans une base de données pour pouvoir effectuer des analyses statistiques.

Il a été élaboré en s'appuyant à partir de l'analyse de contenu des entretiens. Il se compose de 60 questions fermées à choix multiples ou proposant des échelles qualitatives et quantitatives. Pour évaluer la gêne, la question standardisée et recommandée par la communauté scientifique internationale [56], ainsi que par l'ISO [57] a été utilisée.

La description du bruit du tramway s'est faite à l'aide de la méthode des différentiateurs sémantiques, adaptée dans l'esprit d'Osgood [58]. Elle est appropriée pour aider les riverains à caractériser le bruit tel qu'ils le perçoivent à leur domicile et dans ses espaces extérieurs lorsqu'ils existent. Le questionnaire comprend donc une série de paires d'adjectifs antonymes placés de part et d'autre d'une échelle en 7 points. La personne interrogée doit formuler son opinion en choisissant une des cases qui séparent les deux adjectifs. La proximité de l'un des deux adjectifs signifie qu'il caractérise mieux que son antonyme l'opinion de la personne.

Les enquêtés ont évalués globalement, à différents moments du questionnaire, la gêne due : au bruit des tramways, à la circulation routière et au bruit en général. Ils ont exprimé leur jugement sur une échelle quantitative en donnant une note entre 0 et 10 mais aussi sur une échelle qualitative en 5 points. Les items de ces deux évaluations sont standardisés et présents dans de nombreuses enquêtes européennes abordant la gêne due au bruit des transports. Ces deux types d'évaluation ont mis en relation avec les données d'exposition au bruit, pour tenter d'établir des relations dose-réponse. L'objectif était également d'analyser l'expression de la gêne ressentie dans le cadre d'un environnement sonore complexe, composé de plusieurs sources.

Le questionnaire²¹ est divisé en cinq grandes parties :

- **le logement et le quartier** : cette partie concerne la description fine du type d'habitation, du type de logement, de l'exposition des différentes pièces du logement, de l'isolation des pièces, mais aussi le degré de satisfaction vis-à-vis du logement et du cadre de vie et les critères de choix du lieu d'habitation ;
- **la place du tramway dans le quartier** : il s'agit de l'opinion par rapport à la présence du tramway, des changements apportés par la mise en place du tramway pour les personnes résidant dans le logement avant sa mise en circulation ;
- **le bruit du tramway** : porte sur la perception et la description du bruit du tramway au passage à l'extérieur du logement et à l'intérieur fenêtres ouvertes et fermées, les effets comportementaux du bruit du tramway, la gêne

²¹ cf. annexe 5 : questionnaire

due à la circulation des tramways en fonction des différentes périodes de la journée, de la semaine, de l'année ;

- **les autres sources de bruit** : recense les différents types de bruits entendus et la gêne occasionnée, ainsi que la gêne due au bruit de la circulation routière ;
- **la description de la personne enquêtée et du ménage** : les variables âge, sexe, catégorie socioprofessionnelle, situation familiale, présence au domicile, usage du tramway, sont renseignées.

2.2. Le choix des sites d'enquête

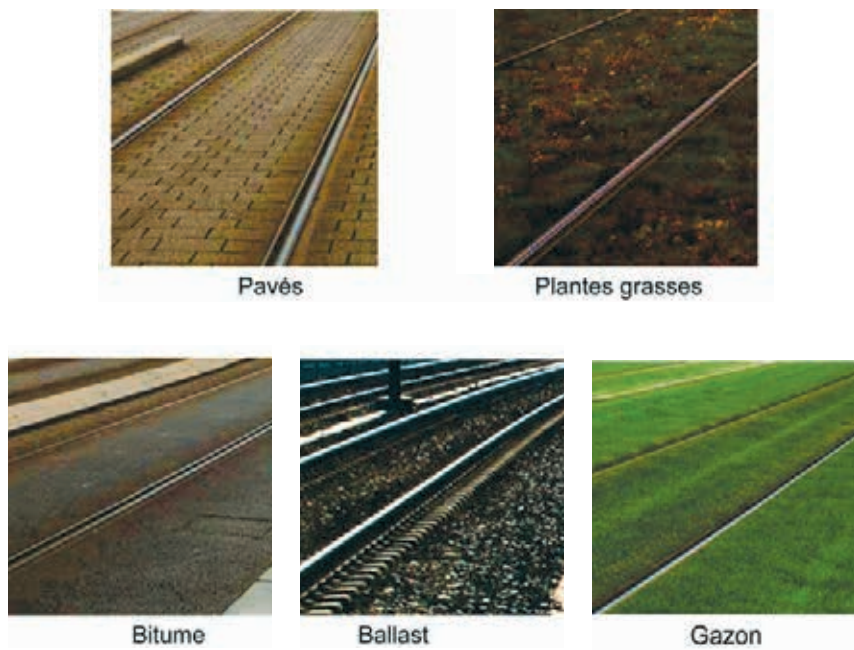
Les 3 lignes de tramway existantes à Nantes ont été parcourues d'un bout à l'autre afin de répertorier les différentes situations d'exploitation du tramway. L'objectif était de déterminer à la fois les sites où se déroulerait l'enquête par questionnaire suivie de la campagne de mesures acoustiques, mais aussi ceux où ont eu lieu les entretiens exploratoires.

2.2.1. Les critères de choix

Lors du repérage des sites ont été inventoriés les différents critères à prendre en compte pour le choix final des lieux d'enquêtes :

Les types de revêtement (Figure 94) : pavés, « plantes grasses », bitume, ballast, gazon.

Figure 94 : les différents revêtements



Les différentes configurations d'exploitation du tramway (Figure 95) : ligne droite, virage, pente, remblai.

Figure 95 : les différentes configurations d'exploitation



Ligne droite



Virage



Pente



Remblai

Le type de rue : en U, en L... (Figure 96)

Figure 96 : exemples de type de rue



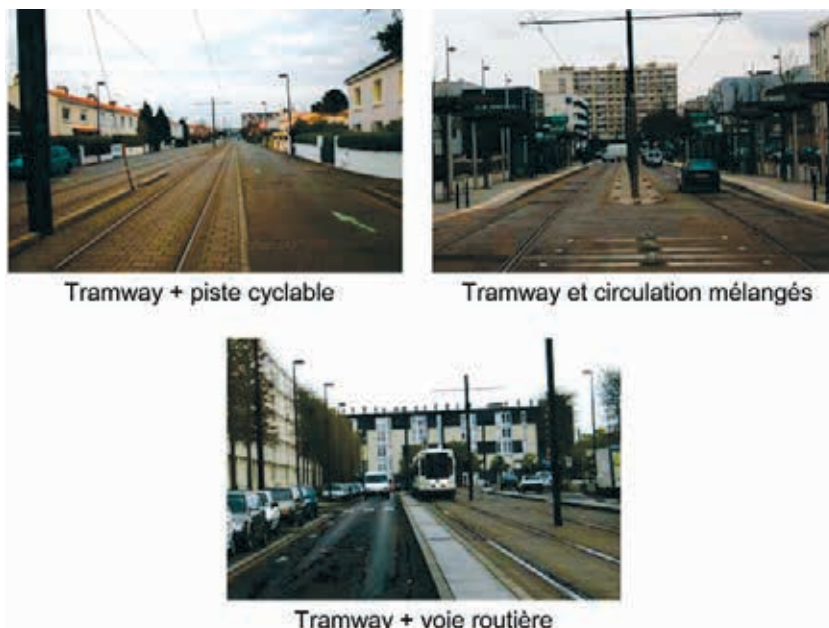
Rue en U



Rue en L

L'intégration du tramway dans la rue (Figure 97) : il peut circuler dans des rues où il n'y a pas de circulation automobile sauf l'accès des riverains à leur domicile. Il peut également être intégré dans la circulation ou au contraire rouler sur une voie réservée.

Figure 97 : différents types d'intégration du tramway dans la rue



Les deux types de rames de tramway²² présentes sur les lignes : les rames « Alstom » sont appelées « ancienne génération » parce qu'elles datent de la réimplantation du tramway à Nantes en 1985 et les rames « Bombardier » appelées « nouvelle génération » ont été introduites en 2000 à l'occasion du prolongement de la ligne 1

Sur la ligne 1 circulent les deux types de rames. Les rames « ancienne génération », sont majoritairement présentes sur la ligne 2, et inversement les rames « nouvelle génération » sont majoritairement présentes sur la ligne 3.

2.2.2. Les contraintes

Par ailleurs, plusieurs contraintes techniques devaient être considérées lors du choix des sites d'enquêtes :

- la présence de bâtiments parallèles à la voie de tramway et une certaine homogénéité de configuration de la rue pour faciliter dans la suite de l'étude la modélisation des niveaux d'exposition au bruit ;
- une densité de population suffisante pour la réalisation de l'enquête. L'objectif était d'interroger un total de 300 à 500 riverains.

Au final, 12 sites²³ ont été retenus pour l'enquête par questionnaire (Figure 98 et Tableau 8). 5 sites se trouvent sur la ligne de tramway n° 1, 3 sur la ligne n° 2, et 4 sur la ligne n° 3.

²² cf. annexe 2

²³ cf. annexe 4 : fiches descriptives des sites

Figure 98 : répartition géographique des douze sites d'enquête



Tableau 8 : caractéristiques des sites d'enquêtes

N° de site	Ligne	Situation	Configuration	Type de revêtement	Type d'habitat	Distance (bât-voies)
1	1	Station Pin Sec	Léger remblai	Ballast	Immeubles	25 et 40 m
2	1	Cours F. Roosevelt	Ligne droite	Goudron	Immeubles	25 m
3	1	Quai de la Fosse	Ligne droite	Pavés	Immeubles	25 m
4	1	Rue Romain Rolland	Ligne droite	Pavés	Immeubles	11 et 20 m
5	1	Station Romain Rolland	Légère pente	Pavés	Immeubles	22 et 34 m
6	2	Avenue d'Anjou	Ligne droite	Pavés	Pavillons	13 m
7	2	Quai de Versailles	Grande courbe	Pavés	Maisons + immeubles	- de 10 m
8	2	Bd Amiral Courbet	Pente forte	Pavés	Maisons + immeubles	- de 10 m
9	3	Avant station Bignon	Virage	Gazon	Immeubles	30 m
10	3	Ave de la Ferrière	Ligne droite	Petites fleurs	Immeubles	20 à 40 m
11	3	Bd Jean XXIII / route de Vannes	Ligne droite	Goudron	Maisons + immeubles	- de 10 m
12	3	Rue du Poitou	Légère pente	Pavés	Immeubles	- de 10 m

2.3. Construction de l'échantillon

La structure par âge, sexe et type d'activité de la population a été établie à partir de la liste des villes françaises qui possèdent des lignes de tramway ou qui ont en projet d'en construire une très prochainement d'une part, et des données du recensement de 1999 disponibles sur le site Internet de l'Insee d'autre part. La comparaison de la moyenne des données sur toutes ces villes avec la composition de la population nantaise n'a pas montré de différence notable. Il a donc été décidé d'établir l'échantillon à partir de la structure démographique de la ville de Nantes.

Le potentiel des différents sites étant relativement faible, la construction de tableaux simplifiés, avec un minimum de critères à respecter, a été adoptée. Appliquer les tableaux de structure d'origine aurait conduit à rendre les quotas difficilement applicables. De plus, par crainte de distorsions trop grandes entre certaines classes, il a été jugé préférable d'éviter d'analyser les données à partir d'un fichier redressé. Trois critères ont donc été retenus :

- le sexe : homme/femme ;
- l'âge en 4 tranches : 18-25 ans, 26-45 ans, 46-60 ans, 61 ans et plus ;
- l'activité définie en 3 catégories : avec emploi, sans emploi, étudiant.

2.4. Le déroulement de l'enquête

La passation du questionnaire a fait l'objet d'un marché passé selon la procédure adaptée du code des marchés publics. En d'autres termes, les modalités de publicité et de mise en concurrence ont été respectées.

Le cahier des charges spécifiait les conditions de passation du questionnaire :

- les questionnaires ont été remplis en face à face au domicile des personnes enquêtées, par l'enquêteur lui-même qui a posé chacune des questions ;
- le nombre de personnes à interroger est dépendant du potentiel propre à chaque site, mais le total de 300 à 500 questionnaires devait être atteint. Une seule personne par foyer pouvait être interrogée. Elle devait résider de manière permanente dans le logement ;
- la date d'emménagement dans le logement était un critère à prendre en compte en plus des critères d'échantillonnage (sexe, âge et activité). Il était donc important de ne retenir que les riverains installés dans leur logement depuis au moins 6 mois ;
- le logement de chaque personne à enquêter comprenait obligatoirement au moins une pièce à vivre (salon/séjour ou chambre) dont une fenêtre donnait directement sur la voie où passe le tramway.

La passation du questionnaire s'est déroulée du 20 septembre au 15 octobre 2005. 12 enquêteurs, soit 1 par site, ont été mobilisés. Il a fait l'objet d'une présentation à Nantes à l'ensemble des enquêteurs prévus sur cette étude, lors d'une séance de briefing. L'objectif était de cibler les points sensibles, de lister les instructions aux enquêteurs et de répondre à leurs interrogations.

Pour s'assurer d'interroger un maximum de personnes, les enquêteurs devaient effectuer jusqu'à trois passages par adresse, à des heures différentes de la journée mais aussi différents jours de la semaine (y compris le samedi). Deux niveaux de contrôle ont été mis en œuvre au cours de l'enquête : un contrôle terrain auprès des enquêteurs, puis un contrôle téléphonique auprès d'une personne interrogée sur 3.

Globalement l'enquête s'est bien déroulée. Les quotas par site, trop restrictifs, n'ont finalement pas pu être respectés. En effet, les enquêteurs ont pu être confrontés par endroit à des populations très homogènes notamment du point de vue du critère « âge ». Plutôt que de réduire le nombre de personnes interrogées, il a été décidé de respecter les quotas sur l'échantillon global et de renoncer aux quotas par site. Au final, 370 personnes ont été interrogées.

2.5. Les mesures d'exposition au bruit et le calcul des indices acoustiques

Un ensemble d'indices d'exposition au bruit devait être affecté à chaque personne interrogée. Une procédure mixte mesure-calcul a donc été utilisée, car il n'était pas possible d'envisager des mesures de longue durée (24 heures) à tous les points (problème de coût, mais aussi de refus de riverains interrogés).

Dans un premier temps, 2 à 3 mesures²⁴ de longue durée par site ont été réalisées. Elles ont été effectuées en façade de logement de riverains enquêtés à l'aide de sonomètres de classe 1, placés à 2 mètres à l'extérieur des façades selon les normes NF-S-31-010 (Caractérisation et mesurage des bruits de l'environnement) et 31-088 (Mesurage du bruit dû au trafic ferroviaire). La grandeur enregistrée par les sonomètres était le niveau de bruit équivalent pondéré « A » sur une seconde ($L_{Aeq, 1s}$). En parallèle de ces mesures, un comptage de véhicules a été réalisé, avec différenciation des véhicules légers, des poids lourds et des tramways, au droit de chaque point de mesure, pendant une heure environ.

Dans un second temps, chaque site a été modélisé grâce au logiciel de simulation SoundPlan®. Après introduction des différentes sources sonores (circulation routière et tramway), le recalage du modèle a été réalisé aux points de mesure, pendant la période de comptage. Le modèle a alors été utilisé pour estimer certaines grandeurs acoustiques aux autres points pour chacun des sites retenus, et il a donc permis d'établir la base de données acoustiques.

2.5.1. Le choix des indicateurs

Deux types d'indicateurs acoustiques ont été distingués dans l'étude : les indicateurs « instantanés » et les indicateurs « de long terme ».

Les indicateurs instantanés

- **niveau de bruit maximum** $L_{Amax,1s}$: c'est la valeur la plus importante du $L_{Aeq,1s}$ mesurée au cours du passage ;

²⁴ cf. annexe 6 : exemple de fiche de mesurage

- **temps de passage T** : il est obtenu à partir du $L_{Amax,1s}$, en définissant un niveau de « coupure » à $L_{Amax,1s} - 10$ dB(A) ;
- **niveau de bruit équivalent « au passage » $L_{Aeq,T}$** : il représente la quantité d'énergie mesurée pendant le temps de passage T du tramway ;
- **SEL « au passage »** : il représente le niveau moyen pendant le temps de passage T ramenée à une seconde ;
- **émergence « au passage » ϵ** : elle caractérise la différence entre la situation lors du passage de la rame et la situation existante avant ou après. Plusieurs définitions peuvent être utilisées, la plus naturelle étant la différence entre le niveau maximum « au passage » et le niveau de bruit résiduel hors passage tramways ($\epsilon = L_{Amax,1s} - \text{niveau sonore résiduel}$).

Les indicateurs de long terme

De façon similaire à ce qui est pratiqué pour les infrastructures de transport routier, ces indicateurs sont principalement des niveaux de bruit équivalents pondérés « A » (L_{Aeq}), calculés pour différentes périodes de la journée (matin, jour, soirée, nuit) et sur 24 heures (y compris LDEN). Cependant, un autre indicateur pouvant être utilisé est le nombre d'événements dépassant une certaine valeur, sur une certaine période.

2.5.2. Le calcul des indicateurs des points avec mesures

Pour les points ayant bénéficié d'une mesure en façade, la grandeur enregistrée était le niveau de bruit équivalent sur une seconde ($L_{Aeq,1s}$). La principale difficulté a été de distinguer la partie liée à l'infrastructure tramway et celle liée aux autres sources de bruit (notamment l'infrastructure routière) ; cette difficulté était d'autant plus importante dans les situations où le bruit du tramway était faible par rapport au bruit routier, ce qui était le cas, notamment, des grandes artères très fréquentées, comme le quai de la Fosse (site n° 3) pendant la journée par exemple.

Néanmoins, pour tous les points de mesure, environ 10 passages « type » ont été sélectionnés parmi les plus « propres ». Dans le cas des sites bruyants, les passages de nuit ont été privilégiés. À partir des passages sélectionnés, les paramètres suivants ont été déterminés : $L_{Amax,1s}$, $L_{Amax,5s}$, $L_{Aeq,T}$ et SEL moyens « au passage ».

Ensuite, en utilisant le nombre n de passages de rames par période, on en a déduit le niveau de bruit équivalent dû au tramway pour chacune de ces périodes (l'hypothèse d'une répartition égale sur chaque voie a été considérée pour toutes les périodes de la journée).

$$L_{Aeq,6h00-22h00} - L_{Aeq,T} - 10 \cdot \log \frac{n \cdot T}{16 \times 3600}$$

Pour en déduire le niveau de bruit équivalent dû à la route ($L_{Aeq\ route,6h-22h}$, par exemple), on a procédé par différence²⁵ :

$$L_{Aeq\ route,6h-22h} = L_{Aeq\ total,6h-22h} - L_{Aeq\ tram,6h-22h}$$

Le calcul du nombre d'événements de type « passages de rames », dépassant une certaine valeur, a été effectué, quant à lui, en utilisant le niveau de bruit maximum 5 secondes « au passage » ($L_{Amax,5s}$) et le nombre de passages de rames par période. Le résultat obtenu ne concerne que les événements de type « passages de rames » et ne tient donc pas compte d'autres bruits éventuels (passages de 2 roues, d'avions...).

Enfin, l'émergence a été déterminée en comparant le niveau de bruit maximum 5 secondes « au passage » ($L_{Amax,5s}$), et le niveau de bruit route, sur la même période :

$$\text{Émergence } 6h-22h = L_{Amax,5s} - L_{Aeq\ route,6h-22h}$$

2.5.3. Le calcul des indicateurs des points avec simulation

Chaque site a été modélisé grâce au logiciel de simulation SoundPlan®. Pour ce faire, des fonds de plan au format AUTOCAD ont été obtenus auprès des services de Nantes Métropole et de la SEMITAN. Après visite sur site, des hauteurs ont été attribuées à chaque bâtiment (ces informations n'étaient pas présentes sur les plans AUTOCAD).

La position des lignes de tramway dans ces sites a été partiellement communiquée sous forme numérique par la SEMITAN. Pour les parties non numérisées (plans papier), le travail de recollement a été réalisé directement dans le modèle SoundPlan®, en introduisant les données manuellement.

Pour ce qui concerne les infrastructures routières, des plans schématiques ont été réalisés au cours des mesures et des comptages, faisant apparaître notamment le nombre de voies, le sens de circulation, le type de trafic routier, la vitesse moyenne des véhicules ainsi que certaines particularités (présence de station, de feu tricolore...).

Pour déterminer la vitesse d'exploitation des tramways, une exploration détaillée des lignes a ensuite été conduite afin d'apprécier les écarts entre les consignes données au conducteur et la réalité. Pour ce faire, ces lignes ont été parcourues à bord d'une rame en exploitation. Les vitesses réelles ont ainsi été déterminées, tout comme certains points particuliers pouvant influencer sur les conditions d'exploitation (carrefours dangereux, zones piétonnes à fort trafic...).

²⁵ Il s'agit d'une différence énergétique

La position exacte des logements des riverains interrogés a été déterminée, quant à elle, à partir de leur adresse. De même, la hauteur des récepteurs a été évaluée sur site, en fonction de la nature des bâtis, en appliquant les hypothèses suivantes :

- hauteur d'un étage (bâti récent) : 2,8 m ;
- hauteur d'un étage (bâti ancien) : 3,2 m ;
- rez-de-chaussée surélevé : ajout 1,5 m ;
- hauteur d'un récepteur : 1,6 m.

Ainsi, par exemple, un récepteur situé dans un immeuble ancien avec rez-de-chaussée surélevé, au 3^e étage, a été affecté d'une hauteur par rapport au sol égale à $1,5 \text{ m} + (3 \times 3,2 \text{ m}) + 1,6 \text{ m} = 12,7 \text{ m}$.

Le modèle a été calé afin de faire coïncider au mieux, aux points où des mesurages ont été réalisés, les calculs et les mesures. Pour ce faire, une ligne source d'une longueur correspondant à la longueur d'une rame (environ 40 m) a été définie.

Le spectre de puissance de celle-ci a été déterminé en fonction de la vitesse de passage, en utilisant les données mesurées au cours de la campagne expérimentale sur l'émission acoustique²⁶, en fonction du type de rame. Lorsque la vitesse de passage était différente de l'une des vitesses mesurées, le spectre correspondant à la vitesse la plus proche a été choisi. Une démarche similaire a été conduite pour la directivité.

Enfin, pour ce qui concerne la puissance, elle a été déterminée par calcul, afin de minimiser l'écart (en niveau global) entre le calcul et la mesure (il s'agit donc bien d'un calage et non d'un recalage).

Ce travail étant réalisé, le modèle SoundPlan® a été utilisé afin de déterminer, pour tous les points enquêtés, le niveau de bruit maximum une seconde « au passage » ($L_{Amax,1s}$). Pour ce faire, une source linéique a été placée devant chaque point récepteur, sur la voie la plus proche (voie numérotée 1), et sur la voie la plus éloignée (voie numérotée 2). La puissance acoustique appliquée à chaque source a été déduite des puissances déterminées en phase de calage, par interpolation, en fonction des conditions réelles sur le terrain (ex : présence d'un feu générant un ralentissement...).

Le niveau $L_{Amax,1s}$ ayant été calculé, un logiciel spécifique, prenant en compte la typologie du site notamment et implémenté dans Excel, a alors permis d'en déduire le niveau de bruit maximum 5 secondes « au passage » ($L_{Amax,5s}$).

Le niveau de bruit et la dose « au passage », à partir desquels toutes les autres grandeurs sont déduites, ont été déterminés en introduisant la notion de point de référence. En fait, chaque point simulé (donc non mesuré) a été associé à un point dit de référence, pour lequel une mesure a été réalisée.

²⁶ cf. Étude acoustique, chapitre « Émission de bruit et sources acoustiques »

L'écart Δ_{ij} entre le niveau de bruit maximum une seconde « au passage » ($L_{Amax,1s}$), calculé au point « i » considéré, et le niveau de bruit mesuré au point « j » de référence, a été utilisé pour estimer la dose « au passage »²⁷ :

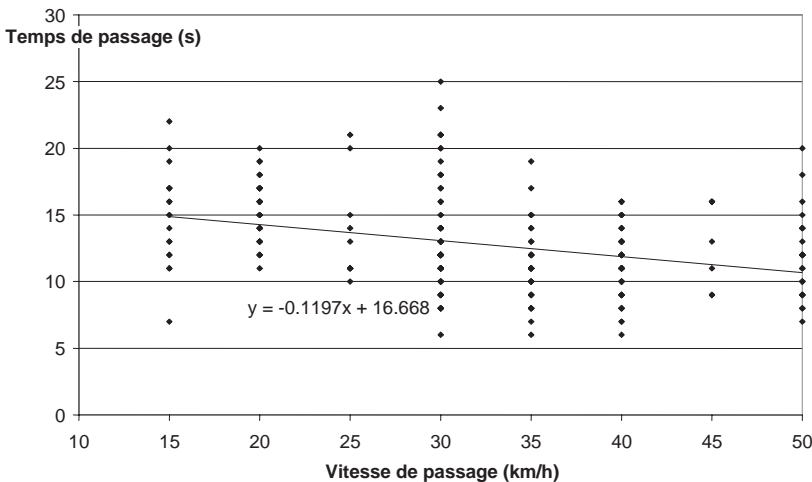
$$SEL(i) = SEL(j) + \Delta_{ij}$$

Le niveau de bruit « au passage », quant à lui, a été déduit de la dose « au passage » en introduisant le temps de passage T_i :

$$L_{Aeq,T}(i) = SEL(i) - 10.\log T_i$$

Le temps de passage étant essentiellement une fonction de la vitesse, une relation liant ces deux paramètres a donc été recherchée à partir des différentes mesures effectuées et des passages sélectionnés. Le résultat est montré à la Figure 99.

Figure 99 : relation vitesse de passage et temps de passage



Une loi de type « linéaire » a été choisie. Elle s'énonce ainsi :

$$T \text{ (en s)} = -0,1197 \text{ Vitesse (en km/h)} + 16,67$$

Concrètement, pour chaque site, la vitesse de passage du tramway a été déterminée en parcourant la ligne. Une interpolation a ensuite été effectuée pour en déduire la vitesse en tout point, en prenant en compte la présence des singularités (stations, feux tricolores, carrefours dangereux...).

²⁷ Cette approximation a été utilisée en raison de l'impossibilité de réaliser des mesures temporelles

Après détermination de la dose de bruit au point simulé i ($SEL(i)$), les valeurs de niveau de bruit équivalent dus au tramway, sur les différentes périodes considérées, ont été déduites. Par exemple sur la période 6 h-22 h :

$$\begin{aligned} L_{Aeq \text{ tram, 6h-22h}}(i) &= SEL(i) + 10.\log(Nb_{\text{trams, 6h-22h}} / (16 \times 3600)) \\ &= SEL(j) + \Delta_{ij} + 10.\log(Nb_{\text{trams, 6h-22h}} / (16 \times 3600)) \\ &= L_{Aeq \text{ tram,6h-22h}}(j) + \Delta_{ij} \end{aligned}$$

Pour ce qui concerne le calcul du nombre d'événements dépassant une certaine valeur, il a été effectué de la même façon que pour les points de mesure, en utilisant le niveau de bruit maximum 5 secondes « au passage » ($L_{Amax,5s}$) et le nombre de passages de rames par période. Les voies 1 et 2 ont été différenciées.

Enfin, l'émergence a également été déterminée en comparant le niveau de bruit maximum 5 secondes « au passage » ($L_{Amax,5s}$), et le niveau de bruit route, sur la même période.

3. Les résultats de l'enquête

Cette partie est consacrée à la présentation des résultats obtenus après une analyse statistique des données. Dans un premier temps, le tri à plat des réponses de l'ensemble des questionnaires a permis d'identifier les variables à prendre en compte dans l'analyse des données. Elle visait en effet à effectuer les croisements entre les données issues des réponses au questionnaire et les données d'exposition au bruit.

3.1. Apurement et constitution du fichier de données

Avant d'exploiter les données d'une enquête par questionnaire, des vérifications sont nécessaires pour valider la base de données.

Dans toute enquête en face à face papier, un certain degré de non-réponse est potentiellement inévitable (oubli, filtre non respecté, erreur de l'enquêteur...). On distingue deux catégories de non-réponse : la non-réponse totale (ou par unité), lorsque aucune information n'est recueillie sur une unité échantillonnée et la non-réponse partielle (ou par item), lorsque le manque d'information est limité à certaines variables. Dans cette enquête, les non réponses se limitent uniquement à quelques questions.

Pour évaluer la cohérence des réponses au questionnaire, différents croisements ont été effectués, notamment concernant le logement et la gêne.

Après vérification du fichier d'adresses, deux questionnaires ont été retirés de la base de données car aucune façade de leur logement ne donnait sur la voie de tramway (confrontation des réponses avec la réalité, situation de l'habitation).

Pour les questions propres au logement et au quartier, ont été contrôlées :

- la cohérence du nombre d'étages (ainsi que le n° d'étage) pour des personnes ayant la même adresse ;
- la correspondance entre le nombre de pièces déclarées et le nombre de pièces renseignées (description des pièces et type d'exposition) ;

- l'adéquation entre le nombre de façades et le nombre d'expositions différentes déclarées.

Concernant l'isolation du logement, nous avons vérifié que les pièces isolées étaient bien renseignées comme pièce du logement. Par exemple, un individu déclarant avoir isolé son bureau alors qu'il n'en possède pas est mis en non réponse. Toutes les non-correspondances ont fait l'objet de recodification.

Des données ont été retirées plus spécifiquement pour l'analyse des différenciateurs sémantiques :

- celles issues de 7 questionnaires dans lesquels le tramway est déclaré « jamais entendu », il a en effet été estimé qu'un bruit non entendu ne peut pas être décrit ;
- celles issues de 4 questionnaires dans lesquels les individus se sont positionnés systématiquement aux extrémités (en -3 ou +3) pour les situations « fenêtres fermées » et « fenêtres ouvertes ». Il est estimé que la consigne de modulation du jugement n'a pas été respectée. Ces individus ont sans doute juste fait un choix entre les deux adjectifs antinomiques.

En définitive, 5 questionnaires ont été retirés pour l'enquête qui compte donc au total 365 individus au lieu des 370 personnes interrogées initialement. Pour le traitement des réponses aux différenciateurs sémantiques, 354 personnes ont été conservées. Concernant les non correspondances, elles ont fait l'objet de recodification après vérification.

3.2. Description de l'échantillon enquêté

Le nombre de personnes interrogées n'est pas équivalent sur les 12 sites du fait de l'inégalité de leurs potentiels respectifs, estimés lors du repérage de site. Le site n° 2, Cours Roosevelt, présente le plus faible effectif avec 19 personnes interrogées et le site n° 8, boulevard Amiral Courbet le plus gros effectif avec 50 personnes interrogées. Le Tableau 9 détaille les effectifs par site.

Tableau 9 : nombre de personnes enquêtées par site

N° de site	Situation	Fréquence	Pourcentage
1	Station Pin sec (L1)	23	6
2	Cours Roosevelt (L1)	16	4
3	Quai de la Fosse (L1)	44	12
4	Rue Romain Rolland (L1)	37	10
5	Station Romain Rolland (L1)	36	10
6	Avenue d'Anjou (L2)	22	6
7	Quai de Versailles (L2)	36	10
8	Bld Amiral Courbet (L2)	50	14
9	Bignon (L3)	20	6
10	Avenue Ferrière (L3)	31	8
11	Jean XXIII- Vannes (L3)	30	8
12	Poitou (L3)	20	6
	Échantillon total	365	

3.2.1. Caractéristiques socio-démographiques

L'échantillon des personnes interrogées se compose de 197 femmes (54 %) et 168 hommes (46 %). Les quotas d'âge de sexe et de statut d'activité ont été globalement respectés sur l'ensemble de l'échantillon.

Le Tableau 10 présentent les effectifs et les pourcentages observés ainsi que les effectifs théoriques (en italique) tels que fixés par les quotas.

Tableau 10 : répartition de l'échantillon par tranche d'âge selon le statut d'activité

Hommes	Avec emploi Fréquence Pourcentage	Sans emploi Fréquence Pourcentage	Étudiant Fréquence Pourcentage	Total Fréquence Pourcentage
18-25 ans	9 5 % (6 %)	4 3 % (2 %)	8 5 % (11 %)	21 13 % (19 %)
26-45 ans	49 29 % (32 %)	10 6 % (6 %)		59 35 % (38 %)
46-60 ans	31 18 % (19 %)	12 7 % (4 %)		43 25 % (23 %)
61 ans et +	1 1 % (0 %)	44 26 % (19 %)		45 27 % (19 %)
Total	90 53 % (57 %)	70 42 % (32 %)	8 5 % (11 %)	168 100 %
Femmes	Avec emploi Fréquence Pourcentage	Sans emploi Fréquence Pourcentage	Étudiant Fréquence Pourcentage	Total Fréquence Pourcentage
18-25 ans	6 3 % (4 %)	6 3 % (2 %)	17 9 % (11 %)	29 15 % (17 %)
26-45 ans	43 22 % (26 %)	14 7 % (9 %)	2 1 % (0 %)	60 30 % (36 %)
46-60 ans	31 16 % (15 %)	20 10 % (8 %)		51 26 % (23 %)
61 ans et +	1 1 % (0 %)	57 28 % (25 %)		58 29 % (25 %)
Total	81 42 % (45 %)	97 48 % (43 %)	19 10 % (11 %)	197 100 %

L'âge moyen de l'échantillon est de 48 ans. La personne interrogée la plus jeune a 18 ans et la plus âgée 92 ans. Les femmes ont en moyenne 49 ans et les hommes ont en moyenne 48 ans.

