



**HAL**  
open science

# Caractérisation physique et perceptive du bruit routier urbain pour la définition d'indicateurs de gêne sonore en situation de mono-exposition et de multi-exposition en présence de bruit industriel

Julien Morel

## ► To cite this version:

Julien Morel. Caractérisation physique et perceptive du bruit routier urbain pour la définition d'indicateurs de gêne sonore en situation de mono-exposition et de multi-exposition en présence de bruit industriel. Acoustique [physics.class-ph]. Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat, 2012. Français. NNT: . tel-00798400

**HAL Id: tel-00798400**

**<https://theses.hal.science/tel-00798400>**

Submitted on 8 Mar 2013

**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.

Thèse

# Caractérisation physique et perceptive du bruit routier urbain pour la définition d'indicateurs de gêne sonore en situation de mono-exposition et de multi- exposition en présence de bruit industriel

Présentée devant  
**L'Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat**

Pour obtenir  
**Le grade de docteur**

Ecole doctorale : MECANIQUE, ENERGETIQUE, GENIE CIVIL et ACOUSTIQUE  
Ecole Centrale de Lyon – Université Claude Bernard-Lyon 1 – INSA Lyon  
*Spécialité : Acoustique*

Par  
**Julien Morel**

---

Soutenue le 07 septembre 2012 devant la Commission d'Examen composée de :

Rapporteur	Catherine Lavandier
Rapporteur	Reinhard Weber
Membre du jury	Danièle Dubois
Membre du jury	Sabine Meunier
Membre du jury	Nacer Hamzaoui
Membre du jury	Etienne Parizet
Membre du jury	Joos Vos
Directrice de thèse	Catherine Marquis-Favre

*Cette thèse a été préparée au sein du Département Génie Civil et Bâtiment de l'Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat*



# Remerciements

Je tiens à remercier en premier lieu C. Lavandier et R. Weber qui m'ont fait l'honneur de lire et juger ces travaux. J'exprime également ma gratitude à D. Dubois, S. Meunier, N. Hamzaoui, E. Parizet et J. Vos d'avoir accepté de faire partie du jury.

J'adresse un grand merci à Catherine Marquis-Favre, pour son encadrement sans faille. Cathy, merci pour ta grande rigueur scientifique, ton professionnalisme et ton humanité ! J'espère avoir le plaisir de continuer à travailler avec toi dans le futur.

Je remercie Marjorie, avec qui nous avons collaboré au cours de mes travaux de thèse (j'espère que tu garderas un bon souvenir de nos escapades à Marcy l'Etoile), et je lui souhaite bon courage avec le petit Diego. Merci également à Laure-Anne, Antoine et Vy qui ont également participé à mes travaux de thèse au cours de leur stage. Merci également à Marion qui m'a initié à la recherche en participant à l'encadrement de mes travaux de master.

Trois ans de thèse c'est long et parfois difficile, mais ça passe beaucoup mieux si le cadre est agréable. Pour cela, je remercie mes directeurs de laboratoire successifs Marc Fontoynt, puis Dominique Dumortier, de m'avoir accueilli et permis de réaliser mes travaux de thèse dans les meilleures conditions. Merci également à tous les collègues du B002 et du LASH en général avec qui j'ai passé du temps, parfois à râler, parfois à échanger, et souvent à déconner : Thierry, Philou, Céline, Riccardo, Andrea, Popo, Arnaud, Mathieu, et les autres... Merci aux foteux du vendredi pour le défoulement et la bonne ambiance, même si j'ai y laissé un bout de cheville lors d'une tragique après-midi de mai...

Merci également à tous mes « cobayes », collègues, amis, étudiants de l'ENTPE ou inconnus, qui m'ont prêté leurs oreilles, et sans qui je n'aurais pas eu la matière pour conduire mes travaux.

Un grand merci aux Lyonnais que j'ai côtoyés au cours de ces trois ans : Manu, Aurel et Yo pour les répèts' au Lyon's Hall, et les concerts (Punk is not dead !), Pims, Ben, Damien, Fanny, Sylvie, pour les (Look)bars, pique-niques, sandwiches, parties de FIFA ou tout simplement le bon temps ! Je dois aussi remercier mes différents colocataires : Hélène (bon courage pour ta fin de thèse et ta jambe zombie !), Antoine (mets ton casque à vélo !), Rom, TisTis et Arnaud (je vous prends tous les 3 à FIFA !), et Mara (tu ne sais pas lire mais Rom t'expliquera...).

Merci à ma famille pour son soutien : ma mère (supérieure), mon père, Romain (toujours là pour un déménagement express !), Marie, Damien (techniquement on n'est pas frère, mais bon tu es un peu le quatrième fils de la maison !), ...

Comme on dit, *last but not least* : je remercie tendrement ma petite Nasta, pour son soutien durant ces trois ans. Tu as réussi à supporter le célibat géographique alors que tu étais à Paris (le comble pour une marseillaise !). Je te remercie d'avoir relu ma thèse pour y dénicher les fautes d'orthographe, même si ça signifie que je vais devoir faire de même avec la tienne ☺



# Résumé / Mots clés

## Résumé

Le bruit dans l'environnement représente une nuisance majeure au quotidien pour nos concitoyens. De nombreux outils sont employés dans la lutte contre les nuisances sonores. Parmi ces outils, les cartes de bruit, rendues obligatoires par la directive Européenne 2002/49/CE, visent à représenter l'état acoustique moyen d'une zone donnée au moyen de l'indice énergétique  $L_{den}$ . Les limites de ce type d'indices ont été mises en évidence dans de nombreuses études, notamment en ce qui concerne la caractérisation de la gêne sonore. Dans ce contexte, ces travaux de thèse se donnent pour objectif de contribuer à l'amélioration des cartes de bruit par la proposition d'indicateurs acoustiques pertinents du point de vue de l'individu pour rendre compte de la gêne ressentie, en situation de mono-exposition au bruit de la circulation routière, et en situation de multi-exposition au bruit de la circulation routière et au bruit industriel.

Dans cette optique, une démarche en 3 étapes est mise en œuvre : (1) la caractérisation physique et perceptive des bruits de la circulation routière en milieu urbain avec proposition d'indicateurs de gêne sonore en situation de mono-exposition, (2) la caractérisation physique et perceptive de situations de multi-exposition au bruit de la circulation routière et au bruit industriel avec proposition d'indicateurs de gêne sonore, et (3) la confrontation des indicateurs proposés aux données d'une expérimentation menée en environnement simulé en laboratoire, puis aux données d'une enquête conduite *in situ*.

## Mots clés

Gêne sonore, bruit routier, bruit industriel, multi-exposition sonore, indicateur, catégorisation libre, données verbales, typologie perceptive et cognitive, caractéristique spectrale, caractéristique temporelle, modèle de gêne totale, laboratoire, environnement simulé, *in situ*.



# English title / Abstract / Keywords

## English title

Physical and perceptual characterization for indicators of annoyance due to urban road traffic noise in isolation and combined with industrial noise.

## Abstract

Environmental noise is a major concern for our fellow-citizens. Various tools are used concerning environmental noise management. Among them, noise maps, obligatory since the adoption of European directive 2002/49/EC, aim at representing the mean acoustical state of a given area, using the energetic index  $L_{den}$ . The limits of such indices were highlighted in previous studies, especially when it comes to linking it to noise annoyance. In this context, this work aims at contributing to the improvement of noise maps by the proposal of noise annoyance acoustical indicators, relevant from the individual point of view, for road traffic noise in isolation and combined with industrial noise.

In this aim, this work is divided into 3 steps: (1) physical and perceptual characterization of urban road traffic noise for the proposal of noise annoyance indicators, (2) physical and perceptual characterization of combined road traffic and industrial noises for the proposal of total annoyance models, and (3) confrontation of the results obtained through the previous steps to the data of an experiment led in a simulated environment, and to the data of a noise annoyance survey.

## Key words

Noise annoyance, road traffic noise, industrial noise, combined noises, indicator, free categorization, verbal data, perceptual and cognitive typology, spectral characteristics, temporal characteristics, total annoyance model, laboratory, simulated environment, *in situ*.





# Table des matières

RESUME / MOTS CLES .....	V
ENGLISH TITLE / ABSTRACT / KEYWORDS .....	VII
LISTE DES FIGURES.....	XIII
LISTE DES TABLEAUX .....	XVII
INTRODUCTION GENERALE .....	1
<b>CHAPITRE 1 : DU BRUIT A LA GENE EN SITUATION DE MULTI-EXPOSITION SONORE – FOCUS SUR LE BRUIT PROVENANT DE LA CIRCULATION ROUTIERE ET LE BRUIT INDUSTRIEL.....</b>	<b>7</b>
1. Du phénomène sonore à la description du bruit .....	8
1.1. Le phénomène sonore.....	8
1.2. Le bruit .....	8
1.3. L’approche « <i>soundscape</i> (environnement sonore)» .....	9
1.4. Indices de bruit.....	11
2. Bruit de la circulation routière et bruit industriel.....	17
2.1. Bruit de la circulation routière .....	17
2.2. Bruit industriel.....	25
3. Le concept de gêne sonore.....	29
3.1. Quelques définitions .....	29
3.2. Facteurs influençant la gêne sonore.....	30
3.3. Comment évaluer la gêne ?.....	34
3.4. D’autres méthodes utiles à l’étude de la gêne .....	39
4. Gêne en situation de multi-exposition sonore.....	41
4.1. Une définition .....	41
4.2. Un glossaire de la multi-exposition sonore .....	42
4.3. Evaluation de la gêne en situation de multi-exposition sonore.....	44
4.4. Modélisation de la gêne en situation de multi-exposition sonore .....	51
5. Résumé et conséquences méthodologiques.....	60
<b>CHAPITRE 2 : CONSTITUTION DU MATERIEL SONORE : ENREGISTREMENTS <i>IN SITU</i> DE BRUITS DE LA CIRCULATION ROUTIERE ET DE BRUIT INDUSTRIEL.....</b>	<b>65</b>
1. Proposition d’une typologie physique <i>a priori</i> de bruit de la circulation routière.....	66

1.1. Eléments influençant l'émission et la propagation du bruit de la circulation routière .....	66
1.2. Typologie physique <i>a priori</i> .....	69
2. Localisation auditive de sources sonores dans l'espace .....	70
2.1. Définition et système de coordonnées .....	70
3. Techniques de prise de son .....	72
3.1. Prise de son ambisonique .....	73
3.2. Prise de son binaurale .....	74
3.3. Prise de son stéréophonique .....	75
3.4. Quel système choisir ? .....	79
4. Protocole d'enregistrement stéréophonique <i>in situ</i> .....	80
4.1. Bruit de la circulation routière .....	80
4.2. Bruit industriel.....	82
5. Synthèse.....	83

**CHAPITRE 3 : CARACTERISATION PHYSIQUE ET PERCEPTIVE DE BRUITS DE LA CIRCULATION ROUTIERE .....85**

1. Une typologie perceptive et cognitive de bruits de passage de véhicules routiers.....	86
1.1. Catégorisation libre et verbalisation libre .....	86
1.2. Comparaison par paires et dissimilarité .....	104
1.3. Synthèse partielle.....	113
2. Indicateurs de gêne pour les différentes catégories de bruits de passage de véhicules routiers .....	114
2.1. Méthode expérimentale .....	114
2.2. Traitement et analyse des données.....	118
2.3. Résultats .....	125
2.4. Discussion.....	134
3. Synthèse.....	135

**CHAPITRE 4 : CARACTERISATION PHYSIQUE ET PERCEPTIVE DE SITUATIONS DE MULTI-EXPOSITION AU BRUIT PROVENANT DE LA CIRCULATION ROUTIERE ET AU BRUIT INDUSTRIEL .....139**

1. Préambule .....	140
2. Méthode expérimentale .....	141
2.1. Stimuli .....	141
2.2. Dispositif expérimental .....	142
2.3. Procédure.....	143
2.4. Sujets .....	144
3. Traitement et analyse des données .....	144
3.1. Homogénéité des sujets .....	144
3.2. Analyses de variance à mesures répétées .....	145

3.3. Analyse des verbatims .....	145
3.4. Corrélation et régression linéaire .....	145
4. Résultats.....	146
4.1. Sujets .....	146
4.2. Analyses de variance .....	146
4.3. Analyse des verbatims .....	151
4.4. Prédiction des gênes spécifiques due au bruit industriel et due aux bruits de passage routier issu des différentes catégories.....	155
4.5. Gêne totale et gênes spécifiques.....	158
4.6. Prédiction de la gêne totale : test de modèles de multi-exposition .....	163
5. Discussion .....	172
5.1. Sur l'analyse des verbatims.....	172
5.2. Sur les gênes spécifiques et la gêne totale.....	173
5.3. Sur les modèles de gêne totale .....	174
6. Synthèse.....	176
<b>CHAPITRE 5 : GENE EN SITUATION DE MULTI-EXPOSITION AU BRUIT DE LA CIRCULATION ROUTIERE ET AU BRUIT INDUSTRIEL : EXPERIENCE EN ENVIRONNEMENT SIMULE.....</b>	<b>179</b>
1. Objectifs.....	180
2. Méthode expérimentale .....	180
2.1. Environnement simulé : présentation de la villa .....	180
2.2. Stimuli : constitution des séquences sonores de longue durée.....	183
2.3. Dispositif expérimental .....	188
2.4. Procédure.....	188
2.5. Sujets .....	192
3. Traitement et analyse des données .....	192
3.1. Homogénéité des sujets .....	194
3.2. ANOVA à mesures répétées .....	194
3.3. ANOVA à 1 facteur.....	194
3.4. Régression logistique .....	194
3.5. Identification des sources de bruit .....	195
3.6. Corrélation et régression linéaire.....	195
4. Résultats.....	196
4.1. Agrégation des données recueillies à l'issue des deux parties .....	196
4.2. Facteurs acoustiques .....	196
4.3. Facteurs non-acoustiques .....	199
4.4. Identification des sources de bruit .....	203
4.5. Gênes partielles et gêne totale .....	204
4.6. Prédiction de la gêne totale : test des modèles de multi-exposition .....	207
5. Confrontations .....	211
5.1. Mise en œuvre .....	211
5.2. Résultats des confrontations .....	212

6. Discussion .....	215
6.1. Facteurs acoustiques et facteurs non-acoustiques .....	215
6.2. Prédiction des gênes partielles .....	216
6.3. Evaluation et comparaison des modèles de gêne totale .....	217
6.4. Confrontations menées dans ces travaux .....	218
7. Synthèse.....	219
<b>CONCLUSION GENERALE.....</b>	<b>221</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....</b>	<b>229</b>
<b>REFERENCES PERSONNELLES .....</b>	<b>245</b>
<b>ANNEXES.....</b>	<b>249</b>
ANNEXE A : La gêne sonore en situation de multi-exposition aux bruits routier et industriel - résultats d'une enquête <i>in situ</i> .....	251
ANNEXE B : Indices acoustiques et psychoacoustiques calculés sur l'ensemble des bruits de passage de véhicules routiers.....	257
ANNEXE C : Questionnaires adressés aux sujets à l'issue des expérimentations .....	261
ANNEXE D : Test de comparaison par paires – résultats du choix forcé pour le désagrément sonore.....	275
ANNEXE E : Evaluation et comparaison des modèles prédictifs de la gêne totale : les résultats en détail.....	283

# Liste des figures

Figure 1.1 : Schéma explicatif pour la signification d'un niveau de pression sonore équivalent par rapport à un niveau de pression sonore.....	12
Figure 1.2 : Construction de l'indice SEL.....	13
Figure 1.3 : Courbes isosoniques [Sch00].....	14
Figure 1.4 : Sensation de force de fluctuation et sensation de rugosité. $f_{\text{mod}}$ est la fréquence de modulation en amplitude [FZ06].....	16
Figure 1.5 : Effet dièdre [Ham03].....	21
Figure 1.6 : Exemple des combinaisons des bruits A et B à étudier dans le cas idéal. ....	45
Figure 1.7 : Abaque permettant d'accéder aux valeurs du facteur de correction E [Pow79c]. .....	57
Figure 1.8 : Graphique illustrant la démarche de Powell [Pow79c]. ....	57
Figure 1.9 : Schéma synthétique de la démarche adoptée. ....	63
Figure 2.1 : Profil d'une rue en « U ».....	68
Figure 2.2 : Différence de niveau sonore pour une rue en « U » et une rue « ouverte » [CERTU98]. ....	69
Figure 2.3 : Système de coordonnées sphériques centré sur la tête de l'auditeur. $\delta$ est l'élévation, $\varphi$ est l'azimut, et $r$ la distance [Bla97]. ....	71
Figure 2.4 : Onde de contournement et onde directe [HW03]. ....	72
Figure 2.5 : Schématisation d'un microphone Soundfield [Cou93]. ....	74
Figure 2.6 : Mannequin artificiel Cortex MANIKIN MK2/NCF1. ....	75
Figure 2.7 : Espace stéréophonique. ....	75
Figure 2.8 : Systèmes usuels de prise de son stéréophonique d'intensité. En haut le système M-S ; à gauche le système XY ; à droite, le système Stéréosonic.....	77
Figure 2.9 : Système de prise de son stéréophonique de temps AB.....	78
Figure 2.10 : Système de prise de son stéréophonique de temps et d'intensité ORTF. ....	78
Figure 3.1 : Dendrogramme des sujets. D est la distance ultramétrique exprimée en fonction des sujets désignés par un chiffre.....	97
Figure 3.2 : Dendrogramme des objets (à gauche) et évolution de l'indice de Rand corrigé moyen en fonction du niveau de catégorisation (à droite). D est la distance entre objets. ....	98
Figure 3.3 : Spectrogrammes auditifs des prototypes. a) dfo_4 (Cat. 1), b) dao_2 (Cat. 2), c) vfo_5 (Cat. 3). ....	101
Figure 3.4 : Pourcentage cumulée de variance expliquée par les dimensions de l'espace résultant de l'EMD. ....	109
Figure 3.5 : Espaces perceptifs de dissimilarité 2D des bruits de passage de véhicules routiers. Les bruits provenant de la même catégorie perceptive et cognitive partagent la même couleur. a) EMD sur les données du test de comparaison par paires. b) EMD sur les données du test de catégorisation libre. ....	109

Figure 3.6 : Exemple de calcul de l'indice $\Delta L^+$ (taux accroissement du niveau de pression sonore pondéré A en fonction du temps) pour le bruit de passage vfo_5 (prototype de la catégorie 3).....	111
Figure 3.7 : Effet du facteur « Niveau Sonore » sur les réponses de gêne concernant la catégorie 1 (deux-roues en allure stabilisée). Les erreurs-types sont représentées au moyen de barre d'erreur autour des valeurs moyennes. ....	126
Figure 3.8 : Effet du facteur « Source » pour trois catégories de bruits de passage d'hétérogénéité différente en termes de gêne ressentie. a) Catégorie 1 - homogène ; b) Catégorie 2 - très hétérogène ; c) Catégorie 7 – moyennement hétérogène. Les bruits de passage qui génèrent des réponses de gêne sans différence significative (d'après le test HSD de Tuckey) sont regroupés et entourés sur chaque graphique. La durée des différents bruits de passage est également reportée. Les erreurs-types sont représentées au moyen de barre d'erreur autour des valeurs moyennes. ....	127
Figure 3.9 : Spectrogrammes auditifs de bruits de passage de la catégorie 2 pour un $L_{Aeq,T}$ égal à 56 dB(A). a) dao_3 ; b) dau_2. ....	129
Figure 4.1 : Spectrogramme auditif du bruit industriel enregistré dans la zone enquêtée pour un $L_{Aeq,T}$ de 42dB.....	140
Figure 4.2 : Effet du facteur « Niveau du bruit industriel » sur les réponses de gêne dues à la mono-exposition au bruit industriel concernant le test d'évaluation de la gêne en situation de multi-exposition au bruit industriel et aux bruits de passage de la catégorie 7. Les erreurs-types sont représentées au moyen de barres d'erreur autour des valeurs moyennes. ....	147
Figure 4.3 : Effet du facteur « Niveau du bruit routier » sur les réponses de gêne due à la mono-exposition aux bruits de passage de la catégorie 7. Les erreurs-types sont représentées au moyen de barres d'erreur autour des valeurs moyennes. ....	148
Figure 4.4 : Effet des facteurs a) « Niveau du bruit routier » et b) « Niveau de bruit industriel », sur les réponses de gêne due à la multi-exposition au bruit industriel et aux bruits de passage de la catégorie 3. Les erreurs-types sont représentées au moyen de barres d'erreur autour des valeurs moyennes.....	150
Figure 4.5 : Principe de la représentation de Vos [Vos92]. a) Combinaison $A(L_{A1})+B(L_{B1})$ . b) Combinaison $B(L_{B1})+A(L_{A1})$ .....	159
Figure 4.6 : Représentation de la gêne totale et des gênes spécifiques relatives aux données sur le test d'évaluation de gêne en situation de multi-exposition au bruit industriel et aux bruits de passage de la catégorie 2 (deux-roues à allure accélérée), selon la méthode de Vos [Vos92]. ....	161
Figure 4.7 : Représentation de la gêne totale et des gênes spécifiques relatives aux données du test d'évaluation de la gêne en situation de multi-exposition au bruit industriel et aux bruits de passage de la catégorie 6 (véhicules légers à allure accélérée), selon la méthode de Vos [Vos92].....	162
Figure 4.8 : Nuage de points représentant les réponses de gêne totale prédite ( $\hat{A}_T$ ) en fonction des réponses moyennes de gêne totale ( $A_T$ ). ....	166
Figure 4.9 : Nuage de points représentant les réponses de gêne prédites ( $\hat{A}_T$ ) par l'équation moyenne (4.3) du modèle des effets indépendants en fonction des réponses moyennes de gêne observées ( $A_T$ ). ....	169
Figure 4.10 : Nuage de points représentant les réponses de gêne prédites par le modèle de source dominante ( $\hat{A}_T$ ) en fonction des réponses moyennes de gêne observées ( $A_T$ ). a) variante « observée ». b) variante « prédite ». ....	170
Figure 4.11 : Nuages de points représentant les réponses de gêne prédites ( $\hat{A}_T$ ) en fonction des réponses moyennes de gêne observées ( $A_T$ ). a) Modèle de sommation vectorielle,	

variante « observée ». b) Modèle de sommation vectorielle, variante « prédite ». c) Modèle de régression linéaire, variante « observée ». d) Modèle de régression linéaire, variante « prédite ». e) Modèle mixte, variante « observée ». f) Modèle mixte, variante « prédite ».....	171
Figure 4.12 : Evolution de la sonie en fonction du temps d'un bruit de passage (en rouge, pour un $L_{Aeq,T} = 56dB(A)$ ) et du bruit industriel (en bleu, pour un $L_{Aeq,T} = 46dB(A)$ ). a) bruit de passage dfo_4 (catégorie 1). b) bruit de passage ddu_1 (catégorie 4).....	174
Figure 5.1 : Vue aérienne de la villa (encadrée en rouge). .....	181
Figure 5.2 : Plan des pièces de la villa mises à disposition pour l'expérimentation.....	181
Figure 5.3 : Aménagement du salon (pièce CH1). .....	182
Figure 5.4 : Isolement standardisé mesuré lorsque la fenêtre du salon est fermée ( $D_{nT}$ fermé) et entrouverte ( $D_{nT}$ entrouvert) [EKR10]. .....	182
Figure 5.5 : Evolution du niveau de pression sonore pondéré A ( $L_A(t)$ ) en fonction du temps pour la séquence combinant le bruit industriel à 44dB(A) et le bruit de la circulation routière à 47 dB(A) (notée BI(44)+BR(47)).....	187
Figure 5.6 : Dispositif expérimental.....	188
Figure 5.7 : Proportion des différentes réponses à la question sur l'ouverture/fermeture de la fenêtre. ....	198
Figure 5.8 : Effet des différents facteurs non-acoustiques sur les variables dépendantes considérées. $A_{BI}'$ , $A_{BR}'$ , $A_T$ et $Per$ représentent respectivement, les réponses de gêne spécifique due au bruit industriel, les réponses de gêne spécifique due au bruit de la circulation routière, les réponses de gêne due à la gêne totale, et les réponses de perturbation ressentie. Les erreurs-types sont représentées au moyen de barres d'erreur autour des valeurs moyennes. ....	202
Figure 5.9 : Représentation de la gêne totale et des gênes partielles pour le test d'évaluation de la gêne en situation de multi-exposition au bruit industriel et au bruit de la circulation routière en environnement simulé, selon la méthode de Vos [Vos92]. ....	207
Figure 5.10 : Nuages de points représentant les réponses de gêne prédites ( $\hat{A}_T$ ) en fonction des réponses moyennes de gêne totale observée ( $A_T$ ) pour a) le modèle des effets indépendants à variante « sonie » et b) le modèle de sommation pondérée. ....	208
Figure 5.11 : Nuages de points représentant les réponses de gêne prédite (variante « observée ») en fonction des réponses moyennes de gêne observées pour a) le modèle de source dominante, b) le modèle de sommation vectorielle, c) le modèle de régression linéaire, et d) le modèle mixte perceptif.....	210
Figure 5.12 : Représentation graphique des confrontations. a) Equations moyennes établies en laboratoire testées sur les réponses de gêne partielle observées récoltées en environnement simulé. b) Equations moyennes établies en laboratoire et testées sur les réponses de gêne partielle prédites récoltées en environnement simulé. c) Equations moyennes établies en laboratoire et testées sur les données observées lors de l'enquête <i>in situ</i> . d) Equations établies en environnement simulé et testées sur les données observées lors de l'enquête <i>in situ</i> . ....	214
Figure 5.13 : Nuages de points représentant les réponses de gêne totale observées en fonction des réponses de gêne totale prédite par le modèle de sommation vectorielle dans la variante « observée ». a) données provenant des expérimentations en laboratoire. b) données provenant de l'expérimentation en environnement simulé. ....	217





# Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Typologie perceptive de bruits industriels permanents et stables [Nos07].....	27
Tableau 1.2 : Indices de bruits industriels permanents et stables [AMVM+10].....	28
Tableau 1.3 : Ensemble de facteurs acoustiques pouvant influencer les jugements de gêne sonore [MPA05].	31
Tableau 1.4 : Ensemble de facteurs non-acoustiques pouvant influencer les jugements de gêne sonore [MPA05].	33
Tableau 1.5 : Avantages et inconvénients de l'évaluation de la gêne sonore <i>in situ</i> ou en laboratoire [Ric96].	39
Tableau 2.1 : Facteurs influençant l'émission et la propagation du bruit de la circulation routière [SETRA09a, SETRA09b].	66
Tableau 2.2 : Typologie physique <i>a priori</i> du bruit routier en milieu urbain.....	70
Tableau 2.3 : Performances des techniques testées. * indique la restitution ayant obtenu le moins bon score, ** indique celle ayant obtenu un score intermédiaire, *** indique celle ayant obtenu le meilleur score [Gua03].	80
Tableau 3.1 : Coefficient de corrélation cophénétique (C) et indice $\gamma$ de Goodman-Kruskal pour les CAH effectuées sur les matrices [S] et [D].	97
Tableau 3.2 : Tableau synthétique présentant les compositions des catégories, et leur prototype, ainsi que les principaux résultats de l'analyse linguistique en liaison avec les catégories.	100
Tableau 3.3 : Résultats des ANOVA à mesures répétées menées sur les réponses de gêne collectées au cours des tests relatifs à chaque catégorie. Les effets des facteurs « Niveau Sonore – NS », « Source – S » ainsi que leur interaction « NS x S » sont reportés. * : l'hypothèse de sphéricité est violée, n.s. : non statistiquement significatif	126
Tableau 3.4 : Corrélation entre les réponses moyennes de gêne des bruits de passage de la catégorie 1 ( $A_1$ ) et divers indices descriptifs de l'intensité sonore (calculés pour la voie gauche). $L_{C-A}$ est la différence entre les indices $L_{Ceq,T}$ et $L_{Aeq,T}$ . $L_{BF}$ , $L_{MF}$ , $L_{HF}$ sont respectivement les indices $L_{Aeq,T}$ calculés entre les bandes de tiers d'octave centrées sur 25 et 250Hz, 315 et 1250Hz, 1.6 et 12.5kHz (cf. [AMVM+10]). a : n.s. d : $p < 0.001$ .	129
Tableau 3.5 : Corrélation entre les réponses moyennes de gêne des bruits de passage de la catégorie 2 ( $A_2$ ) et divers indices (calculés pour la voie gauche). $N_{15-18}$ est la sonie intégrée entre 15 et 18 Barks, $F_{max}$ et $R_{max}$ sont respectivement la force de fluctuation et la rugosité maximum. <sup>a</sup> : n.s. ; <sup>c</sup> : $p < 0.01$ ; <sup>d</sup> : $p < 0.001$ .	130
Tableau 3.6 : Corrélation entre les réponses moyennes de gêne des bruits de passage de la catégorie 3 ( $A_3$ ) et divers indices calculés pour la voie gauche. <sup>a</sup> : n.s. ; <sup>d</sup> : $p < 0.001$ .	131
Tableau 3.7 : Corrélation entre les réponses moyennes de gêne des bruits de passage de la catégorie 4 ( $A_4$ ), 5 ( $A_5$ ) et 7 ( $A_7$ ) et divers indices calculés pour la voie gauche. <sup>a</sup> : n.s. ; <sup>b</sup> : $p < 0.05$ ; <sup>c</sup> : $p < 0.01$ ; <sup>d</sup> : $p < 0.001$ .	131
Tableau 3.8 : Corrélation entre les réponses moyennes de gêne des bruits de passage de la catégorie 6 ( $A_6$ ) et divers indices calculés pour la voie gauche. <sup>a</sup> : n.s. ; <sup>c</sup> : $p < 0.01$ ; <sup>d</sup> : $p < 0.001$ .	132

Tableau 3.9 : Indicateurs de gêne retenus pour les catégories de bruits de passage de véhicules routiers, calculés pour la voie gauche. Pour les indicateurs issus de régression multiples, nous avons fait figurer entre parenthèse et en italique les coefficients de régression standardisés. $R^2$ (ou $r^2$ ) sont les coefficients de détermination associés aux modèles. Err. stand. représente l'erreur type de l'estimation. <sup>b</sup> : $p < 0.05$ ; <sup>c</sup> : $p < 0.01$ ; <sup>d</sup> : $p < 0.001$ . .....	132
Tableau 4.1 : Indices descriptifs du bruit industriel enregistré au cœur de la zone enquêtée (pour un $L_{Aeq,T}=42\text{dB}$ ).....	141
Tableau 4.2 : Résultats des ANOVA à mesures répétées à un facteur (« Niveau du bruit industriel – NBI »), menées sur les réponses de gêne dues à la mono-exposition au bruit industriel récoltées au cours de chaque test. * : hypothèse de sphéricité violée.....	146
Tableau 4.3 : Résultats des ANOVA à mesures répétées à deux facteurs « Niveau du bruit routier – NBR », « Source – S » effectuées sur les réponses de gêne due à la mono-exposition aux bruits de passage, récoltées au cours de chaque test. * : hypothèse de sphéricité violée ; n.s. : non statistiquement significatif. ....	148
Tableau 4.4 : Résultats des ANOVA à mesures répétées à trois facteurs. Seuls les effets des facteurs principaux « Niveau du bruit routier – NBR », « Niveau de bruit industriel – NBI » et « Source – S » sur les réponses de gêne due à la multi-exposition au bruit industriel et aux bruits de passage des 7 catégories sont présentés. * : hypothèse de sphéricité violée. ....	150
Tableau 4.5 : Récapitulatif de l'analyse des verbatims concernant les bruits de passage en rapport avec l'identification du « type de véhicules » et du « type d'allures ». ....	151
Tableau 4.6 : Récapitulatif de l'analyse des verbatims concernant le bruit routier en rapport avec la description des bruits de passage.....	152
Tableau 4.7 : Pourcentage des références au désagrément et à la gêne dans les jugements émis par les sujets sur les bruits de passage de chaque catégorie.....	152
Tableau 4.8 : Récapitulatif de l'analyse des verbatims concernant le bruit industriel. ....	153
Tableau 4.9 : Récapitulatif de l'analyse des verbatims concernant la description du bruit industriel. ....	154
Tableau 4.10 : Pourcentage des références au désagrément dans les jugements émis par les sujets sur le bruit industriel. ....	155
Tableau 4.11 : Coefficients de corrélation calculés entre les réponses moyennes de gêne due au bruit industriel récoltées au cours des 7 tests et divers indices acoustiques et psychoacoustiques. $A_{Bli}$ est la gêne spécifique du bruit industriel obtenue au cours du test d'évaluation de la gêne en situation de multi-exposition au bruit industriel et aux bruits de passage issus de la catégorie i. <sup>a</sup> : n.s. ; <sup>b</sup> $p < 0.05$ ; <sup>c</sup> : $p < 0.01$ . ....	156
Tableau 4.12 : Indicateurs de gêne retenus pour la prédiction de la gêne due au bruit industriel en mono-exposition. $r^2$ est le coefficient de détermination associés aux modèles. Err. stand. représente l'erreur type de l'estimation. <sup>b</sup> : $p < 0.05$ ; <sup>c</sup> : $p < 0.01$ . ....	156
Tableau 4.13 : Indicateurs de gêne pour les catégories de bruits de passage de véhicules routiers. Pour les indicateurs issus de régression multiples, il figure entre parenthèse et en italique les coefficients de régression standardisés. $R^2$ (ou $r^2$ ) sont les coefficients de détermination associés aux modèles. Err. stand. représente l'erreur type de l'estimation. $A_{BRi}$ est la gêne spécifique due aux bruits de passage de la catégorie i. <sup>a</sup> : n.s. ; <sup>c</sup> : $p < 0.01$ ; <sup>d</sup> : $p < 0.001$ . ....	157
Tableau 4.14 : Equations de régression pour les gênes spécifiques des bruits combinés en fonction de l'indice $L_{Aeq,T}$ , en vue de la représentation de Vos. <sup>b</sup> : $p < 0.05$ . <sup>c</sup> : $p < 0.01$ . <sup>d</sup> : $p < 0.001$ . ....	160
Tableau 4.15 : Modèles testés et variantes. $L_T$ : $L_{Aeq,T}$ total. $N_T$ : sonie totale. $L_{BR}$ : $L_{Aeq,T}$ des bruits de passage . $L_{BI}$ : $L_{Aeq,T}$ du bruit industriel. $N_{BR}$ : sonie des bruits de passage. $N_{BI}$ :	

sonie du bruit industriel. $L_t$ : indice de bruit global [Vos92]. $A_{BR}$ : Réponse moyenne de gêne spécifique des bruits de passage. $A_{BI}$ : Réponse moyenne de gêne spécifique du bruit industriel. $\hat{A}_{BR}$ : gêne spécifique prédite du bruit routier à l'aide des indicateurs fournis. $\hat{A}_{BI}$ : gêne spécifique prédite du bruit industriel à l'aide des indicateurs fournis. $\alpha_o$ : angle pour le modèle de sommation vectorielle (variante « observée »). $\alpha_p$ : angle pour le modèle de sommation vectorielle (variante « prédite »). .....	165
Tableau 4.16 : Coefficient $k$ optimal et angles $\alpha_o$ et $\alpha_p$ optimaux pour chaque test. $k$ : coefficient pour le modèle de sommation pondérée. $\alpha_o$ : angle pour le modèle de sommation vectorielle (variante « observée »). $\alpha_p$ : angle pour le modèle de sommation vectorielle (variante « prédite »). .....	167
Tableau 4.17 : Bilan de l'évaluation des modèles psychophysiques pour la prédiction de la gêne totale. ....	168
Tableau 4.18 : Bilan de l'évaluation des modèles perceptifs de prédiction de la gêne totale. ....	170
Tableau 5.1 : Ecart global ( $\Delta_{vfo}$ ) entre niveaux de bruits moyens mesurés pour les véhicules légers à allure stabilisée et les niveaux de bruit moyens mesurés des autres types de véhicules aux autres allures, en vue de la construction des séquences sonores de circulation routière. ....	184
Tableau 5.2 : Indices (calculés pour la voie gauche) décrivant la séquence de bruit de la circulation routière (pour l'indice $L_{Aeq,T}$ égal à 50 dB(A)). ....	186
Tableau 5.3 : Composition de la séquence de bruit de la circulation routière. Gris : bruits de passage de la catégorie 1. Bleu ciel : Bruits de passage de la catégorie 2. Vert : bruits de passage de la catégorie 3. Rose : bruits de passage de la catégorie 4. Violet : bruits de passage de la catégorie 5. Orange : bruits de passage de la catégorie 6. Blanc : bruits de passage de la catégorie 7. ....	187
Tableau 5.4 : Récapitulatif des variables dépendantes et des variables indépendantes mises en jeu. En italique figurent les analyses à effectuer. ....	193
Tableau 5.5 : Résultats des tests $t$ effectués sur les réponses de gêne due aux 4 séquences courtes recueillies à l'issue des deux parties de l'expérience. Les 2 <sup>ème</sup> et 3 <sup>ème</sup> colonnes représentent les réponses moyennes de gêne. ....	196
Tableau 5.6 : Résultats des ANOVA à mesures répétées à 2 facteurs (« Niveau de bruit industriel – NBI », « Niveau de bruit routier – NBR ») menées sur les différentes variables dépendantes (V.D.). $A_{BI}'$ représente les réponses de gêne partielle due au bruit industriel. $A_{BR}'$ représente les réponses de gêne partielle due au bruit de la circulation routière. $A_T$ représente les réponses de gêne totale. Per représente les réponses de perturbation ressentie. * : hypothèse de sphéricité violée. ....	197
Tableau 5.7 : Proportion des différentes réponses de crainte exprimée vis-à-vis d'une installation industrielle - $C_{BI}$ . ....	199
Tableau 5.8 : Proportion des différentes réponses de crainte exprimée vis-à-vis d'une infrastructure routière - $C_{BR}$ . ....	200
Tableau 5.9 : Proportion des différentes réponses de sensibilité au bruit en général - Se. ....	200
Tableau 5.10 : Proportion des différentes activités reportées par l'ensemble des sujets sur l'ensemble des séquences. ....	201
Tableau 5.11 : Résultats des ANOVA à 1 facteur menées sur les différentes variables dépendantes (V.D. – mêmes notations qu'utilisées précédemment) visant à tester l'effet des différentes variables indépendantes (V.I.). $C_{BI}$ et $C_{BR}$ sont les craintes exprimées respectivement vis-à-vis d'une installation industrielle et d'une infrastructure routière. Se est la sensibilité au bruit en général. Ac est l'activité pratiquée. ....	201
Tableau 5.12 : Proportion moyenne (sur l'ensemble des séquences) des occurrences de chaque classe. L'écart-type est indiqué entre parenthèses. ....	203

Tableau 5.13 : Coefficients de corrélation calculés entre les réponses moyennes de gêne partielle due au bruit industriel ( $A_{BI}$ ) et divers indices, calculés pour la voie gauche. <sup>a</sup> : non statistiquement significatif. <sup>d</sup> : $p < 0.001$ .....	204
Tableau 5.14 : Equations de régression pour la prédiction de la gêne partielle due au bruit industriel ( $A_{BI}$ ) et en vue de l'utilisation de la représentation de Vos [Vos92]. <sup>d</sup> : $p < 0.001$ . .....	205
Tableau 5.15 : Coefficients de corrélation calculés entre les réponses moyennes de gêne partielle due au bruit de la circulation routière ( $A_{BR}$ ) et divers indices, calculés pour la voie gauche. <sup>a</sup> : non statistiquement significatif. <sup>c</sup> : $p < 0.01$ . <sup>d</sup> : $p < 0.001$ .....	205
Tableau 5.16 : Equations de régression pour la prédiction de la gêne partielle due au bruit de la circulation routière et en vue de la représentation de Vos [Vos92]. <sup>d</sup> : $p < 0.001$ . .....	206
Tableau 5.17 : Evaluation des modèles de gêne totale pour la multi-exposition au bruit industriel et au bruit de la circulation routière évaluée en environnement simulé. Dans les équations de régression, les chiffres en italique entre parenthèses correspondent aux coefficients de régression standardisés. <sup>a</sup> : n.s. <sup>b</sup> : $p < 0.05$ . <sup>c</sup> : $p < 0.01$ . <sup>d</sup> : $p < 0.001$ .....	209
Tableau 5.18 : Mise en œuvre des confrontations à partir des résultats obtenus en laboratoire.....	211
Tableau 5.19 : Mise en œuvre des confrontations à partir des résultats obtenus en environnement simulé.....	212
Tableau 5.20 : Bilan des confrontations. <sup>d</sup> : $p < 0.001$ .....	213

# Introduction Générale

## Bruit de l'environnement : un contexte sanitaire, socio-économique, réglementaire et scientifique fort

Le développement des sociétés occidentales a fait apparaître de nouveaux besoins, et de nouvelles manières de consommer. Ces dernières ont entraîné des changements d'échelle. En effet, aujourd'hui, nous avons un besoin d'accès rapide à des biens et services qui sont produits en masse et avec des exigences accrues de qualité. Un tel bouleversement des activités humaines a introduit dans notre environnement quotidien de nouvelles sources de bruit toujours plus nombreuses et variées : bruits des transports (routier, aérien, ferroviaire), bruits industriels, bruits de chantier, bruits de voisinage, bruits liés aux activités commerciales, bruits liés aux activités de loisir, etc. [WHO11]. La forte densification des villes, et zones urbaines en général, a introduit pour tout individu, une multiplication des expositions à ces sources de bruit, ainsi qu'une multiplication des situations de **multi-exposition** sonore.

