

Compréhension des mécanismes perceptifs associés à la gêne due aux bruit et vibrations du trafic ferroviaire en zone urbaine

Philéas Maigrot

▶ **To cite this version:**

Philéas Maigrot. Compréhension des mécanismes perceptifs associés à la gêne due aux bruit et vibrations du trafic ferroviaire en zone urbaine. Vibrations [physics.class-ph]. Université de Lyon, 2019. Français. NNT : 2019LYSEI051 . tel-02629274

HAL Id: tel-02629274
https://theses.hal.science/tel-02629274

Submitted on 27 May 2020

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.

N°d'ordre NNT : 2019LYSEI051

THESE de DOCTORAT DE L'UNIVERSITE DE LYON
opérée au sein de
Institut National des Sciences Appliquées de Lyon

École Doctorale 162
Mécanique, Énergétique, Génie Civil et Acoustique

Spécialité de doctorat : Acoustique

Soutenue publiquement le 23/07/2019, par :
Philéas Maigrot

Compréhension des mécanismes perceptifs associés à la gêne due aux bruit et vibrations du trafic ferroviaire en zone urbaine

---

Devant le jury composé de :

Gauthier, Philippe-Aubert	Professeur, GAUS	Rapporteur
Lavandier, Catherine	Professeur, Université de Cergy-Pontoise	Membre du jury
Marquis-Favre, Catherine	Directrice de recherche, ENTPE Lyon	Directrice de thèse
Moorhouse, Andy	Professeur, Université de Salford	Rapporteur
Parizet, Étienne	Professeur, INSA Lyon	Directeur de thèse
Poisson, Franck	Directeur technique, SNCF	Membre du jury

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

Département FEDORA – INSA Lyon - Ecoles Doctorales – Quinquennal 2016-2020

SIGLE	ECOLE DOCTORALE	NOM ET COORDONNEES DU RESPONSABLE
CHIMIE	**CHIMIE DE LYON** **http://www.edchimie-lyon.fr** Sec. : Renée EL MELHEM Bât. Blaise PASCAL, 3e étage **secretariat@edchimie-lyon.fr** INSA : R. GOURDON	M. Stéphane DANIELE Institut de recherches sur la catalyse et l'environnement de Lyon IRCELYON-UMR 5256 Équipe CDFA 2 Avenue Albert EINSTEIN 69 626 Villeurbanne CEDEX **directeur@edchimie-lyon.fr**
E.E.A.	**ÉLECTRONIQUE, ÉLECTROTECHNIQUE, AUTOMATIQUE** **http://edeea.ec-lyon.fr** Sec. : M.C. HAVGOUDOUKIAN **ecole-doctorale.eea@ec-lyon.fr**	M. Gérard SCORLETTI École Centrale de Lyon 36 Avenue Guy DE COLLONGUE 69 134 Écully Tél : 04.72.18.60.97 Fax 04.78.43.37.17 **gerard.scorletti@ec-lyon.fr**
E2M2	**ÉVOLUTION, ÉCOSYSTÈME, MICROBIOLOGIE, MODÉLISATION** **http://e2m2.universite-lyon.fr** Sec. : Sylvie ROBERJOT Bât. Atrium, UCB Lyon 1 Tél : 04.72.44.83.62 INSA : H. CHARLES **secretariat.e2m2@univ-lyon1.fr**	M. Philippe NORMAND UMR 5557 Lab. d'Ecologie Microbienne Université Claude Bernard Lyon 1 Bâtiment Mendel 43, boulevard du 11 Novembre 1918 69 622 Villeurbanne CEDEX **philippe.normand@univ-lyon1.fr**
EDISS	**INTERDISCIPLINAIRE SCIENCES-SANTÉ** **http://www.ediss-lyon.fr** Sec. : Sylvie ROBERJOT Bât. Atrium, UCB Lyon 1 Tél : 04.72.44.83.62 INSA : M. LAGARDE **secretariat.ediss@univ-lyon1.fr**	Mme Emmanuelle CANET-SOULAS INSERM U1060, CarMeN lab, Univ. Lyon 1 Bâtiment IMBL 11 Avenue Jean CAPELLE INSA de Lyon 69 621 Villeurbanne Tél : 04.72.68.49.09 Fax : 04.72.68.49.16 **emmanuelle.canet@univ-lyon1.fr**
INFOMATHS	**INFORMATIQUE ET MATHÉMATIQUES** **http://edinfomaths.universite-lyon.fr** Sec. : Renée EL MELHEM Bât. Blaise PASCAL, 3e étage Tél : 04.72.43.80.46 **infomaths@univ-lyon1.fr**	M. Luca ZAMBONI Bât. Braconnier 43 Boulevard du 11 novembre 1918 69 622 Villeurbanne CEDEX Tél : 04.26.23.45.52 **zamboni@maths.univ-lyon1.fr**
Matériaux	**MATÉRIAUX DE LYON** **http://ed34.universite-lyon.fr** Sec. : Stéphanie CAUVIN Tél : 04.72.43.71.70 Bât. Direction **ed.materiaux@insa-lyon.fr**	M. Jean-Yves BUFFIÈRE INSA de Lyon MATEIS - Bât. Saint-Exupéry 7 Avenue Jean CAPELLE 69 621 Villeurbanne CEDEX Tél : 04.72.43.71.70 Fax : 04.72.43.85.28 **jean-yves.buffiere@insa-lyon.fr**
MEGA	**MÉCANIQUE, ÉNERGÉTIQUE, GÉNIE CIVIL, ACOUSTIQUE** **http://edmega.universite-lyon.fr** Sec. : Stéphanie CAUVIN Tél : 04.72.43.71.70 Bât. Direction **mega@insa-lyon.fr**	M. Jocelyn BONJOUR INSA de Lyon Laboratoire CETHIL Bâtiment Sadi-Carnot 9, rue de la Physique 69 621 Villeurbanne CEDEX **jocelyn.bonjour@insa-lyon.fr**
ScSo	**ScSo*** **http://ed483.univ-lyon2.fr** Sec. : Véronique GUICHARD INSA : J.Y. TOUSSAINT Tél : 04.78.69.72.76 **veronique.cervantes@univ-lyon2.fr**	M. Christian MONTES Université Lyon 2 86 Rue Pasteur 69 365 Lyon CEDEX 07 **christian.montes@univ-lyon2.fr**

*ScSo : Histoire, Géographie, Aménagement, Urbanisme, Archéologie, Science politique, Sociologie, Anthropologie

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

Résumé

Les vibrations générées par le trafic ferroviaire se propagent depuis les rails jusqu'à l'intérieur des maisons voisines. Les riverains concernés par l'exposition aux vibrations sont aussi exposés au bruit ferroviaire. Cette co-exposition au bruit et aux vibrations est source de gêne pour les résidents et peut engendrer des troubles de la santé. Peu d'études ont été menées à propos de la co-exposition au bruit et aux vibrations en termes de gêne. L'objectif de la thèse est d'apporter des éléments de compréhension au regard des phénomènes perceptifs mis en jeux lors de l'exposition combinée au bruit et aux vibrations ferroviaires. Des expériences sont menées dans ce but, en conditions contrôlées et à l'aide d'enregistrements acoustiques et vibratoires réalisés à proximité d'une voie ferrée, à l'intérieur d'un logement. Une première étude a été réalisée afin de valider un protocole expérimental permettant de recueillir en laboratoire des réponses de gêne. Pour plusieurs combinaisons d'enregistrements de bruit et de vibrations ferroviaires présentés à différents niveaux, la gêne 1) partielle due au bruit, 2) partielle due aux vibrations et 3) totale due à la co-exposition au bruit et aux vibrations étaient recueillies. Les résultats de cette première étude ont été utilisés afin d'adopter un même protocole expérimental tout au long de ces travaux de thèse. Les études traitant de la gêne due aux bruit et vibrations ferroviaires sont majoritairement basées sur des indices ne reflétant que la quantité d'énergie liée à chaque exposition et leurs résultats peuvent être contradictoires. Une seconde étude a été menée en laboratoire dans le but d'évaluer l'influence de l'intensité (sonore, vibratoire) sur la gêne et afin de déterminer l'origine des différences de résultats dans la littérature. Les hypothèses testées étaient que ces différences pourraient être dues aux différentes plages de niveaux sonores et vibratoires étudiées, ou à des différences de contenus fréquentiels au sein des stimuli utilisés dans les différentes expériences. Dans la littérature, un besoin d'autres études en laboratoire est souligné afin de mieux comprendre l'influence des paramètres autres que le niveau global vibratoire (p. ex. contenu spectral, modulation) sur la gêne due aux vibrations ferroviaires. Un travail a été réalisé afin de mieux comprendre le rôle du contenu spectral vibratoire dans la gêne spécifique due aux vibrations, en l'absence de bruit. Une expérience a été conduite en utilisant des stimuli vibratoires artificiels, créés à partir des spectres d'enregistrements de vibrations ferroviaires. L'importance des paramètres autres que les niveaux de bruit et de vibrations globaux sur les variations de la gêne due à la co-exposition aux bruit et vibrations ferroviaires a fait l'objet d'une dernière étude. Les stimuli utilisés étaient obtenus à partir de 19 enregistrements sonores et vibratoires réalisés chez un riverain d'une voie ferrée, en les ramenant à une durée de 10s et en contrôlant les variations de niveau de bruit et de vibrations. Cette étude a montré que l'importance relative des paramètres temporels et fréquentiels de la co-exposition au bruit et aux vibrations était faible au regard de celle des paramètres énergétiques.

Mots-clés : gêne vibratoire de court-terme, gêne sonore de court-terme, trafic

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

ferroviaire urbain, co-exposition bruit et vibrations, gêne totale, environnement contrôlé, expérience en laboratoire, mesure *in situ*.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

Abstract

Vibrations due to railway traffic propagate from the tracks to inside neighbour houses. Residents who are exposed to vibrations are also exposed to railway noise. This combined exposure to noise and vibration leads to annoyance, as well as to some health issues. Few studies have been conducted to investigate this combined exposure in terms of annoyance. The goal of the thesis is to improve the knowledge concerning the perceptual phenomena involved when both railway noise and railway vibration occur at the same time. Experiments are carried out in controlled conditions for that purpose, using acoustic and vibratory recordings obtained in the vicinity of a railway track, inside a dwelling. A first study was conducted in order to test the validity of an experimental procedure allowing to collect annoyance responses in laboratory conditions. For several combinations of noise and vibration at different noise and vibration levels, annoyance responses were collected : 1) partial annoyance due to noise, 2) partial annoyance due to vibration and 3) total annoyance due to combined noise and vibration. Results of this first study led to a common procedure used for the rest of the experiments carried out during this thesis work. Studies about annoyance due to combined railway noise and vibration often use indices which only describe an amount of energy for each single exposure. Results can be contradictory. A second study was conducted in the laboratory in order to evaluate the influence of (noise and vibration) intensity on annoyance and to determine the reason of the contradictory results observed in the literature. The initial hypotheses made in the current work were that those could be due to the different ranges of variation of noise and vibratory levels, or to the different spectral contents of the stimuli used in the studies of interest. In the literature, there is a reported need of further investigations about the influence of parameters not related to vibration level (*e.g.* frequency content, modulation) on railway vibration annoyance. During this thesis, work was done in the aim of a better understanding of the role of vibratory spectral content in specific annoyance due to vibration in the absence of noise. An experiment was conducted using artificial vibration stimuli based on the railway vibration recording spectra. The importance of parameters other than overall noise or vibration levels on variations of the annoyance due to combined railway noise and vibration was investigated during a last study. The stimuli were based on 19 noise and vibration recordings obtained inside a dwelling, after having reduced their duration to 10s and with controlled variations of noise and vibration levels. The results showed that the relative importance of temporal and spectral parameters of the combined exposure to noise and vibration was low as compared to that of energetic parameters.

Keywords : short-term vibration annoyance, short-term noise annoyance, urban railway traffic, combined noise and vibration exposure, overall annoyance, controlled environment, laboratory experiment, *in situ* measurements.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

Table des matières

1 Introduction **15**

2 Étude bibliographique : La gêne due aux bruit et vibrations ferroviaires combinés, *in situ* et en laboratoire **19**
2.1 La gêne due aux vibrations du trafic ferroviaire 19
2.1.1 La perception des vibrations globales du corps 19
2.1.2 La gêne vibratoire due au trafic ferroviaire : enquêtes *in situ* 23
2.1.3 La gêne vibratoire due au trafic ferroviaire : études en laboratoire . 28
2.2 La gêne due au bruit du trafic ferroviaire 29
2.2.1 La gêne sonore due au trafic ferroviaire : enquêtes *in situ* 29
2.2.2 La gêne sonore due au trafic ferroviaire : études en laboratoire . . . 32
2.3 La gêne due aux bruit et vibrations du trafic ferroviaire 37
2.3.1 La gêne due aux bruit et vibrations ferroviaires combinés : enquêtes *in situ* 37
2.3.2 La gêne due aux bruit et vibrations ferroviaires combinés : études en laboratoire 38
2.4 Conclusion 42

3 Comparaison de deux méthodes de recueil de la gêne en laboratoire **45**
3.1 Méthode expérimentale 47
3.1.1 Participants 47
3.1.2 Stimuli 47
3.1.3 Dispositif expérimental 50
3.1.4 Procédure 51
3.2 Résultats 51
3.2.1 Influence de la méthode sur les réponses de gêne 53
3.2.2 Influence de la méthode sur la difficulté de la tâche 53
3.2.3 Effets des niveaux de bruit et de vibrations sur les réponses de gêne pour les deux méthodes 53
3.2.4 Réponses de gêne spécifique 54
3.3 Discussion 55
3.4 Conclusion 56

4 Étude de l'influence du niveau global sur la gêne due aux bruit et vibrations du trafic ferroviaire **59**
4.1 Introduction 60
4.2 Méthode expérimentale 62
4.2.1 Participants 62
4.2.2 Dispositif expérimental 62

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

4.2.3 Stimuli . . . 63
4.2.4 Procédure . . . 67
4.3 Résultats et Discussion . . . 68
4.3.1 Influence des niveaux de bruit et de vibrations sur les gênes mesurées 68
4.3.2 Influence du type de train sur les gênes mesurées . . . 70
4.3.3 Vérification de l'hypothèse H_1 . . . 71
4.3.4 Vérification de l'hypothèse H_2 . . . 72
4.3.5 Qualité prédictive des modèles de gêne totale . . . 73
4.3.6 Établissement d'une relation d'équivalence subjective . . . 76
4.4 Conclusion . . . 78

5 Étude de l'influence des paramètres autres que le niveau global sur la gêne due aux bruit et vibrations ferroviaires 81
5.1 Introduction . . . 82
5.2 Expérience préliminaire : L'influence du contenu spectral vibratoire sur la gêne due aux vibrations ferroviaires . . . 84
5.2.1 Stimuli . . . 84
5.2.2 Procédure . . . 86
5.2.3 Dispositif expérimental . . . 87
5.2.4 Participants . . . 87
5.3 Résultats de l'expérience préliminaire . . . 88
5.3.1 RM-ANOVAs à 1 facteur - scores de dissimilarité . . . 88
5.3.2 L'influence du contenu spectral sur la gêne due aux vibrations ferroviaires . . . 88
5.4 Expérience I : La gêne spécifique due aux vibrations ferroviaires égalisées en durée . . . 92
5.4.1 Méthode expérimentale . . . 93
5.4.2 Résultats . . . 94
5.5 Expérience II : La gêne due aux bruits et vibrations ferroviaires égalisés en durée . . . 96
5.5.1 Méthode expérimentale . . . 96
5.5.2 Résultats . . . 97
5.6 Discussion . . . 101
5.6.1 L'influence du contenu spectral sur A_V . . . 101
5.6.2 L'influence des paramètres autres que $L_{A_{eq}}$ et $L_{V_{eq}}$ sur la gêne due aux bruit et vibrations ferroviaires . . . 102
5.7 Conclusion . . . 105

6 Conclusion générale 109

A Restitution des signaux vibratoires 113
A.1 Réglage du gain de l'amplificateur . . . 114

B Résultats des RM-ANOVAs 115

C Interfaces de tests 117
C.1 Comparaison de deux méthodes de recueil de la gêne (chapitre 3) . . . 117
C.2 Expérience préliminaire (chapitre 5, section 5.2) . . . 118

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

Liste des tableaux

2.1 Indicateurs acoustiques et vibratoires des niveaux de bruit et de vibrations ferroviaires : notations et définitions. 27

2.2 Caractéristiques des enquêtes *in situ* et des études en laboratoire ayant examiné l'influence du niveau de vibrations sur la gêne due au bruit (A_N), du niveau de bruit sur la gêne due aux vibrations (A_V) et des niveaux de bruit et de vibrations sur la gêne totale (A_T). 36

4.1 Valeurs du coefficient de corrélation de Pearson pour les régressions linéaires entre les valeurs prédites par les modèles de la littérature et les valeurs de A_T recueillies durant l'expérience. * : $p < 0.001$. 75

4.2 Réponses moyennes de gêne vibratoire A_V pour les combinaisons $N_i V_j$ de bruit et de vibrations et régressions linéaires entre $\log_{10}(A_V)$ et $L_{V_{eq}}$ donnant le niveau vibratoire $L_{V_{eq,estim}}$ équivalent en termes de gêne à chaque niveau de bruit $L_{A_{eq}}$. * : $p < 0.001$. 77

5.1 Coefficients de corrélation de Pearson ($|r|$) associés aux régressions linéaires menées entre les probabilités de gêne et les indices vibratoires. * : $p < 0.05$. 92

5.2 Durée et niveau vibratoire $L_{V_{eq}}$ des stimuli vibratoires lors de la restitution sur le banc expérimental, pour un participant. Les extraits des signaux vibratoires des passages de 19 trains (Fret et TER) sont désignés respectivement par les initiales F et T. 93

5.3 Coefficient de corrélation $r_{Pearson}$ entre la gêne vibratoire spécifique et les descripteurs des stimuli vibratoires : niveau vibratoire rms moyen, $L_{V_{eq}}$, accélération rms moyenne calculée dans chaque bande de tiers d'octave, a_{rms_i}, facteur de crête, CF, temps de montée, T_{rise}, durées définies à partir des seuils $a_{max} - 10$dB et $a_{max} - 3$dB, T_{10dB} et T_{3dB}, temps total de dépassement de x cinquièmes de la dynamique du niveau vibratoire, $T_{x/5}$, fréquence et amplitude de modulation, f_{mod} et A_{mod}. * : $p < 0.05$ 96

5.4 Coefficient de corrélation $r_{Pearson}$ entre la gêne partielle due au bruit et les descripteurs des stimuli sonores : niveau sonore dépassé durant x% de la durée du stimulus, L_x, facteur de crête, CF, temps de montée, T_{rise}, durée définie à partir des seuils $L_{A_{max}} - 10$dB(A) et $L_{A_{max}} - 3$dB(A), T_{10dB} et T_{3dB}, fréquence et amplitude de modulation, f_{mod} et A_{mod}, sonie, N, valeur efficace de la dérivée temporelle de la sonie, $\sigma'(N)$ et énergie totale des composantes tonales, $TETC$. * : $p < 0.05$ 100

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

5.5 Coefficient de corrélation $r_{Pearson}$ entre la gêne totale et les descripteurs acoustiques et vibratoires : accélération rms moyenne calculée dans chaque bande de tiers d'octave, a_{rms_i}, niveau vibratoire rms moyen, $L_{V_{eq}}$, facteur de crête (vibrations), CF_{vib}, temps de montée (vibrations), $T_{rise_{vib}}$, temps total de dépassement de x cinquièmes de la dynamique du niveau vibratoire, $T_{x/5}$, durées (vibratoires) définies à partir des seuils $a_{max} - 10$dB et $a_{max} - 3$dB, $T_{10dB_{vib}}$ et $T_{3dB_{vib}}$, fréquence et amplitude de modulation (vibrations), $f_{mod_{vib}}$ et $A_{mod_{vib}}$, niveau sonore dépassé durant x% de la durée du stimulus, L_x, facteur de crête (bruit), CF, temps de montée (bruit), T_{rise}, durée (signal sonore) définie à partir des seuils $L_{A_{max}} - 10$dB(A) et $L_{A_{max}} - 3$dB(A), T_{10dB} et T_{3dB}, fréquence et amplitude de modulation (bruit), f_{mod} et A_{mod}, sonie, N, valeur efficace de la dérivée temporelle de la sonie, $\sigma'(N)$ et énergie totale des composantes tonales, $TETC$. $^{*} : p < 0.05$ 100

5.6 Résultats de la régression linéraire multiple pas-à-pas. *coef. std* : coefficients standardisés. $^{*} : p < 0.05$; $^{**} : p < 0.01$; $^{***} : p < 0.001$ 102

B.1 Statistiques des 6 RM-ANOVAs menées sur A_N, A_V et A_T dues au Fret et au TER recueillies durant les sessions A et C et durant les sessions B et C respectivement. 115

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

Table des figures

2.1 Représentation schématique du corps humain et principales fréquences de résonance (source : [Amari, 2009]). 20
2.2 Pondérations fréquentielles recommandées par les normes BS 6841, ISO 2631-1 et ISO 2631-2. 23

3.1 Dispositif de mesure *in situ*. 48
3.2 Spectres des signaux utilisés pour la création des stimuli : bruit (a) et vibrations (b). 49
3.3 Réponses de gênes moyennes et erreurs-types associées : (a) gêne partielle due au bruit, (b) gêne partielle due aux vibrations et (c) gêne totale, en fonction des combinaisons de niveaux de bruit et de vibrations. 52
3.4 Difficulté moyenne exprimée à l'issue de chaque session et erreurs-types associées. 53

4.1 Influence du niveau vibratoire sur la gêne sonore d'après les données de Howarth et Griffin (a) et Paulsen et Kastka (c). Influence du niveau sonore sur la gêne vibratoire d'après les données de Howarth et Griffin (b) et Paulsen et Kastka (d). 61
4.2 Schéma du banc vibratoire utilisé pour reproduire les stimuli vibratoires, vu de profil (a) et du dessus (b). 63
4.3 Spectres des signaux vibratoires utilisés comme stimuli durant l'expérience. 66
4.4 Moyennes et erreurs-types des réponses de gênes dues aux combinaisons N_3V_3 et N_4V_4, recueillies : (a) en sessions A et C (Fret) et (b) en sessions B et C (TER). 69
4.5 Moyennes et erreurs-types des réponses de gênes partielles dues (a) au bruit en fonction du niveau vibratoire, et (b) aux vibrations en fonction du niveau de bruit. 69
4.6 Représentation graphique de la qualité prédictive du modèle de Paulsen et Kastka (cf. équation 4.6, [Paulsen and Kastka, 1995]), droite de régression et intervalle de confiance à 95%. 75

5.1 Spectres des 4 signaux créés à partir du train 1 (Fret 1). Le spectre $S_{1,0}$ correspond au signal temporel reconstruit sans appliquer de gain. Les spectres $S_{1,Bande}$ correspondent aux signaux temporels reconstruits en appliquant un gain aux bandes 1 à 3. 85
5.2 Probabilités de gêne calculées dans chaque session pour les paires constituées par les stimuli $Train_0$, $Train_{BF}$, $Train_{MF}$ et $Train_{HF}$. 90

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

5.3 Représentation en histogramme des choix Q_{ij} des participants pour chaque paire, session B (a) et session C (b). Pour chaque paire (i, j), les trois barres correspondent au nombre d'occurrences de la réponse $Q_{ij} = 0$, $Q_{ij} = 0.5$ et $Q_{ij} = 1$, respectivement. 91
5.4 Réponses moyennes de gêne vibratoire spécifique obtenues durant la session B et erreurs-types associées. 95
5.5 Réponses moyennes de A_N, A_V et A_T obtenues durant l'Exp. II et erreurs-types associées. 98
5.6 Relation entre la fréquence de modulation des stimuli vibratoires, f_{mod}, et les réponses moyennes de gêne vibratoire spécifique. 103
5.7 Relation entre les réponses moyennes de gêne totale A_T et de gêne partielle due au bruit A_N. 105

A.1 Fonction de transfert du banc vibratoire (trait discontinu) et filtre correctif (trait continu). 113

C.1 Consignes données aux participants lors du recueil des réponses (a) de gêne sonore, (b) de gêne vibratoire, (c) de gêne totale, (d) de gênes partielles sonore et vibratoire et de gêne totale. 117
C.2 Consigne donnée aux participants lors de la comparaison par paires, question « gêne ». 118
C.3 Consigne donnée aux participants lors de la comparaison par paires, question « similarité ». 118

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

Chapitre 1

Introduction

Dans le contexte du changement climatique, le transport ferroviaire se présente comme une alternative aux transports routier et aérien. Ce mode de transport, considéré comme plus écologique, tend à être encouragé en Europe en ce qui concerne la circulation de marchandises et de personnes ([Cheron et al., 2012]). En effet, l'Union Internationale des chemins de fer (UIC), la Communauté Européenne du Rail (CER), l'Union Internationale des Transports Publics (IUPT) et l'Union des Industries Ferroviaires Européennes (UNIFE) ont cosigné un document précisant que les parts de marché du transport de marchandise par voie ferroviaire devraient passer de 8% en 2001 à 15% en 2020, et de 6% à 10% pour le transport de personnes ([Commission of the European Communities, 2001]). De cette décision résulte une densification inévitable du réseau ferroviaire et par conséquent une augmentation de l'exposition au bruit et aux vibrations des populations vivant à proximité des lignes de chemin de fer.

Selon l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), la santé est définie non pas seulement comme l'absence de maladie mais comme un état de bien-être complet physique, mental et social ([World Health Organization, 2011]). Les effets néfastes du bruit sur la santé ont été pointés par de nombreuses études. Parmi ces effets, la gêne sonore est présentée par différents experts de la santé publique comme un problème environnemental à part entière. Dans un sondage réalisé en 2010 par TNS-Sofres concernant les français et les nuisances sonores, il est apparu que deux tiers de l'échantillon de population interrogé se disaient gênés par le bruit à leur domicile [1]. À un niveau sonore donné, la gêne due au bruit du trafic ferroviaire est rapportée par plusieurs études comme étant inférieure à celles dues aux trafics routier et aérien (p. ex. [Miedema and Oudshoorn, 2001]), justifiant dans certaines réglementations l'existence d'un « bonus ferroviaire » de 5dB(A) en faveur du bruit émis par les trains. Cependant, les résultats de nouvelles enquêtes *in situ* tendent à indiquer que la gêne due au bruit ferroviaire, entre autres, est sous-estimé par ces modèles (p. ex. [Gille et al., 2016a]).

L'amélioration de l'isolation thermique et acoustique des bâtiments durant les précédentes décennies a rendu possible une diminution de l'exposition des résidents au bruit. Ce faisant, cette diminution a fait émerger une autre nuisance : celle des vibrations générées au passage des trains et se propageant jusqu'à l'intérieur des habitations adjacentes. De même que le bruit, les vibrations environnementales peuvent affecter la santé et le

1. www.bruit.fr/boite-a-outils-des-acteurs-du-bruit/bruit-et-politique/les-chiffres-du-bruit/les-francais-et-les-nuisances-sonores.html

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

bien-être des populations vivant à proximité des voies ferrées (cf. [Griffin, 1990] pour une revue des effets néfastes des vibrations environnementales sur la santé).

Les autorités publiques Européennes prennent peu à peu conscience de l'effet des vibrations sur l'humain. En France, le Ministère de l'Écologie et du Développement Durable a financé une étude concernant les cadres réglementaires et normatifs au sujet des vibrations, en France et à l'étranger ([Elias et al., 2007]). En Grande Bretagne, le Département de l'Environnement, de l'Alimentation et des Affaires rurales (*Department for Environment, Food and Rural Affairs*, DEFRA) a également financé plusieurs études concernant la réaction des populations face aux vibrations environnementales en milieu résidentiel ([Temple and Arup Acoustics, 2007], [Waddington et al., 2011]). Enfin, la Commission Européenne a financé le projet CargoVibes visant à atténuer les vibrations d'origine solidiennes susceptibles d'affecter les résidents vivant à proximité de voies ferrées ([Woodcock et al., 2013]). L'absence de résultats unanimes quant à l'influence des facteurs autres que le niveau de vibrations global (p. ex. contenu fréquentiel) sur la gêne vibratoire et la diversité des descripteurs physiques ainsi que des pondérations fréquentielles utilisés rendent complexes les comparaisons entre les différences études.

Plusieurs enquêtes *in situ* ont été menées pour établir une relation entre les émissions de bruit et de vibrations ferroviaires et la gêne exprimée (p. ex. [Gidlöf-Gunnarsson et al., 2012]). Ces enquêtes rapportent que des phénomènes d'interaction existent entre la gêne due aux vibrations et le niveau de bruit, et *vice versa*, entre la gêne due au bruit et le niveau de vibrations. En revanche, un manque de consensus existe entre les résultats des études ayant été conduites en laboratoire pour mettre en évidence ces interactions ([Howarth and Griffin, 1990], [Paulsen and Kastka, 1995]). Il apparaît donc que d'autres travaux sont nécessaires pour répondre au manque de données souligné dans la littérature ([Trollé et al., 2015]).

Démarche scientifique et organisation du document

Cette thèse a pour objectif de contribuer à une meilleure compréhension des mécanismes perceptifs associés à la gêne due au bruit et aux vibrations ferroviaires. Les travaux présentés dans ce manuscrit ont pour vocation de pallier le problème du manque de données expérimentales (en conditions de laboratoire, notamment) dans la littérature. Ces travaux font suite à l'article publié par A. Trollé et ses collègues et recensant les études traitant de la perception des vibrations et de la gêne due aux vibrations générées par les transports terrestres. Au cours de cette thèse, des enregistrements acoustiques et vibratoires sont réalisés à l'intérieur d'un logement voisin d'une voie ferrée. Ils sont ensuite reproduits en laboratoire dans le but d'étudier l'influence de différents facteurs sur la gêne exprimée par les participants. La première étape de la thèse consiste donc à valider un protocole de recueil, en laboratoire, des réponses de gêne des participants. Deux méthodes de recueil seront comparées à cet effet en chapitre 3. La seconde étape consiste à tester plusieurs hypothèses concernant l'absence de consensus entre les résultats des études menées en laboratoire. Durant cette étape, l'effet des niveaux de bruit et de vibrations ferroviaires sur la gêne due au bruit, la gêne due aux vibrations et la gêne totale est également examiné. Cette analyse est présentée en chapitre 4. Enfin, la troisième étape consiste à étudier l'effet potentiel, sur la gêne, des variations autres que celles de niveau sonore ou vibratoire global entre les différents passages de train enregistrés. Pour ce faire, la gêne due aux différents enregistrements est recueillie à durée et à niveaux sonore et

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

vibratoire globaux constants des stimuli. Cette étude fait l'objet du chapitre 5. Pour finir, les conclusions générales et les perspectives de ces travaux de thèse sont présentés.

Les principales questions scientifiques soulevées seront rappelées en préambule de chaque chapitre. De même, chaque chapitre sera clôturé par un rappel des principaux résultats obtenus.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

Chapitre 2

Étude bibliographique : La gêne due aux bruit et vibrations ferroviaires combinés, *in situ* et en laboratoire

Ce chapitre vise à présenter de manière synthétique les principales études existant, qu'elles soient menées sous forme d'enquêtes terrain ou en laboratoire, concernant : i) La gêne due aux vibrations du trafic ferroviaire, ii) La gêne due au bruit du trafic ferroviaire et iii) La gêne due aux bruit et vibrations combinés du trafic ferroviaire.

Plusieurs indicateurs vibratoires et acoustiques sont mentionnés dans les sections suivantes. Leurs définitions mathématiques se trouvent en tableau 2.1.

2.1 La gêne due aux vibrations du trafic ferroviaire

Dans cette première section, les principales études abordant la question de la gêne due aux vibrations d'origine ferroviaire, à travers une enquête *in situ* ou une expérience en laboratoire, sont présentées. Quelques notions de perception vibratoire sont préalablement introduites en section 2.1.1. Pour une description plus détaillée des différents points abordés dans cette section, il sera possible de se référer aux thèses de Maël Amari ([Amari, 2009]) et James Woodcock ([Woodcock, 2013]). Pour certaines des enquêtes *in situ* présentées en section 2.1.2, davantage de détails sont donnés dans la revue de Arnaud Trollé et ses collègues ([Trollé et al., 2015]).

2.1.1 La perception des vibrations globales du corps

D'un point de vue perceptif, les vibrations peuvent être classifiées selon leur contenu fréquentiel en trois groupes :

— Les vibrations localisées, et dont la fréquence est supérieure à une dizaine de Hertz. Il s'agit des vibrations du système main-bras (*hand-arm system*). Ces vibrations sont étudiées notamment dans le cadre des risques liés au travail ou du confort automobile.
— Les vibrations qui affectent le corps entier, ou vibrations globales du corps (*whole-body vibration*). Le domaine fréquentiel où ces vibrations sont mises en jeu varie selon [Mansfield, 2004] de 1 à 20 Hz. La norme ISO 2631-2 précise que, bien que

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

la perception vibratoire soit plus importante sur la plage [1Hz : 25Hz], le domaine fréquentiel des vibrations globales du corps s'étend de 1 à 80Hz ([ISO, 2003]).

— Les vibrations provoquant le mal des transports (*motion sickness*) ou le mal de mer appartiennent au dernier groupe. Ces vibrations de très basse fréquence (inférieure à 1Hz), bien qu'elles affectent le corps entier, sont généralement étudiées séparément en raison des effets qu'elles produisent.

Parmi ces trois groupes, seules les vibrations globales du corps ([1Hz : 80Hz]) rentrent dans le cadre de cette thèse.

Propriétés biomécaniques du corps humain

Le corps humain peut être représenté schématiquement par un ensemble de systèmes masse-ressort-amortisseur correspondant à différentes régions du corps et possédant chacun une fréquence de résonance propre. Celles-ci peuvent aller de quelques Hertz pour les organes les moins volumineux (p. ex. diaphragme) jusqu'à plusieurs dizaines de Hertz (p. ex. cage thoracique) ([Griffin, 1990]).

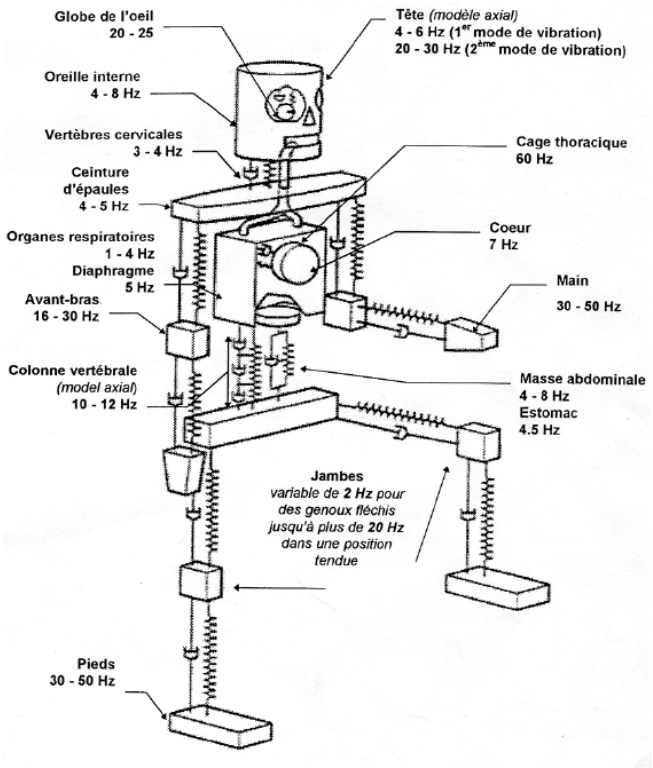


FIGURE 2.1 – Représentation schématique du corps humain et principales fréquences de résonance (source : [Amari, 2009]).

Hormis les propriétés des organes concernés (volume, densité), ces résonances dépendent en particulier de plusieurs facteurs tels que :

— La durée et la direction de l'excitation.
— La position du corps (assis, debout, couché).

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

De nombreux capteurs sensoriels sont impliqués dans le processus de perception des vibrations. Notamment, une vibration peut être détectée *via* le système somesthésique, qui est lui-même composé des sous-systèmes cutané, kinesthésique et viscéral.

Système cutané : Les principaux mécano-récepteurs constituant le système cutané sont les corpuscules de Ruffini, Meissner et Pacini. Ils sont sensibles à des variations d'accélération pouvant aller de quelques Hertz à plusieurs centaines de Hertz, selon la partie du corps qui est stimulée.

Système kinesthésique : Les éléments proprioceptifs désignent les récepteurs associés à la kinesthésie, ou proprioception (c-à-d la perception de la position dans l'espace des différentes parties du corps et des efforts qui leurs sont appliqués).

Système viscéral : Le système viscéral donne également au cerveau des informations sur les vibrations extérieures, à travers des récepteurs situés dans l'abdomen.

Hormis le système somesthésique, d'autres systèmes sensoriels tels que les systèmes vestibulaire (situé dans l'oreille interne), auditif et visuel, interviennent dans la perception vibratoire.

Seuils de perception

L'implication, entre autres, de ces différentes modalités sensorielles fait de la perception des vibrations un phénomène complexe. À cette complexité s'ajoute une contrainte liée aux méthodes psychophysiques employées pour déterminer les liens existant entre une stimulation physique et la sensation résultante.

En premier lieu, la mesure d'un seuil absolu de perception vibratoire est impactée, entre autres facteurs, par le grand nombre de méthodes psychophysiques employé dans la littérature, p. ex. : méthode d'ajustement, méthode des stimuli constants, méthode du choix forcé ou *Alternative Forced Choice* (AFC). De même que pour la perception sonore, l'interprétation de la consigne par les sujets peut être également une source de biais important dans les résultats ([Parsons and Griffin, 1988]).

Malgré des différences importantes entre les courbes décrites par les différentes études sur le sujet, l'ordre de grandeur est le même pour l'ensemble des seuils obtenus (p. ex. [Parsons and Griffin, 1988], [Bellmann, 2002], [Morioka and Griffin, 2006]). Une valeur approximative de ce seuil, indépendante de la fréquence, est estimée à $0.01 m.s^{-2}$.

Seuil différentiel d'amplitude ou JND

La mesure du seuil différentiel (*just noticeable difference* ou JND) fait davantage consensus. Ainsi, un certain nombre d'études parviennent à des résultats similaires en ayant employé des méthodes et des stimuli variés (p. ex. [Morioka and Griffin, 2000], [Bellmann, 2002], [Weber et al., 2001]). Il semble que, pour des stimuli de niveaux vibratoires $L_{V_{eq}}$ compris entre 96 et 118dB (ref. 10^{-6} $m.s^{-2}$) et de fréquences inférieures à 80Hz, la valeur de 1.5dB corresponde au seuil différentiel de perception des vibrations globales du corps (position assise).

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

Courbes d'iso-perception

De même que pour le seuil absolu de perception vibratoire, la mesure des courbes d'iso-perception (aussi appelées courbes d'iso-niveau ou d'iso-confort), représentant l'évolution de la sensation selon la fréquence de l'excitation, est délicate. Des écarts importants existent entre les résultats des études menées à ce sujet.

La courbe d'iso-perception tirée de la norme BS 6841 est tout d'abord constante pour les fréquences inférieures à 2Hz, puis décroissante entre 2Hz et 4Hz, puis de nouveau constante sur la plage 4Hz - 10Hz, et enfin croissante pour les fréquences plus élevées ([BS, 1987]). Cette évolution est indépendante de l'amplitude des vibrations.

La forme de cette courbe peut avoir une justification biomécanique. En effet, le corps peut être considéré comme un solide indéformable lorsque la fréquence de l'excitation est inférieure à 2Hz. Les premières résonances apparaissent ensuite et engendrent une augmentation de l'inconfort. Au-delà de 10Hz, la propagation des vibrations est atténuée par le corps et provoque une baisse du niveau perçu ([Griffin, 1990]).

Cependant, [Morioka and Griffin, 2006] ont montré une évolution différente pour des amplitudes d'excitation proches du seuil de perception. En effet, il apparaît alors que les courbes d'iso-perception augmentent entre 1 et 4Hz, puis décroissent entre 4 et 10Hz et sont finalement croissantes pour les fréquences plus élevées. Cette étude montre également une modification nette de la courbe d'iso-perception lorsque l'amplitude des vibrations augmente. Ce résultat contredit les recommandations des normes BS 6841 et ISO 2631 qui préconisent une simple translation de la même courbe pour les amplitudes plus faibles ([ISO, 1997]).

Pondérations fréquentielles

Des pondérations fréquentielles, telles que la pondération A en acoustique, existent également en perception vibratoire. Les trois pondérations recommandées pour l'étude des vibrations verticales sont représentées en figure 2.2.

La norme BS 6472 propose deux pondérations fréquentielles, les pondérations W_b et W_d qui s'appliquent aux vibrations globales du corps dans les directions verticale et horizontale, respectivement ([BS, 2008]). Ces courbes de pondération sont obtenues à partir des courbes d'iso-perception, en les inversant puis en les normalisant de sorte à obtenir une valeur de 0dB à 6.3Hz pour les vibrations verticales, et à 1Hz pour les vibrations horizontales.

La norme ISO 2631-2 propose une pondération légèrement différente, la pondération W_k, pour les vibrations verticales ([ISO, 2003]). Les différences entre les pondérations W_b et W_k sont minimes au regard des écarts qui peuvent exister entre les courbes d'iso-perception fournies par les études sur ce sujet.

Enfin, la norme ISO 2631-2 introduit la pondération W_m, s'appliquant aux vibrations verticales et horizontales. Cette pondération est obtenue en faisant le produit des pondérations W_k et W_d et son maximum se situe à une fréquence de 1.6Hz.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

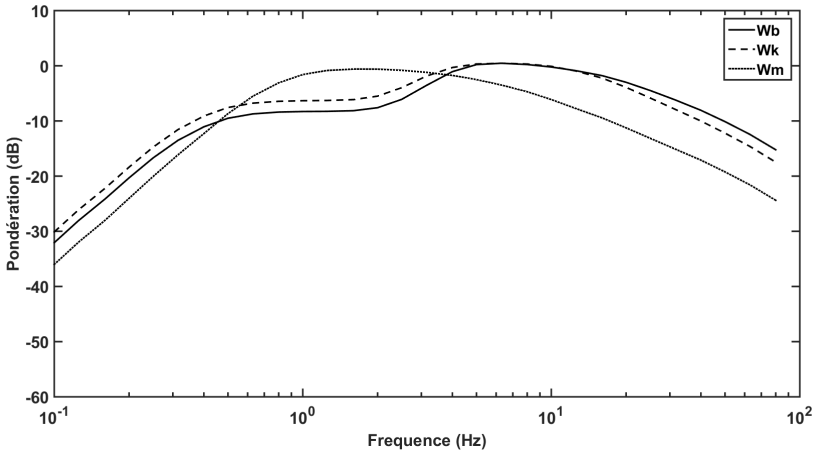


FIGURE 2.2 – Pondérations fréquentielles recommandées par les normes BS 6841, ISO 2631-1 et ISO 2631-2.