Le Tableau 11 présente les professions exercées par les 171 personnes actives. On notera que 9 personnes déclarent avoir une profession en relation avec le tramway. 21 % des actifs travaillent en horaires décalés, et 12 % à leur domicile.

Tableau 11 : répartition selon la CSP recodée en 6 postes

Catégories socio-professionnelles	Fréquence	Pourcentage
Artisans, commerçants et chefs d'entreprises	11	6
Cadres et prof. intellectuelles supérieures	33	19
Professions intermédiaires	41	24
Employés	56	33
Ouvriers	30	18

Base : 171 individus exerçant une activité professionnelle (à temps complet/partiel)

3.2.2. Les caractéristiques de logement

86 % des personnes enquêtées habitent un appartement dans un immeuble et 14 % dans un pavillon ou une maison de ville.

L'ancienneté d'occupation du logement varie de quelques mois à plus de 20 ans. Le Tableau 12 présente la répartition de l'échantillon en fonction du nombre d'années d'occupation regroupé en classes.

Tableau 12 : répartition selon le nombre d'année d'occupation du logement

Nb d'année d'occupation	Fréquence	Pourcentage
1 à 2 ans	105	29
3 à 5 ans	73	20
6 à 10 ans	56	16
11 à 20 ans	51	14
Plus de 20 ans	75	21

Base : 365 individus

En ce qui concerne le statut d'occupation du logement : 42 % de l'échantillon est propriétaire de son logement ou en accession à la propriété et 57 % est locataire d'un logement social ou du secteur privé.

Le logement compte dans 77 % des cas deux façades. Le nombre de pièces varie de 1 à 10. En moyenne (Tableau 13), les personnes interrogées vivent dans un appartement comptant 4 à 5 pièces (60 % de l'échantillon).

Tableau 13 : nombre moyen de pièces

Libellé	Moy.	Nb	Min.	Max.	Écart type	I.C. à 95 %	I.C. à 95 %
Nb de pièces	4,42	365	1	10	1,38	4,27	4,56

En vue de l'analyse de données, les expositions des pièces ont été regroupées en 4 catégories (Tableau 14) :

- exposition directe sur la voie de tramway

- exposition routière « forte » comprend les items :
 - une rue ou route très circulée
 - une rue ou route moyennement circulée
- exposition routière « faible » comprend les items :
 - une rue ou route faiblement circulée
 - une voie de desserte (type voie de lotissement)
 - un parking
- « façade au calme » comprend les items :
 - un jardin privatif
 - un jardin ou espace public
 - une cour intérieure
 - autres

Tableau 14 : répartition en pourcentage des expositions en fonction du type de pièce

Type de pièce \ En %	Base	Directement sur la voie du tramway	Exposition routière « forte »	Exposition routière « faible »	« Façade calme »
La chambre principale	352	60	3	5	32
Cuisine	345	37	11	7	45
Salon + salle à manger	238	72	4	6	18
Salon seul	64	80	3	3	14
Salle à manger seule	83	53	4	8	35
Autre chambre n° 1	274	59	8	6	27
Autre chambre n° 2	155	37	13	15	35
Autre chambre n° 3	48	27	15	12	46

Les résultats indiquent que 68 % des logements sont totalement isolés par du double vitrage et seulement 16 % ne le sont pas du tout.

40 % des logements ont un espace extérieur privatif attenant, il s'agit d'un balcon, ou d'un jardin et parfois des deux.

3.3. Le bruit du tramway au passage

3.3.1. La perception du bruit du tramway au passage

Avant d'aborder la gêne due au bruit du tramway, les individus étaient interrogés simplement sur le fait d'entendre ou non le tramway, sans connotation de nuisances sonores ou de gêne (Tableau 15). 87 % des personnes interrogées déclarent entendre « souvent » (assez souvent + tout le temps) le bruit du tramway lorsqu'elles sont chez elles « fenêtres ouvertes » (52 % « fenêtres fermées »). 4 % déclarent ne « jamais » l'entendre « fenêtres ouvertes » (19 % « fenêtres

fermées »), même si leur logement remplit la condition d’avoir une façade qui donne directement sur la voie de tramway.

Tableau 15 : répartition selon la fréquence avec laquelle les individus entendent le tramway

Bruit du tram entendu...	Jamais	Occasion- nellement	S/T Rarement	Assez souvent	Tout le temps	S/T Souvent
... lorsque vous êtes à l’intérieur - fenêtres fermées	19 %	29 %	48 %	21 %	31 %	52 %
... lorsque vous êtes à l’intérieur – fenêtres ouvertes	4 %	9 %	13 %	13 %	74 %	87 %
... lorsque vous êtes à l’extérieur – sur votre balcon ou dans votre jardin. (Base : 140 ind.)	14 %	17 %	31 %	12 %	57 %	69 %

Base pour fenêtres fermées et ouvertes : 365 individus

Il était demandé aux personnes enquêtées de décrire le bruit du tramway tel que perçu au domicile lors de son passage. Pour cela, et sur la base de l’analyse des entretiens exploratoires préalables à la mise au point du questionnaire, il était proposé :

- une échelle de différenciateurs sémantiques sur laquelle les individus devaient se situer ;
- une liste dans laquelle les individus devaient choisir les deux termes décrivant le mieux leur perception du bruit.

3.3.1.1. Les différenciateurs sémantiques

Les différenciateurs sémantiques se composent de 8 paires d’adjectifs antinomiques situés de part et d’autre d’une échelle en 7 points. Les adjectifs proposés sont ceux qui ont été le plus fréquemment cités lors des entretiens exploratoires pour décrire le bruit du tramway. Dans le but d’établir des profils à partir des scores obtenus pour chaque paire d’adjectifs, des valeurs numériques (de -3 à +3) sont affectées aux réponses des personnes interrogées.

Avant le traitement statistique des différenciateurs sémantiques, 11 individus au total ont été retirés de la base (i.e. 4 personnes qui n’ont pas appliqué la consigne et se sont positionnées systématiquement aux bornes de l’échelle pour « fenêtres fermées » et « fenêtres ouvertes » ainsi que les 7 personnes qui déclarent ne jamais entendre le tramway « fenêtres ouvertes » et « fenêtres fermées »).

La cohérence des adjectifs retenus pour décrire le bruit du tramway a également été contrôlée ; pour cela le calcul du coefficient alpha de Cronbach a été

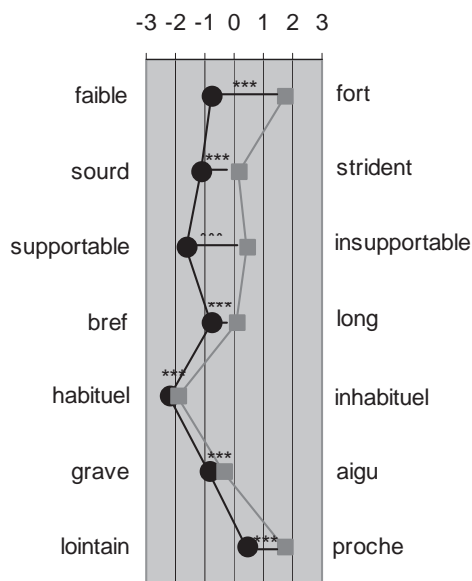
effectué. Ce dernier varie entre 0 et 1 et constitue un indice de « consistance » de l'échelle, c'est-à-dire du degré auquel l'ensemble des items qu'elle inclut mesure bien la même chose. Dans la pratique, on considère généralement que l'homogénéité de l'instrument d'évaluation est satisfaisante lorsque la valeur du coefficient est au moins égale à 0,70 [59].

Dans notre échantillon, en considérant tous les différenciateurs sémantiques, l'alpha de Cronbach est égal à $\alpha = 0,67$ « fenêtres fermées » et $\alpha = 0,70$ « fenêtres ouvertes ». La paire d'adjectifs « progressif/soudain » est la seule paire corrélée négativement avec d'autres items, elle est donc inconsistante avec l'instrument d'évaluation. En retirant « progressif/soudain », l'alpha de Cronbach passe à $\alpha = 0,72$ « fenêtres fermées » et $\alpha = 0,73$ « fenêtres ouvertes ». Cet alpha de Cronbach est considéré comme convenable car il est supérieur à 0,7. L'échelle révisée (en retirant la paire d'adjectifs « progressif/soudain ») a donc été utilisée dans la suite de l'analyse de données.

La Figure 100 présente les profils établis avec les positionnements pour les adjectifs antinomiques décrivant le bruit du tramway au passage tel qu'entendu au domicile dans les situations « fenêtres ouvertes » et « fenêtres fermées ».

**Figure 100 : profils des différenciateurs sémantiques
« fenêtres ouvertes/fenêtres fermées »**

■ «fenêtres ouvertes» ● «fenêtres fermées»



*** : test significatif à 1 %

Les moyennes des scores calculées pour toutes les paires d'adjectifs diffèrent significativement entre « fenêtres ouvertes » et « fenêtres fermées ». La qualification du bruit du tramway est la suivante :

- pour « bref/long », « habituel/inhabituel », « grave/aigu », « lointain/proche », elle se situe sur le même versant « fenêtres ouvertes » ou « fenêtres fermées », plus précisément du côté bref, habituel, grave et proche ;
- alors qu'elle est du côté fort, strident, insupportable et long « fenêtres ouvertes », et faible, sourd, supportable, et bref « fenêtres fermées ».

3.3.1.2. Attributs associés au bruit de tramway

Les personnes interrogées étaient également invitées à décrire le bruit du tramway tel qu'elles l'entendent chez elles en choisissant un ou deux mots parmi une liste de termes déterminée à partir des entretiens exploratoires. Le Tableau 16 présente les pourcentages obtenus en première citation et au cumul (cités en première ou en deuxième citation).

Le bruit de roulement est caractéristique du bruit du tramway au passage, et 76 % des personnes interrogées l'ont choisi pour décrire le bruit du tramway au passage. Souffle et sifflement sont trop peu cités pour faire l'objet d'une analyse particulière. En revanche, grincement-crissement et grondement sont des termes qui réunissent suffisamment de citations pour faire l'objet d'une analyse plus fine et d'une prise en compte dans les analyses statistiques multivariées.

Tableau 16 : pourcentage de citations des qualificatifs décrivant le bruit du tramway

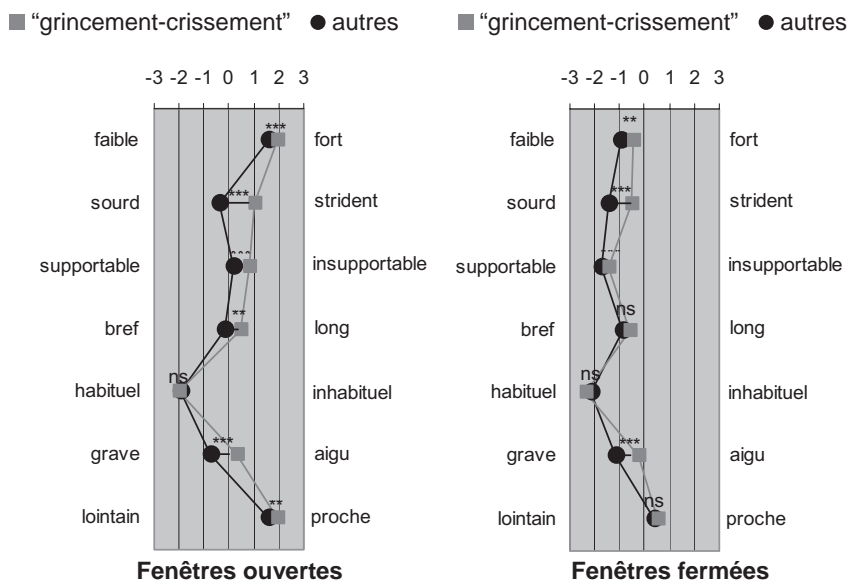
Termes descriptifs	En 1 ^{re} citation	Au cumul
Un roulement	59	76
Un grondement	13	39
Un grincement	9	21
Un crissement	8	22
Un souffle	6	7
Un sifflement	4	11
Ne sait pas	2	2

Base : 365 individus

Grincement et/ou crissement

On constate que 138 personnes interrogées ont cité grincement et/ou crissement en 1^{re} ou 2^e citation, soit 38 % de l'échantillon. Ce type de bruit est en règle générale associé à des situations de virage et/ou freinage notamment à l'approche des stations. Effectivement 85 % des personnes habitant dans le site en virage et plus de la moitié des personnes habitant dans l'un des deux sites « station » ont cité ce type de bruit.

Figure 101 : profils « grincements/crissement » vs autres qualificatifs



ns : test non significatif (proba > 0,05) ;
 ** : test significatif à 5 % (proba ≤ 0,05), *** test significatif à 1% (proba ≤ 0,01)

La comparaison des profils de scores des différenciateurs sémantiques du groupe qui a cité grincement et/ou crissement et de celui qui n'a pas mentionné grincement et/ou crissement (Figure 101) établit :

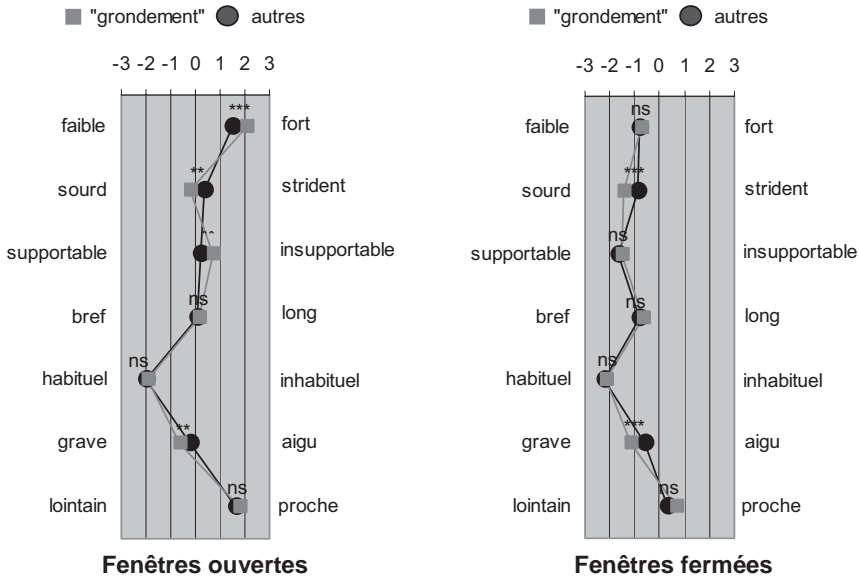
- que « fenêtres fermées », il existe des différences significatives entre les réponses des deux groupes sauf pour les paires d'adjectifs « habituel/inhabituel », « bref/long » et « lointain/proche » mais pas de changement de versant. Le groupe qui a qualifié le bruit du tramway à l'aide des termes grincement et/ou crissement décrit le bruit du tramway comme moins faible, sourd, supportable et grave que le groupe qui n'a pas utilisé ces termes ;
- alors que « fenêtres ouvertes » des différences significatives sont observées entre les moyennes des deux groupes pour toutes les paires d'adjectifs sauf « habituel/inhabituel ». Un changement de versant est constaté pour certaines paires : le bruit est qualifié sur le versant strident, long, aigu par ceux qui ont cité grincement et/ou crissement et sur le versant sourd, bref et grave, pour les personnes qui n'ont pas évoqué grincement et/ou crissement.

Grondement

39 % des personnes interrogées ont choisi le terme de « grondement » pour décrire le bruit du tramway tel qu'elles le perçoivent à leur domicile. Ce type de bruit est sans doute à mettre en relation avec la nature de la plate-forme et le type de pose de voie.

Les personnes qui utilisent le terme « grondement » pour décrire le bruit de tramway, l'ont qualifié de plus fort, sourd, grave et insupportable que ceux qui n'ont pas choisi ce terme. Les réponses des deux groupes restent sur le même versant que ce soit « fenêtres ouvertes » ou « fenêtres fermées » (Figure 102).

Figure 102 : profils « grondement » vs « autres adjectifs »



ns : test non significatif (proba > 0,05) ;
 ** : test significatif à 5 % (proba ≤ 0,05), *** test significatif à 1% (proba ≤ 0,01)

3.3.2. La gêne due au bruit du tramway au passage

La répartition des niveaux de gêne ressentie « lorsque le tramway passe » est très différente « fenêtres fermées » et « fenêtres ouvertes ». « Fenêtres fermées » 11 % des personnes se déclarent beaucoup ou extrêmement gênées alors que « fenêtres ouvertes » ce pourcentage atteint 52 % (Figure 103).

3.3.2.1. Les relations exposition/gêne pour le bruit du tramway au passage

Pour l'analyse conjointe des données acoustiques et des réponses au questionnaire concernant le bruit au passage du tramway ont été retenus :

- **pour les indices acoustiques** : $L_{Amax\ 1s}$, $L_{Amax\ 5s}$, L_{Aeq} et SEL (la Figure 104 représente la distribution des niveaux d'exposition pour ces 4 indices) ;
- **pour les données issues du questionnaire** : une expression qualitative du niveau de gêne ressentie (exprimée sur l'échelle de gêne : extrêmement,

beaucoup, moyennement, légèrement, pas du tout), une évaluation du bruit à l'aide des différenciateurs sémantiques, et une qualification du bruit.

Figure 103 : répartition des niveaux de gêne due au bruit du tramway au passage

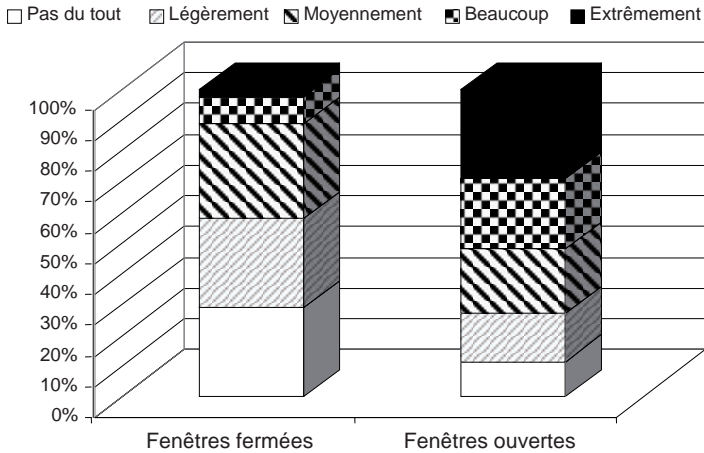
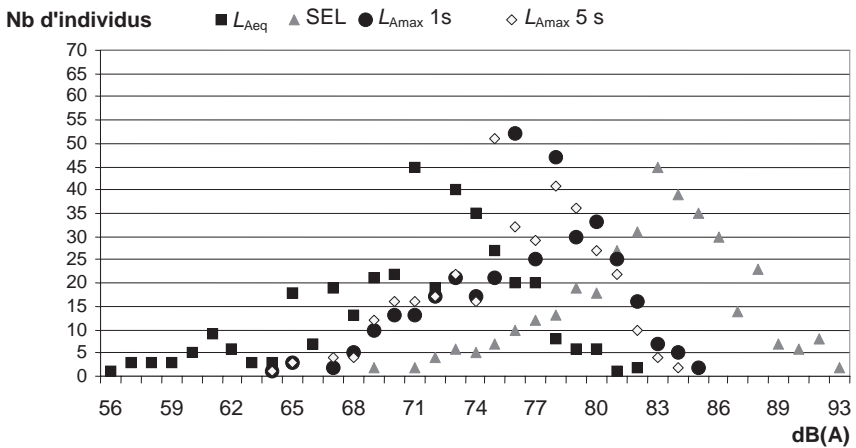


Figure 104 : exposition de l'échantillon au bruit d'un passage de tramway



Avant d'introduire les indices acoustiques dans les modèles de régression logistique comme variable explicative, un test de Chi2 (Tableau 17) a permis de vérifier qu'il existait une relation entre chacun des indices et la gêne ressentie au passage du tramway « fenêtres ouvertes ». Cette relation a été confirmée pour tous les indices acoustiques.

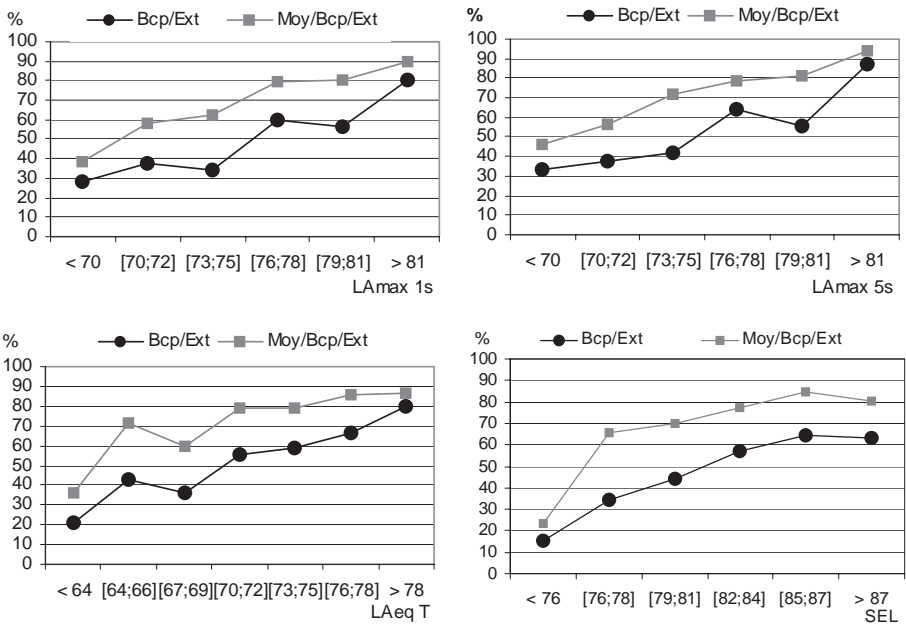
Tableau 17 : relation « gêne au passage »/indices

Indices acoustiques	% d'individus gênés (échelle de gêne : moy.+ bcp + extr.)	% d'individus très gênés (échelle de gêne bcp + extr.)
$L_{Amax\ 1s}$	***	***
$L_{Amax\ 5s}$	***	***
L_{Aeq} passage tram	***	***
SEL tram	***	***

*** : test Chi2 significatif à 1 %

La Figure 105 présente les variations des pourcentages de « beaucoup/extrêmement » et « moyennement/beaucoup/extrêmement » gênés au passage du tramway par classe de niveau d'exposition pour les 4 indices.

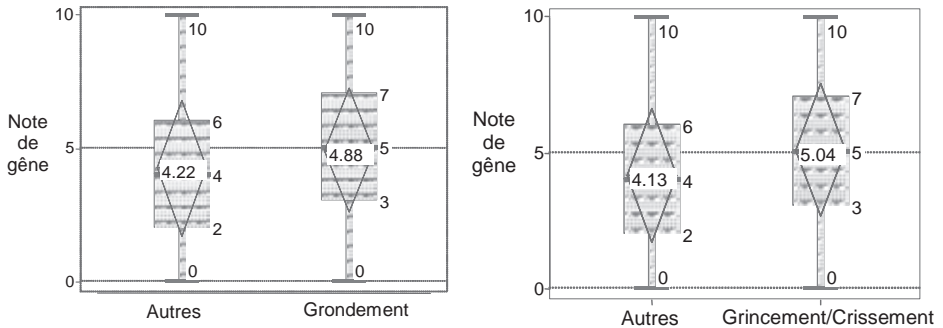
Figure 105 : pourcentage de gens gênés au passage en fonction des niveaux de bruit pour différents indices acoustiques



De la même façon que pour les réponses obtenues avec la liste des termes descriptifs du bruit du tramway, il a été vérifié que l'expression de la gêne variait en fonction du type de bruit perçu. Le test est effectué sur la note de gêne attribuée par les personnes interrogées pour le bruit du tramway au passage. Cette note de gêne n'étant pas distribuée « normalement » dans notre échantillon, on effectue un test non paramétrique.

Les personnes qui ont cité grincement et/ou crissement ont une note moyenne de gêne (Figure 106) significativement plus importante que ceux qui ne l'ont pas cité (le test de Mann-Whitney rejette l'hypothèse nulle d'égalité des distributions à 1 %). Les personnes ayant cité le bruit de grondement sont significativement plus gênées (Figure 106) par le bruit au passage du tramway que celles qui ne l'ont pas cité (le test de Mann-Whitney rejette l'hypothèse nulle d'égalité des distributions à 5 %).

Figure 106 : note de gêne en fonction des réponses aux qualificatifs



3.3.2.2. Les modèles exposition /gêne

L'analyse descriptive des divers indices acoustiques a mis en évidence l'existence d'une relation « exposition-gêne » entre la gêne au passage du tramway et les indices acoustiques de court terme : $L_{Amax\ 1s}$, $L_{Amax\ 5s}$, L_{Aeq} passage et le SEL. En effet, le pourcentage d'individus très gênés (extrêmement + beaucoup gêné) au passage du tramway, « fenêtres ouvertes », augmente en fonction des différentes classes de niveau sonore.

Il s'agit désormais d'établir la relation entre la gêne au passage, variable dépendante binaire Y et le niveau sonore, variable indépendante X . La régression logistique binaire simple sur la gêne au passage du tramway permet d'expliquer la gêne au passage du tramway (si $Y = 1$, « très gêné » sinon 0) en fonction des différents indices acoustiques retenus. Si l'on considère l'indice acoustique sous sa forme continue, on obtient la probabilité estimée de survenue de la gêne pour chaque niveau sonore. L'estimation des paramètres $\hat{\beta}_0$ et $\hat{\beta}_1$ sont calculés par la méthode du maximum de vraisemblance.

$$P(\text{gêne} = 1|\text{bruit}) = P(Y = 1|X) = \frac{1}{1 + e^{-(\beta_0 + \beta_1 \cdot X)}} = \frac{e^{(\beta_0 + \beta_1 \cdot X)}}{1 + e^{(\beta_0 + \beta_1 \cdot X)}}$$

Les intervalles de confiance à 95 % autour des probabilités estimées ne sont pas représentés sur le graphique (Figure 107), ils oscillent autour de cette valeur $\pm 0,7$. Le Tableau 18 fournit les résultats de l'estimation des différentes régressions logistiques pour chaque indice acoustique à partir des données individuelles.

Figure 107 : relations exposition/gêne au passage

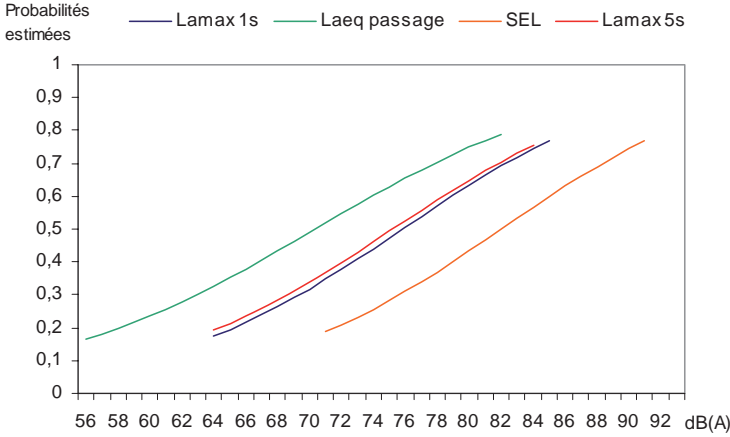


Tableau 18 : regression logistique simple de la gêne au passage du tramway

	Modèle P(HA X)	Coefficient estimé $\hat{\beta}_i$	Écart type $\hat{\sigma}_i$	Khi2 de Wald (p value)	R ²
(1)	$L_{Amax\ 1sec}$	0,1309	0,0287	< 0,0001 ***	0,08
	Constante	-9,9230	2,1984	< 0,0001 ***	
(2)	$L_{Amax\ 5sec}$	0,1279	0,0294	< 0,0001 ***	0,07
	Constante	-9,6237	2,2305	< 0,0001 ***	
(3)	$L_{Aeq\ passage}$	0,1138	0,0234	< 0,0001 ***	0,09
	Constante	-8,0097	1,6689	< 0,0001 ***	
(4)	SEL tramway	0,1333	0,0270	< 0,0001 ***	0,10
	Constante	-10,9301	2,2377	< 0,0001 ***	

Le risque de survenue de la gêne augmente de manière significative avec le niveau sonore. Les différents coefficients de régression $\hat{\beta}_1$ sont significativement différents de 0. La surface sous la courbe ROC (Receiver Operating Characteristic) permet d'évaluer la précision du modèle à discriminer les « très gênés » des « autres ». La discrimination est jugée acceptable lorsque l'AireROC $\geq 0,7$, or ici elle est égale à 0,6 pour les différents modèles, ils ne sont donc pas suffisamment discriminants. Lorsque les différents modèles sont confrontés aux données observées sur notre échantillon, le taux global de bien classés (en utilisant le seuil de 0,5) varie de 60 % à 62,5 %. On constate toutefois que la liaison (R^2 de Nagelkerke) est plus élevée pour les deux derniers indices : L_{Aeq} passage et le

SEL, qui tiennent compte de la durée de l'évènement que pour les L_{Amax} , qui n'en tiennent pas compte.

Les modèles univariés basés uniquement sur un indice acoustique rendant compte du niveau sonore sont jugés insuffisants pour décrire la gêne due au bruit du tramway au passage.

Des variables descriptives du bruit du tramway au passage, issues du questionnaire, sont introduites dans les précédents modèles (régression logistique simple) ; ce sont les 4 paires d'adjectifs suivantes « bref/long », « grave/aigu », « lointain/proche », « sourd/strident » ainsi que les deux termes cités au cumul grondement et grincement et/ou crissement pour décrire le bruit du tramway. Seules les variables significatives sont conservées dans les divers modèles dont les résultats sont synthétisés dans le Tableau 19.

Tableau 19 : résultats des modèles de régression logistique de la gêne au passage

P (HA X _i)	Variables	Coefficient β_j	Écart type $\hat{\sigma}_j$	Khi2 de Wald (p value)	R ²	
Indice acoustique	$L_{Amax\ 1sec}$	0,158	0,036	< 0,0001 ***	0,41	
Constante		-13,229	2,794	< 0,0001 ***		
Terme cité au cumul décrivant le bruit du tramway	« Grondement » cité	1,128	0,307	0,0002 ***		
	<i>Item non cité</i>	0	référence			
	« Grincement et/ou crissement » cité(s)	0,688	0,320	0,0317 **		
	<i>Item(s) non cité(s)</i>	0	référence			
Différenciateurs sémantiques (f.o.)	Bref/Long	0,396	0,069	< 0,0001 ***		
	Grave/Aigu	0,183	0,077	0,0171 **		
	Lointain/Proche	0,376	0,083	< 0,0001 ***		
Indice acoustique	L_{Aeq} passage	0,141	0,030	< 0,0001 ***		0,42
Constante		-11,128	2,192	< 0,0001 ***		
Terme cité au cumul décrivant le bruit du tramway	« Grondement » cité	1,089	0,309	0,0004 ***		
	<i>Item non cité</i>	0	référence			
	« Grincement et/ou crissement » cité(s)	0,724	0,324	0,0254 **		
	<i>Item(s) non cité(s)</i>	0	référence			
Différenciateurs sémantiques (f.o.)	Bref/Long	0,398	0,07	< 0,0001 ***		
	Grave/Aigu	0,187	0,077	0,0159 **		
	Lointain/Proche	0,38	0,084	< 0,0001 ***		
Indice acoustique	SEL tramway	0,134	0,034	< 0,0001 ***	0,40	
Constante		-11,881	2,758	< 0,0001 ***		
Terme cité au cumul décrivant le bruit du tramway	« Grondement » cité	0,838	0,279	0,0027 ***		
	<i>Item non cité</i>	0	référence			
Différenciateurs sémantiques (f.o.)	Sourd/Strident	0,198	0,068	0,0035 ***		
	Bref/Long	0,375	0,07	< 0,0001 ***		
	Lointain/Proche	0,374	0,083	< 0,0001 ***		

L'introduction de variables descriptives du bruit du tramway augmente le pouvoir explicatif des différents modèles. En effet, le R^2 passe de 9 % avec comme seule variable explicative, l'indice acoustique, à 40 % avec l'introduction d'éléments descriptifs du bruit du tramway au passage tels que perçus par les riverains. Le « meilleur » modèle est celui contenant le L_{Aeq} passage : tous les coefficients estimés sont significativement différents de 0, le R^2 , le taux de bon classement et l'aire sous la courbe ROC sont les plus élevés.

Il apparaît donc que les indices acoustiques rendant compte du bruit d'un passage de tramway par son niveau maximum (L_{Amax}), ou en intégrant la durée de l'événement (SEL), ou en estimant un niveau moyen (L_{Aeq}), ne suffisent pas pour décrire la gêne due au bruit du tramway au passage. La nécessité d'introduire dans les modèles explicatifs des variables caractérisant le bruit du tramway a été établie. La hauteur du bruit perçu au passage du tramway, que ce soit dans les fréquences hautes, caractéristiques des bruits de grincement/crissement ou les fréquences basses, caractéristiques du bruit de grondement, pourrait être prise en compte en considérant des indices intégrant les caractéristiques fréquentielles du bruit.

3.3.2.3. Pertinence de la notion d'émergence

Une autre piste explorée dans cette recherche est la pertinence de la notion d'émergence comme descripteur acoustique de la gêne due au bruit du tramway au passage. Elle est définie ici comme la différence entre le bruit de la source considérée et le niveau de bruit de fond. Elle est parfois envisagée en milieu urbain, pour décrire le bruit perçu au passage d'une source particulière. Les valeurs de l'émergence (Tableau 20) pour le bruit du tramway au passage ont donc été calculées en faisant la différence entre le L_{Amax} tramway et le L_{Aeq} « route » sur la période diurne (6h00-22h00).