Une conséquence est la place qu'occupe le bruit pour les individus. Il est **une pollution invisible** qui semble moins préoccuper les Français que d'autres problèmes environnementaux (par exemple le réchauffement climatique), mais il apparaît comme **une nuisance majeure au quotidien** [MGLB08, MB11]. Pour preuve, une étude de l'INSEE [MR02] a montré que les ménages des agglomérations de plus de 50,000 habitants placent en premier lieu le bruit comme « problème qui les préoccupent le plus » devant les problèmes d'insécurité et de pollution atmosphérique. Lambert dans une synthèse sur la gêne due au bruit des transports terrestres [Lam02] fait remarquer que 35% à 40% de la population française se disent gênés par le bruit à leur domicile et que cette gêne est imputable à hauteur de 47% à des sources de bruit du transport routier (deux-roues, automobiles et poids lourds). Lambert et Philipps-Bertin [LP08] ont montré à partir d'une enquête réalisée en 2005, que parmi tous les problèmes environnementaux liés aux transports, 27,7% des enquêtés considèrent que le bruit (et les vibrations) est le problème principal, derrière la pollution de l'air (35,1%). Un récent sondage réalisé par l'institut TNS SOFRES [TNS10], confirme les tendances observées par Lambert [Lam02], et montre par ailleurs que 2 Français sur 3 se disent gênés par le bruit à leur domicile, et que cette gêne est imputable majoritairement au bruit des transports (le bruit de la circulation routière est la première source de gêne citée parmi les sources liées au transport). Les activités commerciales et industrielles sont également citées, mais moins souvent que les bruits de voisinage [TNS10]. Enfin, l'OMS, dans un récent rapport [WHO11], estime que l'exposition au bruit tend à augmenter en Europe, alors que l'exposition à d'autres pollutions environnementales diminue.

Si le bruit apparaît comme une nuisance majeure au quotidien c'est en partie pour **ses effets sur la santé**, que l'on définit comme un état complet de bien-être physique, mental et social [EEA10, WHO11]. Les effets du bruit sur la santé peuvent être auditifs (par exemple fatigue auditive, perte auditive partielle ou totale, etc.) ou extra-auditifs (par exemple perturbation du sommeil, gêne, maladies cardiovasculaires, etc.) [AFSSE04]. Ces effets ont

été attestés et étudiés scientifiquement. Par exemple, Mouret et Vallet [MV95] ont décrit les perturbations d'une exposition au bruit sur l'enchaînement et la durée des différents stades du sommeil. Miedema *et al.* [MPV03] ont déterminé des relations entre les niveaux d'exposition sonore en période nocturne et les perturbations du sommeil dues aux différents modes de transport. On connaît moins les effets indirects du bruit sur la santé, certainement parce qu'ils sont plus difficiles à caractériser (par exemple augmentation de la prise de somnifères, de médicaments dus à l'anxiété, etc.). L'OMS [WHO11] a estimé que, pour les pays d'Europe de l'Ouest, au moins 1 million d'années de vie « en bonne santé » sont perdues chaque année à cause d'effets liés au bruit des transports. De ce fait, selon l'OMS [WHO11], le bruit dans l'environnement ne devrait pas seulement être considéré comme **une nuisance**, mais également comme **un problème de santé publique**.

Par ailleurs, l'exposition au **bruit** participe indirectement à la **persistance d'inégalités sociales** [MGLB08, MB11]. En effet, c'est bien souvent les populations les moins aisées qui habitent des logements de moins bonne qualité phonique dans des endroits situés dans de fortes zones d'exposition sonore (par exemple à proximité d'aéroports, voies ferroviaires, de boulevards périphériques, etc.). De plus, l'exposition sonore a un impact sur les prix du foncier qui peuvent se dégrader en cas de construction d'une nouvelle infrastructure d'importance. L'AFSSE (désormais ANSES<sup>1</sup>) a estimé le coût économique de l'impact sanitaire du bruit des transports en recensant combien les français seraient prêts à payer pour jouir d'un environnement sonore acceptable. Il s'avère que le coût sur une année s'élève à 3.43 milliards d'euros, soit 0.26% du PIB (année 1998).

A l'heure actuelle la réglementation française en matière de politique de lutte contre le bruit, en réponse à cette demande sociale et sanitaire, apparaît complète, mais difficile à appliquer [MB11]. Notamment, alors que Lambert et Philipps-Bertin [LP08] estiment qu'environ 12% de la population française vit dans des conditions de multi-exposition sonore à différents bruits de transport<sup>2</sup>, **la réglementation ne considère actuellement que les principales sources de bruit de l'environnement séparément**. Malgré des propositions pratiques (par exemple [CERTU08a, EEA10]), il existe un vide réglementaire à propos de la multi-exposition sonore, qui fait écho à un enjeu scientifique de taille. En effet, actuellement aucun indicateur ou modèle ne fait consensus au sein de la communauté scientifique pour caractériser les situations de multi-exposition sonore (cf. par exemple [MPAV05]). Le groupe de travail n°3 du Grenelle de l'Environnement [GT30 7] a d'ailleurs listé une série de priorités concernant la lutte contre le bruit, visant à assurer un environnement sonore de qualité pour tous par un respect de réglementations adaptées. Le groupe de travail n°3 a notamment souligné le besoin de connaissances pour mener à bien cet objectif et a rendu prioritaire la définition d'indicateurs de la gêne sonore, en particulier en situation de multi-exposition sonore [GT307].

## **Problématique : vers une amélioration des cartes de bruit**

Le Parlement Européen et le Conseil de l'Union Européenne ont adopté en 2002 la **directive 2002/49/CE** relative à l'évaluation et à la gestion du bruit dans l'environnement [PECE02]. Cette directive a pour objectif principal d'éviter, prévenir ou réduire en priorité les effets nuisibles y compris la gêne due à l'exposition au bruit dans l'environnement. Pour atteindre cet objectif, trois actions sont mises en place : (1) détermination de l'exposition au

---

<sup>1</sup> Agence Nationale de Sécurité Sanitaire de l'Alimentation, de l'Environnement et du Travail.

<sup>2</sup> Ce chiffre ne prend en compte que les multi-expositions à différents bruits de transport, et sous-estime probablement le pourcentage de français vivant dans des conditions de multi-exposition sonore de manière générale.

bruit dans l'environnement au moyen de **cartographies de bruit**, (2) information du public en ce qui concerne le bruit dans l'environnement et ses effets, (2) adoption de plans d'actions fondés sur les résultats des cartographies de bruit, notamment pour préserver la qualité de l'environnement sonore lorsque celle-ci est satisfaisante [PECE02].

Les cartographies de bruit doivent être réalisées pour les **principales sources de bruit considérées séparément** (transport routier, ferroviaire, aérien, activités industrielles), pour les agglomérations<sup>3</sup>, les grands axes de transport (routier et ferroviaire) ainsi que les grands aéroports. Les cartographies de bruit sont en quelque sorte une représentation de l'état acoustique moyen d'une zone donnée, et c'est l'indice  $L_{den}$  qui est utilisé pour représenter l'état d'exposition sonore [PECE02].

Si les **cartes de bruit** sont reconnues pour être **une avancée significative** dans divers domaines (par exemple l'urbanisme) [RD05], **leur pertinence peut être mise en cause** pour d'autres aspects.

En effet, des relations dose-effet ont été construites pour relier la gêne sonore ressentie aux niveaux d'exposition sonore exprimés en  $L_{den}$ , et ce pour diverses sources de bruit de l'environnement (par exemple [MO01]). De telles relations visent à transformer quelque chose d'abstrait pour le grand public (des valeurs de l'indice  $L_{den}$ ), en quelque chose de concret (la gêne ressentie) [EEA10]. Alors si nous connectons ces relations aux cartes de bruit, celles-ci peuvent être interprétées comme des cartes de gêne. Or, de manière générale, les indices énergétiques, tels que l'indice  $L_{den}$ , permettent d'expliquer au mieux un tiers de la variance constatée dans les réponses de gêne récoltées au moyen d'enquête *in situ* [MPA05]. De même il est reconnu que ce type d'indices, que ce soit pour la gêne étudiée *in situ* ou en laboratoire, ne peut pas prendre en compte les spécificités spectrales ou temporelles des différentes sources de bruit de l'environnement, qui apparaissent toutefois importantes dans la formulation de jugements de gêne (par exemple [HDS84, MPA05] pour la gêne étudiée *in situ* et [Nil07, AMVM+10] pour la gêne étudiée en laboratoire). Ainsi pour remplir l'objectif d'information du public, **il est nécessaire que les cartes de bruit soient améliorées par la définition d'indices complémentaires qui soient pertinents du point de vue de l'individu<sup>4</sup> pour caractériser la gêne sonore ressentie.**

Par ailleurs, dans les zones d'habitations où les individus font face à des situations de multi-exposition sonore, la directive 2002/49/CE ne prévoit pour l'heure qu'un empilement des différentes cartes de bruit, étant donné que celles-ci doivent être réalisées pour les différentes sources de bruit de l'environnement séparément [PECE02]. Les propositions faites pour la prise en compte de la multi-exposition sonore sur les cartes de bruit [CERTU08a, EEA10] sont une première avancée, mais elles se révèlent pour l'heure insuffisantes, car elles reposent sur les mêmes indices énergétiques critiqués ci-dessus. Ainsi, **il est nécessaire que les cartes de bruit soient améliorées par la définition d'indices (ou de modèles) complémentaires pertinents du point de vue de l'individu pour la caractérisation de la gêne sonore ressentie en situation de multi-exposition.**

Ces travaux de thèse se proposent alors de contribuer à l'amélioration des cartes de bruit selon ces deux aspects.

---

<sup>3</sup> La directive 2002/49/CE définit l'agglomération comme une partie du territoire d'un Etat membre dans laquelle la population est supérieure à 100,000 habitants [PECE02].

<sup>4</sup> Dans le contexte de nos travaux, l'individu est le riverain, qui subit la nuisance à son domicile, plutôt que l'usager de la ville.



## Démarche et organisation du document

Ainsi, en nous focalisant sur le bruit de la circulation routière en milieu urbain et sur la multi-exposition sonore au bruit de la circulation routière et au bruit industriel, **nous nous donnons pour objectifs de contribuer à l'amélioration des cartes de bruit par la proposition d'indicateurs acoustiques pertinents du point de vue de l'individu pour rendre compte de la gêne ressentie, en situation de mono-exposition (au bruit de la circulation routière) et en situation de multi-exposition (au bruit de la circulation routière et au bruit industriel).**

Dans l'optique de répondre à ces objectifs, une démarche en trois étapes est mise en place :

1. **Caractérisation physique et perceptive des bruits de la circulation routière en milieu urbain.** L'objectif de cette première étape est *in fine* de proposer des indicateurs caractéristiques de la gêne sonore due aux bruits de la circulation routière en milieu urbain, qui soient pertinents du point de vue de l'individu, à partir d'expérimentations en laboratoire<sup>5</sup> ;
2. **Caractérisation physique et perceptive des situations de multi-exposition au bruit de la circulation routière et au bruit industriel**<sup>6</sup>. L'objectif de cette étape est de faire émerger un ou plusieurs modèles de gêne totale en situation de multi-exposition, en cohérence avec les indicateurs caractéristiques de la gêne en mono-exposition sonore, proposés au cours de l'étape 1, et ce à partir d'expérimentations en laboratoire ;
3. **Confrontation des résultats obtenus en laboratoire aux données d'une nouvelle expérience menée en environnement simulé**<sup>5</sup>, **puis aux données d'une enquête *in situ*.** L'objectif de cette étape est de valider les modèles de gêne totale proposés au cours de l'étape 2.

Ce mémoire de thèse est alors organisé en 5 chapitres distincts qui rendent compte des 3 étapes définies pour atteindre les objectifs fixés.

**Le Chapitre 1** dresse un état de l'art des différentes composantes liées à la problématique fixée. Nous nous intéressons notamment à la description et la caractérisation du bruit, en nous focalisant sur le bruit dû à la circulation routière en milieu urbain et au bruit industriel permanent et stable dû aux installations fonctionnant 24h/24. Puis nous dressons un portrait du concept de gêne sonore, avant de nous intéresser plus spécifiquement à la gêne sonore en situation de multi-exposition. Enfin, il est récapitulé l'ensemble des choix méthodologiques effectués à l'issue de cette revue bibliographique, dans l'optique de mener à bien les 3 étapes de notre démarche.<sup>7</sup>

**Le Chapitre 2** définit les bruits de la circulation routière auxquels nous nous intéressons pour mener leur caractérisation physique et perceptive. Nous détaillons également le protocole d'enregistrement *in situ* des bruits de la circulation routière et du bruit

---

<sup>5</sup> Pour une présentation synthétique de ces travaux, nous qualifierons l'évaluation de la gêne « en laboratoire » pour une expérience où les sujets sont placés dans l'écoute et mis dans le contexte d'une situation imaginaire. Nous qualifierons l'évaluation de la gêne en « environnement simulé » pour une expérience où les sujets mis dans le contexte d'une situation imaginaire ne sont plus placés dans l'écoute.

<sup>6</sup> Nous n'effectuerons pas de caractérisation physique et perceptive des bruits industriels, étant donné que cela a été réalisé au cours de précédents travaux de thèse impliquant notre laboratoire pour les bruits industriels permanents et stables [Nos07, Ala09].

<sup>7</sup> Notons que certaines sections de ce chapitre s'inspirent de rapports autoportants rédigés au cours de ces travaux de thèse, dans le cadre du projet de recherche PREDIT NOISI-EXPO, financé par l'ADEME (contrat n°0866C0066). Ces rapports sont listés dans les références personnelles.

industriel amenés à être utilisés au cours des étapes 2 et 3, après avoir établi quelle méthode d'enregistrement, et de diffusion en laboratoire, est la mieux adaptée à notre problématique.<sup>7</sup>

**Le Chapitre 3** rend compte de la caractérisation physique et perceptive des bruits de la circulation routière (étape 1). A partir des enregistrements *in situ*, un test de catégorisation libre et de verbalisation libre<sup>8</sup>, complété par un test de comparaison par paires aboutissent à la proposition d'une typologie perceptive et cognitive composée de 7 catégories de bruits de passage de véhicules routiers<sup>7</sup>. Dans la suite, chaque catégorie perceptive et cognitive est étudiée séparément en laboratoire, du point de vue de la gêne sonore, et cela aboutit à la proposition d'indicateurs caractéristiques de la gêne due aux bruits de passage de chaque catégorie.

**Le Chapitre 4** rend compte de la caractérisation physique et perceptive des situations de multi-exposition sonore aux bruits de la circulation routière et au bruit industriel (étape 2). A partir des enregistrements *in situ* des bruits de passage et du bruit industriel, 7 tests d'évaluation de la gêne, due à la multi-exposition aux 7 catégories de bruits de passage et au bruit industriel, sont menés en laboratoire. Ces tests permettent la mise en évidence de phénomènes liés à la combinaison des bruits et permettent de mettre en avant des modèles de gêne totale en liaison avec les indicateurs précédemment proposés.

**Le Chapitre 5** rend compte de la confrontation des résultats obtenus en laboratoire avec les données d'une nouvelle expérimentation menée en environnement simulé et avec les données d'une enquête *in situ*<sup>9</sup> (étape 3). Pour ce faire, une nouvelle expérimentation en environnement simulé est mise en place, dans le but d'évaluer la gêne due à la multi-exposition au bruit industriel et au bruit de la circulation routière (trafic routier reconstitué à partir des bruits de passage des 7 catégories perceptives et cognitives). Cette nouvelle expérimentation permet notamment de confirmer les modèles de gêne totale mis en exergue au cours de l'étape 2 (en laboratoire). Les modèles mis en avant au cours des expériences en laboratoire et en environnement simulé sont ensuite testés sur les données de l'enquête *in situ*. Ces données sont disponibles en annexe du rapport final du projet de recherche NOISI-EXPO, financé par l'ADEME (contrat n°08660066 C) [EEO10].

---

<sup>8</sup> L'analyse des verbalisations libres a été effectuée par Danièle Dubois (Docteur en psychologie et Directrice de Recherche CNRS), dans le cadre du projet de recherche PREDIT NOISI-EXPO, financé par l'ADEME (contrat n°0866C0066).

<sup>9</sup> L'enquête *in situ* a été réalisée dans le cadre d'un projet de recherche financé par l'AFSSET (désormais ANSES) [MV09], puis analysée sous l'angle de la multi-exposition dans le cadre du projet de recherche PREDIT NOISI-EXPO, financé par l'ADEME (contrat n°0866C0066) [EEO10, PMMR+12]. Les résultats de cette enquête, présentés dans les références citées ci-dessus, sont synthétisés en ANNEXE A de ce mémoire.



# **Chapitre 1 : Du bruit à la gêne en situation de multi-exposition sonore – focus sur le bruit provenant de la circulation routière et le bruit industriel**

*Ce premier chapitre passe en revue les différentes composantes liées à la problématique que nous nous sommes fixée.*

*La section 1 décrit le phénomène sonore, dans son aspect purement physique, avant de définir ce que l'on entend par le mot bruit. Les indices descriptifs des bruits de l'environnement qui sont couramment utilisés sont également résumés, en mettant en exergue leurs limites.*

*La section 2 se focalise plus précisément sur le bruit de la circulation routière d'une part, et sur le bruit industriel d'autre part. Les différentes sources de bruit sont récapitulées, et on met en évidence la complexité à la fois spectrale et temporelle qui en résulte.*

*La section 3 est consacrée au concept de gêne sonore. Il est notamment présenté les facteurs l'influençant, les différentes méthodes pour l'évaluer en laboratoire et au moyen d'enquêtes in situ, en nous focalisant sur les bruits routier et industriel.*

*La section 4 présente l'étude de la gêne en situations de multi-exposition sonore. On met en évidence différents phénomènes spécifiques avant de récapituler les tentatives de modélisation de la gêne dans ces situations.*

*Enfin la section 5 dresse un résumé de ce chapitre et énonce les choix méthodologiques qui guident le développement de ces travaux de thèse.*

# 1. Du phénomène sonore à la description du bruit

## 1.1. Le phénomène sonore

Le phénomène sonore est le résultat de la perturbation produite par un objet, une source sonore, vibrant dans un milieu de propagation, dans notre cas l'air. L'onde sonore se propage de proche en proche par mise en vibration de l'air, à une vitesse approximativement égale à  $340 \text{ m.s}^{-1}$ .

La propagation de l'onde sonore provoque une petite variation de la pression atmosphérique autour de sa valeur moyenne, et c'est précisément ces petites variations qui nous intéressent, et auxquelles sont sensibles les récepteurs. Un récepteur mesure ces petites variations, que l'on note  $p$ , sur un intervalle de temps  $T$  (usuellement la constante d'intégration est « fast » 125ms ou « slow » 1s). La pression sonore *rms* (root mean square), la plus couramment utilisée, est notée  $P$  [Oui01] :

$$P = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt} \quad \text{N.m}^{-2} \quad (1.1)$$

La pression sonore  $P$  n'est pas donnée par sa valeur absolue, mais par rapport à une quantité de référence qui est par convention la pression sonore pour un son pur à 1kHz au seuil d'audibilité moyen. Cette pression sonore de référence est notée  $P_{\text{ref}}$  et vaut  $2.10^{-5} \text{ Pa}$ . Les ondes sonores sont également caractérisées par la fréquence des oscillations autour de la pression atmosphérique moyenne. L'oreille humaine est sensible à des fréquences comprises entre 20 Hz et 20kHz.

L'échelle des pressions sonores auxquelles est sensible l'oreille humaine étant très étendue (de  $2.10^{-5} \text{ Pa}$  pour le seuil d'audibilité à 20 Pa pour le seuil de douleur), il a été décidé de ramener ces pressions sonores sur une échelle plus facilement utilisable. Le niveau de pression sonore, noté  $L$ , est alors défini comme suit [Oui01] :

$$L = 10 \log \left( \frac{P^2}{P_{\text{ref}}^2} \right) \quad \text{dB} \quad (1.2)$$

## 1.2. Le bruit

Nous venons de décrire dans la section 1.1 d'un point de vue purement physique le phénomène sonore. Ce phénomène sonore peut être ensuite qualifié de son ou de bruit. Ces deux notions sont souvent définies de manière distincte.

Berglund et Lindvall [BL95] considèrent que les bruits sont un type de sons non désirés. Pour ces auteurs, la distinction peut venir du fait que beaucoup de sons perçus comme des bruits varient dans le temps de manière imprévisible [BL95]. Alayrac [Ala09] ajoute qu'un bruit est notamment un son de composition spectrale complexe. Ainsi on voit qu'un bruit se distingue d'un son par des caractéristiques spectrales et temporelles complexes.

La directive Européenne 2002/49/CE [PECE02] définit le bruit de l'environnement comme tout son extérieur non désiré ou nuisible résultant d'activités humaines. Berglund et Lindvall [BL95] estiment que le bruit affecte ou peut affecter de manière néfaste le bien-être physiologique ou psychologique des gens. Une autre distinction entre bruit et son serait alors liée aux effets potentiels du bruit sur l'homme.

Pour Aubrée [Aub95], le bruit est lié à la multitude de ses sources, mais également aux multiples représentations que peuvent s'en faire les gens. Pour Guastavino [Gua03], son et bruit sont deux objets cognitifs distincts, en ce sens que le son est un phénomène isolé, indépendant de la source productrice et décrit en termes de propriétés physiques, tandis que le bruit est un phénomène sensible, indissociable de sa source, qui est porteur de sens pour l'auditeur dans un certain contexte d'écoute. Un bruit se distingue donc d'un son également par les représentations qu'un auditeur peut en faire, en fonction du sens que celui-ci donne à la source émettrice.

Pour Léobon [Léo95], le bruit est une notion culpabilisante, négative, alors qu'il n'est pas nécessairement nuisible. En effet d'après Delage [Del79], un son<sup>10</sup> est le témoin d'une activité qui peut être étrangère à l'homme, ou lui être liée. Si nous acceptons la manifestation d'éléments naturels (le bruit des vagues, le bruit des oiseaux), nous acceptons moins le témoignage de l'existence d'autrui (par exemple les bruits de voisinage).

Nous comprendrons donc dans la suite de ce document le bruit comme tout phénomène sonore **complexe**, tant du point de vue **spectral** que **temporel**, désiré ou non, **pouvant affecter** l'auditeur, et **porteur de sens**.

### 1.3. L'approche « *soundscape* (environnement sonore) »

Il nous paraît important d'aborder dès maintenant l'approche « *soundscape* », un champ de recherche encore relativement jeune, pour lequel l'intérêt est grandissant<sup>11</sup>.

#### 1.3.1. Qu'est-ce qu'un « *soundscape* (environnement sonore) » ?

En 2008, un groupe de travail (WG54 – *assessment of soundscape quality*) composé de professionnels (chercheurs, urbanistes, architectes, ingénieurs, etc.) ayant différents intérêts par rapport à l'environnement sonore, a été construit. Le but de ce groupe de travail est *in fine* de normaliser des méthodes d'étude des environnements sonores.

Brown *et al.* [BKG11], membres de ce groupe de travail, proposent de définir un « *soundscape* » comme l'**environnement acoustique** (la totalité des bruits) **d'un lieu** donné tel qu'il est **perçu par les humains**.

L'environnement sonore à travers ce concept est plus vu comme une composante de la qualité de vie et est envisagé tant avec ses aspects positifs que négatifs [SD06]. Le bruit n'est plus vu négativement, de manière « culpabilisante » [Léo95], comme quelque chose contre lequel on doit lutter.

Il existe donc, dans notre champ d'intérêts, des différences entre les approches « *soundscape* » et gêne sonore, que l'on pourrait résumer comme suit [BKG11] :

- La différence la plus importante est que la gêne sonore concerne l'environnement sonore extérieur tel qu'il est perçu chez soi, à l'intérieur du domicile et dans les parties privatives extérieures, tandis que le « *soundscape* » concerne l'environnement sonore extérieur tel qu'il est perçu par l'utilisateur de l'environnement, à l'extérieur de ses parties privatives ;
- Les études sur la gêne sonore tentent d'identifier et de quantifier les facteurs (acoustiques ou non-acoustiques) pouvant donner naissance à cet effet néfaste, vu comme une conséquence de la présence d'une (ou plusieurs) source de bruit dominante. Les études sur le « *soundscape* » tentent de comprendre les attributs qui

---

<sup>10</sup> Notons que Delage [Del79] choisit délibérément de ne pas distinguer son et bruit, mais parle de « sonore ».

<sup>11</sup> En atteste par exemple, le numéro spécial « *soundscape* » paru dans Acta Acustica united with Acustica (vol. 92, n°6, 2006).

influencent la perception qu'ont les individus de l'environnement sonore (l'ensemble des bruits), en fonction de leurs attentes, de la fonction du lieu, dans une approche plus holistique (confort, acceptabilité, bien-être, tranquillité, etc.).

Les approches « soundscape » et « gêne sonore » ne sont donc pas antithétiques, elles ont simplement des objets différents, tout en ayant pour objectif de contribuer à améliorer la qualité de vie des individus. De la même manière que le concept de « soundscape » n'existe qu'à travers la perception humaine [BKG11], la gêne n'existe qu'à travers les individus qui peuvent la ressentir.

### 1.3.2. Quelques résultats

Nos objets de recherche concernent l'étude des impacts en termes de gêne sonore des bruits provenant de la circulation routière ou d'origine industrielle en zone urbaine. De ce fait, l'approche « soundscape » en reste éloignée. Ainsi les résultats évoqués dans cette section sont nécessairement rapportés de manière non exhaustive. En particulier nous ne parlerons que de résultats d'études portant sur des environnements sonores urbains.

Maffiolo suite à des travaux en laboratoire a montré que 2 catégories cognitives de séquences d'environnements sonores urbains émergent : (1) séquences « évènementielles » avec identification des sources de bruit (par exemple **mécanique** amenée à être jugée négativement ou **d'origine humaine** amenée à être jugée positivement) et (2) des séquences « amorphes » desquelles aucune source de bruit ne peut être discriminée et qui font l'objet d'une évaluation hédonique et d'une description selon leurs propriétés acoustiques [Maf99]. En employant des méthodologies différentes, Guastavino [Gua06] (en se focalisant sur les représentations en mémoire) et Raimbault [Rai06] (par une expérience de terrain) ont confirmé les résultats de Maffiolo [Maff99]. En effet, Guastavino [Gua06] a mis en évidence deux catégories cognitives d'environnements sonores urbains : (1) « évènement sonore » attribué à une source de bruit identifiée et (2) « bruit de fond de la ville » qui est considéré comme un bruit collectif de la ville dont on ne peut pas discriminer de sources de bruit. Puis Raimbault [Rai06] a montré que les individus peuvent faire une écoute descriptive qui vise à l'identification des sources de bruit et des évènements sonores ainsi qu'une écoute holistique qui traite l'environnement sonore comme un tout, sans distinction de sources de bruit.

Guastavino [Gua03, Gua07] a étudié en laboratoire des séquences d'environnement sonore urbain d'important contenu en basses fréquences. Deux catégories cognitives ont alors été mises en évidence : (1) séquences « de trafic » spontanément jugées négativement en pondérant ce jugement par le degré de présence humaine et (2) séquences « d'activités humaines » spontanément jugées positivement.

Lavandier et Defréville [LD06], en se focalisant sur des séquences d'environnement sonores « évènementielles » ont établi quantitativement l'influence du type de source identifiée dans l'évaluation des séquences. En effet, l'identification de motos a une influence négative tandis que l'identification de chants d'oiseaux a une influence positive.

L'apparition d'évènements sonores liés à des sources de bruit a évidemment une influence sur la structure temporelle des environnements sonores urbains (par exemple, le nombre d'évènements, leur fréquence d'apparition, etc.). Par analogie à la musique, De Coensel *et al.* [CBM03] ont pointé du doigt la possible influence de la dynamique des environnements sonores sur leur appréciation par les individus. Botteldooren *et al.* [BCM06] ont par la suite proposé un indicateur qui pourrait permettre de catégoriser les environnements sonores suivant leur structure temporelle.

Récemment, une expérience menée par Axelsson *et al.* [ANB10] portant sur un grand nombre de séquences d'environnement sonore très diversifiées, a montré que leur

perception était principalement influencée par 2 attributs : (1) l'agrément, (2) le caractère évènementiel.

Tous ces travaux montrent des traitements cognitifs différents que font les individus de différents environnements sonores. Ces traitements sont influencés notamment par les sources de bruit identifiées ainsi que par la valeur hédonique attribuée à ces sources de bruit par les individus, cette valeur étant notamment influencée par le lieu ainsi que par les attentes des individus par rapport à ce lieu.

## 1.4. Indices de bruit

Pour rappel, on entend par **indice** toute mesure, description du phénomène physique du bruit qui prend en compte certains paramètres (fréquences, puissance, etc.). Le terme **indicateur** s'intéresse à la relation entre niveaux de bruit exprimés par un indice et impact sanitaire (en ce qui nous concerne la gêne sonore), par le biais d'une relation dose-effet [AFSSE04]. Nous l'étendrons et l'utiliserons pour toute relation entre les caractéristiques physiques du bruit exprimées par un ou des indices et la gêne sonore exprimée.

Nous parlerons dans cette section des indices de bruit en général. Usuellement, on considère qu'ils sont de trois types [MPAV05] : (1) énergétique, (2) statistique et (3) psychoacoustique. Nous décrirons dans les sections ultérieures les indices spécifiques du bruit provenant de la circulation routière et du bruit industriel.

### 1.4.1. Courbes de pondération

Les différents instruments de mesure dont nous disposons ne captent pas les pressions sonores comme notre oreille, et un filtre de pondération « A » a été créé pour prendre en compte la réponse physiologique de l'oreille humaine dans le domaine fréquentiel [MPAV05]. La pondération A approxime l'inverse de la courbe d'isotonie d'un son pur de 1kHz à 40 phones [Sch00]. Cette pondération A peut être appliquée aux pressions sonores, et le niveau de pression sonore pondéré A, noté  $L_A$  et s'exprime en dB(A)<sup>12</sup> :

$$L_A = 10 \log \left( \frac{P_A^2}{P_{ref}^2} \right) \quad dB(A) \quad (1.3)$$

La pondération A est la plus utilisée en acoustique. D'autres pondérations existent néanmoins et sont utilisées à des fins plus particulières : B, C, D, E, G (cf. [MPAV05], [BK88]).

### 1.4.2. Les indices énergétiques

#### 1.4.2.1. Le niveau de pression sonore équivalent pondéré A

Plutôt qu'un niveau de pression sonore qui est intégré par l'instrument de mesure sur un temps très court, quasi instantané, il peut être préféré l'utilisation d'un indice qui permet de représenter l'énergie moyenne sur une certaine période de temps (assez longue) : le niveau de pression sonore équivalent. La plupart des études concernant la gêne se réfèrent au niveau de pression sonore équivalent pondéré A noté  $L_{Aeq,T}$ . Il est exprimé comme suit [MPAV05] :

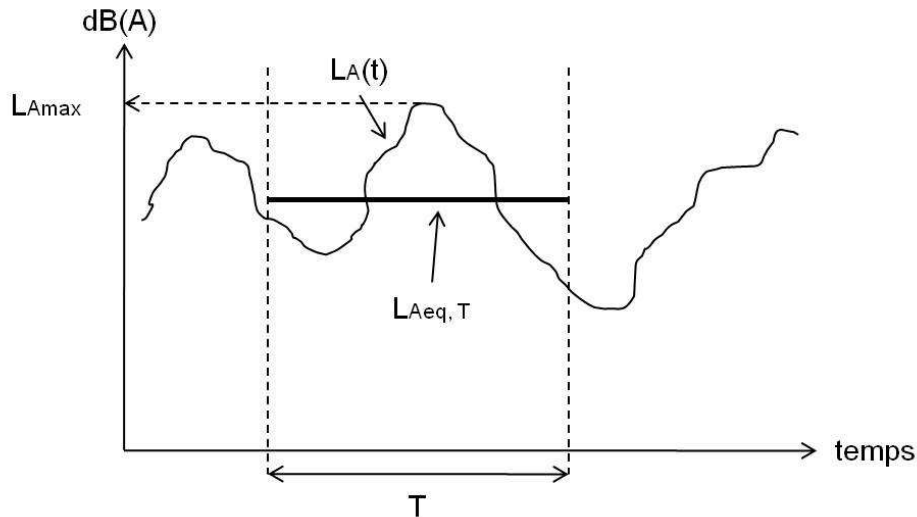
---

<sup>12</sup> Notons que le dB(A) n'est pas une unité physiquement différente du dB. Cela nous indique juste que le niveau de pression sonore est calculé en utilisant la pondération A. Dans la littérature, on fait soit apparaître la pondération dans la notation du niveau de pression sonore  $L_A$ , soit dans l'unité dB(A), ou dans les deux. Dans ce mémoire, nous choisirons la dernière option.



$$L_{Aeq,T} = 10 \log \left( \frac{1}{T} \int_0^T 10^{0,1L_A(t)} dt \right) \text{ dB(A)} \quad (1.4)$$

La Figure 1.1 permet de mieux comprendre ce à quoi correspond un niveau de pression sonore équivalent par rapport à un niveau de pression sonore :



**Figure 1.1 : Schéma explicatif pour la signification d'un niveau de pression sonore équivalent par rapport à un niveau de pression sonore.**

En d'autres termes, le niveau de pression sonore équivalent exprime le niveau d'un bruit continu qui aurait la même énergie acoustique totale que le bruit fluctuant mesuré, pour la même période de temps T [MPAV05]. L'avantage de cet indice ainsi que ses dérivés est qu'il permet de donner une idée de l'exposition longue durée à un bruit, mais les fluctuations et les niveaux de crête (décrits par l'indice  $L_{Amax}$  sur la Figure 1.1) ne sont pas pris en compte, ce qui constitue un inconvénient majeur.

#### 1.4.2.2. Le niveau de pression sonore équivalent jour-soir-nuit ( $L_{den}$ )

La directive Européenne 2002/49/CE définit un nouvel indice destiné à être employé dans tous les pays de l'Union Européenne, l'indice  $L_{den}$  (le niveau de pression sonore équivalent jour-soir-nuit). On le définit comme suit [PECE02] :

$$L_{den} = 10 \log \frac{1}{24} (12 \cdot 10^{0,1L_{day}} + 4 \cdot 10^{0,1(L_{evening}+5)} + 8 \cdot 10^{0,1(L_{night}+10)}) \text{ dB(A)} \quad (1.5)$$

Où :

- $L_{day}$  représente le  $L_{Aeq,T}$  pour la période de jour, entre 06h et 18h en France ;
- $L_{evening}$  représente le  $L_{Aeq,T}$  pour la période de soirée, entre 18h et 22h en France ;
- $L_{night}$  représente le  $L_{Aeq,T}$  pour la période de nuit, entre 22h et 06h en France.

La directive fixe les durées des trois périodes respectivement à 12, 4 et 8 heures. Le début et la fin de chaque période est laissé à la discrétion de chaque Etat membre. On remarque dans cet indice l'introduction de pénalités de 5 dB(A) et 10 dB(A) pour les périodes de soirée et de nuit qui permet la prise en compte d'une gêne de soirée et nocturne plus forte [MPAV05]. On voit également que cet indice ne peut pas permettre de prendre en compte des évènements isolés tels que le passage d'un véhicule dans le sens où les

évènements de ce type sont « noyés » dans la mesure de long terme qui doit être réalisée pour aboutir à cet indice.

### 1.4.2.3. Le niveau d'exposition sonore SEL

Le niveau d'exposition sonore, noté SEL, est défini comme le niveau de pression sonore pondéré A d'un bruit fictif qui, maintenu constant pendant 1 seconde, aurait la même énergie acoustique qu'un évènement acoustique dont le niveau sonore est fluctuant. Il s'exprime par [MPAV05] :

$$SEL = 10 \log \left( \frac{1}{t_0} \int_{t_1}^{t_2} 10^{0,1L_A(t)} dt \right) \text{ dB(A)} \quad (1.6)$$

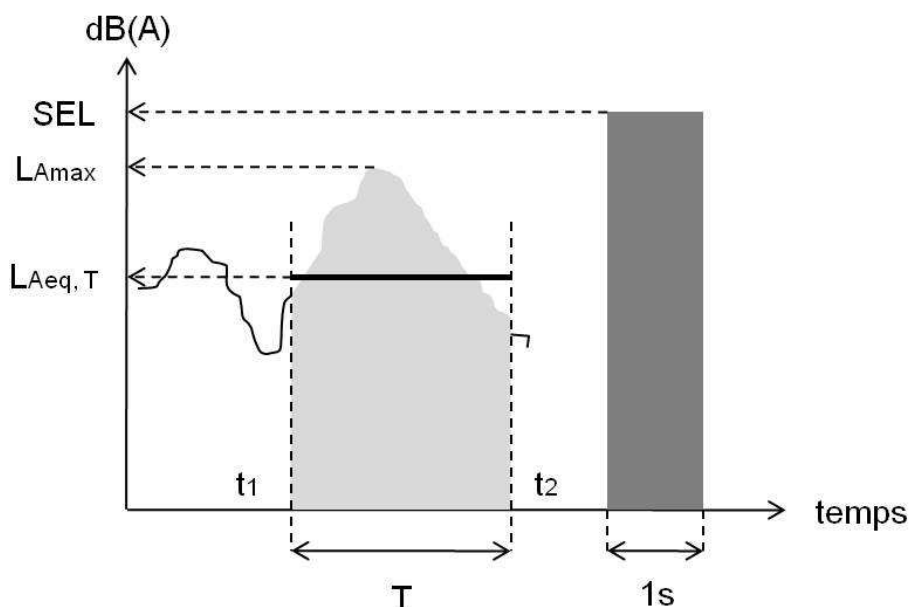
Où :

- $t_0$  est la durée du bruit fictif prise égale à 1s ;
- $t_2-t_1$  est la durée de l'évènement (notée T) que l'on souhaite décrire.