2.1.2 La gêne vibratoire due au trafic ferroviaire : enquêtes *in situ*

De nombreuses enquêtes *in situ* ont été conduites afin d'estimer la gêne vibratoire ressentie par les riverains de voies ferrées.

Parmi ces études, beaucoup de différences existent entre les choix méthodologiques et de présentation des résultats. En particulier, les différences d'unité (vitesse ou accélération), de pondération fréquentielle et de direction des vibrations considérées (verticales dans la plupart des cas, parfois verticales et horizontales ou direction contenant la plus grande énergie) rendent les comparaisons complexes entre les résultats des différentes études.

La première enquête visant à estimer la gêne ressentie par des résidents vivant à proximité d'une voie ferrée en Écosse a été menée par Woodroof et Griffin [Woodroof and Griffin, 1987]. 459 personnes ont répondu à un questionnaire dont le but était de déterminer la perceptibilité des vibrations ferroviaires et la gêne due à celles-ci. En parallèle, des enregistrements vibratoires de longue durée (24h) étaient réalisés dans 52 logements des personnes interrogées. Les résultats de cette étude indiquent que la gêne exprimée par les résidents est proportionnelle au nombre de passages de train sur toute la durée de l'enregistrement. Aucune corrélation significative n'a été trouvée entre la gêne exprimée et les indices vibratoires utilisés.

Passchier-Vermeer et Zeichart ont mené une analyse secondaire des données provenant d'une enquête réalisée en Allemagne auprès de 417 résidents [Passchier-Vermeer and Zeichart, 1998]. Le questionnaire recueillait les variables suivantes : perturbation des activités due aux vibrations ferroviaires durant la journée et durant la nuit, gêne due aux vibrations ferroviaires durant la journée et durant la nuit et gêne due aux vibrations ferroviaires durant 24h. La gêne due au bruit ferroviaire ainsi que la gêne due à la présence de voies ferrées en général étaient également recueillies. Des enregistrements du bruit et des vibrations ferroviaires ont été réalisés dans 284 logements, aux niveaux de la (ou des) chambre(s) à coucher et du salon. À partir de ces mesures, 48 indices reposant sur la

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

vitesse vibratoire étaient calculés. Les corrélations entre les différents indices vibratoires et la gêne vibratoire se rapportant à la même période (jour, nuit, période de 24h) étaient ensuite évaluées de sorte à déterminer l'indice vibratoire le plus à même de décrire la gêne ressentie. Les auteurs ont indiqué que la variable VCKBL25 [1] présentait le plus fort coefficient de corrélation avec la gêne vibratoire moyenne sur une période de 24h. La proportion de variance expliquée était de 18%.

Klæboe et ses collègues ont conduit une enquête *in situ* en Norvège auprès de 1503 résidents *via* des appels téléphoniques ainsi que des mesures vibratoires à l'extérieur et à l'intérieur des bâtiments ([Klæboe et al., 2003]). Le questionnaire évaluait la gêne due aux vibrations des trafics routier et ferroviaire. Les expositions vibratoires des participants ont ensuite été calculées à l'aide d'un modèle semi-empirique pour chaque participant. Celles-ci sont exprimées en maximum de vitesse vibratoire statistique $v_{w,95}$. Les résultats de cette étude montrent que le type d'exposition (routier ou ferroviaire) n'a pas d'influence sur la gêne exprimée, après application de la pondération W_m aux mesures vibratoires.

Dans le but de mettre en place un critère d'acceptabilité concernant les niveaux vibratoires dus au trafic ferroviaire, à l'intérieur des bâtiments, Zapfe et ses collègues ont mené une enquête *in situ* dans 5 villes américaines et canadienne auprès de 1306 personnes ([Zapfe et al., 2009]). Pour ce faire, les auteurs ont cherché à établir un modèle de la gêne due aux vibrations provenant de différents réseaux ferroviaires (trains, métro). Des enregistrements ont été réalisés dans 41 appartements à travers les différentes villes (mesures à l'intérieur et à l'extérieur des logements), en 100 points de mesure. Les niveaux vibratoires à l'intérieur de l'ensemble des logements des résidents interrogés ont ensuite été interpolés à partir de ces mesures. Parmi une centaine d'indices vibratoires calculés à partir des mesures *in situ*, les auteurs indiquent qu'un grand nombre étaient fortement corrélés entre eux. Un ensemble de 9 indices reposant essentiellement sur la vitesse vibratoire a finalement été utilisé pour l'établissement des modèles.

Waddington et ses collègues ont réalisé une enquête sur la gêne vibratoire due à différentes sources à travers 12 zones du Royaume-Uni ([Waddington et al., 2014]). Pour 752 résidents concernés par les vibrations du trafic ferroviaire et ayant répondu au questionnaire, l'exposition vibratoire à l'intérieur du logement a été estimée sur une période de 24h. Pour ce faire, les auteurs ont procédé à des mesures longue durée (24h) à l'extérieur des logements combinées à des mesures courte durée réalisées simultanément à l'intérieur des logements. De nombreux indices vibratoires ont ensuite été calculés à partir des expositions vibratoires estimées. Les auteurs indiquent que tous les indices étaient corrélés entre eux. Deux indices ont finalement été sélectionnés : La Valeur de Dose Vibratoire (*Vibration Dose Value* ou VDV) pondérée W_b (selon les recommandations de la norme Anglaise BS 6472-1) et l'accélération *root-mean-square* (rms) moyenne, $a_{w_{rms,T}}$, pondérée W_m (recommandée par la norme ISO 2631-2).

Les données issues de cette enquête ont également été analysées par Peris et ses collègues afin d'identifier les périodes de la journée durant lesquelles la gêne due aux vibrations ferroviaires est la plus grande et de proposer des pénalités ([Peris et al., 2012]). Le

1. $VCKBL25 = \log_{10}\left[KB_{WT}^2 + 0.25 \cdot KB_{SN}^2\right]^{\frac{1}{2}}$, où KB_{WT} est la moyenne quadratique de la vitesse vibratoire mesurée dans le salon durant la journée, et où KB_{SN} est la moyenne quadratique de la vitesse vibratoire mesurée dans la chambre à coucher durant la nuit.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

questionnaire présenté aux résidents comprenait plusieurs questions distinctes sur la gêne due aux vibrations durant la journée, durant la soirée et durant la nuit. Les auteurs ont ainsi pu montrer l'existence de différences significatives entre les gênes exprimées pour différentes périodes de la journée. Cette étude conclut avec une recommandation concernant l'usage d'une métrique prenant en compte les 24h d'une exposition journalière, nommée $a_{w,den}$ [2] (équivalente à l'indice L_{den} en acoustique), et incorporant des pénalités pour les périodes de soir et de nuit (respectivement 8.3dB et 17dB).

Toujours à l'aide de ces mêmes données, Peris et ses collègues ont également mené une analyse dans le but d'évaluer l'effet de facteurs non reliés à l'exposition vibratoire tels que les facteurs démographiques ou attitudinaux ([Peris et al., 2014]). Les résultats indiquent notamment que deux facteurs liés à l'attitude des résidents ont une influence sur la gêne exprimée : d'une part la peur des dégâts engendrés sur le logement à cause des vibrations (notamment lorsque les résidents sont propriétaires et non locataires) et d'autre part la crainte que les vibrations s'intensifient dans le futur.

Dans le cadre du projet européen CargoVibes, Janssen et ses collègues ont réalisé une méta-analyse ([Janssen et al., 2013]) en reprenant les données provenant de 6 enquêtes *in situ* menées en Europe (p. ex. [Klæboe et al., 2003], [Passchier-Vermeer and Zeichart, 1998], [Waddington et al., 2014]), aux États-Unis ([Zapfe et al., 2009]) ou au Japon (p. ex. [Yano et al., 2005]). Aux données préexistantes, les données de deux nouvelles enquêtes réalisées aux Pays-Bas et en Pologne ont été ajoutées. Lors de ces deux dernières enquêtes, 243 résidents de deux villes des Pays-Bas et 114 résidents d'une ville de Pologne ont été interrogés. Pour chacun d'eux, l'exposition vibratoire a été estimée à partir d'enregistrements de référence réalisés à l'intérieur de quelques habitations (2 à 4).

Pour résoudre le problème des différentes métriques adoptées entre les diverses enquêtes, une matrice de conversion a été mise en place de manière à ce que toutes les expositions vibratoires puissent être comparées sur la base d'indicateurs communs. Les trois métriques adoptées pour l'ensemble des mesures étaient : le maximum de vitesse vibratoire sur toute la durée d'exposition (une semaine pour la plus longue) dans la direction prédominante (généralement direction verticale) $V_{dir,max}$, l'accélération rms moyenne pondérée calculée sur une journée d'exposition $a_{w_{rms,24h}}$ et la VDV pondérée calculée sur une journée d'exposition (pondération W_k pour les vibrations verticales et W_d pour les vibrations horizontales, selon la norme ISO 2631-1).

Cette analyse a permis l'établissement de relations dose-effet robustes [3], en raison de la taille des données (en tout 4490 résidents interrogés). Des relations dose-effet ont été proposées pour prédire la gêne due au bruit ferroviaire et seront décrites plus en détail en section 2.2.

Dans une étude qualitative, Maclachlan et ses collègues ont mené une enquête *in situ* sur deux sites en Suède [Maclachlan et al., 2017]. Un questionnaire a été soumis à un échantillon de 17 résidents dont les logements étaient situés à moins de 100m d'une voie ferrée. Des mesures vibratoires étaient réalisées pour chaque logement, le but étant d'assurer une

2. $a_{w,den} = \left[a^2_{w,7:00-19:00} + (6.7 \cdot a_{w,19:00-23:00})^2 + (50 \cdot a_{w,23:00-7:00})^2\right]^{0.5}$

3. Les relations dose-effet (ou dose-réponse) sont un outil permettant d'estimer le degré de gêne attendu pour un certain niveau d'exposition à un facteur environnemental (source de stress)

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

certaine variabilité entre les niveaux d'exposition des différents résidents interviewés. Les auteurs ont ensuite utilisé l'approche de la théorie ancrée [4] pour émettre des hypothèses quant à l'origine de la gêne exprimée par les résidents. Notamment, la sensation de ne pas pouvoir empêcher ou atténuer la propagation des vibrations, soulevée par l'ensemble des personnes interrogées dans cette étude, semble être en partie responsable de la gêne exprimée. Ce facteur était également mentionné par [Lercher, 2011] concernant la gêne due aux vibrations du trafic ferroviaire.

Récemment, Maclachlan et ses collègues ont également réalisé une enquête *in situ* ([Maclachlan et al., 2018]) à la suite de l'étude qualitative présentée précédemment, impliquant un grand nombre de répondants (6894). L'objectif de l'étude était de déterminer le lien entre la gêne ressentie par un résident et la distance de son logement à la voie ferrée. Des distances de 50m à 1000m étaient considérées. Les résultats indiquent que la distance du logement à la voie ferrée est associée positivement au nombre de personnes indiquant être gênées par les vibrations ferroviaires. Le pourcentage de résidents gênés par les trains de fret ou les trains à diesel était significativement plus grand que celui de résidents gênés par les trains de passager (TER) ou trains à grande vitesse (TGV). Les auteurs invoquent leurs caractéristiques (taille, poids) comme possible explication à ce phénomène. Dans le cas des trains de fret, la gêne exprimée par les résidents reste significative jusqu'à 400m de distance à la voie. Les facteurs attitudinaux tels que la peur vis-à-vis de la santé et les dégâts causés au logement ressortent comme des paramètres importants à prendre en compte lors de futures enquêtes.

Le tableau 2.1 fait une synthèse des indicateurs vibratoires fréquemment utilisés dans la littérature.

4. La théorie ancrée (*Grounded Theory*) est une méthodologie qui vise à faire émerger des concepts ou des théories à partir de données recueillies *in situ*.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

Tableau 2.1 – Indicateurs acoustiques et vibratoires des niveaux de bruit et de vibrations ferroviaires : notations et définitions.

Indicateur acoustique (unité)	Définition	Indicateur vibratoire (unité)	Définition
$p_{A_{rms,T}}$ (Pa)	$\left[\frac{1}{T}\int_0^T p_A^2(t)dt\right]^{\frac{1}{2}}$	$a_{w_{rms,T}}$ $(m.s^{-2})$	$\left[\frac{1}{T}\int_0^T a_w^2(t)dt\right]^{\frac{1}{2}}$
$L_A(t)$ (dB(A))	$20\log_{10}\left(\frac{p_A(t)}{p_0}\right)$	$L_{V_{w,eq}}$ (dB)	$20\log_{10}\left(\frac{a_{wrms}}{a_0}\right)$
$L_{A_{eq}}$ (dB(A))	$10\log_{10}\left(\frac{1}{T}\int_0^T 10^{(L(t)/10)}dt\right)$	$MTVV$ $(m.s^{-2})$	$\max\left[\frac{1}{\tau}\int_{t_0-\tau}^{t_0} a_w^2(t)dt\right]^{\frac{1}{2}}$
$p_{A_{max}}$ (Pa)	$\max\left[\frac{1}{\tau}\int_{t_0-\tau}^{t_0} p_A^2(t)dt\right]^{\frac{1}{2}}$	$L_{V_{w,max}}$ $(m.s^{-2})$	$20\log_{10}\left(\frac{MTVV}{a_0}\right)$
$L_{A_{max}}$ (dB(A))	$20\log_{10}\left(\frac{p_{A_{max}}}{p_0}\right)$	VDV_w $(m.s^{-1.75})$	$\left[\int_0^T a_w^4(t)dt\right]^{\frac{1}{4}}$
L_{den} (dB(A))	$10\log_{10}\left[\frac{1}{24}\left(12\cdot 10^{\frac{L_{day}}{10}} + 4\cdot 10^{\frac{(L_{evening}+5)}{10}} + 8\cdot 10^{\frac{(L_{night}+10)}{10}}\right)\right]$	$v_{w_{rms,T}}$ $(m.s^{-1})$	$\left[\frac{1}{T}\int_0^T v_w^2(t)dt\right]^{\frac{1}{2}}$
SEL_A (dB(A))	$L_{A_{eq}} + 10\log_{10}(T)$	$v_{w_{max}}$ $(m.s^{-1})$	$\left[\frac{1}{\tau}\int_{t_0-\tau}^{t_0} v_w^2(t)dt\right]^{\frac{1}{2}}$
L_x (dB(A))	niveau sonore tel que $L_A(t) > L_x$ durant $(T \times \frac{x}{100})$ s	$v_{w,95}$ $(m.s^{-1})$	$mean(v_{w_{max}}) + 1.8\cdot std(v_{w_{max}})$

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

2.1.3 La gêne vibratoire due au trafic ferroviaire : études en laboratoire

Peu d'études ont été réalisées en conditions de laboratoire dans le but d'évaluer la gêne produite par des vibrations ferroviaires.

Howarth et Griffin ont mené une première étude comportant deux expériences ([Howarth and Griffin, 1988]). L'influence du niveau vibratoire ainsi que de la fréquence des répétitions d'un même passage de train sur la gêne ont été examinées. En premier lieu, un enregistrement des vibrations provoquées par le passage d'un train (direction verticale) a été réalisé à l'intérieur d'une habitation à proximité d'une voie ferrée. Des précisions concernant le type de train ne sont pas données dans l'article. La durée de ce passage était de 12.5s et le niveau vibratoire, exprimé en accélération rms moyenne non pondérée, $a_{rms,12.5s}$, était de $0.059 m.s^{-2}$.

La première expérience était composée de deux parties et a été réalisée par 48 participants. Durant la première partie, ceux-ci ont été exposés durant une heure à un certain nombre de passages : 4, 8, 16 ou 32 trains (les participants réalisaient une seule de ces conditions). Une activité de lecture leur était proposée durant la phase d'exposition, puis les participants devaient indiquer la gêne ressentie durant l'heure écoulée. Durant la seconde partie, la tâche était d'évaluer la gêne due au même passage de train, présenté à 6 niveaux vibratoires différents : 0.037, 0.047, 0.059, 0.074, 0.094 et $0.118 m.s^{-2}$. Chacune des 6 conditions était répétée deux fois. Les participants indiquaient leur gêne à l'aide d'une échelle graduée de 0 (« pas gênant ») à 6 (« extrêmement gênant »).

Les résultats de cette expérience montrent que la fréquence de passage du train a eu une influence sur les réponses de gêne apportées par les participants. Notamment, la condition comportant 32 passages de train en une heure a été jugée significativement plus gênante que les trois autres conditions (4, 8 ou 16 passages en une heure). Le niveau vibratoire a également eu une influence significative sur les réponses de gêne. Les auteurs indiquent que, à réponse de gêne équivalente, le nombre de passage de trains est proportionnel au niveau vibratoire élevé à la puissance 4. Cette relation a été confirmée durant la deuxième expérience.

Cette étude valide l'indicateur VDV (cf. tableau 2.1) reposant sur l'accélération *root-mean-quad* (rmq). Selon les auteurs, cet indicateur est davantage approprié à la prédiction de la gêne due aux vibrations que l'accélération rms moyenne, $a_{w_{rms,T}}$.

Woodcock et ses collègues ont réalisé une étude en laboratoire ([Woodcock et al., 2014]) dans le but de montrer que la gêne vibratoire est multi-dimensionnelle (c-à-d plusieurs dimensions perceptives jouent un rôle dans l'expression de la gêne). À partir des mesures vibratoires issues de l'enquête *in situ* rapportée par [Waddington et al., 2014], 64 000 signaux de vibrations ferroviaires ont pu être analysés, de sorte à ne conserver que les signaux dont l'amplitude dépassait le seuil de perception vibratoire moyen. Dans un second temps, un certain nombre de descripteurs énergétiques, fréquentiels et temporels ont été calculés pour l'ensemble des signaux restants. Une analyse en composantes principales (ACP) a finalement permis de réduire le jeu de stimuli à 14 signaux, tout en assurant une variabilité des différents descripteurs d'un stimulus à l'autre.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

Dans une expérience de comparaisons par paires, 21 participants ont reçu l'instruction de comparer deux à deux plusieurs paires de stimuli. Pour chaque paire, deux questions leur étaient posées :

— *Which of the trains would bother, disturb or annoy you most if you felt them in your home ?*
(Quel train vous gênerait le plus si vous les ressentiez chez vous ?)

— *How similar do you perceive the pair of vibrations to be ?*
(À quel point percevez-vous ces vibrations comme similaires ?)

La gêne due à chacun des 14 stimuli était ensuite recueillie à l'aide d'une échelle sémantique à 5 points, allant de « Pas du tout gênant » à « Extrêmement gênant ».

L'analyse des réponses à la question concernant la gêne lors des comparaisons par paires n'a pas révélé de différences significatives entre les différents stimuli, une fois les réponses transformées en score de gêne. De même, une grande variabilité est observée concernant la répartition des réponses recueillies lors des évaluations individuelles des 14 stimuli.

En revanche, les réponses à la seconde question (similarité des deux stimuli de chaque paire) ont permis la construction d'un espace perceptif à 4 dimensions principales. Ces dimensions sont, dans l'ordre de l'ACP :

1. L'énergie du signal contenue dans la bande d'octave centrée à 16Hz, $a_{rms_{16Hz}}$.
2. L'énergie du signal contenue dans la bande d'octave centrée à 32Hz, $a_{rms_{32Hz}}$.
3. La durée du signal, T.
4. La fréquence de modulation du signal, f_{mod}.

2.2 La gêne due au bruit du trafic ferroviaire

Les principales enquêtes *in situ* et les expériences en laboratoire menées au sujet de la gêne due au bruit du trafic ferroviaire sont synthétisées dans cette section. Le lecteur pourra se référer au tableau 2.1 pour la définition mathématique des indicateurs acoustiques fréquemment utilisés dans la littérature.

2.2.1 La gêne sonore due au trafic ferroviaire : enquêtes *in situ*

De nombreuses études ont été menées pour traiter le problème de la pollution sonore, en zone urbaine tout particulièrement. Les études ont montré que parmi les sources de bruit des transports, le bruit du trafic ferroviaire est perçu comme le moins gênant (p. ex. [Miedema and Oudshoorn, 2001]). Au cours des deux dernières décennies, face à l'augmentation du trafic ferroviaire notamment, de nouvelles études ont été menées pour mieux comprendre les mécanismes perceptifs à l'origine de la gêne due au bruit des transports.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

Les relations dose-effet pour la gêne due au bruit des transports

Schultz a réalisé la première méta-analyse regroupant 11 enquêtes *in situ* concernant la gêne due au bruit des transports ([Schultz, 1978]). Ces enquêtes ne concernaient pas uniquement le bruit ferroviaire, mais incluaient également d'autres sources (p. ex. bruit routier). Pour chaque enquête, la gêne a pu être mise en relation avec le niveau de bruit à l'aide d'un même descripteur : l'indice de niveau de pression sonore équivalent jour-nuit (*day-night average sound pressure level*) L_{dn}. De même, la gêne exprimée par les résidents pour chaque enquête a été exprimée sous une même forme : le pourcentage de personnes très gênées (*percentage highly annoyed*) $\%HA$, défini par l'auteur comme la proportion de personnes exprimant une gêne supérieure, ou égale à 72 % de l'échelle de gêne. Une relation a été établie à partir d'un échantillon de 161 points, entre le niveau de bruit et la gêne sonore exprimée (toutes sources de bruit confondues). L'agrégation des données provenant d'enquêtes concernant différentes sources de bruit a été débattue, notamment par Kryter ([Kryter, 1982]).

Fields et Walker ont mené une enquête en Grande Bretagne, auprès de 1453 résidents répartis sur 75 sites différents, dans le but d'étudier la gêne due spécifiquement au bruit du trafic ferroviaire ([Fields and Walker, 1982]). L'exposition sonore a été mesurée pour chacune des zones d'étude, ce qui a permis de mettre en relation la gêne exprimée par les résidents et le niveau de pression sonore équivalent sur une période de 24h, $L_{eq,24h}$.

Une enquête *in situ* de plus petite envergure (moins de 100 résidents interrogés) a été conduite par Sörensen et Hammar en Suède, concernant la gêne due au bruit ferroviaire ([Sörensen and Hammar, 1983]). Le niveau de pression sonore équivalent ainsi que le maximum du niveau de pression sonore pondéré A, sur une durée de 24h ($L_{A_{max}}$), ont été mesurés. Les résultats indiquent que le nombre de passages de train durant une période de 24h est un critère important pour la prédiction de la gêne. En effet, pour un même niveau sonore, la gêne exprimée est plus importante pour les sites où le nombre de passages est supérieur à 60 que pour les sites où le nombre de passages est plus faible.

Fidell et ses collègues ont poursuivi l'étude de Schultz de 1978 en reprenant les données regroupées par ceux-ci et en ajoutant les données issues de 15 autres enquêtes concernant la gêne due aux bruits des transports ([Fidell et al., 1991]). De même que lors de la première méta-analyse, les différentes sources de bruit n'ont pas été dissociées dans cette étude. À partir de 453 points, les auteurs ont construit une nouvelle relation entre le pourcentage de personnes très gênées ($\%HA$) et le niveau sonore (L_{dn}) et ont confirmé la validité de la relation établie précédemment.

Dans leur étude, Miedema et Vos ont repris certaines des données des deux précédentes méta-analyses en y ajoutant les données provenant de 34 autres enquêtes ([Miedema and Vos, 1998]). Ils ont ensuite analysé séparément les enquêtes portant sur le bruit aérien, le bruit routier et le bruit ferroviaire. Les résultats de cette étude montrent une évolution plus prononcée du pourcentage de personnes très gênées ($\%HA$) par le bruit aérien que par le bruit routier. De même, l'évolution de la gêne due au bruit routier est, elle, montrée comme étant plus prononcée que celle de la gêne due au bruit ferroviaire.

Les trois modèles ont été améliorés dans l'étude de Miedema et Oudshoorn en prenant en compte les distributions de gêne pour chaque source de bruit ([Miedema and Oud-

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

shoorn, 2001]). Ainsi, le pourcentage de personnes peu gênées (*percentage at least little annoyed*) $\%LA$ (gêne supérieure ou égale à 28 % de l'échelle de gêne) et le pourcentage de personnes gênées (*percentage annoyed*) $\%A$ (gêne supérieure à 50 % de l'échelle de gêne), ont pu être exprimés dans les cas du bruit aérien, du bruit routier et du bruit ferroviaire. L'utilisation de ces modèles pour estimer la gêne due aux bruits des transports est recommandée par la Commission Européenne ([EC, 2002]).

Le « bonus ferroviaire » : un constat nuancé

Les courbes établies par Miedema et Oudshoorn montrent par ailleurs clairement une tendance du bruit ferroviaire à être moins gênant que les autres sources de bruit, soutenant les réglementations en vigueur dans plusieurs pays (p. ex. Allemagne) pour lesquelles les émissions admissibles de bruit ferroviaire sont supérieures de 5dB(A) à celles de bruit routier ([Miedema and Oudshoorn, 2001]). Cette réglementation est également appelée « bonus ferroviaire ».

Une telle tendance n'est pas retrouvée dans l'enquête *in situ* réalisée par Lim et ses collègues concernant la gêne due au bruit ferroviaire, dans 18 sites en Corée ([Lim et al., 2006]). Les réponses de gêne due au bruit ferroviaire de 726 résidents dont le logement était situé à moins de 50m de la voie ferrée, ont été recueillies. En parallèle, des mesures acoustiques ont été réalisées sur chaque site, les capteurs étant placés sur le toit de sorte à éviter la présence d'obstacle entre la source et l'appareil de mesure. Les auteurs ont ainsi pu construire une relation dose-effet entre le pourcentage de personnes très gênées et le niveau sonore, L_{dn}. Les résultats obtenus montrent que la gêne exprimée par les résidents est largement supérieure à celle obtenue dans de précédentes études, à un niveau sonore équivalent.

D'autres études menées au Japon ont également indiqué que les réponses de gêne sonore due au bruit ferroviaire étaient considérablement plus élevées que dans le cas d'études menées en Europe (p. ex. [Yano et al., 1997], [Kaku and Yamada, 1996], [Morihara et al., 2004]), réfutant donc l'application d'un bonus ferroviaire. Dans cette étude, les auteurs précisent que le facteur contribuant le plus aux différences observées entre les résultats des études menées en Europe et au Japon est la proximité des logements aux voies ferrées.

En analysant les données d'une enquête *in situ* réalisée en France par Écotière et ses collègues concernant la gêne due aux bruits aérien, routier et ferroviaire ([Ecotière et al., 2014]), Gille et ses collaborateurs ont également mis en défaut les relations dose-effet établies par Miedema et Oudshoorn ([Gille et al., 2016a]), confirmant les résultats d'autres études (p. ex. [Babisch et al., 2009] pour le bruit aérien, [Klæboe et al., 2004] pour le bruit routier et [Lim et al., 2006] pour le bruit ferroviaire). En effet, en comparant les mesures aux courbes de prédiction des pourcentages de personnes peu gênées, gênées ou très gênées par les trois sources de bruit, il apparaît que la gêne exprimée est systématiquement sous-estimée par les différents modèles. Seul le cas des personnes très gênées par le bruit routier semble être correctement prédit.

Facteurs non acoustiques, « multi-exposition » et « co-exposition »

Une raison pouvant expliquer l'inadéquation des relations dose-effet est la méconnaissance de l'influence des facteurs non acoustiques sur la gêne due au bruit.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

Les facteurs démographiques (âge, sexe, statut social, revenus, niveau d'éducation, entre autres) et attitudinaux (crainte vis-à-vis de la source de bruit, sensibilité au bruit en général) ont fait l'objet de plusieurs études (p. ex. [Fields, 1993], [Miedema and Vos, 1998]). La sensibilité au bruit est l'un des facteurs non acoustiques les plus fréquemment relevés dans la littérature comme ayant une influence sur la gêne sonore exprimée (p. ex. [Job, 1988]). Selon Miedema et Vos, une meilleure compréhension de la sensibilité au bruit est nécessaire pour lutter efficacement contre les effets négatifs du bruit ([Miedema and Vos, 2003]).

Une deuxième limite avérée des relations dose-effet provient du fait que les sources de l'environnement sont rarement perçues seules, mais plutôt combinées à plusieurs autres sources de bruit. Lercher fait une synthèse des différents cas de « multi-exposition » (exposition simultanée à plusieurs sources de bruit, p. ex. bruit routier et bruit ferroviaire) étudiés dans la littérature ([Lercher, 2011]).

Taylor a synthétisé et évalué plusieurs modèles psychophysiques de gêne pour des combinaisons de plusieurs sources de bruit ([Taylor, 1982]). Le but de ces modèles (p. ex. modèle des effets indépendants, modèle de sommation énergétique), est d'exprimer la gêne due à l'ensemble des sources (ou « gêne totale ») à partir des paramètres physiques liés aux différentes sources.

Plusieurs études ont également suggéré l'utilisation de modèles perceptifs pour prédire la gêne totale en situation de multi-exposition. Le principe de tels modèles est d'exprimer la gêne totale en fonction des gênes relatives à chaque source (« gêne spécifique » ou « gêne partielle » selon que la source est perçue en l'absence de toute autre source dans le premier cas, ou en combinaison avec une autre source dans le deuxième cas).

Berglund examine le « paradoxe des sources combinées » ou stratégie de compromis ([Berglund, 1997]). Ce phénomène intervient lorsque la gêne totale exprimée par les résidents vis-à-vis d'une combinaison de sources est plus faible que la gêne partielle due à la source la plus gênante au sein de la combinaison. Or, les modèles de gêne totale (psychophysiques ou perceptifs) existants ne permettent pas de prendre en compte de telles situations.

Enfin, dans le cas particulier du trafic ferroviaire, il arrive souvent que les vibrations générées par le passage des trains se propagent et soient perceptibles jusque dans les logements voisins. Cette « co-exposition » au bruit et aux vibrations ferroviaire, ainsi que la compréhension de la gêne résultante due au bruit et aux vibrations, est le principal objet de cette thèse. La section 2.3 est consacrée aux études *in situ* et en laboratoire portant sur la co-exposition au bruit et aux vibrations ferroviaires.

2.2.2 La gêne sonore due au trafic ferroviaire : études en laboratoire

L'une des premières études en laboratoire visant à comprendre la gêne due au bruit des transports a été menée par Öhrström et ses collègues ([Öhrström et al., 1980]). Durant l'expérience, 40 auditeurs ont été exposés à plusieurs passages de différents véhicules (poids

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

lourd, avion, deux roues, train). La moitié des participants a été exposée à 5 passages de poids lourds et d'avions et l'autre moitié à 5 passages de deux roues et 5 passages de train.

Les niveaux sonores, exprimés en terme de maximum de niveau de pression sonore, pondéré A, étaient égalisés pour l'ensemble des stimuli. Pour chaque type de véhicule, les 5 passages étaient présentés aux participants deux fois : Une première fois à un niveau de bruit modéré ($L_{A_{max}}$ = 70dB(A)) et une seconde fois à un niveau de bruit fort ($L_{A_{max}}$ = 80dB(A)). Un questionnaire était ensuite soumis aux participants afin de recueillir leurs réponses de gêne.

Les résultats montrent que le niveau de pression sonore équivalent $L_{A_{eq}}$ est un indicateur pertinent pour la prédiction de la gêne due au bruit des transports en laboratoire, lorsque le nombre d'événements (c-à-d de passages de véhicule) est constant. Les auteurs mentionnent cependant que d'autres paramètres physiques liés aux caractéristiques temporelle ou spectrale du bruit doivent être pris en compte.

Une étude comprenant une enquête *in situ* réalisée conjointement à une expérience en laboratoire a été menée par Izumi ([Izumi, 1988]). L'objectif était d'établir des relations dose-effet entre le niveau d'exposition à des combinaisons de bruits routiers et ferroviaires et la gêne recueillie *in situ* d'une part et en laboratoire d'autre part. Durant l'expérience en laboratoire, plusieurs participants ont été soumis à des combinaisons de bruits routier et ferroviaire présentés chacun à 4 niveaux différents (16 stimuli pour chaque combinaison possible des deux types de source).

D'après les similarités observées entre les relations dose-effet établies à partir des données de l'enquête et de l'expérience, l'auteur valide l'intérêt de l'étude en laboratoire de la gêne sonore. Différents modèles de prédiction de la gêne totale ont été testés, mais aucun n'a montré de corrélation satisfaisante avec les données recueillies dans l'étude.

Sandrock et ses collègues ont mené une étude comportant deux expériences dans le but d'étudier la gêne due aux transports ferroviaires légers en milieu urbain ([Sandrock et al., 2008]). Durant la première expérience, réalisée par 22 participants, la gêne due à des enregistrements courts (6s) des passages d'un bus, d'un tramway et d'un poids lourd, a été recueillie. Les extraits sonores étaient présentés à 7 niveaux de bruit différents, variant en terme de maximum de niveau de pression sonore pondéré A, $L_{A_{max}}$, de 65.5 à 83.5dB(A). Durant la deuxième expérience, réalisée par 60 participants, la gêne due à des scènes sonores composées de bruit routier et des enregistrements utilisés durant la première expérience a été recueillie.

Les résultats des deux expériences montrent que la gêne due au bruit du tramway est plus faible que celle due au bruit du bus (bonus de 3dB(A) pour le tramway). Toutefois les auteurs précisent que ce résultat ne permet pas de confirmer la pertinence du bonus ferroviaire en général. En effet, les spectres sonores des trains, circulant généralement à des vitesses plus élevées que les tramways, sont plus chargés en hautes fréquences et peuvent, par conséquent, engendrer une gêne sonore plus importante.

Une étude a été menée par Torija et ses collègues, à partir des données d'une expérience réalisée dans un environnement réaliste (salon d'une maison individuelle située

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

dans une zone calme), afin de déterminer les paramètres physiques présentant de bonnes corrélations avec la gêne due aux bruits routiers et ferroviaires ([Torija et al., 2011]). Des enregistrements de plusieurs types de train (Intercité, TGV, Maglev) ainsi que de deux axes routiers (autoroute et route locale) ont été réalisés à plusieurs distances de la voie ferrée ou de la route. Plusieurs scènes sonores ont été créées à partir des enregistrements courts de bruit ferroviaire ou de bruit routier (45s) en les superposant à un bruit routier enregistré à 50m d'une autoroute. Chaque scène durait 10min. À l'issue de l'expérience, les participants étaient finalement invités à évaluer la gêne sonore due à chaque passage de 45s, seul. L'expérience complète durait 4h. Les bruits ont été reproduits à l'aide de deux haut-parleurs placés à l'extérieur du logement et présentés à un échantillon de 100 personnes représentatives de la population (en terme d'âge, de sexe, de niveau d'éducation et de sensibilité au bruit).

Les résultats font apparaître une influence de plusieurs paramètres liés au bruit mesuré à l'intérieur du logement sur la gêne sonore. Hormis les paramètres énergétiques ($L_{A_{eq}}$ ou L_{eq}), des paramètres liés au contenu spectral ont montré de fortes corrélations avec la gêne sonore recueillie durant l'expérience. En particulier, les corrélations entre la gêne sonore et le pourcentage de niveau sonore compris dans trois principales régions fréquentielles ([31.5Hz : 125Hz], 315Hz et [630Hz : 2500Hz]) étaient significatives. L'influence de paramètres liés aux variations temporelles tels que le facteur de crête, CF [5] a également été mise en évidence.

Une étude a été menée par Trollé et ses collègues dans le but de déterminer un indicateur acoustique de la gêne à court terme due au bruit de tramway ([Trollé et al., 2014]). Quarante participants ont évalué la gêne sonore due à 61 enregistrements de passages de tramway, présentés aléatoirement. Les niveaux de pression sonore non pondérée, L_{eq}, des différents passages variaient de 46 à 63dB et leurs durées étaient comprises entre 8 et 25.5s. Les participants étaient également invités à réaliser une tâche de verbalisation libre afin de décrire les bruits de tramway qu'ils avaient entendus durant l'expérience, à l'issue de celle-ci.

Les résultats suggèrent que le niveau de pression sonore, le caractère irrégulier ou régulier ainsi que le caractère grave ou aigu des bruits de tramway ont eu une influence sur la gêne sonore exprimée par les participants. En revanche, l'effet de la durée des passages n'était pas significatif. Un indicateur a été proposé, le TETC (*Total Energy of Tonal Components* ou l'énergie totale des composantes tonales), calculé à partir des niveaux des composantes tonales présentes dans les bandes critiques comprises entre 12 et 24 Barks.

Le bonus ferroviaire en laboratoire

Le bonus ferroviaire a été testé expérimentalement par Fastl et ses collègues en laboratoire ([Fastl et al., 1996]). L'expérience comportait 5 sessions d'une durée de 15 minutes chacune. Durant chaque session, 10 passages correspondant à du trafic ferroviaire ou à du trafic routier, ou à une combinaison des deux, étaient présentés à 8 participants.

5. $CF = \frac{max(|p_A(t)|}{p_{A_{rms,T}}}$

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

Les conclusions de l'étude montrent que le bruit ferroviaire a été jugé moins gênant que le bruit routier, pour un même niveau sonore équivalent pondéré A, $L_{A_{eq}}$. Cette différence pourrait être due à des paramètres physiques liés aux types de source (en particulier à des différences de contenu fréquentiel) ou à des différences d'attitude vis-à-vis des deux sources.

En utilisant les mêmes données que celles utilisées par Torija et ses collègues, une étude a été menée par De Coensel et ses collaborateurs afin d'examiner la gêne sonore due au trafic ferroviaire (trains conventionnels, TGV ou Maglev) et au trafic routier ([De Coensel et al., 2007]). En particulier, le but de cette étude était de tester le bonus ferroviaire dans un environnement réaliste et contrôlé. Les enregistrements courts (45s) de bruit ferroviaire ou de bruit routier ont tout d'abord été présentés au sein de scènes sonores reconstituées en les superposant à un enregistrement de 10min de bruit routier. Les participants étaient invités à évaluer la gêne due aux bruits présentés une fois la scène sonore terminée. La gêne à court terme due à chacun des enregistrements seul était également recueillie à l'issue de l'expérience.

Les résultats diffèrent selon que les réponses de gêne se rapportaient aux bruits présents dans les différentes scènes sonores ou bien aux enregistrements seuls. Dans le premier cas, le niveau sonore équivalent pondéré A, $L_{A_{eq}}$, et la distance à la voie suffisaient à expliquer 85% de la variance. Le type de source (TER, TGV, Maglev et bruit routier) n'augmentait pas de façon significative le pourcentage de variance expliquée. Dans le second cas, en revanche, le bruit routier est apparu plus gênant que le bruit ferroviaire (pas de différence significative constatée entre le bruit du Maglev et les autres types de train). Les auteurs mentionnent que lors de tests d'écoute mettant en jeu des stimuli courts, l'évaluation de la gêne sonore se rapporte à l'évaluation de la sonie. Or, les relations entre la sonie et le niveau sonore équivalent pondéré A, $L_{A_{eq}}$, diffèrent dans les cas du bruit routier et du bruit ferroviaire.

Plus récemment, Kim et ses collègues ont réalisé une étude en laboratoire dans le but d'examiner la gêne à court terme due à 4 sources de bruit : aérien (aviation civile), aérien (aviation militaire), ferroviaire et routier ([Kim et al., 2010]). Les enregistrements des différents types de sources ont été déclinés en 9 niveaux de bruit, variant en terme de niveau de pression sonore équivalente, $L_{A_{eq}}$, de 40 dB(A) à 85 dB(A). Les 36 stimuli résultants ont été présentés à 52 participants qui ont évalué pour chaque stimulus la gêne sonore ressentie.

Les résultats montrent que le bruit ferroviaire n'est pas jugé significativement moins gênant que le bruit routier, pour un même niveau sonore équivalent, remettant en cause l'existence du bonus ferroviaire.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

Tableau 2.2 – Caractéristiques des enquêtes *in situ* et des études en laboratoire ayant examiné l'influence du niveau de vibrations sur la gêne due au bruit (A_N), du niveau de bruit sur la gêne due aux vibrations (A_V) et des niveaux de bruit et de vibrations sur la gêne totale (A_T).