Tableau 20 : distribution des valeurs d'émergence de l'échantillon sur la période 6h-22h

Émergence	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	21	22	23	24	25	28	29	30
Nb d'ind.	2	2	11	12	5	2	11	28	20	34	56	25	28	31	28	22	7	1	9	3	8	2	7	8	3

Pour comprendre l'histogramme de la Figure 108 qui semble indiquer que le pourcentage d'individus « très gênés » par le bruit au passage du tramway diminue lorsque la valeur de l'émergence augmente, et simplement à titre indicatif, la composition de l'émergence dans l'échantillon a été explorée (Figure 109).

La variabilité de l'émergence (Figure 109) dans l'échantillon étudié paraît plutôt liée aux variations du bruit de fond qu'à celle du bruit du tramway. Donc, ce qui distingue ici une valeur d'émergence faible d'une valeur d'émergence forte est une différence de niveau du bruit de fond, avec dans les deux cas un niveau maximum du bruit de tramway au passage « comparable ». Ceci implique que la notion d'émergence définie comme une différence entre le bruit d'une source particulière et le bruit résiduel ne peut pas être utilisée dans des situations sonores

où le bruit de fond varie. Ce qui est alors observée ne sont pas uniquement les variations de la source étudiée.

Figure 108 : pourcentage d'individus « très gênés » au passage selon la valeur de l'émergence

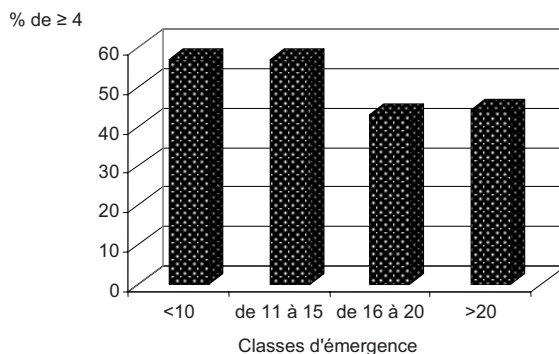
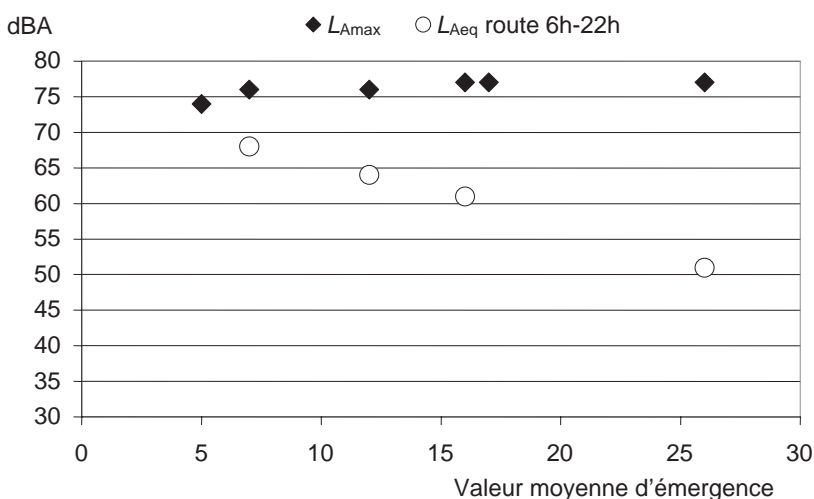


Figure 109 : valeurs moyennes du L_{Amax} tram et du L_{Aeq} route correspondantes selon les valeurs de l'émergence

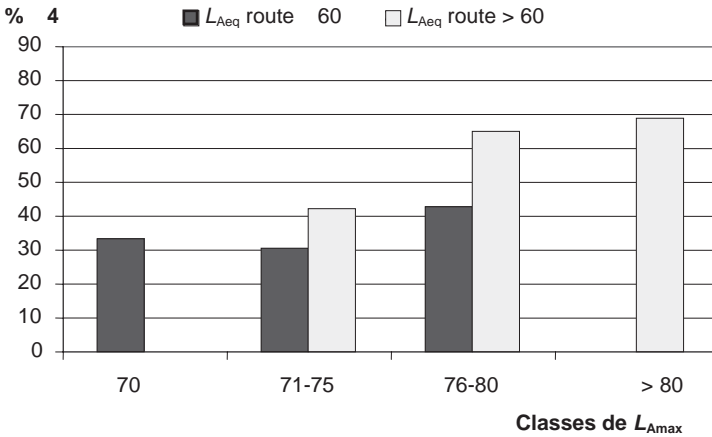


Dans un deuxième temps, l'effet du niveau du bruit de fond sur la gêne due au bruit du passage du tramway a été exploré en observant le pourcentage d'individus « très gênés » dans deux conditions de niveau de bruit de fond.

À la lecture de la Figure 110, l'hypothèse peut être faite que le niveau du bruit de fond influence la gêne due au bruit du tramway au passage. Pour une même classe de L_{Amax} , le pourcentage d'individus se déclarant « très gênés » au

passage du tramway est plus important dans la situation où le L_{Aeq} route est le plus élevé. Cette hypothèse n'a pas pu être testée dans cette recherche du fait de la distribution des données.

Figure 110 : pourcentage d'individus « très gênés » au passage pour différentes classes de L_{Amax} dans deux conditions de bruit de fond



3.3.2.4. Conclusion concernant la gêne due au bruit dû au passage de tramway

Plus de la moitié des personnes interrogées se déclarent « beaucoup » ou « extrêmement gênées » par le bruit du tramway « fenêtres ouvertes » au passage.

Les modèles explicatifs de la gêne basés seulement sur un indice acoustique en relation avec le niveau d'exposition au bruit (L_{Amax} , SEL, L_{Aeq} passage) se révèlent insuffisants.

Des modèles intégrant les caractéristiques du bruit du tramway se sont avérés nettement meilleurs. Dans cette recherche, cette description est basée sur les réponses des individus mais elle pourrait être traduite en termes acoustiques en intégrant les composantes fréquentielles.

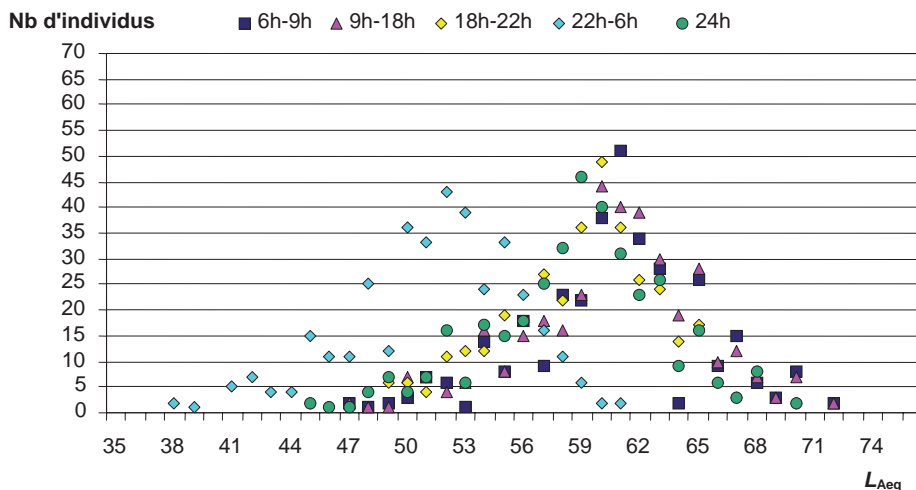
3.4. Le bruit dû au trafic de tramways

3.4.1. Exposition de long terme

Le L_{Aeq} « trafic tramway » a été calculé pour 4 périodes de la journée : matin (6h-9h), jour (9h-18h), soirée (18h-22h) et nuit (22h-6h) et pour 24 h. Le LDEN a également été introduit dans les analyses statistiques. Le calcul de cet indice prend en compte des pondérations pour les périodes de soirée (+5 dB(A)) et de nuit (+10 dB(A)), c'est-à-dire lorsque le bruit est le plus gênant. La Figure 111 présente l'exposition de l'échantillon pour les différentes périodes de la journée.

En moyenne, on constate peu de différences entre les niveaux d'exposition au bruit dû au trafic des tramways des différentes périodes diurnes (matin, jour, soirée). La différence est beaucoup plus importante entre le jour et la nuit du fait d'un nombre de passages de tramways par heure qui passe en moyenne de 20 à 4.

Figure 111 : exposition de l'échantillon au bruit du tramway



Notons que 25 % de l'échantillon dépasse les niveaux maximums admissibles²⁸, applicables lors de l'introduction de lignes nouvelles, en journée (63 dB L_{Aeq} , 6h-22h), et 5 % la nuit (58 dB L_{Aeq} , 22h-6h).

3.4.2. La gêne due au bruit de la circulation des tramways

Après la gêne au passage, le questionnaire abordait la gêne de plus long terme due à la circulation des tramways. La soirée est la période de la journée où il y a le plus de personnes qui se déclarent « extrêmement » ou « beaucoup » gênées. Il y a près d'une personne sur deux qui se déclare au moins moyennement gênée par le bruit dû à la circulation du tramway sur une période de 24 heures, un jour normal de la semaine (Tableau 21).

Les deux principales causes de gêne citées par les riverains de ligne de tramway sont :

- l'intensité du bruit lorsqu'un tramway passe ;
- le nombre de passages de tramway.

²⁸ Conformément à l'arrêté du 8 novembre 1999 relatif au bruit des infrastructures ferroviaires.

Tableau 21 : répartition selon l'intensité de la gêne due au bruit de la circulation des tramways pour les différentes périodes de la journée

	Extrême- ment	Beaucoup	S/T Ext/Bcp	Moyen- nement	Légère- ment	Pas du tout	S/T Léger/ Pas
Matin	6	10	16 %	28	26	30	56 %
Jour	2	9	11 %	29	31	29	60 %
Soirée	6	16	22 %	24	26	28	54 %
Nuit	4	10	14 %	16	26	44	70 %
24h jour normal	1	13	14 %	32	30	24	54 %
24h Week- end	1	7	8 %	28	35	29	64 %

Base : 365 individus

Pour commencer d'appréhender la variabilité de la gêne due à la circulation des tramways, il est à noter que les personnes interrogées se déclarent globalement soit gênées toute l'année de la même façon, soit plus gênées l'été, sans doute du fait de l'ouverture plus fréquente des fenêtres. Pour 8 personnes sur 10, les conditions météorologiques n'ont pas d'influence sur leur perception du bruit du tramway, cette variable n'a ainsi pas été prépondérante dans l'analyse des données.

3.4.2.1. La gêne en fonction des périodes de la journée

Sur une période de 24 heures, un jour normal de la semaine (Figure 112), 47 % des personnes interrogées sont au moins moyennement gênées par le bruit du tramway (15 % se déclarant extrêmement ou beaucoup gênées) contre 36 % le week-end (8 % des personnes se déclarant extrêmement ou beaucoup gênées).

Parmi les riverains au moins moyennement gênés par le bruit du tramway sur 24 heures, 84 % le sont également en soirée, contre 78 % le matin, 76 % en journée et 59 % la nuit.

La Figure 112 présente la répartition de l'échantillon en fonction de l'intensité de la gêne ressentie pour les différentes périodes de la journée. La soirée est la période de la journée où le pourcentage d'individus au moins moyennement gênés est le plus important (45 % se détaillant en 22 % extrêmement et beaucoup gênés et 23 % moyennement gênés).

3.4.2.2. Les activités quotidiennes perturbées par le bruit du tramway

L'évaluation de la gêne due au bruit est également faite à travers la fréquence de perturbation d'activités quotidiennes ou des comportements induits par la gêne due au bruit du tramway. Les résultats du Tableau 22 indiquent que le passage du tramway et le bruit qu'il occasionne a une incidence sur les activités quotidiennes des riverains. Ainsi, près de la moitié « ferme la fenêtre lorsque le tramway passe » « assez souvent/tout le temps », 3 personnes sur 10 « montent le son de la télévision » « assez souvent/tout le temps ».

Figure 112 : répartition des individus en fonction de l'intensité de la gêne par période

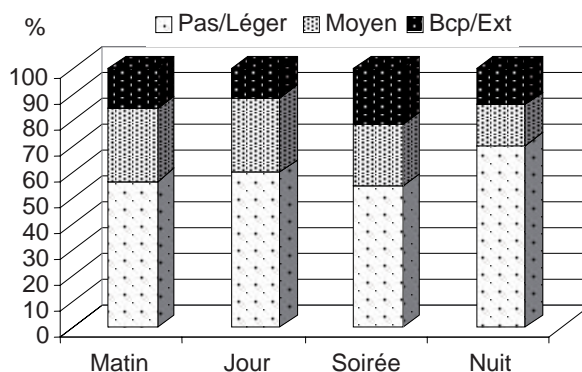


Tableau 22 : répartition selon la fréquence de l'incidence du bruit du tramway sur les activités de la vie quotidienne

	Jamais	Occasionnellement	S/T Rarement	Assez souvent	Tout le temps	S/T Souvent
De fermer la fenêtre	34 %	19 %	53 %	25 %	22 %	47 %
De monter le son de la télévision	54 %	17 %	71 %	20 %	9 %	29 %
D'interrompre votre conversation	64 %	18 %	82 %	16 %	2 %	118 %
De ressentir les vibrations	70 %	16 %	86 %	9 %	5 %	14 %
D'être perturbé lorsque vous vous reposez	65 %	21 %	86 %	10 %	4 %	14 %
De vous réveiller	70 %	17 %	87 %	9 %	4 %	13 %
D'entendre vos fenêtres vibrer	81 %	11 %	92 %	5 %	3 %	8 %
D'être perturbé pendant votre lecture	76 %	16 %	92 %	5 %	3 %	8 %

Base : 365 individus

Un lien a été établi entre la gêne ressentie (au moins moyennement) et la fréquence (« assez souvent/tout le temps ») de perturbation des activités ou d'apparition de comportements induits présentés dans la Figure 113. Les deux comportements les plus fréquemment évoqués sont le fait « de fermer la fenêtre » et « de monter le son de la télévision » à cause du bruit du tramway.

Un modèle de régression établi avec la variable au moins moyennement gêné et les activités perturbées et les comportements spécifiques (fréquence « souvent ») a montré que certaines activités ou comportements sont plus particulièrement reliés à des périodes de la journée (Tableau 23). Ainsi si « fermer la fenêtre » lorsque le tramway passe est un comportement qui apparaît avec une

fréquence importante tout au long de la journée, « monter le son de la télévision » lorsque le tramway passe est un comportement plutôt associé à la soirée.

Figure 113 : pourcentage d'individus déclarant des perturbations fréquentes d'activités ou des comportements en réaction au bruit du tramway en fonction de la gêne ressentie

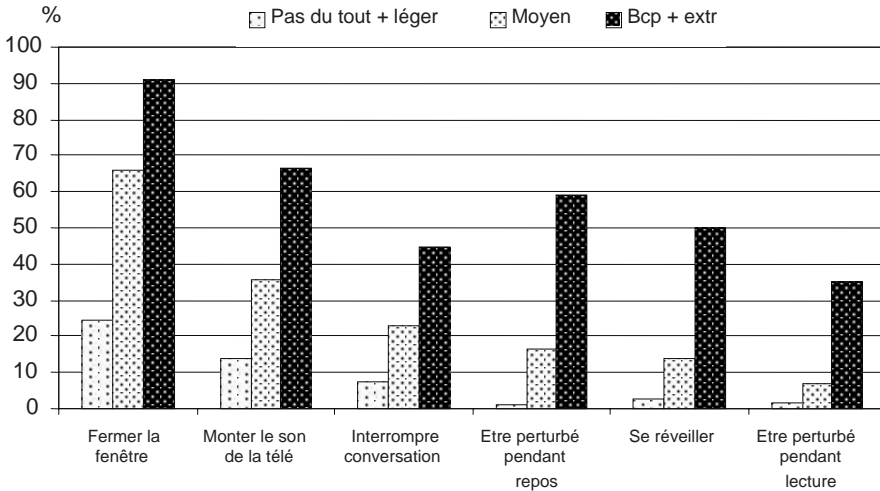


Tableau 23 : les activités perturbées et comportements induits en fonction des moments de la journée

Gêne due au bruit du tram / Activités perturbées ou comportements induits	Matin (6-9h)	Journée (9-18h)	Soirée (18-22h)	Nuit (22-6h)
Fermer la fenêtre	< 0,0001 ***	< 0,0001 ***	< 0,0001 ***	< 0,0001 ***
Monter le son de la télévision	-	0,0146 **	0,0004 ***	-
Se réveiller	< 0,0001 ***	-	0,0438 **	0,0014 ***
Être perturbé lorsqu'on se repose	-	0,0248 **	0,0168 **	0,0239 **

3.4.2.3. Modèles explicatifs de la gêne due au trafic tramway

Préalablement à l'établissement de modèles, l'existence d'une relation entre le niveau de bruit pour les différentes périodes de la journée et l'expression de la gêne a été testée à l'aide du test du Chi2 (Tableau 24).

Le test du Chi2 n'a pas permis d'établir de lien entre le pourcentage d'individus très gênés et le L_{Aeq} tramway pour la période du matin (6h-9h).

Tableau 24 : relation « gêne par période »/L_{Aeq} tramway pour les différentes périodes

Indices acoustiques	% d'individus gênés (échelle de gêne 3+4+5/1+2)	% d'individus très gênés (échelle de gêne 4+5/1+2+3)
L _{Aeq} tram. 6h-9h	**	Non significatif
L _{Aeq} tram. 9h-18h	**	**
L _{Aeq} tram. 18h-22h	***	***
L _{Aeq} tram. 22h-6h (filtré)*	**	***
L _{Aeq} tram. 24h	**	***
LDEN tram.	**	**

*uniquement sur les personnes qui habitent un studio ou qui ont leur chambre principale exposée au bruit du tramway

** : test significatif à 5 % (proba ≤ 0,05) *** : test significatif à 1 % (proba ≤ 0,01)

Les Figures 114 et 115 détaillent les variations du pourcentage d'individus gênés en fonction du niveau de bruit pour les différentes périodes de la journée.

Figure 114 : pourcentage d'individus gênés en fonction des niveaux de bruit pour les différentes périodes de la journée

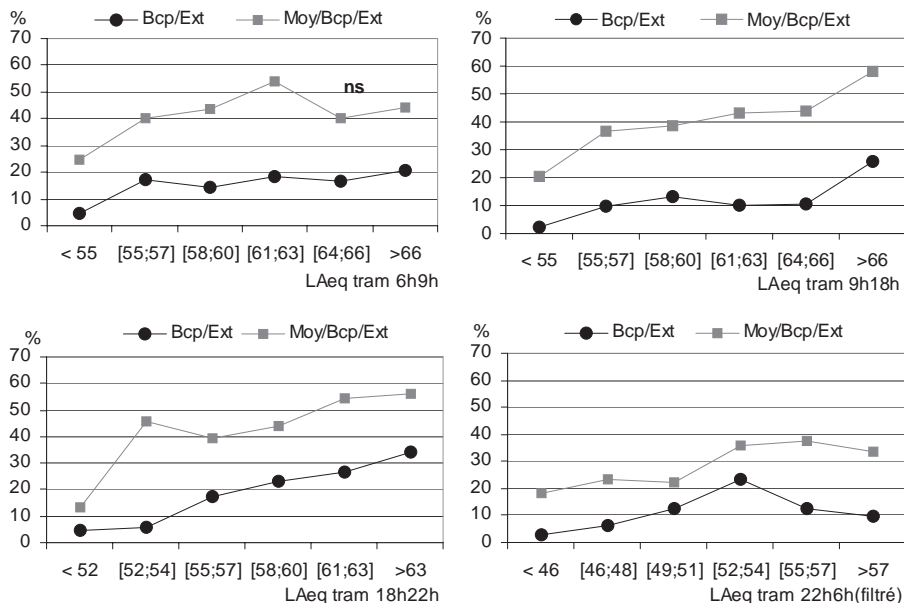
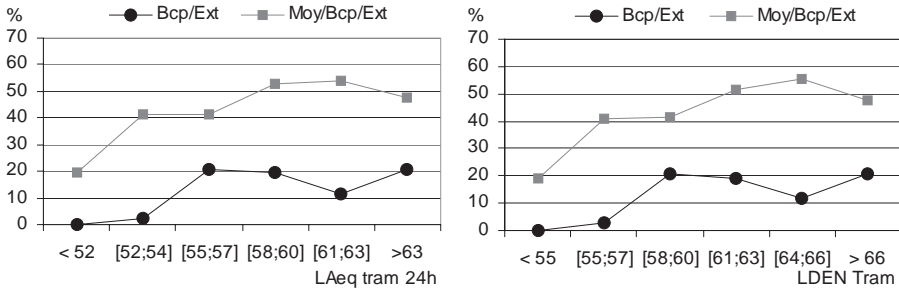


Figure 115 : pourcentage d'individus gênés en fonction des niveaux de bruit sur 24 heures



Les modèles exposition/gêne

Nous avons établi que le pourcentage d'individus gênés (au moins moyennement gêné) par le trafic du tramway par période augmentait en fonction des différentes classes de niveau sonore (L_{Aeq}) pour les différentes périodes de la journée.

La première étape de la phase de modélisation a consisté, comme pour la gêne au passage, à expliquer la gêne due au trafic des tramways par période (où la variable $Y = 1$ si « gêné », 0 sinon) à l'aide du L_{Aeq} tramway associé (Figures 116 et 117).

Figure 116 : relation exposition/gêne par période

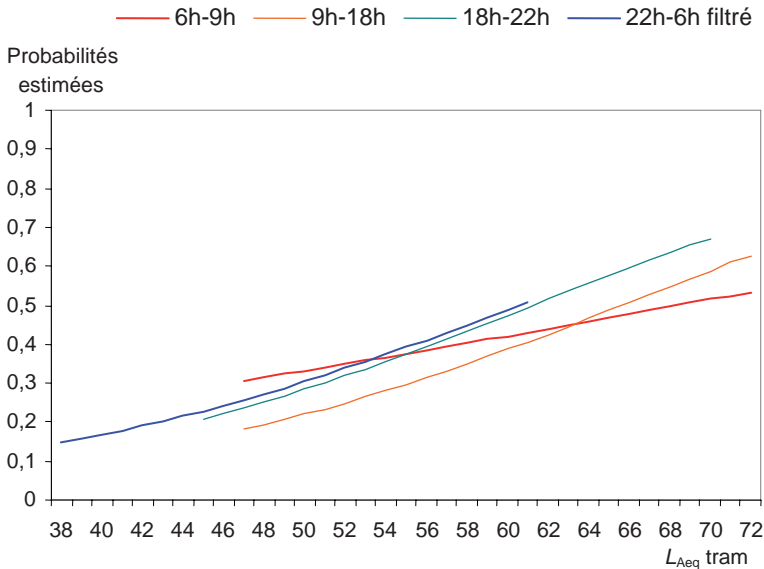
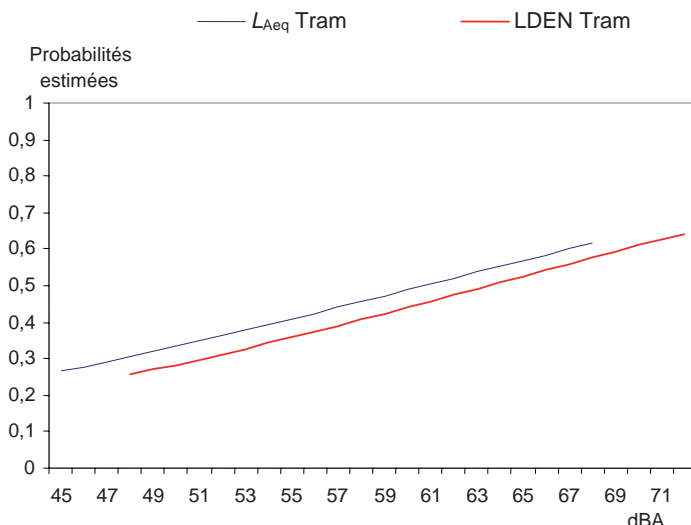


Figure 117 : relation exposition/gêne sur 24 heures



Les courbes de gêne pour les périodes 9h-18h et 18h-22h ont la même allure. L'étude de la période nocturne a été effectuée uniquement pour les personnes dont le logement est un studio ou dont la chambre principale est exposée à une voie de tramway (soit 214 personnes concernées). 34 % des personnes interrogées ayant leur chambre principale (ou studio) exposée directement sur la voie de tramway sont au moins moyennement gênées par le bruit du tramway la nuit contre 23 % sur l'ensemble de l'échantillon.

Tableau 25 : régression logistique simple de la gêne due au bruit du trafic tramway par période

Modèle $P(A_{\text{période } i} X_{\text{période } i})$	Coefficient $\hat{\beta}_j$	Écart type $\hat{\sigma}_j$	Khi2 de Wald (p value)	R^2
L_{Aeq} tram 6h9h	0,038	0,023	0,0970 ns	0,01
Constante	-2,600	1,416	0,0663 ns	
L_{Aeq} tram 9h18h	0,081	0,025	0,0011 ***	0,04
Constante	-5,308	1,512	0,0004 ***	
L_{Aeq} tram 18h22h	0,082	0,025	0,0009 ***	0,04
Constante	-5,027	1,468	0,0006 ***	
L_{Aeq} tram 22h-6h (filtré)	0,078	0,038	0,0410 **	0,03
Constante	-4,717	1,999	0,0183 **	
L_{Aeq} tram 24h	0,065	0,024	0,0069 ***	0,03
Constante	-3,923	1,410	0,0054 ***	
LDEN tram	0,069	0,025	0,0050 ***	0,03
Constante	-4,363	1,514	0,0040 ***	

Le risque de survenue de la gêne augmente de manière significative avec le niveau sonore sauf pour la période 6h-9h (Tableau 25). Excepté le matin, les différents coefficients de régression $\hat{\beta}_i$ sont significativement différents de 0. On constate que la liaison est extrêmement faible quelle que soit la période retenue. Même constat concernant le pouvoir discriminant des différents modèles. D'après le critère de la courbe ROC, ces modèles ne sont pas suffisamment discriminants. Le taux global de bien classés (en utilisant le seuil de 0,5) varie entre 54 % et 70 %.

La gêne due au bruit de la circulation du tramway est très mal expliquée par l'indice acoustique L_{Aeq} période. Il n'explique que 3 à 4 % de la gêne. Même si l'ensemble des recherches basées sur des enquêtes auprès de population a déjà montré que les facteurs acoustiques n'expliquent qu'une partie de la gêne exprimée, ce pourcentage reste très insuffisant.

Pour essayer d'approfondir ce résultat, l'étude des variables explicatives de la gêne due au bruit du trafic de tramway par l'établissement d'un modèle perceptuel de la gêne due au bruit du trafic des tramways a été mise en œuvre.

Modèle perceptuel de la gêne due au bruit du tramway

Pour comprendre pourquoi un indice acoustique qui « moyenne » l'exposition au bruit en faisant la sommation énergétique des événements durant une période déterminée, n'est pas un bon descripteur de la gêne due au bruit de la circulation des tramways, un modèle perceptuel a été établi à partir des variables extraites du questionnaire.

Ce modèle est proposé pour la période où le nombre de personnes se déclarant gênées est la plus importante : en soirée. Le Tableau 26 synthétise les résultats, seules les variables significatives sont conservées dans le modèle.

Ce modèle exploratoire explique 51 % de la gêne de soirée. Le pouvoir discriminant du modèle est jugé excellent d'après le critère de AROC = 0,87, le taux général de bon classement est égal à 76,9 % (Sensibilité = 74,4 % ; Spécificité = 79,1 %). Les résultats issus de ce modèle nous permettent de faire différentes hypothèses pour expliquer la gêne due au bruit du trafic de tramway.

Assez logiquement, il semblerait que l'évaluation de la gêne ne puisse se faire sans prendre en compte le contexte sonore dans lequel le bruit du tramway est entendu. En effet, le plus souvent le tramway circule dans des rues où la circulation automobile est également présente. L'exposition au bruit pour les riverains de la ligne de tramway à Nantes serait donc une situation de multi exposition dans le sens où le bruit extérieur entendu est composé non seulement du bruit du tramway mais aussi du bruit de la circulation routière. Le modèle perceptuel de la gêne de soirée indique que la gêne due au bruit de la route et la gêne ressentie au passage du tramway expliquent conjointement la gêne due au bruit de la circulation des tramways. Plus on est gêné par le bruit de la route, plus le risque d'être gêné par le bruit dû à la circulation du tramway augmente. En d'autres termes, le risque d'être gêné par le bruit dû à la circulation des tramways augmente si le tramway circule dans une rue où le bruit dû à la circulation routière est déjà important.

Tableau 26 : modèle perceptuel de la gêne due au trafic de tramway en soirée

P (A _{18-22h} X _i)	Variables	Coefficient β_j	Ecart type $\hat{\sigma}_j$	P-value (Khi2 de Wald)	R ²
	Constante	- 4,2681	0,6960	< 0,0001 ***	0,51
Gêne	au passage du tramway (très gênés)	1,2990	0,3149	< 0,0001 ***	
	Pas « très gênés »	0	référence		
	trafic route _{18-22h} (gênés)	1,2480	0,3274	0,0001 ***	
	Pas « gênés »	0	référence		
Éléments cités comme gênant dans le fait d'habiter à proximité d'une ligne de tramway	« Le nombre de passages du tramway »	0,7265	0,3017	0,0161 **	
	Item non cité	0	référence		
	« L'intensité du bruit »	0,9765	0,3189	0,0022 ***	
	Item non cité	0	référence		
	« Les vibrations dues au passage »	1,3901	0,4499	0,0020 ***	
Item non cité	0	référence			
Émergence 18-22h	Émergence	0,0688	0,0288	0,0169 **	
Différenciateurs Sémantiques (fenêtres ouvertes)	Bref/Long	0,1513	0,0745	0,0423 **	
	Lointain/Proche	0,2706	0,0923	0,0034 ***	

La gêne due au bruit de la circulation du tramway s'expliquerait par la gêne ressentie à chaque fois que le tramway passe, associée au nombre de passages. La variable nombre d'événements n'a pas pu être testée dans cette recherche car la fréquence des tramways est quasiment la même pour les trois lignes de tramway de la ville de Nantes.

Dans ce modèle les vibrations sont également un facteur aggravant de la gêne due au bruit de la circulation des tramways. Dans notre échantillon, 14 % des personnes interrogées déclarent ressentir « souvent » des vibrations lorsque le tramway passe.

3.4.3. Les variables non acoustiques influençant l'expression de la gêne due au bruit du tramway

Un des objectifs de cette recherche est de rechercher les facteurs de modulation de la gêne due au bruit de tramway. Le niveau d'exposition au bruit n'explique qu'une partie de la gêne exprimée, d'autres variables viennent en complément expliquer les variations.

Pour étudier l'effet des différentes variables sur la gêne due au bruit du trafic des tramways, la note attribuée à la gêne due au bruit de la circulation des tramways par chacune des personnes interrogées a été utilisée. La note moyenne sur l'ensemble de l'échantillon est de 4,48. Le Tableau 27 donne les paramètres de dispersion de la note de gêne.

Tableau 27 : paramètres de dispersion de la note de gêne due au bruit de la circulation des tramways

Moyenne	Écart type	Min	1 ^{er} quartile	Médiane	3 ^e quartile	Max
4,48	2,48	0	3	4	6	10

Les réponses au questionnaire permettent d'étudier différents facteurs de modulation de la gêne : les caractéristiques individuelles d'une part (sexe, âge, activité, diplôme...) et des informations relatives au contexte, à l'environnement dans lequel vivent les riverains d'autre part.

3.4.3.1. Les facteurs individuels

Les variables socio-démographiques

Aucune des variables socio-démographiques n'a d'effet sur la note donnée par les personnes interrogées à la gêne due au bruit du tramway (âge, sexe, activité, diplôme).

Les variables associées au logement

Les variables associées au logement (statut d'occupation, ancienneté dans le logement et isolation du logement, passage du tram avant l'emménagement) n'ont pas d'effet sur le niveau de gêne.

La sensibilité au bruit

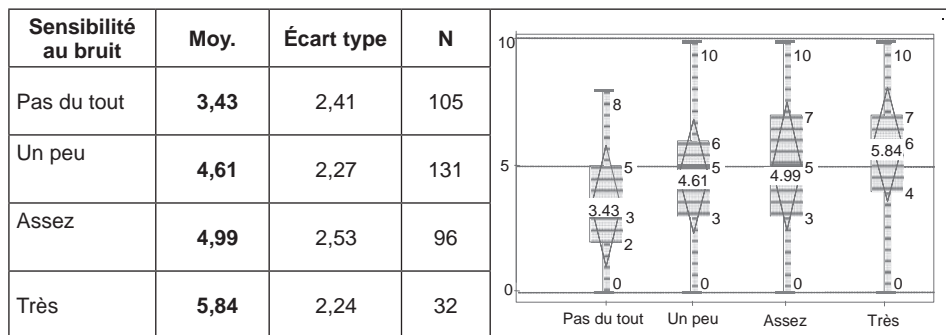
La méthodologie du questionnaire ne permet pas de mesurer la sensibilité au bruit des personnes enquêtées. Il a donc été proposé aux riverains de s'auto-évaluer sur une échelle en 5 points de « très sensible » à « pas du tout sensible ». Le Tableau 28 présente la répartition des réponses. On retiendra que les 2/3 de l'échantillon se déclare « un peu sensible » ou « pas du tout sensible » au bruit de manière générale.