Une rapide manipulation permet d'établir une relation entre l'indice  $L_{Aeq,T}$  et l'indice SEL :

$$SEL = L_{Aeq,T} + 10 \log (t_2 - t_1) \text{ dB(A)} \quad (1.7)$$

La Figure 1.2, inspirée du rapport de l'AFSSE [AFSSE04], permet de mieux comprendre ce que représente l'indice SEL :



**Figure 1.2 : Construction de l'indice SEL.**

La prise en compte du phénomène se fait sur la durée  $T = t_2-t_1$ . La surface sous la courbe d'évolution du niveau de pression sonore délimitée par les instants  $t_1$  et  $t_2$  est égale à l'énergie acoustique de l'évènement considéré. La surface du rectangle gris foncé représente l'énergie acoustique d'un bruit d'une durée d'une seconde, de même énergie acoustique que l'évènement se déroulant entre  $t_1$  et  $t_2$ .

Dans la pratique, l'intégration de l'énergie sonore se fait sur une période de temps sur laquelle l'écart entre les indices  $L_{Aeq,T}$  et  $L_{Amax}$  est inférieur à 10 dB(A) [MPAV05]. Cet indice, qui prend en compte la durée des évènements sonores visés, est usuellement utilisé pour

décrire le bruit créé par un passage d'avion [AFSSE04], mais on peut trouver dans la littérature qu'il est également utilisé pour décrire le bruit créé par le passage d'un véhicule routier [PITO98].

#### 1.4.2.4. L'indice « loudness-level-weighted-equivalent level »

Cet indice, à mi-chemin entre l'approche physique énergétique et l'approche psychoacoustique, a été proposé par Schomer [Sch00] et repose sur une amélioration de la pondération A. D'après la définition de l'indice  $L_{Aeq,T}$ , la courbe de pondération A est appliquée à tous les niveaux sonores comme une simple fonction de la fréquence, alors qu'en réalité il existe plusieurs courbes isosoniques selon le niveau sonore (cf. Figure 1.3).

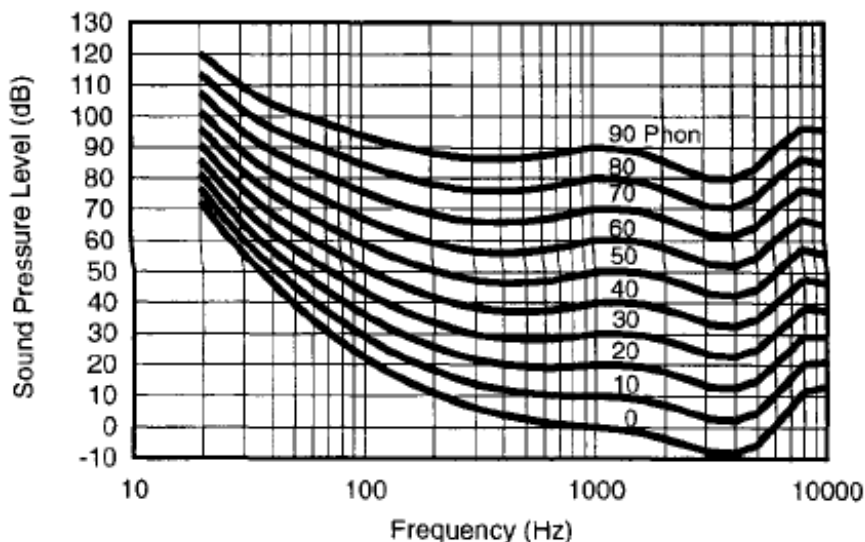


Figure 1.3 : Courbes isosoniques ([Sch00], d'après la norme ISO 226 :1987).

L'hypothèse de Schomer [Sch00] est que ces courbes isosoniques peuvent être utilisées comme une fonction de pondération dynamique qui varie avec la fréquence et le niveau sonore. L'indice proposé est nommé « loudness-level-weighted-equivalent level », noté  $L_{LLeq,T}$ . Il est basé sur une analyse en 1/3 octave du bruit en utilisant les courbes d'isotonie de la Figure 1.3. Le principe de sa construction est le suivant :

1. Le bruit d'une durée  $T$  est séparé en durées élémentaires  $t_j$ , par exemple 125ms la durée d'intégration « fast ». Sur chaque durée élémentaire  $t_j$ , le bruit fait l'objet d'une analyse en 1/3 octave, et à chaque niveau de pression sonore dans les bandes de 1/3 octave correspond un niveau d'isotonie (par exemple, un niveau de 82 dB dans la bande de 1/3 octave centrée sur 125Hz correspond à une valeur de 80 phones, cf. Figure 1.3) ;
2. Le niveau total du bruit en phones est calculé sur chaque durée élémentaire en sommant les niveaux en phones définis en 1 sur chaque bande de 1/3 octave (sur la base d'une sommation énergétique) ;
3. Sommation des niveaux globaux du bruit en phones (obtenus en 2) sur la série des durées élémentaires.

Ainsi le  $L_{LLeq,T}$  s'exprime suivant [Sch00] :

$$L_{LLeq,T} = 10 \log \left( \sum_j \sum_i 10^{0,1L_{Lij}} \right) \text{ phones} \quad (1.8)$$

Où  $L_{Lij}$  est le niveau en phones correspondant à la  $i^{\text{ème}}$  bande de 1/3 octave pendant la  $j^{\text{ème}}$  durée élémentaire.

Schomer *et al.* [SSS01] ont établi à partir de données provenant de différentes méta-analyses que l'indice  $L_{LLeq, T}$  permet de mieux évaluer la gêne due aux bruits de l'environnement en général que les indices acoustiques pondérés A.

### 1.4.3. Les indices statistiques

Un bruit variable dans le temps peut être décrit par sa distribution cumulative, ce qui mène à la notion d'indice statistique  $L_{N\%}$  (niveau de bruit dépassé pendant N% du temps). Les principaux indices statistiques utilisés sont les suivants :

- **L'indice  $L_1$**  est le niveau de pression sonore atteint ou dépassé pendant 1% du temps durant la période d'étude considérée. Cet indice est utilisé pour estimer le niveau de bruit maximum observé ;
- **L'indice  $L_{10}$**  est le niveau de pression sonore atteint ou dépassé 10% du temps. Même s'il peut être considérablement plus faible que le niveau de crête, il donne une idée des plus hauts niveaux sonores rencontrés pendant la période d'étude [MPAV05] ;
- **L'indice  $L_{50}$**  est le niveau dépassé ou atteint 50% du temps, le niveau médian ;
- **L'indice  $L_{90}$**  est le niveau dépassé pendant 90% du temps. On peut le considérer comme le niveau de bruit de fond.

D'après Marquis-Favre *et al.* [MPAV05] certains de ces indices statistiques sont utilisés lors de campagnes de mesures en complément à d'autres indices énergétiques.

### 1.4.4. Les indices psychoacoustiques

Les bruits de l'environnement sont très souvent décrits à l'aide des familles d'indices détaillées dans les précédentes sections (1.4.2 et 1.4.3). Néanmoins les chercheurs s'accordent à reconnaître leurs défauts, notamment par le fait qu'ils ne rendent pas compte des mécanismes de perception humaine de manière adéquate.

Genuit et Fiebig [GF06] estiment par exemple que l'évènement sonore peut être décrit de manière plus convaincante qu'un simple niveau de pression sonore pondéré A par des indices psychoacoustiques tels que la sonie, l'acuité, la rugosité et la force de fluctuation.

#### 1.4.4.1. La sonie

La sonie mesure l'intensité d'un bruit telle qu'elle est perçue par l'auditeur. On l'exprime en sone (1 sone correspond à l'intensité perçue d'une tonalité pure à 1000Hz et 40 dB). La sonie dépend évidemment du niveau de pression sonore, mais également d'autres facteurs, comme le contenu fréquentiel ou la durée [FZ06].

Certains modèles existants (dont le modèle de Zwicker présenté dans la norme ISO 532B [ISO75]), permettant de calculer la sonie d'un bruit, proposent de découper l'échelle des fréquences en 24 bandes critiques exprimées en Bark. La sonie dans chaque bande critique (pour les hypothèses de calcul le lecteur peut se référer à [ISO75]) est appelée sonie spécifique. On la note  $N'$  et l'exprime en sone/Bark. La sonie totale est obtenue en intégrant les sonies spécifiques sur les 24 bandes critiques.

$$N = \int_0^{24 \text{ Bark}} N' dz \quad \text{sones} \quad (1.9)$$

On utilise également le niveau d'isophonie, noté  $L_N$  et exprimé en phones, qui correspond au niveau de pression sonore d'une tonalité pure à 1000Hz qui semble aussi fort que le bruit en question [FZ06]. Le niveau d'isophonie peut être obtenu à partir de la sonie par la formule suivante [ISO75] :

$$L_N = 10 \ln(N) + 40 \text{ phones} \quad (1.10)$$

#### 1.4.4.2. L'acuité

L'acuité est une mesure de la densité spectrale de sonie d'un bruit [FZ06]. En ce sens elle représente une mesure de l'équilibre entre basses et hautes fréquences. On la note  $S$  et on l'exprime en acum. Fastl et Zwicker proposent de calculer l'acuité selon le modèle suivant [FZ06] :

$$S = 0.11 \frac{\int_0^{24 \text{ Bark}} N' \cdot g(z) \cdot z \cdot dz}{\int_0^{24 \text{ Bark}} N' dz} \text{ acum} \quad (1.11)$$

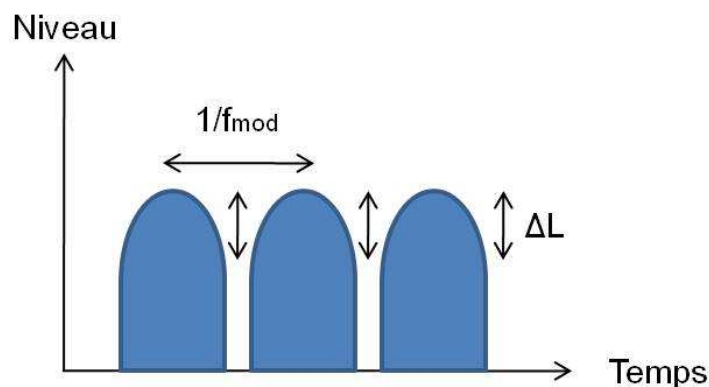
Où  $g(z)$  est un facteur de pondération qui est une fonction des bandes critiques [FZ06].

On utilise souvent le centre de gravité spectral comme mesure complémentaire de la balance spectral d'un son [Trol09]. On le définit alors comme la moyenne des fréquences  $f_i$  du spectre (exprimées en Bark ou en Hz) pondérée par leur amplitude  $A_i$  [Tro09].

$$CGS(\text{Bark ou Hz}) = \frac{\sum_i A_i f_i}{\sum_i A_i} \quad (1.12)$$

#### 1.4.4.3. La rugosité et la force de fluctuation

Des bruits non stationnaires modulés en amplitude, peuvent faire apparaître deux sensations différentes [FZ06]. Pour des fréquences de modulation en amplitude jusqu'à 20 Hz, la force de fluctuation est produite. Au-delà c'est la rugosité qui est ressentie. Aux alentours de la fréquence de modulation de 20 Hz il existe un domaine où ces deux sensations coexistent [FZ06]. La Figure 1.4 suivante permet de comprendre la naissance de ces sensations.



**Figure 1.4 : Sensation de force de fluctuation et sensation de rugosité.  $f_{\text{mod}}$  est la fréquence de modulation en amplitude [FZ06].**

La force de fluctuation, notée  $F$  et exprimée en vacil, est approximée par la relation suivante [FZ06] :

$$F \sim \frac{\Delta L}{\frac{f_{mod}}{4} + \frac{4}{f_{mod}}} \quad \text{vacil} \quad (1.13)$$

La rugosité, notée  $R$  et exprimée en asper, peut être approximée par la relation suivante [FZ06] (d'autres modèles plus complexes existent – par exemple [DW97, Pre98]) :

$$R \sim f_{mod} \Delta L \quad \text{asper} \quad (1.14)$$

Pour plus de détail sur les modèles, le lecteur est invité à se référer à l'ouvrage de Fastl et Zwicker [FZ06].

## 2. Bruit de la circulation routière et bruit industriel

Dans cette section nous présenterons l'état des connaissances sur le bruit de la circulation routière d'une part et le bruit industriel d'autre part. On s'attachera à préciser leur origine, ainsi que les indices qui leur sont spécifiques.

### 2.1. Bruit de la circulation routière

#### 2.1.1. Classement des différents types de véhicules

En France, le Guide du Bruit des Transports Terrestres<sup>13</sup> [CETUR80] définit les catégories de véhicules suivantes :

##### 2.1.1.1. Les véhicules légers

Il s'agit des véhicules dont le poids total en charge est inférieur à 3,5 tonnes. Cette catégorie regroupe **les véhicules particuliers** et **les véhicules utilitaires légers**.<sup>14</sup>

Ces véhicules peuvent ensuite être placés dans différentes catégories en fonction de leurs caractéristiques techniques par exemple, le type de moteur, la cylindrée ou le carburant. Il est couramment admis que du point de vue des niveaux sonores émis, les véhicules légers sont homogènes [Lec02].

##### 2.1.1.2. Les poids lourds

Il s'agit des véhicules dont le poids total en charge est supérieur à 3,5 tonnes [SETRA09a]<sup>15</sup>. Ces véhicules servent principalement au transport de marchandises. Cette catégorie de véhicules est probablement celle qui affiche la plus grande diversité, car même si la plupart des moteurs de poids lourds sont des moteurs diesel à injection directe, les sources secondaires sont très variées d'un poids lourd à l'autre (remorque, essieux, circuit de refroidissement, etc.).

Hugrel et Joumard [HJ04] classent ensuite les poids lourds en deux catégories :

<sup>13</sup> Notons que le Guide du Bruit de 1980 a fait l'objet d'une révision publiée en 2009 [SETRA09a]. Cette actualisation fait apparaître quelques nouveautés par rapport à l'ancien guide, que nous mentionnerons le cas échéant. Nous appellerons ce document actualisé le nouveau Guide du Bruit dans ce mémoire.

<sup>14</sup> Le lecteur peut se référer au rapport de Hugrel et Joumard [HJ04] pour des définitions précises.

<sup>15</sup> Le nouveau Guide du Bruit [SETRA09a] abandonne pour des raisons pratiques la distinction entre 3,5 et 12 tonnes préconisée par le Guide du Bruit de 1980 [CETUR80].

- **Les porteurs** qui n'ont pas besoin de remorque pour le transport des marchandises ;
- **Les tracteurs** qui nécessitent une remorque pour le transport des marchandises.

Contrairement aux véhicules légers, les niveaux de bruit émis par les poids lourds sont très dispersés : jusqu'à 10 dB(A) de différence pour deux poids lourds différents (niveaux de bruit mesurés en conditions contrôlées) [Pal06].

#### **2.1.1.3. Les bus et autocars**

Ces véhicules ne figurent pas clairement dans le classement du Guide du Bruit [CETUR80] et sont simplement assimilés aux poids lourds dans le nouveau Guide du Bruit [SETRA09a], mais il semble tout de même intéressant de les faire apparaître dans une catégorie à part entière dans la mesure où ils font partie intégrante de l'environnement sonore urbain.

Les bus ou autocars ne sont pas une catégorie exclusive de celles des véhicules légers et des poids lourds dans le sens où on les définit comme des véhicules dédiés au transport de personnes d'une capacité d'au moins 10 personnes [HJ04]. Ainsi, le poids total en charge peut aussi bien être supérieur à 3,5 tonnes ou inférieur à 3,5 tonnes, selon la capacité du véhicule.

Nous considérerons que rentreront dans cette catégorie, les véhicules de transport en commun, comme les bus des régies de transport en commun, ou encore les autocars scolaires, les autocars interurbains, etc.

#### **2.1.1.4. Les deux-roues motorisés**

Le Guide du Bruit [CETUR80] propose de distinguer si c'est possible trois sous-catégories dans les deux-roues motorisés, en fonction de leur cylindrée :

- Les motocyclettes qui ont une cylindrée supérieure à 125 cm<sup>3</sup> ;
- Les vélomoteurs qui ont une cylindrée comprise entre 50 et 125 cm<sup>3</sup> ;
- Les cyclomoteurs qui ont une cylindrée inférieure à 50 cm<sup>3</sup>.

Dès les années 80, le Guide du Bruit [CETUR80] a fait état de la difficulté de la prévision du bruit émis par les deux roues, et ensuite de la gêne qui leur est due, notamment pour les raisons suivantes :

- Faible débit des deux-roues par rapport aux autres véhicules routiers ;
- Particularité de leur signature acoustique ;
- Dynamique des niveaux sonores à l'émission importante.

Le nouveau Guide du Bruit [SETRA09a] propose d'assimiler les deux-roues aux véhicules légers, certainement parce que les difficultés posées dès 1980 n'ont pas obtenu l'évolution souhaitée. Notons tout de même que récemment, l'émission acoustique de motocyclettes [LTDB10] d'une part, et de vélomoteurs (scooters) et cyclomoteurs [TDL10] d'autre part, a été étudiée de manière précise.

Jusqu'à aujourd'hui, le bruit des deux-roues est toujours un sujet épineux, et même s'il fait l'objet d'une réglementation et d'une attention particulière, ces difficultés ne sont pas résolues. Un groupe de travail interministériel a été mis en place en 1999 par Dominique Voynet, alors Ministre de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement. La constitution de ce groupe de travail faisait suite à un rapport sur les bruits de voisinage qui a mis en évidence que les nuisances sonores générées par les deux-roues étaient alors le premier

motif de plainte des maires. Le rapport du groupe de travail interministériel [Auz03] fait état de plusieurs propositions pour faire face aux nuisances des deux-roues. La plupart des propositions sont d'ordre réglementaire et visent par exemple à faciliter les contrôles et les sanctions. D'autres propositions visent plutôt à sensibiliser les usagers des deux-roues aux nuisances qu'ils causent aux non-usagers. Par contre aucune proposition ne préconise une meilleure connaissance du bruit des deux-roues et de ses effets en termes de gêne.

Plus récemment, L'AFSSE [AFSSE04] dressait un constat dans le même ordre d'idées en faisant remarquer que la question du bruit des deux-roues est très préoccupante dans la mesure où (1) il s'agit du premier motif de plainte reçue par les maires, (2) le nombre de deux-roues croît fortement.

Un rapport de l'Association des Constructeurs Européens de Motocycles [ACEM04] a souligné que les deux-roues motorisés, s'ils respectent les prescriptions réglementaires n'ont pas un niveau sonore plus élevé que celui des véhicules légers ou des poids lourds. Par contre, une grande part du parc de deux-roues motorisés est équipée de systèmes d'échappement illégaux. Le rapport préconise donc de lutter contre ces pratiques [ACEM04].

## 2.1.2. Les sources de bruit d'un véhicule routier

Un véhicule routier émettant du bruit est souvent considéré comme une source de bruit à part entière, alors qu'en fait il s'agit d'un ensemble de sources dont la contribution individuelle au bruit global du véhicule dépend de ses conditions de fonctionnement.

Les principales sources de bruit d'un véhicule routier sont les suivantes :

- Le groupe moto-propulseur ;
- Le contact pneumatique/chaussée.

Il existe d'autres sources de bruit secondaires, comme les contacts de l'air sur la carrosserie du véhicule (engendrant un bruit aérodynamique), que nous décrivons succinctement.

### 2.1.2.1. Le bruit du groupe moto-propulseur

Trois types de bruit sont rayonnés par le groupe moto-propulseur, nous allons les décrire succinctement [Par08] :

- **Le bourdonnement** est un son pur dont la fréquence est celle des explosions dans les différents cylindres. Pour un moteur classiquement utilisé pour les véhicules légers (4 cylindres à 4 temps), le régime moteur varie entre 750 et 6000 tr/min, et la fréquence de bourdonnement entre 25 et 200 Hz respectivement ;
- **Le bruit de combustion** est constitué par les explosions dans les cylindres, et la composition spectrale dépend de la pression à l'intérieur du cylindre (sa valeur maximale dans le cylindre, sa croissance dans le cylindre au cours de l'explosion) ;
- **Les bruits de boîte de vitesse** sont dus à la synchronisation des arbres de pignons constituant la boîte de vitesse (classiquement deux ou trois arbres de pignons dans les véhicules particuliers) à l'enclenchement des rapports. Le bruit de sirènement se traduit par un son aigu dont la fréquence varie avec le régime moteur. Le bruit de graillonnement est surtout présent au point mort ou en accélération à bas régime.



On voit dans cette rapide description que le bruit global généré par le groupe motopropulseur couvre un large spectre s'étendant des basses fréquences pour le bourdonnement aux hautes fréquences pour le sirènement.

Le niveau de bruit émis par le groupe motopropulseur (noté  $L_m$ ) n'est pas simplement fonction de la vitesse, mais dépend, de manière assez complexe, du rapport de boîte et du régime moteur (cf. [Lel99, San01]).

La plupart des deux-roues sont équipés de moteur à deux temps, mis à part les motocyclettes de forte cylindrée qui sont équipées de moteur à 4 temps. Selon Vernet [Ver83], la différence entre ces deux moteurs ne joue pas sur les niveaux de bruit émis, mais plus sur la coloration spectrale du bruit émis. En effet, pour les moteurs deux temps, on remarque des émergences fréquentielles en basses fréquences.

### **2.1.2.2. Le bruit du contact pneumatique/chaussée**

Le bruit du contact pneumatique/chaussée résulte comme son nom l'indique de l'interaction entre le pneumatique (solide complexe déformable) et la chaussée. Pour Hamet [Ham03], les phénomènes entrant en jeu sont assez bien identifiés, même si leur compréhension reste qualitative pour la plupart.

Gautier [Gau03] classe ces phénomènes en trois catégories, selon leur position dans la chaîne qui conduira du point de contact pneumatique/chaussée à la façade du riverain. On distingue ainsi les phénomènes de génération, d'amplification et de propagation.

#### *a. Les phénomènes de génération*

Parmi les phénomènes contribuant à la génération du bruit de contact pneumatique/chaussée, on distingue usuellement les mécanismes vibratoires du pneumatique et les mécanismes vibratoires de l'air.

Les vibrations du pneumatique sont causées par le défilement des irrégularités des surfaces en présence (aussi bien du pneumatique que de la chaussée). Des vibrations radiales de la ceinture du pneumatique apparaissent et ces vibrations font elles-mêmes rentrer l'air environnant en vibration. Le bruit de vibration du pneumatique a généralement un contenu fréquentiel en basses et moyennes fréquences, jusqu'à environ 1000Hz ([Gau03], [Ham03]).

Les vibrations de l'air sont causées par la compression et dilatation rapide de l'air dans la zone de contact. Ce phénomène appelé « air pumping » est généralement associé aux indentations de la gomme du pneumatique par les aspérités de la chaussée ou par la présence de cavités (dans le pneumatique ou dans la chaussée). L'air emprisonné dans ces cavités peut être mis en résonance ce qui contribue au bruit de vibration de l'air. Le bruit de vibration de l'air intervient dans les moyennes et hautes fréquences, généralement entre 1000 et 2000 Hz ([Gau03, Ham03]).

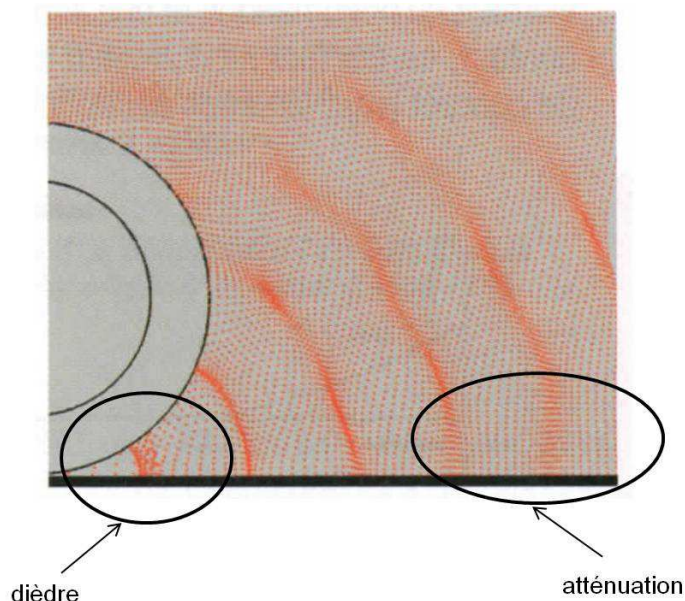
Enfin deux autres phénomènes sont à recenser, mais ils apparaissent plus marginaux et leur portée ne fait pas consensus. Le premier phénomène est appelé « stick-slip ». Il est dû à des cycles successifs d'adhérence/glissement du pneumatique sur la chaussée qui génèrent des vibrations tangentielles. L'autre phénomène est appelé « stick-slap » et génère des vibrations radiales dues à l'adhérence du pneumatique sur la chaussée puis à son décollement en sortie de zone de contact. Ces deux phénomènes minoritaires, par rapport aux deux phénomènes vibratoires précédemment décrits, sont accentués sur certains types de surfaces comme les chaussées peintes dans les parkings ([Gau03, Ham03]).

#### *b. Les phénomènes d'amplification*

Le rayonnement d'un pneu dû à ses vibrations est fortement affecté par les surfaces en présence. Le pneumatique et la chaussée en vis-à-vis forment un dièdre, et dans ce dièdre,

les bruits émis sont amplifiés, c'est ce qu'on appelle l'effet dièdre, ou encore l'effet de corne (« horn-effect »). L'effet dièdre est un phénomène complexe résultant de réflexions multiples entre deux surfaces dont l'une est courbe (le pneumatique). L'effet ne résulte donc pas uniquement d'une concentration de l'énergie acoustique dans une direction privilégiée, mais également d'une augmentation de la puissance globale rayonnée, par les réflexions multiples dans le dièdre.

La Figure 1.5 suivante tirée de [Ham03] est issue d'une simulation en deux dimensions des vibrations d'un pneumatique. On voit sur cette figure que la propagation d'onde dans le dièdre est forte comparée à la propagation d'onde en partie supérieure (absence de surface réfléchissante). A proximité de la chaussée, loin du pneu, on voit également que la propagation d'onde est atténuée. L'amplitude de l'effet dièdre dépend donc des propriétés d'absorption de la chaussée.



**Figure 1.5 : Effet dièdre [Ham03].**

L'effet dièdre affecte principalement les fréquences voisines de 1000 Hz avec des différences selon la nature de la chaussée [Gau03].

Selon Sandberg [San01], environ 70 % de l'énergie émise par un bruit de contact pneumatique/chaussée se trouve dans la bande de 1/3 d'octave centrée sur 1000 Hz. Il ne peut donc être ni décrit comme un bruit à large bande, ni comme un bruit tonal, mais comme une émergence large et prononcée à 1000 Hz.

### *c. Les phénomènes de propagation*

La propagation des phénomènes vibratoires, générés par l'interaction entre le pneumatique et la chaussée, puis amplifiés par effet de corne, dépend des caractéristiques physico-chimiques de la chaussée (plus particulièrement de son revêtement) [Gau03].

Sandberg [San01] présente des mesures de niveaux de bruit de contact pneumatique/chaussée pour 23 revêtements de chaussées différents, les mesures ayant été effectuées en conditions contrôlées (l'information du ou des véhicules utilisés n'est pas donnée, on sait uniquement que la vitesse est de 80km/h). Il apparaît qu'entre le revêtement le plus « bruyant » et le revêtement le moins « bruyant », il y a une différence de 17 dB(A).

Le nouveau Guide du Bruit [SETRA09a] considère trois catégories de revêtements : (1) les « silencieux » (catégorie R1), (2) les « intermédiaires » (catégorie R2) et (3) les « bruyants » (catégorie R3).

Pour une série de mesures en conditions contrôlées (passage d'un véhicule léger isolé à 90 km/h), les niveaux de bruit maximums entre les revêtements R1 et R3 font état d'une

différence de 8 dB(A) [SETRA09a]. La différence est moins importante que celle reportée par Sandberg [San01], mais notons que ce dernier la juge plus élevée que ce qu'elle serait en condition réelle (notamment en raison de l'usure des revêtements, etc.).

### 2.1.2.3. Les sources de bruit secondaires

Le groupe motopropulseur et le contact pneumatique/chaussée sont les deux sources principales de bruit d'un véhicule routier, du moins celles que l'on arrive à caractériser et mesurer spécifiquement. Les contributions respectives des autres sources de bruit décrites ci-après sont intégrées dans l'émission globale du véhicule.

On distingue alors les sources suivantes [Lec02] :

- **Les tubulures** dont le bruit provient des vibrations à hautes pressions de la colonne de gaz entre les bouches d'admission et d'échappement ;
- **Les bouches d'admission** dont les bruits proviennent de la valve d'entrée qui s'ouvre et se ferme périodiquement. Ils augmentent avec la charge du moteur.
- **Les bouches d'échappement** dont les bruits sont dus à la brusque détente des gaz lors de l'ouverture de la valve de sortie ;
- **Le système de ventilation** qui sert à refroidir le moteur par l'intermédiaire du circuit de refroidissement ;
- **Les bruits aérodynamiques** sont causés par la création d'un vortex à la surface du véhicule. Ils dépendent essentiellement de la vitesse, et prennent de l'importance pour des vitesses élevées ;
- **Les bruits de freinage** sont dus à la fois au crissement des freins et à la décharge de pression dans le système de freinage. Même s'ils ne se produisent pas assez souvent pour contribuer de manière significative au bruit global, dans les zones de décélérations, ils peuvent être une source de gêne pour les riverains ;
- **Les bruits de vibrations de la carrosserie** sont dus aux défilements des irrégularités du pneumatique et de la chaussée qui font entrer en vibration les éléments de carrosserie. On peut citer également le bruit de la remorque pour les poids lourds de type tracteur.

On notera la spécificité des poids lourds où d'autres sources spécifiques apparaissent, comme la remorque, le circuit hydraulique, ou encore le ralentisseur.

### 2.1.2.4. Contribution des sources de bruit principales au bruit global

L'hypothèse généralement retenue pour estimer l'émission globale d'un véhicule routier est une addition énergétique des niveaux de bruit du groupe motopropulseur et du bruit de contact pneumatique/chaussée, de telle sorte que le niveau de bruit total d'un véhicule peut être estimé par la relation suivante :

$$L_t^i = 10 \log (10^{0,1L_m} + 10^{0,1L_r}) \quad (1.15)$$

Où ([Lel99, San01]) :

- $L_t^i$  est le niveau de bruit total du véhicule pour un rapport de boîte  $i$  ;
- $L_m$  est le niveau de bruit émis par le groupe moto-propulseur ;
- $L_r$  est le niveau de bruit émis par le contact pneumatique/chaussée.

Pour chaque type de véhicules routiers (cf. section 2.1.1), les contributions respectives au niveau de bruit total des bruits du groupe moto-propulseur et de contact

pneumatique/chaussée sont différentes et dépendent du fonctionnement du véhicule (vitesse, régime moteur, rapport de boîte).

#### *a. Véhicules légers*

Sandberg [San01] explique pour simplifier que le bruit du groupe moto-propulseur domine à faible vitesse le bruit de contact pneumatique/chaussée, et que ce dernier domine le bruit du groupe moto-propulseur à vitesses élevées, et qu'entre ces deux zones de dominance, il existe une zone de recouvrement pour laquelle les contributions des deux sources sont équivalentes.

Au début des années 70 cette zone de recouvrement se situait entre 50 et 60 km/h, et au début des années 90 plutôt entre 40 et 50 km/h. Sandberg [San01] a effectué des mesures de bruit émis par un véhicule léger considéré comme typique et a établi que le bruit de contact pneumatique/chaussée domine le bruit du groupe moto-propulseur sur toute la gamme de vitesse et tous les rapports de boîte, sauf en première. Cela signifie que la zone de recouvrement pourrait même se situer aux alentours de 30 km/h. Lorsque le véhicule est en accélération, le bruit du groupe moto-propulseur et le bruit de contact pneumatique/chaussée augmentent, mais le premier plus fortement que le second. Le bruit du groupe moto-propulseur peut donc dominer le bruit de contact pneumatique/chaussée même en deuxième vitesse, mais rarement pour un rapport de boîte plus élevé. Les observations de Sandberg confirment d'autres travaux comme ceux de Lelong [Lel99].

La zone de recouvrement a été abaissée (en termes de vitesse) au cours des dernières décennies. Cela est probablement dû au fait que le bruit du groupe moto-propulseur a fait l'objet de réglementations très tôt, tandis que le bruit de contact pneumatique/chaussée n'a pas été réglementé.

Pour simplifier, nous considérerons qu'en milieu urbain, le bruit du groupe moto-propulseur est dominant dans l'émission globale, compte-tenu des situations fréquentes d'accélération, de conduite en 1<sup>ère</sup> vitesse, ou encore de zones de vitesse réduite (zones 30, trafic congestionné, etc.). Le bruit de contact pneumatique/chaussée est dominant sur les voies rapides urbaines, et en milieu interurbain (autoroute, départementale, etc.).

#### *b. Poids lourds*

Pour un poids lourd, on retrouve le même comportement. Si dans les années 70 on pensait que la zone de recouvrement se situait entre 70 et 90 km/h et dans les années 90 entre 60 et 70 km/h, grâce à des mesures effectuées au début des années 2000 sur un poids lourd tracteur avec remorque considéré comme typique, il a été établi que le bruit de contact pneumatique/chaussée domine au-dessus de 50 km/h, même si le véhicule est en accélération. A vitesse constante, le bruit de contact pneumatique/chaussée domine dès 40 km/h [San01].

Notons qu'un poids lourd est généralement doté d'un plus grand nombre de pneumatiques, ce qui pourrait expliquer que le bruit de contact pneumatique/chaussée domine le bruit du groupe moto-propulseur même si le poids lourd est en accélération à des vitesses supérieures à 50km/h.

#### *c. Bus et autocars*

Peu d'informations ont été trouvées sur ce type de véhicules, et la synthèse de Sandberg [San01] n'en fait pas état. Selon la description faite en section 2.1.1, on peut faire l'hypothèse que le comportement des sources principales est proche de celui des sources acoustiques des poids lourds.

#### d. Deux-roues motorisés

Encore une fois, peu d'informations sont disponibles pour les deux-roues. Sandberg [San01], tout en le soulignant, a établi que le bruit de contact pneumatique/chaussée dépendait de la largeur du pneumatique. Or nous savons que les pneumatiques des deux-roues sont moins larges que les pneumatiques des véhicules légers et poids lourds (qui eux ont tendance à être de plus en plus larges).

Pour simplifier, moins les pneus sont larges, moins le bruit de contact pneumatique/chaussée émis est élevé. Cela est dû au court-circuitage de l'effet de corne par réduction du dièdre (cf. section 2.1.2.2.b). L'effet de corne est même tout simplement inexistant pour des pneumatiques très étroits (de l'ordre de 5 cm).

Ceci laisse à penser que pour les deux-roues motorisés, en milieu urbain, seul le bruit du groupe moto-propulseur contribuerait majoritairement au bruit global.

### 2.1.3. Indices spécifiques du bruit routier

Des indices spécifiques au bruit routier ont été proposés. Ils sont bien souvent construits à partir des indices de bruits de l'environnement détaillés en section 1.4.

#### 2.1.3.1. Le niveau de pression sonore équivalent corrigé

Nous avons vu en section 2.1.2 que le bruit émis par un véhicule et par un flux de véhicules peut avoir un contenu important dans les basses fréquences, or la pondération A, la plus souvent utilisée a tendance à sous-estimer l'importance des basses fréquences [BHJ96]. Nilsson [Nil07] suggère alors d'utiliser un niveau équivalent corrigé pour décrire le bruit routier ; cette correction faite serait plus à même de prendre en compte le contenu basses fréquences du bruit routier, à l'aide de la différence  $L_{Ceq,T} - L_{Aeq,T}$  :

$$L_{Aeq,T}^* = L_{Aeq,T} + 0,4(L_{Ceq,T} - L_{Aeq,T}) \quad (1.16)$$

#### 2.1.3.2. Le niveau de pollution sonore $L_{NP}$

Au début des années 70, Robinson [Rob71] a proposé un indice, le niveau de pollution sonore, en réponse au besoin d'unification des indices décrivant le bruit en général et le bruit routier en particulier. A cette époque, l'indice  $L_{Aeq,T}$  était déjà couramment utilisé, mais Robinson remarquait qu'il n'était pas assez en accord avec les résultats d'enquêtes socio-acoustiques de l'époque. Le niveau de pollution sonore due au bruit routier est noté  $L_{NP}$  et s'exprime comme suit :

$$L_{NP} = L_{Aeq,T} + 2,56\sigma \quad dB(A) \quad (1.17)$$

Dans cette équation,  $\sigma$  représente l'écart-type du niveau de pression sonore instantané considéré comme une série statistique temporelle sur la période T. La constante 2.56 est définie à partir de résultats d'enquêtes portant sur les bruits de circulation routière [Rob71].

L'avantage de la forme de cet indice est qu'il prend en compte la totalité des bruits arrivant à l'oreille de l'auditeur par le premier terme, tandis que le deuxième terme est lié à la fluctuation du bruit au cours de la période de mesure. Robinson donne une interprétation psychologique à cet indice. Selon lui, le premier terme serait un niveau d'adaptation, tandis que le deuxième terme de fluctuation représenterait la gêne causée par les transitions entre le niveau d'adaptation et les niveaux instantanés lors d'un événement qui attire l'attention ou qui distrait la personne engagée dans une occupation quelconque.

Selon Robinson, cet indice ne nécessite pas plus de paramètres que l'indice  $L_{Aeq,T}$  classique, mais malgré cela il est peu utilisé [MPAV05].

### 2.1.3.3. L'indice TNI « Traffic Noise Index »

Cet indice est construit à partir d'indices statistiques. Selon Marquis-Favre *et al.* [MPAV05], ces indices sont valables pour un bruit routier où le flux de véhicules est continu et fluide, la période de temps sur laquelle s'effectue la mesure étant suffisamment longue pour pouvoir justifier une description statistique, mais pas trop longue pour que le bruit puisse être considéré comme stationnaire.

A partir d'une enquête sur la dissatisfaction engendrée par le bruit routier en Angleterre, Griffiths et Langdon [GL68] ont développé l'indice TNI « Traffic Noise Index » (Indice du Bruit de Trafic) qui s'exprime comme suit :

$$TNI = 4(L_{10} - L_{90}) + L_{90} - 30 \text{ dB(A)} \quad (1.18)$$

D'après Griffiths et Langdon [GL68], le TNI est une tentative de décrire le bruit de trafic en combinant son échelle de fluctuation (le terme  $(L_{10} - L_{90})$  – « le climat du bruit ») et son niveau « absolu » (l'indice  $L_{90}$ ). Dans leur étude, Griffiths et Langdon ont trouvé des corrélations très élevées entre le niveau de dissatisfaction et l'indice TNI. Notons la proximité dans le principe entre les indices TNI et  $L_{NP}$ .

### 2.1.4. Le point sur la réglementation

Le rapport d'information sur les nuisances sonores [MB11] présenté au nom de la Commission du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire de l'Assemblée Nationale résume de manière claire et exhaustive l'ensemble des réglementations qui concernent le bruit de la circulation routière. Nous allons en extraire les principaux points dans ce qui suit.

En ce qui concerne les infrastructures de transport routier, le premier point est l'obligation d'un recensement des infrastructures recevant plus de 5000 véhicules par jour. Les routes recensées doivent ensuite faire l'objet d'un classement sonore en fonction des niveaux de bruit estimés à un horizon de 20 ans. Ces niveaux de bruit sont exprimés **en  $L_{Aeq,T}$ , pour deux périodes T : diurne (de 06h à 22h) et nocturne (de 22h à 06h)**. A l'issue de ce classement sonore, on associe des valeurs d'isolement minimum des façades des bâtiments d'habitation à construire dans les secteurs impactés par l'infrastructure.