Étude	Plage de niveaux sonores considérée	Plage de niveaux vibratoires considérée	Conclusions de l'étude
[Howarth and Griffin, 1990] (laboratoire)	$SEL \in [54 : 79]$dB(A)	$a_{rms_{24s}} \in [0.02 : 0.125]\ m.s^{-2}$	$a_{rms_{24s}}$ n'influence pas A_N Effet antagoniste de SEL sur A_V quand $a_{rms_{24s}}$ faible Effet synergique de SEL sur A_V quand $a_{rms_{24s}}$ fort
[Paulsen and Kastka, 1995] (laboratoire)	$L_{A_{eq}} \in [35 : 60]$dB(A)	$v_{rms_{16s}} \in [0.05 : 0.31]\ mm.s^{-1}$	Effet synergique de $v_{rms_{16s}}$ sur A_N quand $L_{A_{eq}}$ faible Effet synergique de $L_{A_{eq}}$ sur A_V quand $v_{rms_{16s}}$ peu ou pas perceptible
[Öhrström and Skånberg, 1996] (*in situ*)	$L_{A_{max}} \in [65 : 95]$dB(A)	$v_{rms} \in [0 : 2]\ mm.s^{-1}$	v_{rms} influence A_N
[Yokoshima and Tamura, 2005] (*in situ*)	$L_{A_{eq}} \in [41 : 70]$dB(A)	$L_{V_{max}}$ (ref. $10^{-5}\ m.s^{-2}$) $\in [46 : 70]$dB	$L_{V_{max}}$ influence A_N $L_{A_{eq}}$ influence A_V
[Woodcock et al., 2011] (*in situ*)	$L_{den} \in [45 : 75]$dB	$VDV_{b,24h} \in [0 : 0.1]\ m.s^{-1.75}$	$VDV_{b,24h}$ influence A_N L_{den} influence A_V
[Gidlöf-Gunnarsson et al., 2012] (*in situ*)	$L_{A_{eq,24h}} \leq 65$dB(A)	$v_{max} \in [0 : 1.5]\ mm.s^{-1}$	v_{max} influence A_N L_{den} influence A_V
[Lee and Griffin, 2013] (laboratoire)	$L_{A_{eq}} \in [80.5 : 96]$dB(A)	$a_{rms_{18s}} \in [0.008 : 0.079]\ m.s^{-2}$	$a_{rms_{18s}}$ n'influence pas A_N
[Sharp et al., 2014b] (laboratoire)	$L_{A_{eq}} \in [50.7 : 62.5]$dB(A)	$VDV_b \in [0.0514 : 0.0954]\ m.s^{-1.75}$	L_{10} influence A_T Le niveau de vibrations n'influence pas A_T
[Morihara and Matsumoto, 2016] (laboratoire)	$L_{A_{max}} \in [50 : 70]$dB(A)	$L_{V_{max}}$ (ref. $10^{-5}\ m.s^{-2}$) $\in [65 : 75]$dB	$L_{V_{max}}$ influence A_T sauf lorsque $L_{A_{max}} = 70$dB(A)

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

2.3 La gêne due aux bruit et vibrations du trafic ferroviaire

Cette section fait état des différentes enquêtes *in situ* et expériences en laboratoire ayant étudié la gêne due à des combinaisons de bruit et de vibrations ferroviaires. Pour certaines de ces études, davantage de détails pourront être obtenus en se référant à la synthèse bibliographique menée par Trollé et ses collègues ([Trollé et al., 2015]).

Les différentes plages de variation des niveaux de bruit et des niveaux de vibrations considérées dans la littérature sont données en tableau 2.2. Pour chaque étude, les conclusions principales sont également rappelées.

2.3.1 La gêne due aux bruit et vibrations ferroviaires combinés : enquêtes *in situ*

Une enquête *in situ* a été menée par Öhrström et Skånberg, dans 15 sites différents en Suède ([Öhrström and Skånberg, 1996]). Parmi ces sites, les zones d'étude ont été divisées en trois groupes selon le niveau des vibrations émises par le trafic ferroviaire : vibrations fortes (niveau de vitesse vibratoire, v_{rms} supérieur à $2mm.s^{-1}$), vibrations faibles (niveau de vitesse vibratoire inférieur à $1mm.s^{-1}$). Les niveaux de bruit ont été calculés pour chacun des sites. Les réponses de 2833 résidents quant à la gêne due au bruit ferroviaire ont été analysées. Les résultats montrent que la gêne sonore due au trafic ferroviaire est plus élevée dans les zones présentant des vibrations fortes que dans les zones présentant peu ou pas de vibrations. Pour ces dernières, les auteurs préconisent un niveau de bruit limite, $L_{A_{eq}} = 55dB(A)$ pour les émissions de bruit ferroviaire. Ils indiquent qu'une réduction supplémentaire de 10dB(A) est nécessaire dans les zones présentant de fortes vibrations.

Lors de l'enquête *in situ* rapportée par Passchier-Vermeer et Zeichart la gêne due aux vibrations ferroviaires a été recueillie (cf. section 2.1.2) mais également la gêne due au bruit ferroviaire et la gêne totale due à la situation de co-exposition au bruit et aux vibrations ferroviaires ([Passchier-Vermeer and Zeichart, 1998]). L'influence du niveau de bruit sur la gêne vibratoire et inversement, du niveau vibratoire sur la gêne sonore ont été examinés. Les résidents interrogés devaient indiquer leur gêne en faisant la distinction entre la gêne ressentie durant la journée et la gêne ressentie durant la nuit.

Les résultats montrent que :

— La gêne due au bruit du trafic ferroviaire est influencée par le niveau de bruit, de jour comme de nuit, ainsi que par le niveau de vibrations, uniquement pour la période de jour.
— La gêne due aux vibrations du trafic ferroviaire est influencée par le niveau de vibrations uniquement pour la période de jour. Le niveau de bruit, quant à lui, influence la gêne vibratoire de jour comme de nuit.

Concernant la gêne totale, la période de jour était la seule considérée. Les auteurs ont montré une influence significative des niveaux de bruit et de vibrations sur la gêne totale, ainsi qu'un effet significatif de l'interaction entre les deux facteurs. Le niveau de bruit expliquait 8% de la variance, le niveau de vibrations 5% et l'interaction des deux facteurs 3%.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

Les données de l'enquête *in situ* concernant la gêne due aux vibrations ferroviaires, rapportée par Waddington et ses collègues ([Waddington et al., 2014], cf. section 2.1.2), ont été associées aux niveaux sonores estimés à l'intérieur des logements de l'enquête. Ainsi, Woodcock et ses collaborateurs ont pu construire des relations dose-effet entre le pourcentage de personnes très gênées ($\%HA$) et l'exposition combinée aux bruit et vibrations ferroviaires ([Woodcock et al., 2011]). Les résultats montrent qu'il existe une influence significative du niveau de bruit sur la gêne vibratoire et inversement, du niveau de vibrations sur la gêne due au bruit.

Dans le cadre du projet Suédois TVANE, Gidlöf-Gunnarsson et ses collègues ont réalisé une enquête *in situ* pour déterminer l'impact de plusieurs facteurs sur la gêne due au bruit ferroviaire, tels que la fréquence de passage des trains et la présence, ou non, de vibrations ferroviaires ([Gidlöf-Gunnarsson et al., 2012]). Leur enquête couvrait 5 sites, dont deux présentant des niveaux élevés de vibration et deux présentant peu ou pas de vibrations du tout. Un questionnaire a été soumis à 1695 résidents. Les niveaux de bruit et de vibrations ont été obtenus par des mesures associées à un logiciel de prédiction (Cadna pour le bruit) pour les différents sites concernés.

Les résultats montrent que la gêne due aux vibrations est clairement influencée par le niveau de bruit ferroviaire. Le pourcentage de personnes gênées par les vibrations était de 16% pour le groupe composé de personnes peu exposées au bruit, de 28% pour les groupes de personnes exposées modérément au bruit et de 50% pour les personnes très exposées au bruit (entre 56 et 65dB(A)). Un effet significatif du niveau de vibrations sur la gêne due au bruit a également été observé par les auteurs, bien que la taille des sous-échantillons utilisés pour réaliser l'analyse statistique soit faible.

Une enquête *in situ* a été réalisée au Japon, autour de la ligne de train à grande vitesse Shinkansen, par Yokoshima et Tamura ([Yokoshima and Tamura, 2005]). Un total de 872 résidents ont été interrogés quant à la gêne provoquée par le bruit et les vibrations émis par le trafic ferroviaire. Les expositions sonore et vibratoire ont été mesurées dans chacun des 98 sites concernés par l'étude, puis les niveaux sonores et vibratoires ont été estimés pour chaque logement à partir des mesures.

Les auteurs observent que la gêne due au bruit ferroviaire est plus importante lorsque les logements sont exposés à de forts niveaux vibratoires. De même, la gêne vibratoire due au trafic ferroviaire est clairement influencée par le niveau de bruit ferroviaire. Néanmoins, ces résultats ne sont significatifs que dans le cas de maisons individuelles. Ces effets n'ont pas été retrouvés pour les résidents vivant en appartement.

2.3.2 La gêne due aux bruit et vibrations ferroviaires combinés : études en laboratoire

Une première étude en laboratoire de la gêne due aux bruit et vibrations du trafic ferroviaire a été menée par Howarth et Griffin ([Howarth and Griffin, 1990]). Des enregistrements acoustiques et vibratoires avaient préalablement été réalisés à l'intérieur d'un logement situé à proximité d'une voie ferrée. Un passage de train de fret a été sélectionné pour l'expérience. En combinant les signaux de bruit et de vibrations correspondant à ce

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

passage, avec 6 niveaux pour le bruit et 6 niveaux pour les vibrations, 36 stimuli ont été obtenus et présentés à 30 participants.

Les amplitudes des niveaux de bruit ont été exprimées en terme de niveau d'exposition sonore (*Sound Exposure Level* ou SEL) et variaient de 54 à 79dB(A) par pas de 5dB(A). Les amplitudes des stimuli vibratoires, en termes d'accélération rms moyenne, $a_{rms_{24s}}$ étaient de 0.02, 0.03, 0.04, 0.06, 0.09 et $0.125 m.s^{-2}$. La durée du signal était de 24s.

L'expérience était composée de 3 sessions :

— Session A : Les participants devaient évaluer la gêne due aux vibrations pour chacune des 36 combinaisons de bruit et de vibrations. La gêne due aux 6 signaux vibratoires en l'absence de bruit était également recueillie (42 stimuli au total).
— Session B : Les participants devaient évaluer la gêne due au bruit pour chacune des 36 combinaisons de bruit et de vibrations. La gêne due aux 6 signaux de bruit en l'absence de vibrations était également recueillie (42 stimuli au total).
— Session C : Les participants devaient évaluer la gêne totale due aux bruit et vibrations, pour chacune des 36 combinaisons (36 stimuli au total).

Les participants évaluaient leur gêne selon la méthode d'estimation de grandeur, à partir d'une combinaison de référence ($SEL = 64$dB(A) ; $VDV = 0.14\ m.s^{-1.75}$).

Les trois sessions étaient présentées selon un ordre aléatoire aux participants, de même que les stimuli à l'intérieur de chaque session.

Les résultats indiquent que le niveau de vibrations n'a aucune influence sur la gêne due au bruit, quelque soit le niveau sonore considéré. En revanche, les auteurs rapportent un effet significatif du niveau de bruit sur la gêne due aux vibrations. En effet, pour des faibles niveaux vibratoires, une augmentation du niveau de bruit tend à faire diminuer la gêne due aux vibrations (effet antagoniste) tandis que pour de forts niveaux vibratoires, la présence de bruit tend à faire augmenter la gêne vibratoire (effet synergique).

Les conclusions de l'étude indiquent que le niveau de bruit et le niveau de vibrations influencent tous deux la gêne totale. Dans le but d'étudier les importances relatives des sensations auditive et vibratoire, une relation d'équivalence subjective a également été déterminée, entre le niveau d'exposition sonore, SEL, et le niveau vibratoire, VDV : $SEL = 26.7 \cdot \log_{10}(VDV) + 81.7$.

Suivant la même procédure, Paulsen et Kastka ont réalisé une expérience à partir d'enregistrements de tramway réalisés au premier étage d'un immeuble ([Paulsen and Kastka, 1995]). Le but de l'expérience était d'étudier la gêne due aux bruit et vibrations du trafic ferroviaire pour de plus faibles niveaux de bruit que ceux utilisés par Howarth et Griffin. Les signaux de bruit et de vibrations ont été présentés, sous la forme de 20 combinaisons de 4 niveaux de bruit et de 4 niveaux de vibrations, à 24 participants.

Les niveaux de bruit, exprimés en niveau de pression sonore équivalent pondéré A, $L_{A_{eq}}$, étaient de 34, 45 et 60dB(A) et le premier niveau considéré était le bruit de fond (32.5dB(A)) lorsque les haut-parleurs ne diffusaient aucun bruit. Les niveaux de vibra-

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

tion, exprimés en vitesse rms moyenne, $v_{rms_{16s}}$, étaient de 0.05, 0.12 et $0.31mm.s^{-1}$ et le premier niveau considéré était la vibration résiduelle (environ $0.03mm.s^{-1}$) en l'absence de signal vibratoire. La durée du passage de tramway était de 16s.

Trois sessions devaient être réalisées par les participants :

— Session 1 : Les participants devaient évaluer la gêne due aux vibrations pour chacune des 16 combinaisons de bruit et de vibrations. Cette session était réalisée 3 fois par chaque participant afin d'améliorer la fiabilité des résultats.
— Session 2 : Les participants devaient évaluer la gêne due au bruit pour chacune des 16 combinaisons de bruit et de vibrations. Cette session n'était réalisée qu'une fois par participant.
— Session 3 : Les participants devaient évaluer la gêne totale due aux bruits et vibrations, pour chacune des 16 combinaisons.

Les participants inscrivaient leurs réponses *via* une échelle de gêne, variant de 0 (« imperceptible / pas du tout gênant ») à 9 (« extrêmement fort / insupportable »).

Les sessions étaient réalisées dans le même ordre pour chaque participant, mais les stimuli étaient présentés suivant la règle du carré latin à l'intérieur de chaque session, afin d'éviter un potentiel effet d'ordre.

Les auteurs indiquent que la présence de vibrations possède un effet significatif sur la gêne due au bruit, pour de faibles niveaux sonores (inférieur ou égal à 35dB(A)). Dans ce cas, la gêne sonore est accrue lorsque le niveau vibratoire augmente. Une deuxième différence avec l'étude menée par Howarth et Griffin apparaît au niveau de l'influence du bruit sur la gêne vibratoire. Les auteurs rapportent que celle-ci est significative uniquement pour le premier niveau de vibrations (vibrations résiduelles en l'absence de stimulus vibratoire). Les résultats montrent que la gêne vibratoire augmente avec le niveau de bruit.

Concernant la gêne totale, les conclusions de l'étude mentionnent une influence prédominante du niveau de bruit mais aussi une influence significative du niveau de vibrations. Les auteurs ont également mis en place une relation d'équivalence subjective entre le niveau de pression sonore équivalent, $L_{A_{eq}}$, et la vitesse rms moyenne, $v_{rms_{16s}}$: $L_{A_{eq}} = 14.4 \cdot \log_{10}(v_{rms}) + 51.9$.

Une étude en laboratoire a été menée par Lee et Griffin afin de déterminer l'influence du niveau de vibrations sur la gêne due au bruit ferroviaire ([Lee and Griffin, 2013]). Un passage de TGV a été enregistré à proximité d'une voie ferrée, à l'extérieur de tout bâtiment. Le signal acoustique associé à ce passage a été utilisé dans l'expérience. Le signal vibratoire a été créé artificiellement à partir d'une sinusoïde pure (20Hz) dont l'amplitude au cours du temps a été modifiée de sorte à respecter l'évolution temporelle du signal de bruit. Ces deux signaux ont été présentés à un panel de 20 participants.

Les niveaux de bruit, exprimés en niveau de pression sonore équivalent pondéré A, $L_{A_{eq}}$, étaient de 80.5, 84, 86.5, 90.3, 93.1 et 96dB(A). Les niveaux de vibration, exprimés en accélération rms moyenne non pondérée, $a_{rms_{18s}}$, étaient de 0.008, 0.014, 0.020, 0.036, 0.053 et $0.079m.s^{-2}$. La durée des stimuli était de 18s.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

L'expérience comportait 4 sessions, réalisées deux fois chacune de sorte à accroître la fiabilité des résultats :

— Session A : Les participants devaient évaluer la gêne due aux 6 niveaux de bruit isolés des vibrations.
— Session B : Les participants devaient évaluer la gêne totale, due aux bruit et vibrations, pour chacune des 36 combinaisons.
— Session C : Les participants devaient évaluer la gêne due au bruit, pour chacune des 36 combinaisons de bruit et de vibrations.
— Session D : Les participants devaient évaluer la gêne due aux 6 niveaux de vibrations en l'absence de bruit.

La gêne était inscrite par les participants à l'aide d'une échelle graduée de 0 (« pas du tout gênant ») à 10 (« extrêmement gênant »).

Les sessions étaient réalisées dans le même ordre par l'ensemble des participants et les stimuli à l'intérieur de chaque session étaient présentés aléatoirement.

Les résultats confirment les conclusions de l'étude de Howarth et Griffin, aucune influence significative n'ayant été décelée concernant l'effet des vibrations sur la gêne due au bruit. Deux modèles perceptifs de gêne totale ont pu être élaborés à partir des réponses de gênes partielles dues au bruit et aux vibrations :

— Le modèle de dominance, prenant pour seule variable la gêne partielle la plus importante.
— Le modèle des effets indépendants, prenant pour variables les deux gênes partielles.

Dans le cas de cette étude, le modèle des effets indépendants montre une légèrement meilleure performance que le modèle de dominance. De plus, la gêne due au bruit est prédominante dans l'expression de la gêne totale. Cependant, son influence relative vis-à-vis de la gêne vibratoire semble dépendante du niveau de bruit mis en jeu.

Sharp et ses collègues ont réalisé une expérience en laboratoire dans le but de construire un modèle psycho-physique de gêne totale ([Sharp et al., 2014b]). Des mesures acoustique et vibratoire ont préalablement été réalisées le long d'une voie ferrée, au Royaume-Uni, permettant l'enregistrement de 62 passages de train. Afin de réduire la taille de l'échantillon tout en conservant une certaine variabilité dans le jeu de stimuli, une ACP a été menée sur l'ensemble des signaux. En tout, 10 passages acoustiques et vibratoires, dont 7 correspondant à des TER et 3 à des trains de fret, ont été conservés pour l'expérience.

La procédure expérimentale adoptée par Woodcock et ses collègues et décrite en section 2.1.3 a été reprise pour cette expérience ([Woodcock et al., 2014]). Les 30 participants devaient comparer deux à deux l'ensemble des 10 stimuli (45 paires au total), en répondant à deux questions. La première interrogeait les participants sur le stimulus qui leur paraissait le plus gênant, et une seconde leur demandait d'évaluer la similarité entre les deux stimuli.

Les niveaux sonores et vibratoires des stimuli, ainsi que leurs durées, n'étaient pas

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

égalisés lors de l'expérience. Les caractéristiques des stimuli étaient les mêmes que celles des passages originaux.

À partir des similarités perçues par les participants entre les 10 stimuli, un espace perceptif à 4 dimensions a été construit par les auteurs. Ces dimensions sont, par ordre d'importance en termes de corrélations avec les réponses des participants :

1. L'énergie totale des composantes tonales (*Total Energy of Tonal Components* ou TETC) présentes entre les 12e et 24e bandes de Barks.
2. La durée du signal vibratoire, définie comme la durée durant laquelle le niveau vibratoire est supérieur à 4/5e du niveau maximal.
3. Le niveau de bruit, représenté par l'indicateur L_{10}.
4. La fréquence de modulation du signal vibratoire.

Les conclusions de cette étude rapportent que la perception d'une combinaison de bruit et de vibrations repose sur des paramètres non seulement énergétiques mais également spectraux et temporels.

Une étude en laboratoire a été menée récemment par Morihara et Matsumoto dans le but d'examiner l'influence des bruits et vibrations ferroviaires émis par le Shinkansen sur une activité de repos ou de réflexion ([Morihara and Matsumoto, 2016]). Des mesures ont été réalisées à l'extérieur de toute habitation, afin d'obtenir des enregistrements acoustique et vibratoire d'un passage de train. 6 combinaisons ont été obtenues à partir de 2 niveaux de vibrations et 3 niveaux de bruit, pour ce même passage.

Les niveaux de bruit, en termes de maximum de niveau de pression sonore pondéré A, $L_{A_{max}}$, étaient de 50, 60 et 70dB(A).

Les niveaux de vibrations, en termes de maximum de niveau d'accélération vibratoire non pondéré, $L_{V_{max}}$ (ref. 10^{-5} $m.s^{-2}$ selon la norme Japonaise), étaient de 65 et 75dB.

20 participants ont exécuté 2 tâches successives (activité de relaxation puis activité de réflexion), tout en étant exposés aux 6 combinaisons de bruit et de vibrations ainsi qu'aux 3 niveaux de bruit en l'absence de vibrations (9 conditions au total).

Les résultats indiquent que le niveau de vibration possède une influence sur la gêne totale ressentie durant l'activité de lecture. Cette influence disparaît lorsque le niveau de bruit égale 70dB(A). Ce résultat diffère légèrement concernant la gêne ressentie durant l'activité de relaxation. Cette fois, une influence significative du niveau de vibration n'est détectée que pour un niveau sonore de 50dB(A).

2.4 Conclusion

De nombreuses enquêtes *in situ* et études en laboratoire ont été menées pour prédire la gêne due au bruit des transports et ainsi pouvoir lutter efficacement contre les nuisances sonores en zone urbaine. Il semble cependant que de nombreux facteurs non acoustiques

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

ont une influence sur la gêne due au bruit, et en particulier au bruit ferroviaire. La gêne due à des combinaisons de sources de bruit (p. ex. ferroviaire et routier) reste méconnue et davantage d'études sont nécessaires afin d'améliorer les modèles existants dans la littérature.

Dans le cas du trafic ferroviaire, la prédiction de la gêne due au bruit est particulièrement complexe du fait des vibrations ferroviaires auxquelles sont simultanément exposés les résidents. La gêne due aux vibrations a été l'objet de nombreuses enquêtes *in situ* qui ont employé des méthodes et des indicateurs très différents, rendant les comparaisons difficiles. Un certain nombre d'expériences ont été réalisées en laboratoire afin de mieux comprendre la perception des vibrations et l'expression de la gêne vibratoire. Cependant, davantage d'études en conditions contrôlées sont nécessaires pour mieux comprendre la gêne due aux vibrations.

Un manque de consensus est observé dans la littérature concernant l'influence des vibrations sur la gêne due au bruit ferroviaire, et inversement, du bruit sur la gêne due aux vibrations ferroviaires. Plusieurs enquêtes *in situ* ont montré que ces influences existent et ont remis en question le bonus de 5dB(A) accordé au bruit ferroviaire vis-à-vis des autres sources de bruit (p. ex. bruit routier). Cependant cette influence reste difficilement comprise et n'a pas été clairement mise en évidence lors d'expériences en laboratoire. Cette question sera traitée lors du chapitre 4 dans lequel une expérience, conduite afin de rechercher les raisons de ce manque de consensus, est présentée.

Avant que cette étude ne soit réalisée, une comparaison de deux méthodes utilisées dans la littérature pour recueillir en laboratoire des réponses de gêne est proposée afin de définir celle qu'il convient d'adopter tout au long de ces travaux de thèse. Les deux méthodes et leur comparaison sont présentées au chapitre suivant.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

Chapitre 3

Comparaison de deux méthodes de recueil de la gêne en laboratoire

Les travaux présentés dans ce chapitre ont fait l'objet d'une lettre à l'éditeur publiée par le Journal of Acoustical Society of America. Cette lettre s'intitule "**Two laboratory methods of assessing annoyance due to railway noise and vibration (L)**" ([Maigrot et al., 2017]). *Les résultats présentés en section 3.2.4 ne figurent pas dans la lettre originale, certaines parties ayant dû être retirées afin de respecter le nombre de pages limité.*

Questions scientifiques

Ce chapitre vise à répondre aux problématiques suivantes :

- Les réponses de gêne (gênes partielles dues au bruit et aux vibrations et gêne totale) recueillies en laboratoire sont elles modifiées lorsque elles sont recueillies au même moment lors de l'expérience et non pas grâce à des sessions d'expérience indépendantes ?
- Quelles sont les contributions du bruit et des vibrations à la gêne totale exprimée ?

Une expérience est réalisée en laboratoire. Durant cette expérience, un signal acoustique et un signal vibratoire provenant d'un même passage de TER sont présentés à des participants à différents niveaux sonores et vibratoires. Toutes les combinaisons possibles des 4 niveaux de bruit et des 4 niveaux de vibrations sont évaluées à deux reprises par les participants en termes de gêne partielle due au bruit, de gêne partielle due aux vibrations et de gêne totale due à la situation globale. Durant trois sessions, les participants sont invités à donner une réponse de gêne (gênes partielles ou gêne totale) correspondant à chaque stimulus combinant niveaux de bruit et de vibrations. Durant une quatrième session, les participants doivent cette fois évaluer les trois types de gêne, pour chaque stimulus. Les réponses obtenues par les deux méthodes sont finalement comparées afin de sélectionner celle qui sera la plus pertinente pour la suite de ces travaux de thèse.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

Introduction

Le trafic ferroviaire s'est développé en Europe au cours des dernières décennies, particulièrement dans les grandes métropoles. La gêne due au bruit ferroviaire a été largement étudiée, ainsi que la gêne sonore en situation de multi-exposition, c-à-d, lorsque le bruit étudié (p. ex. bruit ferroviaire) est entendu en présence d'une deuxième source de bruit (p. ex. trafic routier, cf. [Lercher, 2011] pour une revue de la gêne sonore en situation de multi-exposition).

Souvent, le bruit ferroviaire s'accompagne de vibrations dans les bâtiments engendrées par le passage des trains. Ces vibrations se propagent à travers le sol, depuis les rails jusqu'aux habitations adjacentes. Elles peuvent alors être perçues et provoquer une gêne chez les habitants (p. ex. [Waddington et al., 2014]).

Seul un faible nombre d'études traitant de la gêne due à la co-exposition au bruit et aux vibrations ferroviaires a été mené jusqu'à présent (cf. [Trollé et al., 2015] pour une revue de la gêne due aux bruit et vibrations ferroviaires). Davantage d'expériences en laboratoire et d'enquêtes *in situ* sont requises de sorte à mieux comprendre les mécanismes perceptifs mis en jeux lorsque les deux types d'exposition (sonore et vibratoire) sont impliqués.

Les études portant sur la gêne en situation de multi-exposition ou de co-exposition distinguent gêne spécifique, gêne partielle et gêne totale. La **gêne spécifique** désigne la gêne due à une source seule. La **gêne partielle** - définie en premier par Berglund ([Berglund, 1997]) - se rapporte à la gêne due à une source (p. ex. le bruit) en présence d'une deuxième (p. ex. les vibrations). La gêne due à l'ensemble des sources combinées est appelée **gêne totale**. Les réponses de gênes peuvent être recueillies en laboratoire, ou lors d'enquêtes *in situ*, afin de mieux comprendre les phénomènes et de proposer des modèles de gêne.

Lors d'enquêtes *in situ* (p. ex. [Öhrström et al., 2007]), les réponses de gênes partielles et totale sont communément recueillies au sein d'un questionnaire unique. Une des questions soulevées dans la littérature concerne l'ordre dans lequel les questions sont présentées, et son influence sur les réponses de gênes obtenues (p. ex. [Schulte-Fortkamp and Weber, 1997]). Dans les études traitant de la gêne sonore en situation de multi-exposition en laboratoire, les participants sont invités à évaluer les gênes partielles et totale après chaque stimulus et durant une même session (p. ex. [Klein et al., 2017]). Il est intéressant de se demander si les participants effectuent alors un compromis entre leurs différentes réponses. Dans le cas de la gêne en situation de co-exposition, les gênes partielles et totale sont généralement recueillies durant différentes sessions. À notre connaissance, aucune étude n'a été menée pour vérifier l'existence d'une potentielle différence entre les réponses de gênes partielles et totale recueillies durant une même session et durant différentes sessions.

Le but de cette étude est de mesurer l'influence de ces deux méthodes pour recueillir les gênes partielles et totale dues à des combinaisons de bruit et de vibrations ferroviaires en laboratoire sur les réponses des participants. En première hypothèse, nous postulons que les deux méthodes mènent à des résultats similaires.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

Les stimuli étaient un ensemble de 16 combinaisons de bruit et de vibrations ferroviaires provenant d'un enregistrement sur site, dans une maison proche d'une voie ferrée. Les deux gênes partielles et la gêne totale correspondant à chaque stimulus ont été recueillies durant trois sessions dédiées spécifiquement à l'évaluation de chaque type de gêne. Lors d'une quatrième session, les trois réponses ont été recueillies, pour chaque stimulus, au même moment.

3.1 Méthode expérimentale

3.1.1 Participants

Trente-deux adultes (20 hommes, 20 femmes ; âge moyen = 33.2 ans, écart-type = 9.7 ans) ont participé à cette expérience. Un audiogramme a été mesuré pour chacun d'eux avant le commencement de l'expérience afin de vérifier qu'aucun ne souffrait de troubles de l'audition. Ils étaient naïfs vis-à-vis du but de l'expérience et avaient le droit de poser toutes les questions qu'ils souhaitaient tant que celles-ci ne concernaient pas directement l'objectif de l'expérience ni le contenu des stimuli. Leur consentement écrit était requis avant le début de l'expérience. Ils étaient indemnisés pour leur participation.

3.1.2 Stimuli

Les stimuli sonore et vibratoire ont été enregistrés simultanément à l'intérieur d'une maison situé au voisinage d'une voie ferrée, à Caluire-et-Cuire (France) en Avril 2016.

L'enregistrement des signaux vibratoires a été effectué par la société Acouphen (Lyon, France, www.acouphen.fr). Les mesures étaient réalisées à l'aide de trois accéléromètres Pizeotronics 393B12 (PCB Piezotronics, Depew, NY, www.pcb.com) valides sur la plage fréquentielle d'intérêt (c-à-d, entre 1Hz et 80Hz pour les vibrations globales du corps) selon trois directions : un accéléromètre enregistrait les vibrations verticales et deux enregistraient les vibrations horizontales (axes perpendiculaire et parallèle à la voie ferrée).

Seule la direction verticale a été utilisée dans l'expérience (une majorité d'études traitant de la gêne due aux vibrations ferroviaires ne considèrent que cette direction, cf. section 2.1). Les capteurs ont été installés au centre de la pièce qui présentait selon les résidents les plus fortes vibrations, conformément à la norme internationale ISO 2631-2 [ISO, 2003].

L'enregistrement sonore a été réalisé, selon la technique ORTF, à l'aide d'un couple de microphones cardioïdes espacés de 17cm et orientés de sorte à former un angle de 110°, permettant ainsi une captation stéréophonique des passages de train. Cette technique d'enregistrement est utilisée par d'autres études (p. ex. [Morel et al., 2012a]), notamment en raison de la qualité sonore atteinte lors de la reproduction stéréophonique. Afin de calibrer les mesures, un microphone omnidirectionnel, placé entre les deux microphones cardioïdes, a également été employé, suivant une méthode utilisée dans de précédentes études (p. ex. [Trollé et al., 2014]). La hauteur au sol des microphones était de 1.5m, le point de mesure acoustique étant aligné verticalement avec le point de mesure vibratoire (cf. figure 3.1).

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés



FIGURE 3.1 – Dispositif de mesure *in situ*.

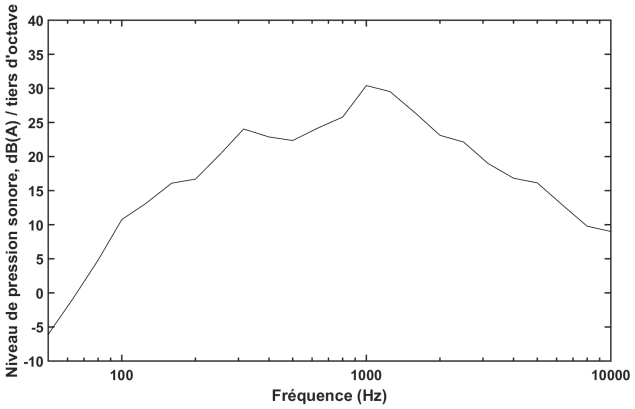
Concernant la topographie du site de mesure, la pièce où se déroulaient les enregistrements était une chambre à coucher de faible volume (dimensions intérieures : 2.95m x 3.15m x 2.15m). L'intérieur de la pièce était peu meublé, à l'exception d'un lit, et disposait d'une fenêtre surplombant la voie ferrée. La fenêtre était maintenue fermée durant les enregistrements. Une distance de 10m environ séparait les rails de la façade du bâtiment. Enfin, la distance entre les microphones placés à l'intérieur de la pièce et la fenêtre était supérieure à 1m.

L'enregistrement s'est déroulé pendant une durée de 30min. L'ensemble des passages enregistrés lors de cette mesure terrain était finalement composé de 6 trains dont 2 trains de fret et 4 trains express régionaux (TER).

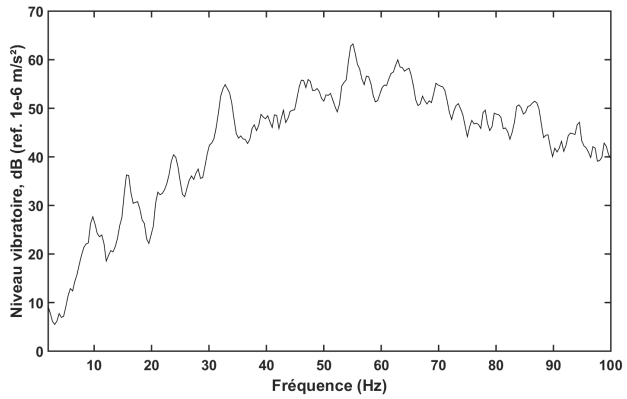
En raison de sa courte durée vis-à-vis des autres passages, un passage de TER a été sélectionné pour l'expérience. La durée de ce passage après extraction était de 13.5s.

Le spectre du signal acoustique était large bande, la plage fréquentielle allant de 30Hz à 8kHz (cf. figure 3.2.a). La fréquence dominante du signal vibratoire était 55Hz (cf. figure 3.2.b).

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés



(a)



(b)

FIGURE 3.2 – Spectres des signaux utilisés pour la création des stimuli : bruit (a) et vibrations (b).

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

Basés sur ces signaux, les stimuli sonores et vibratoires ont été présentés à 4 niveaux différents :

— Les niveaux sonores équivalents pondérés A, $L_{A_{eq}}$, des 4 stimuli sonores, N_1, N_2, N_3 et N_4 étaient de 44, 50, 56 et 62dB(A), respectivement. Le niveau le plus faible de 44dB(A) correspondait au niveau réel du passage enregistré sur site.

— Les accélérations *root-mean-square* (rms) non pondérées, $a_{rms,13.5s}$, des 4 stimuli vibratoires, V_1, V_2, V_3 et V_4, moyennées sur toute la durée du passage, étaient de 0.030, 0.054, 0.071 et 0.094 $m.s^{-2}$, respectivement ($L_{V_{eq}} = 89.5, 94.6, 97$ et 99.5dB). Le niveau vibratoire de 0.030 $m.s^{-2}$ correspondait au niveau réel du passage enregistré sur site.

En conséquence, 16 combinaisons N_iV_j de niveaux de bruit et de vibrations ont pu être formées (i=1 :4, j=1 :4). Ces niveaux sont cohérents avec ceux d'autres études en laboratoire (p. ex. [Howarth and Griffin, 1990], [Paulsen and Kastka, 1995]).

3.1.3 Dispositif expérimental

Les vibrations ont été générées dans la direction verticale par un pot vibrant électrodynamique LDS-V650 (B&K, Nærum, Danemark, www.bksv.com). Les participants s'asseyaient sur un tabouret rigide fixé à une plate-forme rendue solidaire du pot vibrant au moyen d'une vis de serrage. Un garde-fou était présent autour de la plate-forme par mesure de précaution pour les participants, afin d'éviter tout risque de chute. Les participants recevaient pour consigne de ne pas s'accouder au garde-fou et de garder le dos bien droit durant toute la durée de l'expérience.

Le bruit a été généré par deux haut-parleurs (Tapco S5) placés face au banc vibratoire, de sorte à former un triangle équilatéral avec la tête du participant, une fois celui-ci assit sur le tabouret.

Les participants disposaient d'un écran tactile leur donnant les instructions et sur lequel s'affichaient les échelles de gêne. Une échelle continue graduée était utilisée, allant de 0 (« Pas du tout ») à 10 (« Extrêmement »), en accord avec les recommandations d'ICBEN (International Commission on Biological Effects of Noise) proposées par [Fields et al., 2001]. La réponse de gêne était inscrite en déplaçant un curseur le long de l'échelle, à l'aide d'un stylet ou avec le doigt.

L'expérience a été réalisée dans une chambre semi-anéchoïque dont le niveau de bruit de fond n'excédait pas 30dB(A). Le bruit de fond était majoritairement dû à la présence du banc vibratoire et à la ventilation de son système d'alimentation.

Afin de compenser la réponse en fréquence du banc vibratoire utilisé pour reproduire les vibrations, une procédure de filtrage était finalement appliquée aux signaux vibratoires avant reproduction. Cette procédure de filtrage est détaillée en annexe A.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

3.1.4 Procédure

Au début de l'expérience, les participants suivaient une phase d'apprentissage de manière à se familiariser avec les stimuli et avec l'utilisation de l'échelle de gêne. Quatre stimuli étaient présentés durant cette période d'apprentissage : une combinaison « faible » des plus bas niveaux sonores et vibratoires, une combinaison « forte » des plus hauts niveaux sonores et vibratoires, un stimulus composé de bruit uniquement et un stimulus composé de vibrations uniquement.

Une fois cette phase d'apprentissage réalisée, l'expérience comportait 4 sessions : A, B, C et D. L'ordre de passage des sessions était aléatoire. Chaque session se composait des 16 combinaisons de bruit et de vibrations, présentées suivant un ordre aléatoire également. Les participants devaient noter leur gêne après chaque stimulus :

— En session A, les participants devaient évaluer la gêne partielle due au bruit pour chacune des 16 combinaisons N_iV_j. Durant cette session, les gênes spécifiques due aux 4 stimuli sonores N_i seuls étaient également recueillies (pour un total de 20 stimuli : 16 N_iV_j + 4 N_i).

— En session B, les participants devaient évaluer la gêne partielle due aux vibrations pour chacune des 16 combinaisons N_iV_j. Durant cette session, les gênes spécifiques dues aux 4 stimuli vibratoires V_j seuls étaient également recueillies (pour un total de 20 stimuli : 16 N_iV_j + 4 V_j).

— En session C, les participants devaient évaluer la gêne totale due aux bruit et vibrations combinés (16 stimuli N_iV_j).

— En session D, les participants devaient évaluer la gêne partielle due au bruit, la gêne partielle due aux vibrations et la gêne totale due aux bruit et vibrations combinés (16 stimuli N_iV_j).

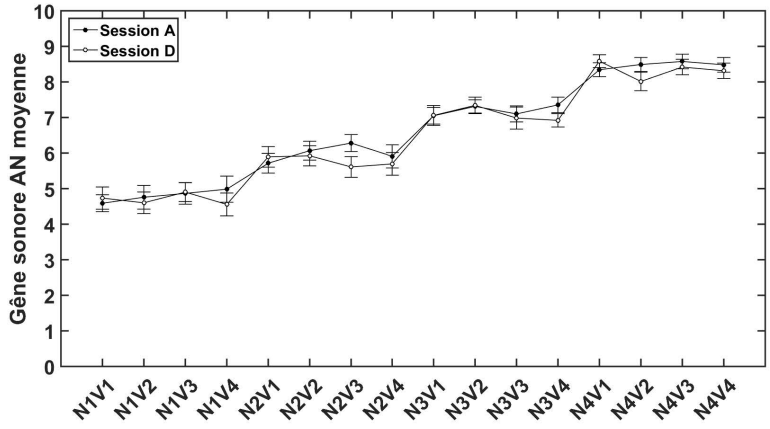
Chaque stimulus pouvait être rejoué autant de fois que nécessaire avant que la réponse de gêne ne soit donnée. Il n'était plus possible de modifier cette réponse dès lors que le stimulus suivant était joué. À la fin de chaque session, les participants devaient finalement évaluer la difficulté de la tâche imposée durant la session, sur la même échelle continue graduée. La durée totale de l'expérience était de 45min.

3.2 Résultats

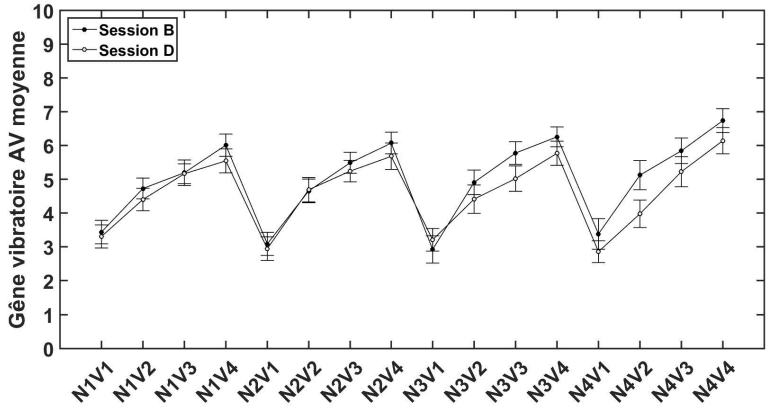
Les résultats ont été analysés afin de déterminer une différence potentielle entre les gênes mesurées par les deux méthodes. Des analyses de la variance à mesures répétées, ou *repeated-measures analysis of variance* (RM-ANOVAs), ont été réalisées sur les réponses de gêne. Toutes les analyses *post hoc* ont été menées à l'aide du test *Honestly Significant Difference* (HSD) de Tukey.

La figure 3.3 indique les réponses moyennes de gêne sonore (A_N), les réponses moyennes de gêne vibratoire (A_V) et les réponses moyennes de gêne totale (A_T), recueillies durant les sessions A et D, durant les sessions B et D et durant les sessions C et D, respectivement.

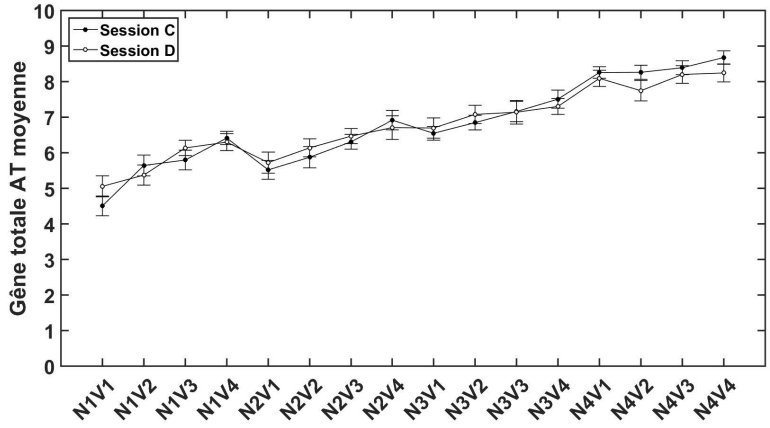
Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés



(a)



(b)



(c)

FIGURE 3.3 – Réponses de gênes moyennes et erreurs-types associées : (a) gêne partielle due au bruit, (b) gêne partielle due aux vibrations et (c) gêne totale, en fonction des combinaisons de niveaux de bruit et de vibrations.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

3.2.1 Influence de la méthode sur les réponses de gêne

Afin d'étudier l'influence de la méthode de recueil des réponses de gêne sur les réponses des participants, 3 RM-ANOVAs à 1 facteur ont été réalisées sur A_N, A_V et A_T, en considérant le facteur **Session**.