Tableau 28 : répartition selon les réponses à l'échelle de sensibilité au bruit

Échelle de sensibilité	Fréquence	Pourcentage
Très sensible	32	9
Assez sensible	97	26
Un peu sensible	133	36
Pas du tout sensible	105	29
Non réponse	1	0

La sensibilité au bruit module la note de gêne. Le groupe « Pas du tout sensible au bruit » se déclare moins gêné que les 3 autres groupes (« Très sensible », « Assez », « Un peu sensible »). Cette différence est significative à 5 % (Tableau 29).

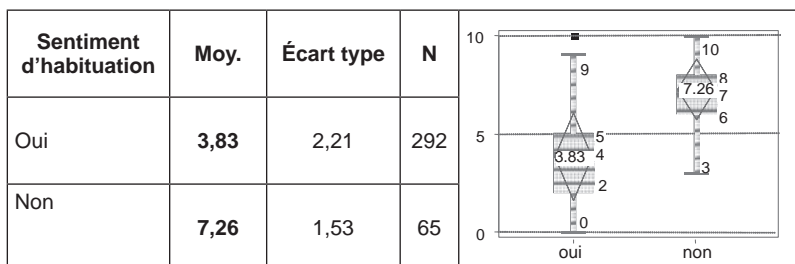
Tableau 29 : note de gêne et « sensibilité au bruit »



3.4.3.2. Le sentiment d'habitation au bruit

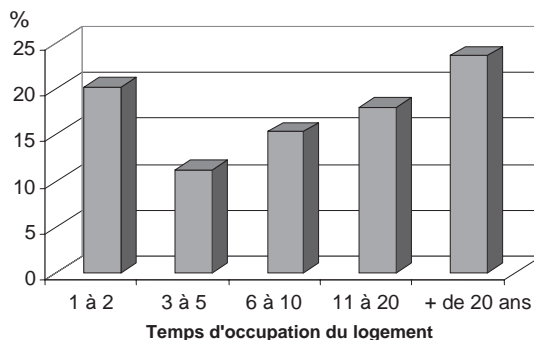
Il y a également un effet du sentiment d'habitation au bruit du tramway sur la note de gêne. La moyenne des notes de gêne des personnes se déclarant « habituées » est plus faible (significatif à 5 %) que celles des personnes se déclarant « non habituées » (Tableau 30).

Tableau 30 : note de gêne et « habitude au bruit »



Par ailleurs, la Figure 118 illustre que le sentiment d'être habitué au bruit du tramway n'est pas lié au temps d'occupation du logement.

Figure 118 : pourcentage d'individus qui déclarent ne pas être habitués au bruit du tramway selon le temps d'occupation du logement



3.4.3.3. La variable usage du tramway

Plus d'une personne interrogée sur deux utilise le tramway pour ses déplacements, au moins 1 à 5 fois par semaine (Tableau 31), 83 % des personnes utilisant le tramway même occasionnellement se disent « extrêmement » ou « beaucoup » satisfaites du tramway en tant qu'utilisateur.

Tableau 31 : répartition selon la fréquence d'utilisation du tramway pour les déplacements

Fréquence d'utilisation	Fréquence	Pourcentage
Tous les jours	76	21 %
1 à 5 fois par semaine	124	34 %
1 à 3 fois par mois	103	28 %
1 à 3 fois par an	33	9 %
Jamais	29	8 %

Il y a globalement un effet significatif de la variable « usage du tramway » sur la note de gêne due au bruit à 1 %. Les moyennes sont significativement différentes entre ceux qui l'utilisent souvent (tous les jours – 1 à 5 fois par semaine) et ceux qui ne l'utilisent jamais. En d'autres termes, plus on utilise le tramway moins on se déclare gêné par le bruit du tramway (Tableau 32).

Tableau 32 : note de gêne et « usage du tram »

Usage	Moyenne	Écart type	N
Souvent	4,16	2,53	200
Occasionnel	4,69	2,35	136
Jamais	5,66	2,36	29

3.4.3.4. La variable « Opinions sur le quartier et cadre de vie »

70 % des personnes interrogées sont « beaucoup » ou « extrêmement » satisfaites de leur logement. Seulement 7 % des personnes interrogées sont « légèrement » ou « pas du tout » satisfaites de leur logement.

Cependant, 22 % des personnes interrogées envisagent de déménager dans les 12 prochains mois. Le cumul des raisons principales du déménagement citées en premier, deuxième et troisième position (Tableau 33), indique que la première raison citée est « pour avoir de meilleures conditions de logement » qui est également la raison la plus souvent évoquée en première citation.

Le cumul des citations donne comme deuxième raison « les nuisances sonores » et comme troisième raison « la recherche de conditions environnementales plus agréables ».

Tableau 33 : répartition des raisons principales de déménager

Liste des items proposés	1 ^{re} citation	CUMUL*
Pour avoir de meilleures conditions de logement	35 %	<u>55 %</u>
Pour des raisons professionnelles	12,5 %	15 %
À cause de problèmes de voisinage	12,5 %	17,5 %
À cause de nuisances sonores	12,5 %	<u>32,5 %</u>
Parce que je vais acheter ou faire construire	8,8 %	17,5 %
Pour des raisons familiales ou personnelles	7,5 %	16,3 %
Pour des conditions environnementales plus agréables	6,3 %	<u>28,8 %</u>
Autres raisons	3,8 %	18,8 %
Pour des raisons financières	1,2 %	7,5 %

Base : 80 individus envisageant de déménager

Dans les critères de choix du logement les aspects environnementaux ne sont pas présents parmi ceux les plus souvent évoqués (Tableau 34).

Tableau 34 : répartition selon les critères de choix du lieu d'habitation

Liste des items proposés	1 ^{re} citation	CUMUL*
Pour des raisons familiales ou personnelles	27 %	<u>37 %</u>
Pour des raisons professionnelles	17 %	22 %
Par pur hasard	8 %	16 %
Parce que j'aime ce quartier	8 %	<u>23 %</u>
À cause du prix de l'immobilier ou des loyers	8 %	18 %
Recherche d'un meilleur environnement	7 %	15 %
Parce que le centre ville est à proximité	7 %	<u>24 %</u>
Je n'ai pas eu le choix	6 %	12 %
J'ai toujours vécu ici (dans ce logement ou ce quartier)	5 %	10 %
Parce que ce quartier est animé/vivant	5 %	11 %
Parce que l'accès au transport en commun est facile	3 %	17 %

*Calcul du cumul = nombre de citations de l'item divisé par la base ; base : 365 individus

Si on s'intéresse au quartier (Tableau 35), on constate qu'une majorité d'individus est d'accord avec le fait que « les déplacements à pied sont faciles » et que « les commerces de proximité sont suffisants ».

Les avis sont cependant plus partagés sur « la présence d'odeurs et de poussières liées à la pollution », ainsi que sur « les problèmes de vandalisme et

d'insécurité ». Enfin, il est intéressant de noter qu'ils ne sont pas d'accord avec l'affirmation qu'il y a « peu de bruit dû aux transports ».

Tableau 35 : répartition en fonction du positionnement sur une échelle d'accord pour différents items concernant le quartier

Liste des items proposés	Tout à fait d'accord	Plutôt d'accord	S/T D'accord	Plutôt pas d'accord	Pas du tout d'accord	S/T Pas d'accord
Il y a beaucoup d'odeurs, de poussières liées à la pollution	22 %	29 %	51 %	32 %	17 %	49 %
Il y a suffisamment de commerces de proximité	44 %	39 %	83 %	11 %	6 %	17 %
En général, les déplacements en vélo y sont difficiles	17 %	30 %	47 %	35 %	18 %	53 %
Il y a peu de bruit dû aux transports (rail, route, avions)	7 %	29 %	36 %	31 %	33 %	64 %
Il y a suffisamment d'espaces verts	20 %	40 %	60 %	26 %	14 %	40 %
Il y a des problèmes d'insécurité, de délinquance ou de vandalisme	17 %	31 %	48 %	37 %	15 %	52 %
En général, les déplacements à pieds y sont faciles	45 %	48 %	93 %	5 %	2 %	7 %
Le nombre d'équipements pour le sport et les loisirs est satisfaisant	14 %	46 %	60 %	25 %	15 %	40 %
Il n'y a aucun problème de stationnement	8 %	29 %	37 %	24 %	38 %	62 %

Base : 365 individus

Globalement, une personne sur 2 est « beaucoup » satisfaite de son quartier, de son cadre de vie (Tableau 36).

Tableau 36 : répartition selon le niveau de satisfaction vis-à-vis du cadre de vie

Échelle de satisfaction	Fréquence	Pourcentage
Extrêmement satisfait	44	12
Beaucoup satisfait	179	49
Moyennement satisfait	119	33
Légèrement satisfait	15	4
Pas du tout satisfait	8	2

Base : 365 individus

Pour les riverains qui ont emménagé alors que le tramway était déjà présent

63 % des personnes interrogées sont arrivées dans leur logement alors que le tramway passait déjà dans la rue. Pour 76 % de ces individus la présence du

tramway était « plutôt un avantage » au moment du choix du logement, à l'inverse pour seulement 11 % il s'agissait d'un inconvénient. Après l'emménagement, les opinions ont peu évolué, en effet 85 % des personnes concernées n'ont pas changé d'avis (Tableau 37).

Tableau 37 : répartition selon l'évolution de l'opinion à propos du tramway

		Fréquence	Pourcentage
OUI	Je pense désormais qu'il s'agit plutôt d'un avantage	18	8
	Je pense désormais qu'il s'agit plutôt d'un inconvénient	13	6
	Je pense désormais qu'il ne s'agit pas plus d'un avantage que d'un inconvénient	3	1
NON	Je n'ai pas changé d'avis	197	85

Base : 231 individus

Pour les riverains résidant dans leur logement avant la mise en place du tramway

37 % des personnes interrogées (soit 137) résidaient dans leur logement avant la mise en circulation du tramway. Les résultats présentés dans le Tableau 38 montrent qu'une majorité d'entre eux était favorable au projet.

Tableau 38 : répartition selon l'opinion par rapport à l'arrivée du tramway

	Fréquence	Pourcentage
Favorable à ce projet	88	64 %
Défavorable à ce projet	33	24 %
Sans opinion par rapport à ce projet	14	10 %

Base : 137 individus

Par ailleurs, ils se sont aussi exprimés sur l'incidence de l'installation du tramway sur la vie du quartier (Tableau 39) :

- globalement les avis sont très partagés, la moitié des personnes interrogées pensent que la rue est embellie par les aménagements de la ligne de tramway, alors que l'autre moitié n'est pas entièrement d'accord. Ils sont également très partagés sur l'incidence de l'installation du tramway sur la circulation automobile : la moitié dit que la circulation automobile est plus difficile et l'autre non ;
- ils ne sont pas d'accord majoritairement pour dire que les déplacements en vélo et les stationnements sont facilités depuis l'installation du tramway ou à l'inverse que les déplacements à pied sont plus difficiles ;
- pour 7 personnes sur 10 l'installation du tramway ne s'est pas accompagnée d'une réduction des nuisances environnementales (bruit et pollution).

Tableau 39 : répartition selon une échelle d'accord pour différents items décrivant l'évolution du quartier depuis l'introduction du tramway

Items proposés	Tout à fait d'accord	Plutôt d'accord	S/T D'accord	Plutôt pas d'accord	Pas du tout d'accord	S/T Pas d'accord
Ma rue est embellie par les aménagements de la ligne de tramway	13 %	35 %	48 %	28 %	23 %	51 %
Il est beaucoup plus difficile de circuler en voiture dans ma rue	21 %	32 %	53 %	28 %	17 %	45 %
Il est beaucoup plus facile de stationner dans ma rue	9 %	20 %	29 %	32 %	37 %	69 %
Les déplacements en vélo y sont plus faciles	7 %	27 %	34 %	39 %	25 %	64 %
Les déplacements à pied y sont plus difficiles	12 %	14 %	26 %	33 %	40 %	73 %
Il y a moins de pollution et d'odeurs qu'avant	7 %	26 %	33 %	43 %	23 %	66 %
Ma rue est moins bruyante qu'avant	12 %	19 %	31 %	31 %	38 %	69 %

Base : 137 individus

Enfin, et assez logiquement, près d'une personne sur 2 estime que le quartier ne s'est ni dégradé ni amélioré depuis l'introduction du tramway (Tableau 40).

Tableau 40 : répartition selon l'opinion sur l'évolution globale du quartier

	Fréquence	Pourcentage
Dégradé	26	19
Amélioré	43	31
Ni dégradé, ni amélioré	65	48
Non réponse	3	2

Base : 137 individus

Influence de l'« opinion sur le cadre de vie » sur l'expression de la gêne

Pour tester l'hypothèse de l'influence de l'appréciation du cadre de vie sur l'expression de la gêne ressentie, les questions concernant l'opinion sur le quartier (Tableau 35) et la satisfaction vis-à-vis du cadre de vie ont été utilisées (Tableau 36).

Dans un premier temps, une analyse factorielle des correspondances multiples a été effectuée afin de mettre en évidence différentes relations entre les modalités de ces différentes questions. L'hypothèse de l'existence d'un lien

entre les réponses données aux différents items concernant le quartier et l'opinion générale sur le cadre de vie quotidien des riverains du tramway de Nantes a donc été testée.

L'analyse concerne les 365 individus interrogés. Les variables illustratives sont constituées de réponses aux questions liées au logement (opinion sur le logement, projet de déménagement, l'isolation du logement, le statut d'occupation du logement...), à la localisation du site, et à la gêne due au bruit du tramway.

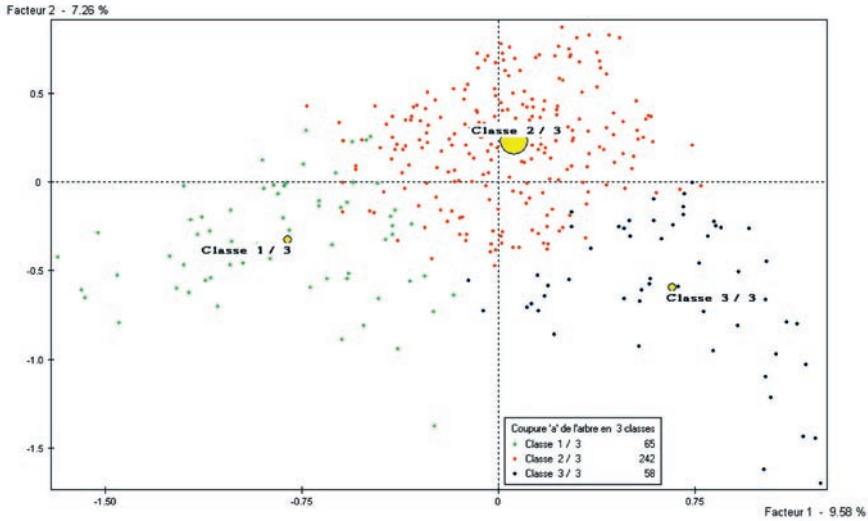
La typologie est effectuée à partir des résultats issus de l'analyse factorielle des correspondances multiples. Il s'agit donc d'une classification sur facteurs c'est-à-dire que la partition s'est faite sur les 21 premiers axes factoriels de manière à ce qu'au moins 80 % de l'inertie totale soit conservée. La partition retenue, à partir du dendrogramme et de la courbe d'indice de niveau est celle en 3 classes, qui est la plus cohérente compte tenu de la taille de l'échantillon. La description de la partition est la suivante.

La première classe est constituée de 65 individus soit 18,4 % de l'échantillon. Ce sont globalement des personnes « extrêmement insatisfaites » de leur cadre de vie. Ce qui caractérise leurs opinions vis-à-vis du quartier est un positionnement de leurs réponses systématiquement aux extrémités de l'échelle d'accord pour exprimer leur insatisfaction. Les principaux items qui interviennent dans la constitution de ce groupe concernent l'insuffisance des équipements sportifs et de loisirs ainsi que d'espaces verts, les problèmes de stationnement et les nuisances que ce soit le bruit ou les odeurs liées à la pollution. Ce sont essentiellement des personnes résidant en appartement, sans balcon, ni terrasse, insatisfaites de leur logement et désirant déménager. Ce groupe d'individus est extrêmement gêné par le bruit du tramway au passage fenêtres ouvertes.

Plus de la moitié de l'échantillon compose **la deuxième classe**. Elle est constituée de 242 individus soit 66,3 % de l'échantillon. Ces personnes se déclarent « modérément satisfaites de leur cadre de vie ». C'est une classe dont les réponses sont assez hétérogènes. En effet, elle rassemble d'une part des opinions plutôt positives concernant les déplacements à pieds, et les commerces à proximité, et d'autre part, des opinions négatives pour le stationnement et les problèmes d'insécurité. Pour certains thèmes, les réponses sont plutôt mitigées (espaces verts, déplacements en vélo, équipements et bruit). Ce sont essentiellement des personnes satisfaites de leur logement.

La dernière classe regroupe 15,9 % de l'échantillon soit 58 individus. Ce sont globalement des individus « extrêmement satisfaits » de leur cadre de vie et de leur quartier (espaces verts, équipements, pollution) car leurs réponses se positionnent systématiquement aux extrémités de l'échelle d'accord mais cette fois pour exprimer leur satisfaction vis-à-vis du quartier. Ces personnes habitent dans une maison de ville avec jardin et sont extrêmement satisfaites de leur logement. Elles sont légèrement gênées par le passage du tramway fenêtres ouvertes.

Figure 119 : classes d'individus déterminées par la classification ascendante hiérarchique



Donc, trois groupes se distinguent nettement d'après leurs réponses concernant le quartier et le cadre de vie (Figure 119). Deux classes à faibles effectifs, assez éloignées du centre de gravité, opposent les personnes extrêmement satisfaites de leur quartier et de leur cadre de vie à celles qui ne le sont pas du tout. Dans ces deux groupes une des variables qui décrit les individus est la gêne due au bruit du tramway au passage. Enfin, la classe contenant plus de la moitié de l'effectif total est assez hétérogène. On peut néanmoins conclure que ce sont globalement des personnes satisfaites de leur quartier et de leur cadre de vie (tableau 39).

Tableau 41 : note de gêne et « cadre de vie »

Groupes ACM « Cadre de vie »	Moy.	Écart type	N
« Très insatisfaits »	5,83	2,40	65
« Satisfaits »	4,33	2,43	242
« Très satisfaits »	3,55	2,21	58

Il y a un effet de la variable « opinion sur le quartier et le cadre de vie » sur la note de gêne tramway à 1 %. Les moyennes entre les riverains « très insatis-

faits » de leur cadre de vie vs « modérés » ainsi qu'entre les « très insatisfaits » vs « très satisfaits » de leur cadre de vie sont significativement différentes à 5 %.

3.4.3.5. La variable « image du tram »

La variable « image du tramway » (Tableau 42) a été construite à partir des questions sur les opinions vis-à-vis de la ligne de tramway et leur évolution :

Q.16 : Lorsque vous avez emménagé dans ce logement, le tramway passait-il déjà ?

OUI : **Q.17** : Au moment où vous êtes arrivé dans ce logement, le tramway était pour vous ?

Q.18 : Depuis votre installation dans ce logement avez-vous changé d'avis concernant la présence du tramway ?

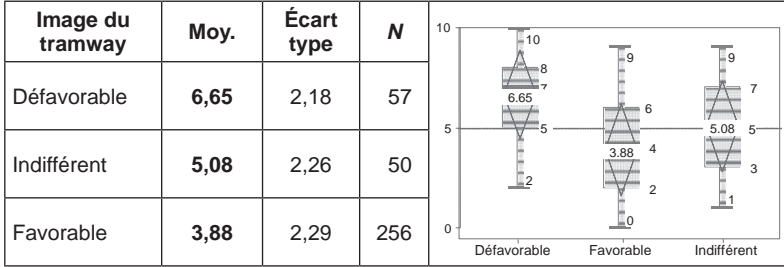
NON : **Q.19** : Lorsque vous avez appris que le tramway allait passer devant chez vous, vous étiez ?

Tableau 42 : constitution des trois groupes « image du tram »

Groupes	Q16	Q17	Q18	Q19
« Les favorables » 261 individus	Oui Oui Oui Non	Plutôt un avantage Ni un avantage, ni un inconvénient À la fois un avantage et un inconvénient	Non, je n'ai pas changé d'avis Oui, je pense désormais qu'il s'agit plutôt d'un avantage Oui, je pense désormais qu'il s'agit plutôt d'un avantage	Favorable au projet
« Les défavorables » 57 individus	Oui Oui Oui Oui Non	Plutôt un avantage Plutôt un inconvénient Ni un avantage, ni un inconvénient À la fois un avantage et un inconvénient	Oui, je pense désormais qu'il s'agit plutôt d'un inconvénient Non, je n'ai pas changé d'avis Oui je pense désormais qu'il s'agit plutôt d'un inconvénient Oui je pense désormais qu'il s'agit plutôt d'un inconvénient	Défavorable au projet
« Les indifférents » 50 individus	Oui Oui Oui Oui Non	Plutôt un avantage Ni un avantage, ni un inconvénient À la fois un avantage et un inconvénient À la fois un avantage et un inconvénient	Oui, je pense désormais qu'il ne s'agit pas plus d'un avantage que d'un inconvénient Non, je n'ai pas changé d'avis Oui, je pense désormais qu'il ne s'agit pas plus d'un avantage que d'un inconvénient Non, je n'ai pas changé d'avis	Sans opinion par rapport au projet

Globalement, il y a un effet de la variable « image du tramway » sur la note de gêne à 1 %. Les moyennes des trois groupes sont significativement différentes entre elles à 5 %.

Tableau 43 : note de gêne et « image du tramway »

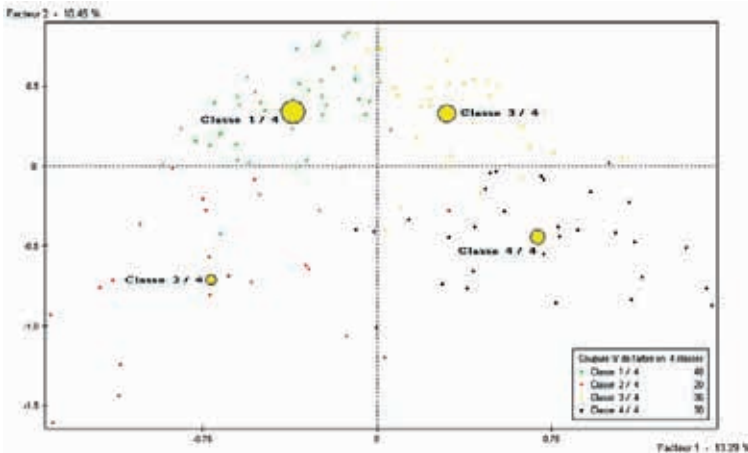


Pour les riverains qui ont vécu l’installation du tramway

Une attention particulière a été portée sur le groupe de riverains qui ont vécu l’arrivée du tramway dans leur quartier. L’existence d’un lien entre l’avis des riverains vis-à-vis du projet d’installation d’une ligne de tramway (Tableau 40), leurs réponses pour différents items décrivant l’évolution du quartier depuis son introduction (Tableau 41) et leur opinion sur l’évolution globale du quartier (Tableau 42) a été testée. Une autre analyse factorielle des correspondances multiples a été réalisée à partir de ces 9 variables actives. Elle porte uniquement sur les riverains résidant dans leur logement avant la mise en place du tramway soit 134 personnes.

Les deux premiers axes expliquent 23,7 % de l’inertie. Les 15 premiers axes factoriels sont conservés pour effectuer la classification ascendante hiérarchique. La meilleure partition compte tenu de la taille du sous-échantillon est celle en 4 classes (Figure 120).

Figure 120 : classes d’individus déterminées par la classification ascendante hiérarchique (CAH)



La première classe est constituée de 48 personnes soit 35,8 % des individus qui ont vécu l'arrivée du tramway dans leur rue. Ce sont globalement des individus « modérément satisfaits » par la venue du tramway (réponses modérées). Ils étaient favorables au projet d'introduire une ligne de tramway. Ils considèrent que leur quartier s'est amélioré : l'introduction du tramway a embelli les rues de leur quartier, elles sont moins polluées qu'avant. Cependant, le tramway a rendu les déplacements à vélo plus difficiles et les rues plus bruyantes.

La deuxième classe est constituée de 20 individus seulement, soit 14,9 % de notre sous-échantillon de riverains installés dans leur logement avant l'installation de la ligne de tramway. Ces individus sont « extrêmement satisfaits » de l'introduction du tramway dans leur quartier. Ils sont tout à fait d'accord pour dire que l'introduction du tramway facilite les déplacements (vélo, à pieds), embellit les rues en les rendant également moins bruyantes et moins polluées qu'avant.

36 individus composent **la troisième classe** soit 26,9 %. Ce sont des individus « modérément mécontents » vis-à-vis du tramway (opinions mitigées). Ils sont tout à fait d'accord pour dire que leur rue est plus bruyante et plus polluée qu'avant. Même si ils n'avaient aucune opinion particulière par rapport à l'introduction de la ligne de tramway, ils constatent que les déplacements à pieds et en vélo sont devenus plus difficiles.

La dernière classe est composée de 30 personnes soit 22,4 %. Ce sont des individus « extrêmement mécontents » de l'arrivée du tramway dans leur rue. Ce dernier a dégradé leur quartier et rendu les déplacements plus difficiles quel que soit le mode de transport (vélo ou voiture). Ils étaient défavorables au projet d'installation du tramway.

Quatre groupes se distinguent nettement d'après leurs réponses concernant l'évolution du quartier depuis l'introduction du tramway. Les quatre classes sont assez éloignées du centre de gravité. Elles opposent les personnes extrêmement et modérément satisfaites à des personnes extrêmement et modérément insatisfaites. Une limite de cette analyse est qu'elle repose sur un petit échantillon et par conséquent les classes qui en découlent ont de faibles effectifs. Il n'est donc pas possible de tester si la note moyenne de gêne est différente entre les 4 groupes.

3.4.4. Conclusion concernant la gêne due au bruit du trafic de tramways

Le L_{Aeq} , indice acoustique qui moyenne l'exposition au bruit, n'est pas un descripteur adapté à la gêne due au bruit du trafic de tramway. Il paraît plus pertinent de considérer l'exposition au bruit du trafic de tramway comme la répétition d'un événement particulier, en combinaison avec les autres sources extérieures de bruits principalement ici le bruit de la circulation routière.

Lorsque le tramway circule dans une rue où la circulation routière est également présente, les riverains sont en situation de multi exposition sonore. Dans ce cas-là, nos résultats conformément à ceux de travaux antérieurs [60] ont montré que la gêne due à une source de bruit particulière, en l'occurrence ici le tramway, peut être affectée par la présence d'autres sources de bruit. La gêne due au bruit du trafic tramway associe la gêne ressentie au passage du tramway et le nombre

passage du tramway avec la gêne due à la circulation routière qui serait un élément « facilitateur ».

Toutes les recherches sur la gêne due au bruit indiquent que les facteurs acoustiques n'expliquent que partiellement la gêne exprimée. Les modèles exposition/gêne donnent le risque d'être gêné pour un individu moyen, mais des variables non acoustiques (Tableau 44) viennent moduler l'expression de la gêne.

Tableau 44 : variables « non acoustiques » modulant l'expression de la gêne due au bruit du tramway

Variables influençant la gêne	Modalités pour lesquelles les notes de gêne diffèrent
Sensibilité au bruit	« Pas du tout » / « Très sensible »-« Assez sensible »- « Un peu sensible »
Sentiment d'habitude au bruit du tram	« Habitué » / « Non habitué »
Usage du tramway	« Souvent » / « Jamais »
Image du tram	« Défavorable » / « Indifférent » / « Favorable »
Satisfaction vis-à-vis du cadre de vie	« Très insatisfaits » / « Modérés » « Très insatisfaits » / « Très satisfaits »

Conformément aux résultats obtenus dans des recherches précédentes [61] les variables socio-démographiques n'ont pas d'effet sur la variabilité de la note de gêne. Les variables qui modulent l'expression de la gêne dans notre recherche comme la « sensibilité au bruit », l'attitude vis-à-vis de la source de bruit, liée à son utilité avec l'« usage du tram », et l'importance qui lui est accordée de manière plus générale, l'« image du tram », sont classiquement citées dans la littérature [62]. Mais, en zone urbaine où les types de quartier et d'habitat sont variés, la « satisfaction vis-à-vis du cadre de vie », vient également influencer l'expression de la gêne ressentie.

Les autres sources de bruit gênantes au domicile

Le tramway s'insère en milieu urbain, il n'est donc pas la seule source de bruit existante. À ce titre, le questionnaire abordait également les autres sources de bruit perceptibles au domicile en termes de description mais aussi de gêne.

La source dominante citée par les riverains est « les deux roues motorisées » avec une personne sur deux qui se déclarent « extrêmement » à « beaucoup » gênées. Le Tableau 45 donne la répartition des personnes concernées, selon le niveau de gêne ressentie, pour les principales sources citées.

Les individus devaient évaluer plus spécifiquement la gêne due au bruit de la circulation routière. Si l'on aborde ce bruit dans sa globalité (Tableau 46), on remarque que sur 24 heures, l'échantillon se divise en deux ; une moitié se dit « pas du tout »/« légèrement » gênée et l'autre moitié au moins « moyennement » gênée. La soirée, comme pour la gêne due au bruit du tramway, reste le moment de la journée le plus sensible au bruit de la circulation, avec près d'une personne sur deux qui est au moins « moyennement » gênée.

Tableau 45 : répartition en fonction du niveau de gêne due à d'autres sources de bruit que le tramway

	Extrême- ment	Beau- coup	S/T Ext/Bcp	Moyen- nement	Légère- ment	Pas du tout	S/T Léger/ Pas
2 roues motorisées (base : 356 ind.)	17 %	32 %	49 %	20 %	19 %	12 %	31 %
Camions (base : 317 ind.)	3 %	16 %	19 %	19 %	24 %	38 %	62 %
Voisins (base : 334 ind.)	4 %	11 %	15 %	10 %	14 %	61 %	75 %
Voisinage (base : 340 ind.)	2 %	8 %	10 %	13 %	16 %	61 %	77 %
Avions (base : 317 ind.)	1 %	4 %	5 %	15 %	21 %	59 %	80 %
Activités de loisirs (base : 231 ind.)	1 %	3 %	4 %	4 %	5 %	87 %	92 %

Tableau 46 : répartition selon le niveau de gêne due au bruit de la circulation automobile selon les différents moments de la journée

	Extrême- ment	Beau- coup	S/T Ext/Bcp	Moyen- nement	Légère- ment	Pas du tout	S/T Léger/ Pas
Matin	2 %	16 %	18 %	22 %	30 %	29 %	59 %
Jour	2 %	12 %	14 %	27 %	28 %	31 %	59 %
Soirée	4 %	21 %	25 %	22 %	24 %	29 %	53 %
Nuit	2 %	8 %	10 %	16 %	26 %	48 %	74 %
Journée de 24 h	1 %	10 %	11 %	34 %	27 %	26 %	54 %

Base : 365 individus

4. Conclusions et perspectives

Dans le cadre de cette étude de la perception du bruit du tramway, 370 riverains des 3 lignes de tramway de la ville de Nantes ont été interrogés. Ils occupaient tous un logement dont au moins une façade donnaient directement sur la ligne de tramway.

Les résultats de l'enquête [63] ont permis d'établir :

- 62,5 % des personnes constituant l'échantillon ont emménagé dans leur logement alors que le tramway passait déjà dans la rue. Pour 76 % d'entre elles la proximité de la ligne de tramway était plutôt un avantage, ceci est sans doute à mettre en relation avec le fait que plus d'une personne sur deux utilise le tramway au moins « 1 à 5 fois par semaine ».

- Les avis des 37,5 % des riverains qui habitaient leur logement avant la mise en circulation du tramway, concernant les changements du quartier sont très partagés. Notamment, 66 % ne sont pas d'accord avec l'affirmation qu'« il y a moins de pollution et d'odeurs qu'avant », et 69 % ne sont pas d'accord avec celle que « leur rue est moins bruyante qu'avant ».
- Le bruit du tramway, avant d'être gênant, est présent ; seules 4 % des personnes interrogées ne l'entendent jamais. Près de 9 personnes sur 10 l'entendent « assez souvent » à « tout le temps » « fenêtres ouvertes », et plus de la moitié « fenêtres fermées ». Globalement, si on ne retient que les adjectifs sur lesquels se concentrent les 2/3 des réponses, le bruit du tramway, « fenêtres ouvertes », est caractérisé de fort (le mode de la distribution des réponses est : « très »), habituel (mode : « assez ») et proche (mode : « assez »). De même les deux mots qui le décrivent le mieux sont roulement et grondement.
- Au passage du tramway, lorsque les fenêtres sont ouvertes, plus de la moitié de l'échantillon se déclare extrêmement ou beaucoup gênée avec en corollaire des comportements comme « souvent fermer la fenêtre » (47 % de citations) et « souvent monter le son de la télévision » (29 % de citations).
- Un jour normal de la semaine, et sur 24 heures, 47 % de l'échantillon est au moins « moyennement gêné » par le bruit de la circulation des tramways. Globalement, en pensant aux différentes périodes de l'année et de la journée, 54 % des personnes interrogées se disent au moins « moyennement gênées » par le bruit de la circulation des tramways. La note moyenne de gêne est de 4,5 sur une échelle de 0 à 10. Les deux causes principales de gêne citées dans le fait d'habiter à proximité d'une ligne de tramway sont « l'intensité du bruit au passage » et « le nombre de passage de tramway ».
- Le tramway n'est pas la seule source de bruit à l'origine de la gêne. Globalement, 53 % des personnes interrogées se déclarent au moins « moyennement gênées » par le bruit de la circulation automobile, et la note de gêne moyenne (4,3) est comparable à celle attribuée à la gêne due au bruit du tramway.