La réglementation française mentionne l'existence de **points noirs du bruit routier**, c'est-à-dire de zones bâties exposées à des niveaux de bruit supérieur à 70 dB(A) de jour et 65 dB(A) de nuit, ce qui correspond à environ 200,000 bâtiments. Des aides de l'Etat sont prévues pour résorber ces points noirs.

A cette réglementation Française s'ajoute la réglementation Européenne par la directive 2002/49/CE. Cette dernière impose la réalisation de cartographie pour les agglomérations de plus de 100,000 habitants en utilisant l'indice  $L_{den}$  pour représenter la situation d'exposition sonore (cf. section 1.4.2.2). Sur la base de ces cartographies, elle exige l'élaboration de Plans de Prévention du Bruit dans l'Environnement (PPBE) destinés, entre autres, à prévenir et réduire les niveaux de bruit, et préserver les zones « calmes ».

## 2.2. Bruit industriel

### 2.2.1. Un objet d'étude complexe

En 2001, Fields [Fie01] a publié un catalogue référençant 521 enquêtes *in situ* portant sur les effets de bruits de l'environnement. Sur la totalité des enquêtes, seulement 12 concernent les bruits industriels. Dans leur synthèse sur les effets du bruit industriel, Berry et

Porter [BP04] soulignent également qu'en comparaison aux bruits des transports, les bruits industriels ont été peu étudiés.

Plusieurs raisons peuvent être invoquées pour expliquer cette différence. Nous allons les décrire succinctement dans ce qui suit.

### 2.2.1.1. Une hétérogénéité des sources

Selon Miedema et Vos [MV04], le bruit industriel est moins répandu que les bruits des transports, mais également plus hétérogène, du fait des différentes activités industrielles, et donc des différentes sources de bruit possible.

A ce titre, il est intéressant de mentionner les travaux de Le Nost [Nos07]. A partir d'un travail bibliographique, il a proposé une typologie fonctionnelle de sources de bruit industriel et l'on n'en recense pas moins de 54 types de sources regroupées dans 11 catégories fonctionnelles différentes.

### 2.2.1.2. Une hétérogénéité temporelle

Recenser les différentes sources de bruit industriel potentielles est une tâche compliquée, mais prendre en compte les spécificités temporelles de ces sources est également difficile. Selon Berglund et Lindvall [BL95], les caractéristiques du bruit industriel émis varient considérablement en fonction d'un équipement spécifique et de son utilisation.

Dans ses travaux de thèse, Le Nost [Nos07] propose alors de distinguer les bruits industriels permanents (i.e. émis continûment 24h/24) des bruits industriels non permanents. Parmi ces types de bruit, il s'agit ensuite de distinguer les bruits qui sont stables<sup>16</sup>, les bruits qui sont impulsionnels<sup>17</sup>, et les bruits qui sont fluctuants<sup>18</sup>.

### 2.2.1.3. Une hétérogénéité spectrale

L'hétérogénéité des sources de bruit industriel et leurs conditions de fonctionnement ont une influence sur la composition spectrale du bruit émis. Par exemple, une machine tournante produit un bruit dominé par des composantes tonales, tandis que les systèmes de ventilation émettent des bruits chargés en basse fréquence<sup>19</sup> [BL95].

Ces particularités spectrales doivent être prises en compte, tant on a montré qu'elles ont un effet sur les jugements émis sur ces bruits (par exemple Häberle *et al.* [HDS84]).

## 2.2.2. Les bruits industriels permanents et stables

Nous venons de le voir, les bruits industriels proviennent de nombreuses sources différentes et possèdent des caractéristiques spectrales et temporelles très variées. Dans ces travaux de thèse, en ce qui concerne les bruits industriels, nous nous inscrirons dans la lignée de précédents travaux impliquant notre laboratoire, en nous focalisant sur les **bruits industriels permanents et stables** (cf. [Nos07, Ala09, AMVM+10]). Dans ce qui suit, nous résumerons les résultats liés à ces travaux, notamment la proposition d'une typologie perceptive de bruits industriels permanents et stables, ainsi que la mise en évidence d'indices acoustiques et psychoacoustiques caractérisant les différents bruits de cette typologie.

---

<sup>16</sup> Les bruits stables présentent des fluctuations de niveau inférieures à 5 dB(A) (norme NF S31-084 citée dans [Nos07] page 57).

<sup>17</sup> Les bruits impulsionnels consistent en une ou plusieurs impulsions d'énergie acoustique ayant chacune une durée inférieure à 1s et séparées d'un intervalle de temps d'une durée supérieure à 0.2s [AFNOR96].

<sup>18</sup> Les bruits fluctuants sont marqués par des fluctuations de niveau supérieures à 5dB(A) (norme NF S31-084 citée dans [Nos07] page 57).

<sup>19</sup> Selon Berglund *et al.* [BHJ96], un bruit basse-fréquence a la majorité de son énergie comprise entre 20Hz et 250Hz.

### 2.2.2.1. Une typologie perceptive de bruits industriels permanents et stables [Nos07]

Le Nost [Nos07], en se focalisant sur les bruits industriels permanents et stables, a réalisé des enregistrements *in situ* de sources de bruit appartenant à 6 catégories fonctionnelles. L'idée de la suite de ses travaux était de tester la pertinence perceptive d'une telle typologie fonctionnelle.

Dans le Tableau 1.1 qui présente la typologie perceptive résultant d'un test de catégorisation libre, il apparaît que les catégories perceptives sont constituées de sources de bruit de même type fonctionnel (catégories 1, 3) ou de types fonctionnels différents (catégories 2, 4, 5, 6). A part la catégorie 6, les sources de bruit appartenant à une catégorie perceptive donnée s'illustrent par des caractéristiques spectrales particulières.

Catégorie perceptive	Type fonctionnel	Nom proposé	Caractéristiques spectrales
1	Appareils à flux d'eau	Aéroréfrigérants	large bande
2	Appareils à flux de gaz Machines à combustion Salle des machines	Grosses souffleries	Basse fréquence Non tonal
3	Equipement électrique	Transformateurs ventilés	Basse fréquence Tonal (2 <sup>e</sup> bande de Bark)
4	Appareils à flux d'eau Appareils à flux de gaz Salle des machines	Machines tournantes	Caractère tonal (pic entre 3 et 8 Barks)
5	Equipement électrique Machines à combustion Salle des machines	Bruits agressifs	Caractère tonal complexe Nombre de raies spectrales élevé
6	Appareils à flux de gaz Salle des machines	Sources peu caractéristiques	Pas de caractéristique identifiée

**Tableau 1.1 : Typologie perceptive de bruits industriels permanents et stables [Nos07].**

### 2.2.2.2. Une caractérisation physique et perceptive de bruits industriels permanents et stables ([Ala09, AMVM+10])

Prenant la suite des travaux de Le Nost [Nos07], Alayrac [Ala09] a effectué une caractérisation physique et perceptive des catégories perceptives issues de la typologie de Le Nost. Il en a résulté la proposition d'indicateurs de gêne adapté à chaque catégorie perceptive (voir aussi [AMVM+10]). Le Tableau 1.2 résume les indices proposés par Alayrac pour caractériser les familles perceptives. Nous expliciterons par la suite ceux qui ne sont pas usuels.

Certains indices classiques ont déjà été présentés dans les sections précédentes, il s'agit du niveau de pression sonore équivalent pondéré A (l'indice  $L_{Aeq,T}$ ) et le niveau d'isotonie (l'indice  $L_N$ ). Les autres indices sont explicités dans les sections ci-après.



Catégorie perceptive	Indices descriptifs
1	$L_{Aeq,T}$ $L_N$
2	$L_{Aeq,T}$ $L_N$
3	$I_{A,1/3oct,100Hz}$ $L_N$ $\ln(I_{spec})$
4	$L_{Aeq,T}$ $L_N$ $L_{Aeq,T} ; Nr ; (N_{4-9Barks} - N_{2-3Barks})$
5	$L_{Aeq,T}$ $L_N$ $L_{Aeq,T} ; Nr ; (N_{4-9Barks} - N_{2-3Barks})$
6	$L_{Aeq,T}$ $L_N$

**Tableau 1.2 : Indices de bruits industriels permanents et stables [AMVM+10].**

*a. L'indice  $I_{A,1/3oct,100Hz}$*

Cet indice a été construit pour rendre compte de l'influence du spectre par rapport à la raie spectrale émergente à 100Hz caractéristique des bruits de la catégorie 3. On l'exprime comme suit [Ala09] :

$$I_{A,1/3oct,100Hz} = 10 \log(10^{0,1L_{Aeq,T}} - 10^{0,1L_{A,100Hz}}) \text{ dB}(A) \quad (1.19)$$

Dans cette équation,  $L_{A,100Hz}$  est le niveau de pression sonore équivalent pondéré A dans la bande de tiers d'octave centrée sur 100Hz.

*b. L'indice  $\ln(I_{spec})$*

De même que l'indice explicité ci-dessus, l'indice  $\ln(I_{spec})$  a été construit pour rendre compte de l'influence du spectre par rapport à la raie spectrale émergente caractéristique des bruits de la catégorie 3. On l'exprime comme suit :

$$\ln(I_{spec}) = \ln(N - N_{Bark\ 2}) \quad (1.20)$$

Dans cet indice,  $\ln$  est le logarithme népérien, et  $N_{Bark\ 2}$  représente la sonie calculée dans la bande critique de 2 Barks.

*c. L'indice  $Nr$*

Cet indice est le nombre de raies spectrales contenu dans le spectre du bruit. Le nombre de raies pris en compte correspond aux raies détectées selon l'algorithme de Pedersen *et al.* [PSA00].

*d. L'indice  $(N_{4-9Barks} - N_{2-3Barks})$*

Cet indice a été construit pour rendre compte de l'influence de la répartition entre basses fréquences et moyennes fréquences. Il est exprimé comme la différence de la sonie spécifique intégrée entre les bandes critiques 4 et 9 Barks (correspondant aux moyennes fréquences) et la sonie spécifique intégrée entre les bandes critiques 2 et 3 Barks (correspondant aux basses fréquences).

### 2.2.3. Le point sur la réglementation

La fiche réalisée par le CERTU [CERTU08b] pour la prise en compte du bruit industriel dans les cartes de bruit résume de manière exhaustive la réglementation en vigueur en France. Nous allons en extraire les principaux points.

Les textes réglementaires concernant les Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (ICPE) et Installations Nucléaires de Base (INB) sont fondés sur une logique de seuils de niveaux de pression sonore à respecter en limite de propriété de la parcelle industrielle et sur la notion du risque **d'émergence sonore** dans le voisinage.

L'émergence de niveau notée  $E$  est définie dans la norme NF S 31-010 [AFNOR96] comme suit :

$$E = L_{Aeq,T \text{ ambient}} - L_{Aeq,T \text{ résiduel}} \quad dB(A) \quad (1.21)$$

Où :

- $L_{Aeq,T \text{ ambient}}$  est le niveau de pression sonore équivalent pondéré A du bruit ambiant (avec le bruit de l'installation industrielle) ;
- $L_{Aeq,T \text{ résiduel}}$  est le niveau de pression sonore équivalent pondéré A du bruit résiduel (sans le bruit de l'installation industrielle).

Ainsi, la réglementation fixe des émergences à ne pas dépasser à la fois en fonction du niveau de bruit ambiant, mais également en fonction de la période de la journée (période diurne et période nocturne). On remarquera que les périodes de mesures sont différentes de celles à effectuer pour la mesure du bruit provenant de la circulation routière. En effet concernant le bruit industriel, la période diurne va de 7h à 22h tandis que la période nocturne va de 22h à 7h.

De même que pour le bruit provenant de la circulation routière, la réglementation Européenne, par la Directive 2002/49/CE [PECE02], se superpose à la réglementation française. Il s'agit toujours d'effectuer des cartes de bruits concernant le bruit industriel et de représenter la situation d'exposition sonore par l'indice  $L_{den}$ . S'il y a dépassement de valeurs seuils de  $L_{den}$  et  $L_{night}$ , alors un PPBE doit être mis en place [CERTU08b].

## 3. Le concept de gêne sonore

### 3.1. Quelques définitions

#### 3.1.1. Une définition générale du concept de gêne sonore

Cela fait presque 50 ans que le bruit est considéré comme une pollution environnementale [Sch78], et que l'on a commencé à étudier ses effets sur la santé notamment en termes de gêne sonore. La synthèse de Schultz [Sch78] a été un travail très important, fondateur, même si à l'époque les effets étudiés, soit n'étaient pas tout à fait les mêmes (utilisation de différents termes, comme dissatisfaction, etc.), soit n'étaient pas définis de la même manière par les chercheurs (utilisation de définitions différentes du terme gêne).

Ce n'est que bien plus tard que Guski *et al.* ont proposé, en recueillant l'avis d'experts internationaux, une définition claire du concept de gêne sonore [GFS99] :

« La gêne est un concept psychologique qui décrit une relation entre une situation acoustique et une personne qui est forcée par le bruit à faire des choses qu'il/elle ne veut pas faire, qui cognitivement et émotionnellement évalue cette situation et se sent en partie désemparé. »<sup>20</sup>

On voit par cette définition que le concept de gêne sonore est un concept plus large que le désagrément sonore (« unpleasantness »), que Guski définit comme une évaluation instantanée d'un son [Gus97]. Le désagrément sonore renvoie à l'évaluation de l'aspect agréable ou désagréable d'un bruit, et contrairement à la gêne sonore la relation entre source de bruit et la personne qui émet le jugement ne semble pas avoir la même importance.

En complément à cette définition générale du concept de gêne sonore on peut ensuite distinguer deux types de gênes que nous allons définir dans les sections suivantes. Il s'agit de la **gêne à court-terme** et la **gêne à long-terme**.

### 3.1.2. La gêne à court-terme

La gêne sonore à court-terme est généralement évaluée en laboratoire, où l'on propose une mise en situation (une contextualisation). Il est demandé au sujet, s'imaginant dans cette situation, d'évaluer la gêne ressentie. La mise en situation proposée peut être complètement imaginaire, ou partiellement aidée par un environnement simulé. La norme NT Acou 111 [NIC02] conseille ces deux mises en situation, dans l'objectif de corrélérer les réponses de gêne à court-terme aux réponses de gêne à long-terme.

Flindell [Fli82] apporte une précision sur la gêne sonore évaluée en laboratoire, en disant que ce que l'on mesure dans ce contexte, ce sont plus des évaluations relatives d'un ensemble d'expositions sonores dans leur capacité à être perçues comme gênantes. On parle plus de potentiel de gêne, que Flindell [Fli82] assimile alors à une réponse moyenne donnée par une population raisonnable et représentative.

### 3.1.3. La gêne à long-terme

La gêne sonore à long-terme est généralement évaluée lors d'enquêtes *in situ*, où les personnes sondées se trouvent chez elles. En général il leur est demandé de faire un jugement rétrospectif sur une période passée dans leur habitation (par exemple chez eux, les 12 derniers mois).

La gêne à long-terme évaluée *in situ* est également reliée aux jugements d'intensité, mais dans une moindre mesure, parmi un ensemble d'autres facteurs. L'étude de Guski *et al.* [GFS99] a montré par exemple que les experts étudiant, la gêne à la fois *in situ* et en laboratoire, ont tendance à rapprocher le concept de gêne sonore de la perturbation des activités.

## 3.2. Facteurs influençant la gêne sonore

Si l'on a fait la distinction précédemment entre gêne sonore à court-terme (évaluée en laboratoire) et gêne sonore à long-terme (évaluée *in situ*), il y a consensus autour d'un certain nombre de facteurs dits acoustiques et non-acoustiques pouvant influencer la gêne

---

<sup>20</sup> "Noise annoyance is a psychological concept which describes a relation between an acoustic situation and a person who is forced to do things he/she does not want to do, who cognitively and emotionally evaluates this situation and feels partly helpless."

sonore évaluée *in situ* ou en laboratoire. L'effet des différents facteurs prend des proportions différentes suivant la méthode d'étude.

Dans les sections, suivantes nous décrivons ces différents facteurs en mettant en exergue leur influence notamment en ce qui concerne la gêne due au bruit de la circulation routière et la gêne due au bruit industriel.

### 3.2.1. Facteurs acoustiques

Le Tableau 1.3 tiré de la synthèse bibliographique de Marquis-Favre *et al.* [MPA05] présente un ensemble de facteurs acoustiques pouvant de manière générale influencer la gêne sonore.

Facteurs liés à la source de bruit	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Exposition au bruit ;</li> <li>- Large fluctuation en amplitude ;</li> <li>- Nombre d'évènements ;</li> <li>- Emergence d'évènements ponctuels ;</li> <li>- Caractère impulsionnel ;</li> <li>- Caractère tonal ;</li> <li>- Contenu en basses fréquences ;</li> <li>- ...</li> </ul>
Facteurs liés au contexte dans lequel apparaît le bruit	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bruit ambiant ;</li> <li>- Changement d'exposition au bruit ;</li> <li>- Introduction durable d'une nouvelle source de bruit ;</li> <li>- ...</li> </ul>
Facteurs liés à la nature de la source de bruit	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Effet du mode de transport ;</li> <li>- ...</li> </ul>
Facteurs liés à l'aspect qualitatif des bruits	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sonie ;</li> <li>- Rugosité ;</li> <li>- Force de fluctuation ;</li> <li>- Périodicité ;</li> <li>- ...</li> </ul>

**Tableau 1.3 : Ensemble de facteurs acoustiques pouvant influencer les jugements de gêne sonore [MPA05].**

Nous allons maintenant résumer des résultats d'études (en laboratoire ou *in situ*) attestant d'effets de ces différents facteurs sur la gêne due au bruit de la circulation routière d'une part et due au bruit industriel d'autre part.

#### 3.2.1.1. Gêne due au bruit de la circulation routière

**Concernant les facteurs liés à la source de bruit**, on peut citer les travaux de Langdon [Lan76a], qui à la suite d'une enquête *in situ* a fait émerger de bonnes corrélations entre niveau d'exposition sonore (exprimé sous forme de divers indices) et dissatisfaction. Sur ce point la méta-analyse de Job [Job88] montre qu'*in situ* les niveaux d'exposition sonore expliquent autour de 20% (en moyenne sur les données de 14 études) de la variation constatée dans les réponses de gêne due au bruit de la circulation routière. En laboratoire, on peut citer les travaux de Yaniv *et al.* [YDB82] qui ont trouvé de très fortes corrélations entre divers indices du bruit routier et la gêne mesurée. En étudiant des extraits sonores de circulation routière en laboratoire, Nilsson [Nil07] a mis en évidence l'influence du contenu en basses fréquences sur la gêne à court-terme et a de ce fait proposé un niveau de pression sonore équivalent corrigé (cf. section 2.1.3.1) pour mieux prendre en compte cet aspect.

**Concernant les facteurs liés au contexte dans lequel apparaît le bruit**, nous pouvons citer les travaux de Nilsson et Berglund [NB06]. Ces derniers ont montré, à travers une étude *in situ* longitudinale<sup>21</sup>, qu'un changement d'exposition au bruit (de l'ordre de 5dB(A)) provoqué par l'érection d'un mur anti-bruit avait permis de réduire la gêne ressentie et le pourcentage de gens « gênés » et « très gênés », notamment à des distances inférieures à 100m de l'infrastructure routière.

**Concernant les facteurs liés à la nature de la source de bruit**, on peut citer des travaux qui ont eu pour but de comparer soit différentes sources de bruit de la circulation routière, soit des bruits de circulation routière émis par des trafics de composition variée (différentes proportions entre les types de véhicules). Dans le premier type de travaux, Sardin et Bar [SB76] à partir de données d'enquêtes *in situ* ont montré que les véhicules légers étaient jugés les moins gênants alors que les mobylettes étaient jugées les plus gênantes. Versfeld et Vos [VV97], par une étude en laboratoire, ont montré qu'à un même  $L_{Aeq,T}$  différents véhicules routiers engendraient différentes réponses de gêne. Quant au deuxième type d'études, Langdon [Lan76b] a montré, à partir de données provenant d'enquêtes *in situ*, que lorsque le trafic routier ne peut pas être considéré comme fluide, on doit tenir compte de la proportion de poids lourds pour aboutir à une meilleure prédiction de la dissatisfaction. En laboratoire, Cermak et Cornillon [CC76] ont également montré qu'au-delà du niveau d'exposition, des indices liés à la composition du trafic pouvaient aboutir à une meilleure compréhension des effets néfastes du bruit de la circulation routière. Versfeld et Vos [VV02] ainsi que Griefhan *et al.* [GSPG07] ont quantifié l'effet de la proportion du nombre de poids lourds dans le trafic routier sur la gêne ressentie, allant dans le sens des résultats de Langdon [Lan76b]. Dans une autre démarche, Guastavino [Gua06] a montré que les gens associaient certains types de véhicules comme les véhicules électriques ou les véhicules de transport en commun à des jugements positifs.

**Enfin, concernant les facteurs liés à l'aspect qualitatif des bruits**, nous pouvons citer les travaux de Meunier et Marchioni [MM98] qui ont mis en évidence la forte influence de la sonie et de l'acuité sur le désagrément (terme utilisé dans leurs travaux plutôt que gêne), sur un corpus de bruits urbains majoritairement composés de bruits provenant de la circulation routière. Dans une autre étude, Meunier [Meu01] a confirmé l'importance de ces deux attributs sur le désagrément en étudiant un nouveau corpus de bruits provenant de la circulation routière et de bruits de la circulation ferroviaire. Enfin soulignons également que Nilsson [Nil07] en étudiant des bruits de la circulation routière de contenus basses-fréquences très différents a trouvé dans la sonie un meilleur prédicteur de la gêne que l'indice  $L_{Aeq,T}$ .

### 3.2.1.2. Gêne due au bruit industriel

**Concernant les facteurs liés à la source de bruit**, Häberle *et al.* [HDS84] ont mis en évidence, en analysant les plaintes portées par des riverains d'usines chimiques, que les bruits comportant une tonalité marquée causent une gêne plus forte que les bruits impulsionnels qui causent eux-mêmes une gêne plus forte que les bruits large-bande<sup>22</sup>. A travers une étude en laboratoire, Berry et Porter [BP92] ont également retrouvé qu'un bruit industriel large-bande était moins gênant qu'un bruit industriel comportant une tonalité marquée. Miedema [Mie04] suggère d'ailleurs d'appliquer des pénalités aux bruits industriels impulsionnels ou à composante tonale marquée. En laboratoire, Alayrac *et al.* [AMVM+10]

---

<sup>21</sup> C'est-à-dire que ces auteurs ont effectué deux fois la même enquête au même endroit à 2 ans d'intervalle [NB06].

<sup>22</sup> Häberle *et al.* [HDS84] décrivent les bruits large-bande comme des bruits ayant une distribution stable de l'énergie en fréquences. Nous considérerons comme large-bande des bruits dont la répartition de l'énergie couvre une large gamme de fréquences.

ont mis en évidence l'influence sur la gêne de la répartition de l'énergie en fréquence et de la présence de composantes tonales dans des bruits industriels permanents et stables.

**Concernant les facteurs liés à la nature de la source de bruit**, Viollon *et al.* [VMB04] ont montré, en étudiant différents bruits industriels en présence de différents bruits de fond, qu'un bruit provenant d'une tour de refroidissement (et donc qui est semblable à un bruit de chute d'eau) est moins gênant que d'autres bruits industriels. Morel *et al.* [MMVA12] ont également montré que des bruits provenant de tours aéroréfrigérantes (catégorie 1 de la typologie de Le Nost [Nos07]) étaient moins gênants que des bruits provenant de grosses souffleries (catégorie 2 de la typologie de Le Nost [Nos07]) ou de transformateurs ventilés (catégorie 3 de la typologie de Le Nost [Nos07]). L'explication donnée était liée au fait que les bruits de la catégorie 1 sont assimilés à des bruits de chute d'eau. Cependant ce jugement n'est pas indépendant du contenu spectral étant donné que les bruits de la catégorie 1 sont large-bande, et donc perçus moins gênants, comme mentionné dans de précédentes études *in situ* ou en laboratoire (cf. plus haut).

**Enfin, concernant les facteurs liés à l'aspect qualitatif des bruits**, Alayrac *et al.* [AMVM+10] ont montré que des sonies spécifiques intégrées sur différentes bandes critiques pouvaient rendre compte de différents contenus en basses fréquences ou moyennes fréquences. Ces auteurs ont également montré que la sonie ou le niveau d'isonie pouvaient produire des résultats équivalents ou meilleurs que l'indice  $L_{Aeq,T}$  pour la prédiction de la gêne, suivant les catégories perceptives de bruits industriels considérées [AMVM+10].

### 3.2.2. Facteurs non-acoustiques

Le Tableau 1.4 ci-après tiré de la synthèse bibliographique de Marquis-Favre *et al.* [MPA05] présente un ensemble de facteurs non-acoustiques pouvant influencer de manière générale la gêne sonore.

Nous allons maintenant récapituler de manière non-exhaustive (pour plus de détails se reporter à la synthèse de Marquis-Favre *et al.* [MPA05]) des résultats d'études (en laboratoire ou *in situ*) attestant d'effets de ces différents facteurs sur la gêne due au bruit de la circulation routière d'une part et due au bruit industriel d'autre part.

Facteurs liés à l'attitude	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Crainte de la source de bruit ;</li> <li>– Possibilité d'adaptation par rapport à la source de bruit ;</li> <li>– La sensibilité au bruit ;</li> <li>– Activité effectuée durant l'exposition au bruit ;</li> <li>– Perception du voisinage ;</li> <li>– Perception globale de l'environnement ;</li> <li>– ...</li> </ul>
Facteurs socio-démographiques	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Age ;</li> <li>– Statut marital ;</li> <li>– Niveau d'éducation ;</li> <li>– Catégorie socio-professionnelle ;</li> <li>– ...</li> </ul>
Facteurs situationnels	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Temps passé au domicile ;</li> <li>– Isolation acoustique du domicile ;</li> <li>– ...</li> </ul>

**Tableau 1.4 : Ensemble de facteurs non-acoustiques pouvant influencer les jugements de gêne sonore [MPA05].**

### 3.2.2.1. Gêne due au bruit de la circulation routière

Fields [Fie93] a réalisé une méta-analyse d'enquêtes *in situ* (la plupart traitent de bruit de la circulation routière, mais il n'est pas possible d'en avoir le détail), et a ainsi tenté d'évaluer si l'effet des facteurs non-acoustiques précédemment résumés (cf. Tableau 1.4) sont importants ou pas<sup>23</sup>. Il a montré que **les facteurs liés à l'attitude** par rapport à la source de bruit tels que la crainte d'un danger par rapport à une infrastructure proche du logement ainsi que la sensibilité au bruit sont deux facteurs importants. Langdon ([Lan76a, Lan76c]) avait pour sa part constaté que la sensibilité au bruit permettait d'expliquer une plus grande proportion de la variance constatée dans les réponses au bruit de la circulation routière que ne le permettaient les mesures physiques ( $L_{Aeq,T}$ , etc.). La méta-analyse de Job [Job88] révèle qu'en moyenne sur les enquêtes *in situ*, la sensibilité au bruit permet d'expliquer 17% de la variance constatée dans les réponses de gêne due au bruit routier.

Fields [Fie93] montre également que **les facteurs socio-démographiques** (âge, CSP, genre, etc.) n'ont pas d'effet important sur la gêne ressentie. Plus récemment, Van Gerven *et al.* [GVBJ+09] ont montré au travers d'une nouvelle méta-analyse que l'âge a bien un effet sur la gêne ressentie, mais que cet effet n'est pas linéaire. En effet, la gêne ressentie atteint son maximum entre 40 et 50 ans.

Enfin Fields [Fie93] a également montré que parmi les **facteurs situationnels**, seule l'isolation du domicile a un effet important sur la gêne ressentie.

Il est important de souligner que les auteurs cités ont souvent pointé des relations complexes entre facteurs non-acoustiques (par exemple relation entre la sensibilité et l'âge, eux-mêmes liés à la gêne ressentie, etc.). Ces résultats montrent bien la complexité de l'étude de la gêne sonore.

### 3.2.2.2. Gêne due au bruit industriel

Comme nous l'avons signalé précédemment, les bruits industriels ont été peu étudiés comparativement aux bruits des transports. Cette section sera par conséquent moins détaillée que la précédente concernant le bruit de la circulation routière.

Miedema et Vos [MV04] ont établi à travers une enquête *in situ* portant sur des bruits industriels que comme pour la gêne due au bruit de la circulation routière, l'âge a une influence non linéaire (la gêne est maximale entre 40 et 50 ans). Ces auteurs ont également retrouvé l'influence de la sensibilité au bruit. De même, le fait d'avoir une vue sur l'industrie depuis son logement contribue à augmenter la gêne ressentie. Enfin, la crainte par rapport à l'installation industrielle responsable de l'émission du bruit a un effet important [MV04].

## 3.3. Comment évaluer la gêne ?

Nous avons défini le concept de gêne sonore, en section 3.1, puis nous avons rapporté un ensemble de facteurs qui peuvent l'influencer en section 3.2. Nous allons maintenant dresser un résumé des différentes méthodes permettant de récolter des réponses de gêne autant *in situ* qu'en laboratoire.

### 3.3.1. *In situ*

#### 3.3.1.1. Evaluation indirecte

Selon Fidell [Fid03], la comptabilisation des plaintes interprétées comme une attitude résultant de l'exposition au bruit était anciennement utilisée pour mesurer les effets néfastes du bruit.

---

<sup>23</sup> Fields utilise un ensemble de critères objectifs pour quantifier l'importance des facteurs. Se reporter à [Fie93].

Cette méthode a été progressivement remplacée par une évaluation directe de la gêne (cf. section 3.3.1.2) ; un exemple d'étude analysant les plaintes recueillies a été mené par Häberle *et al.* concernant le bruit industriel [HDS84].

Un reproche que l'on peut faire à cette évaluation indirecte est que l'analyse des plaintes sous-estime la gêne ressentie, dans la mesure, où l'on ne va pas porter plainte à un commissariat ou toute autre institution, dès que l'on ressent la moindre gêne (cf. [Moc89]<sup>24</sup>).

### 3.3.1.2. Evaluation directe

L'évaluation directe de la gêne *in situ* se fait généralement par passation d'un questionnaire. La passation du questionnaire peut être soit réalisée au domicile des riverains enquêtés, soit par téléphone, soit par courrier (postal ou électronique).

Les questionnaires comportent un ensemble de questions et nous ne détaillerons ici que les questions qui concernent la gêne<sup>25</sup>. Un des problèmes soulevés par les chercheurs qui ont effectué des méta-analyses de données d'enquête *in situ* (par exemple Schultz [Sch78], Job [Job88] ou encore Fields [Fie93]) est la comparaison de données récoltées issues de différentes enquêtes, notamment parce que la question posée ou l'échelle de réponse étaient différentes.

Dans le but de pouvoir comparer les résultats d'enquêtes, des experts internationaux se sont réunis et ont proposé des formulations de questions relatives à la gêne sonore, traduites dans plusieurs langues, qui ont par la suite fait l'objet d'une norme (cf. Fields *et al.* [FJGF+01], et norme ISO 15666 [ISO03]).

Deux modes de récolte des réponses sont proposés, dont voici la traduction en français [ISO03] :

#### (1) Au moyen d'une échelle d'évaluation verbale

« Si vous pensez aux derniers (12 mois environ), quand vous êtes ici, chez vous, le bruit (de la source) vous gêne-t-il ?

*Pas du tout ;*

*Légèrement ;*

*Moyennement ;*

*Beaucoup ;*

*Extrêmement. »*

#### (2) Au moyen d'une échelle numérique avec introduction

« Voici une échelle d'opinion graduée de 0 à 10. Vous devez noter sur cette échelle la façon dont le bruit de (la source) vous gêne, lorsque vous êtes ici, chez vous. Notez 0 si le bruit ne vous gêne pas du tout et notez 10 si le bruit vous gêne extrêmement. Si vous êtes entre ces deux situations, choisissez une note intermédiaire entre 0 et 10.

Question :

« Si vous pensez aux derniers (12 mois environ), quelle note comprise entre 0 et 10 exprime le mieux la façon dont le bruit de (la source) vous gêne ? »

La gêne récoltée par ce biais est une gêne à long-terme, qui est à même de prendre en compte à la fois les facteurs acoustiques et les facteurs non-acoustiques liés au contexte personnel et à l'environnement des enquêtés.

<sup>24</sup> [Moch89], MOCH A. Les stress de l'environnement. Culture et société. Saint Denis : Presses Universitaires de Vincennes, 1989. Citée dans [Ala09] p. 7.

<sup>25</sup> Pour la méthodologie de l'établissement d'un questionnaire et pour la formulation des différentes questions, le lecteur peut se référer au rapport de Champelovier *et al.* [CCL03].



### 3.3.2. En laboratoire

Avant de détailler les différentes méthodes de collecte de réponses de gêne à court-terme en laboratoire, nous allons parler des différents contextes possibles pour une étude en laboratoire.

#### 3.3.2.1. Contextes d'une étude de gêne sonore en laboratoire

Pour étudier la gêne à court-terme en laboratoire, nous l'avons évoqué en section 3.1.2, l'expérimentateur peut proposer au sujet une mise en situation complètement imaginaire, et place **le sujet dans l'écoute**. Le plus souvent ce genre d'expérimentation a lieu dans une salle calme dédiée au test d'écoute en laboratoire d'un aspect visuel très éloigné de ce qu'un sujet pourrait rencontrer à son domicile. Les stimuli sonores sont relativement courts, de l'ordre de la dizaine de secondes (par exemple [Nil07, AMVM+10, KLHL10], etc.). Les stimuli sonores peuvent être soit reproduits au moyen d'enceintes ou par un casque audio (nous discuterons plus en détail le choix de la technique de reproduction au Chapitre 2 ). Dans la littérature on retrouve une diversité de mises en situation différentes. Par exemple Berglund *et al.* [BBL75] proposent aux sujets de s'imaginer chez eux après une dure journée de travail, assis dans un fauteuil confortable en essayant de lire le journal<sup>26</sup>. Nilsson [Nil07] propose quant à lui aux sujets de s'imaginer dans un jardin en train de se relaxer.<sup>27</sup> Enfin, plus récemment, Kim *et al.* [KLHL10] ont encouragé les sujets à s'imaginer en train de lire un livre, en regardant la TV ou toute autre activité similaire. La gêne à court-terme évaluée en laboratoire, où le sujet est placé dans l'écoute et mis dans le contexte d'une situation imaginaire, est corrélée aux jugements d'intensité (par exemple [BBL75, Gus97]). De plus dans la mesure où l'évaluation de la gêne à court-terme est instantanée après l'écoute du bruit, on peut la rapprocher du désagrément sonore (ce que tend à confirmer l'étude de Guski *et al.* [GFS99], en examinant les réponses des experts étudiant la gêne sonore en laboratoire). Néanmoins la mise en situation permettant dans une certaine mesure d'activer des représentations en mémoire de situations vécues, le jugement de gêne à court-terme, même s'il se rapproche d'un jugement de désagrément est plus large que ce dernier.

Des chercheurs utilisent également une mise en situation partiellement imaginaire : mise en contexte **en environnement simulé**. La salle d'écoute du laboratoire est équipée comme un salon typique, pour faciliter la projection des sujets dans la situation imaginaire proposée. Rice [Ric77] a été le premier à proposer un tel environnement simulé, dont l'idée a été reprise par d'autres par la suite (par exemple [Pow79a, Pow79b, Fli82, KMM99a, KMM99b, OYT08], etc.). Généralement, les enceintes ne sont alors plus visibles par les sujets, et ceux-ci peuvent effectuer différentes activités (par exemple, jouer aux cartes, lire un journal, etc.). Dans ce type d'environnements simulés, les sujets sont pris par petits groupes, et peuvent également avoir des conversations entre eux. Généralement les stimuli ont des durées plus longues, de l'ordre de la dizaine de minutes. L'avantage de ce type d'étude est que l'on peut évaluer par exemple des facteurs non-acoustiques tels que la perturbation des activités (par exemple [KMM99a, KMM99b]).

Enfin récemment, De Coensel *et al.* [CBBN+07] ont monté une expérience en **environnement simulé**, en investissant une villa de vacances située dans un environnement calme. La reproduction des stimuli est assurée par des enceintes placées à l'extérieur de la villa et prend en compte le filtrage par les murs et fenêtres de la villa. Cette expérience est très proche de celles citées précédemment, mais De Coensel *et al.*

---

<sup>26</sup> "After a hard day's work, you have just been comfortably seated in your chair and intend to read your news-paper."

<sup>27</sup> "Imagine that you are sitting in a garden, relaxing when you hear the sound."

[CBBN+07] parlent d'une expérience de terrain, et non plus de laboratoire. Cette expérience était originale à la fois par sa méthode de présentation des stimuli, mais également par l'échantillonnage rigoureux de ses sujets, qui a permis de mettre en évidence l'effet de facteurs non-acoustiques sur la gêne ressentie ([CBML+05, CBBN+07]).

### 3.3.2.2. Présentation des stimuli et collecte des données

L'étude de la gêne en laboratoire permet de se focaliser sur les effets d'un nombre réduit de paramètres contrôlés sur les jugements de gêne émis par les sujets.

La plupart des procédures d'évaluation de la gêne en laboratoire sont empruntées à la psychophysique<sup>28</sup>, et font appel à d'autres domaines, comme les statistiques, la théorie du mesurage, les sciences humaines, etc. [MPA05].

Dans cette section nous décrivons brièvement les principales méthodes employées dans la littérature pour évaluer la gêne sonore en laboratoire sans rentrer dans les détails concernant les différents domaines évoqués ci-dessus. Le lecteur pourra se référer à la synthèse de Marquis-Favre *et al.* [MPA05] pour obtenir plus de détails et de références bibliographiques.

Evaluer la gêne en laboratoire nécessite de définir au préalable une procédure qui comprend un mode de collecte des réponses de gêne, et un mode de présentation des stimuli aux sujets qui vont devoir en évaluer la gêne ressentie. Dans le domaine de la gêne sonore on utilise principalement 3 modes de collecte des réponses de gêne : (1) utilisation d'échelles de rapport, (2) utilisation d'échelle de catégories, et (3) utilisation d'échelles de discrimination [MPA05]. Nous allons expliciter ces modes de collecte de réponses de gêne en précisant le(s) mode(s) de présentation des stimuli usuellement associé(s).

- (1) **Des échelles de rapport** sont produites en employant notamment la méthode d'estimation de grandeur qui consiste à donner un chiffre (réel positif) proportionnel à la gêne ressentie. Le jugement peut être réalisé avec ou sans référence. Sans référence, le jugement tient compte de l'estimation antérieure.
- (2) **Des échelles de catégories** sont produites en utilisant des échelles verbales ou numériques. Les échelles verbales et numériques reprennent notamment les recommandations de la norme ISO 15666 [ISO03], c'est-à-dire qu'on utilise 5 catégories verbales « pas du tout », « légèrement », « moyennement », « beaucoup », « extrêmement », ou des échelles numériques allant de 0 à 10 avec comme point central 5. Ces dernières échelles peuvent être continues ou discontinues [Bon86]. Fields *et al.* [FJGF+01] soulignent qu'étant donné la familiarité qu'ont la plupart des gens avec un système en base 10, cette échelle sera facilement comprise. Il est possible également d'associer des labels verbaux avec une échelle numérique discontinue (par exemple Kim *et al.* [KLHL10] pour étudier la gêne due à des bruits de transports) ou continue (Alayrac *et al.* [AMVM+10] pour étudier la gêne due à des bruits industriels). Les labels verbaux sont employés notamment dans le but de faciliter l'utilisation de l'échelle de réponse par les sujets.

Pour ces deux dispositifs de collecte des réponses de gêne, souvent les sujets effectuent un test d'entraînement pour se familiariser avec la tâche demandée, et deux modes de présentation des stimuli sont principalement employés.