Les résultats indiquent que l'effet de la **Session** n'était pas significatif : pour A_N [$F(1, 31) = 1.12$, $p > 0.29$], pour A_V [$F(1, 31) = 3.55$, $p > 0.06$] et pour A_T [$F(1, 31) = 0.01$, $p > 0.91$].

3.2.2 Influence de la méthode sur la difficulté de la tâche

Les notes de difficulté émises à la fin de chaque session ont également été analysées à l'aide d'une RM-ANOVA à 1 facteur, en considérant toujours le facteur **Session**.

L'effet de la **Session** sur la difficulté de la tâche était significatif [$F(3, 93) = 5.74$, $p < 0.01$]. Le pourcentage de variance η^2 expliqué par le facteur **Session** était de 2.4%, indiquant la faible taille de cet effet. Une analyse *post hoc* a confirmé que les notes de difficulté étaient supérieures en session D aux notes de difficulté de la session A ($p<0.001$) et à celles de la session C ($p<0.05$). Les notes de difficulté moyennes sont néanmoins restées inférieures à la note de 5 sur 10 pour les 4 sessions (cf figure 3.4).

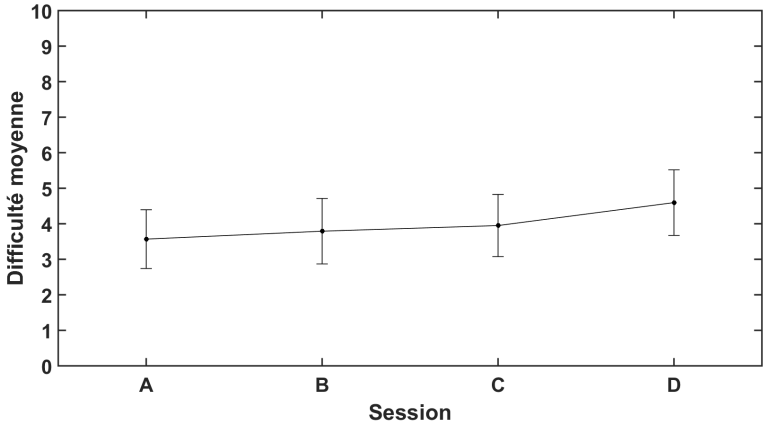


FIGURE 3.4 – Difficulté moyenne exprimée à l'issue de chaque session et erreurs-types associées.

3.2.3 Effets des niveaux de bruit et de vibrations sur les réponses de gêne pour les deux méthodes

Les effets des niveaux de bruit et de vibrations sur A_N, A_V et A_T ont été analysés afin de vérifier la similarité de tendances entre les sessions A, B et C d'une part, et la session D d'autre part. Six RM-ANOVAs à 2 facteurs ont été réalisées en considérant les facteurs **niveau de bruit** et **niveau de vibrations** (4 niveaux par facteur).

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

Réponses de gêne partielle due au bruit

L'effet du **niveau de bruit** sur A_N était significatif pour les réponses recueillies durant la session A [$F(3,93) = 157.49$, $p < 0.001$, $\eta^2 = 47.5\%$] comme pour les réponses recueillies durant la session D [$F(3,93) = 146.20$, $p < 0.001$, $\eta^2 = 44.8\%$].

L'effet du **niveau de vibrations** sur A_N n'était pas significatif, dans le cas de la session A [$F(3,93) = 2.70$, $p > 0.05$] comme de la session D [$F(3,93) = 1.13$, $p > 0.34$].

Réponses de gêne partielle due aux vibrations

L'effet du **niveau de vibrations** sur A_V était significatif pour les réponses recueillies durant la session B [$F(3,93) = 75.47$, $p < 0.001$, $\eta^2 = 24.2\%$] comme pour les réponses recueillies durant la session D [$F(3,93) = 77.83$, $p < 0.001$, $\eta^2 = 19.7\%$].

D'une part, l'effet du **niveau de bruit** sur A_V était significatif dans le cas de la session B [$F(3,93) = 3.75$, $p < 0.015$, $\eta^2 = 0.6\%$], mais la taille de cet effet était très faible. Les résultats d'une analyse *post hoc* ont indiqué que, lorsque le niveau de bruit était de 62dB(A), A_V était significativement différent de la gêne vibratoire lorsque le niveau de bruit était inférieur à 56dB(A). D'autre part, aucune influence du **niveau de bruit** sur A_V n'a été détectée dans le cas de la session D [$F(3,93) = 0.11$, $p > 0.95$].

Réponses de gêne totale

Dans le cas de la session C, les effets des **niveaux de bruit et de vibrations** sur A_T étaient significatifs, [$F(3,93) = 127.85$, $p < 0.001$, $\eta^2 = 35.9\%$] et [$F(3,93) = 28.94$,$p < 0.001$, $\eta^2 = 5.8\%$], respectivement.

Les effets des **niveaux de bruit et de vibrations** sur A_T étaient également significatifs dans le cas de la session D, [$F(3,93) = 92.86$, $p < 0.001$, $\eta^2 = 25.1\%$] et [$F(3,93) = 18.21$,$p < 0.001$, $\eta^2 = 2.9\%$], respectivement.

L'effet de l'interaction entre les deux facteurs sur A_T était également significatif, dans le cas des sessions C et D, [$F(9,279) = 3.13$, $p < 0.002$, $\eta^2 = 1.5\%$] et [$F(9,279) = 2.34$, $p < 0.016$, $\eta^2 = 1.0\%$], respectivement.

3.2.4 Réponses de gêne spécifique

Durant la session A (respectivement, B), les gênes spécifiques dues aux 4 niveaux de bruit (respectivement, de vibrations) ont été recueillies. Ces réponses de gêne correspondent à la gêne due au bruit (respectivement, aux vibrations) en l'absence de vibrations (respectivement, de bruit). Autrement dit, la gêne spécifique due au niveau de bruit N_1 correspond à la gêne exprimée pour la combinaison de bruit et de vibrations N_1V_0. De même, la gêne spécifique due au niveau de vibrations V_1 correspond à la gêne exprimée pour la combinaison de bruit et de vibrations N_0V_1.

2 RM-ANOVAs à 2 facteurs ont été réalisées, en considérant les facteurs **niveau de bruit** et **niveau de vibrations**, sur les réponses de gêne sonore d'une part (4 niveaux pour le facteur **niveau de bruit** et 5 niveaux pour le facteur **niveau de vibrations**)

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

et sur les réponses de gêne vibratoire d'autre part (5 niveaux pour le facteur **niveau de bruit** et 4 niveaux pour le facteur **niveau de vibrations**).

Réponses de gêne spécifique due au bruit

L'effet du **niveau de bruit** sur A_N était significatif [$F(3, 93) = 165.19$, $p < 0.001$, $\eta^2 = 47.8\%$].

L'effet du **niveau de vibrations** sur A_N était significatif également [$F(4, 124) = 5.08$, $p < 0.001$, $\eta^2 = 0.73\%$].

L'extension de la plage de variation du niveau vibratoire (avec l'ajout du niveau V_0) a pour conséquence l'apparition d'un effet significatif de la présence de vibrations sur les réponses de gêne partielle due au bruit. Néanmoins, le pourcentage de variance η^2 expliqué par le **niveau de vibrations** reste très faible (moins de 1%).

Réponses de gêne spécifique due aux vibrations

L'effet du **niveau de vibrations** sur A_V était significatif [$F(3, 93) = 86.77$, $p < 0.001$, $\eta^2 = 23.5\%$].

L'effet du **niveau de bruit** sur A_V était significatif également [$F(4, 124) = 7.07$, $p < 0.015$, $\eta^2 = 2.5\%$].

La prise en compte d'un cinquième niveau de bruit (avec l'ajout du niveau N_0) entraîne une augmentation du pourcentage de variance expliqué par le **niveau de bruit** (de 0.6% à 2.5%).

3.3 Discussion

Au vu des résultats des 3 RM-ANOVAs à 1 facteur réalisées à partir des réponses de gêne partielle due au bruit (recueillies en sessions A et D), de gêne partielle due aux vibrations (recueillies en sessions B et D) et de gêne totale (recueillies en sessions C et D) en considérant le facteur **Session**, il semble que la méthode de recueil des réponses de gêne ne possède pas d'influence sur les réponses données par les participants. Toutefois, le choix de la méthode semble avoir une influence sur la difficulté ressentie par les participants, la méthode de recueil simultané des réponses de gêne utilisée durant la session D étant légèrement plus difficile.

Les résultats des 6 RM-ANOVAs à 2 facteurs réalisées en considérant les facteurs **niveaux de bruit et de vibrations** suggèrent que la présence de vibrations n'a pas influencé les réponses de gêne partielle due au bruit. Ce résultat est en accord avec les conclusions d'autres études en laboratoire (p. ex. [Howarth and Griffin, 1990]). Cependant, d'autres études conduites en laboratoire et *in situ* (p. ex. [Gidlöf-Gunnarsson et al., 2012]) ont montré que cette influence pouvait exister. Dans une expérience menée en laboratoire, Paulsen et Kastka ont montré que la gêne due au bruit tend à augmenter avec le niveau vibratoire lorsque le niveau sonore reste faible ou modéré ([Paulsen and Kastka, 1995]). Toutefois, les niveaux sonores mis en jeu dans leur expérience étaient faibles comparés

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

à ceux utilisés dans d'autres études (p. ex. [Howarth and Griffin, 1990], ou la présente étude), ce qui pourrait expliquer les différences de résultats observées.

En effet, les résultats de l'analyse des réponses de gêne sonore spécifique dans le cas de la session A montrent qu'à partir d'une certaine étendue de sa plage de variation, le **niveau de vibrations** influence la gêne due au bruit. Cette influence est faible et n'apparaît qu'en prenant en compte les réponses de gêne concernant le bruit en l'absence de vibrations. Cette analyse est en tout point similaire à celles de la littérature : les réponses de gêne spécifique recueillies par Paulsen et Kastka et par Howarth et Griffin ont également été intégrées à l'analyse des gênes partielles comme un cinquième niveau du facteur. Les résultats obtenus ici soutiennent donc les conclusions de Paulsen et Kastka.

Le **niveau de bruit** semble avoir eu une influence sur les réponses de gêne partielle due aux vibrations recueillies en session B. Bien qu'en accord avec les conclusions d'autres études ([Howarth and Griffin, 1990], [Paulsen and Kastka, 1995], [Gidlöf-Gunnarsson et al., 2012]), cette influence n'a pas été retrouvée lors de l'analyse des réponses de gêne partielle due aux vibrations recueillies en session D.

L'influence significative du **niveau de bruit** sur la gêne due aux vibrations se trouve confortée si les résultats sont analysés en considérant dans une même analyse les réponses de gêne vibratoire spécifiques et les réponses de gêne partielle (c-à-d en se plaçant dans les conditions d'analyse de Paulsen et Kastka et de Howarth et Griffin). En effet, la taille de l'effet du facteur **niveau de bruit** devient plus importante après l'ajout d'un cinquième niveau ($\eta^2 = 2.5\%$) qu'avant ($\eta^2 = 0.6\%$).

Il est possible de supposer qu'un effet significatif du **niveau de bruit** sur la gêne vibratoire puisse apparaître également en session D en étendant la plage de variation du niveau sonore. Cette hypothèse n'a pas pu être testée, les réponses de gêne spécifique n'ayant pas été recueillies durant la session D.

Les **niveaux de bruit et de vibrations** ont tous deux influencé les réponses de gêne totale. D'après le pourcentage de variance η^2 expliqué par les deux facteurs, la gêne totale est principalement influencée par le **niveau de bruit**. Ce résultat est cohérent avec les conclusions de plusieurs études *in situ* et en laboratoire ([Gidlöf-Gunnarsson et al., 2012], [Howarth and Griffin, 1990], [Paulsen and Kastka, 1995]).

3.4 Conclusion

Le but de cette étude était de comparer deux méthodes de recueil de réponses de gêne en laboratoire : durant différentes sessions ou durant la même session. Quatre sessions comportant chacune 16 combinaisons de bruit et de vibrations ont été prévues à cet effet. Durant la première session (A) ; la tâche imposée aux participants était d'évaluer la gêne partielle due au bruit. Durant une seconde session (B), la tâche était d'évaluer la gêne partielle due aux vibrations. Durant une troisième session (C), la tâche était d'évaluer la gêne totale. Finalement, la tâche durant la quatrième session (D) était d'évaluer les trois types de gêne après chaque combinaison.

Les résultats indiquent qu'aucune différence n'existe entre les gênes partielles et totale

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

recueillies dans différentes sessions ou dans une seule et même session. La session D a été jugée légèrement plus difficile par les participants.

Pour finir, la session D est avantageuse car un nombre réduit de stimuli peut mener à autant de réponses que l'ensemble des sessions A, B et C cumulées. Par conséquent, cette méthode pourra être adoptée dans de futures expériences impliquant un grand nombre de stimuli.

Principaux résultats obtenus

- Les participants n'effectuent pas de compromis entre leurs réponses lorsque les trois réponses de gêne (gênes partielles dues au bruit et aux vibrations et gêne totale) sont recueillies au même moment lors de l'expérience.
- Le bruit et les vibrations contribuent tous deux à la gêne totale exprimée par les participants.
- Dans le cadre des niveaux sonores et vibratoires mis en jeu durant l'expérience, le bruit est prédominant dans l'expression de la gêne totale.

Cette première expérience a permis de valider un protocole de recueil des réponses de gêne dues aux bruit et vibrations ferroviaire en laboratoire. La méthode employée semble particulièrement appropriée car elle permet de réduire le nombre de stimuli à présenter aux participants sans affecter le nombre de réponses recueillies. Cette expérience a également permis d'observer les réponses de gêne pour des combinaisons de plusieurs niveaux de bruit et de vibrations ($L_{A_{eq}} \in [44 : 62]$ dB(A), $a_{rms} \in [0.03 : 0.094]$ $m.s^{-2}$). Notamment, il a été possible de retrouver certains des résultats obtenus en laboratoire par de précédentes études. L'objet du prochain chapitre sera de traiter plusieurs hypothèses quant au manque de consensus actuel parmi les résultats de la littérature concernant l'évolution, en fonction des niveaux sonores et vibratoires, des gênes partielles et de la gêne totale en situation de co-exposition au bruit et aux vibrations ferroviaires.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

Chapitre 4

Étude de l'influence du niveau global sur la gêne due aux bruit et vibrations du trafic ferroviaire

Questions scientifiques

Ce chapitre vise à répondre aux problématiques suivantes :

- Quelle est l'influence du niveau de bruit sur la gêne due au bruit (A_N), la gêne due aux vibrations (A_V) et la gêne totale (A_T) ?
- Quelle est l'influence du niveau de vibrations sur A_N, A_V et A_T ?
- D'où proviennent les différences entre les résultats obtenus par [Howarth and Griffin, 1990] et [Paulsen and Kastka, 1995] ?
- Quel modèle de gêne totale adopter ?

Une expérience est réalisée en laboratoire. Durant cette expérience, des enregistrements de bruit et de vibrations provenant de deux passages de train (1 train de Fret et 1 TER) sont présentés à des participants à différents niveaux sonores et vibratoires. Toutes les combinaisons possibles des 5 niveaux de bruit et des 5 niveaux de vibrations sont évaluées en termes de gêne partielle due au bruit, de gêne partielle due aux vibrations et de gêne totale, durant deux sessions dédiées à chacun des trains. La méthode de recueil des réponses de gêne validée au chapitre précédent est utilisée. L'influence du niveau de bruit sur la gêne due aux vibrations, et inversement, du niveau de vibrations sur la gêne due au bruit, est évaluée à partir des résultats obtenus dans chaque session à travers deux analyses distinctes. Les réponses de gêne sont ensuite agrégées pour évaluer plus largement l'influence des niveaux de bruit et de vibrations globaux sur les réponses de gêne sonore, vibratoire et totale.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

4.1 Introduction

La gêne due au bruit ferroviaire a été largement étudiée, mais il reste difficile de la prédire au vu de la variabilité des résultats de la littérature. Plusieurs études ont permis d'établir des relations dose-effet entre le niveau de bruit ferroviaire et le pourcentage de personnes gênées ($\%LA$, $\%A$ ou $\%HA$). En dépit de leur faible qualité prédictive, les courbes de Miedema et Oudshoorn ([Miedema and Oudshoorn, 2001]) sont recommandées par la Commission Européenne ([EC, 2002]) pour l'estimation de la gêne due aux bruits aérien, routier et ferroviaire. Dans différentes enquêtes socio-acoustiques, le bruit ferroviaire apparaît comme le bruit des transports le moins gênant et bénéficie à ce titre d'un bonus dans plusieurs réglementations à l'étranger (p. ex. en Allemagne). Néanmoins, ce constat est remis en question par des études plus récentes qui ont montré que l'absence de prise en compte des vibrations limite la pertinence des relations dose-effet pour le bruit ferroviaire. Notamment, lors d'enquêtes *in situ*, le niveau des vibrations dues au trafic ferroviaire semble avoir une influence sur la gêne sonore exprimée (p. ex. [Woodcock et al., 2011], [Gidlöf-Gunnarsson et al., 2012]).

Afin d'étudier l'influence des niveaux sonores et vibratoires sur la gêne due aux bruit et vibrations ferroviaires combinés, deux expériences en laboratoire ont été menées par Howarth et Griffin et par Paulsen et Kastka (resp. [Howarth and Griffin, 1990] et [Paulsen and Kastka, 1995]). Les deux expériences ont employé un protocole similaire dans lequel un passage de train était présenté aux participants (24 participants pour Howarth et Griffin et 16 participants pour Paulsen et Kastka) avec différentes combinaisons de niveaux sonores et vibratoires. Les participants devaient évaluer pour chaque combinaison la gêne partielle due au bruit, la gêne partielle due aux vibrations et la gêne totale. Howarth et Griffin ont utilisé un passage de train de Fret d'une durée de 24s et Paulsen et Kastka ont utilisé un passage de tramway de 16s. Les deux études différaient concernant la méthode employée pour recueillir les réponses de gêne. Howarth et Griffin ont utilisé la méthode d'estimation de grandeur en donnant aux participants une combinaison de bruit et de vibrations de référence par rapport à laquelle les autres sont évaluées. Paulsen et Kastka ont fourni aux participants une échelle de gêne continue allant de 0 (« imperceptible / pas gênant du tout ») à 9 (« extrêmement fort / insupportable ») que les participants devaient utiliser pour évaluer la gêne ressentie.

Les comparaisons sont délicates entre les résultats des deux études, en raison des différences d'unités utilisées par les auteurs pour exprimer les niveaux sonores (niveau d'exposition sonore SEL_A pour Howarth et Griffin et niveau de pression sonore $L_{A_{eq}}$ pour Paulsen et Kastka) et les niveaux vibratoires (accélération rms moyenne non pondérée a_{rms} et vitesse rms moyenne non pondérée v_{rms}, respectivement). Il semble néanmoins que, pour le bruit comme pour les vibrations, les niveaux choisis par Howarth et Griffin aient été plus élevés que ceux choisis par Paulsen et Kastka :

- Le niveau d'exposition sonore le plus faible dans Howarth et Griffin était de 54dB(A), soit le deuxième niveau de pression sonore le plus élevé dans Paulsen et Kastka en tenant compte de la durée du passage de train de Fret (24s).
- Le niveau vibratoire le moins élevé de Paulsen et Kastka est « tout juste perceptible » alors que le premier niveau de vibrations de Howarth et Griffin ($0.02\ m.s^{-2}$) est nettement au-dessus du seuil de perception ($\approx 0.015\ m.s^{-2}$).

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

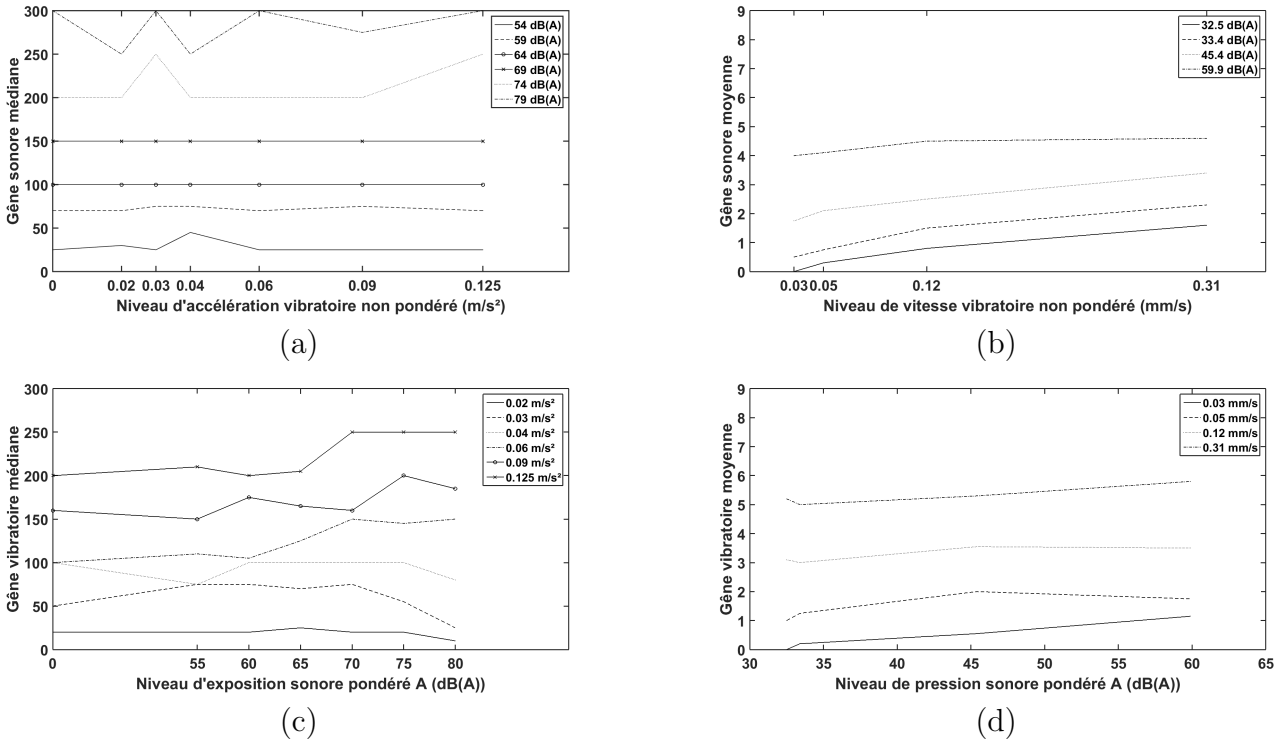


FIGURE 4.1 – Influence du niveau vibratoire sur la gêne sonore d'après les données de Howarth et Griffin (a) et Paulsen et Kastka (c). Influence du niveau sonore sur la gêne vibratoire d'après les données de Howarth et Griffin (b) et Paulsen et Kastka (d).

Les conclusions des deux études divergent quant à l'influence du niveau de vibrations sur la gêne sonore :

— Howarth et Griffin rapportent qu'aucun effet significatif du niveau vibratoire sur la gêne sonore n'a été décelé.
— Paulsen et Kastka montrent que les niveaux de bruit faibles (en-dessous de 33.4 dB(A)) sont plus gênants en présence de vibrations fortes.

Les réponses de gêne sonore en fonction du niveau de vibrations, sont présentées pour les deux études en figures 4.1.a) et 4.1.b).

Les deux études divergent également largement quant à l'influence du niveau de bruit sur la gêne vibratoire :

— Howarth et Griffin montrent que le niveau de bruit tend à faire augmenter la gêne vibratoire lorsque le niveau de vibrations est élevé (effet synergique) et à la faire diminuer lorsque le niveau de vibrations est faible (effet antagoniste).
— Paulsen et Kastka rapportent que les vibrations faibles (0.03 $mm.s^{-1}$ et 0.05 $mm.s^{-1}$) ont été plus souvent perçues lorsque celles-ci étaient combinées à de forts niveaux de bruit (45.4 dB(A) et 59.9 dB(A)).

Les réponses de gêne vibratoire en fonction du niveau de bruit, pour les deux études, sont présentées en figures 4.1.c) et 4.1.d).

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

L'objectif des travaux présentés dans ce chapitre était tout d'abord de contribuer à la compréhension de l'influence du niveau global sur la gêne due aux bruit et vibrations du trafic ferroviaire. En effet, il apparaît que davantage d'études en laboratoire sont nécessaires pour comprendre les mécanismes perceptifs mis en jeu ([Trollé et al., 2015]). Le but de cette étude était de contribuer à la compréhension et l'interprétation des différences constatées entre les résultats obtenus par Howarth et Griffin et par Paulsen et Kastka.

Pour cela, deux hypothèses initiales ont été émises :

Hypothèse H_1 ***:*** Les résultats dépendent des plages de variation des niveaux sonores et vibratoires choisis. En effet, les plages choisies par Howarth et Griffin et Paulsen et Kastka se recouvrent peu ou pas du tout.

Hypothèse H_2 ***:*** Les différents types de train utilisés comme stimuli (train de Fret pour Howarth et Griffin et tramway pour Paulsen et Kastka) ont eu une influence sur les résultats obtenus. En particulier, le contenu spectral du signal vibratoire associé au train de Fret était peu étendu (compris entre 30Hz et 45Hz). Le contenu spectral du signal vibratoire associé au tramway était plus large bande (entre 16Hz et 60Hz).

Une expérience est proposée pour tester ces 2 hypothèses. Deux enregistrements de train (un train de Fret et un TER) dont les vibrations générées montraient des différences de contenu spectral ont été présentés à un panel de participants. Les bruit et vibrations associés à chaque passage ont été présentés en combinaison, à 5 niveaux sonores et 5 niveaux vibratoires différents (25 combinaisons possibles pour chaque type de train), de sorte à couvrir au maximum les plages de variations des niveaux mis en jeu dans les études de Howarth et Griffin et par Paulsen et Kastka (resp. [Howarth and Griffin, 1990] et [Paulsen and Kastka, 1995]).

4.2 Méthode expérimentale

4.2.1 Participants

Quarante adultes (23 hommes, 17 femmes ; âge moyen = 33.3 ans, écart-type = 14.3 ans) ont participé à cette expérience. Leur audition était évaluée avant l'expérience par un audiogramme. Aucun participant ne connaissait le but de l'expérience ni le contenu des stimuli. Leur consentement écrit était requis avant le début de l'expérience et une indemnisation leur était versée à l'issue de celle-ci. Enfin, ils étaient libres de poser les questions qu'ils désiraient poser tant que celles-ci ne concernaient pas le but de l'expérience ou le contenu des stimuli.

4.2.2 Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental utilisé dans cette expérience était le même que celui présenté en section 3.1.3. Il est représenté schématiquement en figure 4.2. Les vibrations étaient générées dans la direction verticale par un pot vibrant électrodynamique LDS-V650 (B&K, Nærum, Danemark, www.bksv.com). Le bruit a été reproduit à l'aide de deux haut-parleurs Tapco S5.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés



(a) (b)

FIGURE 4.2 – Schéma du banc vibratoire utilisé pour reproduire les stimuli vibratoires, vu de profil (a) et du dessus (b).

L'expérience était réalisée en chambre semi-anéchoïque. Le bruit de fond dans la chambre n'excédait pas 30dB(A) et était essentiellement dû au système de refroidissement de l'alimentation du banc vibratoire.

La réponse en fréquence du banc vibratoire utilisé pour reproduire les vibrations durant l'expérience était compensée en filtrant les signaux avant qu'ils ne soient reproduits. La procédure de filtrage est détaillée en annexe A.

4.2.3 Stimuli

Les stimuli sonores et vibratoires utilisés dans cette expérience sont issus de signaux enregistrés lors d'une seconde mesure terrain, réalisée en Septembre 2017 à Caluire-et-Cuire (France). Les enregistrements se sont déroulés dans le même logement que lors de la première session de mesures (cf. chapitre 3, section 3.1.2).

2e session de mesure terrain

Le matériel utilisé pour l'enregistrement des signaux vibratoires (identique à celui utilisé lors de la première session de mesures et décrit en chapitre 3, section 3.1.2) a été fourni par la société Acouphen. Le même équipement que celui utilisé lors de la première mesure a permis l'enregistrement des signaux acoustiques. La durée totale de la 2e session de mesure était de 1h45min. À l'issue de cette mesure, 16 trains (dont 8 passages de Fret et 8 TER) ont été enregistrés. Deux passages de trains (un Fret et un TER) ayant eu lieu au même moment (croisement) n'ont pas été conservés.

Plus de détails pourront être trouvés dans le prochain chapitre de cette thèse concernant les caractéristiques des 20 enregistrements de passages de train réalisés durant cette thèse (6 passages provenant de la première session de mesure + 14 passages exploitables à l'issue de la seconde). Pour l'expérience présentée dans ce chapitre, seuls deux enregistrements ont été utilisés. Avant de sélectionner ces deux passages, plusieurs modifications ont été apportées aux signaux acoustiques et vibratoires.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

Limitation de la durée des signaux acoustiques et vibratoires

L'objectif de l'expérience était d'étudier l'influence du niveau global sur la gêne due aux bruit et vibrations ferroviaires, à partir de deux passages possédant des contenus fréquentiels différents.

L'influence de la durée d'un stimulus sonore (resp. vibratoire) sur la gêne due au bruit (resp. aux vibrations) n'est pas claire. Griffin et Whitham ont montré que la durée influence la gêne vibratoire due à des signaux sinusoïdaux, jusqu'à une durée de 32s ([Griffin and Whitham, 1980]). Récemment, Woodcock et ses collègues ont élaboré un modèle de gêne vibratoire à partir d'enregistrements de vibrations ferroviaires, dans lequel intervient la durée du stimulus vibratoire ([Woodcock et al., 2014]). Sharp et ses collaborateurs ont également fait intervenir la durée du signal vibratoire dans un modèle de gêne totale due aux bruit et vibrations ferroviaires ([Sharp et al., 2014b]).

En revanche, plusieurs études ont montré que la gêne due au bruit routier n'était pas influencée par la durée (p. ex. [Paulsen, 1997] et [Morel et al., 2012b]), pour des stimuli allant de quelques secondes à 80s). Trollé et ses collègues ont également indiqué que la durée n'influençait pas la gêne sonore due à des enregistrements de tramway allant de 8s jusqu'à 25.5s ([Trollé et al., 2014]).

La première étape a donc été de raccourcir les signaux acoustiques et vibratoires de manière à ce que tous les signaux possèdent la même durée. Le processus de raccourcissement des signaux a été réalisé à l'aide du logiciel libre Audacity®.

Afin de limiter la fatigue des participants, tous les signaux ont vu leur durée raccourcie à 10s. Parmi les 20 passages de train, 1 passage de TER dont la durée était de 7s n'a pas été considéré dans la suite de cette expérience.

Dans un premier temps, les signaux acoustiques ont été modifiés. Deux marqueurs étaient placés à deux instants du passage considéré, la plupart du temps entre deux passages de wagons. Le signal compris entre les deux marqueurs était ensuite supprimé avant de reconstruire le signal sans la portion concernée. Afin de s'assurer que la modification n'impactait pas le réalisme d'un passage de train, une vérification « à l'oreille » était effectuée.

Une fois cette étape réalisée sur le signal acoustique, le signal vibratoire correspondant au même passage de train était également raccourci, suivant les mêmes marqueurs temporels.

Limitation des émergences énergétiques

Parmi les signaux ainsi obtenus, certains présentaient de fortes émergences au cours du temps. Ces émergences peuvent avoir une influence sur la gêne, à niveau équivalent constant. En effet, les indicateurs tels que le maximum de niveau sonore (L_{max}) ou le niveau sonore excédé durant x% du temps (L_x) peuvent présenter de bonnes corrélations avec la gêne due au bruit (p. ex. [Kim et al., 2010], [Sharp et al., 2014b]). De même, le maximum de niveau vibratoire a été utilisé comme indicateur dans certaines études (p. ex. [Morihara and Matsumoto, 2016]).

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

Dans le cadre de cette expérience, les indicateurs utilisés pour quantifier les aspects énergétiques des signaux acoustiques et vibratoires sont respectivement le niveau sonore équivalent ($L_{A_{eq}}$) et le niveau d'accélération rms moyenne ($L_{V_{eq}}$). La seconde étape a donc été de limiter les émergences présentes dans les signaux acoustiques et vibratoires de sorte que leurs paramètres énergétiques puissent être représentés uniquement par ces indicateurs.

Limitation des émergences parmi les signaux vibratoires :

Pour deux signaux vibratoires présentant une forte dispersion de leur niveau au cours du temps, un gain $G_v(t)$ dépendant uniquement du maximum de niveau vibratoire a été appliqué.

Ce gain prend une valeur de 0dB au début du signal puis croît linéairement jusqu'à une valeur de 10dB lorsque le niveau vibratoire atteint son maximum et décroît ensuite linéairement jusqu'à une valeur de 0dB. Il peut s'exprimer sous la forme :

$$G_v(t) = \begin{cases} at, \text{ si } t < t_0, \\ 10 - bt, \text{ si } t > t_0, \end{cases} \tag{4.1}$$

où t_0 est l'instant où le maximum du niveau vibratoire est atteint et où les coefficients directeurs sont $a = \frac{10}{t_0}$ (dB/s) et $b = \frac{10}{(T-t_0)}$ (dB/s), T étant la durée totale du signal vibratoire.

Le gain est finalement appliqué directement au signal temporel $v_1(t)$ tel que :

$$v_2(t) = \frac{v_1(t)}{g_v(t)} \tag{4.2}$$

où $g_v(t) = 10^{\frac{G_v(t)}{20}}$.

Limitation des émergences parmi les signaux acoustiques :

Les signaux acoustiques présentaient dans l'ensemble davantage d'émergences que les signaux vibratoires. Un gain $G_s(t)$ dépendant à chaque instant de l'écart entre le niveau sonore équivalent à court-terme $L_{eq}(t)$ (constante de temps *fast*, 0.125s) et l'indice L_{50} a donc été appliqué à l'ensemble des signaux sonores.

Ce gain peut être exprimé sous la forme suivante :

$$G_s(t) = k(L_{eq}(t) - L_{50}) \tag{4.3}$$

k étant un facteur multiplicateur initialisé à une valeur de 0.1.

Le gain est appliqué directement au signal temporel original $s_1(t)$, tel que :

$$s_2(t) = \frac{s_1(t)}{g_s(t)} \tag{4.4}$$

où $g_s(t) = 10^{\frac{G_s(t)}{20}}$.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

Les nouvelles valeurs des indices L_{10} et L_{50} étaient ensuite calculées. Si la différence $L_{10} - L_{50}$ restait supérieure au seuil de 2dB(A) choisi, l'opération précédente était réitérée, en incrémentant le facteur k à la décimale supérieure.

Égalisation des niveaux sonores et vibratoires :

Une dernière étape était réalisée lors du traitement des signaux, afin d'égaliser les niveaux des signaux acoustiques (resp. vibratoires) entre eux.

Sélection des stimuli

L'hypothèse H_2 était que le contenu fréquentiel des signaux vibratoires possède une influence sur les résultats obtenus par Howarth et Griffin et par Paulsen et Kastka (resp. [Howarth and Griffin, 1990] et [Paulsen and Kastka, 1995]).

Afin de pouvoir tester cette hypothèse, deux signaux vibratoires ont été sélectionnés parmi les 19 passages après traitement.

Le critère utilisé lors de cette sélection a été le contenu basse fréquence des signaux, c-à-d sur la plage [12.5 - 25 Hz]. En effet, les résultats de la littérature indiquent que la sensibilité aux vibrations est plus importante pour des fréquences inférieures à 20Hz (p. ex. [Mansfield, 2004]). À des fréquences inférieures à 12.5Hz, les contenus fréquentiels des vibrations enregistrées étaient trop faibles pour être considérées.

Les deux passages de train pour lesquels les différences de contenu fréquentiel étaient maximisées étaient un passage de Fret et un passage de TER (cf. figure 4.3). Les fréquences de modulation f_{mod} des 2 signaux vibratoires étaient proches ($f_{mod_{Fret}} = 0.49$Hz, $f_{mod_{TER}} = 0.59$Hz), permettant d'éviter toute influence de ce paramètre sur les résultats.

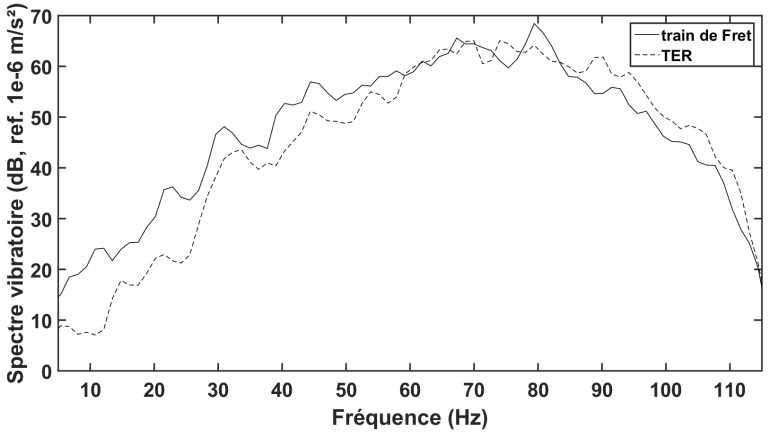


FIGURE 4.3 – Spectres des signaux vibratoires utilisés comme stimuli durant l'expérience.

Ce choix de stimuli était pertinent de par la nature des trains. En effet, Sharp et ses collègues ont montré que des différences importantes existaient entre la gêne due aux vibrations générées par des trains de Fret et celle due aux vibrations générées par des TER ([Sharp et al., 2014a]). Ce résultat était expliqué d'une part par les différences de durées moyennes entre les deux types de train et également par le contenu basse fréquence plus important dans le cas des trains de Fret.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

Choix des niveaux de bruit et de vibrations

L'hypothèse H_1 était que l'étendue de la plage de variation des niveaux de bruit et de vibrations possède une influence sur les résultats obtenus par Howarth et Griffin et par Paulsen et Kastka.

Pour tester cette hypothèse, les stimuli sonores et vibratoires ont été présentés à 5 niveaux différents :

— Les niveaux sonores équivalents pondérés A, $L_{A_{eq}}$, des stimuli sonores, N_1, N_2, N_3, N_4 et N_5 étaient de 42, 50, 58, 66 et 74dB(A).
— Les niveaux vibratoires non pondérés, $L_{V_{eq}}$, des stimuli vibratoires, V_1, V_2, V_3, V_4 et V_5 étaient de 72 (pas de vibrations générées), 92, 100, 108 et 116dB.

Ces niveaux ont été appliqués aux deux passages de train sélectionnés.

Les deux niveaux sonores les plus faibles de l'étude de Paulsen et Kastka (32.5 et 33.4dB(A)) n'ont pas pu être atteints, car ils n'auraient alors pas suffisamment émergé du bruit de fond émis par le dispositif de reproduction vibratoire.

Il est important de préciser qu'un niveau sonore équivalent de 74dB(A) peut correspondre dans la réalité au niveau sonore produit par un passage train à l'intérieur d'une habitation fenêtre ouverte ou à l'extérieur (p. ex. terrasse, balcon).

La plage de variation des niveaux vibratoires contenait l'ensemble des niveaux testés par Howarth et Griffin et Paulsen et Kastka. Ces deux études incluaient également une condition où les différents niveaux de bruit étaient présentés en l'absence de vibrations. Le niveau V_1, correspondant au niveau vibratoire résiduel du banc expérimental en l'absence de vibrations, a donc été fixé à 72dB de sorte à pouvoir tester cette condition.

Par conséquent, 25 combinaisons N_iV_j de bruit et de vibrations ont pu être formées ($i = 1:5$, $j = 1:5$).

4.2.4 Procédure

La tâche demandée aux participants était d'évaluer, pour différentes combinaisons de bruit et de vibrations, la gêne partielle due au bruit, la gêne partielle due aux vibrations et la gêne totale (3 réponses par combinaison). L'expérience comportait 3 sessions A, B et C, contenant chacune :

— Session A : les 25 combinaisons N_iV_j formées à partir des signaux de bruit et de vibrations correspondant au train de Fret.
— Session B : les 25 combinaisons N_iV_j formées à partir des signaux de bruit et de vibrations correspondant au TER.
— Session C : les combinaisons N_3V_3 et N_4V_4 formées à partir des signaux de bruit et de vibrations correspondant au train de Fret et au TER (4 combinaisons au total).

Les participants réalisaient dans un premier temps les sessions A et B (ordre aléatoire). L'ordre des stimuli à l'intérieur de chaque session était aléatoire.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

Une étape de familiarisation était réalisée au début de chacune des deux sessions. Quatre combinaisons du bruit et des vibrations du Fret (resp. du TER) étaient présentées aux participants en session A (resp. en session B) : une combinaison forte (N_5V_5), une combinaison faible (N_1V_1) ainsi que deux combinaisons intermédiaires (N_1V_5 et N_5V_1).

La session C était réalisée à la suite des sessions A et B. Cette session avait pour but d'évaluer la répétabilité des réponses de gêne apportées lors des deux premières sessions afin de pouvoir, le cas échéant, réaliser des comparaisons *a posteriori* de celles-ci.

4.3 Résultats et Discussion

L'influence des niveaux sonores et vibratoires sur les gênes mesurées durant l'expérience a été examinée. Après avoir vérifié que les données pouvaient être agrégées, des analyses de la variance à mesures répétées (RM-ANOVAs) ont été réalisées sur l'ensemble des réponses de gêne. L'influence du niveau global sur la gêne partielle due au bruit (A_N), la gêne partielle due aux vibrations (A_V) et la gêne totale (A_T) a ainsi été déterminée, permettant de vérifier la validité de l'hypothèse initiale H_1.

Dans un second temps, les analyses ont été menées séparément sur les réponses de gêne recueillies en session A (train de Fret) puis sur les réponses de gêne recueillies en session B (TER) avant d'évaluer l'influence du type de train sur l'ensemble des réponses, permettant ainsi de vérifier la validité de l'hypothèse initiale H_2. Les qualités prédictives des modèles de gêne totale de la littérature ont également été évaluées.