Une relation exposition/ gêne a été établie entre la gêne au passage du tramway et les différents indices acoustiques qui caractérisent le bruit au passage (L_{Amax} , L_{Aeq} passage et SEL). Le pourcentage d'individus « très gênés » augmente en fonction du « niveau sonore ». Les modèles univariés établis uniquement sur la base de ces indices acoustiques se sont révélés insuffisants pour prévoir le risque d'être gêné par le bruit au passage du tramway. L'introduction de variables descriptives du bruit a grandement amélioré le pouvoir explicatif des modèles. Il paraît donc important de considérer l'exposition au bruit en terme de niveau, mais aussi en intégrant les composantes fréquentielles. En effet, cela permettrait de prendre en compte des facteurs aggravants de la gêne comme par exemple les situations où il y a des grincements ou des crissements.

La gêne dite de « long terme », attribuée au bruit du trafic de tramway n'a pas pu être expliquée par des indices acoustiques (L_{Aeq} , LDEN) qui moyennent le bruit dû aux tramways circulant au cours d'une période de la journée ou sur 24 heures. L'établissement d'un modèle perceptuel à partir de variables issues des réponses au questionnaire indique que pour comprendre la gêne due au bruit du trafic de tramways, l'environnement dans lequel circule le tramway doit être aussi considéré. Les riverains des lignes de tramways à Nantes sont, dans la majorité des sites, en situation de multi exposition sonore. Le modèle perceptuel a montré que la gêne due au bruit du trafic de tramway est une accumulation de gêne ressentie au passage du tramway en lien avec la gêne due au bruit de la circulation routière. Dans notre échantillon la gêne due au bruit de la circulation routière vient ainsi aggraver la gêne due au bruit du tramway.

Avant d'obtenir des modèles prédictifs de la gêne due au bruit des tramways certains points méritent d'être approfondis :

- L'exposition au bruit au passage du tramway demande une description détaillée d'un point de vue acoustique afin d'obtenir un indice qui synthétise à la fois le niveau mais aussi les caractéristiques fréquentielles.
- La fréquence de passages des tramways n'a pas pu être exploitée dans cette recherche car elle ne présentait pas de variabilité sur les 3 lignes étudiées. Il semble toutefois important de pouvoir traduire dans un modèle prédictif l'accumulation de gêne événementielle (au passage du tramway), et tester l'hypothèse d'un seuil de fréquence de passages « acceptable ».
- En zone urbaine, il paraît inopportun de vouloir appréhender l'exposition à une seule source de bruit. La « contamination » entre la gêne due au bruit du tramway et la gêne due au bruit de la circulation routière a été établie dans cette recherche. Il reste à mieux caractériser le type d'interférences en termes de contamination (facilitation, inhibition) ou d'indépendance en fonction du type de situation sonore.
- Enfin, l'environnement dans lequel circule le tramway est un élément important pour les riverains. Le niveau de satisfaction vis-à-vis du quartier en termes d'aménagements, d'équipements et de qualité de l'air vient moduler l'expression de la gêne due au bruit du tramway. Les riverains se déclarent d'autant moins gênés par le bruit dû au tramway qu'ils sont satisfaits de leur cadre de vie.

Bilan : de l'émission à la perception

Cette recherche a proposé deux approches complémentaires du bruit et des vibrations engendrés par la circulation des tramways :

- une approche physique, qui a permis une caractérisation fine du bruit et des vibrations émis par le tramway ;
- une approche psychosociologique qui s'est intéressée à la perception de ces bruits et vibrations et à l'évaluation de la gêne qu'ils peuvent provoquer chez les riverains.

Ce chapitre dresse le bilan de ces deux approches : il propose des éléments qui précisent les données d'entrée utiles ou accessoires dans les logiciels de prévision du bruit du tramway afin de fournir des indicateurs acoustiques qui aient la meilleure adéquation possible avec le bruit perçu au passage du tramway. Il propose également une réflexion sur l'intérêt de reconsidérer la réglementation en matière de bruit des infrastructures et de vibrations propagées dans le sol, applicable aux tramways circulant sur rails en milieu urbain.

1. Contribution des sources

L'analyse conjointe des réponses au questionnaire et des niveaux d'exposition au bruit a montré l'insuffisance des indicateurs acoustiques classiques, rendant compte essentiellement de l'intensité du bruit, pour prédire le risque d'être gêné au passage du tramway.

La qualification du bruit du tramway par les riverains interrogés diffère en fonction des conditions d'exploitation. Ces dernières peuvent engendrer des situations plus gênantes décrites par les termes « grincement » ou « crissement », par exemple dans les sites en virage, correspondant plutôt à des bruits riches en fréquences élevées, ou au contraire par le terme « grondement » caractérisé notamment par la présence de fréquences basses.

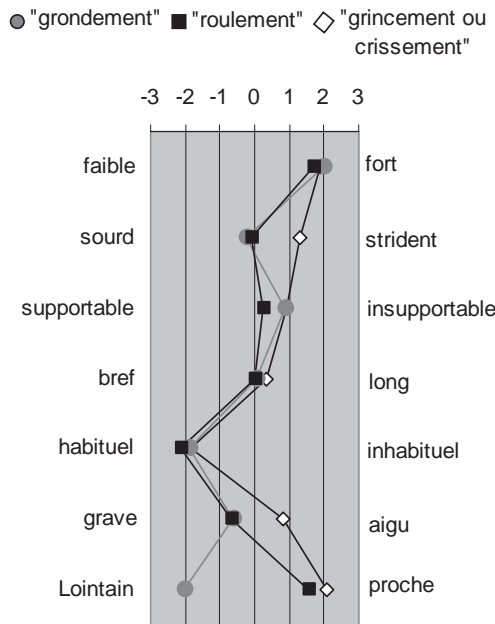
Une analyse des descriptions faites du bruit du tramway selon qu'il soit en priorité qualifié de « roulement », « grondement » ou « grincement/crissement » (Figure 121) montre que si les différences en ce qui concerne l'intensité du bruit (faible/fort) paraissent négligeables, d'autres caractéristiques au contraire semblent associées à ces différents termes :

- « grincement/crissement » implique un bruit plutôt « strident » et « aigu » ;
- « grondement » fait plutôt référence à un bruit qualifié de « lointain » ;
- « roulement » est associé à un bruit défini comme plus « supportable ».

Cependant la démarche employée et les mesures disponibles ne permettent pas de relier objectivement les dénominations du bruit, citées par les personnes enquêtées, avec les caractéristiques fréquentielles du bruit chez le riverain, *a fortiori* avec des sources particulières ou des phénomènes physiques bien identifiés (roulement/grondement/crissement). Cette association nécessiterait notamment une étude psycho-acoustique complémentaire.

En revanche, les modèles explicatifs de la gêne au passage ont montré l'importance des caractéristiques fréquentielles du bruit dans la gêne ressentie, vraisemblablement renforcée par l'existence de raies (ou fréquences pures). C'est pourquoi les développements qui suivent mettent en exergue non seulement les contributions des sources dans le bruit global, mais soulignent aussi les aspects fréquentiels des bruits émis.

Figure 121 : qualificatifs associés par les riverains enquêtés aux bruits de « roulement », « grondement » et « grincement ou crissement »



Le bruit auquel sont exposés les riverains résulte de la combinaison d'un bruit qui se propage par voie aérienne (bruit aérien), et de vibrations transmises au sol puis aux bâtiments et régénérées sous forme de bruit (bruit solidien). En raison des propriétés et des caractéristiques physiques des milieux de propagation, il comporte une composante basse fréquence (inférieure à 200 Hz), qui inclut notamment le bruit solidien, et une composante plutôt riche en moyennes et hautes fréquences caractéristique du bruit aérien.

Les différentes sources de bruit identifiées lors des mesures sur les tramways présentent des caractéristiques fréquentielles distinctes. Par ailleurs certains paramètres liés soit aux conditions de circulation (vitesse), soit au matériel roulant (type de rame), soit à l'infrastructure (pose de voie, revêtement), influencent ces caractéristiques fréquentielles. La description qui suit s'attache à préciser l'influence de ces paramètres sur les différents types de bruit émis, en soulignant les aspects fréquentiels. Il convient de noter que les analyses qui ont précédé n'ont pas toujours permis de séparer certaines contributions (par exemple le type de pose de voie et le revêtement de la plate-forme dans les bruits de roulement). Les développements complémentaires nécessaires seront précisés le cas échéant.

1.1. Bruit de roulement

Le bruit de roulement est la composante prépondérante du bruit au passage d'un tramway, le nombre total de roues de la rame conduisant à renforcer sa participation au bruit total. Il est provoqué par les irrégularités de surface des roues et du rail, qui interagissent dans la zone de contact. Les vibrations générées se propagent dans la plate-forme, le rail et les roues, qui rayonnent alors et donnent naissance aux différentes composantes du bruit de roulement. Chaque contribution prédomine dans une gamme de fréquence spécifique, et les caractéristiques mécaniques de la voie et du matériel roulant influencent le comportement global du bruit de roulement.

Les composantes basses fréquences sont imputables prioritairement à la pose de voie et à la plate-forme associée. Le rayonnement du rail prédomine aux fréquences moyennes. Pour permettre une atténuation suffisante des vibrations le long du rail, il est préférable de privilégier une fixation rigide du rail sur son support²⁹. Le rayonnement des roues intervient aux fréquences élevées, correspondant notamment aux fréquences de résonance des roues. La réduction du rayonnement repose alors sur la conception de roues optimisées, par exemple équipées de dispositifs absorbant les vibrations. Enfin, un entretien régulier des rails et des roues (meulage) garantit une faible rugosité des bandes de roulement, condition nécessaire pour réduire l'excitation.

Les éléments observés lors de la campagne de mesures procurent des indications sur les tendances relatives au bruit de roulement. À faible vitesse, on peut distinguer schématiquement deux gammes de fréquences disjointes contribuant au bruit de roulement : les basses fréquences (au-dessous de 160 Hz) présentant un niveau de bruit qui reste modéré, et les fréquences plus élevées (approximativement de 200 à 2500 Hz) qui apportent la plus grande contribution, avec toutefois des spécificités propres au type de rame et à la pose de voie (voir § 1.1.1 à 1.1.3 ci-dessous). Il existe cependant dans tous les cas une contribution plus réduite pour une fréquence commune caractéristique (tiers d'octave 800 Hz).

Les paragraphes suivants décrivent les effets des paramètres vitesse, pose de voie/revêtement, et type de rame sur les caractéristiques fréquentielles du bruit de roulement.

²⁹ En contrepartie les vibrations propagées dans la plate-forme ne sont pas atténuées (voir § 1.4).

1.1.1. Effet vitesse

Comme cela vient d'être rappelé, les rugosités respectives des bandes de roulement des roues et des rails sont l'élément essentiel à l'origine du bruit de roulement. Ces rugosités sont caractérisées par la dimension et l'amplitude des irrégularités, exprimées au moyen du spectre de rugosité. Au passage d'une roue, ce spectre spatial se traduit par un spectre fréquentiel qui caractérise l'excitation au point de contact. Un doublement de la vitesse implique un glissement du spectre d'excitation d'une octave vers les fréquences plus élevées. Or, en pratique, on n'observe pas de glissement de spectre sur les bruits de roulement mesurés. Ceci conduit à penser que la variété des phénomènes intervenant dans la génération du bruit de roulement se manifeste par des effets plus complexes de la vitesse sur le spectre acoustique. Le manque d'informations disponibles sur la rugosité des rails et du matériel ne permet pas d'approfondir l'analyse sur ce point.

Avec l'accroissement de la vitesse, on constate que les spectres de bruit de roulement sont davantage renforcés aux fréquences élevées qu'aux fréquences basses. Ceci se manifeste de façon distincte pour les deux types de rame : renforcement du spectre dès les fréquences moyennes et aux fréquences hautes (à partir de 500 Hz) sans changement notable aux basses fréquences sur l'une des rames, accroissement du spectre à toutes les fréquences et plus accentué aux moyennes et hautes fréquences (à partir de 500 Hz) pour l'autre rame. Par ailleurs la vitesse tend à « gommer » les irrégularités des spectres observées aux basses vitesses, pour donner une répartition fréquentielle plus régulière.

En résumé, la vitesse se traduit essentiellement par un renforcement du bruit de roulement aux moyennes et hautes fréquences. Des différences d'effet de la vitesse sont constatées entre les types de rame.

1.1.2. Effet pose de voie et revêtement

Les caractéristiques mécaniques de la voie (raideurs, masses...), liées au choix de la pose de voie, sont primordiales pour les vibrations induites au point de contact roue/rail et leur propagation (atténuation) dans le rail. Le choix du revêtement intervient davantage au niveau du rayonnement et de la propagation jusqu'au récepteur. Rappelons que les caractéristiques des sites étudiés ici ne permettent pas de séparer les effets respectifs de la pose et du revêtement dans le bruit de roulement. Ils sont donc considérés globalement, sachant que la pose *a priori* la moins bruyante est associée, dans le cadre de cette étude, au revêtement le plus absorbant : les effets convergent.

Outre les paramètres mécaniques de la voie, l'état de surface (rugosité) des rails est essentiel. Rappelons que pour cette étude, la rugosité n'est connue que très partiellement dans le domaine associé au bruit de roulement ; l'état des rails peut *a priori* être considéré comme satisfaisant.

L'étude a montré que le bruit de roulement est globalement moindre sur le site en pose classique, associé à un revêtement gazon, que sur le site équipé de semelles souples et doté d'un revêtement pavé. Les différences entre sites se manifestent essentiellement à partir de 400 Hz : le site anti-vibratile pavé est

nettement plus bruyant sur l'ensemble de la gamme des moyennes et hautes fréquences. Cet écart est plus prononcé quand la vitesse est plus élevée. Inversement aux très basses fréquences, le site en pose classique engazonnée peut se révéler légèrement plus bruyant ; cette dernière remarque doit être relativisée en soulignant que la contribution des très basses fréquences dans le bruit total est faible.

En résumé, le bruit de roulement se caractérise par une présence plus prononcée des moyennes et hautes fréquences pour le site doté d'une pose anti-vibratile par semelle résiliente, et revêtement réfléchissant. Ce type de pose, impliquant une fixation plus souple du rail, réduit notamment l'atténuation des ondes de vibration dans le rail et conduit à une plus grande contribution du rayonnement du rail dans le bruit de roulement.

1.1.3. Effet rame

A pose de voie donnée, le type de rame introduit des spécificités quant à l'allure générale du spectre du bruit de roulement ; il induit également des différences sur l'effet de la vitesse (voir § 1.1.1). Les deux types de rame étudiés proviennent de générations distinctes de matériel roulant et sont équipés d'un nombre différent de bogies : le bruit de roulement décrit ici s'entend par bogie, et non globalement pour la rame. La rugosité des roues n'a pas été relevée ; leur état est cependant considéré comme satisfaisant.

Toutes choses égales par ailleurs, le bruit de roulement lié au passage d'un bogie de la rame de première génération (rame « A ») présente un spectre plus riche en basses fréquences (jusqu'à 400-500 Hz environ) et en hautes fréquences (au-delà de 1600 Hz), alors que la rame de génération récente (rame « B ») s'impose aux moyennes fréquences. Ceci se traduit par un spectre plus étalé en fréquence pour la rame A, et plus concentré autour des fréquences moyennes pour la rame B.

Certains riverains sont exposés, sur une même ligne, à la circulation des deux types de matériel roulant étudiés. Lors des entretiens, ils n'ont jamais exprimé de différence quant à leur perception du bruit des deux types de rame. Les mesures indiquent que les bruits de roulement émis ont des niveaux globaux comparables mais que leur contenu spectral diffère sensiblement. Ceci concerne également les bruits de traction.

1.2. Bruit de traction

De façon globale pour une rame, le bruit de traction, correspondant au bruit en provenance des moteurs et des auxiliaires (hacheur, onduleur...) liés à la traction, reste faible devant le bruit de roulement sur les sites dont les caractéristiques de pose de voie et de rugosité entraînent un fort bruit de roulement. En revanche, il doit être pris en compte dans les cas où le bruit de roulement est plus modéré. Sa contribution globale peut accroître le bruit total de 2 à 3 dB(A) ; elle diffère en fonction du type de rame et de la vitesse. Toutefois les écarts peuvent être bien supérieurs à certaines fréquences.

Les moteurs de traction sont situés au voisinage des bogies. En fonction des choix technologiques des constructeurs, le nombre et la position des moteurs sur les bogies peuvent varier. Certains équipements directement associés à la traction peuvent y être adjoints. En raison de la proximité de ces différents éléments et des roues, la séparation des différentes sources au niveau même des bogies moteurs n'a pu être réalisée. Cependant l'analyse comparative des bogies moteurs et porteurs permet d'extraire des informations relatives à la traction.

Le bruit associé à la traction se traduit par des caractéristiques fréquentielles qui peuvent être ou non liées au régime de fonctionnement du moteur. Il peut s'agir de raies fréquentielles, qui sont dépendantes du fonctionnement du moteur, ou de composantes qui contribuent dans une gamme de fréquences plus large (tiers d'octave).

Le type de pose de voie n'intervient pas, bien évidemment, dans le bruit de traction. En revanche, le choix du revêtement de surface, de par sa nature plus ou moins absorbante, peut affecter la propagation jusqu'au récepteur.

Le type de rame est bien sûr déterminant pour les caractéristiques du bruit de traction, en particulier la répartition fréquentielle. Les rames analysées dans cette étude sont de générations différentes, et sont équipées de technologies distinctes. Elles présentent suivant les cas des composantes fréquentielles plus ou moins étalées en fréquence.

L'effet de la vitesse dépend des caractéristiques de la traction ; il est abordé en même temps que le type de rame :

a) rame de première génération, équipée de moteurs à courant continu

Il s'agit ici d'un type de rame à plancher mixte, comportant un moteur à courant continu par bogie moteur, alimenté par un hacheur. Le bruit associé à la traction au niveau des bogies moteurs est caractérisé par un spectre large bande, auquel se superposent quelques raies de fréquence variable avec la vitesse : d'une part aux basses fréquences (inférieures à 200 Hz) aux basses vitesses uniquement, d'autre part à fréquence plus élevée (env. 1060 Hz à 40 km/h). La contribution de ces raies peut différer d'un bogie moteur à l'autre.

b) rame de génération récente, équipée de moteurs asynchrones

La rame, à plancher bas intégral, est équipée de moteurs-roues, soit 4 moteurs asynchrones pour chaque bogie moteur. Le bruit associé présente deux caractéristiques essentielles. On observe d'une part une raie spectrale dont la fréquence est directement liée à la vitesse (env. 2060 Hz à 40 km/h). D'autre part on constate une forte contribution en haute fréquence (notamment le tiers d'octave 4000 Hz), qui n'est pas associée à une raie mais présente un étalement en fréquence ; cette contribution reste de niveau constant avec la vitesse.

En résumé, les caractéristiques du bruit de traction sont directement liées au type de matériel roulant. Ce bruit se distingue notamment par la présence de raies de forte amplitude, qui glissent vers les hautes fréquences lorsque la vitesse est plus élevée. Les spectres des deux types de rames étudiés diffèrent sensiblement.

1.3. Bruit des auxiliaires

L'hypothèse avait été émise que les auxiliaires, lorsqu'ils sont installés en toiture, pouvaient se révéler gênants pour les riverains occupant les étages des habitations, en raison d'une directivité plus prononcée vers le haut, sachant que les sources de bruit proches du sol (particulièrement le bruit de roulement) ont une directivité davantage orientée latéralement. Les mesures au passage n'ont révélé qu'une faible contribution des sources en toiture, lorsque la climatisation est arrêtée.

Une analyse de la climatisation en régime forcé maximal, mesurée à l'arrêt, a permis d'estimer que l'augmentation du bruit maximum vers les grandes hauteurs pouvait atteindre 3 dB(A) en champ libre, dans le cas d'un passage à faible vitesse (20 km/h) et d'une plate-forme classique produisant un bruit de roulement limité. Dans le cas étudié, le bruit de climatisation consiste essentiellement en une raie à 290 Hz, à laquelle s'ajoutent quelques harmoniques et raies d'amplitudes plus réduites.

En résumé, la climatisation peut contribuer de façon non négligeable au bruit vers les étages des habitations, aux faibles vitesses. Lors de l'enquête, les bruits de climatisation n'ont pas été cités par les riverains. Ceci peut s'expliquer par le fait qu'une partie seulement des rames du réseau nantais est équipée de systèmes de climatisation, ceux-ci fonctionnant de façon temporaire.

1.4. Bruits solidiens

En plus du bruit se propageant par voie aérienne, une partie du bruit basses fréquences présent à l'intérieur des bâtiments proches d'une ligne de tramway est due à la régénération de vibrations en provenance de la voie et propagées dans le sol. Beaucoup de paramètres influent sur ce bruit solidien, paramètres que l'on peut associer aux différents phénomènes suivants :

- génération des vibrations aux contacts roue/rail ;
- atténuation vibratoire due à la plate-forme ;
- propagation dans le sol ;
- régénération dans le bâtiment.

Dans le cadre de cette étude, seuls les trois premiers phénomènes ont été étudiés. Les conclusions données ci-dessous concernent donc les effets conjugués des paramètres relatifs à ces trois phénomènes sur les vibrations au pied des habitations.

De manière générale, la transmission de vibrations dans le sol est significative dans une gamme de fréquence située autour de 40-140 Hz. Dans cette gamme, ce sont les irrégularités de surface des roues et des rails (rugosités) qui sont en grande partie responsables des vibrations de la voie et du véhicule, en particulier autour de deux fréquences de résonance situées autour de 65-80 Hz et 100-125 Hz. Ce spectre d'excitation est ensuite filtré par l'atténuation de la voie et la propagation dans le sol.

1.4.1. Effet vitesse

La vitesse du tramway joue un rôle au niveau du spectre d'excitation. En effet, comme pour le bruit de roulement, une augmentation de la vitesse implique un glissement du spectre d'excitation vers les hautes fréquences. Les écarts de vibrations peuvent ainsi atteindre ponctuellement 7 à 8 dB dans certains tiers d'octave pour des vitesses comprises entre 20 et 50 km/h. Toutefois cet effet n'est pas monotone dans la mesure où le spectre de rugosité ne l'est pas non plus. Ainsi, en niveau global, les écarts sont beaucoup plus faibles et souvent inférieurs à 3 dB. La vitesse ne peut donc pas être considérée comme un facteur déterminant.

1.4.2. Effet rame

L'effet du type de rame est significatif puisque des écarts vibratoires de 5 dB ont été relevés en moyenne entre les deux types de rame. Il semble que ces écarts soient liés principalement à la conception de l'essieu. Autour de la première fréquence de résonance notamment, un accroissement des masses non suspendues (essieu monté) augmente les niveaux de vibrations sur le rail. Cette différence de masse influe également sur les fréquences de résonance voie/essieu et explique les différences de spectres vibratoires entre les deux rames.

1.4.3. Effet pose de voie

La pose de voie est, de toute évidence, un paramètre primordial au niveau de l'atténuation des vibrations entre le rail et le sol. L'efficacité d'une pose de type dalle flottante a notamment été confirmée et les niveaux d'atténuation prescrits par le constructeur semblent atteints (-20 dB à 63 Hz). En revanche, aucune conclusion n'a pu être tirée concernant la pose sur semelle souple, compte tenu des incohérences apparues lors des mesures.

1.4.4. Effet sol

Le sol joue également un rôle important au niveau de la propagation des vibrations. Globalement, l'étude a montré que l'atténuation géométrique est de l'ordre de 1 dB/m, tandis que l'amortissement interne induit une atténuation pouvant varier de 2 à 8 dB/m selon le type de sol. Les deux effets se conjuguent. Cette atténuation se produit plutôt à partir de 60 Hz et croît avec la fréquence. Un point important est que le sol intervient également au niveau de l'atténuation due à la plate-forme en raison du couplage voie/sol. En pratique donc, pour une même pose de voie, l'atténuation due à la plate-forme peut varier selon le type de sol.

1.5. Sources de bruit et logiciels de prévision

Les sources de bruit de roulement sont les sources prépondérantes dans le bruit émis au passage d'un tramway en ligne droite : elles constituent l'élément fondamental à prendre en compte dans les logiciels de prévision.

Les bruits de traction et ceux émis par les auxiliaires (notamment en toiture), même s'ils ne sont pas cités par les riverains enquêtés, apportent une contribution non négligeable au bruit total, en particulier dans les conditions où le bruit de

roulement est modéré. Ceci se produit par exemple lors des passages à faible vitesse, et sur des sites équipés de pose de voie et de revêtement acoustiquement favorables. À ce titre, il est important d'introduire également ces sources dans les logiciels de prévision, pour l'étude de ce type de configuration. Leur prise en compte s'avère également nécessaire, en raison des caractéristiques spectrales particulières de ces bruits, pour l'utilisation de descripteurs plus adéquats avec la gêne au passage du tramway.

Enfin, les notions de directivité verticale de chaque source doivent être introduites, chacune présentant des caractéristiques spécifiques qui modulent l'exposition au bruit des riverains en fonction de la situation de leur logement dans la rue.

Pour tenir compte des situations particulières qui n'entraient pas dans le cadre de cette étude (courbes, arrêt aux stations...), il conviendrait d'intégrer également les sources correspondantes (crissement, freinage...).

2. Gêne de long terme et réglementation

L'implantation d'une nouvelle ligne de tramway est soumise à la réglementation relative au bruit des infrastructures ferroviaires. Elle s'appuie sur le L_{Aeq} de long terme pour donner des valeurs limites admissibles. Or les résultats de cette recherche tendent à montrer que cette réglementation repose sur des indicateurs acoustiques qui ne sont pas appropriés dans le cas de tramways circulant sur rails.

L'analyse conjointe des données issues de l'enquête et des données d'exposition au bruit a mis en évidence que cet indice, qui moyenne le bruit dû à la circulation des tramways, explique insuffisamment la gêne ressentie. Il ne peut donc pas être considéré comme un descripteur acoustique pertinent de la gêne due au bruit du trafic de tramways. Un indice qui rendrait compte à la fois de l'intensité du bruit et du nombre d'événements serait plus approprié.

La réglementation propose également l'utilisation d'un terme correcteur de (-3 dB) qui permettrait d'établir une équivalence entre la gêne due au bruit routier et la gêne due au bruit ferroviaire. Il a été montré qu'à même niveau d'exposition, la gêne due au bruit ferroviaire est plus faible que celle due au bruit routier. Cet avantage pour le rail est très souvent pris en compte dans les réglementations nationales. L'analyse des données de cette étude n'a pas permis de montrer l'existence de ce « bonus ferroviaire » pour la gêne due au bruit du trafic de tramway. Plusieurs hypothèses peuvent être formulées :

- la gêne due au bruit de trafic de tramway est mal expliquée par le L_{Aeq} , et les modèles exposition/gêne basés sur cet indicateur ne sont donc pas valides. Il est par conséquent erroné de vouloir comparer ces modèles avec ceux établis pour le bruit de la circulation routière. Cela revient en effet à comparer une gêne de « dose » dans le cas de la route, qui est relativement bien expliquée par le L_{Aeq} , à un cumul de gêne « événementielle » dans le cas du tramway ;

- le tramway est un mode de transport urbain qui circule le plus souvent dans des rues où est présente la circulation routière. Les analyses ont montré que, dans cet environnement sonore complexe, la gêne due au bruit du trafic de tramways n'est pas indépendante de la gêne due au bruit de la circulation routière. Dans l'échantillon observé, une contamination entre les deux gênes a même été observée. Pour un même niveau maximum de bruit au passage du tramway, les riverains se déclarent plus gênés par le tramway dans une rue « bruyante » que dans une rue « calme ». Il est donc impossible dans ces conditions de considérer indépendamment la contribution de chaque source de bruit.

Au niveau opérationnel, il conviendra donc :

- *a minima* d'introduire dans la réglementation un niveau maximum admissible, mais pas seulement pour les périodes nocturnes comme le MEEDM³⁰ suggère de le faire dans une circulaire sur la prévention du bruit des infrastructures. La gêne ressentie au passage du tramway explique en effet en partie la gêne de long terme ;
- dans une deuxième étape, il conviendrait d'envisager une réglementation adaptée à la complexité de l'environnement sonore urbain qui ne peut être réduit à la juxtaposition de différentes sources de bruit.

Conjointement au niveau d'exposition au bruit, l'environnement dans lequel circule le tramway est également un élément important pour les riverains. Le niveau de satisfaction vis-à-vis du quartier en termes d'aménagements, d'équipements et de qualité de l'air vient moduler l'expression de la gêne due au bruit. Les riverains se déclarent d'autant moins gênés par le bruit dû au tramway qu'ils sont satisfaits de leur « cadre de vie ».

L'amélioration du « cadre de vie » apparaît donc comme une condition pour une meilleure acceptabilité du tramway. En effet, dans cette recherche, les personnes satisfaites de l'implantation d'une ligne sont également celles qui ont perçu une amélioration des conditions de déplacement à pied ou en vélo, un embellissement de leur rue, une réduction du bruit mais aussi de la pollution de l'air.

³⁰ Ministère de l'Ecologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer.

Conclusion et perspectives

L'introduction d'une ligne, et plus généralement d'un réseau de tramways, en milieu urbain conduit à des changements à la fois multiples et significatifs sur le plan environnemental : pollution de l'air locale, bruit, paysage urbain, utilisation de l'espace public (y compris congestion), etc. La dimension sonore du tramway n'est donc pas la seule dimension environnementale, mais force est de constater, notamment à la lumière de l'enquête de perception réalisée dans le cadre de ce projet, qu'elle constitue une composante importante de la qualité de l'environnement urbain.

La recherche présentée dans ce rapport a étudié à la fois la physique du bruit et des vibrations émis par les tramways, et leur perception par les riverains. Ces trois aspects ont été traités selon une démarche scientifique similaire, à savoir des campagnes expérimentales approfondies et l'élaboration de modèles. La diversité des configurations de sites et de rames étudiées, et la représentativité de l'échantillon des riverains enquêtés permettent d'élargir la portée des résultats scientifiques et de les resituer dans un contexte opérationnel et réglementaire.

1. Sur le plan de la recherche

1.1. Concernant les émissions de bruit

La connaissance des émissions de bruit des tramways, soit de façon globale (puissance et directivité), soit de façon plus fine (identification et caractérisation des différentes sources), a nécessité la réalisation de campagnes de mesures acoustiques *in situ*. Trois sites équipés de différentes catégories de pose de voie discontinue et deux rames de technologie et de génération différentes ont été mesurés. Ces campagnes ont permis de mettre en évidence le rôle essentiel des sources de bruit élémentaires situées en partie basse des rames (en particulier les bogies moteurs et porteurs, ainsi qu'une source qui s'étend sur toute la longueur de la rame), et cela quelle que soit la vitesse du tramway. Ces mesures ont aussi mis en évidence l'influence prépondérante de paramètres liés à la nature de l'infrastructure (pose de voie, revêtement) venant, dans les situations les plus pénalisantes, augmenter les niveaux sonores jusqu'à 10 dB(A) ; mais aussi l'influence de sources auxiliaires ou d'équipements électriques (climatisation – convertisseurs de traction notamment). Ces dernières, dans le cas où elles sont situées en toiture, rayonnent du bruit en direction des étages ; elles ne sont cependant significatives qu'aux faibles vitesses et sur des sites où le bruit de roulement est peu important.

À partir de ces nombreuses mesures, et de la base de données expérimentales créée à cette occasion, un modèle d'émission de bruit (TramNoise), caractérisé par le niveau de puissance, la directivité verticale et les caractéristiques fréquentielles des sources élémentaires, a pu être développé, puis validé, pour une rame de tramway circulant à vitesse constante (non prise en compte actuellement des situations de démarrage, de freinage ou de virage).

La modélisation d'une rame par sources, en comparaison de la modélisation uniforme couramment employée dans les études d'impact, trouve son intérêt dans les situations suivantes :

- représentation de la rame plus proche de la réalité ;
- estimation plus précise des indicateurs instantanés à l'émission ;
- prise en compte de l'aspect dynamique du bruit au passage d'une rame ;
- analyse exploratoire du bruit émis, avec la possibilité d'insérer des modifications virtuelles sur une source particulière.

Les perspectives de recherche dans ce domaine résident principalement dans une meilleure description des sources (raies spectrales et directivité horizontale notamment) ainsi que des situations prises en compte (plate-forme – matériels roulants en particulier), notamment les contributions respectives de la pose de voie, du revêtement et des états de surface roue/rail. Par ailleurs la description précise de l'émission acoustique en provenance du rail nécessite une étude méthodologique complémentaire.

1.2. Concernant les vibrations dans le sol

Comme pour le bruit, une importante campagne expérimentale a été menée *in situ*, suivie de travaux de modélisation. Les nombreuses configurations testées, en terme de type de matériel roulant, de site et de vitesse, combinés aux différents types de mesures effectuées, sur les rames elles-mêmes, sur les rails et au niveau du sol, ont permis de bien distinguer les effets des différents paramètres sur les vibrations générées au passage des rames. Cette grande quantité de données a permis également de mettre au point et de valider un modèle complet, allant de l'excitation au contact roue/rail jusqu'à la propagation des vibrations dans le sol.