- **Présentation par stimulus unique** : les stimuli sont présentés un par un en ordre aléatoire aux sujets ;

---

<sup>28</sup> La psychophysique étudie les relations quantitatives démontrées entre des événements physiques identifiés et mesurables et des réponses évoquées selon une règle expérimentale avérée [Bon86].

- **Présentation par stimuli multiples** : les stimuli sont tous présentés aux sujets dans un ordre aléatoire, avant de recueillir pour chaque stimulus le jugement donné par les sujets.

(3) **Des échelles de discrimination** sont produites en utilisant notamment le mode de présentation par paires, où le sujet doit comparer chacun des stimuli deux à deux. On trouve trois types de présentation des stimuli pour cette méthode [PHG05].

- **Présentation par choix forcé** : les sujets écoutent chaque paire de bruits et doivent choisir quel est le bruit le plus gênant par exemple ;
- **Présentation avec gradation du choix** : les sujets écoutent chaque paire de bruits et doivent choisir quel est le degré de différence entre les deux bruits (par exemple « A est beaucoup plus gênant que B », « A est plus gênant que B », « A et B sont également gênant », « B est plus gênant que A », « B est beaucoup plus gênant que A ») ;
- **Présentation avec une échelle continue** : les sujets écoutent chaque paire de bruits et doivent juger sur une échelle continue à quel point, par exemple, les gênes ressenties à l'écoute des deux bruits sont différentes.

Il existe peu d'études comparatives de ces différentes procédures. Citons principalement l'étude de Parizet *et al.* [PHG05], qui ont comparé 5 procédures pour juger le désagrément de divers bruits d'intérieur de voiture : (1) échelle de catégorie numérique continue avec présentation par stimulus unique, (2) échelle de catégorie numérique continue avec présentation par stimuli multiples, (3) présentation par paires avec choix forcé, (4) présentation par paires avec gradation du choix, et (5) présentation par paires avec une échelle continue. Il est ressorti que les deux premières procédures sont perçues plus rapides et légèrement moins difficiles que les autres. Elles posent en outre l'avantage de pouvoir recueillir des jugements sur un plus grand nombre de stimuli, ce qui est un avantage non-négligeable. Néanmoins les résultats affichent plus de dispersion qu'avec les autres procédures.

Citons également l'étude de Celik *et al.* [CPM05] qui ont comparé notamment vis-à-vis de la gêne (ainsi que l'intensité perçue et le désagrément) due à différents bruits (trafic routier, ventilation et bruits de restaurants) deux procédures qui nous intéressent, à savoir (1) échelle de catégorie numérique avec présentation par stimulus unique et (2) comparaison par paires avec choix forcé. Celik *et al.* [CPM05] ont montré que les résultats obtenus *via* ces procédures sont en accord.

Il n'y a donc pas de contre-indication à l'utilisation de l'une ou l'autre procédure. Dans la mesure où l'on a vu que la présentation par stimulus unique permettait de pouvoir juger un grand nombre de stimuli en un temps relativement réduit, et dans la mesure où cette méthode nous permet de nous rapprocher au mieux, au niveau de la question posée, des recommandations de la norme ISO 15666 [ISO03], nous privilégierons cette méthode pour étudier la gêne en laboratoire.

### 3.3.3. Gêne sonore *in situ* vs gêne sonore en laboratoire

Selon Marquis-Favre *et al.* [MPA05], il apparaît dans la littérature un conflit entre l'évaluation de la gêne *in situ* et l'évaluation de la gêne en laboratoire. Cependant chaque technique d'évaluation possède ses avantages et ses inconvénients. Le Tableau 1.5 suivant en dresse une liste [Ric96].

	Avantages	Inconvénients
Evaluation <i>in situ</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Contexte réel ;</li> <li>– Exposition sur le long-terme ;</li> <li>– Gêne réellement ressentie ;</li> <li>– Jugements de gêne absolus ;</li> <li>– Echantillons de population segmentés.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Exposition à un bruit unique, non répétable ;</li> <li>– Présences d'autres sources de bruit ;</li> <li>– Mesure physique comprend également d'autres sources de bruit ;</li> <li>– Réalisation chronophage et coûteuse.</li> </ul>
Evaluation en laboratoire	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Répétabilité ;</li> <li>– Possibilité d'isoler ou de combiner des bruits ;</li> <li>– Contrôle précis des paramètres physiques ;</li> <li>– Pratique et rapide à mettre en place ;</li> <li>– Peu coûteux.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Système de reproduction sonore nécessaire ;</li> <li>– Jugements de gêne relatifs, dans un contexte imaginaire, dans l'écoute ou en environnement simulé ;</li> <li>– Exposition au bruit sur le court-terme ;</li> <li>– Disponibilité limitée des sujets.</li> </ul>

**Tableau 1.5 : Avantages et inconvénients de l'évaluation de la gêne sonore *in situ* ou en laboratoire [Ric96].**

En laboratoire, ce sont donc plus les effets des facteurs acoustiques qui vont être étudiés, tandis qu'*in situ*, ce sont plus les effets des facteurs non-acoustiques. Le choix de la méthode dépend donc des objectifs affichés et des moyens à disposition.

Toutefois, dans l'idéal, soulignons qu'il serait préférable d'effectuer des « allers-retours » entre le laboratoire et le terrain. En effet, le laboratoire permet de proposer des modèles qu'il est nécessaire de valider sur le terrain pour pouvoir prétendre à la généralisation, tandis que l'on peut voir émerger des effets de certains facteurs *in situ*, puis les étudier séparément de manière contrôlée en laboratoire, afin de mieux comprendre leurs effets et les prendre en compte dans les modèles.

### 3.4. D'autres méthodes utiles à l'étude de la gêne

Les méthodes explicitées dans la section 3.3.2 sont issues de la psychoacoustique, en tant que domaine de la psychophysique. Selon ce paradigme, l'évaluation auditive des bruits est mesurée et représentée dans un espace multidimensionnel donné par les sciences physiques. La dispersion des données, notamment due à un certain nombre de facteurs psychologiques, n'est alors pas considérée comme un objet de recherche en soi [Dub00]. Cette approche centrée sur l'objet (en ce qui nous concerne les bruits) s'avère très utile pour dégager des tendances principales et trouver des consensus, notamment pour le développement d'indicateurs de gêne (par exemple [AMVM+10]).

Récemment une approche cognitive a été proposée pour identifier comment les individus donnent du sens à leurs expériences sensorielles quotidiennes, et comment, à travers une analyse linguistique de leur discours, cette connaissance individuelle est partagée avec d'autres individus ([Dub00, DGR06, Dub09]). Cette approche est basée sur l'idée que les individus structurent leur représentation du monde selon des similarités sémantiques qui reflètent le sens que les individus donnent au monde à travers les expériences sensorielles qu'ils en ont. C'est une approche qui a déjà été éprouvée notamment dans le domaine de la perception de l'environnement sonore (cf. [Maf99, Gua03,

Gua07, TSPL08]). Cette nouvelle approche est basée (1) sur un cadre théorique alliant une théorie psychologique (catégorisation naturelle), et une théorie psycholinguistique qui fasse le lien entre la théorie psychologique et la sémantique de l'expression des sensations, et (2) sur une procédure expérimentale particulière (catégorisation libre et verbalisation libre) [Dub09]. Nous allons expliciter brièvement ces deux points avant d'examiner les apports de cette nouvelle démarche dans l'étude de la gêne sonore.

### 3.4.1. Théories et connaissances sous-jacentes

#### 3.4.1.1. Catégorisation naturelle [Ros78]

Cette théorie repose sur deux principes : (1) **l'économie cognitive** qui veut que l'on traite le maximum d'informations différentes tout en conservant ce traitement d'informations dans des proportions directement utilisables et (2) **la structure du monde perçu** qui veut que celle-ci ne soit pas due au hasard, mais qu'elle soit dirigée par un certain nombre de différences et de co-occurrences (un canard possède des plumes plutôt que de la fourrure).

La catégorisation naturelle repose ensuite sur une organisation hiérarchique des connaissances qui s'effectue selon une **dimension horizontale** et une **dimension verticale**.

La **dimension verticale** concerne le degré de globalité de la catégorie, par exemple une catégorie globale « animal » contient entre autres « les mammifères », qui comprennent entre autres « les chiens », etc. La **dimension horizontale** concerne le degré de segmentation entre catégories à un même niveau de globalité, par exemple cela nous renseigne dans les « mammifères », selon quels attributs « un chien » est différent « d'un chat ». Selon la dimension horizontale, les catégories tendent alors à être définies en termes de **prototypes** qui possèdent les attributs les plus représentatifs à l'intérieur de leur catégorie.

#### 3.4.1.2. Psycholinguistique

L'idée est qu'en analysant ce qui est dit et comment cela est dit, on puisse inférer des interprétations pertinentes à propos de la manière dont les individus conceptualisent et traitent leurs expériences sensorielles [DGR06]. Egalement, le langage en tant qu'outil partagé doit pouvoir nous renseigner sur des conceptualisations partagées de ces expériences sensorielles.

Une analyse linguistique complète vise à décrypter la morphologie (qui concerne la structure interne de la construction des mots), la syntaxe (qui concerne la construction des phrases et l'agencement des mots) et la sémantique (qui concerne la signification des expressions linguistiques) dans les discours [GD06].

Nous allons récapituler dans le domaine de la perception sonore quels sont les outils (ressources) linguistiques disponibles tels qu'ils ont pu être identifiés dans de précédents travaux et interprétés en lien avec les théories explicitées ci-dessus [DGR06] :

- **Les noms** : ils se réfèrent généralement aux différentes sources de bruit (par exemple « porte », « oiseau », etc.) ;
- **Les nominalisations déverbales (noms avec un suffixe dérivé d'un verbe)** : ils se réfèrent par exemple à une action mécanique (par exemple « grincement »), le verbe lui se référant au mode de production du bruit (« grincer ») ;
- **Les adjectifs** : ils se réfèrent aux phénomènes sonores (au sens général) et sont liés à leur description objective (« grave », « aigu », etc.) ;

- **Les adjectifs déverbaux (adjectifs construits à partir d'un verbe)** : ils se réfèrent principalement à un jugement hédonique, un effet (par exemple « insupportable ») ;
- **Les phrases prépositionnelles** : elles se réfèrent à des notions de lieu, activité, temporalité, etc. (par exemple « les motos à Bastille le samedi soir ») ;
- **Les clauses relatives** : elles se réfèrent à la source de bruit (« le bruit d'un verre qui casse »).

### 3.4.2. Procédure expérimentale : catégorisation libre et verbalisation libre

D'un point de vue méthodologique, les procédures de catégorisation libre et verbalisation libre permettent de tirer profit de l'apport de ces différentes théories et d'accéder au mieux aux représentations partagées des expériences sensorielles individuelles [Dub09].

A la base, les stimuli sont présentés tous simultanément aux sujets. **La tâche de catégorisation libre** implique que ces derniers regroupent les stimuli en fonction de la similarité perçue, en faisant autant de groupes qu'ils le souhaitent avec dans chaque groupe autant de stimuli qu'ils le souhaitent. Ensuite, la **tâche de verbalisation libre** implique que les sujets font une description libre de chaque groupe formé. Enfin, on demande généralement aux sujets de désigner dans chaque groupe quel stimulus leur paraît le plus représentatif, en d'autres termes, on leur demande de désigner un **prototype**.

### 3.4.3. Quels apports pour l'étude de la gêne ?

Selon Dubois *et al.* [DGR06], la plupart des tentatives de propositions d'indicateurs de gêne reposent souvent sur des indices acoustiques, ou des combinaisons d'indices acoustiques. Ce faisant, la valeur sémantique attribuée aux sources de bruit identifiées et qui on l'a vu, influe sur les jugements faits sur ces sources de bruit, ne peut pas être capturée par de telles propositions reposant sur des mesures physiques.

L'idée serait alors d'identifier **en amont** par cette procédure les caractéristiques et attributs, d'un ensemble de bruits répartis en différentes catégories, qui sont **pertinents** du point de vue du sujet et **partagés** entre les sujets, pour ensuite étudier de telles catégories du point de vue de la gêne, afin de proposer des indicateurs pertinents.

## 4. Gêne en situation de multi-exposition sonore

Dans cette section, nous nous attacherons à définir ce qu'est une situation de multi-exposition sonore, et donnerons un glossaire des termes généralement employés relatifs à l'étude de la gêne dans ces situations. Nous ferons un portrait assez exhaustif des résultats fournis par les travaux publiés à la fois pour des études *in situ* et pour des études en laboratoire. Enfin, nous terminerons en listant les tentatives de modélisation de la gêne en situation de multi-exposition sonore.

### 4.1. Une définition

Dans la littérature scientifique, le vocabulaire employé pour parler des situations de multi-exposition sonore est très varié. Certains auteurs parlent de sources de bruit

combinées (« combined noise sources »), d'autres de sources de bruit mélangées (« mixed noise sources »), de sources de bruit simultanées (« simultaneous noise sources ») ou encore de bruit multi-sources (« multi-sourced noise »).

Champelovier *et al.* [CCL03] dans leur ouvrage retraçant une étude d'envergure sur la gêne due à l'exposition combinée au bruit routier et ferroviaire définissent les situations de multi-exposition sonore comme des situations dans lesquelles des individus dans des lieux d'habitation ou des espaces publics sont exposés à plusieurs sources de bruit de l'environnement, ces sources de bruit n'étant pas assimilables au bruit de fond dans la mesure où elles sont parfaitement identifiables tant du point de vue acoustique que perceptif et même visuel.

Les sources de bruit de l'environnement en question ne sont pas nécessairement présentes simultanément, ainsi sur la période de temps où l'on évalue la multi-exposition sonore, le recouvrement temporel peut être principalement de trois types :

- Recouvrement temporel partiel ;
- Recouvrement temporel total (les bruits sont simultanés) ;
- Pas de recouvrement temporel.

## **4.2. Un glossaire de la multi-exposition sonore**

Lorsque l'on traite de la gêne sonore en situation de multi-exposition, on fait généralement appel à un vocabulaire particulier, que nous allons expliciter dans les sections suivantes.

### **4.2.1. La gêne totale**

Ce terme de gêne totale peut se trouver sous différentes dénominations dans la littérature, on parle de « total annoyance », ou de « overall annoyance ». Lorsque l'on est en présence de sources de bruit combinées, la gêne totale fait référence à la gêne causée par la combinaison de ces bruits.

La notion de gêne totale est une notion délicate, et certains s'interrogent sur la pertinence même de ce concept [CCL03]. En effet, on peut s'interroger sur les processus et capacités d'un individu à agréger les différentes sources de bruit qu'il perçoit.

### **4.2.2. La gêne spécifique**

Dans la littérature, on trouve ce terme sous la dénomination « specific annoyance ». La gêne spécifique d'une source de bruit qui est présente dans une combinaison est la gêne que provoquerait cette source de bruit si elle était entendue seule (en d'autres termes en mono-exposition).

### **4.2.3. La gêne partielle**

On trouve ce terme dans la littérature sous la dénomination « partial annoyance ». Il a été introduit par Berglund et Nilsson [BN97], et fait référence à la gêne que provoque une source de bruit lorsqu'elle est entendue dans une combinaison de sources de bruit.

Cette notion de gêne partielle a été peu exploitée, même si en situation contrôlée, elle permet d'accéder directement à certains effets d'interaction (comme le masquage ou l'inhibition) qui interviennent dans les combinaisons de sources de bruit (cf. [BN98a, BN01a]).

Souvent on parle de gêne spécifique aussi bien en laboratoire qu'*in situ*. Or *in situ*, un bruit peut rarement être entendu seul, il est entendu souvent en présence de tous les autres bruits de l'environnement, dans des situations de dominance (cf. section 4.2.6) variées. Il apparaît donc que les données de gênes spécifiques recueillies *in situ* correspondent souvent aux données de gênes partielles recueillies en laboratoire (cf. [BN97]).

#### 4.2.4. Inhibition – masquage

On dit que la gêne due à un bruit A est inhibée par la présence d'un bruit B si la gêne due au bruit A en présence de B est réduite par rapport à la gêne de A en mono-exposition. Ce terme d'inhibition est employé par Powell [Pow79c], et son utilisation fait suite aux premières études sur la multi-exposition sonore du début des années 70 ([Bot71] pour une enquête *in situ*, [PR75] et [Pow79a] pour des études en laboratoire

A partir de cette définition de l'inhibition, Morel *et al.* [MMVA12]) ont introduit le pouvoir d'inhibition d'une source de bruit sur une autre. Cette notion correspond à la capacité d'une source de bruit à devenir la composante la plus gênante devant les autres sources de bruit d'une combinaison.

Si l'on se réfère à la démarche utilisée par Powell [Pow79c], l'inhibition résulte des effets de masquage spectral entre les deux bruits diffusés simultanément. Le masquage spectral est évalué généralement par le seuil de masquage qui est le niveau de pression sonore d'un son test nécessaire pour être audible en présence d'un son masquant. Lorsque des sons sont combinés à des niveaux sonores proches, le masquage spectral est rarement complet, on a plutôt du masquage spectral partiel qui est en fait un effet de réduction de l'intensité perçue du son test en présence du son masquant [FZ06]. Le masquage est également influencé par la composition spectrale du bruit masquant (se référer par exemple aux travaux de Hellman [Hel82, Hel84, Hel85]). Par ailleurs, des auteurs comme Berglund *et al.* [BBGL81] ont établi que l'intensité perçue est une base sous-tendant le jugement de gêne sonore, ce qui explique le lien entre inhibition et masquage.

#### 4.2.5. Effets synergiques de différentes sources de bruit

On parle d'effets synergiques de différentes sources de bruit lorsque la gêne totale est supérieure ou égale à la gêne spécifique maximale dans cette combinaison.

Dans certaines études, ce principe n'est pas respecté et certains auteurs estiment que le non-respect de ce principe est dû à des biais dans le recueil des réponses de gêne spécifique ou totale (cf. [SW97]).

Lorsque ce principe n'est pas respecté, certains auteurs appellent cela le paradoxe des sources de bruit combinées. Hatfield *et al.* [HKJ06] font alors référence à deux paradoxes :

- Le paradoxe dit faible : la gêne totale est inférieure à la somme arithmétique des gênes spécifiques (on appelle également cela l'hypoaddition [BBGL81]) ;
- Le paradoxe dit fort : la gêne totale est inférieure à la gêne spécifique maximale.

Alayrac [Ala09] rencontre le paradoxe dit fort, dans une combinaison de bruits industriel et de nature, et l'explique par des effets cognitifs dus à la présence du bruit de nature. Ce type de bruit est reconnu en effet pour améliorer l'agrément de l'environnement sonore (par exemple [Gua03, LD06]).



#### **4.2.6. Dominance**

Dans une combinaison de sources de bruit A+B, on dit que A domine B si le niveau de pression sonore de A est supérieur à celui de B dans la combinaison. A est alors la source dominante dans la combinaison. En anglais cela se traduit par « dominant source ».

Toutefois, A n'est pas nécessairement la source de bruit la plus gênante. Dans la combinaison, la source la plus gênante est appelée en anglais « strongest component ».

#### **4.2.7. Correction subjective, pénalité et bonus**

Rapidement les chercheurs se sont rendu compte que des bruits différents de même niveau sonore ne suscitaient pas la même réaction de gêne. Rice [Ric75] a été le premier à proposer l'emploi de corrections subjectives censées être appliquées aux mesures de bruit pour rendre compte de leurs différences en termes de gêne spécifique.

Dans le même ordre d'idées, on définit le bonus comme l'existence d'une gêne plus faible pour une même exposition sonore à deux sources de bruit différentes.

### **4.3. Evaluation de la gêne en situation de multi-exposition sonore**

Nous l'avons exposé dans la section 3 de ce chapitre, l'étude de la gêne sonore peut se faire soit *in situ*, soit en laboratoire. Les méthodes d'évaluation (collectes des données, formulation des questions, présentation des stimuli, etc.) pour l'étude de la gêne en situation de multi-exposition sonore sont les mêmes que celles exposées dans la section 3. Cependant, il existe des spécificités méthodologiques que nous allons récapituler avant de faire un résumé des résultats probants issus d'enquêtes *in situ* ou d'études en laboratoire.

#### **4.3.1. Spécificités méthodologiques**

##### **4.3.1.1. *In situ***

Pour les enquêtes de gêne *in situ* relative à la multi-exposition sonore, il est important de disposer de données relatives aux gênes partielles et à la gêne totale.

En respectant la formulation donnée par la norme ISO 15666 [ISO03] (cf. section 3.3.1.2), trois questions relatives à la gêne doivent alors être posées dans le cas d'une multi-exposition à deux sources de bruit principales : une question relative à la gêne due au bruit A, une question relative à la gêne due au bruit B, et une question relative à la gêne totale.

L'ordre de ces questions est un sujet important selon les experts puisqu'il peut influencer les réponses fournies par les personnes enquêtées. Pour Schulte-Fortkamp et Weber [SW97], le paradoxe fort des sources de bruit combinées (cf. section 4.2.5) observé pour certaines enquêtes *in situ* (par exemple [Tay82]) est un résultat inattendu, et semble être un artefact. Une explication pourrait être que la question concernant la gêne totale est posée généralement très tôt dans le questionnaire, et même avant les questions relatives aux gênes partielles, et donc poser cette question sur la gêne totale prématurément peut empêcher l'enquêté d'avoir toutes les sources de bruit présentes à l'esprit.

Selon Hatfield *et al.* [HKJ06], les paradoxes de sources de bruit combinées peuvent être dus soit à un réel effet de l'intégration de différents bruits au niveau acoustique, auditif ou psychologique, ou bien être dus au format des questions relatives à la gêne due aux sources de bruit combinées dans les enquêtes *in situ*. Pour ces auteurs, l'interprétation que les enquêtés font de la question posée, mais également des échelles proposées pour l'évaluation de la gêne sont des paramètres influents. Ils proposent d'utiliser alors des échelles de réponses fermées entre 0 et 10 mais en autorisant de manière explicite les

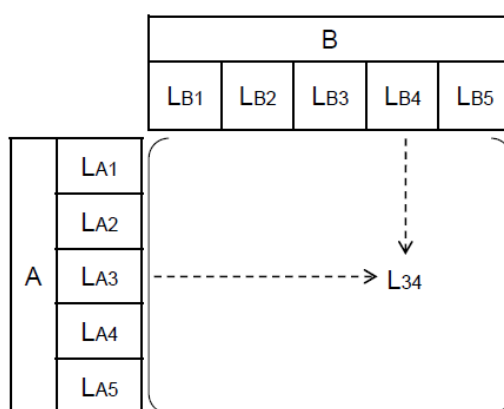
réponses supérieures à 10. A notre connaissance, aucune étude n'a fait état de l'emploi d'une telle échelle pour le recueil de réponses de gêne partielle et totale.

Notons que le questionnaire utilisé par Champelovier *et al.* [CCL03] aborde en premier l'évaluation des gênes partielles, puis en espaçant les questions, l'évaluation de la gêne totale, tout en respectant la formulation donnée par la norme ISO 15666 [ISO03].

#### 4.3.1.2. En laboratoire

##### a. Principe de construction des stimuli

Selon Berglund et Nilsson [BN97], il est nécessaire de disposer d'un nombre important de combinaisons des bruits constituant la multi-exposition. Ces auteurs proposent même d'utiliser dans le cas idéal toutes les combinaisons uniques de 5 niveaux sonores pour chaque bruit composant la multi-exposition. Cela est illustré sur la Figure 1.6, pour une multi-exposition sonore composé d'un bruit A et d'un bruit B.



**Figure 1.6 : Exemple des combinaisons des bruits A et B à étudier dans le cas idéal.**

Dans la Figure 1.6, les  $L_{Ai}$  sont les niveaux de pression sonores du bruit A seul, les  $L_{Bj}$  sont les niveaux de pression sonores du bruit B seul. Chaque élément  $L_{ij}$  de cette matrice représente la combinaison du bruit A et du bruit B pour un niveau de pression sonore total calculé comme la somme énergétique des  $L_{Ai}$  et  $L_{Bj}$ . Par exemple, le niveau de pression sonore total  $L_{34}$  du bruit combinant A au niveau  $L_{A3}$  et B au niveau  $L_{B4}$  vaut :

$$L_{34} = 10 \log (10^{0,1L_{A3}} + 10^{0,1L_{B4}}) \quad (1.22)$$

On complète le plan expérimental en proposant également aux sujets d'évaluer la gêne due aux bruits A et B en mono-exposition, et ce pour les niveaux de pressions sonores  $L_{Ai}$  et  $L_{Bj}$ .

Peu d'auteurs testent une matrice entière (par exemple [BN01a, Fli82]), et la plupart étudient seulement quelques vecteurs de cette matrice ou un échantillon d'éléments de la matrice (cf. par exemple [BBGL81, RI84, Vos92, MMVA12]).

##### b. Recueil des réponses de gêne

Usuellement, il est demandé, de manière implicite, aux sujets de juger la gêne indépendamment du fait que le stimulus soit une multi-exposition ou une mono-exposition. La question posée suit la formulation donnée par la norme ISO 15666 [ISO03] ou en est adaptée. Dans le traitement des données, il est considéré que les jugements recueillis sur les stimuli issus de mono-exposition constituent des jugements de gêne spécifique, et que

les jugements recueillis sur les stimuli issus de multi-exposition constituent des jugements de gêne totale. C'est de cette manière que procèdent la plupart des chercheurs.

Berglund et Nilsson [BN01a] demandent aux sujets d'évaluer directement l'intensité perçue totale ainsi que les intensités perçues partielles, pour le même corpus de stimuli. Cette méthode leur apporte l'avantage d'étudier plus en détail les mécanismes de masquage spectral [BN98b] sous-tendant le phénomène d'inhibition de la gêne. Il s'agit donc d'une piste intéressante pour établir un modèle prédictif. Toutefois, cette méthode nécessite d'être certain que les sujets peuvent identifier, au sein d'une combinaison, les deux sources de bruit présentes (par exemple [BN01b]).

### 4.3.2. Quelques résultats

La plupart des études portant sur la gêne en situation de multi-exposition sonore se sont intéressées à des combinaisons de bruits de transport. On retrouve notamment les multi-expositions : bruit routier-bruit aérien, bruit routier-bruit ferroviaire. Cependant, d'autres multi-expositions ont également été étudiées. Nous allons décrire ici les principaux résultats ressortant de ces études, en séparant études *in situ* et études en laboratoire.

#### 4.3.2.1. *In situ*

##### *a. Multi-exposition au bruit de la circulation routière et au bruit aérien*

Au début des années 70, Bottom [Bot71] rapporte les résultats d'une enquête pour laquelle les sites sélectionnés étaient divisés en trois zones du point de vue de l'exposition au bruit aérien, et dans chacune des trois zones, les enquêtés étaient classés dans trois catégories d'exposition au bruit de la circulation routière (les sites retenus sont situés en zone urbaine bâtie où le trafic routier peut être interrompu par des feux de signalisation ou congestionné aux heures de pointes). Le premier résultat important relaté par Bottom est que pour les trois expositions au bruit aérien, la gêne due au bruit aérien est toujours moins élevée lorsque l'exposition au bruit de la circulation routière est plus élevée. En d'autres termes, le bruit de la circulation routière affecte le jugement de gêne du bruit aérien. Bottom [Bot71] a clairement mis en évidence une interaction entre le bruit aérien et le bruit routier que Powell a plus tard nommé effet d'inhibition [Pow79c].

Au début des années 80, Taylor [Tay82] a publié les résultats d'une enquête d'envergure réalisée à proximité de l'aéroport de Toronto. Le questionnaire soumis aux enquêtés comportait des questions relatives aux gênes partielles dues aux bruits routiers (peu de détails sont donnés dans cet article sur le trafic routier, mais on comprend que les zones enquêtées sont soit traversées par des autoroutes, soit par des dessertes locales) et aérien, et aussi relative à la gêne totale. Selon Taylor, les résultats indiquent que la gêne totale est plus influencée par le niveau de pression sonore du bruit de la circulation routière que par celui du bruit aérien. Pour Taylor, la gêne totale pourrait être une moyenne pondérée des gênes partielles.

Les résultats observés par Bottom [Bot71] ont été confirmés récemment par 2 études. Une enquête Suisse [BL07] révèle que la gêne due au bruit aérien est réduite en présence de bruit de la circulation routière (aucun détail n'est donné sur le type de trafic routier) à niveau sonore modéré ou élevé, et que la gêne due au bruit de la circulation routière est réduite par la présence de bruit aérien, mais dans des proportions moindres. Ces résultats suggèrent que le bruit aérien est moins masquant que le bruit de la circulation routière. Puis Lim *et al.* [LKHL08] ont adopté une démarche similaire à celle de Bottom [Bot71] : constitution de 2 groupes d'enquêtés par rapport à la gêne due au bruit aérien, classifiés selon le niveau de bruit de fond (faible ou élevé) constitué principalement de bruit de la circulation routière (aucun détail n'est donné sur le type de trafic routier). Ils ont établi que la

gêne due au bruit aérien est significativement plus forte en présence de bruit de fond faible qu'en présence de bruit de fond élevé.

#### *b. Multi-exposition au bruit de la circulation routière et au bruit ferroviaire*

A la fin des années 80, Izumi [Izu88] a publié les résultats d'une recherche comparant résultats en laboratoire et résultats provenant d'une enquête *in situ*. Les résultats de l'enquête *in situ* et de l'expérience de laboratoire sont similaires. Izumi [Izu88] fait plusieurs observations : (1) pour des niveaux d'exposition faibles au bruit de la circulation routière (il s'agit d'un trafic autoroutier), la gêne totale semble être une moyenne des gênes partielles, et (2) la gêne due au bruit de la circulation routière est inhibée par la gêne due au bruit ferroviaire, surtout lorsque ce dernier est à un niveau d'exposition élevé.

En 1996, Ronnebaum *et al.* [RSW96] réanalysent les résultats d'une enquête *in situ* allemande effectuée au début des années 80. L'enquête portait sur 22 sites en Allemagne qui étaient catégorisés suivant la situation de dominance des bruits étudiés (dominance routière, ferroviaire ou pas de dominance). Les auteurs ne donnent pas de détail sur le type de trafic routier rencontré. Sur l'ensemble des données, Ronnebaum *et al.* [RSW96] remarquent l'existence d'un bonus ferroviaire d'environ 6 dB(A) (cf. définition en section 4.2.7). Pour les sites où l'une des deux sources domine, la gêne totale est comprise entre la gêne de la source dominante et la gêne de la source dominée. Si aucune des deux sources ne domine, et si (1) les deux sources de bruit ont des niveaux de pression sonore équivalents supérieurs à 53 dB(A), alors la gêne totale est inférieure aux gênes partielles, et si (2) les deux sources de bruit ont des niveaux de pression sonore équivalents inférieurs à 50 dB(A), alors la gêne totale est supérieure aux gênes partielles.

Une enquête nationale d'envergure a été menée à la fin des années 90 par l'INRETS en collaboration avec la SNCF [CCL03]. L'enquête a porté sur 61 sites répartis sur le territoire français avec des situations de dominance variées (dominance routière, ferroviaire ou pas de dominance). Les infrastructures routières étudiées ont des trafics compris entre 3000 et 80,000 véhicules par jour. Du point de vue de l'analyse des gênes partielles, Champelovier *et al.* [CCL03] rapportent que pour des niveaux sonores élevés, la gêne due au bruit de la circulation routière semble être inhibée par la présence de bruit ferroviaire (en accord avec Izumi [Izu88]), tandis que la gêne due au bruit ferroviaire est exacerbée par la présence de bruit de la circulation routière (peu de détails sont donnés sur le type de trafic routier). Ensuite, ces mêmes auteurs semblent confirmer l'existence d'un bonus ferroviaire, mais il serait dépendant de la période de la journée : 5 dB(A) le jour, 2 dB(A) en soirée, et jusqu'à 10 dB(A) la nuit.

Les résultats de l'étude suédoise menée par Öhrström *et al.* [OBAS+07] sont quelque peu différents. En effet, en étudiant les possibles effets d'interaction entre bruit routier (il s'agit de trafic autoroutier) et bruit ferroviaire, Öhrström *et al.* [OBAS+07] ont trouvé que les sources de bruit étudiées semblent « se contaminer » entre elles c'est-à-dire que leurs gênes partielles sont plus élevées en présence de l'autre bruit. Par ailleurs, Öhrström *et al.* [OBAS07] ne retrouvent pas le bonus ferroviaire pourtant souvent cité dans d'autres études. Au contraire, ces auteurs trouvent qu'au-delà de 50 dB(A) les individus ont plus de probabilité d'être gênés par le bruit ferroviaire que par le bruit de la circulation routière. Cela est peut être dû à la synergie entre la gêne sonore due au bruit ferroviaire et la gêne vibratoire provoquée par l'infrastructure ferroviaire.

Ota *et al.* [OYT07] ont communiqué en 2007 les résultats d'une enquête *in situ* japonaise impliquant le recueil de réponses de gêne due au bruit de la circulation routière (il s'agit d'un trafic autoroutier), du trafic ferroviaire conventionnel et du trafic du Shinkansen (équivalent du TGV au Japon). D'une manière générale, Ota *et al.* [OYT07] ne rapportent pas d'interaction entre le bruit de la circulation routière et le bruit ferroviaire et ne confirment

pas l'idée d'un bonus ferroviaire, mais soulignent l'importance du bruit de la circulation routière dans l'évaluation de la gêne totale, ce qui est confirmé par les analyses effectuées par Yokoshima *et al.* [YOT07] sur ces mêmes données.

En 2007, les résultats d'une autre enquête *in situ* sont présentés [LBGD+07]. Les auteurs confirment une inhibition de la gêne due au bruit ferroviaire par la présence de bruit de la circulation routière (il s'agit d'un trafic autoroutier). Ces résultats ne semblent pas en accord avec l'étude d'Izumi [Izu88]. La différence avec les résultats d'Izumi [Izu88] peut résider dans le fait que l'étude décrite par Lercher *et al.* [LBGD+07] présente, pour la plupart des enquêtés, des niveaux de bruit ferroviaire bien supérieurs aux différents niveaux de bruit de la circulation routière.

Enfin, Lam *et al.* [LCCA+09] ont publié les résultats d'une enquête *in situ* effectuée dans Hong Kong et ont mis en évidence, l'inhibition de la gêne du bruit de la circulation routière (aucun détail n'est donné sur le type de trafic routier) par la présence de bruit ferroviaire (en accord avec Izumi [Izu88]). La différence avec les résultats précédents peut s'expliquer par le fait que la quasi-totalité des enquêtés était en situation où le bruit de la circulation routière était présent à des niveaux supérieurs au bruit ferroviaire.

### *c. Autres situations de multi-exposition*

En 2000, Berglund et Nilsson [BN00] communiquent les résultats d'une enquête *in situ* pour laquelle les enquêtés devaient évaluer la gêne due à l'ensemble de la circulation routière, et la gêne de chaque type de véhicules routiers (deux-roues, véhicules légers, bus, et poids lourds). Malgré leur faible présence (7 % du trafic un soir dans la semaine, et moins de 1 % le reste de la semaine), les deux-roues sont reportés comme la source de bruit la plus gênante, mais la gêne totale reportée lui est inférieure, ce qui indique que les enquêtés ont donné un jugement de gêne global en tenant compte des sources qui provoquent une gêne importante, mais également en tenant compte des périodes plus calmes.

En 2008 Pedersen *et al.* [PBBB08] ont publié un rapport rendant compte d'une enquête *in situ* portant sur la gêne en situation de multi-exposition aux bruits de la circulation routière (trafics routiers de différentes importances – « busy road », « main road ») et provenant d'éoliennes. Ces auteurs se sont intéressés au cas où le bruit de la circulation routière est présent à des niveaux sonores modérés à forts, tandis que le bruit provenant d'éoliennes est présent à des niveaux plus faibles. L'hypothèse de départ de Pedersen *et al.* [PBBB08] est que le bruit de la circulation routière masquerait le bruit des éoliennes et diminuerait le risque de gêne due au bruit éolien, tandis que le bruit des éoliennes n'aurait aucun effet sur la gêne due au bruit de la circulation routière. Au final, les auteurs n'ont pas détecté d'effet de masquage du bruit éolien par le bruit de la circulation routière. Par contre, ils mettent en évidence que le fait d'être gêné par une source de bruit augmente le risque d'être gêné par l'autre source de bruit s'il est possible de l'entendre.

## **4.3.2.2. En laboratoire**

### *a. Multi-exposition au bruit de la circulation routière et au bruit aérien*

Powell et Rice [PR75] ont mené une expérience dans laquelle les sujets participaient à trois sessions. Durant chaque session, les sujets sont soumis à 9 bruits d'avion (variables en niveau sonore et en type). Pendant que les bruits d'avion sont diffusés, l'expérimentateur diffuse en continu un bruit de fond de circulation routière (aucun détail n'est donné sur le type de trafic). Le niveau du bruit de fond est différent pour chaque session. Plus le niveau de bruit de fond de circulation routière est élevé, plus la gêne due au bruit d'avion est diminuée. Powell et Rice [PR75] retrouvent donc en laboratoire, ce que Bottom [Bot71] avait établi plus tôt au travers d'une enquête *in situ*. Ces résultats sont également confirmés plus tard par Rice et Izumi [RI84] qui établissent que le bruit aérien tend à être moins gênant

lorsque le bruit de la circulation routière (aucun détail n'est donné sur le type de trafic routier) est à des niveaux plus élevés, seulement si on ne prend pas en compte les niveaux extrêmes d'exposition au bruit aérien. Dans une expérience au déroulement similaire, Powell [Pow79a] a montré que l'augmentation du bruit de fond routier (provenant de voies rapides) de 20 dB(A) équivalait en termes de gêne due au bruit aérien à une réduction d'environ 3 dB(A).

Vos [Vos92] a étudié également la combinaison de bruits routier (provenant d'un trafic routier important mais fluide) et aérien. En général Vos [Vos92] a trouvé que la gêne totale est supérieure aux gênes spécifiques, et a mis en évidence un effet de source dominante dans la mesure où la gêne totale bien que supérieure aux gênes spécifiques semble être déterminée par le bruit le plus gênant.

Berglund et Nilsson [BN01a] ont mené une série d'expériences portant sur la combinaison de bruits de transport. Les attributs auditifs jugés par les sujets au cours de leurs expériences étaient la sonie (sonie partielle, spécifique et totale). Concernant la combinaison entre les bruits routier (trafic routier en heure de pointe) et aérien, Berglund et Nilsson [BN01a] ont mis en évidence une asymétrie dans les capacités des bruits à se masquer entre eux. Plus précisément, dans leurs expériences, le bruit de la circulation routière a été trouvé plus masquant que le bruit aérien, confirmant les interprétations de Brink et Lercher [07]. Notons que le bruit de la circulation routière employé dans leurs expériences est de nature plus stable que le bruit aérien, dans la mesure où ce dernier varie beaucoup dans le temps.

#### *b. Multi-exposition au bruit de la circulation routière et au bruit ferroviaire*

Izumi [Izu88] a établi au cours de son expérience en laboratoire portant sur la combinaison du bruit routier (il s'agit d'un trafic autoroutier, considéré comme bruit de fond) et du bruit ferroviaire que lorsque le niveau de pression sonore du bruit de la circulation routière est faible, la gêne totale est comprise entre les gênes spécifiques. Par contre, lorsque le niveau de pression sonore du bruit de la circulation routière est moyen à fort, la gêne totale suit la gêne de la source la plus gênante, ce qui est un résultat classique, déjà observé pour d'autres types de combinaisons de bruits (par exemple [Vos92]).

Dans la même série d'expériences décrite auparavant, Berglund et Nilsson [BN01a] ont étudié la combinaison d'un bruit de la circulation routière (trafic routier en heure de pointe) avec un bruit ferroviaire. De même que pour la combinaison de bruit de la circulation routière et de bruit aérien, le bruit de la circulation routière a été trouvé plus masquant que le bruit ferroviaire.