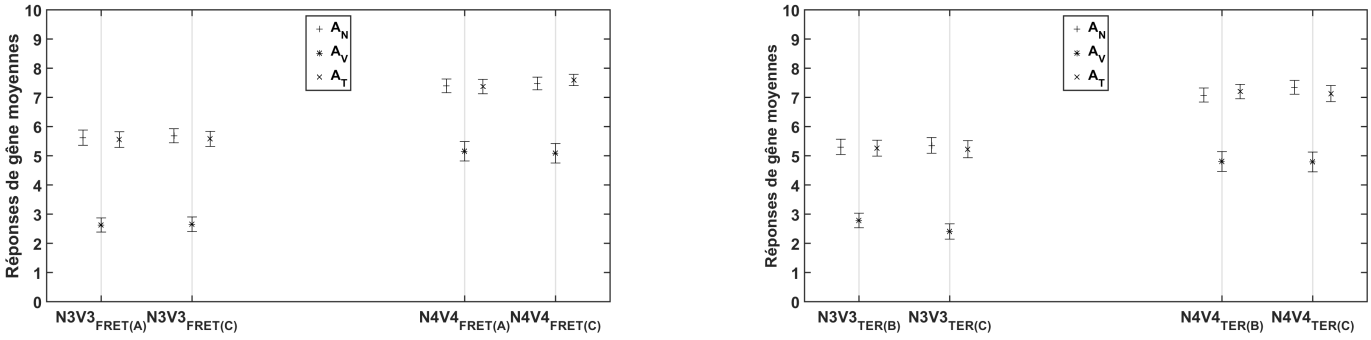
4.3.1 Influence des niveaux de bruit et de vibrations sur les gênes mesurées

Afin d'évaluer la répétabilité des réponses données par les participants durant les sessions A et B et ainsi de pouvoir comparer les résultats d'une session à l'autre, une troisième session (session C) a été réalisée. Celle-ci était constituée de quatre combinaisons : les combinaisons N_3V_3 et N_4V_4 pour le passage de Fret (session A) et pour le passage de TER (session B).

Six RM-ANOVAs à 1 facteur ont été menées sur A_N, A_V et A_T dues aux combinaisons N_3V_3 et N_4V_4 pour les passages de Fret et de TER recueillies respectivement durant les sessions A et C et durant les sessions B et C (cf. figure 4.4). Le facteur considéré ici était le facteur **Session**.

Les 6 RM-ANOVAs indiquent que l'effet du facteur **Session** n'était pas significatif (les résultats sont présentés en annexe B). Les réponses de gênes partielles ainsi que la gêne totale dues au bruit et aux vibrations du train de Fret et du TER ont donc pu être agrégées durant la suite des analyses.

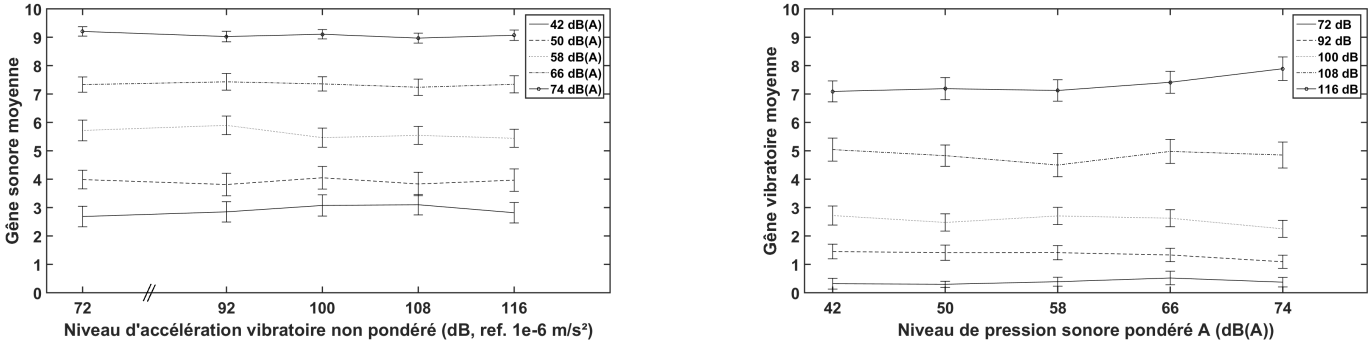
Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés



(a) (b)

FIGURE 4.4 – Moyennes et erreurs-types des réponses de gênes dues aux combinaisons N_3V_3 et N_4V_4, recueillies : (a) en sessions A et C (Fret) et (b) en sessions B et C (TER).

Les réponses moyennes de gêne sonore (sessions A et B agrégées) en fonction du niveau de vibrations, et de gêne vibratoire (sessions A et B agrégées) en fonction du niveau de bruit, sont présentées en figure 4.5.



(a) (b)

FIGURE 4.5 – Moyennes et erreurs-types des réponses de gênes partielles dues (a) au bruit en fonction du niveau vibratoire, et (b) aux vibrations en fonction du niveau de bruit.

Réponses de gêne partielle due au bruit

L'influence des niveaux de bruit et de vibrations sur A_N a été évaluée par une RM-ANOVA à 2 facteurs : les **niveaux de bruit** (5 niveaux) et **de vibrations** (5 niveaux).

L'effet du **niveau de bruit** sur A_N était significatif avec un effet important [$F(4, 156) = 484.636$, $p < 0.001$, $\eta^2 = 66.1\%$].

L'effet du **niveau de vibrations** sur A_N n'était pas significatif [$F(4, 156) = 0.522$, $p > 0.71$].

Aucun effet de l'interaction sur A_N n'a été détecté.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

Réponses de gêne partielle due aux vibrations

L'influence des niveaux de bruit et de vibrations sur A_V a été évaluée par une RM-ANOVA à 2 facteurs : les **niveaux de bruit** (5 niveaux) et **de vibrations** (5 niveaux).

L'effet du **niveau de bruit** sur A_V n'était pas significatif [$F(4, 156) = 0.791$, $p > 0.53$].

L'effet du **niveau de vibrations** sur A_V était significatif avec un effet important [$F(4, 156) = 455.249$, $p < 0.001$, $\eta^2 = 70.0\%$].

L'effet de l'interaction entre les deux facteurs sur A_V était significatif, bien que relativement faible [$F(16, 624) = 3.134$, $p < 0.001$, $\eta^2 = 0.36\%$].

Réponses de gêne totale

L'influence des niveaux de bruit et de vibrations sur A_T a été évaluée par une RM-ANOVA à 2 facteurs : les **niveaux de bruit** (5 niveaux) et **de vibrations** (5 niveaux).

L'effet du **niveau de bruit** sur A_T était significatif avec un effet important [$F(4, 156) = 297.128$, $p < 0.001$, $\eta^2 = 40.1\%$].

L'effet du **niveau de vibrations** sur A_T était significatif avec un effet relativement important [$F(4, 156) = 98.898$, $p < 0.001$, $\eta^2 = 11.1\%$].

L'effet de l'interaction entre les deux facteurs sur A_T était significatif [$F(4, 156) = 22.339$, $p < 0.001$, $\eta^2 = 3.4\%$].

4.3.2 Influence du type de train sur les gênes mesurées

Réponses de gênes partielles sonore et vibratoire dues au train de Fret

Pour étudier l'influence du niveau sonore (resp. vibratoire) sur la gêne partielle due aux vibrations (resp. au bruit) du train de Fret, 2 RM-ANOVAs à 2 facteurs ont été réalisées sur A_V et A_N en considérant les facteurs **niveaux de bruit et de vibrations**.

Les résultats indiquent que l'effet du **niveau de bruit** sur A_V n'était pas significatif [$F(4, 156) = 1.576$, $p > 0.18$]. En revanche, un effet significatif de l'interaction entre les deux facteurs sur A_V a été détecté [$F(16, 624) = 1.901$, $p < 0.02$, $\eta^2 = 0.44\%$]. La taille de cet effet était cependant faible (moins de 1% de variance expliquée par l'interaction).

Les résultats indiquent également que le **niveau de vibrations** n'a pas eu d'effet significatif sur A_N [$F(4, 156) = 0.466$, $p > 0.76$]. Aucun effet de l'interaction entre les deux facteurs sur A_N n'a été détecté.

Réponses de gênes partielles sonore et vibratoire dues au TER

Pour étudier l'influence du niveau sonore (resp. vibratoire) sur la gêne partielle due aux vibrations (resp. au bruit) du TER, 2 RM-ANOVAs à 2 facteurs ont été réalisées sur A_V et A_N en considérant les facteurs **niveaux de bruit et de vibrations**.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

Les résultats indiquent que l'effet du **niveau de bruit** sur A_V n'était pas significatif [$F(4, 156) = 0.317$, $p > 0.86$]. En revanche, un effet significatif de l'interaction entre les deux facteurs sur A_V a été détecté [$F(16, 624) = 1.786$, $p < 0.03$, $\eta^2 = 0.40\%$]. La taille de cet effet était cependant faible (moins de 1% de variance expliquée par l'interaction).

Les résultats indiquent également que le **niveau de vibrations** n'a pas eu d'effet significatif sur A_N [$F(4, 156) = 0.822$, $p > 0.51$]. Aucun effet de l'interaction entre les deux facteurs sur A_N n'a été détecté.

Réponses de gênes partielles et de gêne totale dues au Fret et au TER

Enfin, pour étudier l'influence du type de train sur les gênes partielles et sur la gêne totale, 3 RM-ANOVAs à 1 facteur ont été réalisées sur A_N, A_V et A_T en considérant le facteur **Train** (2 niveaux pour ce facteur).

L'effet du **Train** sur les réponses de A_N, A_V et A_T n'était pas significatif : [$F(1, 39) = 3.913$, $p > 0.055$], [$F(1, 39) = 1.011$, $p > 0.32$] et [$F(1, 39) = 3.847$, $p > 0.056$], respectivement.

4.3.3 Vérification de l'hypothèse H_1

Les études menées par Howarth et Griffin et par Paulsen et Kastka (resp. [Howarth and Griffin, 1990] et [Paulsen and Kastka, 1995]) ont toutes deux examiné l'influence du niveau global sur la gêne due au bruit et aux vibrations du trafic ferroviaire. En revanche, les niveaux sonores et vibratoires utilisés dans ces deux études étaient sensiblement différents, les niveaux mis en jeu dans l'expérience de Paulsen et Kastka étant plus faibles que ceux mis en jeu dans Howarth et Griffin.

L'hypothèse H_1 était que ces choix expérimentaux ont influencé les résultats, expliquant les différences constatées entre les deux études.

Durant l'expérience présentée dans ce chapitre, les plages de variation des niveaux sonores et vibratoires englobaient approximativement les plages couvertes par les deux études. Si l'hypothèse H_1 était vérifiée, alors les résultats de Howarth et Griffin et ceux de Paulsen et Kastka auraient dû être retrouvés, à des niveaux élevés pour la première étude et à des niveaux faibles et modérés pour la seconde.

Les résultats de la RM-ANOVA à 2 facteurs menée sur les réponses de gêne sonore (sessions A et B agrégées) ne rapportent aucun effet du **niveau de vibrations** sur la gêne due au bruit.

Ces résultats sont cohérents avec ceux obtenus par Howarth et Griffin. Plusieurs enquêtes *in situ* ont pourtant rapporté un effet du niveau de vibrations sur la gêne due au bruit ferroviaire. En laboratoire, Morihara et Matsumoto ont également observé un effet du niveau de vibrations sur la gêne sonore ressentie durant une activité de réflexion ou de lecture ([Morihara and Matsumoto, 2016]). Une influence significative du niveau de vibrations sur les réponses de gêne due au bruit a également été observée parmi les résultats de l'expérience présentée durant le chapitre 3.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

Néanmoins, il semble que cet effet ne se manifeste que lorsque le niveau de bruit est faible. Notamment, Paulsen et Kastka ont rapporté que le niveau de vibrations impactait la gêne due au bruit pour des niveaux sonores inférieurs ou égaux à 33.4 dB(A). En raison du bruit de fond dans la salle dû au système de refroidissement de l'alimentation du banc vibratoire, le choix a été fait de ne pas tester ces niveaux.

Les résultats de la RM-ANOVA à 2 facteurs menée sur les réponses de gêne vibratoire (sessions A et B agrégées) ne rapportent aucun effet du **niveau de bruit** sur A_V. En revanche, un effet significatif de l'interaction entre les niveaux de bruit et de vibrations a été décelé.

Un test-t mené entre A_V due à la combinaison N_1V_5 et A_V due à la combinaison N_5V_5 rapporte une différence significative ($p < 0.01$). À fort niveau vibratoire ($L_{V_{eq}} = 116$dB), la réponse moyenne de A_V passe de 7.1 lorsque le niveau de bruit est faible ($L_{A_{eq}} = 42$dB(A)) à 7.9 lorsque le niveau de bruit est fort ($L_{A_{eq}} = 74$dB(A)) (cf. figure 4.5.b)).

Le d de Cohen est une estimation de la taille de l'effet mis en évidence par un test-t. Celui-ci révèle que l'effet du niveau de bruit sur la gêne due au cinquième niveau de vibration V_5 est relativement faible : $d_{Cohen} = 0.42$. En effet, Cohen précise qu'un effet est considéré comme faible lorsque $d_{Cohen} = 0.2$ et qu'il peut être considéré comme moyen à partir de $d_{Cohen} = 0.5$ ([Cohen, 1992]).

Le résultat du test-t est cohérent avec l'étude de Howarth et Griffin. En effet, ces derniers montrent qu'un effet synergique du niveau de bruit sur la gêne due aux vibrations ferroviaires peut se manifester lorsque le niveau de vibrations est élevé. Ce résultat est conforté par l'effet significatif de l'interaction des niveaux de bruit et de vibrations sur A_V, qui pourrait être lié à l'apparition d'un effet du niveau de bruit à partir d'un certain niveau vibratoire.

Un manque de consensus existe dans la littérature concernant l'effet du niveau de vibrations sur la perception (et en particulier la gêne) sonore. En revanche, l'effet du niveau de bruit sur la perception vibratoire est plus largement admis (p. ex. [Gidlöf-Gunnarsson et al., 2012] et [Waddington et al., 2014], *in situ*). En laboratoire, Parizet et Marpe ([Parizet and Marpe, 2005]) ont montré que l'intensité perçue d'un signal vibratoire sinusoïdal (28Hz) était significativement influencée par la présence d'un signal sonore tonal (28Hz).

4.3.4 Vérification de l'hypothèse H_2

Howarth et Griffin ([Howarth and Griffin, 1990]) ainsi que Paulsen et Kastka ([Paulsen and Kastka, 1995]) ont étudié l'influence du niveau global sur A_V, A_N et A_T dues à des enregistrements de passage de train. Les stimuli mis en jeu dans ces deux études étaient de nature très différente : un passage de train de Fret était présenté aux participants dans le premier cas, et un passage de tramway dans le second. Par ailleurs, les vibrations associées aux deux cas présentaient un contenu fréquentiel très différent. L'énergie pour les vibrations du train de Fret était principalement contenue dans la plage [30Hz : 40Hz]. Dans le cas du tramway, le spectre vibratoire était plus large bande ([16Hz : 60Hz]) avec plusieurs pics d'énergie à 16Hz, 32Hz et 50Hz.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

L'hypothèse H_2 était que ces différences de contenus fréquentiels ont influencé les résultats, expliquant les différences constatées entre les deux études.

Durant l'expérience présentée dans ce chapitre, deux passages de natures et de contenus fréquentiels différents ont été présentés aux participants. Le premier passage était un train de Fret et le deuxième était un TER. Dans le cas du train de Fret, l'énergie contenue dans les basses fréquences (entre 16Hz et 30Hz) était plus importante que dans le cas du TER (environ 10dB d'écart). Les deux stimuli présentaient un spectre vibratoire large bande (entre 10Hz et 120Hz). Si l'hypothèse H_1 était vérifiée, alors les réponses des participants auraient dû être affectées par le stimulus qui leur était présenté.

Les résultats obtenus dans le cas du train de Fret et du TER sont similaires en tout point. L'hypothèse H_2 n'est donc pas vérifiée.

Une explication peut provenir du fait que les profils des spectres vibratoires ne présentaient pas suffisamment de différences, comparées à celles constatées entre les stimuli vibratoires utilisés par Howarth et Griffin et par Paulsen et Kastka, pour engendrer une différence dans les résultats. En effet, les stimuli utilisés dans la présente étude provenaient tous deux d'enregistrements réalisés à l'intérieur du même logement. Bien que des écarts existent entre les deux contenus spectraux des vibrations du train de Fret et du TER, les deux signaux contenaient de l'énergie sur l'ensemble de la plage [16Hz : 120Hz].

En considérant des mesures réalisées sur plusieurs sites, Sharp et ses collègues ont montré que les vibrations émises par un train de Fret sont généralement évaluées comme plus gênantes que celles émises par un TER, à accélération rms moyenne équivalente ([Sharp et al., 2014a]). Ce résultat était expliqué par les différences de durées moyennes (trains de Fret plus longs en général) mais également de contenus fréquentiels (trains de Fret plus lourds donc présentant davantage d'énergie en basses fréquences).

Les résultats montrent que les réponses de gêne partielle due aux vibrations du train de Fret n'étaient pas significativement différentes de celles dues aux vibrations du TER. Or, la durée des deux passages était identique. Cette observation peut donc signifier que les différences de contenus spectraux (notamment en basses fréquences) n'étaient pas suffisantes pour pouvoir vérifier l'hypothèse initiale H_2.

4.3.5 Qualité prédictive des modèles de gêne totale

La littérature fournit plusieurs modèles de gêne totale due aux bruit et vibrations du trafic ferroviaire. Ces modèles sont de deux sortes : dans les modèles psychophysiques les variables indépendantes sont les niveaux sonore et vibratoire globaux, dans les modèles perceptifs les variables sont les gênes partielles dues au bruit et aux vibrations.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

Modèles psychophysiques

Howarth et Griffin ([Howarth and Griffin, 1991]) proposent un premier modèle, basé sur la loi de Stevens, tel que la gêne totale s'exprime

$$\psi = a + b \cdot \phi_v^{n_v} + c \cdot \phi_s^{n_s}$$

où la variable ϕ_v correspond à la valeur de dose vibratoire (VDV) et où $\log_{10}(\phi_s)$ est assimilé au niveau d'exposition sonore (*Sound Exposure Level* ou SEL).

Les coefficients a, b et c sont obtenus à l'aide d'une régression linéaire multiple. Le modèle final est le suivant ($r = 0.958$, $p < 0.005$, entre $A_{T_{calculée}}$ et $A_{T_{mesurée}}$) :

$$\psi = 22.7 + 243 \cdot \phi_v^{1.18} + 0.265 \cdot \phi_s^{0.036} \tag{4.5}$$

Howarth et Griffin ([Howarth and Griffin, 1990]) proposent un second modèle dont les valeurs des coefficients a, b et c ainsi que des exposants n_s et n_v sont relativement proches des précédentes ($r = 0.97$, $p < 0.005$, entre $A_{T_{calculée}}$ et $A_{T_{mesurée}}$) :

$$\psi = 15.9 + 260 \cdot \phi_v^{1.04} + 0.167 \cdot \phi_s^{0.039} \tag{4.6}$$

Dans ces deux études, il est précisé que l'ajout d'un terme d'interaction $\phi_v^{n_v} \cdot \phi_s^{n_s}$ n'améliore pas significativement le coefficient de corrélation.

Paulsen et Kastka ([Paulsen and Kastka, 1995]) proposent un troisième modèle, basé sur la vitesse vibratoire rms moyenne, v_{rms}, et sur le niveau de pression sonore équivalente, $L_{A_{eq}}$, dans lequel la gêne totale est calculée par une régression linéaire multiple, et s'exprime ($r = 0.7$, $p < 0.01$, entre $A_{T_{calculée}}$ et $A_{T_{mesurée}}$) :

$$y = -0.15 + 1.58 \cdot \log_{10}(v_{rms}) + 0.11 \cdot L_{A_{eq}} \tag{4.7}$$

Finalement, Sharp ([Sharp, 2014]) propose un quatrième modèle dans lequel les variables indépendantes sont l'indice VDV, pondéré W_b, et l'indice $L_{A_{eq}}$. Le modèle obtenu par régression linéaire multiple est le suivant ($R^2 = 0.843$, $p < 0.01$) :

$$A_T = -12.8 + 30.7 \cdot VDV_b + 0.19 \cdot L_{A_{eq}} \tag{4.8}$$

Modèles perceptifs

Lee et Griffin ([Lee and Griffin, 2013]) établissent deux modèles perceptifs de gêne totale en considérant les modèles perceptifs de gêne totale utilisés dans le domaine de la gêne en situation de multi-exposition sonore. Dans le premier modèle, dit des effets indépendants, les contributions des gênes partielles sonore et vibratoire sont sommées ($R^2 = 0.7$, $p < 0.01$) :

$$A_T = 2.742 + 0.25 \cdot A_V + 0.54 \cdot A_N \tag{4.9}$$

Dans le second modèle, dit de gêne dominante, seule la gêne partielle la plus importante est considérée comme variable indépendante ($R^2 = 0.69$, $p < 0.01$) :

$$A_T = 2.179 + 0.78 \cdot A_D \tag{4.10}$$

où $A_D = max(A_N, A_V)$. Les deux modèles présentent des coefficients de détermination R^2 relativement élevés.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

Évaluation de la qualité prédictive

Les qualités prédictives des modèles présentés précédemment ont été évaluées avec les données de A_T recueillies durant l'expérience par des relations linéaires simples entre gêne mesurée et gêne prédite. Les résultats de ces régressions sont présentés en tableau 4.1.

Tableau 4.1 – Valeurs du coefficient de corrélation de Pearson pour les régressions linéaires entre les valeurs prédites par les modèles de la littérature et les valeurs de A_T recueillies durant l'expérience. * : $p < 0.001$.

	Modèle	r Pearson
Modèles psychophysiques	[Howarth and Griffin, 1991]	0.76*
	[Howarth and Griffin, 1990]	0.80*
	[Paulsen and Kastka, 1995]	0.91*
	[Sharp, 2014]	0.82*
Modèles perceptifs	[Lee and Griffin, 2013] (effets indépendants)	0.96*
	[Lee and Griffin, 2013] (gêne dominante)	0.98*

Pour les modèles psychophysiques, il est important de noter que le modèle présentant la meilleure qualité prédictive est celui établi par Paulsen et Kastka ([Paulsen and Kastka, 1995]) basé sur l'indice de vitesse vibratoire rms moyenne (cf. figure 4.6).

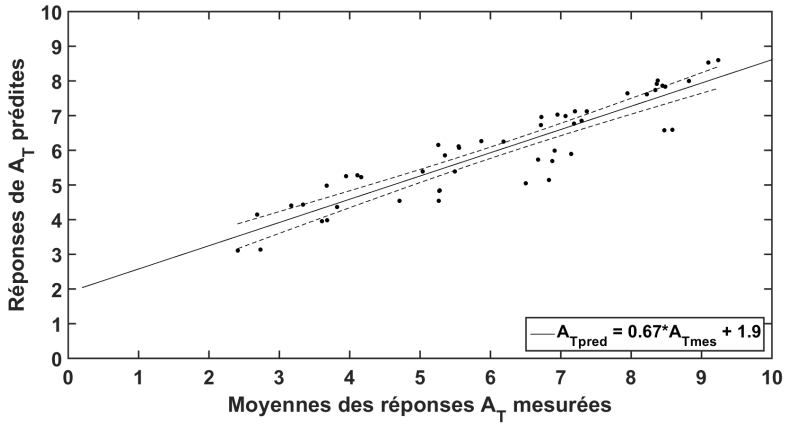


FIGURE 4.6 – Représentation graphique de la qualité prédictive du modèle de Paulsen et Kastka (cf. équation 4.6, [Paulsen and Kastka, 1995]), droite de régression et intervalle de confiance à 95%.

Les modèles perceptifs présentent tous deux de bonnes qualités prédictives, au vu des forts coefficients de corrélation obtenus entre les données prédites par ces modèles et les données recueillies.

D'autres études portant sur la gêne sonore en situation de multi-exposition ont rapporté une qualité supérieure des modèles perceptifs vis-à-vis des modèles psychophysiques, en termes de qualité d'ajustement lors de leur construction à partir de données *in situ* (p. ex. [Pierrette et al., 2012b], [Pierrette et al., 2012a]) et en termes de qualité prédictive pour des modèles testés sur des données *in situ* (p. ex. [Marquis-Favre and Morel, 2015]).

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

En particulier, le modèle de gêne dominante apparaît comme le modèle représentant le mieux les données de gêne totale recueillies durant l'expérience. Ce modèle est souvent rapporté comme présentant un meilleur ajustement aux données de A_T obtenues *in situ* ou en laboratoire (p. ex. [Nguyen et al., 2012]).

4.3.6 Établissement d'une relation d'équivalence subjective

À partir des réponses de gênes partielles sonore et vibratoire, ainsi que des réponses de gêne sonore spécifique recueillies durant l'expérience, il est possible d'établir des relations d'équivalence subjective entre les niveaux sonores et les niveaux vibratoires donnant lieu à une gêne équivalente.

Pour des stimuli de différentes natures, la loi de Stevens relie l'intensité perçue d'un stimulus ψ à son intensité physique ϕ par la relation suivante :

$$\psi = k \cdot \phi^n \tag{4.11}$$

où k et n sont des constantes ([Stevens, 1957]).

Pour des stimuli de natures sonore et vibratoire, on peut alors écrire :

$$\psi_s = k_s \cdot \phi_s^{n_s} \text{ et } \psi_v = k_v \cdot \phi_v^{n_v}$$

Si l'on admet que la gêne due au bruit (resp. aux vibrations) est directement reliée à l'intensité perçue du stimulus sonore (resp. vibratoire), il vient :

$$\log_{10}(A_N) = a_s + b_s \cdot L_{A_{eq}} \tag{4.12}$$

$$\log_{10}(A_V) = a_v + b_v \cdot L_{V_{eq}} \tag{4.13}$$

où $a_s = \log_{10}(k_s)$, $a_v = \log_{10}(k_v)$, $b_s = \frac{n_s}{20}$ et $b_v = \frac{n_v}{20}$, et où $L_{A_{eq}} = 20 \cdot \log_{10}(\phi_s)$ et $L_{V_{eq}} = 20 \cdot \log_{10}(\phi_v)$.

En posant que l'intensité perçue des stimuli sonore et vibratoire est égale, on obtient :

$$L_{A_{eq}} = a + \frac{n_v}{n_s} \cdot L_{V_{eq}} \tag{4.14}$$

où a est une constante.

Pour déterminer expérimentalement la relation d'équivalence subjective correspondant aux données recueillies durant l'expérience, des régressions linéaires ont été effectuées entre les valeurs moyennes de la variable dépendante $\log_{10}(A_V)$ pour chacun des 5 niveaux de bruit et la variable dépendante $L_{V_{eq}}$. Les résultats de ces régressions sont présentés en tableau 4.2.

Les relations obtenues sont ensuite utilisées pour calculer, pour chacun des 5 niveaux de bruit, le niveau d'accélération $L_{V_{eq,estim}}$ donnant lieu à une gêne vibratoire équivalente à la gêne sonore spécifique due au niveau de bruit seul. Le tableau 4.2 montre les niveaux vibratoires équivalents calculés à partir des données de l'expérience.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

Tableau 4.2 – Réponses moyennes de gêne vibratoire A_V pour les combinaisons $N_i V_j$ de bruit et de vibrations et régressions linéaires entre $\log_{10}(A_V)$ et $L_{V_{eq}}$ donnant le niveau vibratoire $L_{V_{eq,estim}}$ équivalent en termes de gêne à chaque niveau de bruit $L_{A_{eq}}$. * : $p < 0.001$.

	A_V				
	$V_1 = 72$	$V_2 = 92$	$V_3 = 100$	$V_4 = 108$	$V_5 = 116$dB
$N_1 = 42$	0.32	1.45	2.72	5.04	7.09
$N_2 = 50$	0.3	1.41	2.48	4.83	7.19
$N_3 = 58$	0.39	1.41	2.7	4.5	7.12
$N_4 = 66$	0.52	1.33	2.63	4.98	7.41
$N_5 = 74$ dB(A)	0.37	1.09	2.25	4.85	7.89

$L_{A_{eq}}$ (dB(A))	$A_{N_{N_i V_1}}$	Ord. Orig. (a_v)	Coef. Dir. (b_v)	r Pearson	$L_{V_{eq,estim}} = \frac{\log_{10}(A_{N_{N_i V_1}}) - a_v}{b_v}$ (dB)
42	2.7	-2.73*	0.031*	0.99*	100.8
50	4	-2.80*	0.032*	0.99*	106.7
58	5.7	-2.50*	0.029*	0.99*	112.05
66	7.3	-2.28*	0.027*	0.99*	116.0
74	9.2	-2.72*	0.031*	0.99*	118.7

D'après l'équation 4.14, une régression linéaire entre la variable indépendante $L_{V_{eq,estim}}$ et la variable dépendante $L_{A_{eq}}$ mène à la relation d'équivalence subjective suivante ($r = 0.99$, $p = 0.001$) :

$$L_{A_{eq}} = -134.5 + 1.7 \cdot L_{V_{eq,estim}} \tag{4.15}$$

Concernant l'exposant vibratoire n_v, des valeurs proches de l'unité sont rapportées par plusieurs études (p. ex. [Shoenberger and Harris, 1971], [Jones and Saunders, 1974]).

D'autre part, Stevens propose que lorsque l'intensité d'un son pur (1000Hz) augmente de 10dB, la sonie varie selon un rapport 2 :1, ce qui correspond à une valeur de n_s d'environ 0.60 ([Stevens, 1955]). Dans le cadre d'une étude portant sur l'équivalence subjective entre le bruit et les vibrations, cette valeur oscille entre 0.38 et 0.72 ([Huang and Griffin, 2010]).

Ici, le rapport $\frac{n_v}{n_s} \approx \frac{1}{0.6} \approx 1.67$ est bien proche de la valeur de 1.7 obtenue à partir des données expérimentales.

Afin de pouvoir comparer la relation d'équivalence subjective construite à celles obtenues dans la littérature, il est nécessaire d'établir une régression linéaire entre la variable $L_{A_{eq}}$ et les niveaux vibratoires exprimés en termes de valeur de dose vibratoire (VDV).

Cette régression ($r = 0.99$, $p = 0.001$) permet la relation d'équivalence subjective suivante :

$$L_{A_{eq}} = 57.8 + 39.5 \cdot \log_{10}(VDV_{estim}) \tag{4.16}$$

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

Huang et Griffin ([Huang and Griffin, 2012]) ont mené une étude dans le but de déterminer l'effet des niveaux de bruit et de vibrations sur les gênes relatives dues au bruit et aux vibrations, et aboutissent à la relation d'équivalence subjective suivante ($r = 0.99$, $p < 0.001$) :

$$L_{A_{eq}} = 84.4 + 32.6 \cdot \log_{10}(VDV) \tag{4.17}$$

Les auteurs présentent également les relations obtenues par différentes études ayant utilisé des signaux acoustiques et vibratoires variés (non exclusivement issus d'enregistrements du trafic ferroviaire) :

— Les valeurs de l'ordonnée à l'origine varient entre 51.9 ([Paulsen and Kastka, 1995]) et 93.6 ([Fleming and Griffin, 1975]).
— Les valeurs du coefficient directeur varient entre 14.4 ([Paulsen and Kastka, 1995]) et 40.0 ([Kjellberg et al., 1985]).

Les coefficients de la relation 4.16 sont donc bien en cohérence avec ceux de la littérature.

4.4 Conclusion

L'objectif des travaux présentés dans ce chapitre était tout d'abord d'étudier l'influence du niveau global ($L_{A_{eq}}$ pour le bruit et $L_{V_{eq}}$ pour les vibrations) sur la gêne partielle due au bruit (A_N), la gêne partielle due aux vibrations (A_V) et la gêne totale (A_T). Le but de l'expérience mise en place était également de contribuer à comprendre les différences entre les résultats provenant de deux études ayant également traité en laboratoire la question de l'influence des niveaux de bruit et de vibrations sur la gêne en situation de co-exposition.

Deux passages de train de nature différente (1 train de Fret et 1 TER) ont été présentés à des participants sous la forme de combinaisons de bruit et de vibrations à différents niveaux sonores et vibratoires. Les deux passages ont été sélectionnés parmi un jeu de stimuli dont les durées avaient préalablement été égalisées et après avoir limité les émergences de niveaux sonores et vibratoires. Ces deux passages ont été sélectionnés de sorte à maximiser les différences de contenus fréquentiels vibratoires. Une fréquence de modulation proche entre les deux signaux vibratoires était également un critère de sélection.

Indifféremment du passage de train considéré, il semble que les participants aient évalué la gêne due au bruit présent dans la combinaison, indépendamment du niveau de vibrations. Les réponses de gêne partielle due aux vibrations sont légèrement influencées par le niveau de bruit présent dans la combinaison, seulement lorsque le niveau de vibrations est au moins de 116dB. Ce résultat est retrouvé par Howarth et Griffin ([Howarth and Griffin, 1990]) mais pas par Paulsen et Kastka ([Paulsen and Kastka, 1995]).

Les résultats indiquent que les différentes plages de variations des niveaux sonores et vibratoires exploitées par les deux études semblent être à l'origine des différences constatées entre les résultats de celles-ci. Le type de train utilisé comme stimuli, et en particulier le contenu fréquentiel vibratoire associé au passage, ne semble pas avoir été la cause des

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

différents résultats.

Dans le cadre des signaux utilisés dans cette thèse, le bruit était de manière générale la modalité la plus gênante. En effet le pourcentages de variance des réponses de gêne totale expliquée par le bruit était de 40.1% contre seulement 11.1% par les vibrations. Le modèle de source dominante proposé dans la littérature pour des situations de co-exposition aux bruit et vibrations ferroviaires permettait une bonne prédiction de la gêne totale.

Principaux résultats obtenus

- Sur les plages de variation des niveaux de bruit et de vibrations testées, le niveau sonore a une influence sur A_V, lorsque $L_{V_{eq}} = 116$ dB.
- Sur les plages de variation des niveaux de bruit et de vibrations testées, le niveau vibratoire n'a pas d'influence sur A_N.
- Les réponses de A_N, A_V et A_T sont identiques pour des combinaisons de bruit et de vibrations provenant de deux trains de natures et de contenus fréquentiels différents, de fréquences de modulation proches, après égalisation de la durée et limitation des émergences des niveaux sonores et vibratoires.

Cette seconde expérience a permis d'observer l'évolution des réponses de gêne A_N, A_V et A_T pour des combinaisons de plusieurs niveaux de bruit ($L_{A_{eq}} \in [42 : 74]$ dB(A)) et de vibrations ($L_{V_{eq}} \in [92 : 116]$ dB) provenant de deux passages de train de natures différentes (train de Fret et TER), enregistrés sur un même site. Les différences de contenu fréquentiel étaient maximales entre ces deux passages, parmi l'ensemble des enregistrements disponibles durant cette thèse. Les deux signaux présentaient des fréquences de modulation proches. Les résultats indiquent un effet relativement faible du niveau de bruit sur la gêne due aux vibrations, uniquement lorsque le niveau vibratoire est élevé ($L_{V_{eq}} = 116$ dB). Aucun effet du niveau de vibrations sur la gêne due au bruit n'a été observé. Cette conclusion est cohérente avec d'autres études qui indiquent que la gêne due aux vibrations est impactée par la présence de bruit. L'objet du prochain chapitre sera l'identification de paramètres, autres que les niveaux énergétiques globaux, qui influenceraient les réponses de gêne à court terme due aux bruit et vibrations ferroviaires. La gêne partielle sonore, la gêne partielle vibratoire ainsi que la gêne totale dues à des combinaisons de bruit et de vibrations provenant d'enregistrements de trafic ferroviaire égalisés en durée et en niveaux sonore et vibratoire, seront évaluées.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

Chapitre 5

Étude de l'influence des paramètres autres que le niveau global sur la gêne due aux bruit et vibrations ferroviaires

Questions scientifiques

Ce chapitre vise à répondre aux problématiques suivantes :

- Le contenu spectral vibratoire possède-t-il une influence sur la gêne due aux vibrations ferroviaires ?
- Quelle est l'influence des paramètres autres que le niveau vibratoire sur la gêne due à des stimuli vibratoires égalisés en durée ?
- Quelle est l'influence des paramètres autres que les niveaux sonore et vibratoire globaux sur la gêne due à des combinaisons de bruit et de vibrations égalisés en durée ?

Le chapitre 4 a présenté une expérience menée en laboratoire afin d'étudier l'influence du niveau global (niveau de pression sonore équivalent, $L_{A_{eq}}$, et niveau d'accélération vibratoire, $L_{V_{eq}}$) sur la gêne partielle due au bruit (A_N), la gêne partielle due aux vibrations (A_V) ainsi que la gêne totale (A_T). Ce chapitre a pour but d'étudier l'influence sur A_N, A_V et A_T des paramètres autres que les niveaux énergétiques globaux, c'est-à-dire des caractéristiques fréquentielles et temporelles des signaux acoustiques et vibratoires, liés à la co-exposition aux bruit et vibrations ferroviaires. Lors d'une expérience préliminaire, la gêne spécifique due à des stimuli vibratoires créés artificiellement à partir de vibrations ferroviaires enregistrées *in situ* est étudiée afin d'évaluer l'impact du contenu spectral vibratoire. Une première expérience est réalisée, basée sur des stimuli vibratoires extraits d'enregistrements de vibrations ferroviaires de même durée (10s) et égalisés en niveau vibratoire (100dB ou 108dB). La gêne spécifique due aux vibrations seules est étudiée durant cette première expérience. Une seconde expérience mettant en jeu des stimuli sonores et vibratoires de même durée (10s) et à niveaux sonore et vibratoire constants (resp, 58dB(A) et 100dB) est réalisée. Les gênes partielles sonore et vibratoire ainsi que la gêne totale sont évaluées durant cette seconde expérience.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

5.1 Introduction

L'état de l'art concernant le domaine de la gêne ressentie par les riverains de voies ferrées fait apparaître un manque de prise en compte des paramètres autres que les niveaux de bruit et de vibrations ferroviaires (cf. chapitre 2, sections 2.1 et 2.2).

Notamment, en laboratoire, plusieurs études ont montré que la gêne sonore est influencée par les paramètres liés aux caractéristiques fréquentielles et temporelles des stimuli sonores (p. ex. [Torija et al., 2011] pour le bruit ferroviaire, [Klein et al., 2015] pour le bruit routier). Cette observation est en accord avec les conclusions d'enquêtes *in situ* qui rapportent une faible qualité prédictive des modèles de gêne due au bruit des transports basés uniquement sur le niveau de pression sonore moyen (p. ex. [Marquis-Favre et al., 2005], [Gille et al., 2016a]).

Des indices ont été proposés pour la prédiction de la gêne due aux bruits ferroviaire et routier, tels que l'énergie totale des composantes tonales (*Total Energy of Tonal Components* ou $TETC$, [Trollé et al., 2014]) ou l'indice $\sigma'(N)$, basé sur les variations temporelles de la sonie ([Gille et al., 2016b]). Ces indices ont montré d'importantes corrélations avec la gêne due au bruit ferroviaire mesurée en laboratoire (p. ex. [Vallin et al., 2018]).

Les résultats de plusieurs études permettent de penser que le contenu spectral vibratoire possède une influence sur la gêne due aux vibrations ressentie par les riverains de voies ferrées (p. ex. [Sharp et al., 2014a]). L'application de pondérations fréquentielles aux signaux vibratoires se présente alors comme une solution permettant d'estimer l'intensité vibratoire réellement perçue, indépendamment du contenu fréquentiel et donc du type de source considéré (cf. chapitre 2, section 2.1.1). Il semble cependant que les pondérations fréquentielles recommandées par les normes ISO 2631 et BS 6472 ne soient pertinentes que dans le cas de signaux mono-fréquentiels (p. ex. [Ljunggren, 2006]). À partir de données issues d'une enquête *in situ*, Waddington et ses collègues ont pu établir des relations dose-effet entre la gêne due aux vibrations ferroviaires et un grand nombre d'indices vibratoires ([Waddington et al., 2014]). Le pourcentage de variance ($R^2_{McFadden}$) expliqué par l'indice VDV pondéré W_b (indice le plus pertinent d'après les résultats de l'étude) était de 3% quand, pour des enquêtes *in situ* concernant la gêne due au bruit, des qualités d'ajustement de 5% à 20% sont généralement attendues. À titre d'exemple, à partir des données issues de 39 enquêtes *in situ* concernant la gêne due au bruit (trafics aérien, routier et ferroviaire confondus), Job a pu calculer que 17.6% de la variance dans les réponses de gêne sonore était expliquée par le niveau de bruit ([Job, 1988]).

Afin d'étudier le caractère multi-dimensionnel de la gêne spécifique due aux vibrations ferroviaires, Woodcock et ses collègues ont mené une expérience en laboratoire à partir d'enregistrements vibratoires réalisés à proximité de voies ferrées ([Woodcock et al., 2014]). À partir des résultats obtenus, un espace perceptif à 4 dimensions a pu être construit. Les deux premières dimensions étaient respectivement liées au contenu spectral basse fréquence (entre 4Hz et 16Hz) et moyenne voire haute fréquence (entre 32Hz et 64Hz). Selon les auteurs, ces deux dimensions correspondent à deux mécanismes indépendants dans la perception des vibrations, la première dimension étant reliée aux vibrations ressenties avec tout le corps, et la seconde étant davantage reliée à la perception vibro-tactile. Les deux dernières dimensions étaient liées à la durée et à la fréquence de modulation.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

Enfin, se pose la question de l'influence sur la gêne partielle sonore, la gêne partielle vibratoire et la gêne totale, des paramètres autres que les niveaux sonore et vibratoire globaux, lorsque les deux types d'exposition sont combinés.