Les résultats concernant la génération des vibrations au contact roue/rail, en particulier la confirmation de l'excitation par les irrégularités grande longueur d'onde des surfaces de roulement et l'identification des résonances voie/essieux constitue un point original de l'étude. Ils permettent d'expliquer les écarts importants qui ont pu être mis en évidence en fonction, notamment, du type de matériel roulant et de l'état de surface des rails.

Concernant la transmission des vibrations entre les rails et le sol, les travaux ont permis de rendre compte plus précisément de l'influence de la pose de voie. Un point important est que l'atténuation au passage d'une rame peut être très différente de l'atténuation obtenue suite à une excitation ponctuelle. Ceci a été mis en évidence expérimentalement et bien confirmé par les calculs : un modèle 3D avec flexion des dalles est donc nécessaire pour caractériser l'efficacité d'une pose.

Par ailleurs, les résultats du modèle montrent que les paramètres du sol ont un effet important sur cette efficacité et qu'ils doivent être bien pris en compte. Enfin, il s'avère que la torsion des dalles peut jouer un rôle significatif dans la transmission des vibrations et qu'un modèle complètement symétrique (rail double, flexion des dalles) est insuffisant dans certains cas.

Quant à la validation des modèles, les écarts entre les niveaux estimés et mesurés peuvent paraître importants mais doivent être mis en parallèle avec d'autres travaux de même nature, qui donnent des écarts dont l'ordre de grandeur est similaire (pour des environnements généralement plus homogènes, trains sur voies ferrées par exemple). Les résultats sont donc globalement satisfaisants compte tenu des incertitudes concernant les données d'entrée, notamment l'hétérogénéité du sol. Les principales perspectives de recherche se situent toutefois dans l'amélioration des modèles. Des pistes ont été évoquées (mesures parallèles à la voie, interaction voie/véhicule plus complète) pour approfondir la compréhension des phénomènes et réduire les écarts qui subsistent avec les mesures.

1.3. Concernant la perception et la gêne

Grâce à une enquête par questionnaire à large échelle menée auprès de 370 riverains de lignes de tramway de Nantes, un grand nombre de données subjectives ont été recueillies, puis mises en relation avec des données objectives d'exposition au bruit (sur la base d'une campagne de mesures et de calculs).

Les riverains des lignes de tramways perçoivent le bruit des rames comme du bruit de roulement, et dans certaines situations, du bruit de freinage (grincement à proximité de stations) ou du bruit de crissement (virage) et même du bruit de grondement (en relation avec le type de plate-forme et de pose de voie). La plus grande partie de l'échantillon (2/3 des réponses) le décrit comme « fort », « habituel » et « proche ».

La gêne exprimée au passage d'une rame est importante, notamment « fenêtres ouvertes », situation dans laquelle plus de la moitié des personnes interrogées se déclarent « très gênées ». Une relation « exposition au bruit-gêne au passage » a pu être établie pour 3 types d'indicateurs acoustiques : le L_{Amax} qui indique le bruit maximum au passage de la rame, le SEL (sound exposure level) qui tient compte en plus de la durée du passage et le L_{Aeq} qui est le niveau de bruit moyen au passage. La gêne exprimée est renforcée dès lors que les bruits sont perçus comme un grincement, un crissement ou un grondement. La perception de vibrations apparaît aussi comme un facteur aggravant. Ces aspects fréquentiels ne sont cependant pas pris en compte par les descripteurs événementiels conventionnels qui se sont ainsi révélés insuffisants pour prédire à eux seuls le risque d'être gêné ; aussi leur intégration devrait améliorer de façon significative le modèle explicatif de la gêne au passage.

La question de l'émergence du bruit du tramway, en tant que descripteur de la gêne, a aussi été étudiée. Les résultats exploratoires ont montré que cette notion, définie comme une différence entre le niveau maximum au passage du tramway et le niveau de bruit hors passage, n'est pas utilisable lorsque le bruit de fond

contribue principalement à la variabilité de l'émergence. Ces résultats ont également permis de poser l'hypothèse d'une interaction entre la gêne due au bruit de la circulation automobile et la gêne due au bruit du tramway.

Comme pour la gêne au passage, des relations exposition (L_{Aeq})-gêne due au bruit de trafic des tramways ont été établies pour différentes périodes de la journée (y compris sur 24 h), et notamment pour la soirée qui est la période au cours de laquelle le pourcentage de riverains qui se déclarent gênés est le plus élevé. La gêne ressentie se traduit également par des perturbations de certaines activités quotidiennes (conversation, repos, sommeil, lecture notamment), mais aussi par l'adoption de comportements en réaction à ces nuisances sonores (fermeture des fenêtres, augmentation du niveau du son de la TV par exemple). Encore une fois la capacité des indicateurs acoustiques énergétiques à expliquer ou prédire la gêne de long terme reste faible. Plusieurs raisons expliquent la faiblesse de ces relations : selon les réponses au questionnaire, la gêne due au bruit des tramways semble mieux liée à d'autres descripteurs comme le nombre d'événements sonores et leur intensité. Par ailleurs la gêne est co-déterminée par des facteurs non acoustiques (sensibilité au bruit, image du tramway, usager du tramway...) ; enfin, la gêne due au bruit des tramways semble en partie « contaminée » par la gêne due au bruit de la circulation routière. Ce dernier aspect soulève la question de l'évaluation de la gêne due au bruit d'une source particulière (le tramway) dans des environnements multi-sources.

2. Sur le plan opérationnel et réglementaire

Le trafic des tramways peut être à l'origine de gêne pour les riverains. Son intensité est liée au niveau de bruit mais certaines situations ou conditions d'exploitations viennent aggraver la gêne exprimée. Il s'agit principalement de celles qui sont à l'origine de grincement ou de crissement comme les virages, mais aussi celles où des vibrations sont ressenties. D'un point de vue opérationnel, ces situations doivent être examinées et, le cas échéant, traitées en priorité.

En dehors de ces situations particulières, **le bruit du tramway** a été majoritairement décrit par les riverains comme du bruit de roulement. D'un point de vue physique, le roulement constitue effectivement la source de bruit principale au passage de rames de tramways, sur tous sites et à toutes les vitesses :

- la nature de l'infrastructure (pose de voie et revêtement) constitue le paramètre prépondérant, à prendre en compte dès la conception en privilégiant une fixation rigide des rails pour limiter leur rayonnement, et des propriétés acoustiques absorbantes du revêtement de surface ;
- la vitesse de passage de la rame est le second paramètre important, permettant éventuellement d'agir en phase d'exploitation sur le bruit émis, notamment en cas d'état dégradé des surfaces de roulement dans l'attente d'une opération d'entretien ;
- le type de rame est un paramètre de moindre importance au regard des deux paramètres précédents, pour le bruit de roulement.

Par ailleurs des sources secondaires, typiques de chaque rame, apportent une contribution significative au bruit émis dès lors que le bruit de roulement reste modéré, ainsi que le montre l'exploitation d'un modèle par sources (tel que Tram-Noise développé dans ce projet) :

- les sources de bruit de traction et, dans une moindre mesure, les équipements auxiliaires ne doivent pas être négligées dans les efforts de réduction.

Toutefois il faut noter que les différences d'émission acoustique liées au matériel roulant ne sont pas perçues par les riverains.

Lorsqu'elles sont ressenties par les riverains, **les vibrations** occasionnent une gêne spécifique mais sont aussi un facteur aggravant de la gêne due au bruit. Il est donc important de caractériser les situations susceptibles de générer des vibrations et d'apporter des solutions adaptées pour les limiter. Les résultats obtenus montrent que le problème des vibrations induites au passage d'un tramway ne doit pas être analysé uniquement sous l'angle de l'atténuation apportée par un type de plate-forme donné, comme c'est le cas habituellement. Relier le choix d'une pose de voie comprenant des dispositifs isolants (semelles souples ou dalle flottante par exemple) seulement à la distance entre l'infrastructure et les habitations n'est pas pertinent.

En effet, d'une part il apparaît que les vibrations générées *au niveau des rails* peuvent être assez différentes d'une configuration à l'autre. Ils varient surtout en fonction du type de rame et de l'état de surface des rails et dans une moindre mesure, de la vitesse de la rame et du type de pose de voie. La réduction des vibrations générées au passage d'une rame peut donc être envisagée en amont de l'atténuation par la plate-forme :

- dès la conception des rames, la masse, l'inertie et le type d'essieux sont des paramètres sur lesquels il est possible d'agir pour limiter les efforts au contact roue/rail ;
- en ce qui concerne la voie, certains paramètres (en particulier de semelles sous rails) peuvent éventuellement être ajustés pour contrôler les résonances du système ;
- au niveau de l'entretien, la maîtrise des états de surface des rails est également un moyen de réduire les vibrations.

D'autre part, l'atténuation des vibrations *entre les rails et le sol* dépend effectivement du type de pose de voie mais aussi fortement du sol. La réduction des vibrations générées au passage de la rame peut donc être envisagée au niveau de la plate-forme, en utilisant des modèles du type de ceux présentés ici mais en veillant à :

- bien considérer l'atténuation au passage de la rame, qui est différente de l'atténuation correspondant une excitation ponctuelle (mesurée au marteau d'impact par exemple) ;
- prendre en compte les caractéristiques du (sous-)sol pour déterminer l'efficacité d'une pose isolante.

Enfin, en ce qui concerne l'atténuation des vibrations *dans le sol avec la distance*, il est clair qu'elle dépend fortement du type de sol et en particulier des phénomènes d'amortissement. Ainsi les règles simplifiées usuelles ne sont pas très fiables, et imposent une forte surestimation des niveaux vibratoires.

Sur le plan réglementaire, pour ce qui concerne l'aspect bruit, l'utilisation actuelle du L_{Aeq} , auquel sont associées des valeurs limites d'exposition, mériterait d'être complétée par des indicateurs événementiels (et des valeurs limites correspondantes) traduisant plus fidèlement la gêne ressentie par les riverains. Cette évolution réglementaire, largement évoquée dans l'annexe 1 de la Directive européenne (2002/49/CE), s'est produite depuis bien longtemps dans certains pays nordiques (Suède par exemple), dans le cas particulier du bruit ferroviaire (valeurs limites en L_{Amax} pour la nuit). Enfin, la fixation de ces valeurs limites d'exposition devrait aussi mieux tenir compte des niveaux sonores « pré-existants » dus à la présence d'autres sources de bruit, notamment celui de la circulation automobile.

Contrairement au bruit, il n'existe pas de normes relatives aux vibrations engendrées par les infrastructures de transports. Ainsi, il n'existe pas d'indicateur standard, ni pour évaluer l'impact vibratoire d'une infrastructure au niveau d'un bâtiment (l'équivalent du niveau de bruit en façade), ni pour évaluer l'émission vibratoire au passage d'un véhicule (données sources, équivalent du niveau de bruit à 7,50 m) et encore moins de méthodes recommandées pour mesurer de tels indicateurs. Dans un premier temps, il serait donc souhaitable de mettre en place de tels outils. Dans un second temps, il serait alors possible de développer des méthodes de calculs normalisées de ces indicateurs, méthodes qui pourraient être utilisées dans le cadre d'étude d'impacts vibratoires, lors de la construction de nouvelles lignes de tramways.

Bibliographie

- [1] S. Riemens (1989), New facts about noise emission of tramcars, *Proceedings of Internoise 89*, Newport Beach, USA, pp. 285-290.
- [2] H. Spackova (2004), Noise reducing devices in the construction of tram permanent way in Prague, *Proceedings of Internoise 2004*, Prague, Rép. tchèque.
- [3] S. Lakusic, T. Rukaniva, V. Dragcevic (2005), The influence of the reconstruction of the tram tracks on the level of noise, *Proceedings of Internoise 2005*, Rio de Janeiro, Brésil.
- [4] K. Berezowska-Apolinarska (1986), Propagation of noise generated by a tram moving with uniform motion, *Archives of Acoustics* 11(3), pp. 231-237.
- [5] J. Mandula, B. Salaiova, M. Kovalakova (2002), Prediction of noise from trams, *Applied Acoustics* 63, pp. 373-389.
- [6] E. Piana, G. Cousin, A. Armani, G. P. Beretta (2002), Characterization of ground vehicles noise emission by pass-by tests using an 8-microphone array, *Proceedings of Internoise 2002*, Dearborn, MI, USA.
- [7] G. Dutilleux (2006), Bruit des tramways - Représentation des sources dans les modèles prévisionnels, *Séminaire Réduction du bruit des transports terrestres*, Aix-les-Bains.
- [8] M. A. Pallas, J. Lelong (2001), Investigation of the rolling noise sources on the tram of Nantes with a microphone array, *Proceedings of Internoise 2001*, La Haye, Pays-Bas.
- [9] Silence Integrated Project 516288, <http://www.silence.org>
- [10] F. Poisson, P.-E. Gautier (2007), The reduction of railway noise in the European Integrated Project SILENCE, *19th ICA*, Madrid, Spain.
- [11] C. Fillol, A. Frid, F. Poisson (2007), Report on source ranking on state of the art validation platforms and final priorities for research effort, *SILENCE project*.
- [12] E. Bongini, S. Molla, P.E. Gautier, D. Habault, P.O. Mattei, F. Poisson (2007), Acoustic sources characterisation on railway vehicle for prediction and audio synthesis of pass-by noise. *Proceedings of 19th ICA*, Madrid, Spain.
- [13] D.H. Johnson, D.E. Dudgeon (1993), *Array signal processing – concepts and techniques*, Prentice Hall.
- [14] M. A. Pallas, R. Perrier (2009), Nearfield noise source localisation with constant directivity arrays : a comparison - Application to tram noise, *Proceedings of NAG/DAGA09*, Rotterdam, Pays-Bas.

- [15] R. Chatagnon, J. Lelong (2006), Compte-rendu de mesures : étude de la directivité du tramway de Nantes, INRETS, rapport LTE0603.
- [16] R. Chatagnon, J. Lelong (2006), Compte-rendu de mesures : mesures supplémentaires de directivité – tramway de Nantes, INRETS, rapport LTE0615.
- [17] T. Kitagawa (2007), An investigation into inconsistencies between theoretical predictions and microphone array measurements of railway noise, Thèse de doctorat, Institute of Sound and Vibration Research, University of Southampton.
- [18] D. H. Cato (1976), Prediction of environmental noise from fast electric trains, *Journal of Sound and Vibration* 46(4), pp. 483-500.
- [19] B. Hemsworth (2000), Reducing ground-borne vibrations : state-of-the-art study, *Journal of Sound and Vibration* 231(3), pp. 703-709.
- [20] G. Degrande, G. Lombaert (2001), An efficient formulation of Krylov's prediction model for train induced vibrations bases on the dynamic reciprocity theorem, *Journal of Acoustical Society of America* 110(3), pp. 1379-1390.
- [21] B. Picoux, R. Rotinat, J.-P. Regoin, D. Le Houédec (2003), Prediction and measurements of vibrations from a railway track lying on a peaty ground, *Journal of Sound and Vibration* 267(3), pp. 575-589.
- [22] X. Sheng, C.J.C. Jones, D.J. Thompson (2003), A comparison of a theoretical model for quasi-statically and dynamically induced environmental vibration from trains with measurements, *Journal of Sound and Vibration* 267(3), pp. 621-635.
- [23] A. Nordborg (1998), Parametrically excited rail/wheel vibrations due to track-support irregularities, *Acustica* 84, pp. 854-859.
- [24] L. Auersch (2005), The excitation of ground vibration by rail traffic : theory of vehicle-track interaction and measurements on high-speed lines, *Journal of Sound and Vibration* 284(1-2), pp. 103-132.
- [25] K. Knothe, Y. Wu (1998), Receptance behaviour of railway track and subgrade, *Archive of Applied Mechanics* 68, pp. 457-470.
- [26] G. Lombaert, G. Degrande, J. Kogut, S. François (2006), The experimental validation of a numerical model for the prediction of railway induced vibrations, *Journal of Sound and Vibration* 297(3-5), pp. 512-535.
- [27] X. Sheng, C.J.C. Jones, D.J. Thompson (2004), A theoretical study on the influence of the track on train-induced ground vibration, *Journal of Sound and Vibration* 272(3-5), pp. 909-936.
- [28] H. Kruse, K. Popp (2001), A modular algorithm for linear, periodic train-track models, *Archive of Applied Mechanic* 71, pp. 473-486.
- [29] G. Lombaert, G. Degrande, B. Vanhauwere, B. Vandeborghht, S. François (2006), The control of ground-borne vibrations from railway traffic by

- means of continuous floating slabs, *Journal of Sound and Vibration* 297(3-5), pp. 946–961.
- [30] F. Cui, C.H. Chew (2000), The effectiveness of floating slab track system - Part I. Receptance methods, *Applied Acoustics* 61, pp. 441–453.
- [31] W. Ruecker, L. Auersch, M. Baessler, K. Knothe, Y. Wu, U. Gerstberger, K. Popp, H. Kruse, S. Savidis, R. Hirschaner, C. Bode, W. Schepers, G. Schmid, F. Friedrich (2003), A comparative study of results from numerical track-subsoils calculations, *System dynamics and long-term behaviour of railway vehicles, track and subgrade*, Springer, pp. 471–488.
- [32] L. Auersch (2005), Simplified methods for wave propagation and soil-structure interaction : the dispersion of layered soil and the approximation of FE-BEM results, *Proceedings of Eurodyn'05* , Paris, France, pp. 1303–1308.
- [33] K. Adolfsson, B. Andreasson, A. Bodare, C. Madshus (1999), High speed lines on soft ground – Evaluation and analyses of measurements from the west coast line, *Rapport 2-9710-502 (Part 1 & 2)*, Banverket, Borlänge, Suède.
- [34] A.M. Kaynia, C. Madshus, P. Zackrisson. Ground vibration from high speed trains : prediction and countermeasure (2000), *Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering* 126(6), pp. 531-537.
- [35] C. Madshus, A.M. Kaynia (2000), High speed railway lines on soft ground : dynamic behaviour at critical train speed, *Journal of Sound and Vibration* 231(3), pp. 689-701.
- [36] A. Smekal, E. Berggren (2002), Mitigation of track vibration at Lesgard Sweden, field measurements before and after soil improvement, *Proceedings of Eurodyn'02*, Munich, Allemagne.
- [37] B. Picoux, D. Le Houédec (2005), Diagnosis and prediction of vibrations from railway trains, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 25(12), pp. 905–921.
- [38] P. Van Den Broeck (2001), A prediction model for ground-borne vibrations due to railway traffic, Thèse de Doctorat, Université Catholique de Louvain, Louvain-La-Neuve, Belgique.
- [39] M. Maldonado, D. Le Houédec (2004), Problèmes vibratoires liés à la construction du tramway d'Athènes, Actes du *XIVe Colloque « Vibrations Choc et Bruit »*, Lyon, France, CD-ROM.
- [40] M. Maldonado, D. Le Houédec (2005), Vibrations induced by tramways : propagation, isolation and perception, *Proceedings of Eurodyn'05*, Paris, France, pp. 2047-2052.
- [41] S. Foti (2000), Multistation methods for geotechnical characterisation using surface waves, Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique de Turin, Turin, Italie.

- [42] S.L. Grassie (1996), Measurement of railhead longitudinal profiles : a comparison of different techniques, *Wear* 191, pp. 245-251.
- [43] P. Aknin, H. Chollet (1999), A new approach for the modelling of track recording vehicles and the deconvolution of versine measurements, *Vehicle System Dynamics supp.* 33, pp. 59-70.
- [44] EN ISO 3095 (2005), Railway applications - Acoustics - Measurement of noise emitted by railbound vehicle.
- [45] Commission Decision of 23 December 2005 concerning the technical specification for interoperability relating to the subsystem rolling stock ó noise of the trans-European conventional rail system, *Official Journal of the EU*, 30/12/2006.
- [46] DIN 45672 (1995), Schwingungsmessungen in der Umgebung von Schienenverkehrswegen – Teil 2 : Auswerteverfahren, *Deutsches Institut für Normung*.
- [47] C.G. Lai, G.J. Rix (1998), Simultaneous inversion of Rayleigh phase velocity and attenuation for near-surface site characterization, *National Science Foundation and U.S. Geological Survey*.
- [48] G. Lombaert, G. Degrande (2003), The experimental validation of a numerical model for the prediction of the vibrations in the free field produced by road traffic, *Journal of Sound and Vibration* 262(2), pp. 309–331.
- [49] Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Équipement : Arrêté du 8 novembre 1999 relatif au bruit des infrastructures ferroviaires, J.O n° 261 du 10 novembre 1999.
- [50] J.M. Fields (2001), An updated catalog of 521 social surveys of residents' reactions to environmental noise (1943–2000), Nasa/CR-2001-211257, 149p.
- [51] R. Rylander, M. Björkman, U. Ahrlin (1977), Tramway noise in city traffic, *Journal of Sound and Vibration* 51(3), pp. 353-358.
- [52] H.M. Miedema, R. Van den Berg (1988), Community response to tramway noise, *Journal of Sound and Vibration* 120(2), pp. 341-346.
- [53] O.A. Alim, A.Z. Nagwa (1993), Subjective and objective assessments of tram noise in city Alexandria, *Proceedings of Internoise* 93, pp. 1153-1156.
- [54] J. Vogt, C. Lehmann, P. Kainath, K.Th. Kalveram (1996), Simulation of tram noise abatement procedures in the psychoacoustic laboratory : a pilot study, *Proceedings of Internoise* 96, vol 3, pp. 1223-1996.
- [55] A. Lecourt (2000), Proximité et aménagement : le phénomène NIMBY, évolution d'une notion, *ESO* 14, pp. 53-56.
- [56] J.M. Fields et col. (2001), Standardized general purpose noise reaction questions for community noise surveys : research and recommendation, *Journal of Sound and Vibration* 242 (4), pp. 641-679.

- [57] Technical specification ISO/DTS 15666 (2003), Acoustics - Assessment of noise annoyance by means of social and socio-acoustic surveys, 15 January 2003.
- [58] C.E. Osgood, G.J. Suci and P.H. Tannenbaum (1957), *The measurement of meaning*, Urbana, University of Illinois Press.
- [59] J.C. Nunnally, I.H. Bernstein (1994), *Psychometric theory*, 3e ed., New York, Mc Graw-Hill.
- [60] M.A. Nilsson, B. Berglund (2001), Effects of noise from combinations of traffic sources, *Archives of the center for sensory research* 6(1).
- [61] H.M.E. Miedema, H. Vos (1999), Demographic and attitudinal factors that modify annoyance from transportation noise, *Journal of the Acoustical Society of America* 105, pp. 3336-3344.
- [62] R. Guski (1999), Personal and social variables as co-determinants of noise annoyance, *Noise and Health* 3, pp. 45-56.
- [63] C. Philipps-Bertin, P. Champelovier, C. Trindade, J. Lambert (2006), Caractérisation des sources et évaluation de la perception du bruit et des vibrations des tramways : enquête auprès de riverains : méthodologie et premiers résultats, INRETS, rapport LTE 0614, 141p.

Annexe 1

Description des sites de mesurage acoustique et vibratoire

Les mesures ont été effectuées sur quatre sites du réseau de tramway de l'agglomération nantaise. Ces sites présentent des caractéristiques distinctes, en particulier en ce qui concerne la pose de voie, assez représentatives des différentes configurations existantes sur les réseaux français. Ils ont par ailleurs été sélectionnés pour permettre des mesures acoustiques en condition de champ libre, excepté pour le site « Libération » où seules des mesures vibratoires ont été effectuées.

Localisation des sites de mesures sur le réseau de tramway nantais



Les fiches suivantes présentent les caractéristiques de ces quatre sites. En particulier, on trouvera : une photo montrant l'environnement dans lequel s'inscrit



la voie ; un tableau récapitulatif des caractéristiques principales de la pose ; une vue en coupe de la voie.

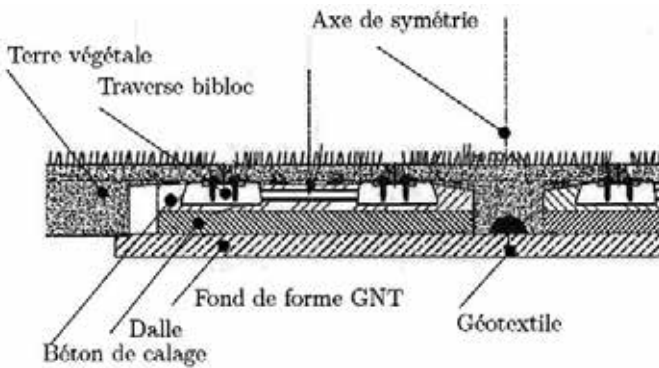
La voie du site *Souillarderie* appartient à la plus ancienne ligne de tramway de Nantes (1985) et correspond à une voie SNCF réutilisée, ce qui explique qu'il n'y ait pas de vue en coupe disponible pour ce site.

Ferrière



		Épaisseur (mm)
Rail	À gorge 35GP	152,5
Semelle	Cannelée (caoutchouc)	9
Traverse	Bibloc béton – noyée dans du béton de calage	250
Assise	Dalle béton (une par voie)	190
Fond de forme	Graves non traitées Gnt0/32 (un par voie)	200

Nom du site	Type de pose de voie	Type de revêtement	Configuration spatiale	Année de mise en service	Hauteur totale de voie (mm)
<i>Ferrière</i>	Classique	Gazon 140 mm	Rue ouverte	2004	800

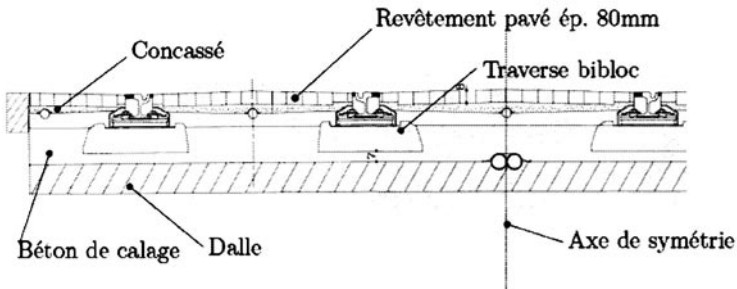


Longchamp



		Épaisseur (mm)
Rail	À gorge 35GP	152,5
Semelle	Souple (élastomère)	12,5
Traverse	Bibloc béton – noyée dans du béton de calage	320
Assise	Dalle béton (une seule pour les deux voies)	200
Fond de forme	Non	

Nom du site	Type de pose de voie	Type de revêtement	Configuration spatiale	Année de mise en service	Hauteur totale de voie (mm)
Longchamp	Isolante DPHI	Pavé 80 mm	Rue en U	2000	630



Souillarderie



		Épaisseur (mm)
Rail	À gorge 50E6	153
Semelle	Pas d'information	
Traverse	Monobloc bois	
Assise	Ballast	200
Fond de forme	Graves non traitées Gnt20/40	200

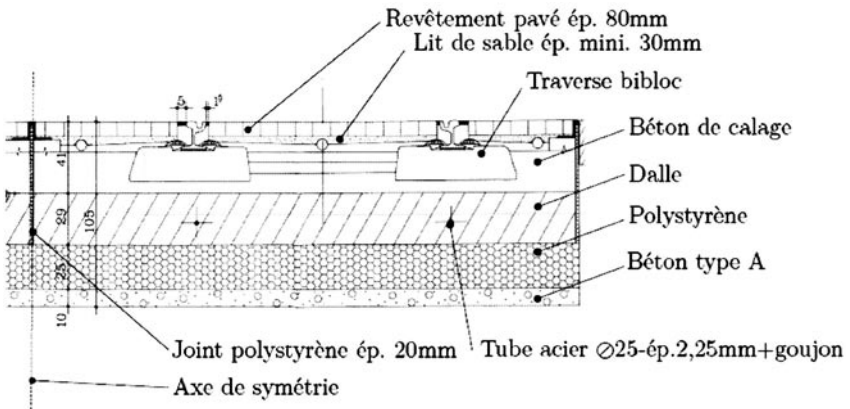
Nom du site	Type de pose de voie	Type de revêtement	Configuration spatiale	Année de mise en service	Hauteur totale de voie (mm)
Souillarderie	Voie SNCF requalifiée	Ballast	Voie ouverte	1985	400

Libération



		Épaisseur (mm)
Rail	À gorge 35GP	152,5
Semelle	Cannelée (caoutchouc)	9
Traverse	Bibloc béton – noyée dans du béton de calage	300
Assise	Dalle béton (une par voie)	290
Couche isolante	Polystyrène	250
Fond de forme	Béton (un seul pour les deux voies)	100

Nom du site	Type de pose de voie	Type de revêtement	Configuration spatiale	Année de mise en service	Hauteur totale de voie (mm)
Libération	Isolante dalle flottante	Pavé 80 mm	Rue en L	1994	1050



Annexe 2

Description des rames

Deux types de matériel roulant sont en circulation sur le réseau de tramway nantais. Une rame de chaque type a été mesurée lors de cette étude. Elles sont issues de différentes générations de matériel roulant, et présentent donc des choix technologiques distincts. La captation de courant est effectuée par pantographe. Cette annexe décrit les caractéristiques respectives des deux rames. Les spécifications techniques des deux matériels sont regroupées dans un tableau en fin de cette annexe.

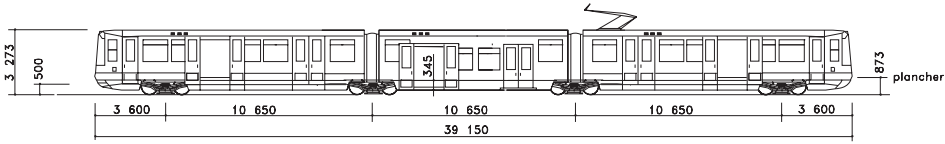
Rame TFS (constructeur : Alstom)



Composition des rames

Le TFS (Tramway Français Standard) circule à Nantes depuis 1985. À l'origine équipées de deux caisses sans plancher bas, les rames ont été modifiées en 1991, avec l'ajout d'une troisième caisse, centrale à plancher bas. Toutes les rames du réseau nantais présentent dès lors cette configuration à trois caisses, pour une longueur totale de 39,15 m. Le châssis et la caisse sont en aluminium.

Schéma général de la rame TFS



Bogies et traction

Chaque rame comprend quatre bogies, dont deux bogies moteurs situés respectivement à chacune des extrémités, et deux bogies porteurs. La traction est assurée par des moteurs à courant continu, alimentés par un hacheur : un moteur est situé en position centrale de chaque bogie moteur. Ces bogies sont de conception classique à essieux.

Confort thermique

La rame permet un chauffage par ventilation d'air chaud, mais ne dispose pas de ventilation réfrigérée ni de climatisation.

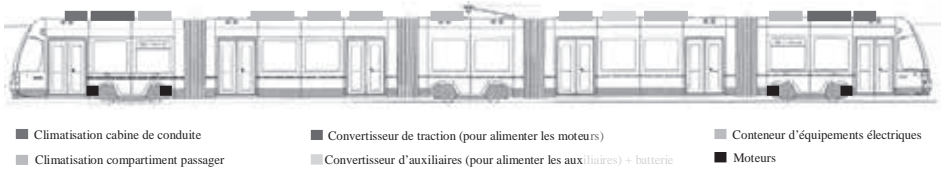
Rame Incentro (constructeur : Bombardier)



Composition des rames

L'Incentro est un modèle de tramway à plancher bas intégral, conçu par la société Adtranz, rachetée ensuite par la société Bombardier. Sa longueur totale est de 36,4 m. Le châssis et la caisse sont réalisés en acier, à l'exception du pavillon en aluminium. En raison du plancher bas intégral, l'ensemble des composants électriques est reporté en toiture.

Schéma d'implantation des principaux composants de l'Incentro



Bogies et traction

L'Incentro repose sur des bogies surbaissés à quatre roues indépendantes. Chaque rame comporte trois bogies, dont deux bogies moteurs situés respectivement à chaque extrémité, et un bogie porteur au centre. Chaque bogie moteur est équipé de quatre moteurs triphasés asynchrones, soit un moteur associé à chaque roue et positionné à chaque angle extérieur du bogie. Un onduleur à IGBT et un hacheur d'excitation à thyristors permet d'alimenter l'ensemble des quatre moteurs. Les convertisseurs de traction sont situés sur la toiture.

Confort thermique

Chaque cabine de conduite est équipée de sa propre unité de climatisation, deux autres unités permettent de climatiser les compartiments passagers. Ces équipements sont disposés sur la toiture.

Spécifications techniques des rames TFS et Incentro

Caractéristiques générales des rames

	Rame TFS (rame A)	Rame Incentro (rame B)
Longueur totale	39,15 m	36,4 m
Largeur	2,3 m	2,4 m
Hauteur maximale	3,25 m	3,25 m
Hauteur du plancher	Motrices : 0,87 m Caisse centrale : 0,35 m	0,35 m
Nombre de bogies moteurs	2	2
Nombre de bogies porteurs	2	1
Masse à vide	53,2 10 ³ kg	38,5 10 ³ kg
Masse maximale	82,4 10 ³ kg	69,2 10 ³ kg

Caractéristiques des bogies

	Rame TFS (rame A)	Rame Incentro (rame B)
Empattement	1,7 m	1,8 m
Diamètre de roue neuve	0,66 m	0,66 m
Suspension primaire	Plots caoutchouc	Plots caoutchouc
Suspension secondaire	Plots sandwich Acier-caoutchouc	Ressorts hélicoïdaux
Empattement entre essieux	1,9 m	1,8 m
Charge sur bogie moteur :		
– à vide	14 000 kg	13 000 kg
– en charge exceptionnelle	20 600 kg	22 200 kg
Charge sur bogie porteur :		
– à vide	12 600 kg	12 500 kg
– en charge exceptionnelle	20 600 kg	24 800 kg

Annexe 3

Antenne microphonique : principe et performances

Principe général

L'antenne microphonique est un système de mesure acoustique directif. Basé sur un ensemble de microphones omnidirectionnels, il tire ses propriétés d'écoute directive du traitement appliqué aux signaux reçus. Le principe utilisé ici est celui de la focalisation en champ proche, lui-même dérivé de la technique classique de *formation de voie* (« beamforming ») : il consiste à compenser les différences de temps de propagation entre un point source supposé (*point focal*) dans l'espace et les différents capteurs de l'antenne, de façon à remettre tous les signaux en phase relativement à ce point focal, puis à les moyenner. Le signal émis par une source située au point focal n'est pas modifié, alors que les signaux en provenance d'autres points de l'espace sont atténués.