Dans une approche différente utilisant notamment des verbalisations libres (cf. section 3.4), Raimbault *et al.* [RLCW04] ont étudié 9 combinaisons de bruit ferroviaire (passage de différents trains) et de bruit de la circulation routière (trafic autoroutier, trafic sur route nationale avec ou sans poids lourds). Il apparaît que les bruits de la circulation routière sont considérés comme une caractéristique spatiale de l'environnement, tandis que le train est identifié comme un objet sonore en mouvement. Si la gêne sonore n'est pas explicitement étudiée au travers des expériences décrites par Raimbault *et al.* [RLCW04], les auteurs soulignent que l'aspect temporel des séquences influe sur les évaluations.

En 2008, Ota *et al.* [OYT08] ont publié les résultats d'une étude en laboratoire complémentaire de l'enquête *in situ* alors menée en 2007 [OYT07]. Dans cette étude, ils ont établi que si la gêne totale approche la gêne spécifique du bruit le plus gênant, il existe des différences suivant quelle gêne spécifique est la plus forte. En effet, la gêne totale est approximativement égale à la gêne due au bruit de la circulation routière (aucun détail n'est donné sur le type de trafic routier) quand celle-ci est beaucoup plus forte que la gêne due au bruit ferroviaire. Par contre lorsque la gêne spécifique due au bruit ferroviaire est beaucoup

plus forte que celle due au bruit de la circulation routière, la gêne totale est inférieure à la gêne due au bruit ferroviaire. Enfin, lorsque les gênes spécifiques sont à peu près équivalentes, la gêne totale est légèrement supérieure à chacune d'elles.

### *c. Autres situations de multi-exposition*

Berglund *et al.* [BBGL81] ont mené une série d'expériences dans lesquelles ils ont combiné différents bruits urbains (bruit de la circulation routière – trafic urbain - avec bruit de marteau piqueur, bruit de la circulation routière avec bruits d'engin de chantier, bruit de marteau piqueur avec bruit d'engin de chantier). Ces auteurs ont mis en évidence ce qu'ils ont nommé l'hypoaddition (cf. section 4.2.5) pour l'ensemble des combinaisons étudiées.

Dans ses travaux, Vos [Vos92] a également étudié la gêne totale lorsqu'un bruit impulsionnel (coup de feu) est combiné au même bruit de circulation routière que décrit précédemment, puis lorsque ce même bruit impulsionnel est combiné à un bruit aérien, et enfin lorsque ces trois bruits sont combinés. Comme explicité dans la sous-section précédente, il apparaît que la gêne totale est généralement supérieure aux gênes spécifiques, surtout lorsque les bruits combinés sont à peu près aussi gênants. Lorsqu'un des bruits est beaucoup plus gênant, la gêne totale suit la gêne due à la source la plus gênante, en accord avec le principe de source dominante. Vos [Vos92] établit également à partir de ses travaux que lorsque trois bruits sont combinés, le bruit dont la gêne est la plus faible n'a que peu d'influence sur le jugement de gêne totale.

Dans une approche originale, Alayrac [Ala09] a étudié des combinaisons de bruits industriels permanents et stables à différents bruits résiduels caractéristiques d'environnements sonores (campagne, résidence, rue calme, chantier, et route). Pour différentes combinaisons (bruits industriels combinés au bruit résiduel de rue calme, de chantier et de route), des observations similaires à celles de Vos [Vos92] sont faites : la gêne totale est supérieure aux gênes spécifiques et tend vers la gêne due au bruit le plus gênant. Par contre, pour d'autres combinaisons impliquant un bruit industriel avec une composante spectrale en basses fréquences ou un bruit industriel dû à des chutes d'eau, la gêne totale est inférieure à la gêne due au bruit industriel et supérieure à la gêne due au bruit résiduel. Ce phénomène a été imputé respectivement aux effets de masquage entre les bruits combinés (effets dus à la composante spectrale en basses fréquences du bruit industriel) et au caractère naturel du bruit industriel dû à des chutes d'eau. Ce phénomène est même amplifié lorsque ce bruit industriel est en présence des bruits résiduels de résidence et de campagne. Enfin il est intéressant de noter que lorsque les bruits industriels sont combinés au bruit résiduel de campagne ou de résidence, la gêne totale se situe systématiquement entre les gênes spécifiques. Alayrac [Ala09] parle alors d'un effet « bonus » du bruit résiduel, dû à des effets cognitifs associés aux bruits de nature présents dans ces bruits résiduels.

En partant de ces mêmes bruits industriels permanents et stables, Morel *et al.* [MMVA12] ont étudié la combinaison de bruits à large bande avec des bruits au contenu important en basses fréquences, puis les mêmes bruits à large bande combinés à des bruits à composante spectrale principale à 100Hz. Morel *et al.* [MMVA12] ont observé des résultats similaires à ceux de Vos [Vos92], i.e. un effet de source dominante. Ils ont également mis en évidence une asymétrie dans les pouvoirs d'inhibition des bruits combinés. Les bruits à large bande sont plus inhibés par les bruits basses fréquences et les bruits à composante spectrale principale à 100Hz que ces derniers ne le sont par les bruits à large bande.

Dernièrement, Jeon *et al.* [JLY10] ont publié les résultats d'une expérience en laboratoire afin de les comparer avec les résultats d'une enquête *in situ* menée dans le but d'évaluer l'environnement sonore urbain lorsque le bruit de circulation routière (peu de fluctuation de niveau sonore et vitesse moyenne approximativement égale à 60km/h) et les bruits de chantier sont les sources de bruit principales. L'expérience de laboratoire étudie

donc la gêne totale lorsqu'un bruit de circulation routière est combiné à différents bruits de chantier (stationnaire, impulsif, intermittent ou fluctuant). Les résultats indiquent que la gêne totale est presque toujours supérieure ou égale à la gêne due au bruit le plus gênant pour des niveaux modérés de bruit routier (55dB(A)), et ce quel que soit le bruit de chantier auquel il est combiné. Par contre la gêne totale est plus faible que la gêne due au bruit le plus gênant pour des niveaux élevés de bruit routier (75dB(A)) et pour un bruit de chantier de niveau de pression sonore plus faible que celui du bruit de circulation routière. Toutefois, les auteurs n'expliquent pas ce phénomène [JLY10].

#### **4.4. Modélisation de la gêne en situation de multi-exposition sonore**

Parallèlement aux premières études menées sur la gêne en situation de multi-exposition sonore, certains auteurs se sont consacrés à la modélisation de la gêne totale. Nous classons ces modèles selon deux approches : une approche dite classique qui rassemble les modèles les plus utilisés et testés, et les autres approches qui se basent sur d'autres concepts.

##### **4.4.1. Modèles classiques de prédiction de la gêne totale**

Marquis-Favre *et al.* [MPA05] ont répertorié dans une synthèse récente neuf modèles prédictifs de la gêne totale. Selon Berglund et Nilsson [BN98b], ces modèles sont soit psychophysiques, soit perceptifs, c'est-à-dire qu'ils lient la gêne totale à des variables acoustiques (comme par exemple les niveaux de pression sonore) ou à des variables perceptives (comme par exemple des gênes partielles ou des gênes spécifiques). Ces mêmes auteurs critiquent ces modèles en disant qu'ils ne sont généralement que mathématiques (c'est-à-dire qu'ils ne sont élaborés que statistiquement d'après les données provenant d'enquêtes *in situ* ou d'expériences menées en laboratoire), et ne se basent pas ou peu sur les processus psychologiques aboutissant à la gêne totale (i.e. les mécanismes perceptifs et cognitifs).

Dans cette section, nous décrivons ces modèles et les discuterons en nous appuyant sur la bibliographie disponible.

Nous adopterons notamment les notations suivantes :

- $A_T$  est la gêne totale ;
- $A_i$  est la gêne spécifique du  $i^{\text{ème}}$  bruit de la combinaison ;
- $A_i'$  est la gêne partielle du  $i^{\text{ème}}$  bruit de la combinaison ;
- $L_T$  est le niveau de pression sonore total ;
- $L_i$  est le niveau de pression sonore du  $i^{\text{ème}}$  bruit de la combinaison.

##### **4.4.1.1. Le modèle de sommation énergétique**

Dans la littérature, ce modèle est appelé « energy summation model ». Il stipule que la gêne totale est une fonction du niveau de pression sonore total :

$$A_T = aL_T + b \quad (1.23)$$

Pour Taylor [Tay82] et Miedema [Mie04], la validité du modèle de sommation énergétique peut être mise en question parce qu'il fait l'hypothèse que les bruits combinés induisent la même gêne spécifique lorsqu'ils ont le même niveau de pression sonore.

Miedema [Mie85] propose de tester sur les modèles de gêne totale une condition limite simple : si toutes les sources de bruit sont « éteintes » sauf une, le modèle doit se ramener à la formulation de la gêne spécifique du bruit restant.



Prenons l'exemple de deux bruits combinés (bruit 1 et bruit 2). Si l'on éteint le bruit 2, l'équation (1.23) devient :

$$A_1 = aL_1 + b \quad (1.24)$$

Si l'on « éteint » le bruit 1, l'équation (1.23) devient :

$$A_2 = aL_2 + b \quad (1.25)$$

On voit que dans le cas général, on obtiendrait la même relation entre les gênes spécifiques et les niveaux de bruits spécifiques, ce qui est généralement faux.

Le fait que le modèle de sommation énergétique ne vérifie pas la condition limite explicitée plus haut est certainement une des raisons fortes qui permettent d'expliquer que dans bon nombre de cas, ses performances en termes de prédiction de la gêne totale laissent à désirer (par exemple [Tay82, RSW96, KKKN99]). Cependant Izumi [Izu88] a trouvé que si ce modèle affichait les moins bonnes performances, il ne peut néanmoins pas être rejeté étant donné que les autres modèles n'apportent pas d'amélioration significative. Morel *et al.* [MMVA12] ont fait des observations similaires.

Flindell [Fli82] a proposé en reprenant le principe de sommation énergétique un modèle basé sur un indice appelé le «  $L_{Aeq,T}$  pression » et noté  $pL_{Aeq,T}$ . Cet indice est défini comme suit :

$$pL_{Aeq,T} = 20 \log \left( \frac{1}{T} \int_0^T 10^{0,2L_A(t)} dt \right) \quad dB(A) \quad (1.26)$$

On le calcule sur chaque bruit composant la multi-exposition. Les indices relatifs à chaque bruit sont ensuite sommés selon un principe que Flindell appelle « psum », selon :

$$pL_{Aeq,T}, psum = 20 \log \left( \sum_{i=1}^n 10^{0,2pL_{Aeq,T}^i} \right) \quad dB(A) \quad (1.27)$$

Cet indice  $pL_{Aeq,T}, psum$  devient la métrique du bruit total, il doit être injecté dans l'équation (1.23), pour obtenir le modèle de Flindell.

Selon Flindell [Fli82], cet indice associé avec cette sommation énergétique est à même de prendre en compte les différences entre les bruits combinés en termes de gêne spécifique. De ce fait les données de Flindell [Fli82] montrent que l'indice  $pL_{Aeq,T}, psum$  est plus corrélé à la gêne totale que l'indice  $L_{Aeq,T}$ .

#### 4.4.1.2. Le modèle de source dominante

Dans la littérature, ce modèle est appelé « the strongest component model ». En toute rigueur, il devrait être traduit en français « le modèle de la source la plus gênante » et non modèle de source dominante (cf. section 4.2.6). Il stipule que la gêne totale est égale au maximum des gênes spécifiques ou partielles des bruits combinés :

$$A_T = \max_{i=1 \text{ à } n} (A_i \text{ ou } A_i') \quad (1.28)$$

Malgré sa simplicité, ce modèle prédit généralement bien la gêne totale, que ce soit pour une évaluation de la gêne totale *in situ*, ou en laboratoire. En outre, il respecte la condition limite de Miedema [Mie85].

*In situ* ce modèle offre souvent une bonne prédiction de la gêne totale (par exemple [RSW96, NYNS09, NYNH+10, PMMR+12]) comparé aux autres modèles testés. Malgré cela, ce modèle a tendance à surestimer la gêne totale ([RSW96, BV02]).

En laboratoire, ce modèle a également abouti à de bonnes prédictions de la gêne totale (par exemple [BBGL81]) en soulignant également un problème de surestimation de la gêne totale (exprimée en termes de sonie).

Cependant de nombreux auteurs ont fait émerger des critiques récurrentes sur ce modèle. Par exemple, selon Schulte-Fortkamp et Weber [SW97] et Miedema [Mie04], ce modèle ne peut être applicable que dans les situations où les gênes spécifiques sont clairement différentes. Morel *et al.* [MMVA12] ont également montré que ce modèle n'était pas adapté à des combinaisons de sources dont les pouvoirs d'inhibition sont très différents.

Pour Berglund et Nilsson [BN01a], s'il est appliqué avec les gênes partielles, cette tendance à la surestimation ne devrait plus exister. Toutefois, même dans ce cas, la gêne totale dévie de la gêne prédite par le modèle [BN01a].

#### 4.4.1.3. Le modèle des effets indépendants

Dans la littérature ce modèle est appelé « independent effects model ». Il stipule que la gêne totale est une fonction des niveaux de pression sonore de chaque bruit combiné :

$$A_T = a_1L_1 + a_2L_2 + \dots + a_nL_n + b \quad (1.29)$$

Taylor a introduit ce modèle [Tay82], en faisant l'hypothèse que les individus sont capables d'évaluer les bruits séparément et d'intégrer leurs évaluations sur la base d'un simple processus de sommation mentale. Si un bruit est clairement dominant, le modèle autorise que des variations de niveaux sonores des sources dominées puissent produire un changement dans la gêne totale. De même, le modèle des effets indépendants respecte la condition limite de Miedema [Mie85]. Un désavantage de ce modèle est qu'il ne présente pas de terme pouvant prendre en compte de possibles interactions entre les bruits combinés.

Si Taylor [Tay82] et Kaku *et al.* [KKKN99] ont montré que ce modèle fournit une bonne prédiction de la gêne totale, il est toutefois apparu en retrait dans d'autres études ([Vos92, RSW96, MMVA12]).

#### 4.4.1.4. Le modèle des différences énergétiques

Dans la littérature, ce modèle est appelé « energy difference model ». Il stipule que la gêne totale est fonction du niveau de bruit total, ainsi que de la différence absolue des niveaux de pression sonore des bruits combinés :

$$A_T = aL_T + b|L_1 - L_2| + c \quad (1.30)$$

Ce modèle proposé par Taylor [Tay82] est une modification du modèle de sommation énergétique. L'introduction de la différence absolue des niveaux sonores des bruits combinés est une manière simple de prendre en compte de possibles interactions entre les bruits combinés. Jusqu'à aujourd'hui, aucune généralisation de ce modèle n'a été proposée pour n bruits combinés.

D'un point de vue théorique, ce modèle ne respecte pas la condition limite de Miedema [Mie85]. D'un point de vue pratique, aucun consensus n'est trouvé lorsque ce modèle est testé. Pour Taylor [Tay82], il offre la meilleure qualité de prédiction. Pour Kaku *et al.* [KKKN99] et Ronnebaum *et al.* [RSW96], ce modèle est l'un des plus mauvais modèles prédictifs testés. Dans les travaux présentés par Morel *et al.* [MMVA12] le modèle des différences énergétiques n'apporte rien par rapport au modèle de sommation énergétique. Une constante de ce modèle est que le coefficient de régression affecté au terme

« d'interaction » est rarement significatif, ce qui signifie que par rapport au niveau de bruit total l'influence de la différence des niveaux sonores des bruits combinés est moindre sur la gêne totale. La formulation de ce modèle n'est pas adéquate pour prendre en compte des interactions éventuelles.

#### 4.4.1.5. Le modèle de sommation pondérée de Vos

Vos [Vos92] propose de relier la gêne totale à « l'indice de bruit global »  $L_t$  :

$$A_T = aL_t + b \quad (1.31)$$

Calculer l'indice de bruit global implique le calcul au préalable de pénalités subjectives dépendantes du niveau sonore, illustrant la différence entre l'évolution des gênes spécifiques des bruits combinés. Cela implique également de choisir un bruit de référence de niveau sonore  $L_{ref}$  et de gêne spécifique  $A_{ref}$ .

Dans le cas de deux bruits combinés, la démarche de calcul du  $L_t$  est décrite ci-dessous :

$$A_1 = a_1L_1 + b_1 \quad (1.32)$$

$$A_{ref} = a_{ref}L_{ref} + b_{ref} \quad (1.33)$$

La pénalité subjective dépendante du niveau sonore du bruit 1 par rapport au bruit de référence se calcule selon :

$$P_1 = \frac{b_1 - b_{ref} + (a_1 - a_{ref})L_1}{a_{ref}} \quad (1.34)$$

L'indice  $L_t$  est ensuite calculé sur la base d'une sommation énergétique du niveau du bruit de référence et du niveau « corrigé » de l'autre bruit :

$$L_t = k \cdot \log \left( 10^{\frac{L_{ref}}{k}} + 10^{\frac{L_1 + P_1}{k}} \right) \quad (1.35)$$

Le facteur  $k$  est à déterminer pour ajuster au mieux la relation exprimée par l'équation (1.31). Vos [Vos92] dans ses travaux a par exemple établi qu'une valeur  $k$  égale à 15 optimisait la prédiction.

Pour Vos [Vos92], étant donné, que la somme des niveaux de pression sonore des bruits combinés est effectuée après prise en compte de la (ou des) pénalité(s) subjective(s), le modèle de sommation pondérée représente une intégration mentale des jugements de gêne plutôt qu'une intégration mentale des niveaux sonores des bruits combinés.

Ce modèle ressemble au modèle de correction subjective (« subjectively corrected model ») proposé par Rice ([Ric75, RI84]) pour  $k$  égal à 10. Miedema a donné à ce modèle une base théorique en le généralisant (cf. [Mie96]), puis l'a nommé modèle des gênes équivalentes (« annoyance equivalents model ») [Mie04].

Pour Marquis-Favre *et al.* [MPA05], l'intérêt de ce modèle, est que par le calcul d'un indice commun pour exprimer la gêne, il est possible de ramener la gêne due à n'importe quel type de bruit à une gêne équivalente, et ainsi la combinaison et comparaison de n'importe quel type de bruits est possible. Pour Miedema [Mie04], le choix du bruit de référence n'est pas arbitraire.

Dans la pratique, ce modèle s'avère plutôt performant. Vos [Vos92] a établi qu'il prédisait mieux la gêne que le modèle des effets indépendants, et en général les résultats de la littérature lui donnent du crédit (par exemple [Sol96, KKKN99]) même si l'on peut trouver

des exemples où d'autres modèles de gêne totale lui sont supérieurs (par exemple [RSW96]).

Récemment Alayrac *et al.* [AMV11] ont réutilisé le principe de calcul de l'indice  $L_t$  pour proposer un indicateur de gêne pour des bruits ambiants composés de bruits industriels et de différents bruit résiduels.

Enfin notons que c'est ce principe (avec  $k=10$ ) qui est actuellement mis en avant au niveau de l'Union Européenne pour caractériser les situations de multi-exposition sonore [EEA10].

#### 4.4.1.6. Le modèle de sommation vectorielle

Dans la littérature, ce modèle est appelé « vector summation model ». Il spécifie que la gêne totale dérive d'une addition vectorielle des gênes spécifiques des bruits combinés.

$$A_T = \sqrt{(A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2\cos\alpha_{12})} \quad (1.36)$$

Ce modèle a été originellement proposé par Berglund *et al.* [BBL73] pour déterminer l'intensité perçue de l'odeur d'une mixture de composants odorants, et possède donc un background théorique en psychophysique.

Berglund *et al.* [BBGL81] l'ont proposé pour déterminer la gêne (ou sonie) totale due à une combinaison de bruits. Dans leur papier, l'angle  $\alpha_{12}$  optimise le modèle lorsqu'il vaut  $90^\circ$ , annulant ainsi le terme d'interaction [BBGL81]. Berglund et Nilsson [BN98a] ont trouvé que  $\alpha_{12}$  se situait aux alentours de  $90^\circ$  lorsque l'on prend en compte dans l'équation (1.36) les gênes partielles, et aux alentours de  $104^\circ$  lorsque l'on prend en compte les gênes spécifiques.

Un défaut de ce modèle qui est habituellement retrouvé dans la littérature est qu'il a tendance à surestimer la gêne totale, de manière générale (cf. [BBGL81, BV02, MMVA12]). Pour Berglund et Nilsson [BN98a], ce problème de surestimation générale de la gêne totale disparaît lorsque l'on prend en compte les gênes partielles, et non plus les gênes spécifiques dans l'équation (1.36).

En termes de qualité de prédiction, Ronnebaum *et al.* [RSW96] n'ont pas trouvé ce modèle supérieur aux autres.

#### 4.4.1.7. Le modèle mixte

Dans la littérature, il est appelé « mixed model ». Il a été récemment proposé par Morel *et al.* [MMVA10] et propose de relier la gêne totale aux niveaux de pression sonore des bruits combinés ainsi qu'à la valeur absolue de la différence de ces niveaux :

$$A_T = aL_1 + bL_2 + c|L_1 - L_2| + d \quad (1.37)$$

Selon Morel *et al.* [MMVA10], l'idée derrière ce modèle est que les personnes évaluent les bruits séparément, et intègrent leurs jugements sur la base d'une sommation mentale, en prenant en compte la dominance des bruits combinés. Notons que ce modèle respecte la condition limite de Miedema [Mie85].

Ce modèle a pour l'instant été peu testé mais à chaque fois, donnait les meilleurs résultats en termes de qualité de prédiction de la gêne totale ([MMVA10, MMVA12]).

Notons que si dans le modèle des différences énergétiques (cf. section 4.4.1.4) la différence absolue des niveaux sonores des bruits combinés n'a pas d'influence devant le niveau de pression sonore total, ce n'est pas le cas dans le modèle mixte ([MMVA10, MMVA12]). En effet, le coefficient de régression devant cette différence absolue devient

significatif. Ceci illustre que cette formulation permet de prendre en compte d'éventuelles interactions<sup>29</sup> entre les bruits combinés.

Notons enfin que ce modèle a également été proposé dans une version perceptive pour la prédiction de la gêne totale dans le cas d'une multi-exposition au bruit de la circulation routière et au bruit industriel, à partir des données d'une enquête *in situ* [PMMR+12]. La formulation est alors la suivante :

$$A_T = aA_1 + bA_2 + c|A_1 - A_2| + d \quad (1.38)$$

Le modèle mixte perceptif permettait une aussi bonne prédiction de la gêne totale que le modèle de source dominante [PMMR+10].

#### 4.4.1.8. Le modèle de réponse-sommation

Il est nommé dans la littérature « response-summation model ». Ce modèle a été proposé par Ollerhead ([Oll78, Oll80]), et propose de relier la gêne totale au niveau efficace  $L_{eff}$  :

$$A_T = aL_{eff} + b \quad (1.39)$$

Où  $L_{eff}$  s'exprime suivant :

$$L_{eff} = L_T + \sum_{i=1}^n D_i 10^{\frac{L_i - L_T}{10}} \quad (1.40)$$

Avec  $D_i$ , construit comme « l'incrément du niveau efficace » relatif au bruit  $i$  (un facteur de correction qui ajuste la réaction relative au bruit  $i$ ).

Notons que Ollerhead [Oll78] fait l'hypothèse que les bruits combinés suivent la même évolution en fonction du niveau sonore (la pente est la même) mais autorise des changements de magnitude de la gêne (par une variation de l'ordonnée à l'origine). La métrique  $L_{eff}$  est une modification du niveau sonore total, qui prend en compte le fait que deux bruits différents peuvent générer des gênes spécifiques différentes.

Dans la pratique, Le modèle de réponse-sommation n'a pas vraiment montré de bonnes qualités de prédiction, (par exemple [Pow79c, Tay82, RSW96]). Cependant, notons que Kaku *et al.* [KKKN99] dans le cadre de leurs travaux lui accordent du crédit. Cette disparité est peut être due à l'hypothèse même qui sous-tend la construction de ce modèle, à savoir que les pentes d'évolution des gênes spécifiques doivent être les mêmes pour les bruits combinés. Dans le cas général cette hypothèse n'est pas réalisée, mais il est possible que dans le cas où elle l'est, le modèle de réponse-sommation permette une bonne prédiction de la gêne totale.

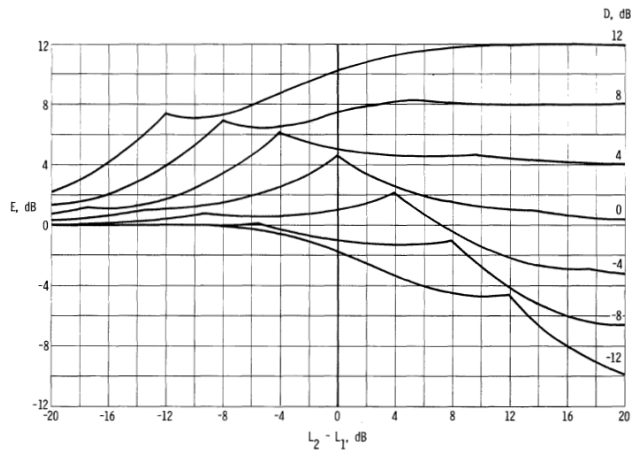
#### 4.4.1.9. Le modèle de sommation inhibition

On le trouve dans la littérature sous la dénomination « summation and inhibition model ». Ce modèle a été proposé par Powell [Pow79c] et stipule que la gêne totale est une fonction du niveau de pression sonore total auquel on ajoute un facteur de correction  $E$ , prenant en compte les phénomènes d'inhibition entre les bruits combinés :

$$A_T = a(L_T + E) + b \quad (1.41)$$

Les valeurs de  $E$  sont déterminées à partir d'un abaque construit par Powell [Pow79c], qui est présenté dans la Figure 1.7 :

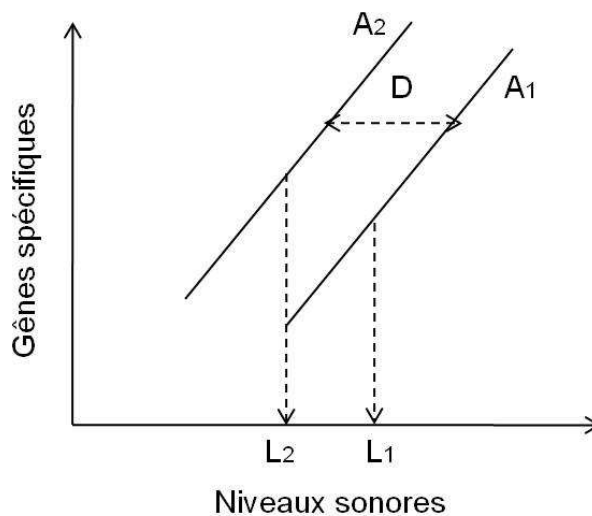
<sup>29</sup> Interactions qui peuvent être mises en évidence expérimentalement en faisant varier les niveaux sonores des bruits combinés.



**Figure 1.7 : Abaque permettant d'accéder aux valeurs du facteur de correction E [Pow79c].**

Notons que Powell émet deux hypothèses qui limitent la portée de son modèle : (1) les pentes d'évolution des gênes spécifiques en fonction du niveau sonore sont les mêmes pour les bruits combinés, et (2) les bruits combinés doivent avoir des propriétés d'inhibition de la gêne similaires entre eux.

Sur la Figure 1.7 on voit que E est fonction de la différence  $L_2 - L_1$  entre les niveaux sonores du bruit 2 (le bruit qui est le plus gênant), et le bruit 1 (le bruit qui est le moins gênant), et de D, qui est l'incrément nécessaire (en dB) pour que le bruit 1 soit aussi gênant que le bruit 2. Ceci est illustré sur la Figure 1.8.



**Figure 1.8 : Graphique illustrant la démarche de Powell [Pow79c].**

Malgré ces hypothèses restrictives, le modèle de sommation-inhibition est intéressant dans sa construction pour plusieurs aspects. En effet le premier avantage est qu'il prend en compte les phénomènes d'inhibition qui sont modélisés en reprenant les équations de Stevens [Ste66]<sup>30</sup>.

Concrètement si on considère un bruit cible, la gêne due au bruit cible tel qu'il est entendu en présence d'un autre bruit (dit inhibant) sera inférieure à la gêne spécifique du bruit cible. Les équations de Stevens [Ste66] que Powell utilise pour son modèle [Pow79c] modélisent la gêne du bruit cible tel qu'il est entendu en présence du bruit inhibant, en d'autres termes, elles modélisent la gêne partielle. Ces gênes partielles s'expriment selon [Pow79c, BN97] :

<sup>30</sup> [Ste66], STEVENS S.S. Power-group transformations under glare, masking, and recruitment. Journal of the Acoustical Society of America, 1966, vol. 39, n°4, pp. 725-735. Cité dans [Pow79c] p. 3.

$$A_d' = \left(\frac{1}{c}\right)^b \left(\frac{A_d}{A_s}\right)^b A_d \quad (1.42)$$

$$A_s' = \left(\frac{1}{c}\right)^b \left(\frac{A_s}{A_d}\right)^a A_s \quad (1.43)$$

Où  $A_d = \max(A_1, A_2)$  et  $A_s = \min(A_1, A_2)$ , et a, b, c sont des constantes à déterminer.

Enfin la dernière hypothèse de Powell [Pow79c] est que la gêne totale est égale à la somme arithmétique des gênes partielles, soit :

$$A_T = A_d' + A_s' \quad (1.44)$$

Notons que les courbes de l'abaque sont déterminées à partir des équations (1.42) et (1.43). Ainsi, les équations (1.42), (1.43), (1.44) d'une part, et l'équation (1.41) d'autre part, représentent deux formulations alternatives du modèle de Powell [Pow79c].

Notons également que Powell dans ses travaux, n'a jamais testé l'hypothèse selon laquelle la gêne totale est égale à la somme arithmétique des gênes partielles. Berglund et Nilsson [BN01a] ont testé cette hypothèse sur leurs données, et ont trouvé que la gêne totale (exprimée comme « total loudness ») différait très clairement de la somme arithmétique des gênes partielles.

Dans la pratique, les résultats, quant au test du modèle de sommation-inhibition, sont assez dispersés. Taylor [Tay82] lui a trouvé une faible qualité de prédiction, tandis que d'autres ont montré que ses performances sont plus qu'honorables (par exemple [RSW96, Pow79c, BBGL81, Fli82]).

#### 4.4.1.10. Le modèle de régression linéaire

Ce modèle, initialement proposé par Berglund et Nilsson [BN00] à partir de données provenant d'une enquête *in situ*, relie la gêne totale à la somme pondérée des gênes partielles<sup>31</sup>, selon :

$$A_T = a_1 A_1' + a_2 A_2' + \dots + a_n A_n' + b \quad (1.45)$$

Dans l'étude de Berglund et Nilsson [BN00], différentes sources de bruit routier sont prises en compte. Les pondérations illustrent pour ces auteurs le temps de présence du bruit correspondant à la source visée dans l'environnement sonore global. Botteldooren et Verkeyn [BN02] ont trouvé que ce modèle prédit la gêne totale de manière moins précise que le modèle de source dominante, mais mieux que le modèle de sommation vectorielle. Pierrette *et al.* [PMMR+12] à partir de données d'enquête *in situ* ont également trouvé que ce modèle prédit moins bien la gêne totale que le modèle de source dominante et le modèle mixte.

#### 4.4.1.11. Le modèle perceptif généralisé

Ce modèle a été proposé par Berglund et Nilsson [BN01a]. Il définit la gêne totale comme suit :

$$A_T = (A_1'^n + A_2'^n)^{1/n} \quad (1.46)$$

En réalité pour différentes valeurs de n, on retrouve d'autres modèles classiques présentés dans les précédentes sous-sections. Par exemple pour n=1 on retrouve le principe d'une sommation arithmétique des gênes partielles, i.e. le modèle de Powell (cf. section

<sup>31</sup> On peut également l'envisager avec les gênes spécifiques.

4.4.1.9), et dans le cas extrême où  $n$  tend vers  $\infty$ , on retrouve le modèle de source dominante (cf. section 4.4.1.2). Dans le cas où  $n=2$ , on se retrouve dans le cas d'une sommation euclidienne des gènes partielles [BN01a]. On retrouve alors le modèle de sommation vectorielle lorsque l'angle  $\alpha_{12}$  est égal à  $90^\circ$  (cf. section 4.4.1.6 par une application aux gènes partielles).

Berglund et Nilsson [BN01a] ont montré que ce modèle généralisé fournit une prédiction optimale pour des valeurs de  $n$  aux alentours de 2.5. En considérant dans l'équation (1.46) les gènes spécifiques et non plus les gènes partielles, une prédiction optimale est obtenue lorsque  $n$  est environ égal à 4.1.

A notre connaissance, ce modèle n'a pas été testé lors d'autres travaux.

## 4.4.2. D'autres approches

### 4.4.2.1. L'introduction de la logique floue

Botteldooren et Verkeyn [BV02] ont proposé d'introduire la logique floue, comme d'autres auteurs l'ont fait (cf. review de Marquis-Favre *et al.* [MPA05]). Botteldooren et Verkeyn l'utilisent pour modéliser la gène totale, car (1) la logique floue fournit les bases mathématiques pour imiter le comportement humain et (2) un jugement de gène est typiquement un exemple pouvant être modélisé en introduisant la logique floue d'un point de vue cognitif [BV02].

Botteldooren et Verkeyn ont montré qu'en introduisant la logique floue dans le modèle de source dominante, on surestime moins souvent la gène totale que le modèle de source dominante classique, et notamment pour les plus faibles niveaux de gène [BV02].

### 4.4.2.2. Approche multi-composante de la gène

L'approche de Preis [Pre96] est basée sur la distinction entre environnement sonore naturel, compris comme un environnement sonore dans lequel un auditeur peut se concentrer sur un son particulier à sa convenance, et un environnement sonore perturbé (« distorted »), compris comme un environnement sonore où l'auditeur focalise son attention sur un bruit perturbant l'environnement sonore naturel [Pre96].

Précisément, selon Preis, c'est dans un environnement sonore perturbé qu'apparaît la gène [Pre96]. Elle propose alors de séparer le bruit (qui retient l'attention) du bruit de fond. La gène est alors vue par Preis [Pre96] comme une combinaison linéaire de trois termes : (1) l'« annoying loudness » qui est la moyenne temporelle de la différence entre la sonie du bruit et la sonie du bruit de fond, rapportée à la sonie du bruit de fond, (2) l'« intrusiveness » qui est la moyenne temporelle de la différence de l'acuité du bruit et de l'acuité du bruit de fond, rapportée à l'acuité du bruit de fond, et (3) La « Distortion of informational content » qui est le rapport de la durée de l'ensemble des distorsions sur la durée de mesure totale.

A notre connaissance, cette approche n'a pas fait l'objet de confrontation expérimentale.

### 4.4.2.3. Le modèle d'évènements remarquables

Le modèle d'évènements remarquables (« the notice-events model ») a été proposé par De Coensel *et al.* [CBMB+09]. Ce modèle s'inscrit dans une approche *ab initio*, qui consiste à partir de lois gouvernant le comportement de constituants de base à modéliser un système complexe.

L'hypothèse de De Coensel *et al.* est que la perception de l'environnement sonore est déterminée par les évènements sonores remarquables. Un évènement remarquable dans ce cadre est alors un évènement remarqué de manière consciente pendant un certain temps. L'occurrence d'un évènement remarquable dépend de plusieurs paramètres, comme par exemple le niveau sonore de l'évènement par rapport au niveau sonore du bruit de fond, le



contexte environnemental de l'auditeur, son activité, ainsi qu'un ensemble de facteurs personnels, comme l'habitation [CBMB+09].

Dans leur modèle, De Coensel *et al.* proposent un ensemble de formulations mathématiques afin de modéliser un individu sur la base de principes acoustiques, psychoacoustiques, et psychologiques [CBMB+09]. En sortie du modèle, on obtient l'indice  $SEL_{thr}$ , appelé « niveau d'exposition sonore remarqué ».

Le modèle a été testé sur une population synthétique (c'est-à-dire simulée) en créant des scénarios sonores (d'exposition au bruit routier et au bruit ferroviaire) censés correspondre à la réalité. Les résultats de leur simulation sont très proches de résultats provenant d'enquêtes *in situ* [CBMB+09].

Comme perspectives, De Coensel *et al.* envisagent d'ajouter dans ce modèle des formulations permettant de prendre en compte d'autres aspects cognitifs et émotionnels liés au comportement humain. A l'heure actuelle, ce modèle n'a pas été testé sur des données autres que simulées [CBMB+09].

## 5. Résumé et conséquences méthodologiques

Ce chapitre a permis une revue des différentes composantes liées à la problématique dans laquelle nous nous inscrivons. Plus précisément, la section 1 a expliqué le phénomène sonore d'un point de vue purement physique. Un tel phénomène sonore est ensuite interprété comme un bruit suivant la perception que l'auditeur en a, notamment par l'image que lui renvoie la source émettrice et le sens que l'individu lui attribue. Nous avons également récapitulé les indices les plus couramment employés pour décrire les bruits de l'environnement.

La section 2 s'est intéressée plus particulièrement au bruit provenant de la circulation routière et au bruit industriel. Concernant les bruits industriels, nous disposons de résultats de travaux récents portant sur les bruits industriels permanents et stables. Ces travaux ont notamment fait émerger des catégories perceptives de bruits industriels qui ont fait l'objet d'une caractérisation physique et perceptive notamment par la proposition d'indices spécifiques. Ces résultats constituent une base pour les travaux à mener dans le cadre de cette thèse. Concernant les bruits de la circulation routière, nous avons mis en évidence la diversité des sources (type de véhicules et type de sources acoustiques des véhicules) qui résulte en des bruits de composition spectrale et de structure temporelle variée. Notamment en milieu urbain, nous avons vu que le bruit du groupe moto-propulseur était généralement dominant. Les indices spécifiques du bruit routier ont été également passés en revue. Ils sont essentiellement basés sur des indices énergétiques dont les limites ont été soulevées en section 1.

La section 3 est consacrée au concept complexe et multi-facettes de gêne sonore, que nous avons défini en nous appuyant sur la littérature disponible. Nous avons notamment distingué gêne à court-terme et gêne à long-terme qui sont respectivement étudiées en laboratoire ou au moyen d'enquêtes *in situ*, et montré en nous focalisant sur la gêne due au bruit de la circulation routière et la gêne due au bruit industriel, que de tels moyens d'études sont complémentaires et permettent d'accéder à des aspects différents de la gêne sonore (facteurs acoustiques et non-acoustiques). Au niveau des procédures employées pour étudier la gêne sonore en laboratoire, un panel de méthodes héritées de la psychophysique a été rappelé. Ces méthodes s'avèrent très utiles et efficaces, notamment lorsqu'il s'agit de trouver des tendances principales. A ces méthodes classiques nous avons montré qu'il serait

profitable en amont d'associer une approche cognitive de développement récent, afin de développer de nouveaux indices et indicateurs impliquant des caractéristiques et attributs pertinents du point de vue de l'individu.

Enfin, la section 4 a été consacrée à l'étude de la gêne sonore en situation de multi-exposition. Des phénomènes complexes ont été mis en évidence à travers de précédentes études *in situ* ou en laboratoire. Jusqu'à lors, aucune des nombreuses propositions de modélisation de la gêne totale en situation de multi-exposition ne fait consensus au sein de la communauté scientifique. Il conviendra donc de produire des données qui nous permettront de proposer de nouveaux modèles ou d'améliorer l'existant de manière à prendre en compte les phénomènes complexes mis en évidence.