À notre connaissance, seule une étude en laboratoire a été menée dans le but d'étudier l'aspect multi-dimensionnel de la gêne totale due à la co-exposition au bruit et aux vibrations ferroviaires. Reprenant la procédure expérimentale de Woodcock et ses collaborateurs ([Woodcock et al., 2014]), Sharp et ses collègues ont demandé à 30 participants de comparer deux à deux, en termes de gêne totale, 10 stimuli composés de combinaisons de bruit et de vibrations provenant d'enregistrements acoustiques et vibratoires réalisés à proximité de voies ferrées ([Sharp et al., 2014b]). Les résultats ont permis aux auteurs de conclure que la gêne totale due aux bruit et vibrations ferroviaires, A_T, était multi-dimensionnelle et de proposer un espace perceptif à 4 dimensions. En analysant les corrélations entre ces dimensions et différents descripteurs acoustiques et vibratoires, les auteurs ont finalement établi le modèle suivant :

$$A_T = -69.7 + 4.16 \cdot TETC + 0.054 \cdot T_{4/5,v} + 0.316 \cdot L_{10} - 0.273 \cdot f_{mod} \qquad (5.1)$$

où les indices $T_{4/5,v}$ et f_{mod} représentent respectivement la durée et la fréquence de modulation du signal vibratoire. L'indice $TETC$ est l'énergie des composantes tonales du bruit et L_{10} est le niveau de pression sonore dépassé durant 10% de la durée du signal acoustique.

Ce modèle peut être discuté, dans la mesure où seuls 10 stimuli ont été utilisés pour parvenir à sa création. De plus, ni le niveau de pression sonore équivalente, $L_{A_{eq}}$, ni l'accélération rms moyenne, a_{rms}, n'étaient égalisés entre les stimuli lors de l'expérience. Or, au vu de ces travaux de thèse, il semble que dans l'expression de la gêne sonore ou de la gêne vibratoire, l'importance des paramètres énergétiques (p. ex. $L_{A_{eq}}$, a_{rms}) soit supérieure à celles des paramètres non énergétiques (c-à-d des caractéristiques fréquentielles et temporelles) de l'exposition au bruit et aux vibrations ferroviaires. Dès lors, la question est posée de savoir si ces paramètres ne devraient pas apparaître dans l'équation 5.1.

L'objectif des travaux présentés dans ce chapitre est d'évaluer l'influence des paramètres autres que les niveaux de bruit et de vibrations sur la gêne spécifique due aux vibrations, les gênes partielles dues au bruit et aux vibrations, ainsi que la gêne totale. Une expérience préliminaire a été réalisée à partir de stimuli vibratoires artificiels dans le but d'étudier, tout d'abord, la pertinence des pondérations fréquentielles recommandées par les normes internationales. Les résultats de cette expérience permettront également de déterminer, si elles existent, les plages fréquentielles ressenties comme les plus gênantes dans le cadre de vibrations ferroviaires. Deux expériences ont été conduites à partir d'enregistrements de stimuli obtenus à partir d'enregistrements de bruit et de vibrations égalisés en durée ainsi qu'en niveaux sonores et vibratoires. Durant l'Expérience I, la gêne vibratoire spécifique due aux stimuli vibratoires présentés seuls était considérée. Pour deux niveaux vibratoires (100dB et 108dB, ref. 10^{-6} $m.s^{-1}$), l'influence des paramètres autres que le niveau vibratoire global sur la gêne due aux vibrations a été évaluée. Durant l'Expérience II, les gênes partielles sonore et vibratoire ainsi que la gêne totale dues à la co-exposition aux bruit et aux vibrations ferroviaires ont été recueillies afin de mieux comprendre l'influence des paramètres autres que les niveaux sonore et vibratoire globaux sur la gêne ressentie.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

5.2 Expérience préliminaire : L'influence du contenu spectral vibratoire sur la gêne due aux vibrations ferroviaires

L'expérience préliminaire rapportée dans cette section a été mise en place afin de mieux comprendre les mécanismes liés à la gêne vibratoire et en particulier, l'influence du contenu spectral des vibrations sur la gêne due aux vibrations ferroviaires.

5.2.1 Stimuli

Les stimuli vibratoires utilisés dans cette expérience ont été créés artificiellement à partir des enregistrements *in situ* réalisés à l'intérieur d'un logement en Avril 2016 à Caluire-et-Cuire (France). Les détails relatifs à la mesure *in situ* sont présentés en chapitre 3, section 3.1.2.

Le but de l'expérience était d'étudier l'influence sur la gêne due aux vibrations ferroviaires du contenu spectral de celles-ci. Pour ce faire, des modifications ont été apportées aux spectres vibratoires de 5 passages de train (2 Fret et 3 TER).

Chaque signal a tout d'abord été filtré par bandes de tiers d'octave. Les niveaux vibratoires de certaines bandes ont ensuite été amplifiés. Les spectres des différents signaux reconstruits ont été affectés d'une phase aléatoire équiprobable afin d'obtenir des signaux stationnaires et de s'affranchir des variations temporelles d'amplitude. Ces signaux vibratoires ont finalement été égalisés en durée et en niveau d'accélération vibratoire, $L_{V_{eq}}$.

Sélection des bandes fréquentielles

Les bandes de tiers d'octave considérées sont les suivantes :

- **Bande 1 = [12.5Hz : 25Hz]**. Les bandes centrées sur 12.5Hz, 16Hz, 20Hz et 25Hz sont comprises dans la bande 1.
- **Bande 2 = [31.5Hz : 50Hz]**. Les bandes centrées sur 31.5Hz, 40Hz et 50Hz sont comprises dans la bande 2.
- **Bande 3 = [63Hz : 80Hz]**. Les bandes centrées sur 63Hz et 80Hz sont comprises dans la bande 3.

La plage fréquentielle vibratoire d'intérêt, dans le cadre de cette thèse, varie de 1Hz à 80Hz ([ISO, 1997]). Les niveaux vibratoires des signaux enregistrés *in situ* étaient trop faibles, à des fréquences inférieures à 12.5Hz, pour être considérés.

La bande 1 peut être considérée comme la plage fréquentielle basse fréquence (**BF**). La bande 2 peut être considérée comme la plage fréquentielle moyenne fréquence (**MF**). La bande 3 peut être considérée comme la plage fréquentielle haute fréquence (**HF**).

La sensibilité humaine est plus importante pour la bande de fréquence **BF** ([Mansfield, 2004]). D'après les seuils de perception vibratoire (cf. chapitre 2, section 2.1.1), la sensibilité humaine est la moins importante pour la gamme de fréquences **HF**.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

Une fois le signal filtré par bandes de tiers d'octave, le signal temporel est reconstruit, tel que :

$$s_{Train,Bande}(t) = \sum_i w_i \cdot s_{Bande_i}(t) \tag{5.2}$$

où le coefficient w_i est le gain appliqué au signal s_{Bande} contenu dans la i-ème bande de tiers d'octave.

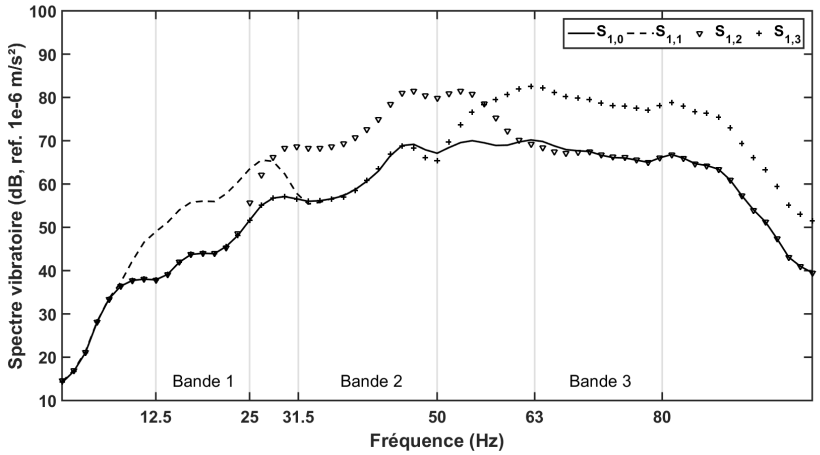


FIGURE 5.1 – Spectres des 4 signaux créés à partir du train 1 (Fret 1). Le spectre $S_{1,0}$ correspond au signal temporel reconstruit sans appliquer de gain. Les spectres $S_{1,Bande}$ correspondent aux signaux temporels reconstruits en appliquant un gain aux bandes 1 à 3.

Choix du gain

Le choix de la valeur du gain appliqué aux bandes fréquentielles à amplifier a été fait en réalisant plusieurs essais dans le laboratoire.

Pour une valeur du gain égale à 2 (6dB d'augmentation), les modifications sont tout juste perceptibles et il existe un risque que les participants ne sentent pas de différence entre les signaux.

Pour une valeur du gain égale à 4 (12dB d'augmentation), en revanche, les modifications peuvent être trop facilement perçues et les participants peuvent alors être tentés d'établir une stratégie pour réaliser la tâche de comparaison demandée.

Une valeur de 3 (environ 10dB d'augmentation) a donc été choisie.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

Application d'une phase aléatoire équiprobable

Le but de l'expérience était d'étudier l'influence sur la gêne due aux vibrations ferroviaires du contenu spectral vibratoire. Afin de s'abstraire des variations temporelles du niveau vibratoire, les spectres des signaux $s_{Train,Bande}(t)$ se sont vus attribuer une phase aléatoire équiprobable.

Les signaux analytiques sont exprimés dans le domaine fréquentiel, tels que :

$$\tilde{\mathrm{S}}_{Train,Bande}(f) = S_{Train,Bande}(f) \cdot \exp^{(i\phi)} \tag{5.3}$$

où ϕ est la phase aléatoire équiprobable appliquée au spectre $S_{Train,Bande}(f)$.

Pour chaque train, 4 signaux $TRAIN_{BANDE}$ sont finalement obtenus dans le domaine temporel par transformée de Fourier complexe inverse (fonction *ifft()* du logiciel Matlab®).

Égalisation en durée et en niveau vibratoire

Pour chacun des 20 signaux $TRAIN_{BANDE}$ obtenus, seules les 5 premières secondes sont conservées. Une telle durée semble appropriée pour cette expérience, notamment car elle permet de limiter la fatigue des participants en réduisant le temps d'expérience.

La dernière étape de création des stimuli était l'égalisation des niveaux d'accélération vibratoire, afin de s'affranchir de toute influence du niveau vibratoire sur les réponses des participants.

Un niveau équivalent de 105dB (ref. $10^{-6} m.s^{-2}$) est choisi. Ce niveau est cohérent avec les niveaux vibratoires généralement utilisés dans les études concernant la gêne due aux vibrations ferroviaires (p. ex. [Howarth and Griffin, 1988], [Morihara and Matsumoto, 2016]).

5.2.2 Procédure

L'expérience comportait 5 sessions. Chaque session contenait les 3 stimuli $TRAIN_{BF}$, $TRAIN_{MF}$ et $TRAIN_{HF}$ créés à partir du spectre vibratoire modifié et le stimulus $TRAIN_O$ créé à partir du spectre vibratoire non modifié du du même passage de train original. Les participants réalisaient chaque session dans un ordre aléatoire.

Durant chaque session, les participants devaient comparer deux à deux les 4 stimuli. Six comparaisons devaient donc être réalisées par session et l'ordre des paires à l'intérieur de chaque session était aléatoire.

Pour chaque paire de stimuli, les deux questions suivantes étaient posées :

1. *Lorsque vous vous imaginez chez vous, lequel de ces 2 passages serait le plus gênant ?*
2. *Évaluez la similarité des passages.*

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

Pour répondre à la première question (gêne), les participants devaient choisir parmi les 3 options suivantes :

— Le premier passage est plus gênant que le deuxième (symbolisé par le bouton « 1 »).
— Le deuxième passage est plus gênant que le premier (symbolisé par le bouton « 2 »).
— Les deux passages sont aussi gênants l'un que l'autre (symbolisé par le bouton « = »).

Pour répondre à la deuxième question (dissimilarité), les participants utilisaient une échelle continue, numérotée de 0 (« égaux ») à 10 (« très différents »).

Avant la première paire, les 4 stimuli étaient présentés à la suite, espacés de 1s, afin que les participants puissent se familiariser avec les différences entre les signaux avant de commencer la tâche de comparaison par paires. Les participants pouvaient rejouer les 4 stimuli autant de fois que nécessaire avant de démarrer chaque session.

La durée totale de l'expérience était de 20min.

5.2.3 Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental utilisé pour reproduire les vibrations était le même que celui présenté lors des chapitres 3 et 4. Les vibrations étaient générées par un pot vibrant électrodynamique LDS-V650 (B&K, Nærum, Danemark, www.bksv.com). Les participants indiquaient leurs réponses grâce à un écran tactile positionné face à eux lorsqu'ils étaient assis sur le banc vibratoire.

L'expérience était réalisée dans une salle du laboratoire ne possédant pas de traitement acoustique. Afin que les participants ne soient pas perturbés visuellement durant l'expérience, un rideau opaque était mis en place autour du dispositif expérimental.

Le bruit de fond dans la salle était de 46dB(A). Ce niveau élevé pour une expérience de perception vibratoire était dû aux systèmes de ventilation de l'alimentation du pot vibrant et de l'amplificateur.

La réponse en fréquence du banc vibratoire était compensée en réalisant une opération de filtrage sur les signaux avant leur reproduction. La procédure de filtrage est détaillée en annexe A.

5.2.4 Participants

Vingt adultes (12 hommes, 8 femmes ; âge moyen = 40 ans, écart-type = 13 ans) ont participé à cette expérience. Aucun participant ne connaissait l'objectif de l'expérience et aucun n'avait pris part à d'autres expériences de perception vibratoire. Les participants n'étaient pas indemnisés pour leur participation. Leur consentement écrit était requis avant le début de l'expérience.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

5.3 Résultats de l'expérience préliminaire

Les résultats ont été analysés afin de déterminer si le contenu spectral vibratoire possède une influence sur la gêne due aux vibrations ferroviaires.

Des analyses de la variance à mesures répétées (RM-ANOVAs) ont ensuite été menées sur les scores de dissimilarité perçue entre les deux stimuli de la paire.

Dans un second temps, la cohérence des résultats a été examinée avant, pour chaque paire de stimuli, de calculer une probabilité de gêne à partir des réponses des participants à la première question : lequel de ces 2 passages serait le plus gênant ? Les corrélations entre la probabilité de gêne associée à une paire de stimuli et la différence de niveau vibratoire ont finalement été examinées, en utilisant plusieurs indices vibratoires.

5.3.1 RM-ANOVAs à 1 facteur - scores de dissimilarité

Cinq RM-ANOVAs à un facteur (facteur **Paire**) ont été menées sur les scores de dissimilarité obtenus durant les cinq sessions, afin d'étudier l'influence du contenu spectral sur la perception des vibrations ferroviaires. Le facteur **Paire** possédait 6 niveaux (6 paires présentées durant chaque session).

L'effet du facteur sur les réponses obtenues durant les 5 sessions était significatif :

— En session A (Fret 1) : $[F(5, 95) = 4.63,\ p < 0.001,\ \eta^2 = 15.1\%]$.
— En session B (Fret 2) : $[F(5, 95) = 5.53,\ p < 0.001,\ \eta^2 = 14.2\%]$.
— En session C (TER 1) : $[F(5, 95) = 3.01,\ p < 0.05,\ \eta^2 = 10.1\%]$.
— En session D (TER 2) : $[F(5, 95) = 5.37,\ p < 0.001,\ \eta^2 = 18.4\%]$.
— En session E (TER 3) : $[F(5, 95) = 2.80,\ p < 0.05,\ \eta^2 = 8.5\%]$.

L'effet du facteur **Paire** était faible cependant, les proportions de variance expliquées selon les sessions variant approximativement entre 10% et 20%.

Il est également à noter que, d'une manière générale, les scores de dissimilarité moyens obtenus par chaque paire de stimuli pour chacune des 5 sessions étaient relativement faibles (inférieurs à 5 sur 10).

5.3.2 L'influence du contenu spectral sur la gêne due aux vibrations ferroviaires

Dans une expérience de comparaisons par paires, lorsque la tâche demandée est d'évaluer le stimulus le plus gênant parmi différents stimuli, les réponses des participants peuvent conduire à des erreurs circulaires ([Parizet, 2002]).

Par exemple, si un participant est plus gêné par un stimulus A que par un stimulus B, plus gêné par le stimulus B que par un stimulus C et plus gêné par le stimulus C que par le stimulus A, il est impossible de déterminer le stimulus le plus gênant de la triade A, B et C.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

Les choix exprimés par les participants pour la paire de stimuli (i, j) sont représentés par la variable Q_{ij}. Ses valeurs sont comprises dans l'intervalle $[-1 : 1]$, tels que :

— $Q_{ij} < 0$, si le participant est plus gêné par le stimulus i que par le stimulus j.
— $Q_{ij} > 0$, si le participant est plus gêné par le stimulus j que par le stimulus i.

Trois méthodes sont à notre disposition pour détecter si un participant a commis une erreur circulaire en évaluant la triade A, B et C ([Kendall and Smith, 1940]) :

1. La première méthode consiste à faire la différence entre $(Q_{AB} + Q_{BC})$ et Q_{AC}.
2. La seconde méthode est équivalente à la première mais en contenant la somme $(Q_{AB} + Q_{BC})$ dans l'intervalle $[-1 : 1]$.
3. La troisième méthode consiste à comptabiliser toutes les erreurs circulaires de la forme « $(Q_{AB} > 0)$, $(Q_{BC} > 0)$, $(Q_{AC} < 0)$ » ou « $(Q_{AB} < 0)$, $(Q_{BC} < 0)$, $(Q_{AC} > 0)$ ».

Si les participants indiquent leurs réponses à l'aide d'une échelle continue (c-à-d si Q_{ij} varie continument entre -1 et 1), on peut constater que les deux premières méthodes sont adaptées. En revanche, lors d'une tâche de comparaison par paires à choix discrets (c-à-d si Q_{ij} est une variable discrète), plus le nombre de choix possibles est restreint, plus l'efficacité des méthodes 1 et 2 est limitée. La troisième méthode semble donc la plus adaptée pour ce type de protocole. Cependant, elle est également mise à défaut si le choix « A = B » est proposé aux participants ($Q_{AB} = 0$). Un certain nombre d'erreurs circulaires ne sera alors plus comptabilisé.

Le nombre d'erreurs circulaires « nettes » (c-à-d sans occurrence de la réponse « = ») a été relevé :

— Dans la session A : 3 participants ont commis une erreur circulaire (n°6, n°19 et n°20).
— Dans la session B : 2 participants ont commis une erreur circulaire (n°16 et n°20).
— Dans la session C : 1 participant a commis une erreur circulaire (n°20).
— Dans la session D : 2 participants ont commis une erreur circulaire (n°17 et n°19).
— Dans la session E : 2 participants ont commis une erreur circulaire (n°7 et n°8).

Les 20 participants ont été conservés pour l'analyse des résultats, aucun d'eux n'ayant commis au moins une erreur circulaire « nette » durant chaque session.

Construction de la matrice des probabilités de gêne vibratoire

Les réponses apportées par les participants à la première question (gêne) peuvent être transformées en scores de gêne à l'aide de différentes méthodes (méthode de Bradley-Terry, méthode de Thurstone, [David, 1963]). Cependant les scores de gêne ainsi obtenus pour les stimuli d'une même session sont inter-dépendants et ne peuvent être comparés aux scores obtenus pour les stimuli d'une autre session.

Des probabilités de gêne ont donc été calculées pour chacune des 30 paires présentées aux participants. Ces probabilités sont indépendantes et peuvent donc être comparées

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

d'une session à l'autre.

Afin de pouvoir transformer les réponses à la première question (gêne) données par les participants pour chaque paire en probabilités de gêne vibratoire, les choix Q_{ij} des participants doivent tout d'abord être transposés dans l'intervalle [0 : 1].

La probabilité de gêne vibratoire P_{ij} associée à la paire de stimuli i et j est obtenue en réalisant la moyenne sur l'ensemble des participants des choix exprimés pour cette même paire. La probabilité P_{ij} indique la probabilité d'être plus gêné par le stimulus j que par le stimulus i.

Une certaine variabilité peut être observée entre les probabilités de gêne calculées à partir des réponses obtenues dans chaque session, c'est-à-dire suivant le train considéré (cf. figure 5.2).

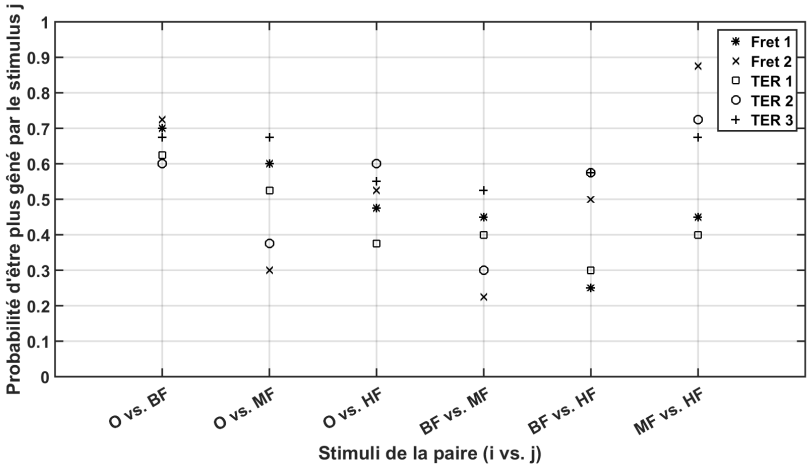


FIGURE 5.2 – Probabilités de gêne calculées dans chaque session pour les paires constituées par les stimuli $Train_0$, $Train_{BF}$, $Train_{MF}$ et $Train_{HF}$.

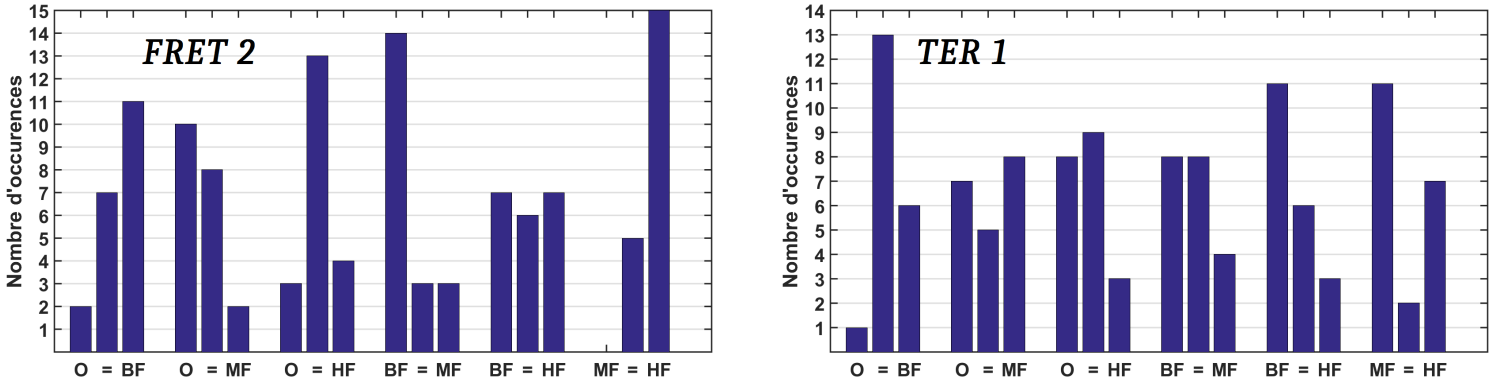
Durant la session C (TER 1), les probabilités de gêne varient peu autour de la valeur de 0.5 ($\approx$ 0.3 à 0.6). De telles valeur de probabilités de gêne peuvent indiquer une forte occurrence de la réponse « A = B », ou une forte disparité dans les choix des participants.

Durant la session B (Fret 2) en revanche, les participants ont indiqué dans l'ensemble de fortes dissemblances ou, au contraire, de fortes ressemblances entre les différents stimuli, entraînant des valeurs de probabilité de gêne plus extrêmes ($\approx$ 0.2 à 0.9).

La figure 5.3 montre les choix Q_{ij} faits par les participants pour chaque paire durant les sessions B et C. Il est à noter que les choix faits par les participants durant la session B semblent montrer davantage de consensus que ceux faits durant la session C.

Durant la session B (cf. figure 5.3.a), le score de dissimilarité le plus faible était obtenu par la paire de stimuli **O** et **HF**, se traduisant par une plus grande apparition de la réponse « = ». Le score de dissimilarité le plus élevé était obtenu par la paire de stimuli **MF** et **HF**, se traduisant par un choix consensuel pour la réponse « HF ».

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés



(a) (b)

FIGURE 5.3 – Représentation en histogramme des choix Q_{ij} des participants pour chaque paire, session B (a) et session C (b). Pour chaque paire (i, j), les trois barres correspondent au nombre d'occurrences de la réponse $Q_{ij} = 0$, $Q_{ij} = 0.5$ et $Q_{ij} = 1$, respectivement.

Durant la session C (cf. figure 5.3.b), le score de dissimilarité le plus faible était obtenu par la paire de stimuli **O** et **BF**, se traduisant par une forte apparition de la réponse « = ». Le score de dissimilarité le plus élevé était obtenu par la paire de stimuli **MF** et **HF**, se traduisant ensuite par un fort dissensus : 11 participants étaient plus gênés par le stimulus **MF** et 7 participants par le stimulus **HF**.

Corrélations entre les indices vibratoires et les probabilités de gêne

Le niveau vibratoire de chaque stimulus une fois restitué par le banc vibratoire a été mesuré.

Différents indices ont été calculés : l'accélération rms moyenne, a_{rms}, la valeur de dose vibratoire (VDV), le maximum de vibration transitoire (MTVV) et la vitesse rms moyenne, v_{rms}. Les 3 pondérations fréquentielles recommandées par les normes ISO 2631 et BS 6472 (W_b, W_k et W_m, cf. chapitre 2, section 2.1.1) et fréquemment utilisées dans les études traitant de la gêne due aux vibrations ont été appliquées aux descripteurs a_{rms} et VDV.

Pour chacune des 30 paires de stimuli, une différence de niveau vibratoire a ainsi pu être calculée à l'aide de chacun de ces descripteurs et comparée à la probabilité de gêne associée (cf. tableau 5.1).

Aucune corrélation significative n'a été relevée entre les probabilités de gêne et les indices vibratoires, indépendamment de la pondération fréquentielle utilisée (cf. tableau 5.1).

Dans un second temps, la différence de niveau d'accélération vibratoire entre les stimuli d'une même paire a été calculée dans chaque bande de tiers d'octave comprise entre 10Hz et 80Hz. Pour chaque paire de stimuli, les différences de niveau vibratoire par bande de tiers d'octave ont été comparées aux probabilités de gêne associées (cf. tableau 5.1).

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

Tableau 5.1 – Coefficients de corrélation de Pearson ($|r|$) associés aux régressions linéaires menées entre les probabilités de gêne et les indices vibratoires. * : $p < 0.05$.

Indice	(unité)	$\|r\|$ Pearson
$a_{k,rms}$	$(m.s^{-2})$	0.09
$a_{m,rms}$	$(m.s^{-2})$	0.07
$a_{b,rms}$	$(m.s^{-2})$	0.04
VDV	$(m.s^{-1.75})$	0.14
VDV_k	$(m.s^{-1.75})$	0.07
VDV_m	$(m.s^{-1.75})$	0.05
VDV_b	$(m.s^{-1.75})$	0.01
$MTVV$	$(m.s^{-2})$	0.31
v_{rms}	$(m.s^{-1})$	0.13
$a_{rms_{10Hz}}$	$(m.s^{-2})$	0.71^*
$a_{rms_{12.5Hz}}$	$(m.s^{-2})$	0.62^*
$a_{rms_{16Hz}}$	$(m.s^{-2})$	0.62^*
$a_{rms_{20Hz}}$	$(m.s^{-2})$	0.68^*
$a_{rms_{25Hz}}$	$(m.s^{-2})$	0.63^*
$a_{rms_{31.5Hz}}$	$(m.s^{-2})$	0.08
$a_{rms_{40Hz}}$	$(m.s^{-2})$	0.18
$a_{rms_{50Hz}}$	$(m.s^{-2})$	0.20
$a_{rms_{63Hz}}$	$(m.s^{-2})$	0.40^*
$a_{rms_{80Hz}}$	$(m.s^{-2})$	0.40^*

Les coefficients de corrélation de Pearson obtenus pour chaque bande de tiers d'octave font apparaître trois groupes :

1. Le contenu fréquentiel des bandes de tiers d'octave centrées sur 10Hz, 12.5Hz, 16Hz, 20Hz et 25Hz est significativement corrélé avec les probabilités de gêne calculées. Les valeurs absolues des coefficients de corrélation sont relativement élevées (entre 0.62 et 0.71).

2. Le contenu fréquentiel des bandes de tiers d'octave centrées sur 31.5Hz, 40Hz et 50Hz n'est pas significativement corrélé avec les probabilités de gêne calculées.

3. Le contenu fréquentiel des bandes de tiers d'octave centrées sur 63Hz et 80Hz est significativement corrélé avec les probabilités de gêne calculées. Les valeurs absolues des coefficients de corrélation sont relativement faibles (0.40).

5.4 Expérience I : La gêne spécifique due aux vibrations ferroviaires égalisées en durée

La gêne vibratoire spécifique due à plusieurs enregistrements vibratoires de passages de train a été examinée durant cette première expérience.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

5.4.1 Méthode expérimentale

Stimuli

Les stimuli ont été obtenus à partir des enregistrements *in situ* de 19 passages de train, réalisés durant la thèse (les détails concernant la mesure *in situ* sont donnés en chapitres 3 et 4, sections 3.1.2 et 4.2.3, respectivement).

De sorte à ce que l'influence de ces paramètres sur la gêne exprimée par les participants soit aussi faible que possible, la durée ainsi que le niveau d'accélération ont été égalisés. Les étapes de la construction des stimuli et notamment la procédure d'égalisation de leurs durées sont présentées en détail en chapitre 4, section 4.2.3 :

— Dans un premier temps, les enregistrements vibratoires ont été raccourcis à l'aide du logiciel libre Audacity®.
— Dans un second temps, les émergences énergétiques parmi les signaux vibratoires ont été limitées de sorte à s'abstraire au maximum de l'influence des paramètres énergétiques sur les réponses de gêne finales.
— Les signaux ont finalement été égalisés en niveau vibratoire, à un premier niveau $L_{V_{eq_1}} = 100$dB et à un second niveau $L_{V_{eq_2}} = 108$dB.

La durée ainsi que le niveau global des stimuli vibratoires reproduits sur le banc vibratoire aux niveaux $L_{V_{eq_1}}$ et $L_{V_{eq_2}}$, pour un participant, sont présentés en tableau 5.2.

Tableau 5.2 – Durée et niveau vibratoire $L_{V_{eq}}$ des stimuli vibratoires lors de la restitution sur le banc expérimental, pour un participant. Les extraits des signaux vibratoires des passages de 19 trains (Fret et TER) sont désignés respectivement par les initiales F et T.

Passage	Durée (s)	$L_{V_{eq_1}}$ (dB)	$L_{V_{eq_2}}$ (dB)	Passage	Durée (s)	$L_{V_{eq_1}}$ (dB)	$L_{V_{eq_2}}$ (dB)
F_1	10.0	100.4	107.6	T_1	9.9	100.1	107.3
F_2	10.0	100.5	107.5	T_2	10.0	99.1	106.2
F_3	10.3	99.9	107.5	T_3	10.0	99.9	107.4
F_4	10.3	100.0	107.5	T_4	10.0	99.5	107.3
F_5	10.0	98.1	106.2	T_5	10.0	100.1	107.6
F_6	10.0	100.9	108.3	T_6	10.0	99.3	106.5
F_7	10.0	99.1	106.2	T_7	10.0	99.9	107.4
F_8	10.0	100.1	107.3	T_8	10.0	100.3	108.3
F_9	10.0	99.6	106.5	T_9	10.0	99.8	107.5
				T_{10}	10.0	98.4	106.6

Avant leur reproduction, les signaux étaient filtrés de sorte à compenser l'effet de la réponse en fréquence du dispositif vibratoire (la procédure de filtrage est présentée en annexe A). Or, cette procédure de filtrage était réalisée à partir d'une mesure unique de la fonction de réponse en fréquence. Du fait des variations de poids entre les différents participants, une certaine variation du niveau vibratoire parmi les stimuli (due à une variation de la réponse en fréquence du dispositif vibratoire d'un participant à l'autre) a été observée (≈ 2.5dB).

De même, une faible variation de la durée entre les stimuli (≈ 0.3s) a pu être observée. Cette variation résulte du compromis à faire entre le processus d'égalisation et la volonté de ne pas dénaturer les stimuli extraits des enregistrements.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

Procédure

L'expérience était composée de deux sessions indépendantes contenant chacune les 19 stimuli vibratoires.

Pour chaque stimulus, la tâche des participants était d'évaluer la gêne vibratoire due au stimulus, en l'indiquant à l'aide d'une échelle continue, numérotée de 0 (« pas du tout gênant ») à 10 (« extrêmement gênant »).

Durant la session A, les 19 stimuli étaient présentés aux participants à un niveau vibratoire rms moyen de 100dB. L'ordre de présentation des stimuli à l'intérieur de la session était aléatoire.

Durant la session B, le niveau vibratoire des 19 stimuli était fixé à 108dB. Ce second niveau, ainsi que celui de 100dB, ont également été testés lors de l'expérience présentée en chapitre 4. L'ordre de présentation des stimuli était également aléatoire.

Les participants réalisaient tout d'abord la session A, puis la session B. Chaque session durait environ 15 minutes.

Dispositif expérimental et participants

Les stimuli vibratoires étaient reproduits à l'aide du même dispositif expérimental que celui présenté en sections 3.1.3, 4.2.2 et 5.2.3.

Vingt-et-un participants (13 hommes, 8 femmes ; âge moyen = 29.3 ans, écart-type = 11.4 ans) ont pris part à cette expérience. Ceux-ci avaient également participé à l'expérience présentée en chapitre 4 et étaient donc familiers des expériences de perception vibratoire.

Les participants n'étaient pas indemnisés pour leur participation et étaient invités à donner leur consentement écrit avant le commencement de l'expérience. L'expérience durait dans son ensemble 20 à 30 minutes.

5.4.2 Résultats

Les résultats ont tout d'abord été analysés au moyen d'analyses de la variance à mesures répétées (RM-ANOVAs), avec le facteur **Stimulus**. Dans un second temps, un certain nombre de descripteurs vibratoires ont été calculés pour chaque stimulus afin d'étudier leurs corrélations avec les réponses de gêne vibratoire spécifique.

Les résultats de l'Exp. I seront discutés conjointement aux résultats de l'Exp. II en section 5.6.2.

RM-ANOVAs à 1 facteur : facteur Stimulus

Deux RM-ANOVAs à 1 facteur ont été menées sur les réponses de gêne vibratoire spécifique obtenues en sessions A et B, avec le facteur **Stimulus** (19 niveaux pour ce facteur).

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

Les résultats indiquent que l'influence du **Stimulus** sur les réponses de gêne vibratoire spécifique obtenues en session A n'était pas significative, $[F(18, 360) = 1.5467, p = 0.072]$.

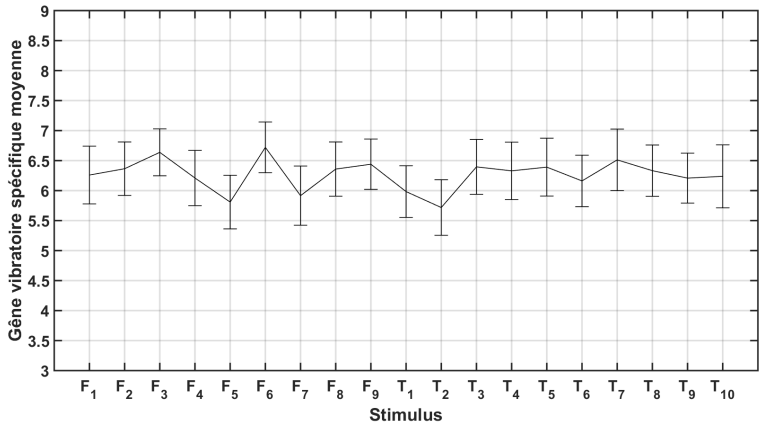


FIGURE 5.4 – Réponses moyennes de gêne vibratoire spécifique obtenues durant la session B et erreurs-types associées.

L'influence du **Stimulus** sur les réponses de gêne vibratoire spécifique obtenues en session B était significative, avec un effet relativement important $[F(18, 360) = 2.0677$, $p < 0.01$, $\eta^2 = 14.8\%]$. La figure 5.4 présente les réponses moyennes de gêne vibratoire spécifique obtenues en session B.

Calcul de descripteurs vibratoires

Plusieurs descripteurs utilisés dans la littérature concernant la gêne due aux vibrations ont été calculés de sorte à caractériser les stimuli vibratoires.

Les caractéristiques temporelles des signaux vibratoires étaient représentées par le temps de montée (T_{rise}) et la durée du signal définie à partir des seuils $a_{max} - 10$dB (T_{10dB}) et $a_{max} - 3$dB (T_{3dB}). Le temps durant lequel le niveau du signal vibratoire excédait un cinquième ($T_{1/5}$), deux cinquièmes ($T_{2/5}$), trois cinquièmes ($T_{3/5}$) et quatre cinquièmes ($T_{4/5}$) de sa plage de variation était également inclus à la liste de descripteurs (cf. [Woodcock et al., 2014] pour un modèle de gêne vibratoire spécifique comprenant l'indice T_{10dB}).

La fréquence de modulation (f_{mod}) ainsi que l'amplitude de modulation (A_{mod}) faisaient également partie des descripteurs utilisés pour caractériser l'aspect temporel des signaux vibratoires (cf. [Woodcock et al., 2014] pour un modèle de gêne vibratoire spécifique comprenant l'indice f_{mod}).

Au regard des résultats de l'expérience préliminaire présentés durant la section 5.3, les indices vibratoires tels que l'accélération rms moyenne pondérée $a_{w,rms}$, la Valeur de Dose Vibratoire (VDV), pondérée ou non, ou la vitesse vibratoire, n'ont pas été inclus au panel de descripteurs présenté ici. En revanche, l'accélération rms moyenne calculée dans les bandes de tiers d'octave comprises entre 10Hz et 80Hz a été ajoutée à la liste des descripteurs vibratoires calculés.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

Enfin, du fait des faibles variations de niveau vibratoire rms moyen constatées après reproduction sur le banc vibratoire, deux descripteurs de l'énergie des signaux vibratoires ont également été calculés : le niveau vibratoire rms moyen, $L_{V_{eq}}$, ainsi que le facteur de crête, CF.

Le tableau 5.3 présente les coefficients de corrélation de Pearson entre les paramètres décrits ci-dessus et les réponses de gêne vibratoire spécifique obtenues en session B.

Tableau 5.3 – Coefficient de corrélation $r_{Pearson}$ entre la gêne vibratoire spécifique et les descripteurs des stimuli vibratoires : niveau vibratoire rms moyen, $L_{V_{eq}}$, accélération rms moyenne calculée dans chaque bande de tiers d'octave, a_{rms_i}, facteur de crête, CF, temps de montée, T_{rise}, durées définies à partir des seuils $a_{max} - 10$dB et $a_{max} - 3$dB, T_{10dB} et T_{3dB}, temps total de dépassement de x cinquièmes de la dynamique du niveau vibratoire, $T_{x/5}$, fréquence et amplitude de modulation, f_{mod} et A_{mod}. * : $p < 0.05$

$L_{V_{eq}}$	$a_{rms,10Hz}$	$a_{rms,12.5Hz}$	$a_{rms,16Hz}$	$a_{rms,20Hz}$	$a_{rms,25Hz}$	$a_{rms,31.5Hz}$
0.68*	0.08	0.08	-0.09	0.00	-0.08	0.23

$a_{rms,40Hz}$	$a_{rms,50Hz}$	$a_{rms,63Hz}$	$a_{rms,80Hz}$	CF	T_{rise}	$T_{(1/5)}$
0.17	0.04	0.35	0.18	0.45	-0.21	-0.44

$T_{(2/5)}$	$T_{(3/5)}$	$T_{(4/5)}$	T_{3dB}	T_{10dB}	f_{mod}	A_{mod}
-0.50*	-0.47*	-0.18	-0.43	-0.33	0.22	0.02

Les réponses obtenues en session A n'ont pas été considérées, aucune différence significative n'ayant été décelée entre celles-ci.

5.5 Expérience II : La gêne due aux bruits et vibrations ferroviaires égalisés en durée

Les gênes partielles sonore et vibratoire ainsi que la gêne totale dues aux bruits et vibrations provenant d'enregistrements de différents passages de train ont été examinées durant cette seconde expérience.

5.5.1 Méthode expérimentale

Stimuli

Les stimuli sonores ont été obtenus à partir des enregistrements *in situ* réalisés durant la thèse (cf. chapitres 3 et 4, sections 3.1.2 et 4.2.3, respectivement). Les stimuli vibratoires utilisés durant l'Exp. I ont été de nouveau utilisés pour l'Exp. II.

De même que pour les stimuli vibratoires, les stimuli sonores ont été extraits des enregistrements sonores, égalisés en durée et en niveau de pression sonore équivalent (cf. chapitre 4, section 4.2.3) :

— Les enregistrements acoustiques ont tout d'abord été raccourcis à l'aide du logiciel libre Audacity®.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

— Afin que l'influence des paramètres énergétiques sur les réponses de gêne partielle sonore soit aussi faible que possible, les émergences énergétiques parmi les signaux acoustiques ont été limitées, de sorte à ce que la différence de niveau sonore $L_{10}-L_{50}$ soit contenue sous le seuil de 2dB(A).
— Enfin, les signaux ont été égalisés en niveau de pression sonore équivalent, à un niveau $L_{A_{eq}} = 58$dB(A).

Tout comme pour les stimuli vibratoires, une légère variation entre les durées des différents stimuli (inférieure à 0.3s) a été observée.

Procédure

L'expérience était composée d'une série de 19 stimuli composés du bruit et des vibrations provenant des enregistrements sonores et vibratoires, après modification de ces derniers.

Pour chaque combinaison de bruit et de vibrations, les participants étaient invités à évaluer successivement la gêne partielle due au bruit, la gêne partielle due aux vibrations, ainsi que la gêne totale due à la combinaison de bruit et de vibrations. Les participants indiquaient leurs réponses de gêne à l'aide de trois échelles continues, numérotées de 0 (« pas du tout gênant ») à 10 (« extrêmement gênant »).

L'ordre de présentation des stimuli était aléatoire. L'expérience durait environ 15 minutes.