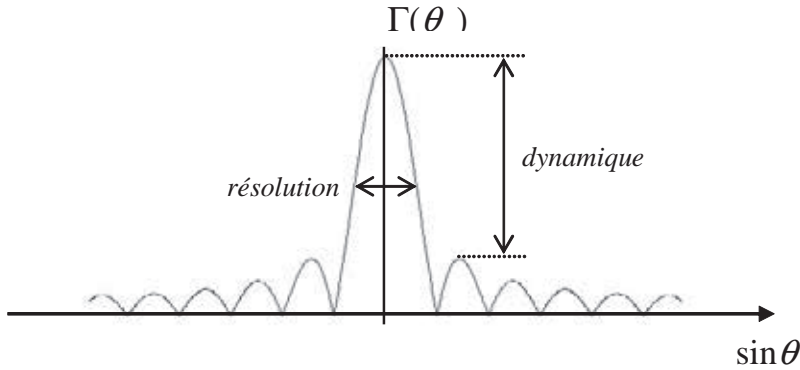
En outre, comme les sources se déplacent pendant la durée d'observation nécessaire à leur analyse (*temps de pose*), le point focal est maintenu attaché au point source et se déplace avec lui pendant le temps de pose. C'est la technique de *dédopplérisation*, qui permet simultanément de compenser l'effet doppler (faible dans le contexte présent où les vitesses de passage sont peu élevées).

La directivité d'écoute de l'antenne est composée typiquement d'un lobe principal centré sur le point focal, caractérisé par sa largeur à -3dB (par analogie avec la théorie des filtres) et qui traduit la *résolution spatiale* ou capacité à séparer des sources proches dans l'espace (Figure 1). Celle-ci est liée aux dimensions de l'antenne (*ouverture*). L'atténuation en dehors du lobe principal est élevée, mais peut présenter localement des lobes secondaires plus importants : la *dynamique* de l'antenne, ou différence en dB entre les niveaux du lobe principal et du lobe secondaire le plus élevé, traduit la capacité de l'antenne à détecter une source faible en présence de sources plus puissantes. Elle est influencée par la répartition des capteurs à l'intérieur de l'ouverture. Elle peut être améliorée en appliquant des coefficients multiplicatifs à chaque capteur, au détriment toutefois de la résolution. Une « bonne » antenne offrira simultanément un lobe principal étroit (au regard des dimensions de l'objet à caractériser) et une dynamique élevée. Ses performances ne sont cependant pas constantes sur l'ensemble de la gamme de fréquence d'analyse : d'une part la résolution est dégradée aux fréquences bas-

ses comparativement aux hautes fréquences, d'autre part la fréquence maximale de travail comporte une limite stricte définie par l'espacement minimal entre deux capteurs (exclusion du repli spatial, condition d'échantillonnage spatial correct de Shannon).

Des informations plus détaillées sur la méthode de traitement et les performances théoriques peuvent être trouvées dans [13]. La théorie repose sur des hypothèses de sources ponctuelles de type monopoles décorrélées entre elles. Dans le contexte réel, il convient d'être circonspect dans l'observation des résultats, et éventuellement prendre en compte et adapter les traitements à des hypothèses différentes : sol réfléchissant (sources images), autres modèles de sources...

Figure 1 : représentation schématique de la directivité spatiale $\Gamma(\theta)$ d'une antenne linéaire à capteurs équidistants, en fonction de l'angle d'incidence θ



Réponse théorique de l'antenne

L'antenne est constituée de deux alignements de microphones ayant respectivement des espacements de 5 cm et 15 cm et adaptés à des gammes de fréquence distinctes. Pour l'analyse bande fine, la fréquence limite d'utilisation de l'une ou l'autre sous-antenne est fixée à 1600 Hz. Lors des analyses tiers d'octave, l'espacement 15 cm est sélectionné jusqu'à la bande tiers d'octave 1250 Hz incluse, et l'espacement 5 cm à partir du tiers d'octave 1600 Hz. Les figures suivantes (Figure 2, Figure 3 et Figure 4) montrent la réponse de l'antenne pour différentes configurations d'antenne et d'analyse en fonction de la fréquence de la source, représentée à l'échelle de la rame. Elles sont issues de simulations réalisées pour une source ponctuelle (monopole) se déplaçant à la vitesse de 30 km/h, dont le spectre contient une raie pour chaque fréquence centrale des bandes tiers d'octave normalisées, de 63 Hz à 4000 Hz. Les niveaux acoustiques estimés sont représentés en dB(A). Les dépouillements sont effectués dans des conditions identiques à ce qui est appliqué par ailleurs aux mesures réelles.

Figure 2 : réponse de l'antenne linéaire horizontale à un monopole, constitué d'un spectre de raies de même puissance, se déplaçant à 30 km/h. Analyse en bande fine. Cumul fréquentiel : de 140 Hz à 4400 Hz

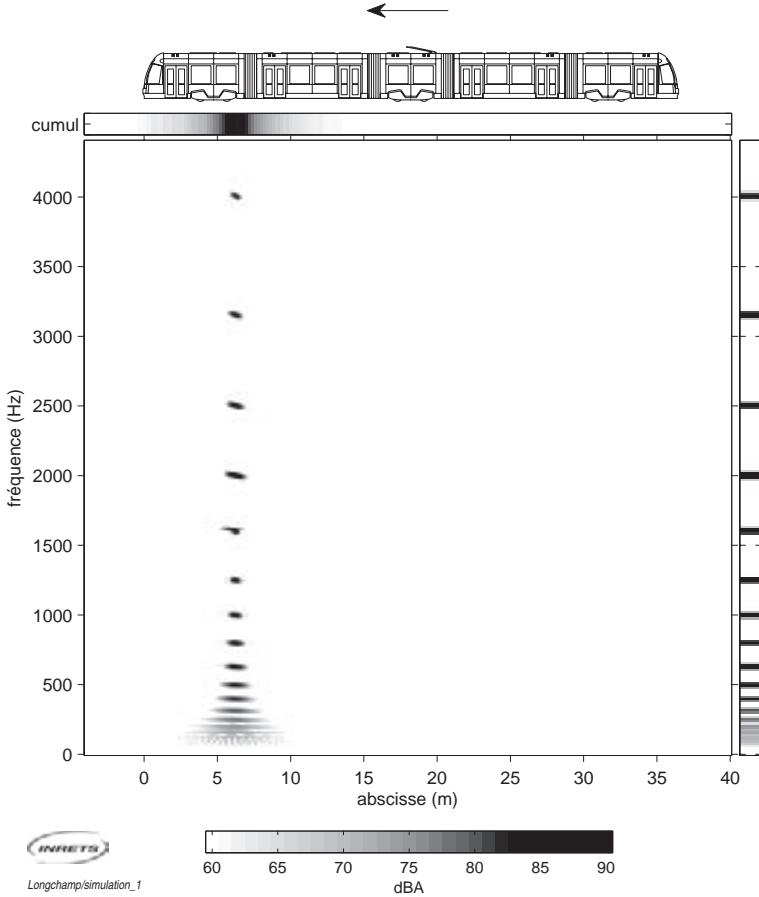
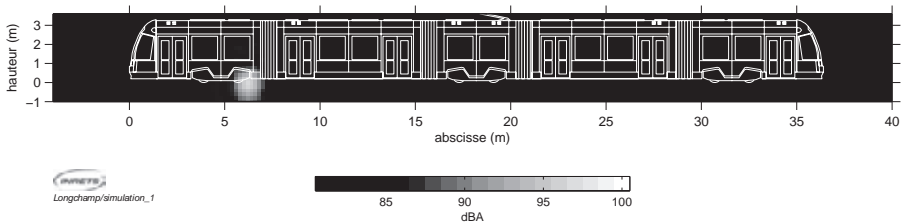
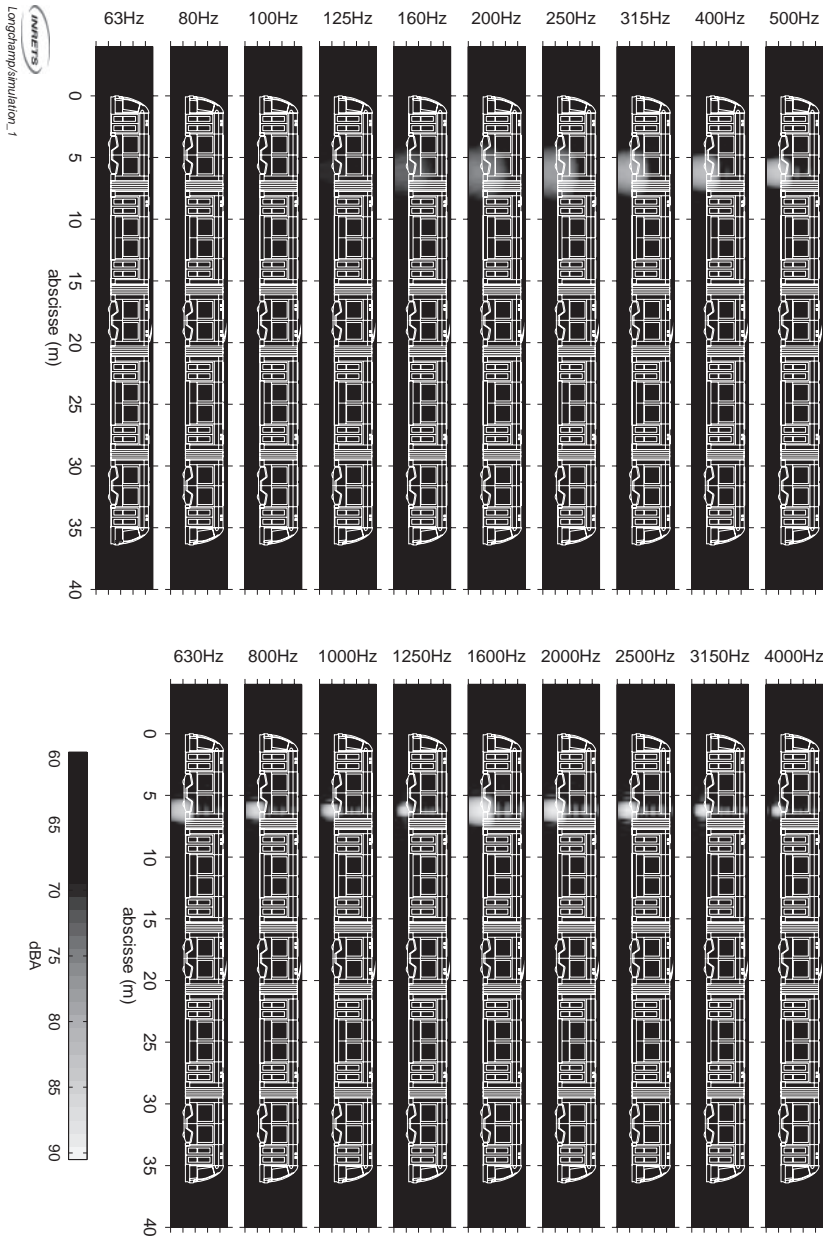


Figure 3 : réponse de l'antenne en croix à un monopole, constitué d'un spectre de raies de même puissance, se déplaçant à 30 km/h. Niveau global



**Figure 4 : réponse de l'antenne en croix à un monopole, constitué d'un spectre de raies de même puissance, se déplaçant à 30 km/h.
Analyse par tiers d'octave**



Annexe 4

**Enquête de perception :
fiches descriptives des sites**

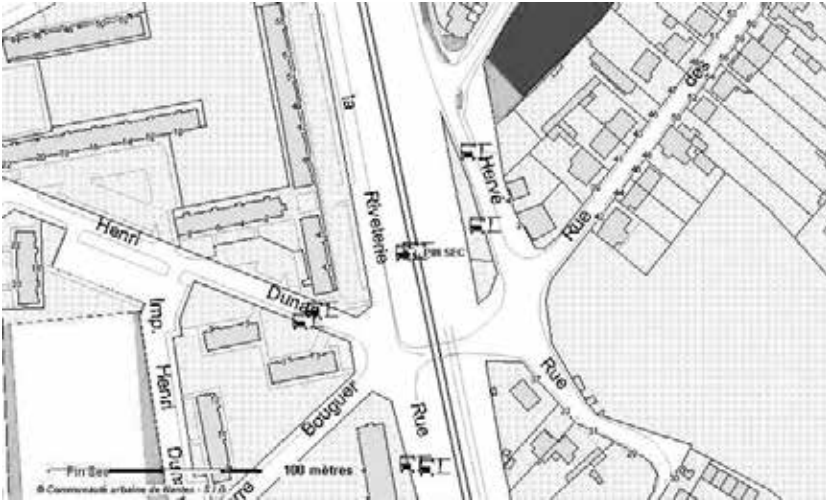
Site n° 1 : station pin sec – Ligne 1

Adresses : du 41 au 55 rue de la Rivetterie ; 2 au 6 rue P. Bouguer – Nantes

Type de site : station

Distance à la voie : 40 m et 25 m

Potentiel : 110 personnes



Site n° 2 : cours F. Roosevelt – Ligne 1

Adresses : 3 au 13 allée du Port Maillard ; 2-3 allée de la Tremperie ; 1, 2, 2bis, 3 et 3 bis allée Flesselles ; 2 au 5 allée Duguay-Trouin ; 1 à 3 rue Léon Maitre – Nantes

Type de site : centre ville

Distance à la voie : 25 m

Potentiel : 140 personnes



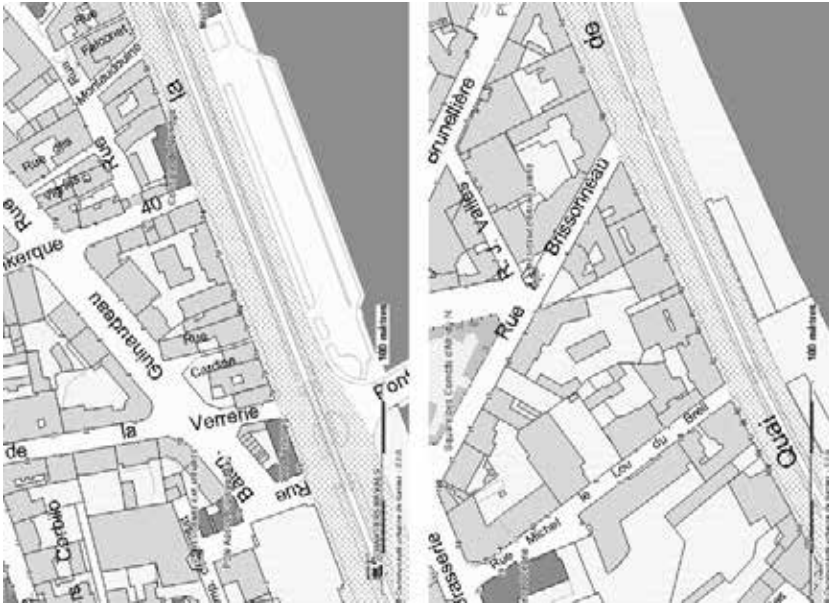
Site n° 3 : quai de la Fosse – Ligne 1

Adresses : 56 au 70 et 84 au 99 quai de la Fosse – Nantes

Type de site : quai en centre ville

Distance à la voie : 25 m

Potentiel : 168 personnes



Site n° 4 : rue Romain Rolland – Ligne n° 1

Adresses : 1 au 15 et 14 au 24 rue Romain Rolland – Nantes

Type de site : péri urbain

Distance à la voie : 11 et 20 m

Potentiel : 130 personnes



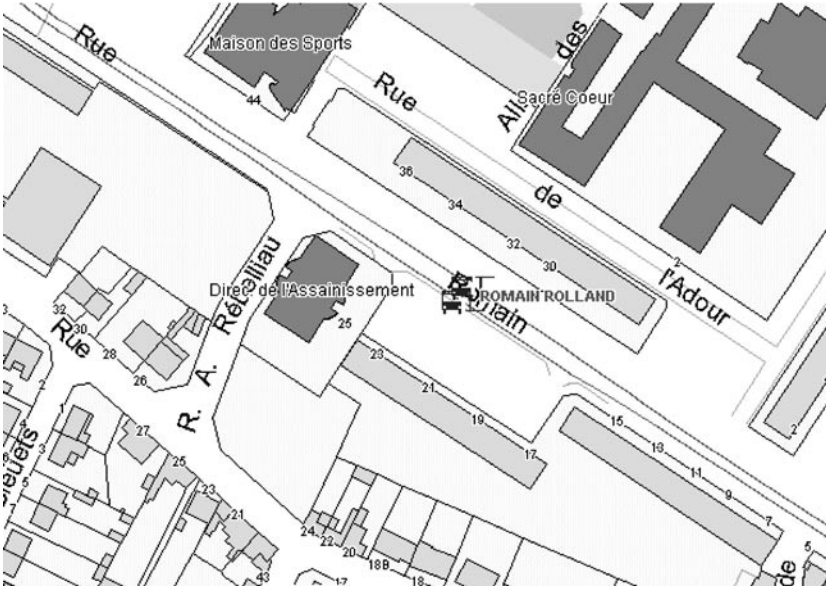
Site n° 5 : station Romain Rolland – Ligne 1

Adresses : 17 au 23 et 26 au 36 rue Romain Rolland – Nantes

Type de site : station

Distance à la voie : 22 et 34 m

Potentiel : 100 personnes



Site n° 6 : avenue d'Anjou – Ligne 2

Adresses : 3 au 35 et 4 au 40 avenue d'Anjou – Rezé

Type de site : tramway seul pas de circulation routière

Distance à la voie : 13 m

Potentiel : 40 personnes



Site n° 7 : quai de Versailles – Ligne 2

Adresses : 25 au 35 bis quai de Versailles – Nantes

Type de site : grande courbe – peu de circulation routière

Distance à la voie : moins de 10 m

Potentiel : 146 personnes



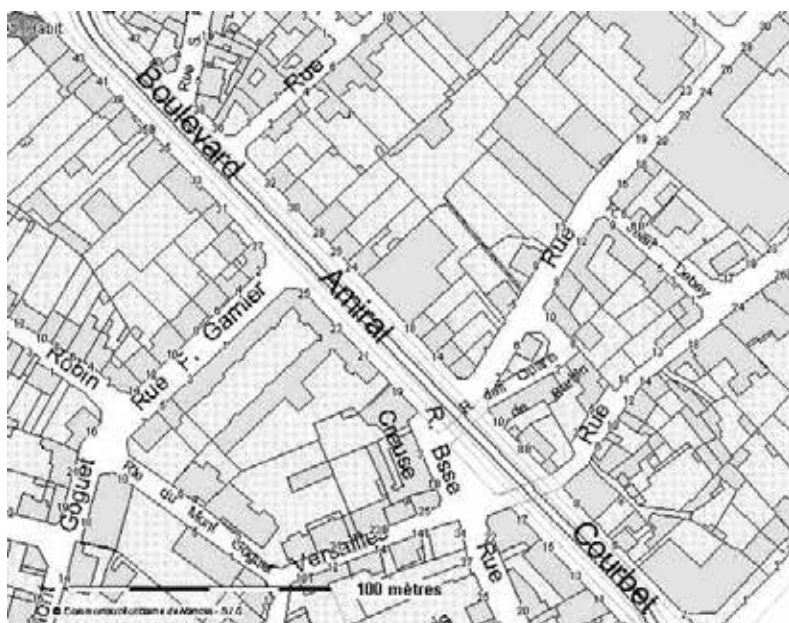
Site n° 8 : bd Amiral Courbet – Ligne 2

Adresses : 8 au 42 et 11 au 41 bd Amiral Courbet – Nantes

Type de site : forte montée

Distance à la voie : moins de 10 m

Potentiel : 135 personnes



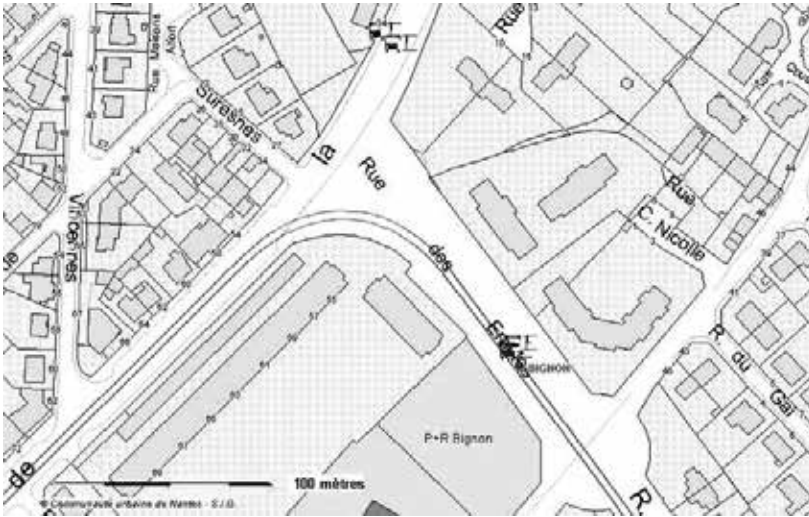
Site n° 9 : Bignon – Ligne 3

Adresses : 27 et 34 rue de Suresnes ; 52 et 54 ave de la Morlière ; 2 et 4 résidence des érables, rue des Érables + bâtiment en face « les terrasses de la Morlière » – Orvault

Type de site : virage

Distance à la voie : moins de 10 m

Potentiel : 60 personnes



Attention il manque un bâtiment sur ce plan



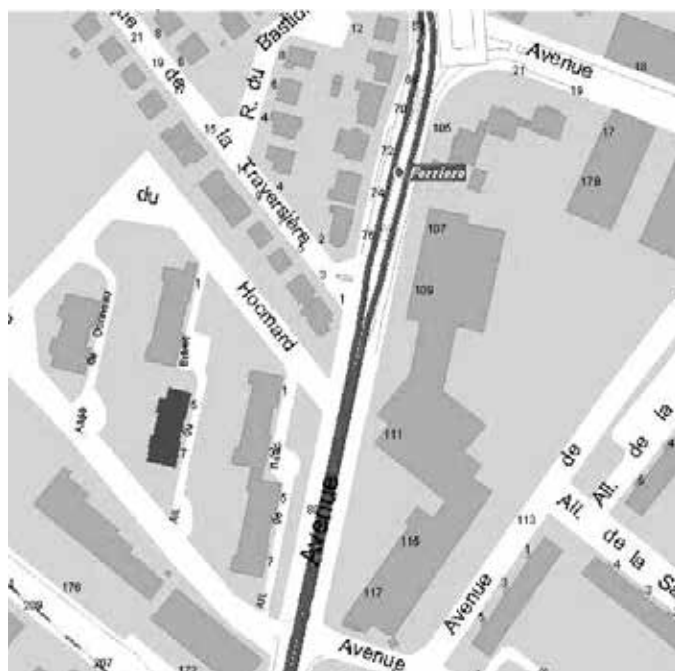
Site n° 10 : av. de la Ferrière – Ligne 3

Adresses : 1 à 7 allée de l'Isaac ; 109, 111, 115 et 117 ave de la Ferrière – Orvault

Type de site : périurbain

Distance à la voie : 20 à 40 m

Potentiel : 195 personnes



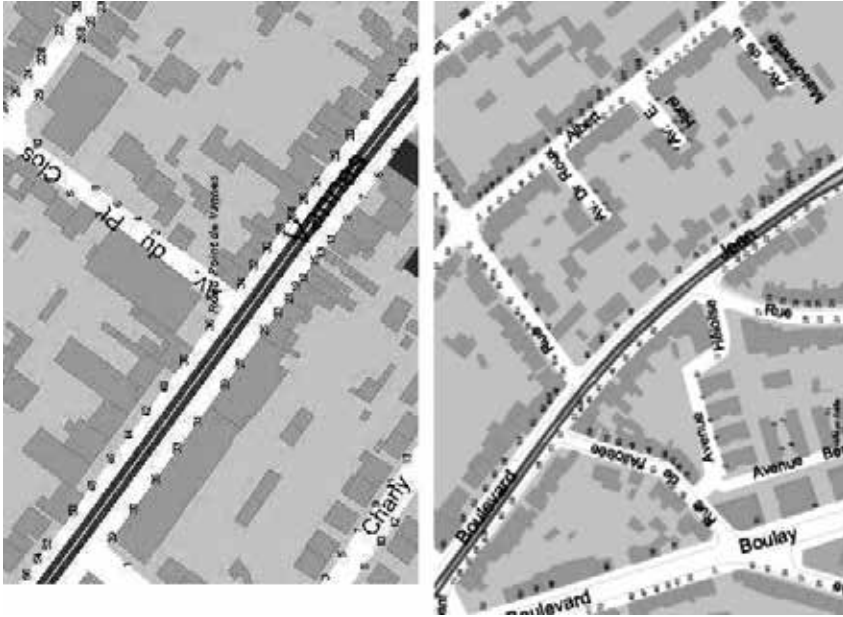
Site n° 11 : Jean XXIII-Vannes – Ligne 3

Adresses : 12 au 50 et 5 au 39 route de Vannes, 12 au 64 et 15 au 69 bd Jean XXIII – Nantes

Type de site : ligne droite

Distance à la voie : moins de 10 m

Potentiel : 190 personnes



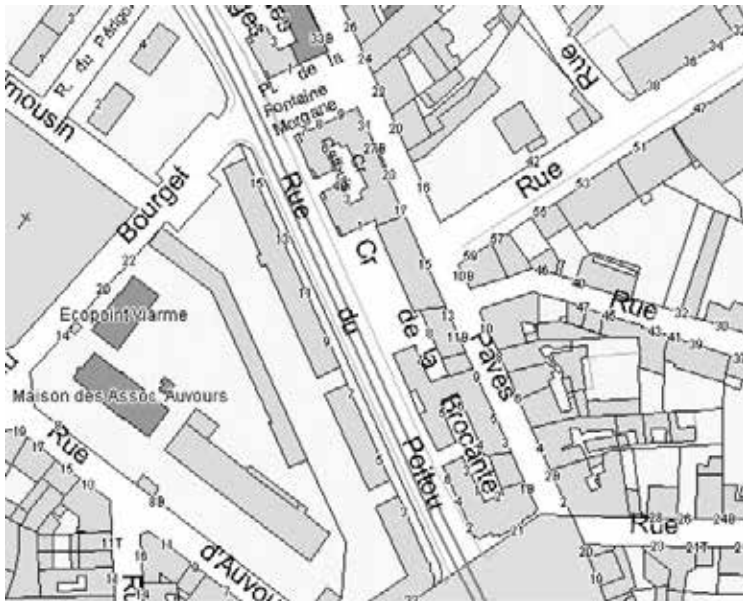
Site n° 12 : Poitou – Ligne 3

Adresses : 1 au 15 rue du Poitou + en face cour Cathus et cour de la Brocante – Nantes

Type de site : légère pente

Distance à la voie : moins de 10 m

Potentiel : 104 personnes



Annexe 5

Questionnaire « Perception du tramway de Nantes »

		N° questionnaire :
<u>Nom de l'enquêteur :</u>	Date de l'interview / / / / / 2005 Heure début : Heure fin :	SITE (numéro) : Adresse :

INTERROGER DES PERSONNES :

- AGEES DE 18 ANS ET PLUS
- A LEUR RESIDENCE PRINCIPALE
- DONT LE LOGEMENT A AU MOINS UNE OUVERTURE SUR LA VOIE DE TRAMWAY

Bonjour,

L'Institut national de recherche sur les transports et leur sécurité (INRETS), organisme public de recherche, réalise actuellement à la demande de l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME), une enquête auprès de riverains de tramways dans différents quartiers de Nantes.

Auriez-vous, s'il vous plaît, 30 minutes à nous consacrer ?

Sachez que vos réponses resteront strictement confidentielles. Ce questionnaire respecte la loi informatique et liberté.

Enquêteur : il s'agit d'un entretien individuel, refuser la présence d'un couple

Habitez-vous ici, dans cette maison ou cet appartement, de manière permanente, depuis au moins 6 mois ?

- Non 1 ⇒ **STOP CONTACT**
- Oui 2 ⇒ **CONTINUER**

1. Le logement et le quartier

Q1. Actuellement, vous habitez dans ?

- Un appartement dans un immeuble 1 *indiquez l'étage /_/_/ sur*
- Un pavillon indépendant..... 2 */_/_/ nb d'étages total*
- Une maison de ville ou mitoyenne 3
- Autre (*précisez*)..... 4

Q2. Depuis quelle année occupez-vous ce logement ? /_/_/_/_/

Q3. Êtes-vous ?

- En accession à la propriété 1
- Propriétaire..... 2
- Locataire d'un logement social (type HLM) 3
- Locataire d'un logement du secteur privé 4
- Occupant à titre gratuit..... 5
- Autre(*précisez*)..... 6

Q4. Combien de façades comporte votre logement ? /_/_/

Précision : une façade est un mur extérieur comprenant au moins une ouverture : porte, fenêtre, baie vitrée

Q5. Combien de pièces compte votre logement ? /_/_/

Précision : sans compter la salle d'eau ou salle de bain, les couloirs et hall, mais en comptant la cuisine

Q6. Quelles sont ces pièces et sur quoi donnent-elles ?

Enquêteur : présentez cartes n° 1 et n° 2

	<i>Enquêteur : Présenter carte n° 2 et noter code correspondant</i>
1. Chambre principale	
2. Autre Chambre (1)	
3. Autre Chambre (2)	
4. Autre Chambre (3)	
5. Salon seul	
6. Salle à manger seule	
7. Salle à manger + salon	
8. Bureau	
9. Cuisine	
10. Autres : (précisez)	

Q7. Votre logement est-il isolé par du double-vitrage (ou similaire : survitrage, double-fenêtre.....) ?

- Oui, totalement..... 1 ➡ **PASSEZ EN Q9**
- Oui, en partie..... 2 ➡ **PASSEZ EN Q8**
- Non..... 3 ➡ **PASSEZ EN Q9**
- NSP..... 4 ➡ **PASSEZ EN Q9**

Q8. Quelles pièces sont isolées ?

- Chambre principale 1
- Autres chambres 2
- Salon 3
- Salle à manger 4
- Salle à manger + salon 5
- Bureau 6
- Cuisine 7
- Autre (précisez) 8

Q9. Disposez-vous d'un balcon ou d'un jardin privatif attenant à votre logement ?

- Seulement, un jardin 1
- Seulement, un balcon 2
- Un balcon et un jardin 3
- Aucun des deux 4

Q10. D'une façon générale, que pensez-vous de votre logement ? En êtes-vous ...

Enquêteur : Montrez carte n° 3

- Extrêmement satisfait 5
- Beaucoup satisfait 4
- Moyennement satisfait 3
- Légèrement satisfait 2
- Pas du tout satisfait 1

Q11. Envisagez-vous de déménager dans les 12 mois à venir ?

- Oui 1 ➔ **PASSEZ À Q12**
- Non 2 ➔ **PASSEZ À Q13**

Q12. Pour quelle(s) raison(s) principale(s) ?

Précision : Classez au maximum 3 raisons par ordre décroissant, en premier citer la plus importante

Enquêteur : une réponse par colonne si pas d'autre choix alors cocher « ne sait pas » Montrez carte n° 4

	A Rép. 1	B Rép. 2	C Rép. 3
À cause de problèmes de voisinage	1	1	1
Pour avoir de meilleures conditions de logement (plus grand, plus confortable, etc...)	2	2	2
Pour des raisons professionnelles	3	3	3
Pour avoir des conditions environnementales plus agréables.	4	4	4
Parce que je vais acheter ou faire construire	5	5	5
Pour des raisons familiales ou personnelles	6	6	6
À cause des nuisances sonores	7	7	7
Pour des raisons financières	8	8	8
Autres raisons (précisez) :	9	9	9
Ne sait pas	10	10	10

Q13. Pour quelles raisons êtes-vous venu habiter ici ?

Précision : Classez au maximum 3 raisons par ordre décroissant.

Enquêteur : une réponse par colonne si pas d'autre choix alors cocher « ne sait pas ». Montrez carte n° 5

	A	B	C
À cause du prix de l'immobilier ou des loyers	1	1	1
Pour des raisons professionnelles	2	2	2
Pour des raisons familiales ou personnelles	3	3	3
Recherche d'un meilleur environnement	4	4	4
Parce que ce quartier est animé/vivant	5	5	5
Parce que l'accès au transport en commun est facile	6	6	6
Parce que le centre ville est à proximité	7	7	7
Parce que j'aime ce quartier	8	8	8
Par pur hasard	9	9	9
Je n'ai pas eu le choix	10	10	10
J'ai toujours vécu ici (dans ce logement ou ce quartier)	11	11	11
Ne sait pas	12	12	12

Q14. Dites si vous êtes « Tout à fait d'accord », « plutôt d'accord », « plutôt pas d'accord » ou « pas du tout d'accord » avec les affirmations suivantes à propos de votre quartier :

Enquêteur : Une réponse par ligne. Montrez échelle d'accord carte n° 6

	Tout à fait d'accord	Plutôt d'accord	Plutôt pas d'accord	Pas du tout d'accord
Il y a beaucoup d'odeurs, de poussières liées à la pollution	4	3	2	1
Il y a suffisamment de commerces de proximité	4	3	2	1
En général, les déplacements en vélo y sont difficiles	4	3	2	1
Il y a peu de bruit dû aux transports	4	3	2	1
Il y a suffisamment d'espace vert	4	3	2	1
Il y a des problèmes d'insécurité, de délinquance ou de vandalisme	4	3	2	1
En général, les déplacements à pieds y sont faciles	4	3	2	1
Le nombre d'équipements pour le sport et les loisirs est satisfaisant	4	3	2	1
Il n'y a aucun problème de stationnement	4	3	2	1

Q15. Globalement, que pensez vous de votre cadre de vie quotidien, c'est-à-dire ce qui est à proximité de votre logement, dans l'ensemble, en êtes-vous ?