Dans l'objectif de contribuer à l'amélioration des cartes de bruit par la proposition d'indicateurs pertinents du point de vue de l'individu, pour rendre compte de la gêne due à l'exposition au bruit de la circulation routière, puis à une multi-exposition au bruit de la circulation routière et au bruit industriel, nous proposons à travers ces travaux de thèse d'adopter une démarche en trois étapes principales. Cette démarche est synthétisée en Figure 1.9.

Dans une **première étape** nous réaliserons une caractérisation physique et perceptive des bruits de la circulation routière afin de proposer des indices et des indicateurs de gêne sonore caractéristiques du bruit de la circulation routière qui soient plus pertinents du point de vue de l'individu que les indices actuellement employés. Au préalable, nous devons savoir quels bruits de la circulation routière nous allons caractériser, et nous constituer un matériel sonore de qualité par des enregistrements *in situ* afin de mener nos travaux en laboratoire. Ces points sont abordés au **Chapitre 2**. Une fois ce matériel sonore constitué, nous nous proposons d'utiliser les apports d'une récente approche cognitive, utilisant une procédure de catégorisation libre et verbalisation libre, afin de proposer une typologie perceptive et cognitive de bruits de la circulation routière. De cette manière chaque catégorie pertinente du point de vue de l'individu sera ensuite caractérisée par des indices plus adaptés à rendre compte de la gêne ressentie. Pour cela, pour chaque catégorie perceptive et cognitive, la gêne sera évaluée en conditions imaginaires en laboratoire, en utilisant une procédure expérimentale (recueil de réponses de gêne au moyen d'une échelle numérique continue avec présentation par stimulus unique) déjà éprouvée par son efficacité dans de précédents travaux. Nous étudierons un ensemble de facteurs influents sur la gêne sonore à court-terme en utilisant les recommandations de la norme ISO 15666 [ISO03] pour la formulation de questions relatives au recueil de réponses de gênes. Cela fait l'objet du **Chapitre 3**.

Dans une **deuxième étape**, nous nous proposons de réaliser une caractérisation physique et perceptive des situations de multi-exposition sonore au bruit de la circulation routière et au bruit industriel. Pour ce faire, nous combinerons des bruits de chaque catégorie de la typologie perceptive et cognitive proposée en étape 1 à un bruit industriel permanent et stable auparavant enregistré *in situ* (cf. Chapitre 2). L'évaluation de la gêne sera menée en conditions imaginaires en laboratoire en adaptant le protocole utilisé en étape 1 et en respectant les spécificités méthodologiques liées à l'étude de la multi-exposition sonore, rappelés dans ce chapitre. Les objectifs de cette deuxième étape sont multiples. Nous veillerons notamment à mettre en évidence les phénomènes soulignés dans l'étude bibliographique et évaluer leur importance dans les jugements de gênes recueillies. Puis nous testerons sur ces mêmes données les modèles prédictifs de la gêne totale résumés dans ce chapitre, afin de voir si un ou plusieurs modèles se dégagent au fil des expérimentations menées pour chaque catégorie. Cela fera l'objet du **Chapitre 4**.

Dans une **troisième étape**, nous confronterons le ou les modèles de gêne totale, mis en avant à l'issue de l'étape 2, aux données récoltées par une expérience en environnement

simulé d'une part et aux données d'une enquête *in situ* d'autre part. L'objectif de la première confrontation est de proposer une expérimentation aux conditions moins abstraites que les expérimentations menées dans la deuxième étape<sup>32</sup>. Nous devons pour ce faire reconstituer des séquences d'environnement sonore de longue durée, constituées de bruit de la circulation routière (séquences reconstituées à partir des enregistrements *in situ* effectués dans la première étape) et de bruit industriel (séquence longue reconstituée à partir des enregistrements *in situ* effectués dans la première étape). L'objectif de la deuxième confrontation est de tester les modèles mis en avant en laboratoire à des données récoltées en contexte réel au moyen d'une enquête *in situ*. L'enquête a été réalisée dans le cadre d'un projet de recherche financé par l'AFSSET (cf. [MV09]) et analysée sous l'angle de la multi-exposition dans le cadre d'un projet de recherche PREDIT financé par l'ADEME (contrat n°0866C0066) [EEO10, PMMR+12]. Les résultats de cette enquête, présentés dans les références citées ci-dessus, sont résumés dans l'ANNEXE A de ce document. Cette dernière étape fait l'objet du **Chapitre 5**.

---

<sup>32</sup> Pour une présentation synthétique ultérieure, le terme « en laboratoire » désignera l'évaluation de la gêne par des sujets placés en contexte imaginaire et dans l'écoute. Le terme « en environnement simulé » désignera l'évaluation de la gêne par des sujets en contexte imaginaire dans un environnement simulé et sans être placés dans l'écoute.

<p><b>Etape 1</b>  <i>Caractérisation physique et perceptive des bruits de la circulation routière</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Enregistrements <i>in situ</i> de bruits de la circulation routière</li> <li>- Catégorisation libre avec verbalisation libre et comparaison par paires</li> <li>▶ <b>Typologie perceptive et cognitive de bruits de passage de véhicules routiers</b></li> <li>- Evaluation de la gêne due aux catégories de bruits de passage en conditions imaginaires en laboratoire</li> <li>▶ <b>Indicateurs caractéristiques de la gêne due aux bruits de chaque catégorie perceptive</b></li> </ul>	<p>Chapitre 2</p> <p>Chapitre 3</p>
<p><b>Etape 2</b>  <i>Caractérisation physique et perceptive des situations de multi-expositions aux bruits de la circulation routière et au bruit industriel</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Enregistrements <i>in situ</i> de bruit industriel</li> <li>- Evaluation de la gêne due à la multi-exposition aux catégories de bruits de passage et au bruit industriel, en conditions imaginaires en laboratoire</li> <li>▶ <b>Modèles de gêne totale</b></li> </ul>	<p>Chapitre 2</p> <p>Chapitre 4</p>
<p><b>Etape 3</b>  <i>Confrontation des résultats de l'étape 2 aux données d'une expérience en environnement simulé et aux données d'une enquête <i>in situ</i></i></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Evaluation de la gêne due à la multi-exposition au bruit de la circulation routière et au bruit industriel, en conditions imaginaires en environnement simulé</li> <li>▶ <b>Modèles de gêne totale</b></li> <li>▶ <b>Modèles prédictifs de la gêne totale en laboratoire et en environnement simulé vs. données de l'enquête <i>in situ</i></b></li> </ul>	<p>Chapitre 5</p>

Figure 1.9 : Schéma synthétique de la démarche adoptée.



## **Chapitre 2 : Constitution du matériel sonore : enregistrements in situ de bruits de la circulation routière et de bruit industriel**

*Ce deuxième chapitre présente la manière dont nous avons constitué notre matériel sonore pour mener à bien les différentes expérimentations prévues.*

*La section 1 examine les différents facteurs influençant l'émission et la propagation des bruits de la circulation routière, qui sont pris en compte dans les modèles sur lesquels sont basées les cartes de bruit. Cet examen aboutit en la proposition d'une typologie physique a priori de bruits de la circulation routière.*

*La section 2 rappelle succinctement les mécanismes de localisation de sources sonores dans l'espace. L'identification de ces mécanismes servira à définir des critères pour le choix d'une technique de prise de son.*

*La section 3 présente les différentes techniques de prise de son usuellement employées dans notre domaine, et aboutit au choix de la technique de prise de son de temps et d'intensité avec le système ORTF.*

*La section 4 donne les protocoles d'enregistrement in situ définis pour les bruits de la circulation routière d'une part, et le bruit industriel d'autre part.*

*Enfin la section 5 synthétise les points essentiels de ce chapitre.*

# 1. Proposition d'une typologie physique *a priori* de bruit de la circulation routière

La directive Européenne 2002/49/CE [PECE02] préconise d'employer la méthode Française NMPB-96 pour calculer les émissions acoustiques dues au trafic routier. Le nouveau Guide du Bruit [SETRA09a, SETRA09b] liste l'ensemble des éléments à même d'influencer l'émission acoustique d'un trafic routier, ainsi que les éléments influençant sa propagation jusqu'à un récepteur. C'est à partir de ces éléments que nous nous proposons de construire une typologie physique de bruits routiers en milieu urbain.

## 1.1. Eléments influençant l'émission et la propagation du bruit de la circulation routière

Le Tableau 2.1 résume l'ensemble des éléments influençant l'émission et la propagation du bruit de la circulation routière. Il est réalisé à partir du Nouveau Guide du Bruit [SETRA09a, SETRA09b].

Facteurs influençant l'émission	Facteurs influençant la propagation
<ul style="list-style-type: none"><li>- Type de véhicules ;</li><li>- Débit moyen horaire pour chaque type de véhicules ;</li><li>- Vitesse et allure représentative de chaque type de véhicules ;</li><li>- Catégorie de revêtement de chaussée ;</li><li>- Déclivité de la route.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Conditions météorologiques ;</li><li>- Topographie (nature du sol, présence de bâtiments, etc.)</li></ul>

**Tableau 2.1 : Facteurs influençant l'émission et la propagation du bruit de la circulation routière [SETRA09a, SETRA09b].**

Le nouveau Guide du Bruit fournit les lois permettant de quantifier les effets de ces différents facteurs. Pour plus de détails à ce propos, le lecteur peut se référer à [SETRA09a, SETRA09b].

Pour rappel nous nous plaçons en milieu urbain où (1) les vitesses des véhicules sont réduites et généralement limitées (à 50km/h ou 30km/h en fonction des zones), (2) les distances entre source et récepteur (en façade des bâtiments par exemple) sont réduites, et (3) le bruit du groupe moto-propulseur domine généralement le bruit du contact pneumatique/chaussée (cf. Chapitre 1 ).

Dès lors certains de ces éléments peuvent être **négligés**. Il s'agit par exemple des **conditions météorologiques**, lesquelles, dès lors que la distance source-récepteur est inférieure à 100m, n'ont que peu d'influence [AFNOR02]. Pour simplifier et en envisageant un revêtement de sol urbain généralement réfléchissant entre source et récepteur, nous considérerons que la **nature du sol** est homogène en zone urbaine et que par conséquent son influence sur la propagation n'est pas discriminatoire. Etant donné que la **catégorie du revêtement de chaussée** influe sur le bruit de contact pneumatique/chaussée (cf. Chapitre 1 ), cet élément peut également être négligé, puisque le bruit du groupe moto-propulseur est considéré dominant par rapport au bruit du contact pneumatique/chaussée. La **déclivité de la route** soit influe sur la vitesse des véhicules, soit modifie le niveau de bruit émis par le groupe moto-propulseur [SETRA09a], donc ce paramètre sera pris en compte au travers du bruit du groupe moto-propulseur dominant en zone urbaine à des vitesses limitées. Enfin sur le terrain, il est difficile d'avoir la connaissance **de certains types de véhicules**. En effet, les

comptages automatiques classiquement utilisés ne permettent pas une identification des deux-roues par rapport aux véhicules légers ou des bus et autocars par rapport aux poids lourds.

Les éléments restants (types de véhicules, présence de bâtiments, type d'allures) sont examinés plus précisément dans les sections suivantes.

### 1.1.1. Type de véhicules

Pour rappel, nous avons défini 4 types de véhicules au Chapitre 1 :

- Les véhicules légers ;
- Les poids lourds ;
- Les deux-roues motorisés ;
- Les bus et autocars.

Nous avons vu également que ces types de véhicules peuvent être subdivisés en sous-catégories de véhicules suivant un ensemble de paramètres tels que le type de motorisation, le nombre d'essieux, la cylindrée, etc. Ces paramètres peuvent effectivement influencer l'émission acoustique.

Du point de vue de la perception sonore, à notre connaissance, peu de travaux font état de discrimination entre sous-catégories de types de véhicules. Nous pouvons citer l'étude de Gulbol *et al.* [GVK03a] qui ont montré que différents véhicules légers (de la voiture compacte au minivan en passant par la berline de luxe) de cylindrée et de motorisation différente (« essence » ou « diesel ») sont perçus différemment par les auditeurs d'un test d'écoute. En effet, les véhicules « diesels » sont jugés plus forts/gênants que les véhicules à essence. Ces jugements apparaissent également dépendants de l'allure du véhicule (vitesse constante, accélération ou décélération). Notons tout de même que les enregistrements qui ont servi à la réalisation de ce test d'écoute ont été réalisés en conditions contrôlées (sur une piste d'essai, en champ libre), et donc les caractéristiques des véhicules étaient connues *a priori*. *In situ*, il apparaît difficile de pouvoir contrôler de telles caractéristiques et de discriminer les véhicules d'un même type selon ces critères.

Enfin si des expériences de ce type ont été menées pour les véhicules légers, nous n'avons pas connaissance de telles expériences pour les autres types de véhicules. Nous faisons donc le choix pour les raisons évoquées ci-dessus de conserver ce critère (type de véhicule) avec le niveau de détail (véhicules légers, poids lourds, deux-roues motorisés, bus et autocars) tel que donné ici.

### 1.1.2. Présence de bâtiments

La présence de bâtiments détermine la nature du tissu urbain et le type morphologique des rues<sup>33</sup> dans lesquelles circulent les véhicules. La norme NF S 31-130 [AFNOR08] distingue deux types de morphologies : (1) rues en « U », et (2) rues en tissu ouvert.

Les rues en « U » sont considérées comme un ensemble constitué par une infrastructure de transport et des bâtiments disposés de part et d'autres de façon quasi-continue et de hauteurs homogènes répondant aux critères suivants [AFNOR08] :

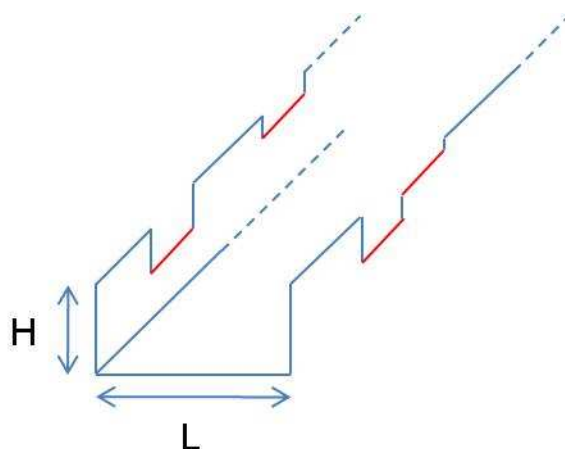
- Hauteur (H) des bâtiments supérieure à 5m de chaque côté de l'infrastructure ;

---

<sup>33</sup> La rue réunit la voie de circulation et ce qui l'entoure, c'est-à-dire ses abords et la première rangée de façade qui la borde [CETUR81].



- Le profil minimal d'une rue en « U » doit afficher un rapport d'au moins 0.3 entre la hauteur moyenne des façades de chaque côté et la largeur entre façades sur un arc<sup>34</sup> ;
- La longueur des discontinuités (en rouge sur la Figure 2.1) entre façades doit être inférieure ou égale à 20% de la longueur totale de l'arc. Les discontinuités doivent être réparties le long de l'arc (pour chaque côté de l'infrastructure).



**Figure 2.1 : Profil d'une rue en « U ».**

Une rue en « U » ressemble alors à un espace acoustiquement semi-fermé dans lequel par le biais de réflexions multiples sur les façades en vis-à-vis s'établit un champ acoustique proche d'un champ diffus<sup>35</sup>. Elles sont plus fréquemment rencontrées dans les centres urbains et plus rarement en périphérie.

Les rues en tissu ouvert sont définies par opposition aux rues en « U ». C'est principalement le cas des zones non-bâties, de certaines zones pavillonnaires, ou des zones bordées de bâtiments de part et d'autre de l'infrastructure routière, mais ne remplissant pas les conditions de la rue en « U » [AFNOR08]. Suivant les cas, le champ acoustique s'établissant en tissu ouvert peut se rapprocher d'un champ libre<sup>36</sup>.

Notons que dans les premières versions de la norme NF S 31-130 [AFNOR08], on faisait apparaître un troisième type de morphologie : les rues en « L » (avec des bâtiments d'un seul côté de l'infrastructure routière). Cette notion de rue en « L » se justifiait uniquement par des considérations pratiques et ne correspondait pas à l'existence d'un champ acoustique particulier [CERTU98]. Elle a donc été abandonnée.

Le type de morphologies a une influence sur les niveaux de bruit émis par les véhicules constituant le trafic. La Figure 2.2 présente la différence de niveau sonore entre une rue en « U » et une rue en tissu ouvert de même largeur. Plus la rue est étroite, plus cette différence de niveau sonore est élevée.

Du point de vue de la perception sonore, peu de travaux à notre connaissance étudient l'influence du type de morphologies. Nous pouvons citer à ce titre les travaux en laboratoire de Gulbol *et al.* [GKV03b] qui, à partir d'enregistrements *in situ* de bruits de passage de véhicules légers dans trois rues aux morphologies différentes (rue en « L » assimilée à une rue en tissu ouvert, rue en « U » large, rue en « U » étroite), ont montré que le bruit est perçu plus intense/gênant lorsque la rue est étroite. Citons également la typologie morphologique

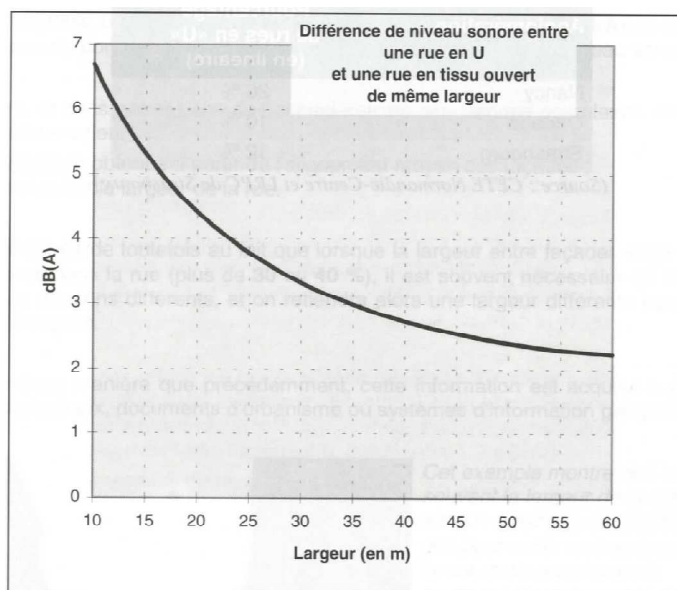
<sup>34</sup> Un arc est défini comme une portion de rue entre deux intersections.

<sup>35</sup> Les ondes acoustiques d'un champ diffus subissent réflexions et diffractions. En un point, il existe donc une superposition du champ direct (onde directe) et du champ réverbéré (ondes réfléchies et diffractées). Dans un champ diffus « idéal », le champ acoustique est homogène en tout point de l'espace.

<sup>36</sup> Les seules ondes acoustiques qui parviennent au récepteur dans un champ acoustique libre « idéal » sont celles du champ direct, en provenance de la source.

proposée par Polack *et al.* [PBRL+07], réalisée à partir de mesures *in situ* et du recueil d'un ensemble d'informations, puis testée en laboratoire *via* une procédure de catégorisation libre et verbalisation libre, qui conduit à une distinction entre rues en tissu ouvert et rues en « U ».

D'un point de vue pratique sur le terrain, il semble assez aisé de pouvoir discriminer rue en « U » et rue en tissu ouvert. Pour cela nous conservons ce critère (type de morphologies) avec ce degré de détail (rue en « U », rue en tissu ouvert).



**Figure 2.2 : Différence de niveau sonore pour une rue en « U » et une rue « ouverte » [CERTU98].**

### 1.1.3. Types d'allures

Le Nouveau Guide du Bruit [SETRA09] distingue trois types d'allures que peuvent avoir les véhicules composant le trafic routier : allure stabilisée, allure décélérée, allure accélérée. En allure stabilisée, on considère que la vitesse du véhicule ou du flux de véhicules est sensiblement constante. Les allures accélérées et décélérées sont définies de manière similaire. On considère que le véhicule ou le flux de véhicules sont respectivement globalement en accélération ou en décélération.

A notre connaissance, peu d'études ont porté sur les différences de perception entre les bruits émis par un véhicule (ou un flux de véhicules) dans les différents types d'allure. En ce qui concerne la gêne, le lecteur est invité à se référer au Chapitre 1 de ce mémoire de thèse (section 3.2).

Sur le terrain il semble aisé de pouvoir discriminer ces trois allures et nous choisissons donc de conserver ce critère (type d'allures) avec ce degré de détail (stabilisée, accélérée, décélérée).

## 1.2. Typologie physique *a priori*

Dans le cadre que nous nous sommes fixés, nous proposons de croiser trois critères physiques *a priori* : (1) type de véhicules, (2) type de morphologies, (3) type d'allures, pour former une typologie physique *a priori* de bruits routiers (cf. Tableau 2.2) :

	Allure stabilisée		Allure accélérée		Allure décélérée	
Véhicules légers	Rue en « U »	Tissu ouvert	Rue en « U »	Tissu ouvert	Rue en « U »	Tissu ouvert
Poids lourds	Rue en « U »	Tissu ouvert	Rue en « U »	Tissu ouvert	Rue en « U »	Tissu ouvert
Bus et autocars	Rue en « U »	Tissu ouvert	Rue en « U »	Tissu ouvert	Rue en « U »	Tissu ouvert
Deux-roues	Rue en « U »	Tissu ouvert	Rue en « U »	Tissu ouvert	Rue en « U »	Tissu ouvert

**Tableau 2.2 : Typologie physique *a priori* du bruit routier en milieu urbain.**

Nous faisons l'hypothèse qu'il est possible de reconstruire différents types de trafics routiers en milieu urbain à partir d'éléments correspondant à cette typologie physique *a priori*. Dès lors il nous apparaît pertinent de procéder à l'enregistrement *in situ* de bruits de passage de véhicules routiers correspondant aux 24 éléments de cette typologie, pour, dans un premier temps, tester sa pertinence perceptive. Les enregistrements devront être de bonne qualité et nous permettre, dans un deuxième temps, de pouvoir reconstituer, à partir de l'ensemble des bruits de passage enregistrés, des séquences sonores de circulation routière, comme cela a pu être fait dans de précédents travaux (par exemple [GSPG07]).

## 2. Localisation auditive de sources sonores dans l'espace

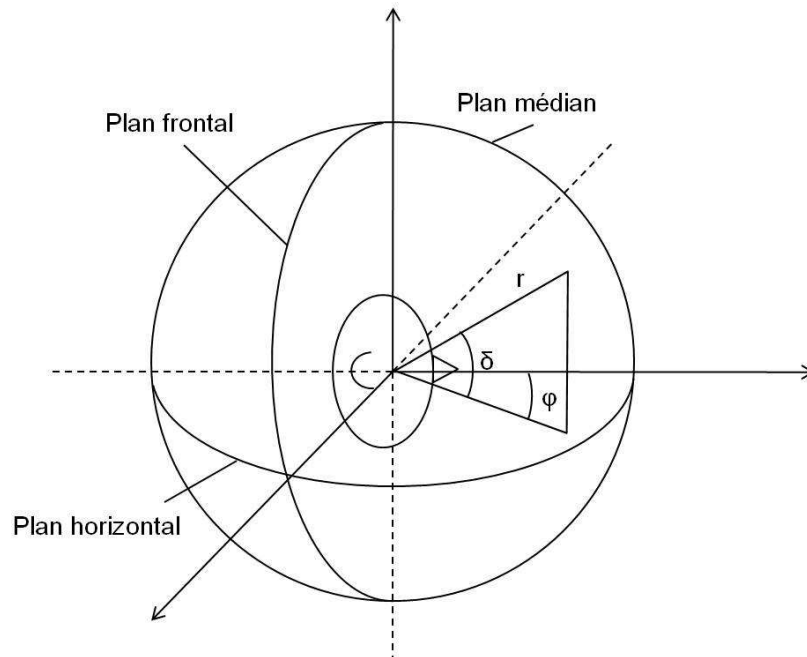
Nous souhaitons, pour mener à bien nos expérimentations en laboratoire, disposer d'enregistrements *in situ* de bruits de la circulation routière et de bruit industriel. La problématique est toutefois différente pour ces deux bruits de l'environnement. En effet, alors que les bruits industriels auxquels nous nous intéressons (bruits permanents et stables) sont émis par des sources fixes, les bruits de la circulation routière sont émis par des sources en mouvement. Il apparaît dès lors nécessaire de rappeler les principes de localisation auditive de sources sonores dans l'espace avant de nous consacrer au choix du système d'enregistrement (section 3 de ce chapitre).

Cette section 2 décrit ces principes succinctement, dans le cas simple d'une source sonore ponctuelle en champ libre.

### 2.1. Définition et système de coordonnées

La perception de l'espace sonore passe par la localisation des sources sonores dans l'espace. Localiser une source, c'est déterminer sa direction (son azimut et son élévation), puis sa profondeur, i.e. la distance à laquelle elle se trouve de l'auditeur [HW03].

La localisation auditive est définie dans un système de coordonnées sphériques dont l'origine est le centre de l'axe interaural de l'auditeur (cf. Figure 2.3).



**Figure 2.3 : Système de coordonnées sphériques centré sur la tête de l'auditeur.  $\delta$  est l'élévation,  $\phi$  est l'azimut, et  $r$  la distance [Bla97].**

### 2.1.1. Localisation d'une source sonore dans le plan médian

Si la source sonore est placée dans le plan médian, on peut faire l'hypothèse que les signaux sonores arrivant aux oreilles de l'auditeur sont identiques. Blauert [Bla97] rappelle que bien souvent dans ce cas, la direction de l'évènement auditif (perçu par l'auditeur) ne coïncide pas avec la direction de l'évènement sonore (qui se produit à proximité de l'auditeur). Cela semble être lié au type de signal émis par la source sonore (par exemple les signaux à bande étroite). Pour des sources large-bande, c'est notamment le filtrage par la tête (HRTF) qui permet une localisation des sources sonores dans le plan médian. Par ailleurs, Blauert estime que des facteurs cognitifs sont liés à cette « erreur », par exemple la familiarité entretenue par l'auditeur vis-à-vis de la source émettrice, les attentes et les habitudes de l'auditeur [Bla97].

### 2.1.2. Localisation latérale d'une source sonore

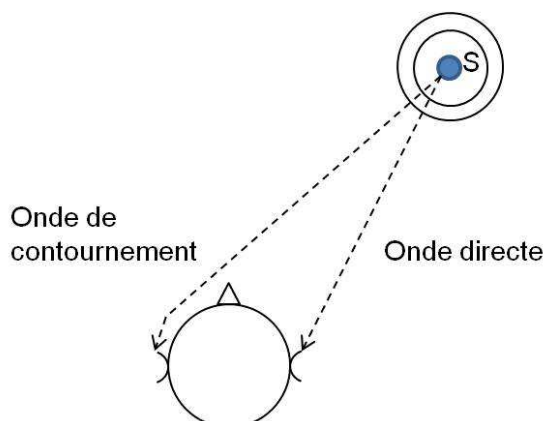
Si la source est située dans l'espace à droite ou à gauche du plan médian, les signaux sonores arrivant aux oreilles ne sont plus identiques. Ils diffèrent d'une manière qui est caractéristique de l'incidence de l'onde sonore produite par la source, ainsi que de la distance à laquelle se trouve la source. On peut faire l'hypothèse que le système auditif tire les informations dont il a besoin pour localiser latéralement la source sonore des dissimilarités entre les signaux arrivant aux deux oreilles. On distingue généralement deux classes d'informations [Bla97] :

- Les différences interaurales de temps (ITD : Interaural Time Difference en anglais) ;
- Les différences interaurales d'intensité (ILD : Interaural Level Difference en anglais).

Les ITD sont dues à la différence de chemin que doit parcourir l'onde de contournement<sup>37</sup> par rapport à l'onde directe<sup>38</sup> (cf. Figure 2.4). Cette différence de temps

<sup>37</sup> Onde qui arrive à l'oreille située du côté opposé à la source.

augmente avec la distance que doit parcourir l'onde de contournement et est maximale lorsque l'azimut est égal à 90°.



**Figure 2.4 : Onde de contournement et onde directe [HW03].**

Les ILD sont dues à la complexité de la tête humaine qui constitue un obstacle à l'onde sonore. La tête provoque des phénomènes de diffraction et réflexion de l'onde sonore qui résultent en un filtrage fréquentiel qui dépend de la position de la source [HW03]. Les ILD sont difficiles à modéliser. On retient, de manière générale, qu'elles dépendent, de manière complexe, de l'azimut et des fréquences constituant le bruit émis par la source sonore. Pour plus de détails le lecteur peut se référer à [Dan01] ou [Bla97].

### 2.1.3. Perception de la distance d'une source sonore

La perception de la distance à laquelle se trouve la source sonore (« distance hearing ») est un problème complexe et Blauert [Bla97] souligne le manque de connaissances sur ce sujet. Grossièrement, la perception de la distance à laquelle se trouve la source sonore dépend de l'association de la distance à laquelle se trouve la source sonore avec d'autres paramètres tels que le niveau de pression sonore au point de réception, les modifications spectrales dues au chemin parcouru par l'onde sonore jusqu'au point de réception, ou encore le rapport du champ direct au champ réverbéré [Bla97, HW03].

Enfin Blauert [Bla97] rappelle que des facteurs cognitifs rentrent également en compte dans la perception de la distance à laquelle se trouve la source sonore. Ainsi, la familiarité qu'évoque le signal sonore à l'auditeur est importante. Par exemple, pour des conversations, la distance de l'évènement auditif (perçu par l'auditeur) correspond souvent bien à la distance de l'évènement sonore (qui se produit à proximité de l'auditeur).

## 3. Techniques de prise de son

Hugonnet et Walder [HW03] définissent la prise de son comme « l'art de stimuler, par une chaîne de reproduction sonore la meilleure possible, l'imagination de l'auditeur qui pourra façonner sa propre image sonore et mentale d'un évènement littéraire ou musical ».

L'idée est donc de choisir la bonne technique d'enregistrement afin de permettre à l'auditeur de pouvoir se projeter dans la scène sonore qui sera restituée. Dans la problématique qui nous intéresse, il s'agira notamment de pouvoir garantir par la chaîne de reproduction choisie une bonne identification des sources de bruit enregistrées, en assurant

<sup>38</sup> Onde qui arrive à l'oreille située du côté de la source.

un repérage des mouvements des sources de bruit s'il y a lieu (par exemple pour les véhicules routiers).

Il existe diverses techniques de prise de son, mais dans cette section nous décrirons plus spécifiquement les plus couramment utilisées dans notre domaine, à savoir :

- La prise de son ambisonique ;
- La prise de son binaurale ;
- La prise de son stéréophonique.

Dans la description qui est faite de ces techniques, les restitutions adaptées seront également évoquées, dans le sens où ce sont comme on l'a dit précédemment deux composantes indissociables, même si cela ne concerne pas spécifiquement ce chapitre.

### 3.1. Prise de son ambisonique

La technique ambisonique est basée sur une décomposition du champ acoustique en harmoniques sphériques centrées sur l'auditeur [Dan01]. Dans sa forme la plus simple cette technique utilise un encodage directionnel du champ sonore sur 4 composantes (on l'appelle le format B) : composante  $W$  (information omnidirectionnelle - mesure de la pression sonore), et composantes  $X$ ,  $Y$  et  $Z$  (composantes bidirectionnelles - mesure du gradient de pression selon trois directions orthogonales).

Pour une onde plane d'incidence  $\vec{u}$  portant un signal  $S$ , cet encodage se traduit par les équations suivantes [Dan01] :

$$W = S \quad (2.1)$$

$$X = \sqrt{2} \cos\varphi \cdot \cos\delta \cdot S \quad (2.2)$$

$$Y = \sqrt{2} \sin\varphi \cdot \cos\delta \cdot S \quad (2.3)$$

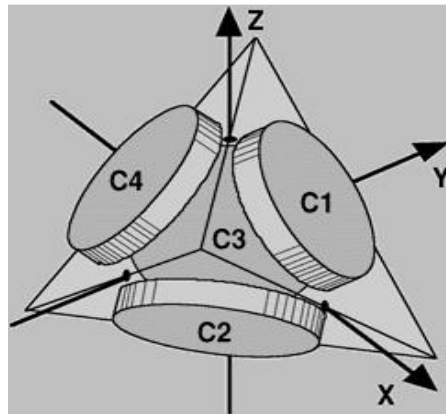
$$Z = \sqrt{2} \sin\delta \cdot S \quad (2.4)$$

Dans ces équations<sup>39</sup>, les notations employées sont les mêmes que pour la Figure 2.3.

Dans la pratique, réaliser une prise de son ambisonique revient à mesurer en un même point à la fois la pression sonore et les composantes du gradient de pression suivant trois axes orthogonaux. Cela pourrait se faire à condition que l'on puisse superposer en un même point 4 microphones : un microphone omnidirectionnel (pour mesurer le signal), et trois bidirectionnels (pour le gradient de pression dans les trois directions orthogonales). Mais, dans la pratique, on utilise des microphones Soundfield constitués de quatre capsules cardioïdes positionnées au centre des quatre faces d'un tétraèdre régulier (cf. Figure 2.5).

---

<sup>39</sup> Pour une restitution 2D (horizontale), on ne retient que les composantes  $W$ ,  $X$  et  $Y$ . Le facteur  $\sqrt{2}$  a été introduit pour assurer des puissances moyennes équivalentes des 3 canaux dans le cas de sources sonores horizontales réparties uniformément dans toutes les directions [Dan01].



**Figure 2.5 : Schématisation d'un microphone Soundfield [Cou93].**

Les quatre signaux mesurés nommés C1, C2, C3 et C4 constituent le format A. De simples combinaisons linéaires permettent d'obtenir les quatre directivités associées au format B, en faisant l'hypothèse de la quasi-coïncidence des capsules [Cou93] :

$$W = C1 + C2 + C3 + C4 \quad (2.5)$$

$$X = C1 + C2 - C3 - C4 \quad (2.6)$$

$$Y = C1 - C2 + C3 - C4 \quad (2.7)$$

$$Z = C1 - C2 - C3 + C4 \quad (2.8)$$

L'avantage de la prise de son ambisonique est qu'elle permet une restitution des enregistrements sur n'importe quelle configuration de haut-parleurs, moyennant la possession d'un décodeur qui permet de répartir les quatre canaux d'enregistrement sur les N haut-parleurs [Cat01].

Dans la restitution des prises de sons ambisoniques il existe deux configurations : la 2D et la 3D. Dans la configuration 2D la composante directionnelle Z n'est pas prise en compte et la restitution se fait dans un plan horizontal. Dans ce cas les haut-parleurs sont tous placés à la même hauteur. Dans la configuration 3D le réseau de haut-parleurs est distribué verticalement (par exemple [GK04]).

### 3.2. Prise de son binaurale

La prise de son binaurale a pour objectif de reconstituer les informations sonores spatiales au niveau des oreilles. La qualité de l'image sonore produite par une prise de son binaurale est souvent considérée comme capable de concurrencer l'expérience auditive naturelle [Dan01].

Concrètement, la prise de son binaurale la plus directe consiste à loger un capteur dans chaque conduit auditif d'un individu. On peut également faire l'usage d'une tête artificielle (cf. Figure 2.6).

Si l'enregistrement binaural est directement restitué aux oreilles de l'auditeur (*via* un casque), on parle de binauralisation. Ainsi, l'auditeur perçoit les informations sonores telles qu'il les aurait perçues dans l'environnement, incluant les effets de diffractions et réflexions de chaque évènement sonore par le corps, la tête et les oreilles de l'auditeur [Dan01].

Si l'enregistrement binaural est restitué à l'auditeur *via* un réseau de haut-parleurs on parle de transauralisation (deux haut-parleurs placés devant l'auditeur) ou de double transauralisation (deux haut-parleurs devant et deux haut-parleurs derrière l'auditeur). Par contre, ce procédé nécessite un traitement particulier qui consiste en l'annulation des

chemins croisés (cross-talk en anglais) entre les haut-parleurs et les oreilles (le lecteur peut se référer à [Dan01] pour plus de détails).

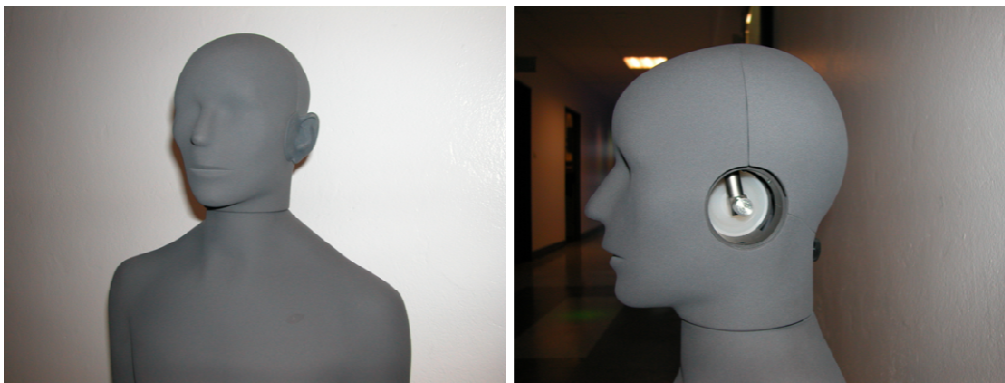


Figure 2.6 : Mannequin artificiel Cortex MANIKIN MK2/NCF1.

### 3.3. Prise de son stéréophonique

La stéréophonie désigne la technique de restitution, sur deux haut-parleurs, pour des enregistrements sonores effectués au moyen d'un couple de microphones. Selon Hugonnet et Walder [HW03], l'objectif de la stéréophonie est de donner à l'auditeur « l'illusion crédible qu'il existe, entre et au-delà des enceintes, un environnement acoustique dans lequel des sources sonores recréées peuvent être localisées et dissociées dans l'espace. ». Ceci est illustré sur la Figure 2.7 [HW03] :

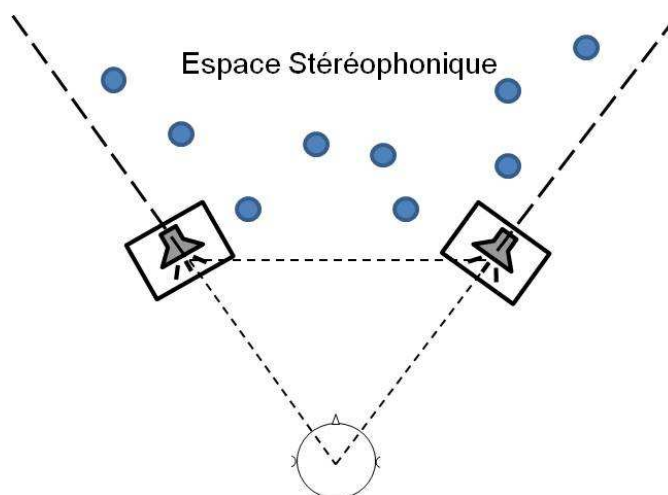


Figure 2.7 : Espace stéréophonique.

Généralement, la voie d'enregistrement droite du couple de microphones est restituée sur le haut-parleur de droite et la voie d'enregistrement gauche est restituée sur le haut-parleur de gauche. Parfois, pour avoir un meilleur rendu des basses fréquences, un caisson de basses est ajouté.

La localisation des sources au sein de l'espace stéréophonique se fait grâce aux différences interaurales d'intensité et de temps (ILD et ITD) entre les deux canaux de diffusion. Ces différences peuvent être introduites naturellement dès la prise de son. Il existe, de manière générale, trois grands types de prise de son stéréophonique [HW03] :

- Prise de son stéréophonique d'intensité ;
- Prise de son stéréophonique de temps ;
- Prise de son stéréophonique de temps et d'intensité.



Avant cela, rappelons ce qui est usuellement appelé l'angle utile de prise de son.