Dispositif expérimental et participants

Les stimuli vibratoires étaient reproduits à l'aide du même dispositif expérimental que celui utilisé durant l'Exp. I. Les stimuli sonores étaient reproduits à l'aide d'un couple de haut-parleurs Tapco S5, placés de sorte à former un triangle équilatéral avec la tête du participant (cf. chapitre 4, section 4.2.3).

Quarante participants (23 hommes, 17 femmes ; âge moyen = 33.3 ans, écart-type = 14.3 ans) ont pris part à cette expérience. Ce groupe de participants était le même que celui ayant participé à l'expérience présentée en chapitre 3. Cette dernière et l'Exp. II avaient lieu le même jour. Les participants réalisaient l'expérience présentée en chapitre 3 en premier, puis l'Exp. II. Une pause était accordée entre chaque expérience, si nécessaire.

5.5.2 Résultats

Dans un premier temps, des analyses de la variance à mesures répétées (RM-ANOVAs) ont été menées sur les réponses de gêne partielle due au bruit (A_N), de gêne partielle due aux vibrations (A_V) et de gêne totale (A_T), avec le facteur **Stimulus**. Dans un second temps, de même que pour l'Exp. I, un certain nombre de descripteurs acoustiques ont été calculés pour chaque stimulus sonore afin d'évaluer leurs corrélations avec la gêne partielle due au bruit. Finalement, à l'aide des descripteurs acoustiques et vibratoires calculés pour chaque combinaison de bruit et de vibrations, l'influence des paramètres autres que le niveau global sur la gêne totale a été évaluée.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

Les résultats de l'Exp. II seront discutés conjointement aux résultats de l'Exp. I en section 5.6.2.

RM-ANOVAs à 1 facteur : facteur Stimulus

Trois RM-ANOVAs à 1 facteur ont été menées sur les réponses de A_N, A_V et A_T, avec le facteur **Stimulus** (19 niveaux pour ce facteur).

L'effet du **Stimulus** était significatif, sur les réponses de A_N [$F(18, 702) = 3.1352$, $p < 0.001$, $\eta^2 = 2.3\%$], sur les réponses de A_V [$F(18, 702) = 2.0231$, $p < 0.01$, $\eta^2 = 1.6\%$] et sur celles de A_T [$F(18, 702) = 2.3370$, $p = 0.001$, $\eta^2 = 1.4\%$]. La figure 5.5 présente les réponses moyennes de A_N, A_V et A_T obtenues durant l'Exp. II.

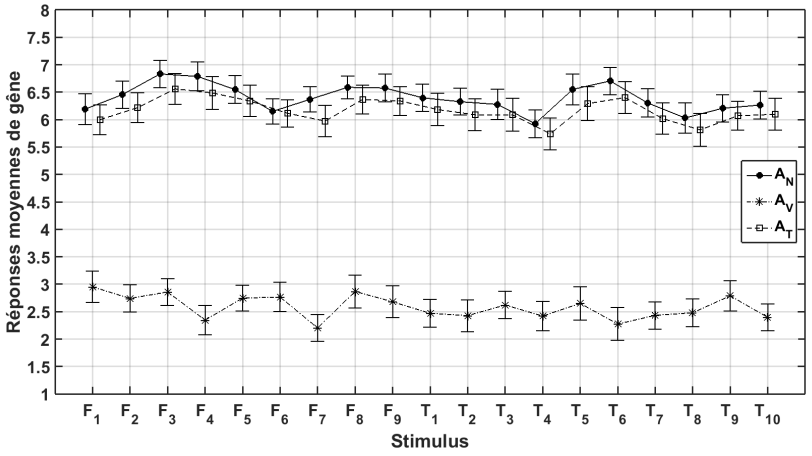


FIGURE 5.5 – Réponses moyennes de A_N, A_V et A_T obtenues durant l'Exp. II et erreurs-types associées.

Les proportions de variance, η^2, expliquées par le **Stimulus** dans chaque cas indiquent que l'effet du facteur était faible.

Calcul de descripteurs acoustiques

Plusieurs descripteurs utilisés dans la littérature concernant la gêne due au bruit ont été calculés de sorte à caractériser les stimuli sonores.

Les caractéristiques temporelles des signaux acoustiques étaient représentées par le temps de montée (T_{rise}) et la durée du signal définie à partir des seuils $L_{A_{max}} - 3$dB(A) (T_{3dB}) et $L_{A_{max}} - 10$dB(A) (T_{10dB}) (cf. [Terroir and Lavandier, 2014] pour une utilisation de l'indice T_{10dB} appliqué à l'évaluation de la qualité sonore des trains TGV).

La fréquence de modulation (f_{mod}) ainsi que l'amplitude de modulation (A_{mod}) étaient également inclus dans l'ensemble des descripteurs utilisés pour caractériser les signaux acoustiques.

Les niveaux de pression sonore dépassés durant 10% du temps (L_{10}), 50% du temps (L_{50}), et 90% du temps (L_{90}), ainsi que le facteur de crête CF ont été ajoutés à la liste

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

des descripteurs, afin de caractériser l'énergie des signaux acoustiques (cf. [Sharp et al., 2014b] pour un modèle de gêne totale due aux bruit et vibrations ferroviaires comprenant l'indice L_{10}). Cette précaution semble nécessaire, bien que les indices L_{10} et L_{50} aient été utilisés afin de limiter les émergences énergétiques des stimuli sonores, afin de caractériser au mieux les signaux acoustiques.

En supplément des descripteurs physiques des signaux acoustiques présentés ci-dessus, trois indices psychoacoustiques ont été utilisés.

La sonie (N) se calcule par la formule suivante :

$$N = \int_0^{24Barks} N' dz \tag{5.4}$$

N' étant la sonie spécifique, correspondant à l'excitation de la membrane basilaire calculée sur chaque bande de Bark, conformément à la norme ISO 532B ([Zwicker et al., 1991]).

L'indice $TETC$ (*Total Energy of Tonal Components* ou Énergie Totale des Composantes Tonales), proposé par [Trollé et al., 2014] dans le cadre de l'étude de la gêne due au bruit de tramway a également été rapporté parmi les variables contributives du modèle de [Sharp et al., 2014b]. La définition mathématique de cet indice est la suivante :

$$TETC_{z_1-z_2} = 10 \cdot \log_{10}\left(\int_{z_1-1}^{z_2} 10^{L(z)/10} dz\right) \tag{5.5}$$

où $L(z)$ correspond au niveau maximal des composantes tonales à l'intérieur de la bande critique z, en barks. Différents intervalles $[z1 : z2]$ ont été recommandés dans la littérature. Selon que le bruit étudié était le bruit de tramway ([Trollé et al., 2014]) ou le bruit ferroviaire ([Vallin et al., 2018]), l'indice proposé était respectivement $TETC_{12-24}$ ou $TETC_{16-24}$. Ces deux descripteurs ont donc été calculés.

Enfin, un dernier descripteur a été proposé par [Gille et al., 2016b], calculé à partir de l'indice de sonie instantannée $N(t)$. Cet indice, défini comme la valeur efficace de la dérivée temporelle de la sonie, vise à prendre en compte les fluctuations régulières ou irrégulières d'amplitude des signaux acoustiques et se calcule comme suit :

$$\sigma'(N) = \left(\frac{1}{T} \cdot \int_0^T \left(\frac{dN(t)}{dt}\right)^2 dt\right)^{\frac{1}{2}} \tag{5.6}$$

Ces trois descripteurs sont rapportés comme significativement corrélés à la gêne due aux bruits routier ou ferroviaire par différentes études (p. ex. [Vallin et al., 2018]).

Analyse des réponses de gêne partielle due aux vibrations

Parmi les descripteurs vibratoires présentés en section 5.4, seule l'accélération rms moyenne contenue dans la bande de tiers d'octave centrée sur 20Hz, $a_{rms,20Hz}$, était significativement corrélée avec les réponses de A_V ($r_{Pearson} = 0.55$, $p < 0.05$).

Bien que des variations de niveau vibratoire $L_{V_{eq}}$ aient été constatées également durant l'Exp. II (de l'ordre de $\approx$ 2dB), les réponses de gêne partielle vibratoire n'ont pas été significativement influencées par ce paramètre ($r_{Pearson} = 0.39$, $p > 0.05$), contrairement aux réponses de gêne vibratoire spécifique obtenues durant la session B de l'Exp. I.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

Analyse des réponses de gêne partielle due au bruit

Le tableau 5.4 présente les coefficients de corrélation de Pearson obtenus entre les paramètres décrits ci-dessus et les réponses de A_N.

Tableau 5.4 – Coefficient de corrélation $r_{Pearson}$ entre la gêne partielle due au bruit et les descripteurs des stimuli sonores : niveau sonore dépassé durant x% de la durée du stimulus, L_x, facteur de crête, CF, temps de montée, T_{rise}, durée définie à partir des seuils $L_{A_{max}} - 10$dB(A) et $L_{A_{max}} - 3$dB(A), T_{10dB} et T_{3dB}, fréquence et amplitude de modulation, f_{mod} et A_{mod}, sonie, N, valeur efficace de la dérivée temporelle de la sonie, $\sigma'(N)$ et énergie totale des composantes tonales, $TETC$. * : $p < 0.05$

L_{10}	L_{50}	L_{90}	CF	T_{rise}	T_{10dB}	T_{3dB}
0.49*	-0.20	0.02	0.09	-0.22	0.29	-0.16

f_{mod}	A_{mod}	N	$\sigma'(N)$	$TETC_{12-24}$	$TETC_{16-24}$
0.04	-0.44	0.51*	-0.24	0.19	-0.28

Analyse des réponses de gêne totale

Le tableau 5.5 présente les coefficients de corrélation de Pearson obtenus entre les indices vibratoires et acoustiques calculés pour chaque stimulus et les réponses de A_T.

Tableau 5.5 – Coefficient de corrélation $r_{Pearson}$ entre la gêne totale et les descripteurs acoustiques et vibratoires : accélération rms moyenne calculée dans chaque bande de tiers d'octave, a_{rms_i}, niveau vibratoire rms moyen, $L_{V_{eq}}$, facteur de crête (vibrations), CF_{vib}, temps de montée (vibrations), $T_{rise_{vib}}$, temps total de dépassement de x cinquièmes de la dynamique du niveau vibratoire, $T_{x/5}$, durées (vibratoires) définies à partir des seuils $a_{max} - 10$dB et $a_{max} - 3$dB, $T_{10dB_{vib}}$ et $T_{3dB_{vib}}$, fréquence et amplitude de modulation (vibrations), $f_{mod_{vib}}$ et $A_{mod_{vib}}$, niveau sonore dépassé durant x% de la durée du stimulus, L_x, facteur de crête (bruit), CF, temps de montée (bruit), T_{rise}, durée (signal sonore) définie à partir des seuils $L_{A_{max}} - 10$dB(A) et $L_{A_{max}} - 3$dB(A), T_{10dB} et T_{3dB}, fréquence et amplitude de modulation (bruit), f_{mod} et A_{mod}, sonie, N, valeur efficace de la dérivée temporelle de la sonie, $\sigma'(N)$ et énergie totale des composantes tonales, $TETC$. * : $p < 0.05$

$a_{rms,10Hz}$	$a_{rms,12.5Hz}$	$a_{rms,16Hz}$	$a_{rms,20Hz}$	$a_{rms,25Hz}$	$a_{rms,31.5Hz}$	$a_{rms,40Hz}$	$a_{rms,50Hz}$	$a_{rms,63Hz}$
0.13	-0.28	0.15	0.37	0.60*	0.16	0.16	0.02	0.06

$a_{rms,80Hz}$	$L_{V_{eq}}$	CF_{vib}	$T_{rise_{vib}}$	$T_{(1/5)}$	$T_{(2/5)}$	$T_{(3/5)}$	$T_{(4/5)}$	$T_{3dB_{vib}}$
-0.21	-0.06	0.02	-0.34	0.21	0.26	0.01	0.00	0.29

$T_{10dB_{vib}}$	$f_{mod_{vib}}$	$A_{mod_{vib}}$	L_{10}	L_{50}	L_{90}	CF	T_{rise}	T_{3dB}
0.19	0.16	-0.11	0.43	-0.09	0.01	0.14	-0.21	-0.05

T_{10dB}	f_{mod}	A_{mod}	N	$\sigma'(N)$	$TETC_{12-24}$	$TETC_{16-24}$	A_V	A_N
0.27	0.08	-0.47*	0.54*	-0.24	0.14	-0.29	0.00	0.96*

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

5.6 Discussion

5.6.1 L'influence du contenu spectral sur A_V

Une tâche de comparaison par paires entre plusieurs stimuli vibratoires artificiels a été réalisée par 20 participants afin d'étudier l'influence du contenu spectral vibratoire sur la gêne due aux vibrations ferroviaires. Une analyse a ensuite été menée pour déterminer un indice pertinent de la probabilité de gêne associée à une paire de stimuli vibratoires.

Au vu des résultats des 5 RM-ANOVAs à 1 facteur réalisées à partir des scores de dissimilarité, avec le facteur **Paire**, il semble que les modifications de contenu spectral apportées aux 5 enregistrements de passage de train aient été perçues. En effet, dans chacune des 5 sessions, un effet significatif du facteur sur les dissimilarités perçues par les participants entre les stimuli comparés deux-à-deux, a été décelé.

Les pondérations fréquentielles W_b, W_k et W_m, recommandées par les normes ISO 2631 et BS 6472, se sont révélées inaptes à prédire la gêne due aux stimuli vibratoires présentés en paire, à accélération rms constante. En effet la différence de niveau vibratoire pondéré de chaque stimulus n'était pas corrélée avec la probabilité d'être plus gêné par l'un ou l'autre, pour aucune de ces trois pondérations.

En laboratoire, Howarth et Griffin ont également montré que l'utilisation de la pondération W_b n'améliorait pas significativement la prédiction de la gêne due aux vibrations ferroviaires provenant de différents enregistrements de train de contenus fréquentiels variés ([Howarth and Griffin, 1991]).

Les résultats d'une enquête *in situ* menée par Klæboe et ses collègues concernant la gêne vibratoire due aux trafics routier et ferroviaire, montrent que la pondération W_m est pertinente pour la gêne due aux vibrations des trafics routier et ferroviaire ([Klæboe et al., 2003]). En effet, à niveaux pondérés équivalents, le type de source vibratoire semble ne pas avoir d'influence sur la gêne mesurée. Ce résultat n'est pas retrouvé dans l'analyse menée par Woodcock et ses collègues ([Woodcock et al., 2016]) sur les données provenant de l'enquête *in situ* rapportée par Waddington et ses collaborateurs ([Waddington et al., 2014]). En effet, l'analyse montre une influence significative du type de source (vibrations ferroviaires ou vibrations produites par un engin de chantier) sur la gêne due aux vibrations, malgré l'utilisation de la pondération fréquentielle W_m. L'explication proposée par Woodcock et ses collègues, selon laquelle la pondération fréquentielle W_m serait mise en défaut dès lors que les vibrations proviennent de sources très distinctes, n'est pas confirmée par les résultats de la présente étude. En effet, dans le cas de cette dernière, l'ensemble des signaux vibratoires utilisés était dû à du trafic ferroviaire et avait été enregistrés en un même site.

Les résultats de l'expérience préliminaire font apparaître des corrélations significatives ($0.40 < r_{Pearson} < 0.71$) entre les probabilités de gêne vibratoire et le niveau vibratoire basse fréquence (de 10Hz à 25Hz) et haute fréquence (de 63Hz à 80Hz). En laboratoire, [Woodcock et al., 2014] montrent également que deux bandes fréquentielles sont impliquées dans la formation de la gêne due aux vibrations : de 4Hz à 16Hz, et de 32Hz à 64Hz.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

5.6.2 L'influence des paramètres autres que $L_{A_{eq}}$ et $L_{V_{eq}}$ sur la gêne due aux bruit et vibrations ferroviaires

Deux expériences ont été réalisées afin d'étudier la gêne due à 19 enregistrements de bruits et de vibrations associés aux passages de trains de Fret (9 passages) et de TER (10 passages), égalisés en durée ainsi qu'en niveaux sonore et vibratoire.

Durant la première expérience (Exp. I), les participants évaluaient uniquement la gêne spécifique due aux stimuli vibratoires seuls. Les 19 stimuli étaient présentés à un niveau de 100dB (V_1) puis à un niveau de 108dB (V_2).

Durant la seconde expérience (Exp. II), les participants évaluaient les 19 combinaisons de bruit et de vibrations en termes

— de gêne partielle vibratoire (A_V).
— de gêne partielle sonore (A_N).
— et de gêne totale (A_T).

Le niveau de bruit durant l'Exp. II était de 58dB(A) et le niveau vibratoire de 100dB.

L'influence des paramètres autres que $L_{V_{eq}}$ sur la gêne due aux vibrations

Les résultats de la RM-ANOVA à 1 facteur menée sur les réponses de A_V spécifique due au niveau vibratoire V_1 indiquent que l'effet du facteur **Stimulus** n'était pas significatif.

Dans le cas de la gêne spécifique due au niveau vibratoire V_2, des corrélations significatives ont été détectées entre A_V et le niveau vibratoire $L_{V_{eq}}$ ainsi qu'entre A_V et la durée du signal vibratoire, définie par les indices $T_{(2/5)}$ et $T_{(3/5)}$.

Une analyse des corrélations entre ces trois descripteurs révèle une redondance dans l'information apportée par ceux-ci, comme l'indiquent les coefficients de Pearson calculés entre $L_{V_{eq}}$ et $T_{(2/5)}$ ($r = -0.72$, $p < 0.05$), et entre $L_{V_{eq}}$ et $T_{(3/5)}$ ($r = -0.63$, $p < 0.05$).

Afin de construire un modèle de gêne spécifique due aux vibrations, une régression linéaire multiple pas-à-pas est effectuée. Pour qu'une variable prédictive soit incluse au modèle, le critère est que la valeur estimée du coefficient associé à cette variable soit significative. Les résultats de la régression sont présentés en tableau 5.6.

Tableau 5.6 – Résultats de la régression linéraire multiple pas-à-pas. *coef. std* : coefficients standardisés. * : $p < 0.05$; ** : $p < 0.01$; *** : $p < 0.001$

Prédicteurs	Constante	$L_{V_{eq}}$ (dB) (*coef. std*)	f_{mod} (Hz) (*coef. std*)	R^2_{adjust}	Err. type d'estimation
Step 1 coefficient				0.43	0.1959
Valeur estimée du coefficient	-23.3991^{**}	0.2767^{**} (0.6824)			
Erreur-type	7.7062	0.0719 (0.1773)			
Step 2 coefficients				0.53	0.1779
Valeur estimée du coefficient	-26.2311^{**}	0.3018^{***} (0.7443)	0.1757^{*} (0.3512)		
Erreur-type	7.1221	0.0663 (0.1636)	0.0818 (0.1636)		

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

Dans une expérience en laboratoire, Woodcock et ses collègues ont demandé à des participants de comparer deux à deux différents enregistrements de passages de train, en termes de dissimilarité perçue ([Woodcock et al., 2014]). À l'issue de l'expérience, un espace perceptif a pu être construit, permettant ainsi d'isoler 4 dimensions principales responsables de l'expression de la gêne. Un modèle de gêne vibratoire spécifique a ainsi pu être proposé ($R^2 = 0.92$, $p < 0.001$) :

$$A_V = -0.40 + 4.57 \cdot a_{rms,16Hz} + 3.18 \cdot a_{rms,32Hz} + 0.02 \cdot T_{10dB} + 0.02 \cdot f_{mod} \tag{5.7}$$

$a_{rms,16Hz}$ et $a_{rms,32Hz}$ étant respectivement l'accélération vibratoire rms moyenne contenue dans les 2 bandes de tiers d'octave centrées sur 16Hz et 32Hz.

Les auteurs préconisent de mener d'autres expériences pour confirmer l'influence de la fréquence de modulation f_{mod} sur la gêne vibratoire spécifique. Dans le cadre des signaux vibratoires utilisés durant cette thèse, bien que cette variable soit également incluse au modèle élaboré *via* la régression multiple pas-à-pas, les variations de ce paramètre ne semblent pas impacter grandement les réponses de A_V mesurées (cf. figure 5.6).

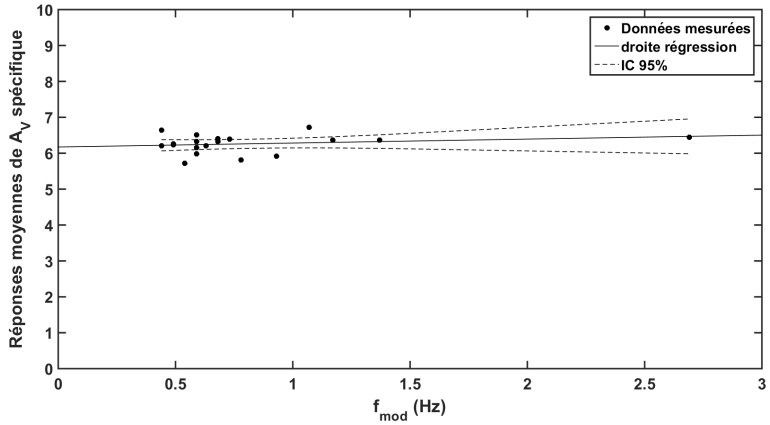


FIGURE 5.6 – Relation entre la fréquence de modulation des stimuli vibratoires, f_{mod}, et les réponses moyennes de gêne vibratoire spécifique.

Dans le cas de la gêne partielle due au niveau vibratoire V_1, les résultats montrent que ni le niveau vibratoire vibratoire, $L_{V_{eq}}$, ni la fréquence de modulation, f_{mod}, n'étaient significativement corrélées avec les réponses de A_V obtenues. Ce résultat pourrait s'expliquer par un phénomène de masquage dû à la présence de bruit.

Cependant, les résultats de l'expérience en laboratoire menée par Sharp et ses collègues à partir de combinaisons de bruit et de vibrations ferroviaires font également apparaître une influence de la fréquence de modulation des vibrations f_{mod} sur la gêne totale recueillie, suggérant que ce paramètre était perçu malgré la présence de bruit ([Sharp et al., 2014b]).

Il est possible en définitive que le niveau de vibrations $V_1 = 100$dB, n'ait pas été suffisamment élevé dans notre expérience pour permettre aux participants de se baser sur les paramètres autres que le niveau vibratoire global afin d'évaluer la gêne vibratoire.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

L'influence des paramètres autres que $L_{A_{eq}}$ sur la gêne partielle due au bruit

Le résultat de la RM-ANOVA à 1 facteur menée sur les réponses de A_N montrent que l'effet du facteur **Stimulus** était significatif.

Des corrélations significatives ont été détectées entre A_N et l'indice psychoacoustique de sonie (N). Ce résultat était attendu, la sonie étant rapportée dans la littérature comme une base de l'estimation de la gêne sonore, notamment due au bruit routier ([Kaczmarek and Preis, 2010]).

L'indice L_{10} était significativement corrélé aux réponses de A_N. Celui-ci était mentionné parmi les variables prédictives du modèle de gêne totale établi par Sharp et ses collègues, de même que l'indice $TETC$ ([Sharp et al., 2014b]). Aucune corrélation n'a en revanche été détectée entre les descripteurs $TETC_{12-24}$ et $TETC_{16-24}$ et les réponses de A_N mesurées. Ceci pourrait être expliqué par le fait que les stimuli sonores ne comportaient pas suffisamment de composantes tonales, telles que des bruits de crissement.

De même, l'indice $\sigma'(N)$ n'était pas corrélé aux réponses de A_N. La dérivée temporelle de la sonie a été rapportée parmi les indices corrélés à la gêne due au bruit ferroviaire lors d'une étude en laboratoire ([Vallin et al., 2018]). Cependant, la même étude a montré que cet indice n'était plus corrélé avec les réponses de gêne dès lors que le niveau de pression sonore équivalent était contrôlé. En conséquence, les résultats de notre expérience confirment les conclusions de la précédente étude.

L'influence des paramètres autres que $L_{A_{eq}}$ et $L_{V_{eq}}$ sur la gêne totale

Le résultat de la RM-ANOVA à 1 facteur menée sur les réponses de A_T montrent que l'effet du facteur **Stimulus** était significatif.

Des corrélations significatives ont été détectées entre A_T et les descripteurs vibratoires et acoustiques suivants : l'accélération vibratoire rms moyenne contenue dans la bande de tiers d'octave centrée sur 25Hz, $a_{rms,25Hz}$, l'amplitude de modulation des stimuli sonores, A_{mod}, ainsi que la sonie.

Au vu des réponses moyennes de gêne obtenues durant l'Exp. II, il semble cependant manifeste que les participants ont le plus souvent estimé la gêne totale en se basant sur la gêne partielle dominante, c-à-d la gêne partielle due au bruit (cf. figure 5.7). En effet, une forte corrélation a été détectée entre les réponses de A_T et celles de A_N ($r_{Pearson} = 0.96$, $p < 0.05$). Des observations similaires ont été faites concernant le rapprochement entre la gêne totale et la gêne partielle dominante, lors d'enquêtes *in situ* (p. ex. [Botteldooren and Verkeyn, 2002]) ou d'études en laboratoire (p. ex. [Klein et al., 2017]).

Hormis la sonie, aucun des descripteurs corrélés avec les réponses de A_V ou de A_N n'ont révélé de corrélation significative avec les réponses de A_T.

Le modèle de gêne totale due aux bruit et vibrations ferroviaires construit par Sharp et ses collègues faisait intervenir la fréquence de modulation du signal vibratoire, f_{mod}, ainsi que l'indice L_{10}, parmi les 4 variables du modèle. Une des raisons pour que ces indices

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

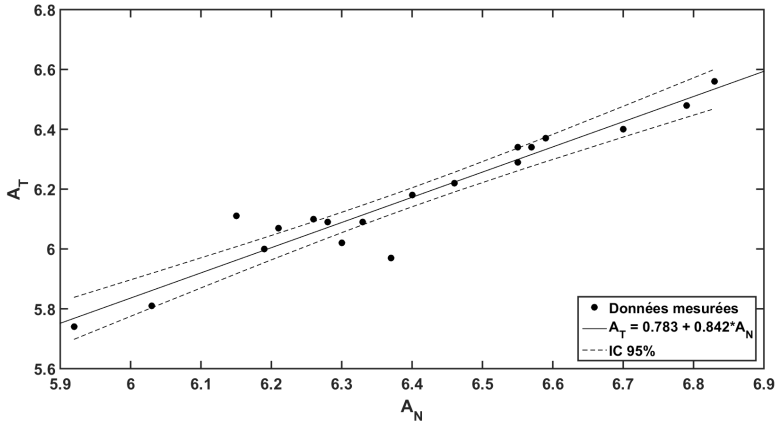


FIGURE 5.7 – Relation entre les réponses moyennes de gêne totale A_T et de gêne partielle due au bruit A_N.

ne soient pas corrélés avec les réponses de A_T provient du manque de variabilité parmi les enregistrements réalisés durant cette thèse, dû au choix d'un unique site de mesure. La sélection de différents logements pour réaliser d'autres enregistrements de bruit et de vibrations ferroviaires aurait permis d'obtenir davantage de signaux et donc une variabilité plus grande des paramètres temporels et spectraux. En raison de la complexité de mise en place du dispositif de mesure chez des riverains de voies ferrées, il n'a pas été possible d'obtenir un échantillon suffisamment varié de stimuli pour évaluer l'influence notamment de la fréquence de modulation des signaux vibratoires, f_{mod}, sur la gêne totale.

5.7 Conclusion

L'objectif des travaux présentés dans ce chapitre était d'étudier l'influence des paramètres autres que le niveau global sur la gêne due aux bruit et vibrations du trafic ferroviaire. En particulier, l'expérience préliminaire mise en place avait pour but d'étudier le rôle du contenu spectral des vibrations ferroviaires dans la gêne vibratoire ressentie par les participants. Deux expériences ont été conduites en se basant sur des enregistrements de bruit et de vibrations ferroviaires égalisés en durée et présentés à niveaux sonore et vibratoire constants afin d'évaluer l'impact des paramètres autres que les niveaux de bruit et de vibrations globaux sur les gênes partielles sonore et vibratoire et sur la gêne totale.

Durant l'expérience préliminaire, cinq sessions comportant chacune 4 stimuli vibratoires créés artificiellement ont été réalisées par 20 participants. Les 4 stimuli d'une même session consistaient en des signaux stationnaires créés à partir du spectre vibratoire d'un passage de train enregistré *in situ*, non modifié (**O**), après application d'un gain de +10dB en basses fréquences (**BF**), après application d'un gain de +10dB en moyennes fréquences (**MF**) et après application d'un gain de +10dB en hautes fréquences (**HF**). Durant chaque session, les participants devaient comparer deux à deux les 4 stimuli vibratoires et indiquer, pour chaque paire : 1) le stimulus le plus gênant et 2) la dissimilarité perçue entre les deux stimuli.

Les indices vibratoires de la littérature (VDV_w, a_{rms_w}, v_{rms}) ne semblent pas appro-

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

priés dans le cas de signaux égalisés en durée et en niveau vibratoire moyen pour estimer la probabilité de gêne vibratoire. Les résultats font apparaître un faible degré de consensus dans l'évaluation de la gêne vibratoire par les participants, rendant complexe l'étude de l'influence du contenu spectral vibratoire sur la gêne ressentie. Néanmoins, les probabilité de gêne calculées à partir des choix des participants étaient corrélées significativement avec l'accélération vibratoire moyenne contenue dans différentes bandes de tiers d'octave. Deux plages fréquentielles semblent mises en jeu dans l'évaluation de la gêne vibratoire, la première étant comprise entre 10Hz et 25Hz et la seconde étant comprise entre 63Hz et 80Hz.

Les 19 enregistrements de bruit et de vibrations ferroviaires réalisés durant cette thèse ont été exploités durant 2 expériences visant à étudier l'influence des paramètres autres que le niveau vibratoire global sur la gêne spécifique due aux vibrations (Exp. I) ainsi que sur les gênes partielles sonore et vibratoire et sur la gêne totale (Exp. II). Les enregistrements ont été présentés aux participants après avoir été égalisés en durée ainsi qu'en niveaux sonore et vibratoire. Durant l'Exp. I, les vibrations seules étaient reproduites et deux niveaux vibratoires étaient considérés : 100dB (Session A) et 108dB (Session B). Durant l'Exp. II, le bruit et les vibrations étaient reproduits à niveaux sonore et vibratoire constants : 58dB(A) et 100dB, respectivement.

Les résultats de l'Exp. I indiquent que les variations de niveau vibratoire résiduelles lors de la reproduction des stimuli ont majoritairement guidé les réponses des participants, révélant peu d'influence des paramètres autres que le niveau global sur la gêne vibratoire. L'influence sur la gêne de la fréquence de modulation, f_{mod}, des signaux vibratoires doit être étudiée durant de futures expériences en laboratoire, à partir d'enregistrements de vibrations ferroviaires présentant une plus grande variabilité de ce paramètre.
Les résultats de l'Exp. II montrent que les participants ont utilisé principalement la sonie des différents stimuli sonores pour évaluer la gêne partielle due au bruit ($N \in [9.7 : 11.5]$ sones). Une forte corrélation est observée entre la gêne totale exprimée par les participants et la gêne partielle due au bruit. Dans le cadre des stimuli utilisés durant ces travaux, la gêne partielle due aux vibrations ne semble pas être influencée par les paramètres autres que le niveau global. De plus, à la différence de l'Exp. I, les participants n'ont pas pu réaliser leurs réponses en se basant sur les variations résiduelles de niveau vibratoire $L_{V_{eq}}$. Davantage d'études en laboratoire sont nécessaires pour clarifier l'impact du niveau de restitution des vibrations sur l'évaluation de la gêne vibratoire due à des stimuli égalisés en durée et à $L_{V_{eq}}$ constant, et pour examiner un potentiel masquage dû à la présence de bruit.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

Principaux résultats obtenus

- Les pondérations fréquentielles recommandées dans le cadre de l'étude de la gêne due aux vibrations ferroviaires (W_b, W_k, W_m) ne permettent pas d'estimer la gêne due aux stimuli vibratoires artificiels créés à partir des enregistrements de vibrations ferroviaires réalisés *in situ*.
- La gêne exprimée par les participants est corrélée à l'accélération vibratoire moyenne dans les bandes de tiers d'octave comprises entre 10Hz et 25Hz ainsi qu'entre 63Hz et 80Hz.
- Pour des stimuli vibratoires artificiels créés à partir des enregistrements de vibrations ferroviaires réalisés *in situ* (variations restreintes de contenu fréquentiel), la prédiction de la gêne vibratoire n'est pas évidente, du fait d'un faible degré de consensus parmi les participants.
- Lorsque de faibles variations du niveau vibratoire $L_{V_{eq}}$ existent entre les stimuli vibratoires obtenus à partir des enregistrements disponibles, l'évaluation de la gêne vibratoire spécifique est principalement basée sur ce paramètre, indiquant une faible influence des paramètres autres que le niveau global.
- La gêne partielle sonore due à des stimuli de courte durée (10s) composés d'enregistrements de bruit et de vibrations ferroviaires est fortement influencée par les variations de sonie ($N \in [9.7 : 11.5]$ sones).
- La gêne totale due à des stimuli de courte durée (10s) composés d'enregistrements de bruit et de vibrations ferroviaires est majoritairement influencée par la gêne partielle due au bruit, dans le cadre des niveaux sonore et vibratoire testés ($L_{A_{eq}} = 58$dB(A), $L_{V_{eq}} = 100$dB).

Ce chapitre a permis d'approfondir la compréhension des mécanismes associés à la gêne due aux bruit et vibrations ferroviaires. Dans le cadre des signaux acoustiques et vibratoires utilisés dans ces travaux, la gêne due aux vibrations ferroviaires semble être principalement liée au niveau vibratoire non pondéré, $L_{V_{eq}}$. Les résultats montrent notamment que les pondérations fréquentielles majoritairement utilisées dans ce contexte (pondérations W_b, W_k, W_m) sont inaptes à prédire la gêne vibratoire. À durée égale (10s) et à niveaux sonore et vibratoire constants (resp. 58dB(A) et 100dB), la gêne totale est fortement influencée par la gêne partielle due au bruit. Afin d'évaluer cette dernière, les participants semblent se baser sur les variations de sonie, davantage que sur la variation d'autres indices, entre les stimuli sonores utilisés durant ces travaux. La gêne partielle due aux vibrations est quant à elle très peu modifiée par la variation des paramètres autres que le niveau global entre les stimuli vibratoires.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

Chapitre 6

Conclusion générale

Cette thèse avait pour objectif principal de contribuer à la compréhension des mécanismes perceptifs associés à la gêne due au bruit et aux vibrations du trafic ferroviaire. La littérature est conséquente du point de vue de l'étude de la gêne due au bruit des transports et notamment au bruit ferroviaire (p. ex. [Miedema and Vos, 1998], [Miedema and Oudshoorn, 2001], [Gille et al., 2016a], [Vallin et al., 2018]). La gêne due aux vibrations ferroviaires a fait l'objet d'enquêtes *in situ* (p. ex. [Klæboe et al., 2003], [Zapfe et al., 2009]) et d'études en laboratoire (p. ex. [Howarth and Griffin, 1988], [Woodcock et al., 2014]). Des enquêtes *in situ* ont été réalisées, durant lesquelles la gêne due au bruit ferroviaire ainsi que la gêne due aux vibrations ferroviaires étaient évaluées ([Klæboe et al., 2003], [Gidlöf-Gunnarsson et al., 2012], [Waddington et al., 2014]). Dans l'ensemble, ces enquêtes ont montré que le niveau de vibrations pouvait influencer la gêne sonore et, inversement, que le niveau de bruit pouvait influencer la gêne vibratoire. Le peu d'études conduites en laboratoire pour mettre en évidence de telles interactions ont mené à des résultats contradictoires ([Howarth and Griffin, 1990], [Paulsen and Kastka, 1995]). En vue de mieux comprendre les phénomènes observés *in situ*, davantage d'études en laboratoire avec les protocoles expérimentaux adéquats étaient nécessaires.

Des enregistrements de bruit et de vibrations, réalisés à l'intérieur d'un logement jouxtant une voie ferrée, ont été utilisés dans le but d'obtenir, en conditions contrôlées, des réponses de gêne sonore, de gêne vibratoire et de gêne totale due à la co-exposition au bruit et aux vibrations. Deux méthodes ont été envisagées pour obtenir les réponses de gênes partielles sonore et vibratoire et de gêne totale dues à un même passage de train : en recueillant les trois réponses directement après la présentation du passage ou en séparant l'expérience en plusieurs sessions dédiées à chaque type de gêne. Les réponses de gêne obtenues *via* les deux méthodes étaient similaires. La méthode consistant à recueillir les trois réponses de gêne directement après que le passage de train ait été présenté a été adoptée pour les expériences menées durant ces travaux de thèse. Celle-ci permet en effet de réduire considérablement le temps total d'exposition des participants durant l'expérience.

Dans la littérature, l'exposition au bruit et aux vibrations est majoritairement caractérisée par les niveaux sonore ($L_{A_{eq}}$) et vibratoire ($L_{V_{eq}}$) globaux. Une première expérience a donc été réalisée afin d'évaluer l'influence de ces paramètres sur la gêne due aux bruit et vibrations ferroviaires. Le protocole expérimental adopté devait permettre en particulier de tester des hypothèses concernant l'origine des différences constatées entre les

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

résultats de la littérature à ce sujet. Ces hypothèses concernaient les différentes plages de niveaux sonores et vibratoires ainsi que les différents types de train utilisés dans les 2 expériences en laboratoire concernées ([Howarth and Griffin, 1990], [Paulsen and Kastka, 1995]). Il est apparu que, pour les niveaux de bruit et de vibrations considérés, la gêne due aux vibrations était légèrement influencée par le niveau de bruit, à fort niveau vibratoire uniquement. Aucune influence du niveau de vibrations sur la gêne due au bruit n'a été détectée. Ces résultats ont été obtenus à partir d'un enregistrement de passage de train de Fret et à partir d'un enregistrement de passage de TER, pour lesquels une différence de contenu fréquentiel vibratoire était observée. Les résultats indiquaient également que, pour les plages de niveaux sonores et vibratoires sélectionnées, la gêne totale était davantage influencée par le bruit que par les vibrations. Enfin, l'influence des niveaux de bruit et de vibrations sur la gêne sonore et sur la gêne vibratoire a été caractérisée par une relation d'équivalence subjective donnant le niveau sonore ($L_{A_{eq}}$) équivalent, en terme de gêne, à un certain niveau vibratoire ($L_{V_{eq}}$).

La diversité des indicateurs physiques utilisés dans la littérature pour caractériser le niveau d'exposition vibratoire ainsi que la pertinence contestée des principales pondérations fréquentielles vibratoires révèlent un manque d'appréciation du rôle du contenu spectral vibratoire sur l'intensité vibratoire perçue (et *a fortiori* sur la gêne vibratoire). Une expérience a été réalisée à partir de stimuli vibratoires artificiels afin de mieux comprendre l'influence des niveaux de vibrations dans chaque bande fréquentielle comprise entre 12.5Hz et 80Hz. Bien qu'un fort dissensus ait été observé parmi les réponses des participants, il a été possible d'isoler plusieurs bandes fréquentielles qui semblaient jouer un rôle dans la formation de la gêne vibratoire, à savoir les bandes de tiers d'octave comprises entre 10Hz et 25Hz ainsi que les bandes de tiers d'octave de fréquences centrales 63Hz et 80Hz.

La quasi-totalité des enregistrements réalisés durant ces travaux de thèse a été exploitée pour mener à bien les expériences visant à déterminer les indicateurs physiques, autres que le niveau (sonore ou vibratoire) global, ayant une influence sur la gêne (sonore, vibratoire et totale). Les enregistrements ont été ramenés à une durée de 10s afin de s'abstraire de toute influence de ce paramètre sur les résultats.

La gêne vibratoire due aux enregistrements vibratoires limités en durée a été évaluée en laboratoire, à niveau vibratoire quasi-constant. Un écart de 1 à 2 JND (*Just Noticeable Difference*) a en effet été constaté entre le niveau vibratoire le plus élevé et le niveau vibratoire le moins élevé, lors de la restitution des stimuli. Ces variations de niveau vibratoire expliquaient une grande partie de la variance dans les résultats, ainsi que la fréquence de modulation dans une bien moindre mesure.

Les gênes partielles sonore et vibratoire et la gêne totale en situation de co-exposition au bruit et aux vibrations ferroviaires a finalement été recueillie en laboratoire, à partir des enregistrements limités en durée et égalisés en niveaux de bruit et de vibrations globaux. Très peu de variations ont été observées parmi les réponses obtenues, indiquant une influence très marginale des paramètres autres que les niveaux sonore et vibratoire globaux. Concernant la gêne partielle due au bruit, les différences entre les réponses de gêne moyennes étaient significatives mais uniquement expliquées par les différences limitées de sonie entre les stimuli. Enfin, la gêne totale était très fortement corrélée à la gêne partielle

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

sonore, semblant indiquer que les participants basaient leurs réponses sur le modèle de gêne dominante.

L'ensemble des enregistrements de bruit et de vibrations ferroviaires ayant permis d'aboutir à ces résultats a été réalisé à l'intérieur d'un seul et même logement. La mise en place du protocole de mesure *in situ* de passages de train requiert plusieurs étapes (sélection d'une portion de ligne ferroviaire, prise de contact avec les résidents à proximité de la voie ferrée, mise en place du dispositif de mesure, vérification de la validité des signaux mesurés) prenant chacune plusieurs semaines. Cette contrainte de durée explique le choix fait concernant le lieu de mesure. Ce choix a néanmoins eu pour effet de réduire fortement la variabilité des paramètres tels que le type de train ou le contenu fréquentiel vibratoire entre les différents signaux utilisés.

Perspectives

Afin de pouvoir adopter des politiques de transport public appropriées dans le contexte du développement du réseau ferroviaire et en vue d'instaurer des réglementations adaptées, en zone urbaine en particulier, ces phénomènes doivent être mieux appréhendés. Les travaux menés durant cette thèse contribuent aux recherches menées dans cet objectif. Des lacunes demeurent toutefois qui ne peuvent être comblées sans davantage de données mesurées *in situ* et en laboratoire.