Enquêteur : Montrez échelle de satisfaction carte n° 7

- Extrêmement satisfait..... 5
- Beaucoup satisfait..... 4

- Moyennement satisfait 3
- Légèrement satisfait 2
- Pas du tout satisfait 1

2. Le tramway dans le quartier

Q16. Lorsque vous avez emménagé dans ce logement, le tramway passait-il déjà dans votre rue ?

- Oui 1 ➔ **PASSEZ À Q17**
- Non 2 ➔ **PASSEZ À Q19**

Q17. À ce moment là, c'est-à-dire au moment où vous êtes arrivé dans ce logement, le tramway était pour vous :

Enquêteur : une seule réponse possible

- Plutôt un avantage 1
- Plutôt un inconvénient 2
- Ni un avantage, ni un inconvénient 3
- À la fois un avantage et un inconvénient 4

Q18. Depuis votre installation dans ce logement, avez-vous changé d'avis concernant la présence du tramway ?

- OUI** : je pense désormais qu'il s'agit plutôt d'un avantage 1
 - OUI** : Je pense désormais qu'il s'agit plutôt d'un inconvénient 2
 - OUI** : Je pense désormais qu'il ne s'agit pas plus d'un avantage que d'un inconvénient 3
 - NON** : je n'ai pas changé d'avis 4
- ➔ **PASSEZ À Q22**

Q19. Lorsque vous avez appris que le tramway allait passer devant chez vous, étiez-vous ?

- Favorable à ce projet 1
- Défavorable à ce projet 2
- Sans opinion par rapport à ce projet 3

Q20. Dites si vous êtes « Tout à fait d'accord », « plutôt d'accord », « plutôt pas d'accord » ou « pas du tout d'accord » avec les affirmations suivantes. Depuis que le tramway passe dans votre rue vous diriez ?

Enquêteur : une réponse par ligne Montrez carte n° 8

	Tout à fait d'accord	Plutôt d'accord	Plutôt pas d'accord	Pas du tout d'accord
Ma rue est embellie par les aménagements de la ligne de tramway	4	3	2	1
Il est beaucoup plus difficile de circuler en voiture dans ma rue	4	3	2	1
Il est beaucoup plus facile de stationner dans ma rue	4	3	2	1

	Tout à fait d'accord	Plutôt d'accord	Plutôt pas d'accord	Pas du tout d'accord
Les déplacements en vélo y sont plus faciles	4	3	2	1
Les déplacements à pied y sont plus difficiles	4	3	2	1
Il y a moins de pollution et d'odeurs qu'avant	4	3	2	1
Ma rue est moins bruyante qu'avant	4	3	2	1

Q21. Globalement vous diriez que depuis l'arrivée du tramway votre quartier s'est :

- Dégradé..... 1
- Amélioré 2
- Ni dégradé, ni amélioré 3

3. Le bruit du tramway

Q22. Lorsque vous êtes ici chez vous, est-ce que vous ENTENDEZ le bruit du tramway, même faiblement, qu'il vous gêne ou pas ?

Enquêteur : Une réponse par ligne. Montrez carte n° 9

	Jamais	Occasionnellement	Assez souvent	Tout le temps	
Lorsque vous êtes à l'intérieur, fenêtres fermées	1	2	3	4	
Lorsque vous êtes à l'intérieur, fenêtres ouvertes	1	2	3	4	
Lorsque vous êtes à l' extérieur , sur votre balcon ou dans votre jardin	1	2	3	4	Non concerné 5

Q23. De quelle façon êtes-vous gêné par le bruit du tramway lorsqu'il passe devant chez-vous ?

Enquêteur : Montrez carte n° 10

- Codage :**
- Extrêmement..... 5
 - Beaucoup 4
 - Moyennement 3
 - Légèrement 2
 - Pas du tout 1

	Niveau de gêne
Lorsque que vous êtes à l'intérieur de votre logement, fenêtres fermées	
Lorsque que vous êtes à l'intérieur de votre logement, fenêtres ouvertes	
Lorsque vous êtes à l' extérieur , dans votre jardin ou sur votre balcon	Non concerné 6

Consigne à lire pour Q24 à Q26

Nous vous proposons maintenant une série d'adjectifs pour décrire le bruit tel que vous l'entendez ici, chez vous. Les adjectifs sont présentés par paire. Vous devez répondre pour chaque paire d'adjectifs, en vous positionnant plus ou moins près de l'adjectif qui correspond le mieux à votre avis. Vous devez répondre spontanément et rapidement.

Q24. Vous diriez que le bruit du tramway tel que vous l'entendez lorsque vous êtes ici chez vous FENÊTRES FERMÉES est un bruit

Enquêteur : une réponse par ligne, présenter carte n° 11

	Très	Assez	Un peu	Ni l'un ni l'autre	Un peu	Assez	Très	
Faible	-3	-2	-1	0	1	2	3	Fort
Sourd	-3	-2	-1	0	1	2	3	Strident
Supportable	-3	-2	-1	0	1	2	3	Insupportable
Bref	-3	-2	-1	0	1	2	3	Long
Habituel	-3	-2	-1	0	1	2	3	Inhabituel
Grave	-3	-2	-1	0	1	2	3	Aigu
Progressif	-3	-2	-1	0	1	2	3	Soudain
Lointain	-3	-2	-1	0	1	2	3	Proche

Q25. Vous diriez que le bruit du tramway tel que vous l'entendez lorsque vous êtes ici chez vous FENÊTRES OUVERTES est un bruit

Enquêteur : une réponse par ligne, présenter carte n° 11

	Très	Assez	Un peu	Ni l'un ni l'autre	Un peu	Assez	Très	
Faible	-3	-2	-1	0	1	2	3	Fort
Sourd	-3	-2	-1	0	1	2	3	Strident
Supportable	-3	-2	-1	0	1	2	3	Insupportable
Bref	-3	-2	-1	0	1	2	3	Long
Habituel	-3	-2	-1	0	1	2	3	Inhabituel
Grave	-3	-2	-1	0	1	2	3	Aigu
Progressif	-3	-2	-1	0	1	2	3	Soudain
Lointain	-3	-2	-1	0	1	2	3	Proche

Q26. Vous diriez que le bruit du tramway tel que vous l'entendez lorsque vous êtes ici chez vous DANS LE JARDIN OU SUR VOTRE BALCON/TERRASSE est un bruit Non concerné

4 ➔ PASSEZ A Q27

Enquêteur : une réponse par ligne, présenter carte n° 11

	Très	Assez	Un peu	Ni l'un ni l'autre	Un peu	Assez	Très	
Faible	-3	-2	-1	0	1	2	3	Fort
Sourd	-3	-2	-1	0	1	2	3	Strident

	Très	Assez	Un peu	Ni l'un ni l'autre	Un peu	Assez	Très	
Supportable	-3	-2	-1	0	1	2	3	Insupportable
Bref	-3	-2	-1	0	1	2	3	Long
Habituel	-3	-2	-1	0	1	2	3	Inhabituel
Grave	-3	-2	-1	0	1	2	3	Aigu
Progressif	-3	-2	-1	0	1	2	3	Soudain
Lointain	-3	-2	-1	0	1	2	3	Proche

Enquêteur seul : Avez-vous l'impression que la personne interrogée a eu des difficultés pour répondre aux questions Q24 à Q26 : Oui Non

Q27. Je vais vous lire une liste de mots, vous choisirez au maximum 2 mots qui, pour vous, décrivent le mieux le bruit du tramway tel que vous l'entendez lorsque vous êtes ici chez vous :

Enquêteur : Montrez carte n° 12

	A 1 ^{re} réponse	B 2 ^e réponse
Un roulement	1	1
Un grincement	2	2
Un souffle	3	3
Un sifflement	4	4
Un grondement	5	5
Un crissement	6	6
Ne sait pas (si pas de 2 ^e réponse)	7	7

Q28. Lorsque vous êtes ici chez vous, et que le tramway passe, vous arrive-t-il d'entendre ?

Enquêteur : une réponse par ligne. Montrez carte n° 13

	Jamais	Occasionnellement	Assez souvent	Tout le temps
Le bruit des freins du tramway	1	2	3	4
La sonnette d'avertissement	1	2	3	4
Le bruit des portes qui s'actionnent	1	2	3	4
Le marche pied qui se déplie	1	2	3	4
Les annonces en station	1	2	3	4
Le bruit des usagers qui montent ou descendent du tramway	1	2	3	4
Le bruit du moteur du tramway	1	2	3	4

Q29. Est-ce que les conditions météorologiques ont une influence sur le bruit du tramway tel que vous l'entendez, ici chez vous :

Enquêteur : une réponse par ligne

	OUI, le bruit est plus fort	OUI, le bruit est moins fort	NON, Aucune influence
Lorsqu'il pleut	1	2	3
Autres (précisez) :	1	2	3

Q30. En ce qui concerne le bruit du tramway, tel que vous l'entendez ici chez vous, vous diriez que :

Enquêteur : une seule réponse possible Montrez carte n° 14

- Les tramways récents sont plus bruyants 1
- Les tramways anciens sont plus bruyants..... 2
- Les deux types de tramway font le même bruit..... 3
- Ne sait pas 4

Q31. Lorsque vous êtes ici chez vous, vous arrive-t-il, lorsque le tramway passe ?

Enquêteur : Une réponse par ligne .Montrez carte n° 15

	Jamais	Occasion- nellement	Assez souvent	Tout le temps
De sursauter	1	2	3	4
De fermer la fenêtre	1	2	3	4
D'interrompre votre conversation	1	2	3	4
De monter le son de la télévision	1	2	3	4
De vous réveiller	1	2	3	4
D'entendre vos fenêtres vibrer	1	2	3	4
D'être perturbé pendant votre lecture	1	2	3	4
D'être perturbé lorsque vous vous reposez, vous détendez	1	2	3	4
De ressentir des vibrations	1	2	3	4

Q32. Si vous pensez aux 6 derniers mois, lorsque vous êtes ici chez vous, de quelle façon êtes vous gêné par le bruit dû à la circulation des tramways pour chacune des périodes suivantes ?

Enquêteur : une réponse dans chaque case, présentez l'échelle de gêne. Montrez carte n° 16

- Codage :**
- Extrêmement 5
 - Beaucoup 4
 - Moyennement..... 3
 - Légèrement 2
 - Pas du tout 1

a) Si vous pensez à un jour normal de la semaine :

	Niveau de gêne
Matin	
Jour	
Soirée	
Nuit	
Globalement sur une journée de 24 H	

b) Si vous pensez au week-end :

	Niveau de gêne
Globalement sur une journée de 24 h du week-end	

Q33. Lorsque vous êtes ici chez vous, y-a-t-il une ou des période(s) de l'année où vous êtes plus particulièrement gêné par le bruit dû à la circulation des tramways ?

Enquêteur : deux réponses maximum

	A	B
Le printemps	1	1
L'été	2	2
L'automne	3	3
L'hiver	4	4
Non aucune, je suis toujours gêné (ou pas gêné) de la même façon	5	5
NSP – (Si pas de 2 ^e réponse)	6	6

Q34. Voici une échelle d'opinion graduée de 0 à 10. Vous devez noter sur cette échelle la façon dont le bruit dû à la circulation des tramways vous gêne lorsque vous êtes ici, chez vous : notez 0 si le bruit dû à la circulation des tramways ne vous gêne pas du tout et notez 10 si le bruit vous gêne extrêmement. Si vous êtes entre ces deux situations, choisissez une note intermédiaire entre zéro et dix.

Globalement si vous pensez aux différentes périodes de l'année et de la journée. Comment noteriez-vous la façon dont le bruit dû à la circulation des tramways vous gêne lorsque vous êtes chez-vous ?

Enquêteur : présentez échelle d'opinion. Montrez carte n° 17

Maintenant quelle note exprime le mieux la gêne que vous ressentez ?

/ /

Q35. En résumé, si vous pensez aux six derniers mois, vous diriez que globalement le bruit dû à la circulation des tramways vous gêne

Enquêteur : présentez échelle de gêne. Montrez carte n° 18

- Extrêmement 5
- Beaucoup 4
- Moyennement 3
- Légèrement 2
- Pas du tout 1

Q36. Qu'est ce qui est pour vous le plus gênant dans le fait d'habiter à proximité d'une ligne de tramway ?

Enquêteur : deux réponses maximum – présentez carte n° 19

	A Réponse 1	B Réponse 2
Le nombre de passages de tramway	1	1
L'intensité du bruit lorsqu'un tramway passe	2	2
Les vibrations dues au passage du tramway	3	3
Le fait de voir passer le tramway	4	4
Les usagers du tramway qui regardent chez vous	5	5

	A Réponse 1	B Réponse 2
Les coups de sonnette du tramway	6	6
Je ne suis gêné(e) par rien	7	
NSP – (si pas de 2 ^{ème} choix)	8	8

Q37. Finalement, avez-vous le sentiment d'être aujourd'hui habitué au bruit du tramway ?

- Oui..... 1
- Non..... 2
- Ne sait pas 3

Q38. Lorsque vous êtes ici chez vous, êtes-vous gêné par le bruit :

Enquêteur : une réponse par ligne Montrer carte n° 20

	Non concerné	Pas du tout	Légè- rement	Moyen- nement	Beau- coup	Extrê- mement
Des camions	6	1	2	3	4	5
Des 2 roues motorisées (Mobylettes, motos, scooters)	6	1	2	3	4	5
Des bruits des voisins (à l'intérieur des logements)	6	1	2	3	4	5
Des bruits du voisinage (extérieur des logements)	6	1	2	3	4	5
Des avions	6	1	2	3	4	5
Des bruits d'activités de loisirs, de divertissement (restaurants, bars, cinémas.)	6	1	2	3	4	5
Des bruits d'activités professionnelles (usines, commerces)	6	1	2	3	4	5
Autres (précisez).....	6	1	2	3	4	5

Q39. Si vous pensez aux 6 derniers mois, lorsque vous êtes ici chez vous, de quelle façon êtes vous gêné par le bruit dû à la circulation automobile pour chacune des périodes suivantes ?

Enquêteur : une réponse dans chaque case, présentez l'échelle de gêne. Montrez carte n° 20

- Codage :** Extrêmement..... 5
 Beaucoup 4
 Moyennement 3
 Légèrement 2
 Pas du tout 1

	Niveau de gêne
Matin	
Jour	
Soirée	
Nuit	
Globalement sur une journée de 24 H	

Q40. Voici une échelle d'opinion graduée de 0 à 10. Vous devez noter sur cette échelle la façon dont le bruit dû à la circulation automobile vous gêne lorsque vous êtes ici, chez vous : notez 0 si le bruit occasionné par celle-ci ne vous gêne pas du tout et notez 10 si le bruit vous gêne extrêmement. Si vous êtes entre ces deux situations, choisissez une note intermédiaire entre zéro et dix.

Globalement si vous pensez aux différentes périodes de l'année et de la journée. Comment noteriez-vous la façon dont le bruit dû à la circulation automobile vous gêne lorsque vous êtes chez-vous ?

Enquêteur : présentez échelle d'opinion. Montrez carte n° 21

Maintenant quelle note exprime le mieux la gêne que vous ressentez ?

/ ___ /

Q41. En résumé, si vous pensez aux six derniers mois, vous diriez que globalement le bruit dû à la circulation automobile vous gêne :

Enquêteur : présentez échelle de gêne. Montrez carte n° 22

- Extrêmement 5
- Beaucoup 4
- Moyennement 3
- Légèrement 2
- Pas du tout 1

Q42. Si vous pensez aux six derniers mois, de quelle façon êtes-vous gêné par LE BRUIT EN GÉNÉRAL, c'est-à-dire l'ensemble des bruits que vous entendez lorsque vous êtes ici chez vous :

Enquêteur : présentez l'échelle de gêne, carte n° 22

- Extrêmement 5
- Beaucoup 4
- Moyennement 3
- Légèrement 2
- Pas du tout 1

Q43. De la même façon, si vous pensez aux six derniers mois, comment noteriez-vous la gêne due au BRUIT EN GÉNÉRAL, c'est-à-dire l'ensemble des bruits que vous entendez lorsque vous êtes ici chez vous :

Consigne : voici une échelle d'opinion graduée de 0 à 10. Vous devez noter sur cette échelle la façon dont LE BRUIT EN GÉNÉRAL vous gêne lorsque vous êtes ici, chez vous : notez 0 si le bruit ne vous gêne pas du tout et notez 10 si le bruit vous gêne extrêmement. Si vous êtes entre ces deux situations, choisissez une note intermédiaire entre zéro et dix.

Enquêteur : présenter échelle d'opinion. Montrer carte n° 23

Maintenant quelle note exprime le mieux la gêne que vous ressentez ?

/ ___ /

4. La personne enquêtée et le ménage

« Pour finir, quelques questions concernant vous-même et votre famille »

Q44. Sexe

- Masculin 1
- Féminin 2

Q45. Quelle est votre année de naissance ? / / / / /

Q46. Quel est votre niveau d'études ?

Enquêteur : Présentez carte n° 24

- Aucun diplôme..... 1
- C.E.P. / C.A.P. 2
- Brevet (B.E.P.C., B.E.P.) 3
- Baccalauréat 4
- BTS/DUT 5
- Autre diplôme supérieur (grande école, Université) 6
- Autres (*précisez*) : 7

Q47. Actuellement, exercez-vous une activité professionnelle ?

- Oui, à temps complet..... 1
- Oui, à temps partiel 2
- Non 3
- Non, retraité 4
- Non, chômeur 5
- Non, congé parental 6
- Non, élève ou étudiant 7 ➔ **PASSEZ À Q51**
- Non, sans profession 8 ➔ **PASSEZ À Q51**

Q48. Quelle est (ou était) votre profession ?

Enquêteur : notez en clair / _____ /

Q49. Si actif, travaillez-vous en horaires décalés (travail de nuit, travail en équipe) ?

- Oui..... 1
- Non 2

Q50. Si actif, travaillez-vous à domicile

- Oui..... 1
- Non 2

Q51. D'une manière générale, estimez-vous être sensible au bruit ?

Enquêteur : Présentez carte n° 25

- Pas du tout 1
- Un peu 2
- Assez..... 3
- Très 4

Q52. Comment qualifieriez-vous votre état de santé au cours des 12 derniers mois ?

Consigne à lire : voici une échelle d'opinion graduée de 0 à 10. Vous devez noter grâce à cette échelle votre état de santé : notez 0 si vous pensez que votre état de santé est très mauvais , notez 10 si vous pensez que votre état de santé est très bon. Si vous êtes entre ces deux situations, choisissez une note intermédiaire entre zéro et dix.

Ne souhaite pas répondre à cette question..... 11 ➔ **PASSEZ À Q53**

Enquêteur : Montrez carte n° 26

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

Très mauvais

Très bon

Q53. Dans ce logement, actuellement, vous vivez ?

- En couple avec enfant(s).....1 année de naissance des enfants qui vivent dans le logement : 1 : / / / / / , 2 : / / / / / , 3 : / / / / / ,
- En couple sans enfant.....2
- Seul(e).....3
- Avec vos parents.....4
- Seul(e) avec des enfants.....5 année de naissance des enfants qui vivent dans le logement : 1 : / / / / / , 2 : / / / / / , 3 : / / / / /
- Autre cas (précisez)6

Q54. Êtes vous présent à votre domicile...

Enquêteur : une réponse par ligne, montrez carte 27

	Jamais	Occasionnellement	Assez souvent	Tout le temps
...en matinée	1	2	3	4
...l'après-midi	1	2	3	4
...en soirée	1	2	3	4
...la nuit	1	2	3	4

Q55. Vous arrive-t-il de partir en week-end ?

Enquêteur : montrez carte n° 28

- Tous les week-end..... 1
- Assez souvent 2
- Occasionnellement..... 3
- Jamais 4

Q56. Votre profession ou celle d'un des membres de votre ménage, est-elle en relation avec le tramway ?

- Oui..... 1
- Non 2



FIN DU QUESTIONNAIRE

➤ Remplir le tableau ci-joint

À remplir par l'enquêteur seul

Y a-t-il des signes pouvant laisser à penser que l'interviewé a eu des difficultés à répondre ?

- non 1
- oui 2

Si oui, précisez (problème de compréhension, surdité, ...) :

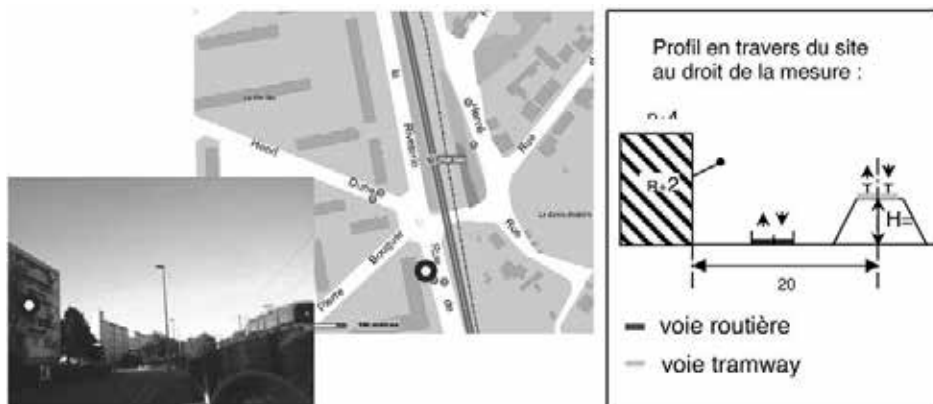
.....
.....
.....

Ambiance générale de l'interview ?

- très bonne 1
- normale 2
- médiocre 3

Annexe 6

Enquête de perception : exemple de fiche de mesure acoustique



Point de mesure

- Hauteur par rapport à la voie : R + 2
- Date des mesures : du 22 au 23/11/2005
- Conditions météorologiques :
Jour (6h-22h) U3T3
Nuit (22h-6h) U3T5

Caractéristiques du site

- Site en L
- Présence virage (non ; oui, léger, accentué) : non
- Profil en long : horizontal
- Hauteur habitation : côté mesures : R + 4 (Rdc surélevés) ;

- Revêtement façade : côté mesures : béton rugueux ;
- Nature des ouvertures : côté mesures : vitrage double ;
- Distance entre l'axe des voies de tramway et le bâtiment : 30 m

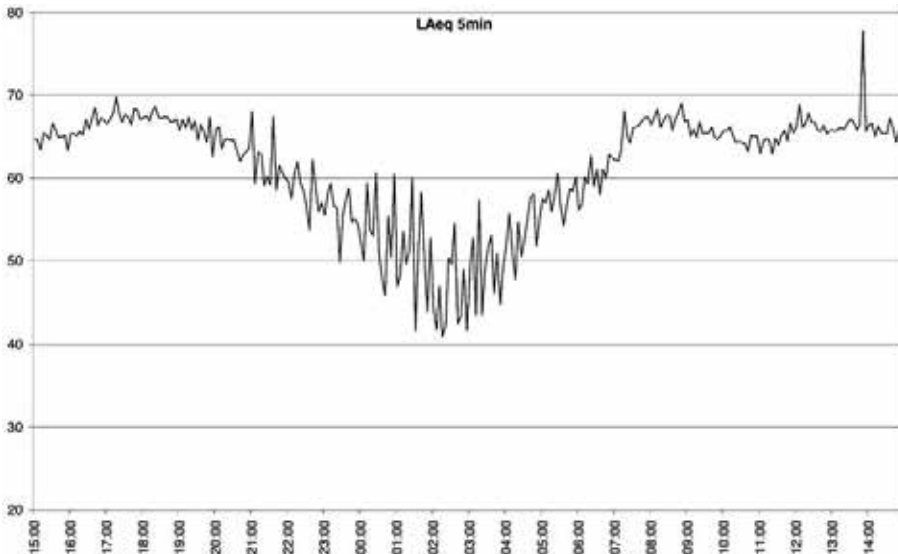
Caractéristiques des voies routières

- Nombre : 2 x 1 voie
- Vitesse estimée : 55 km/h
- Nature du trafic : pulsé
- Nature et état du revêtement : classique
- Trafic (TMJA-année) : 9500 véh/j-2006 (rue de la Riveterie (vers sud/rond point))

Caractéristiques de la voie tramway

- Type de pose de voie (ballast, classique, -10dB ou -20dB) : ballast SNCF
- Type de revêtement (ballast, végétalisé, réverbérant) : ballast
- Allure du tramway (vitesse constante, accéléré – décéléré ou station) : accéléré – décéléré
- Type de tramway (proportion Alstom / Bombardier) : mixte

Trace temporel (L_{Aeq} 5 min)



Niveaux mesures (db(A))

	L_{Aeq}	L_1	L_{10}	L_{50}	L_{90}	L_{95}	$L_{10} - L_{90}$
06h-09h	65,4	74,7	69,0	62,1	49,7	48,2	19,3
09h-18h	66,6	75,2	69,0	63,8	56,4	55,0	12,6
18h-22h	63,7	74,1	68,8	62,7	52,1	49,6	16,7
22h-06h	54,9	68,0	56,4	44,9	41,1	40,5	15,3
00h-24h	64,5	73,6	68,1	59,1	42,7	41,5	25,4

Évènements

Nombre d'évènements dépassant le seuil indiqué pendant au moins 5 s.

	> 65 dB(A)	> 70 dB(A)	> 75 dB(A)	> 80 dB(A)	Trafic tramway
06h-09h	67	67	0	0	67
09h-18h	193	193	0	0	193
18h-22h	61	61	0	0	61
22h-06h	22	22	0	0	22
00h-24h	343	343	0	0	343

Trafic tramway

Ligne 1	Vers Beaujoire	Vers François Mitterrand
06h-09h	32	35
09h-18h	93	100
18h-22h	24	37
22h-06h	9	13
00h-24h	158	185

Spectre moyen d'un passage de tramway

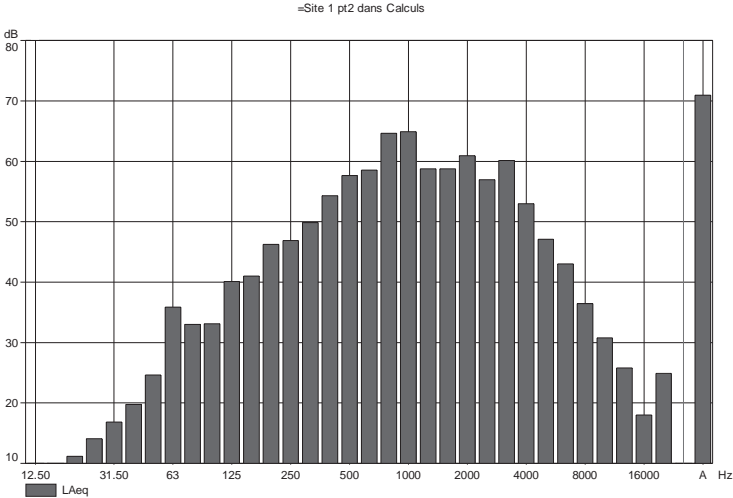
Moyenne sur 10 passages

Leq passage : 70,5 dB(A)

$L_{max,1s}$: 79,1 dB(A)

Dose passage : 80,8 dB(A)

$L_{max,5s}$: 76,2 dB(A)



Décomposition sonore par type de source

	Niveau sonore dû au tramway	Niveau sonore autres	Niveau sonore total
06h-09h	58,7	64,3	65,4
09h-18h	58,5	65,9	66,6
18h-22h	57,0	62,7	63,7
22h-06h	49,6	53,3	54,9
00h-24h	56,8	63,7	64,5

Fiche bibliographique

Unité de recherche LTE	Projet n° C05-11	Actes INRETS n° 279
Titre Bruit et vibrations dus aux tramways : émission et perception		
Sous-titre		Langue F
Auteur(s) M.A. Pallas ¹ , C.Philipps-Bertin ¹ , M. Maldonado ³ , T. Legouis ² , P. Champelovier ¹ , O. Chiello ¹ , J. Lambert ¹ , D. Le Houedec ³ , J. Lelong ¹		Rattachement ext. ¹ INRETS ² SerdB ³ EC Nantes
Nom adresse financeur, co-éditeur ADEME		N° contrat, conv. C05-11
		Date de publication Décembre 2009
Remarques		
Résumé Un des avantages environnementaux du tramway souvent mis en avant est le relatif « silence » qu'il procure comparativement aux autres moyens de transports publics. Cependant, on constate que l'introduction de lignes de tramway peut créer des situations particulièrement gênantes pour les riverains. D'où la nécessité de mieux connaître les situations à l'origine des réactions négatives des riverains, afin de mieux prendre en compte la perception et les effets du bruit et des vibrations dans les projets futurs, ainsi que dans l'élaboration de réglementations adaptées au cas du bruit des tramways. Cette recherche propose deux approches complémentaires du bruit et des vibrations engendrés par la circulation des tramways : – une approche physique, qui a permis une caractérisation fine du bruit et des vibrations émis par le tramway ; – une approche psychosociologique qui s'est intéressée à la perception de ces bruits et vibrations et à l'évaluation de la gêne qu'ils peuvent provoquer chez les riverains. La démarche suivie inclut le recueil et l'analyse de données expérimentales détaillées (mesures, enquête). Des modèles sont développés en matière d'émission acoustique, de vibration et de gêne. Ils permettent d'élargir la portée des résultats scientifiques, et de les resituer en conclusion dans un contexte opérationnel et réglementaire.		
Mots clés tramway, bruit, vibration, perception, gêne		
Nb de pages 270	Prix 125,24 €	Bibliographie Oui

Publication data form

Research Unit LTE	Projet No C05-11	INRETS proceedings No 279
Title Noise and vibrations due to trams : emission and perception		
Subtitle		Language F
Author(s) M.A. Pallas ¹ , C.Philipps-Bertin ¹ , M. Maldonado ³ , T. Legouis ² , P. Champelovier ¹ , O. Chiello ¹ , J. Lambert ¹ , D. Le Houedec ³ , J. Lelong ¹		Affiliation ¹ INRETS ² SerdB ³ EC Nantes
Sponsor, co-editor, name and address		Contract, conv. N° C05-11
		Publication date December 2009
Notes		
Summary One of the environmental advantages of the tram which is often put forward, is its relative « silence », in comparison with other public means of transportation. However, the introduction of tram lines can create particularly annoying situations for the local residents. Hence arises the need for a better knowledge of the situations leading to negative reactions from the local inhabitants, in order to better take into account the perception and the effects of noise/vibrations in the future projects, as well as in the elaboration of regulations adapted to the case of tram noise. The research presented in this report proposes two complementary approaches of the noise and vibrations generated by trams : – a physical approach, which provides a detailed description of the noise and the vibrations emitted by trams, – a psycho-sociological approach which considers the perception of these noises and vibrations, and the evaluation of the annoyance for the local residents. Both of them include in situ experimental data collection and analysis (measures, socio-acoustic survey). Noise emission, vibration and annoyance models are elaborated. They allow to widen the scientific results and, in conclusion, to place them in an operational and regulation context.		
Key words Tram, Noise, Vibration, Perception, Annoyance		
Nb of pages 270	Price 15,24 €	Bibliography Yes

Imprimé en France – JOUVE, 1, rue du Docteur-Sauvé – 53101 Mayenne
498961E - Dépôt légal : décembre 2009



Les impacts de l'introduction du tramway sur le cadre de vie urbain sont nombreux. Sur le plan environnemental, la question du bruit demeure un des enjeux-clefs, tant pour les concepteurs de tramways que pour les exploitants de réseaux de transport collectif et les collectivités locales, dès lors que l'un des objectifs visés est une plus grande acceptabilité de ce mode de transport par les riverains. Mais que savons-nous aujourd'hui de cette nuisance ?

Cette recherche, effectuée dans le cadre d'un projet PREDIT financé par l'ADEME, s'est attachée à caractériser les émissions acoustiques et vibratoires des tramways, et à évaluer la gêne ressentie par les riverains. Ce travail s'appuie sur le recueil *in situ* de données expérimentales – mesures, enquête – et le développement de modèles explicatifs. Sur la base des résultats scientifiques obtenus sont discutées les évolutions souhaitables sur le plan réglementaire.

Marie-Agnès Pallas, INRETS, Laboratoire transports environnement (LTE)

Chrystèle Philipps-Bertin, INRETS-LTE

Marc Maldonado, Génie civil et mécanique, Ecole centrale Nantes

Thierry Legouis, Bureau d'études SerdB Nantes

Patricia Champelovier, INRETS-LTE

Olivier Chiello, INRETS-LTE

Jacques Lambert, INRETS-LTE

Donatien Le Houedec, Génie civil et mécanique, Ecole centrale Nantes

Joël Lelong, INRETS-LTE

Rapport n° 279
Décembre 2009

15,24 €



Institut national de recherche
sur les transports et leur sécurité



ISSN 0768-9756
ISBN 978-2-85782-678-1