Tout d'abord, le protocole expérimental de recueil en laboratoire des gênes dues au bruit et aux vibrations et de la gêne totale a été validé dans le cadre de l'étude de l'influence des niveaux de bruit et de vibrations sur la gêne. Pour confirmer la validité du protocole proposé, il serait intéressant de mener une expérience utilisant des stimuli sonores et vibratoires plus variés et égalisés en niveau global.

Les interactions perceptives détectées au cours de cette thèse entre le niveau de bruit et la gêne vibratoire n'interviennent qu'à partir d'un certain niveau vibratoire. Cette observation soulève l'importance du choix des plages de variation des niveaux sonores et vibratoires et la nécessité d'étudier en détail l'influence de ce facteur sur l'apparition des phénomènes d'interaction. Les contraintes liées au dispositif expérimental n'ont pas permis de tester des niveaux de bruit inférieurs à 44dB(A). Or, si ce niveau d'exposition sonore semble trop faible pour occasionner de la gêne, les résultats d'une étude montrent qu'une interaction existe, pour des niveaux de l'ordre de 33dB(A). À titre informatif, la démarche expérimentale adoptée dans ce travail de thèse pourrait donc être utilisée pour étudier l'influence sur la gêne due au bruit et aux vibrations de niveaux de bruit inférieurs à 44dB(A).

Concernant le jeu d'enregistrements collectés durant la thèse, celui-ci pourrait constituer une base pour un échantillon plus conséquent de signaux acoustiques et vibratoires associés à des passages de train enregistrés à l'intérieur de différents logements exposés au bruit et aux vibrations ferroviaires. Une telle banque de signaux, associée aux détails relatifs aux passages de train enregistrés (type de train, vitesse) et aux lieux de mesure (distance à la voie, caractéristiques du bâtiment et du logement), permettrait notamment de sélectionner des passages présentant des caractéristiques (énergétique, temporelle, spectrale) suffisamment différentes pour une expérience en laboratoire et d'évaluer l'influence

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

de ces dernières sur la gêne mesurée.

En ce qui concerne le dispositif expérimental de reproduction en laboratoire des vibrations ferroviaires enregistrées *in situ*, des améliorations peuvent y être apportées pour permettre un contrôle plus fin du niveau vibratoire reproduit. Durant cette thèse, afin de compenser la fonction de réponse en fréquence du banc vibratoire, une seule mesure de celle-ci était effectuée, avant le lancement de l'expérience. Or, il a pu être observé que la masse corporelle des participants avait une influence sur la fonction de réponse en fréquence mesurée, donnant parfois lieu à des variations non souhaitées du niveau vibratoire. Pour de futures expériences faisant suite à ces travaux de thèse, une mesure individuelle de la fonction de réponse en fréquence du banc vibratoire serait utile.

Enfin, l'obtention de données de gêne partielle due au bruit, de gêne partielle due aux vibrations et de gêne totale, recueillies *in situ* serait utile pour évaluer la qualité prédictive des modèles de la littérature. Une telle évaluation est aujourd'hui manquante et serait d'intérêt pour estimer l'impact du trafic ferroviaire sur la qualité de vie des populations exposées. De plus, les données mesurées *in situ* reflètent la gêne ressentie sur une période de long terme. Celle-ci doit être considérée conjointement aux données de gêne à court terme obtenues en laboratoire afin de pouvoir prédire la réaction des habitants exposés aux bruit et vibrations ferroviaires.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

Annexe A

Restitution des signaux vibratoires

Une procédure de filtrage des signaux vibratoires, avant restitution de ceux-ci sur le banc vibratoire, est adoptée. Cette procédure vise à prendre en compte l'effet de la fonction de transfert mécanique du banc vibratoire sur la reproduction des stimuli. L'algorithme de filtrage utilisé est présenté en annexe de la thèse de Maël Amari ([Amari, 2009]).

Les étapes de la procédure de correction des signaux vibratoires sont les suivantes :

— Obtention de la fonction de réponse en fréquence (FRF) du filtre souhaité en inversant la FRF du banc vibratoire (cf. figure A.1).
— Construction du filtre à réponse impulsionnelle (calcul des coefficients b_i).
— Filtrage des signaux vibratoires.

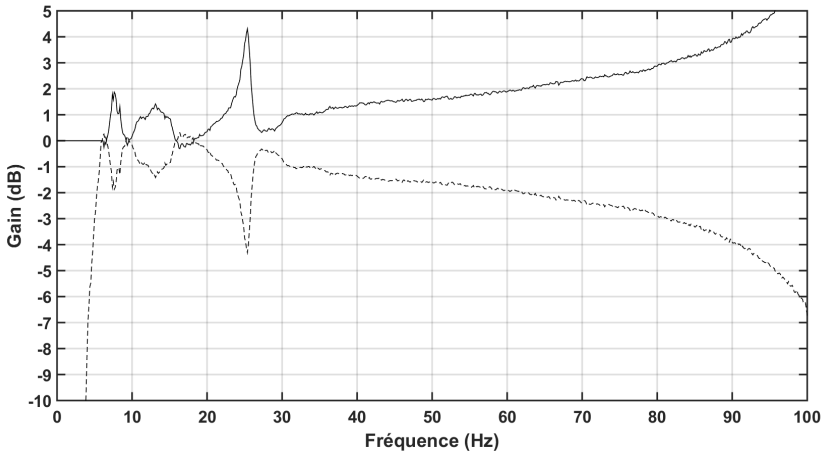


FIGURE A.1 – Fonction de transfert du banc vibratoire (trait discontinu) et filtre correctif (trait continu).

Les basses fréquences (inférieures à 6Hz) sont ignorées dans la construction du filtre correctif (forçage des valeurs à 0dB). D'une part les contenus fréquentiels des signaux vibratoires étaient trop faibles sur cette plage pour être considérés. D'autre part cette précaution permet d'éviter une amplification trop importante du niveau vibratoire lors de la reproduction.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

A.1 Réglage du gain de l'amplificateur

Les signaux vibratoires filtrés selon la procédure décrite précédemment sont transmis au système d'amplification du banc vibratoire à l'aide d'une carte son Gina 24 (Echo Digital Audio, Santa Barbara, Californie, www.echoaudio.com). Les signaux sont amplifiés par un amplificateur de puissance LDS PA-500L (B&K, Nærum, Danemark, www.bksv.com), avant d'être reproduits par le banc vibratoire.

Le modèle d'amplificateur utilisé ne possédant pas de contrôle fin du gain appliqué, une procédure de réglage est requise pour chaque participant, avant le début de l'expérience :

1. Une fois que le participant a pris position sur le banc vibratoire, un signal sinusoïdal est reproduit *via* la carte son et l'amplificateur.
2. Le niveau vibratoire est relevé à l'aide d'un analyseur SVAN 974 (Svantek, Varsovie, Pologne, www.svantek.com) dédié à l'analyse de signaux vibratoire.
3. Si le niveau vibratoire obtenu diffère du niveau attendu (mesuré à l'aide du même analyseur avant le lancement de l'expérience, lors de la calibration des niveaux vibratoires), le gain est ajusté de manière à corriger l'écart observé.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

Annexe B

Résultats des RM-ANOVAs

Les résultats des 6 analyses de la variance à mesures répétées (RM-ANOVAs) présentées en section 4.3.1 sont regroupés dans le tableau B.1.

Tableau B.1 – Statistiques des 6 RM-ANOVAs menées sur A_N, A_V et A_T dues au Fret et au TER recueillies durant les sessions A et C et durant les sessions B et C respectivement.

Variable dépendante	Facteur	SC	ddl	MC	F	p
A_N (Fret)	SESSION	29	1	29	0.003	0.95
A_N (TER)	SESSION	4537	1	4537	0.295	0.59
A_V (Fret)	SESSION	874	1	874	0.058	0.81
A_V (TER)	SESSION	13086	1	13086	1.138	0.29
A_T (Fret)	SESSION	4020	1	4020	1.113	0.30
A_T (TER)	SESSION	131	1	131	0.011	0.92

Les résultats indiquent que les réponses de gêne partielle due au bruit (A_N), de gêne partielle due aux vibrations (A_V) et de gêne totale (A_T), mesurées durant deux sessions d'expérience indépendantes, sont similaires.

Cette observation est vérifiée quelque soit le type de train utilisé comme stimulus (Fret ou TER).

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

Annexe C

Interfaces de tests

C.1 Comparaison de deux méthodes de recueil de la gêne (chapitre 3)

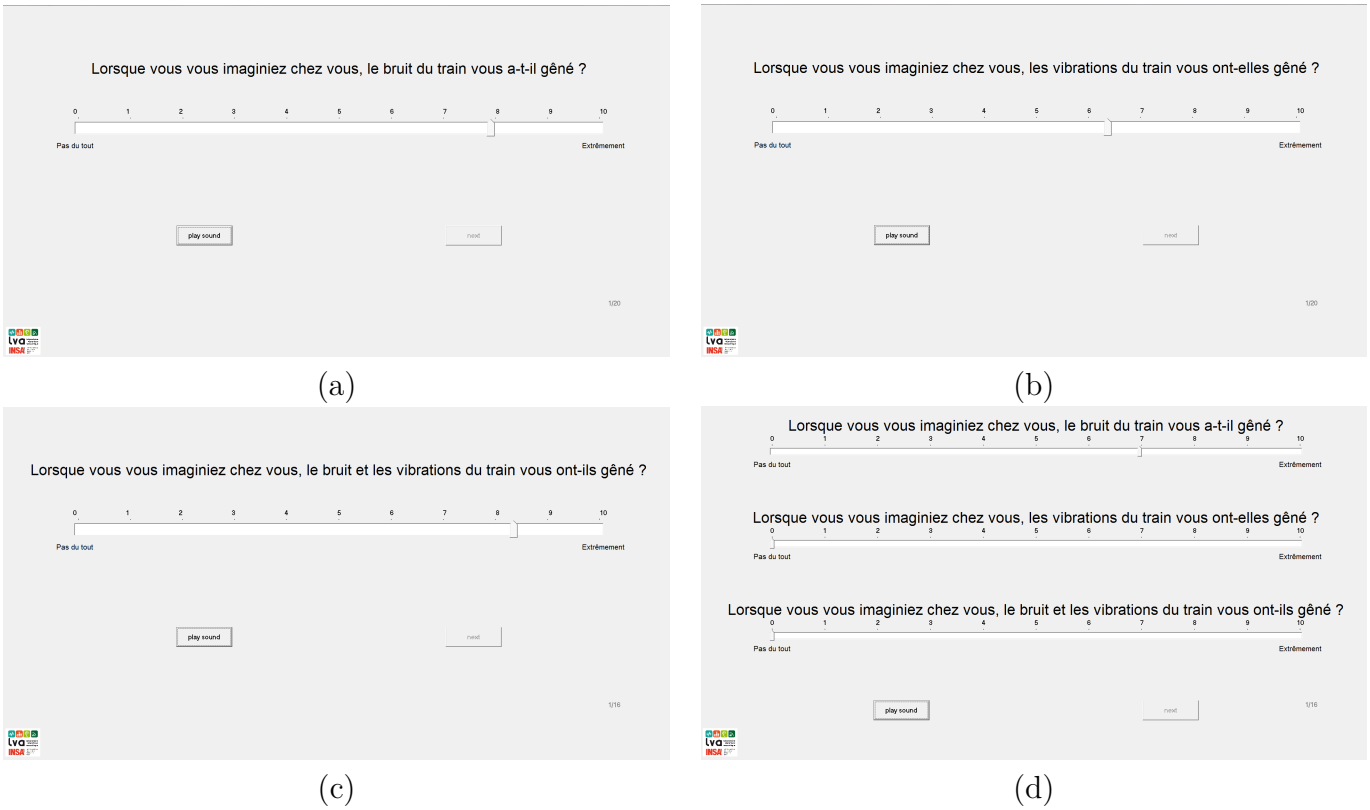


FIGURE C.1 – Consignes données aux participants lors du recueil des réponses (a) de gêne sonore, (b) de gêne vibratoire, (c) de gêne totale, (d) de gênes partielles sonore et vibratoire et de gêne totale.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

C.2 Expérience préliminaire (chapitre 5, section 5.2)

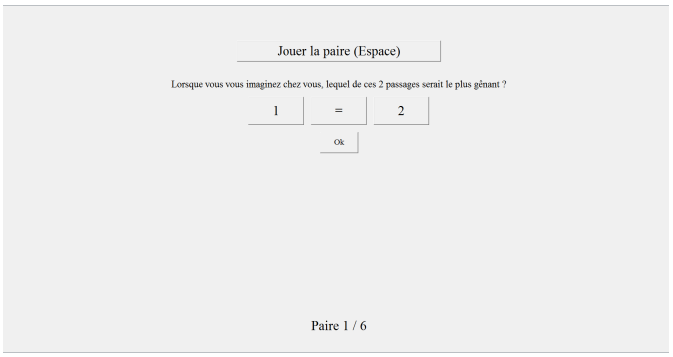


FIGURE C.2 – Consigne donnée aux participants lors de la comparaison par paires, question « gêne ».

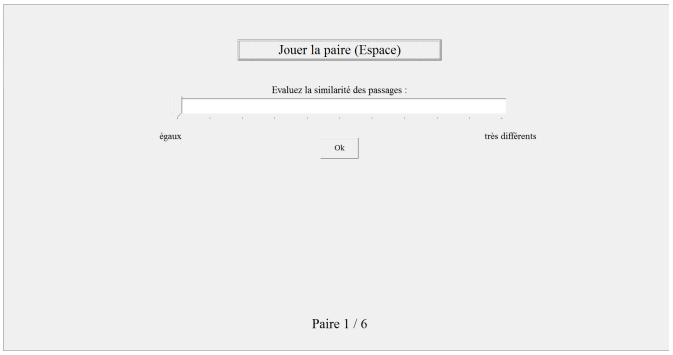


FIGURE C.3 – Consigne donnée aux participants lors de la comparaison par paires, question « similarité ».

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

Bibliographie

[Amari, 2009] Amari, M. (2009). *Etude du confort vibro-acoustique automobile en simulateur*. PhD thesis, INSA de Lyon.

[Babisch et al., 2009] Babisch, W., Houthuijs, D., Pershagen, G., Cadum, E., Katsouyanni, K., Velonakis, M., Dudley, M.-L., Marohn, H.-D., Swart, W., Breugelmans, O., et al. (2009). Annoyance due to aircraft noise has increased over the years—results of the hyena study. *Environment international*, 35(8) :1169–1176.

[Bellmann, 2002] Bellmann, M. A. (2002). *Perception of whole body vibrations : From basic experiments to effects of seat and steering wheel vibrations on the passenger's comfort inside vehicles*. Shaker.

[Berglund, 1997] Berglund, B. (1997). Empirical issues concerning annoyance models for combined community noise. *Inter-noise 97*, pages 1053–1058.

[Botteldooren and Verkeyn, 2002] Botteldooren, D. and Verkeyn, A. (2002). Fuzzy models for accumulation of reported community noise annoyance from combined sources. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 112(4) :1496–1508.

[BS, 1987] BS (1987). Bs 6841 : Guide to measurement and evaluation of human exposure to whole-body mechanical vibration and repeated shock. Technical report, British Standards Institution, London.

[BS, 2008] BS (2008). Bs 6472-1 : Guide to evaluation of human exposure to vibration in buildings – part 1 : Vibration sources other than blasting. Technical report, British Standards Institution, London.

[Cheron et al., 2012] Cheron, C., Walter, M., Sandor, J., and Wiebe, E. (2012). Errac roadmap. towards 2030 : energy, noise and vibration european railway roadmaps. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 48 :2221–2229.

[Cohen, 1992] Cohen, J. (1992). A power primer. *Psychological bulletin*, 112(1) :155.

[Commission of the European Communities, 2001] Commission of the European Communities (2001). White Paper - European transport policy for 2010 : time to decide. Technical report.

[David, 1963] David, H. A. (1963). *The method of paired comparisons*, volume 12. London.

[De Coensel et al., 2007] De Coensel, B., Botteldooren, D., Berglund, B., Nilsson, M. E., De Muer, T., and Lercher, P. (2007). Experimental investigation of noise annoyance caused by high-speed trains. *Acta Acustica united with Acustica*, 93(4) :589–601.

[EC, 2002] EC (2002). Position paper on dose response relationships between transportation noise and annoyance. Technical report, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.

[Ecotière et al., 2014] Ecotière, D., Champelovier, P., Marquis-Favre, C., Morel, J., Olny, X., Philipps-Bertin, C., and Vincent, B. (2014). Multi-exposition au bruit des transports : Application et evaluation d'une méthode opérationnelle d'identification de la

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

gêne en situation de multi-exposition. *Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie : Paris, France*, 106.

[Elias et al., 2007] Elias, P., Taillefer, N., Villot, M., and Weiss, N. (2007). Protection contre les vibrations environnementales – Le cas Français – Rapport DAE 2007-491/MV/BEA.

[Fastl et al., 1996] Fastl, H., Kuwano, S., and Namba, S. (1996). Assessing the railway bonus in laboratory studies. *Journal of the Acoustical Society of Japan (E)*, 17(3) :139–148.

[Fidell et al., 1991] Fidell, S., Barber, D. S., and Schultz, T. J. (1991). Updating a dosage–effect relationship for the prevalence of annoyance due to general transportation noise. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 89(1) :221–233.

[Fields et al., 2001] Fields, J., De Jong, R., Gjestland, T., Flindell, I., Job, R., Kurra, S., Lercher, P., Vallet, M., Yano, T., Guski, R., et al. (2001). Standardized general-purpose noise reaction questions for community noise surveys : Research and a recommendation. *Journal of sound and vibration*, 242(4) :641–679.

[Fields, 1993] Fields, J. M. (1993). Effect of personal and situational variables on noise annoyance in residential areas. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 93(5) :2753–2763.

[Fields and Walker, 1982] Fields, J. M. and Walker, J. (1982). The response to railway noise in residential areas in great britain. *Journal of Sound and Vibration*, 85(2) :177–255.

[Fleming and Griffin, 1975] Fleming, D. and Griffin, M. (1975). A study of the subjective equivalence of noise and whole-body vibration. *Journal of Sound and Vibration*, 42(4) :453–461.

[Gidlöf-Gunnarsson et al., 2012] Gidlöf-Gunnarsson, A., Ögren, M., Jerson, T., Öhrström, E., et al. (2012). Railway noise annoyance and the importance of number of trains, ground vibration, and building situational factors. *Noise and Health*, 14(59) :190.

[Gille et al., 2016a] Gille, L.-A., Marquis-Favre, C., and Morel, J. (2016a). Testing of the european union exposure-response relationships and annoyance equivalents model for annoyance due to transportation noises : The need of revised exposure-response relationships and annoyance equivalents model. *Environment international*, 94 :83–94.

[Gille et al., 2016b] Gille, L.-A., Marquis-Favre, C., and Weber, R. (2016b). Noise sensitivity and loudness derivative index for urban road traffic noise annoyance computation. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 140(6) :4307–4317.

[Griffin, 1990] Griffin, M. J. (1990). *Handbook of human vibration*. Elsevier Academic press.

[Griffin and Whitham, 1980] Griffin, M. J. and Whitham, E. M. (1980). Discomfort produced by impulsive whole-body vibration. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 68(5) :1277–1284.

[Howarth and Griffin, 1988] Howarth, H. and Griffin, M. (1988). Human response to simulated intermittent railway-induced building vibration. *Journal of Sound and Vibration*, 120(2) :413–420.

[Howarth and Griffin, 1990] Howarth, H. and Griffin, M. (1990). Subjective response to combined noise and vibration : summation and interaction effects. *Journal of sound and vibration*, 143(3) :443–454.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

[Howarth and Griffin, 1991] Howarth, H. V. and Griffin, M. J. (1991). The annoyance caused by simultaneous noise and vibration from railways. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 89(5) :2317–2323.

[Huang and Griffin, 2010] Huang, Y. and Griffin, M. J. (2010). The relative importance of noise and vibration to the sensation of comfort in vehicles. In *45th UK Conference on Human Response to Vibration*. Institute of Naval Medicine.

[Huang and Griffin, 2012] Huang, Y. and Griffin, M. J. (2012). The effects of sound level and vibration magnitude on the relative discomfort of noise and vibration. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 131(6) :4558–4569.

[ISO, 1997] ISO (1997). Iso 2631-1 : Mechanical vibration and shock – evaluation of human exposure to whole-body vibration – part 1 : General requirements. Technical report, International Organization for Standardization, Geneva.

[ISO, 2003] ISO (2003). Iso 2631-2 : Mechanical vibration and shock – evaluation of human exposure to whole-body vibration – part 2 : Vibration in buildings (1 hz to 80 hz). Technical report, International Organization for Standardization, Geneva.

[Izumi, 1988] Izumi, K. (1988). Annoyance due to mixed source noises—a laboratory study and field surve on the annoyance of road traffic and railroad noise. *Journal of sound and vibration*, 127(3) :485–489.

[Janssen et al., 2013] Janssen, S. A., Vos, H., and Koopman, A. (2013). A meta-analysis of surveys into vibration annoyance from railway. *Noise control for quality of life. Internoise 2013, Innsbruck, Austria, 15-18 september 2013, 1-5.*

[Job, 1988] Job, R. (1988). Community response to noise : A review of factors influencing the relationship between noise exposure and reaction. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 83(3) :991–1001.

[Jones and Saunders, 1974] Jones, A. and Saunders, D. (1974). A scale of human reaction to whole body, vertical, sinusoidal vibration. *Journal of Sound and Vibration*, 35 :503–520.

[Kaczmarek and Preis, 2010] Kaczmarek, T. and Preis, A. (2010). Annoyance of time-varying road-traffic noise. *Archives of acoustics*, 35(3) :383–393.

[Kaku and Yamada, 1996] Kaku, J. and Yamada, I. (1996). The possibility of a bonus for evaluating railway noise in japan. *Journal of sound and Vibration*, 193(1) :445–450.

[Kendall and Smith, 1940] Kendall, M. G. and Smith, B. B. (1940). On the method of paired comparisons. *Biometrika*, 31(3/4) :324–345.

[Kim et al., 2010] Kim, J., Lim, C., Hong, J., and Lee, S. (2010). Noise-induced annoyance from transportation noise : Short-term responses to a single noise source in a laboratory. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 127(2) :804–814.

[Kjellberg et al., 1985] Kjellberg, A., Wikström, B.-O., and Dimberg, U. (1985). Whole-body vibration : exposure time and acute effects—experimental assessment of discomfort. *Ergonomics*, 28(3) :545–554.

[Klæboe et al., 2004] Klæboe, R., Amundsen, A., Fyhri, A., and Solberg, S. (2004). Road traffic noise–the relationship between noise exposure and noise annoyance in norway. *Applied Acoustics*, 65(9) :893–912.

[Klæboe et al., 2003] Klæboe, R., Turunen-Rise, I., Hårvik, L., and Madshus, C. (2003). Vibration in dwellings from road and rail traffic—part ii : exposure–effect relationships based on ordinal logit and logistic regression models. *Applied Acoustics*, 64(1) :89–109.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

[Klein et al., 2017] Klein, A., Marquis-Favre, C., and Champelovier, P. (2017). Assessment of annoyance due to urban road traffic noise combined with tramway noise. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 141(1) :231–242.

[Klein et al., 2015] Klein, A., Marquis-Favre, C., Weber, R., and Trollé, A. (2015). Spectral and modulation indices for annoyance-relevant features of urban road single-vehicle pass-by noises. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 137(3) :1238–1250.

[Kryter, 1982] Kryter, K. D. (1982). Community annoyance from aircraft and ground vehicle noise. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 72(4) :1222–1242.

[Lee and Griffin, 2013] Lee, P. and Griffin, M. J. (2013). Combined effect of noise and vibration produced by high-speed trains on annoyance in buildings. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 133(4) :2126–2135.

[Lercher, 2011] Lercher, P. (2011). Combined noise exposure at home. In *Encyclopedia of Environmental Health*. Elsevier (Amsterdam).

[Lim et al., 2006] Lim, C., Kim, J., Hong, J., and Lee, S. (2006). The relationship between railway noise and community annoyance in korea. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 120(4) :2037–2042.

[Ljunggren, 2006] Ljunggren, F. (2006). *Floor vibration : dynamic properties and subjective perception*. PhD thesis, Luleå tekniska universitet.

[Maclachlan et al., 2018] Maclachlan, L., Ögren, M., van Kempen, E., Hussain-Alkhateeb, L., and Persson Waye, K. (2018). Annoyance in response to vibrations from railways. *International journal of environmental research and public health*, 15(9) :1887.

[Maclachlan et al., 2017] Maclachlan, L., Waye, K. P., and Pedersen, E. (2017). Exploring perception of vibrations from rail : An interview study. *International journal of environmental research and public health*, 14(11) :1303.

[Maigrot et al., 2017] Maigrot, P., Marquis-Favre, C., and Parizet, É. (2017). Two laboratory methods of assessing annoyance due to railway noise and vibration (L). *The Journal of the Acoustical Society of America*, 142(5) :3284–3287.

[Mansfield, 2004] Mansfield, N. J. (2004). *Human response to vibration*. CRC press.

[Marquis-Favre and Morel, 2015] Marquis-Favre, C. and Morel, J. (2015). A simulated environment experiment on annoyance due to combined road traffic and industrial noises. *International journal of environmental research and public health*, 12(7) :8413–8433.

[Marquis-Favre et al., 2005] Marquis-Favre, C., Premat, E., and Aubrée, D. (2005). Noise and its effects–a review on qualitative aspects of sound. part ii : Noise and annoyance. *Acta Acustica united with Acustica*, 91(4) :626–642.

[Miedema and Oudshoorn, 2001] Miedema, H. and Oudshoorn, C. (2001). Annoyance from transportation noise : relationships with exposure metrics dnl and denl and their confidence intervals. *Environmental health perspectives*, 109(4) :409.

[Miedema and Vos, 1998] Miedema, H. M. and Vos, H. (1998). Exposure-response relationships for transportation noise. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 104(6) :3432–3445.

[Miedema and Vos, 2003] Miedema, H. M. and Vos, H. (2003). Noise sensitivity and reactions to noise and other environmental conditions. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 113(3) :1492–1504.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

[Morel et al., 2012a] Morel, J., Marquis-Favre, C., Dubois, D., and Pierrette, M. (2012a). Road traffic in urban areas : A perceptual and cognitive typology of pass-by noises. *Acta acustica united with acustica*, 98(1) :166–178.

[Morel et al., 2012b] Morel, J., Marquis-Favre, C., Pierrette, M., and Gille, L.-A. (2012b). Physical and perceptual characterization of road traffic noises in urban areas for a better noise annoyance assessment. In *Acoustics 2012*.

[Morihara and Matsumoto, 2016] Morihara, T. and Matsumoto, Y. (2016). An experimental study on combined effects of high-speed railway noise and vibrations on activity disturbances. In *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, volume 253, pages 1769–1775. Institute of Noise Control Engineering.

[Morihara et al., 2004] Morihara, T., Sato, T., and Yano, T. (2004). Comparison of dose–response relationships between railway and road traffic noises : the moderating effect of distance. *Journal of sound and vibration*, 277(3) :559–565.

[Morioka and Griffin, 2000] Morioka, M. and Griffin, M. J. (2000). Difference thresholds for intensity perception of whole-body vertical vibration : effect of frequency and magnitude. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 107(1) :620–624.

[Morioka and Griffin, 2006] Morioka, M. and Griffin, M. J. (2006). Magnitude-dependence of equivalent comfort contours for fore-and-aft, lateral and vertical whole-body vibration. *Journal of Sound and Vibration*, 298(3) :755–772.

[Nguyen et al., 2012] Nguyen, T., Nguyen, H., Yano, T., Nishimura, T., Sato, T., Morihara, T., and Hashimoto, Y. (2012). Comparison of models to predict annoyance from combined noise in ho chi minh city and hanoi. *Applied Acoustics*, 73(9) :952–959.

[Öhrström et al., 2007] Öhrström, E., Barregård, L., Andersson, E., Skånberg, A., Svensson, H., and Ängerheim, P. (2007). Annoyance due to single and combined sound exposure from railway and road traffic. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 122(5) :2642–2652.

[Öhrström et al., 1980] Öhrström, E., Björkman, M., and Rylander, R. (1980). Laboratory annoyance and different traffic noise sources. *Journal of Sound and Vibration*, 70(3) :333–341.

[Öhrström and Skånberg, 1996] Öhrström, E. and Skånberg, A.-B. (1996). A field survey on effects of exposure to noise and vibration from railway traffic, part i : Annoyance and activity disturbance effects. *Journal of sound and vibration*, 193(1) :39–47.

[Parizet, 2002] Parizet, E. (2002). Paired comparison listening tests and circular error rates. *Acta acustica united with Acustica*, 88(4) :594–598.

[Parizet and Marpe, 2005] Parizet, E. and Marpe, B. (2005). Loudness estimation in the presence of vertical vibrations. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 117(4) :2396–2396.

[Parsons and Griffin, 1988] Parsons, K. and Griffin, M. (1988). Whole-body vibration perception thresholds. *Journal of sound and Vibration*, 121(2) :237–258.

[Passchier-Vermeer and Zeichart, 1998] Passchier-Vermeer, W. and Zeichart, K. (1998). *Vibrations in the living environment : Relationships between vibration annoyance and vibration metrics*. Number 98.030. TNO.

[Paulsen, 1997] Paulsen, R. (1997). On the influence of the stimulus duration on psychophysical judgment of environmental noises taken in the laboratory. In *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, volume 1997, pages 516–519. Institute of Noise Control Engineering.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

[Paulsen and Kastka, 1995] Paulsen, R. and Kastka, J. (1995). Effects of combined noise and vibration on annoyance. *Journal of Sound and Vibration*, 181(2) :295–314.

[Peris et al., 2012] Peris, E., Woodcock, J., Sica, G., Moorhouse, A. T., and Waddington, D. C. (2012). Annoyance due to railway vibration at different times of the day. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 131(2) :EL191–EL196.

[Peris et al., 2014] Peris, E., Woodcock, J., Sica, G., Sharp, C., Moorhouse, A. T., and Waddington, D. C. (2014). Effect of situational, attitudinal and demographic factors on railway vibration annoyance in residential areas. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 135(1) :194–204.

[Pierrette et al., 2012a] Pierrette, M., Marquis-Favre, C., Morel, J., Rioux, L., Vallet, M., Viollon, S., and Moch, A. (2012a). Corrigendum to "noise annoyance from industrial and road traffic combined noises : A survey and a total annoyance model comparison"[j environ psychol 32 (2)(2012) 178–186]. *Journal of Environmental Psychology*, 32(3) :285.

[Pierrette et al., 2012b] Pierrette, M., Marquis-Favre, C., Morel, J., Rioux, L., Vallet, M., Viollon, S., and Moch, A. (2012b). Noise annoyance from industrial and road traffic combined noises : A survey and a total annoyance model comparison. *Journal of environmental psychology*, 32(2) :178–186.

[Sandrock et al., 2008] Sandrock, S., Griefahn, B., Kaczmarek, T., Hafke, H., Preis, A., and Gjestland, T. (2008). Experimental studies on annoyance caused by noises from trams and buses. *Journal of Sound and Vibration*, 313(3-5) :908–919.

[Schulte-Fortkamp and Weber, 1997] Schulte-Fortkamp, B. and Weber, R. (1997). Overall annoyance ratings in a multisource environment. In *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, volume 1997, pages 264–269. Institute of Noise Control Engineering.

[Schultz, 1978] Schultz, T. J. (1978). Synthesis of social surveys on noise annoyance. *The journal of the acoustical society of America*, 64(2) :377–405.

[Sharp, 2014] Sharp, C. (2014). *Human response to environmental noise and vibration from freight and passenger railway traffic*. PhD thesis, University of Salford.

[Sharp et al., 2014a] Sharp, C., Woodcock, J., Sica, G., Peris, E., Moorhouse, A. T., and Waddington, D. C. (2014a). Exposure-response relationships for annoyance due to freight and passenger railway vibration exposure in residential environments. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 135(1) :205–212.

[Sharp et al., 2014b] Sharp, C., Woodcock, J., and Waddington, D. (2014b). Considering the perception of combined railway noise and vibration as a multidimensional phenomenon. In *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, volume 249, pages 888–897. Institute of Noise Control Engineering.

[Shoenberger and Harris, 1971] Shoenberger, R. W. and Harris, C. S. (1971). Psychophysical assessment of whole-body vibration. *Human Factors*, 13(1) :41–50.

[Sörensen and Hammar, 1983] Sörensen, S. and Hammar, N. (1983). Annoyance reactions due to railway noise. *Journal of sound and vibration*, 87(2) :315–319.

[Stevens, 1955] Stevens, S. S. (1955). The measurement of loudness. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 27(5) :815–829.

[Stevens, 1957] Stevens, S. S. (1957). On the psychophysical law. *Psychological review*, 64(3) :153.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

[Taylor, 1982] Taylor, S. (1982). A comparison of models to predict annoyance reactions to noise from mixed sources. *Journal of Sound and Vibration*, 81(1) :123–138.

[Temple and Arup Acoustics, 2007] Temple and Arup Acoustics (2007). Human response to vibration in residential environments (NANR1721) – Final Project Report.

[Terroir and Lavandier, 2014] Terroir, J. and Lavandier, C. (2014). Perceptual impact of distance on high-speed train sound quality. *Acta Acustica united with Acustica*, 100(2) :328–340.

[Torija et al., 2011] Torija, A. J., Ruiz, D. P., De Coensel, B., Botteldooren, D., Berglund, B., and Ramos-Ridao, Á. (2011). Relationship between road and railway noise annoyance and overall indoor sound exposure. *Transportation research part D : transport and environment*, 16(1) :15–22.

[Trollé et al., 2014] Trollé, A., Marquis-Favre, C., and Klein, A. (2014). Short-term annoyance due to tramway noise : Determination of an acoustical indicator of annoyance via multilevel regression analysis. *Acta Acustica united with Acustica*, 100(1) :34–45.

[Trollé et al., 2015] Trollé, A., Marquis-Favre, C., and Parizet, É. (2015). Perception and annoyance due to vibrations in dwellings generated from ground transportation : A review. *Journal of low frequency noise, vibration and active control*, 34(4) :413–457.

[Vallin et al., 2018] Vallin, P.-A., Marquis-Favre, C., Bleuse, J., and Gille, L.-A. (2018). Railway noise annoyance modeling : Accounting for noise sensitivity and different acoustical features. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 144(6) :3381–3390.

[Waddington et al., 2011] Waddington, D., Moorhouse, A., Steele, A., Woodcock, J., Condie, J., Peris, E., Sica, G., Koziel, Z., et al. (2011). Human response to vibration in residential environments (nanr209).

[Waddington et al., 2014] Waddington, D. C., Woodcock, J., Peris, E., Condie, J., Sica, G., Moorhouse, A. T., and Steele, A. (2014). Human response to vibration in residential environments. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 135(1) :182–193.

[Weber et al., 2001] Weber, R., Baumann, I., Bellmann, M., and Mellert, V. (2001). The influence of sound on perception thresholds and jnds of whole-body vibrations. In *17 th International Congress of Acoustics, Rome*.

[Woodcock, 2013] Woodcock, J. (2013). *Field and laboratory studies into the human response to groundborne vibration : Exposure-response relationships, perceptual dimensions, and models of annoyance*. PhD thesis, University of Salford.

[Woodcock et al., 2014] Woodcock, J., Moorhouse, A., and Waddington, D. (2014). A multidimensional evaluation of the perception and annoyance caused by railway induced groundborne vibration. *Acta Acustica united with Acustica*, 100(4) :614–627.

[Woodcock et al., 2013] Woodcock, J., Peris, E., Moorhouse, A., and Waddington, D. (2013). Guidance document for the evaluation of railway vibration – CargoVibes Report D1.5.

[Woodcock et al., 2011] Woodcock, J., Peris, E., Sica, G., Koziel, Z., Moorhouse, A. T., Waddington, D. C., et al. (2011). Human response to vibration in residential environments : Establishing exposure-response relationships. In *10th International Congress on Noise as a Public Health Problem (ICBEN)*.

[Woodcock et al., 2016] Woodcock, J., Sica, G., Peris, E., Sharp, C., Moorhouse, A., and Waddington, D. (2016). Quantification of the effects of audible rattle and source type on the human response to environmental vibration. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 139(3) :1225–1234.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

[Woodroof and Griffin, 1987] Woodroof, H. and Griffin, M. J. (1987). Survey of the effect of railway-induced building vibration on the community. Technical report.

[World Health Organization, 2011] World Health Organization (2011). Burden of disease from environmental noise. technical report. Technical report.

[Yano et al., 2005] Yano, T., Morihara, T., and Sato, T. (2005). Community response to shinkansen noise and vibration : a survey in areas along the sanyo shinkansen line. In *Proceedings of Forum Acusticum, Budapest, Hungary*.

[Yano et al., 1997] Yano, T., Yamashita, T., and Izumi, K. (1997). Comparison of community annoyance from railway noise evaluated by different category scales. *Journal of sound and Vibration*, 205(4) :505–511.

[Yokoshima and Tamura, 2005] Yokoshima, S. and Tamura, A. (2005). Combined annoyance due to the shinkansen railway noise and vibration. In *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, volume 2005, pages 803–810. Institute of Noise Control Engineering.

[Zapfe et al., 2009] Zapfe, J. A., Saurenman, H., and Fidell, S. (2009). Ground-borne noise and vibration in buildings caused by rail transit. Technical report.

[Zwicker et al., 1991] Zwicker, E., Fastl, H., Widmann, U., Kurakata, K., Kuwano, S., and Namba, S. (1991). Program for calculating loudness according to din 45631 (iso 532b). *Journal of the Acoustical Society of Japan (E)*, 12(1) :39–42.

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés

FOLIO ADMINISTRATIF

THESE SOUTENUE DEVANT L'INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUEES DE LYON

NOM : Maigrot **DATE de SOUTENANCE :** 23/07/2019

Prénoms : Philéas, Rémy, Pierre-Jean

TITRE : Compréhension des mécanismes perceptifs associés à la gêne due aux bruit et vibrations du trafic ferroviaire en zone urbaine

NATURE : Doctorat **Numéro d'ordre :** 2019LYSEI051

École doctorale : Mécanique, Énergétique, Génie Civil et Acoustique

Spécialité : Acoustique

RESUME : Les vibrations générées par le trafic ferroviaire se propagent depuis les rails jusqu'à l'intérieur des maisons voisines. Souvent, ces vibrations s'accompagnent du bruit de passage du train. Cette co-exposition au bruit et aux vibrations est source de gêne pour les résidents et peut engendrer des troubles de la santé. Peu d'études ont été menées à propos de la co-exposition au bruit et aux vibrations en termes de gêne. L'objectif de la thèse est d'apporter des éléments de compréhension au regard des phénomènes perceptifs mis en jeux lors de l'exposition combinée au bruit et aux vibrations. Des expériences sont menées dans ce but, en conditions contrôlées et à l'aide d'enregistrements acoustiques et vibratoires réalisés à proximité d'une voie ferrée, à l'intérieur d'un logement. Une première étude a été réalisée afin de valider un protocole expérimental permettant de recueillir en laboratoire des réponses de gêne. Pour plusieurs combinaisons d'enregistrements de bruit et de vibrations ferroviaires présentés à différents niveaux, la gêne 1) partielle, due au bruit, 2) partielle, due aux vibrations et 3) totale, due à la co-exposition au bruit et aux vibrations, étaient recueillies. Les résultats de cette première étude ont été utilisés afin d'adopter un même protocole expérimental tout au long de ces travaux de thèse. Les études traitant de la gêne due aux bruit et aux vibrations ferroviaires sont majoritairement basées sur des indices ne reflétant que la quantité d'énergie liée à chaque exposition et leurs résultats peuvent être contradictoires. Une seconde étude a été menée en laboratoire dans le but d'évaluer l'influence de l'intensité (sonore, vibratoire) sur la gêne et afin de déterminer l'origine des différences de résultats dans la littérature. Les hypothèses testées étaient que ces différences pourraient être dues aux différentes plages de niveaux sonores et vibratoires étudiées, ou à des différences de contenus fréquentiels au sein des stimuli utilisés dans les différentes expériences. Dans la littérature, un besoin d'autres études en laboratoire est souligné afin de mieux comprendre l'influence des paramètres autres que le niveau global vibratoire (p. ex. contenu spectral, modulation) sur la gêne due aux vibrations ferroviaires. Un travail a été réalisé afin de mieux comprendre le rôle du contenu spectral vibratoire sur la gêne spécifique due aux vibrations, en l'absence de bruit. Une expérience a été conduite en utilisant des stimuli vibratoires artificiels, créés à partir des spectres d'enregistrements de vibrations ferroviaires. L'importance des paramètres autres que les niveaux de bruit et de vibrations globaux sur les variations de la gêne due à la co-exposition aux bruit et vibrations ferroviaires a fait l'objet d'une dernière étude. Les stimuli utilisés étaient obtenus à partir de la quasi-totalité des enregistrements sonores et vibratoires à disposition, en les ramenant à une durée de 10s et en contrôlant les variations de niveau de bruit et de vibrations d'un stimulus à un autre ainsi qu'au sein de chaque stimulus. Cette étude a montré que l'importance relative des paramètres temporels et fréquentiels de la co-exposition au bruit et aux vibrations était faible au regard de celle des paramètres énergétiques.

MOTS-CLES : gêne vibratoire de court-terme, gêne sonore de court-terme, trafic ferroviaire urbain, co-exposition bruit et vibrations, gêne totale, environnement contrôlé, expérience en laboratoire, mesure *in situ*.

Laboratoire(s) de recherche : Laboratoire Vibrations Acoustique (LVA) de l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon (INSA) et Laboratoire Génie Civil et Bâtiment (LGCB) de l'École Nationale des Travaux Publics de l'État

Directeur de thèse : Étienne Parizet

Président de jury :

Composition du jury :

Andy Moorhouse	Rapporteur
Catherine Lavandier	Membre du jury
Catherine Marquis-Favre	Co-directrice de thèse
Étienne Parizet	Directeur de thèse
Franck Poisson	Membre du jury
Philippe-Aubert Gauthier	Rapporteur

Cette thèse est accessible à l'adresse : http://theses.insa-lyon.fr/publication/2019LYSEI051/these.pdf
© [P. Maigrot], [2019], INSA Lyon, tous droits réservés