### 3.3.1. Angle utile de prise de son

Il s'agit de l'angle à l'intérieur duquel doivent se trouver les sources sonores pour être reproduites à l'intérieur de l'espace stéréophonique (cf. Figure 2.7). Dans la pratique, l'angle utile de prise de son doit être proche de l'angle sous lequel les sources sonores sont « vues » par le système de prise de son stéréophonique. Si l'angle utile de prise de son est trop fermé l'image stéréophonique est déformée [HW03].

Notons que l'angle utile de prise de son n'est pas forcément égal à l'angle physique entre les axes des microphones du système stéréophonique.

### 3.3.2. Prise de son stéréophonique d'intensité

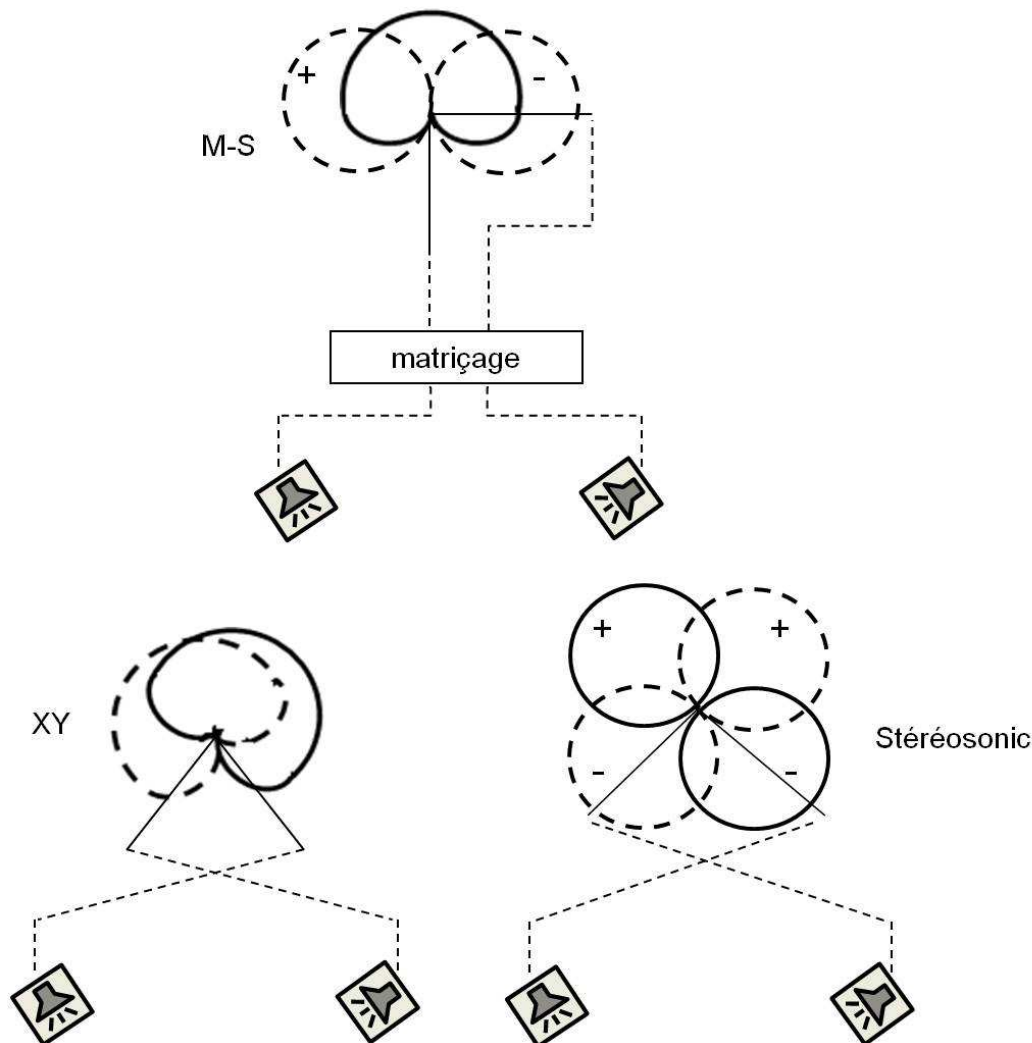
Le principe de la prise de son stéréophonique d'intensité n'utilise comme paramètre de localisation des sources sonores que la différence interaurale d'intensité (ILD, cf. section 2.1.2).

Face à une source sonore, les deux microphones du système stéréophonique sont placés l'un au-dessus de l'autre de manière à ce qu'il existe un angle physique. Pour ce type de système, lorsque l'on diminue l'angle physique entre les microphones, on augmente l'angle utile et inversement [HW03].

Les systèmes les plus utilisés sont les suivants :

- **Système M-S (Middle-Side)**. Il superpose deux microphones, un à directivité cardioïde (Middle - M), et l'autre à directivité bidirectionnelle (Side - S), qui forment un angle physique de 90°. Le premier microphone est placé face à l'axe de la scène sonore et, par conséquent, le deuxième est lui perpendiculaire. Un matriçage est nécessaire avant la restitution puisque le canal de gauche restitue le signal (M + S) et le canal de droite le signal (M – S) [HW03] ;
- **Système XY**. Il superpose deux microphones de directivité cardioïde qui forment un angle physique variant de 80° à 130° pour un angle utile de prise de son allant de 180° à 130°. Selon Hugonnet et Walder , l'image obtenue souffre d'un manque d'espace et de profondeur mais l'ouverture importante de l'angle utile de prise de son permet une utilisation à proximité des sources sonores [HW03] ;
- **Système Stéréosonic**. Il superpose deux microphones à directivité bidirectionnelles qui forment un angle physique de 90°. Dans le cas d'un milieu réverbérant, il souffre d'une faible spatialisation même si la localisation des sources sonores est bonne. Les microphones bidirectionnels ont une perte de sensibilité en basses fréquences (inférieures à 200 Hz). Ce système apporte donc une coloration spectrale aux événements sonores, surtout ceux au contenu basses fréquences important [HW03].

La Figure 2.8 schématise ces trois systèmes.



**Figure 2.8 : Systèmes usuels de prise de son stéréophonique d'intensité. En haut le système M-S ; à gauche le système XY ; à droite, le système Stéréosonic.**

### 3.3.3. Prise de son stéréophonique de temps

Le principe de prise de son stéréophonique de temps n'utilise, comme paramètre de localisation des sources sonores, que la différence interaurale de temps (ITD, cf. section 2.1.2).

Face à une source sonore, les deux microphones, distants de plusieurs centimètres, sont positionnés de manière à ce que l'angle physique entre eux soit nul. Pour ce type de système, lorsque l'on diminue l'espacement entre les deux microphones, on augmente l'angle utile de prise de son et inversement : des espacements de 25 cm et 50 cm correspondent respectivement à des angles utiles de prise de son valant 180° et 130°. [HW03].

Le système AB, le plus employé, utilise deux microphones omnidirectionnels qui sont espacés de plusieurs dizaines de centimètres. D'après Hugonnet et Walder, ce système restitue avec beaucoup d'ampleur les grandes masses sonores en milieu semi-réverbérant, mais la précision de localisation n'est possible que pour les sources les plus proches. Pour des fréquences moyennes à élevées, dont la longueur d'onde est de l'ordre de l'espacement entre les deux microphones, des oppositions de phase se produisent sous certains angles de captation ; l'addition des niveaux gauche et droit se traduit alors par des annulations de niveaux [HW03].

La Figure 2.9 schématise le système AB.

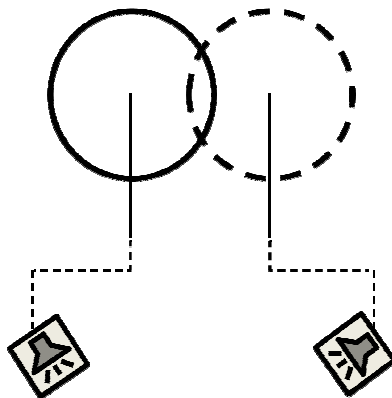


Figure 2.9 : Système de prise de son stéréophonique de temps AB.

### 3.3.4. Prise de son stéréophonique de temps et d'intensité

La prise de son stéréophonique de temps et d'intensité utilise les deux paramètres de localisation des sources sonores : les différences interaurales de temps et la différence d'intensité (cf. ILD et ITD, cf. section 2.1.2).

Face à une source sonore, les deux microphones sont espacés de quelques centimètres et forment un angle physique non nul. Pour ce type de système, on augmente l'angle utile de prise de son en diminuant l'espacement entre les deux microphones et en fermant l'angle physique, et inversement [HW03].

Généralement, pour ce type de système, on utilise des microphones à directivité cardioïde. Un compromis est à trouver entre l'espacement et l'angle physique entre les microphones. Pour un espacement de 17 cm entre les deux microphones, des angles physiques de 50° et 130° conduisent à des angles utiles de prise de son valant respectivement 160° et 80° [HW03]. Dans chaque pays on utilise des combinaisons différentes d'espacement et d'angle physique. En France, l'association de microphones cardioïdes espacés de 17 cm et formant un angle physique de 110° est utilisé le plus couramment. Ce système est connu sous le nom ORTF. Il offre un angle utile de prise de son de 90°.

En général, les systèmes de prise de son de temps et d'intensité sont utilisés car ils offrent un bon compromis entre spatialisation et localisation des sources sonores. De plus les sources sonores extérieures sont rendues avec réalisme. Plus précisément, le système ORTF jouit d'une bonne homogénéité de l'image stéréophonique restituée (localisation, perception de la distance de la source sonore) [HW03].

La Figure 2.10 schématise le système ORTF :

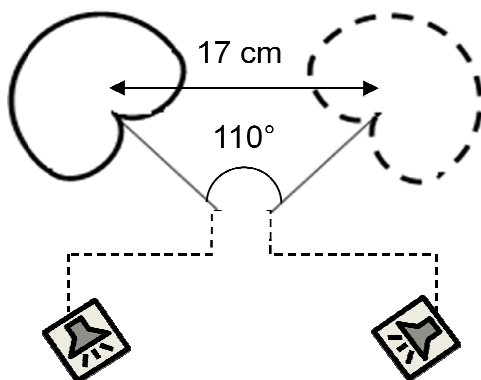


Figure 2.10 : Système de prise de son stéréophonique de temps et d'intensité ORTF.

### 3.4. Quel système choisir ?

On a vu que chacune des trois grandes techniques de prise de son/restitution offrent des avantages et inconvénients par rapport à la localisation auditive de sources dans l'espace. Dans cette section, nous nous intéressons à des travaux traitant de problématiques similaires à la nôtre pour arrêter un choix quant au système que nous allons utiliser.

Dans leurs travaux de thèse, portant respectivement sur l'identification des signaux sonores en milieu urbain et la qualité sonore de l'environnement urbain, Vogel [Vog99] et Maffiolo [Maf99] ont comparé plusieurs techniques d'enregistrements stéréophoniques. Des séquences sonores dites de « circulation » et de « jardins publics » ont été enregistrées simultanément sur 4 configurations. Les configurations comparées sont les suivantes :

- stéréophonie de temps, système AB avec 70 cm d'écartement entre les microphones omnidirectionnels (O70) ;
- stéréophonie de temps et d'intensité, système associant deux microphones cardioïdes avec écartement de 60 cm et angle physique de 100°(C60);
- stéréophonie de temps et d'intensité, système associant deux microphones infracardioïdes avec écartement de 70 cm et angle physique de 100 (I70);
- stéréophonie de temps et d'intensité, système ORTF.

Quatorze paires de séquences sonores sont comparées en laboratoire au cours d'un test de comparaison par paires (8 paires de séquences de « circulation » et 6 paires de séquences de « jardin public »). Pour ce test, les sujets devaient estimer quelle séquence leur semblait la plus proche de leur expérience quotidienne. Sur les résultats exploitables de cette étude, il apparaît que, pour les séquences de « circulation », la stéréophonie de temps et d'intensité I70 est préférée à la configuration O70 et que la configuration C60 est préférée à la configuration ORTF. Vogel conclut en recommandant de ne pas utiliser de microphones omnidirectionnels pour les prises de sons d'environnement urbain [Vog99]. Maffiolo ajoute à cela que les configurations O70 et ORTF ne semblent pas convenir pour les ambiances de circulation où les sources sont en mouvement [Maf99]. Toutefois, Vogel [Vog99] mentionne un effet d'ordre dans la présentation des paires de séquences sonores, ce qui empêchait des recommandations fermes quant à l'usage d'une configuration pour l'enregistrement de sources sonores en mouvement.

Guastavino, lors de ses travaux de thèse [Gua03] portant sur la perception des basses fréquences dans l'environnement sonore urbain, a comparé trois techniques de prise de son/restitution : ambisonique (microphone Soundfield et restitution sur 4 canaux), transauralisation (tête artificielle et restitution sur deux canaux) et stéréophonie (stéréophonie de temps et d'intensité, système ORTF et restitution sur deux canaux). Des séquences variées (ambiance sonore urbaine, avec bruit de passage de véhicules routiers, habitacle de voiture, concert, et cocktail de voix) sont enregistrées simultanément par les trois systèmes de prise de son. Guastavino a choisi comme système de prise de son stéréophonique le système ORTF, à la fois pour enregistrer des séquences sonores en intérieur et en extérieur, avec des sources fixes ou en mouvement. Les séquences sonores sont restituées au cours d'un même test d'écoute. Les sujets devaient, pour chaque ambiance sonore, retenir celle qui leur paraissait la plus proche de leur expérience quotidienne en précisant les raisons de leur choix (question ouverte). Ensuite, pour chaque ambiance, un questionnaire fermé plus spécifique est passé aux sujets. Ce questionnaire porte sur des propriétés de rendu de la scène sonore. Pour la question ouverte, ce sont les techniques ambisonique et transaurale qui ont été choisies le plus souvent. Le Tableau 2.3 récapitule les résultats selon les propriétés de rendu des scènes sonores.

La technique ORTF associée à une restitution sur haut-parleurs est reconnue par les sujets de l'expérience de Guastavino [Gua03] pour sa bonne représentation, lisibilité, vraisemblance, et son rendu global de la scène sonore. Par contre la technique ambisonique est la meilleure en ce qui concerne l'enveloppement et l'immersion.

	Ambisonique	Transaurale	Stéréophonie (ORTF)
Enveloppement	***	*	*
Immersion	***	*	*
Représentation	*	*	***
Lisibilité	*	**	***
Vraisemblance	**	*	***
Note globale	**	*	***

**Tableau 2.3 : Performances des techniques testées. \* indique la restitution ayant obtenu le moins bon score, \*\* indique celle ayant obtenu un score intermédiaire, \*\*\* indique celle ayant obtenu le meilleur score [Gua03].**

Ces différents éléments nous amènent à écarter la technique transaurale et la prise de son stéréophonique de temps (système AB). La technique ambisonique est séduisante mais, en plus d'être onéreuse, ne correspond pas à notre problématique, puisque nous ne cherchons pas à reproduire en laboratoire une sensation d'immersion ou d'enveloppement mais nous cherchons à restituer des extraits sonores de passages de véhicules routiers avec une bonne représentation et une bonne vraisemblance. **Nous opterons donc pour un système de prise de son ORTF** afin de mener les enregistrements *in situ* de bruits routiers en zone urbaine.

Notons également que ce système de prise de son a été utilisé dans d'autres travaux de recherche présentant des séquences sonores en milieu urbain avec des sources de bruit en mouvement (par exemple [VLD02, LD06]).

## 4. Protocole d'enregistrement stéréophonique *in situ*

### 4.1. Bruit de la circulation routière

#### 4.1.1. Les lieux d'enregistrement

Rappelons que l'objectif de ces travaux de thèse est dans un premier temps de caractériser physiquement et perceptivement les bruits de la circulation routière et dans un deuxième temps de caractériser physiquement et perceptivement des situations de multi-exposition au bruit routier et au bruit industriel.

Il conviendra alors dans un souci de réalisme d'effectuer des enregistrements *in situ* de bruits de la circulation routière dans des zones où les riverains sont également impactés par le bruit provenant d'installation industrielle.

Avant ces travaux de thèse, un tel repérage a été mené par le laboratoire dans la région lyonnaise, grâce aux informations données par le Grand Lyon, Acoucity, les services de la DRIRE<sup>40</sup>, et des services « hygiène et santé publique » des mairies concernées. Les enregistrements de bruits de la circulation routière ont été effectués dans les zones

<sup>40</sup> Direction Régionale de l'Industrie, de la Recherche, et de l'Environnement.

d'habitation de l'agglomération lyonnaise situées à proximité de ces sites industriels. Certains de ces sites se situent en centre ville, d'autres en périphérie.

Nous avons également réalisé bon nombre de ces enregistrements dans la commune de Marcy l'Etoile située dans le Grand Lyon, dans laquelle a eu lieu l'enquête de gêne sonore financée par l'AFSSET [MV09]. Cette enquête socio-acoustique a été traitée sous l'angle de la multi-exposition au bruit routier et au bruit industriel permanent et stable dans le cadre du projet de recherche NOISI-EXPO financé par l'ADEME (contrat n°0866C0066)<sup>41</sup>. Les données de cette enquête, présentées dans le rapport du projet de recherche NOISI-EXPO [EEO10], nous serviront pour confronter nos résultats obtenus en laboratoire (Chapitre 5 de ce mémoire de thèse) par l'étude d'une situation de multi-exposition au bruit routier et au bruit industriel.

Enfin, nous avons veillé à effectuer des enregistrements qui puissent nous permettre de décrire chaque situation de la typologie physique de bruits routiers en milieu urbain proposée dans la première partie de ce chapitre.

#### **4.1.2. Le matériel utilisé**

Les enregistrements stéréophoniques ont été réalisés au moyen du couple ORTF Schoeps MSTC 64© avec des bonnettes anti-vent Schoeps BBG©.

Les signaux stéréophoniques ont été enregistrés sur un enregistreur stéréophonique portable Tascam HD-P2©. Les signaux sont échantillonnés à 44.1 kHz avec une résolution de 24 bits.

Simultanément aux enregistrements stéréophoniques, des enregistrements monophoniques ont été réalisés par un microphone omnidirectionnel GRAS 40AE© et son préamplificateur PRES21A©. Ces signaux monophoniques ont été enregistrés sur un autre enregistreur portable (Fostex FR-2 Field Memory Recorder©) avec les mêmes réglages que ceux utilisés pour enregistrer les signaux stéréophoniques (44.1 kHz, 24 bits). Une bonnette anti-vent a également été utilisée pour ce microphone. Ces signaux monophoniques ne sont pas destinés à la restitution lors de tests d'écoute, mais réalisés afin de donner l'information sur les niveaux sonores réels d'enregistrement, puisque les microphones du couple ORTF ne permettent pas d'être étalonnés à cet effet. Avant chaque enregistrement, le microphone omnidirectionnel est donc étalonné au moyen d'un calibre acoustique de classe 1 Norsonic 1251©.

Le microphone omnidirectionnel est placé au centre du couple ORTF, légèrement en hauteur de celui-ci.

#### **4.1.3. Le protocole d'enregistrement**

Conformément aux préconisations des normes NF S 31-010 [AFNOR96] et NF S 31-085 [AFNOR02], le couple ORTF et le microphone omnidirectionnel sont placés à une hauteur de 1m50 du sol et, dans la mesure du possible, à au moins 2 mètres de toute paroi réfléchissante (façades, etc.). L'axe du couple ORTF est placé perpendiculairement à l'axe de la route afin d'optimiser l'orientation de l'angle utile de prise de son par rapport à l'axe de passage des véhicules.

La distance microphone-véhicule est variable et a été contrainte par l'architecture urbaine des différents lieux d'enregistrement et la préconisation des normes citées précédemment. D'une manière générale, cette distance est inférieure à 10 mètres.

---

<sup>41</sup> Les résultats de cette enquête de gêne sonore ([EEO10, PMMR+12]) sont résumés dans l'Annexe A de ce mémoire de thèse.

La durée des séquences enregistrées est variable, entre quelques minutes à plusieurs dizaines de minutes.

#### 4.1.4. Informations complémentaires

Au cours des enregistrements, un certain nombre d'informations sont relevées :

- Lieu d'enregistrement ;
- Données temporelles (date, heure de début, heure de fin de l'enregistrement) ;
- Données météorologiques (notamment présence de vent léger)<sup>42</sup> ;
- Morphologie du lieu (rue en tissu ouvert ou rue en « U ») ;
- Présence d'un carrefour, arrêt de bus, feu de signalisation, etc. ;
- Evènements sonores particuliers (avertisseur sonore, avion, conversation de passants, etc.) ;
- Passage des véhicules, en prenant soin de repérer le type de véhicules (véhicule léger, bus, poids lourds ou deux-roues) et le moment de passage dans l'enregistrement.

Le recueil de ces données complémentaires était destiné à faciliter le dépouillement des séquences enregistrées. Au final, environ 8 heures de séquences de circulation routière ont été enregistrées entre les mois de mai et septembre 2009.

#### 4.1.5. Dépouillement

L'ensemble des séquences enregistrées ont fait l'objet d'une écoute attentive, et des bruits de passage de véhicules routiers, décrivant l'ensemble des situations de la typologie physique *a priori* proposée dans la section 1 (cf. Tableau 2.2), ont été extraits.

Pour l'extraction de ces bruits de passage, nous avons veillé à ce qu'aucun bruit « parasite » (par exemple, vent, voix, oiseaux, autre véhicule, etc.) ne soit présent. La durée des bruits de passage extraits n'est pas normalisée sur une base objective (par exemple tous les bruits fixés à 7s), mais sur la base de la durée de l'évènement sonore qui est le passage du véhicule routier (cf. [Maf09]). De ce fait les durées sont variables et s'étendent d'environ 3s à 9s.

Au total nous avons conservé 57 bruits de passage de véhicules routiers.

## 4.2. Bruit industriel

La problématique pour l'enregistrement du bruit industriel n'est pas la même puisque les sources émettrices sont fixes. Nous avons décidé de conserver la même méthode d'enregistrement stéréophonique que les bruits de la circulation routière pour deux raisons : (1) dans un souci d'homogénéité, étant donné que nous serons amenés à combiner bruits de la circulation routière et bruit industriel, (2) cette technique a été utilisée dans de précédents travaux de thèses étudiant les bruits industriels permanents et stables ([Nos07, Ala09]).

Toujours dans l'objectif de confronter nos résultats obtenus en laboratoire aux données de l'enquête *in situ*, effectuée en 2009 à Marcy l'Etoile (cf. [EEO10, PMMR+12]), nous avons décidé d'enregistrer le bruit industriel provenant de l'installation impactant les riverains enquêtés de Marcy l'Etoile. Ce choix était pertinent car le bruit avait été caractérisé comme stable [EEO10] et la direction du site industriel ne prévoyait pas de travaux d'insonorisation des sources de bruit impactant la zone enquêtée. Nos différents passages dans cette zone enquêtée, entre les périodes d'investigation de la zone en octobre 2008 et nos

---

<sup>42</sup> Tous les enregistrements ont été effectués par temps sec.

enregistrements en septembre 2010, nous ont confortés dans le choix de ce bruit pour confronter nos résultats obtenus en laboratoire aux données d'enquête obtenues un an auparavant.

Le matériel utilisé est le même que pour les bruits de circulation routière (section 4.1.2 de ce chapitre). L'enregistrement a été effectué de nuit, de manière à éviter la présence de bruit routier, au cours du mois de septembre 2010, devant l'un des pavillons au cœur de la zone enquêtée, à environ 60m de l'axe routier qui longe le site industriel (cf. ANNEXE A).

Le protocole respecte les préconisations des normes citées en section 4.1.3 de ce chapitre. L'axe du couple ORTF est dirigé en direction des principales sources émettrices de l'installation industrielle.

## 5. Synthèse

Dans ce chapitre nous avons présenté la manière dont nous avons constitué notre matériel sonore pour mener à bien nos expériences en laboratoire.

Dans la section 1 nous avons examiné les différents éléments pris en compte dans les modèles d'émission et de propagation utilisés pour réaliser les cartes de bruit routière. De ces éléments, nous avons retenu trois critères physiques *a priori* que nous croisons pour former une typologie physique *a priori* de bruits de la circulation routière : type de véhicules (véhicule léger, bus et autocars, poids lourds, deux-roues motorisés) x type de morphologies (rue en tissu ouvert, rue en « U ») x type d'allures (allure stabilisée, allure accélérée, allure décélérée). Notre hypothèse est qu'en zone urbaine différents types de trafics routiers peuvent être reconstitués à partir des éléments de cette typologie. C'est la pertinence perceptive de cette typologie physique que nous allons tester dans le Chapitre 3 afin de proposer des indicateurs de gêne sonore pour des catégories de bruits routiers pertinentes du point de vue du riverain.

La section 2 a été l'occasion de rappeler les mécanismes de localisation de sources sonores dans l'espace. La connaissance de ces mécanismes s'avère importante pour le choix d'une technique de prise de son qui nous permette de réaliser nos objectifs.

La section 3 a examiné les techniques les plus couramment utilisées dans notre domaine, et notre choix se porte sur la prise de son stéréophonique de temps et d'intensité avec un système ORTF.

La section 4 précise les protocoles et lieux d'enregistrements pour les bruits de la circulation routière et pour le bruit industriel. Nous avons veillé à réaliser des enregistrements dans la zone d'habitation qui a fait l'objet de l'enquête *in situ* avec laquelle nous confronterons les résultats obtenus par les expérimentations de multi-exposition menées en laboratoire. Au total 57 bruits de passage de véhicules routiers, décrivant l'ensemble des situations de la typologie physique proposée en section 1, ont été extraits des enregistrements menés en milieu urbain.





## Chapitre 3 : Caractérisation physique et perceptive de bruits de la circulation routière

*En partant de la typologie physique a priori proposée au Chapitre 2 , et des enregistrements stéréophoniques de bruits de passage de véhicules routiers qui y sont associés, trois expériences sont menées.*

*La section 1 de ce chapitre relate deux expériences, dont la première vise à tester la pertinence perceptive d'une telle typologie physique. Pour cela, les bruits de passage enregistrés sont soumis à un panel d'auditeurs via une procédure de catégorisation libre et verbalisation libre. La deuxième expérience a pour but d'évaluer la robustesse des résultats de la première expérience. Pour ce faire, une sélection des stimuli de la première expérience sont soumis à un nouveau panel d'auditeurs via un test de comparaison par paires. Les résultats des deux expériences sont complémentaires et confortent la proposition d'une typologie perceptive et cognitive de bruits de passage de véhicules routiers constituée de 7 catégories structurées par les critères a priori « type de véhicules » et « type d'allures ».*

*La section 2 de ce chapitre est consacrée à une troisième expérience qui vise à caractériser les catégories perceptives par des indicateurs de gêne adaptés. Pour cela, chaque catégorie perceptive fait l'objet d'un test d'évaluation de la gêne sonore à court-terme. A l'issue de ces tests, des indicateurs caractéristiques de la gêne sont proposés. En cohérence avec les résultats des deux premières expériences, ces indicateurs prennent en compte les aspects spectraux et temporels des bruits de passage en addition aux aspects plus classiques liés à l'intensité.*

# 1. Une typologie perceptive et cognitive de bruits de passage de véhicules routiers

La première partie de ce chapitre prend pour point de départ, la typologie physique *a priori*, proposée dans le Chapitre 2 . A la suite de cette proposition, nous avons effectué des enregistrements stéréophoniques de bruits de la circulation routière *in situ* (dans l'agglomération lyonnaise) et en avons extrait 57 bruits de passage correspondant à l'ensemble des situations décrites par la typologie physique proposée.

Nous souhaitons désormais évaluer la pertinence perceptive d'une telle typologie physique, et pour ce faire nous montons deux expériences : la première consiste en un test d'écoute de catégorisation libre associé à une verbalisation libre, et la deuxième en un test d'écoute de comparaison par paires. L'objectif de la deuxième expérience est de tester la robustesse des résultats de la première expérience.

## 1.1. Catégorisation libre et verbalisation libre

L'objectif de cette première expérience est de confronter la pertinence perceptive de la typologie physique *a priori* proposée au Chapitre 2 *via* une expérimentation en laboratoire, à partir du matériel sonore constitué. Rappelons que cette typologie physique est établie en croisant trois critères *a priori*, sur lesquels sont basés les modèles utilisés pour générer les cartes de bruits.

D'un point de vue théorique, la procédure de catégorisation libre avec verbalisation libre est particulièrement adaptée à la compréhension de principes psychologiques qui sous-tendent le processus de catégorisation naturelle, ces derniers n'étant pas nécessairement en relation avec les caractéristiques acoustiques des bruits en question [Dub00]. L'intérêt d'utiliser cette procédure (présentée au Chapitre 1 ) est alors de confronter une organisation choisie *a priori* avec des critères physiques, à l'organisation partagée par un panel d'auditeurs. Les catégories perceptives et cognitives résultantes sont alors le reflet du sens attribué par les sujets aux bruits de passage.

### 1.1.1. Méthode expérimentale

#### 1.1.1.1. Stimuli

Les stimuli utilisés pour cette expérience sont construits à partir des 57 bruits de passage de véhicules routiers, extraits des enregistrements *in situ* (cf. Chapitre 2 ).

##### *a. Niveaux sonores de restitution*

Lorsque l'on étudie la similarité (ou la dissimilarité) de séquences sonores artificielles ou réelles, l'intensité est un paramètre influent (par exemple [CC76, Maf99, TMF08, TMH09]). Dans l'objectif général que nous nous sommes fixés, nous aimerions contribuer à l'amélioration des cartes de bruit par une caractérisation des bruits de la circulation routière qui soit pertinente du point de vue des individus. Il nous apparaît alors nécessaire que des aspects des bruits de la circulation routière, autres que leur niveau de pression sonore, puissent émerger. En conséquence, nous avons décidé d'égaliser tous nos stimuli en intensité, en fixant leur niveau de pression sonore équivalent ( $L_{Aeq,T}$ ) à 60dB(A). Notons qu'un fade in et un fade out de 50ms sont appliqués à chacun des stimuli, respectivement à son début et à sa fin.

Le choix d'un tel niveau a été dicté par deux éléments : (1) la proximité avec les niveaux enregistrés sur le terrain et (2) la nécessité d'avoir un niveau de restitution qui soit

acceptable pour les sujets tout au long de l'expérience. A ce propos, deux valeurs de l'indice  $L_{Aeq,T}$  avaient été initialement envisagées : 60 et 65dB(A). Un test préliminaire a montré qu'une valeur de 65dB(A) rendait l'expérience plus difficile et fatigante pour les sujets.

#### *b. Durée des stimuli*

La durée des stimuli peut avoir une influence limitée sur le jugement porté par des auditeurs (par exemple [LM69, PP72, Pau97], notamment pour certaines durées testées de stimuli, et pour des jugements d'intensité, d'acceptabilité ou de gêne, recueillis en laboratoire)<sup>43</sup>.

Dans cette expérience de catégorisation libre avec verbalisation libre, nous faisons l'hypothèse que ce facteur n'aura pas d'influence en comparaison au contenu des stimuli (identification de la source de bruit, aspects spectraux, aspects temporels, etc.).

Comme nous l'avons dit au Chapitre 2 , il nous paraît plus opportun de normaliser la durée des stimuli non pas d'un point de vue objectif (par exemple tous les stimuli à 7s), mais du point de vue de l'évènement sonore, c'est-à-dire le passage du véhicule routier. En ce sens, nous nous rapprochons de la normalisation en durée effectuée par Maffiolo [Maf99].

En conséquence, la durée des stimuli s'étend d'environ 3s à 9s. Notons que cette dynamique de durée est similaire à celle rencontrée dans les travaux de Guyot portant sur la catégorisation de bruits domestiques [Guy96].

#### *c. Nombre de stimuli*

Comparé à d'autres travaux utilisant cette procédure expérimentale, le nombre de 57 stimuli utilisés dans notre expérience peut paraître élevé (par exemple [Guy96, Maf99, Gua03, Nos07]). Toutefois, selon Gaillard [Gai09], il n'existe pas de contre-indication d'un point de vue statistique quant au nombre de stimuli pour une expérience de catégorisation libre. La principale interrogation réside dans la difficulté qui est éprouvée par les sujets pour réaliser une telle tâche. Pour des bruits dont les individus font peu l'expérience au quotidien, il peut être nécessaire de limiter le nombre de stimuli. Au contraire, lorsque les bruits font partie du quotidien, la tâche peut impliquer un grand nombre de stimuli. Par exemple, Tardieu *et al.* [TSPL08] ont proposé 66 environnements sonores de gare ferroviaire aux sujets de leur test d'écoute.

Les bruits routiers étant des bruits communs du quotidien d'un grand nombre de nos concitoyens, le nombre de 57 stimuli est donc considéré pour la tâche de catégorisation libre à mener.

#### *d. Mesures des stimuli*

En préalable au test d'écoute, les stimuli ont été diffusés et mesurés au niveau de l'emplacement de l'auditeur, afin de calculer, à partir de ces mesures, différents indices acoustiques et psychoacoustiques.

Deux mesures successives ont été réalisées. La première au moyen du mannequin artificiel Cortex MANIKIN MK2/NCF1<sup>®</sup>, et la deuxième au moyen d'un microphone omnidirectionnel GRAS 40AE<sup>®</sup> et son préamplificateur PRES21A<sup>®</sup>. Les mesures effectuées au mannequin sont enregistrées sur un PC portable *via* une carte son externe CREATIVE SoundBlaster Extigy<sup>®</sup>. Les mesures effectuées au microphone omnidirectionnel sont stockées sur un enregistreur portable Tascam HD-P2<sup>®</sup> (échantillonnées à 44.1 kHz avec une amplitude de résolution de 24 bits). Avant enregistrement, les microphones sont étalonnés au moyen d'un calibre acoustique de classe 1 Norsonic 1251<sup>®</sup>.

Les enregistrements effectués au mannequin artificiel sont destinés à fournir les valeurs des indices énergétiques et statistiques ( $L_{Aeq,T}$ ,  $L_{N\%}$ , spectres 1/3 octave, etc.).

---

<sup>43</sup> Ce point sera plus détaillé dans la section 2.1.1 de ce chapitre.

L'utilisation du mannequin artificiel permet de prendre en compte dans la mesure, l'effet de la présence d'une tête et d'un buste humain. Les enregistrements effectués au microphone omnidirectionnel sont destinés à fournir les valeurs des indices psychoacoustiques (N, R, F, S, etc.), conformément à la norme ISO 532B [ISO75].

Ces indices ont été calculés au moyen du logiciel dBsonic<sup>®</sup> commercialisé par 01dB-Metravib<sup>44</sup> et à partir de scripts Matlab<sup>®</sup>, afin de caractériser ces bruits par les analyses menées en section 1.2 et suivantes. Nous avons fait figurer les valeurs d'un panel d'indices calculés sur les bruits de passage mesurés dans l'ANNEXE B.

**NB :** Les stimuli mesurés comportent deux voies d'enregistrement, la voie gauche et la voie droite. A partir de maintenant et tout au long de ce document lorsque nous calculerons des corrélations et régressions entre indices calculés à partir des bruits mesurés et des variables dépendantes, nous donnerons uniquement les résultats relatifs à la voie gauche (arbitrairement choisie). Cependant nous avons systématiquement effectué tous les calculs sur les deux voies. Lorsque des résultats différents sont obtenus pour la voie gauche et la voie droite, cela sera mentionné.

### 1.1.1.2. Dispositif expérimental

L'expérience de catégorisation libre et verbalisation libre est informatisée. La passation s'effectue au moyen du logiciel TCL-LabX développé par P. Gaillard [Gai09]. Le test a lieu dans la chambre semi-anéchoïque du Laboratoire des Sciences de l'Habitat de l'ENTPE (dimensions : L x l x h = 4.4 x 2.8 x 2.3m<sup>3</sup>). L'unité centrale de l'ordinateur est placée à l'extérieur de la salle de test pour ne pas contribuer au bruit de fond qui est mesuré à moins de 19dB(A).

En cohérence avec le système d'enregistrement choisi (cf. Chapitre 2 ), la reproduction stéréophonique des stimuli est assurée par un système 2.1 (deux haut-parleurs actifs Dynaudio Acoustics BM5A Actif<sup>®</sup> sont associés à un caisson de basses Dynaudio Acoustics BM9S<sup>®</sup>) *via* une carte son haute qualité Lynx Studio Technology LynxTwo<sup>®</sup>. Le caisson de basses est utilisé pour obtenir un meilleur rendu des basses fréquences caractéristiques des bruits de la circulation routière. Ce dernier est placé au sol entre les deux haut-parleurs. La fréquence de recouvrement entre caisson de basses et haut-parleurs est fixée à 80Hz.

La disposition des haut-parleurs respecte les recommandations de Bech et Zacharov [BZ06] : le centre de l'axe interaural de l'auditeur et les haut-parleurs forment un triangle équilatéral à 1m20 du sol, l'auditeur étant assis face à l'écran de l'ordinateur, et donc face aux enceintes.

### 1.1.1.3. Procédure

La procédure employée pour ce test se déroule en trois étapes : (1) catégorisation libre, (2) verbalisation libre et (3) choix d'un prototype. Le déroulement de chaque étape ainsi que les consignes données sont inspirées de précédents travaux (par exemple [Guy96, Gua03, TSPL08]).<sup>45</sup>

#### *a. Catégorisation libre*

---

<sup>44</sup> A noter que la sonie N est calculée à partir de la norme DIN 45631 [DIN91]. Pour plus de détails sur les modèles utilisés pour le calcul des indices psychoacoustiques, le lecteur peut se référer au manuel d'utilisation de dBsonic.

<sup>45</sup> Les consignes proposées ont constitué un livrable dans le cadre du projet NOISI-EXPO financé par l'ADEME (contrat n°0866C0066) [EEO10]. Dans ce cadre, nous avons collaboré avec D. Dubois, Directrice de Recherche CNRS à l'Institut Jean Le Rond d'Alembert dans l'équipe « Lutherie – Acoustique – Musique » (cf. section 1.1.3.2), à qui ces consignes ont été soumises pour validation. Son avis était essentiel puisqu'elle allait, à partir des données récoltées lors de la verbalisation libre, mener une analyse linguistique dans le cadre du projet (cf. [EEO10]).

Des icônes sonores associées aux différents stimuli sont alignées en haut de l'écran (en ordre aléatoire). Cliquer sur l'icône permet d'écouter le stimulus correspondant, et le sujet peut déplacer chaque icône. La consigne donnée est la suivante :

*« Vous allez entendre différents extraits sonores de circulation routière enregistrés dans différents lieux de l'agglomération Lyonnaise. Il vous est demandé de les écouter en vous imaginant chez vous. Pour écouter les extraits, cliquez sur l'icône correspondante.*

*Votre tâche consiste à mettre ensemble dans des groupes, les extraits sonores qui se ressemblent. Vous êtes libre de former autant de groupes que vous le souhaitez, avec dans chaque groupe autant d'extraits sonores que vous voulez.*

*Pour cela, vous pouvez écouter chacun des extraits sonores autant de fois que vous le voulez. »*

Notons qu'en anticipation aux futurs tests pour déterminer des indicateurs de gêne sonore, nous demandons aux sujets de s'imaginer chez eux.

#### *b. Verbalisation libre*

A l'issue de cette première étape, l'expérimentateur rejoint le sujet dans la salle d'écoute pour le recueil des données verbales relatives aux catégories formées. La consigne est alors la suivante :

*« Merci.*

*Pouvez-vous maintenant dire, pour chacun des groupes formés, les raisons pour lesquelles vous avez regroupé les différents extraits sonores ?*

*Pouvez-vous dire en quoi le groupe est différent des autres ? »*

Les données verbales sont saisies par l'expérimentateur dans une fenêtre dédiée à cet effet.

#### *c. Choix d'un prototype*

Dès que les données verbales relatives à un groupe sont saisies, l'expérimentateur demande ensuite aux sujets son choix pour l'élément le plus représentatif (le prototype) du groupe :

*« Pouvez-vous identifier un extrait sonore qui vous paraît le plus représentatif de ce groupe, et dites pourquoi ? »*

*Pouvez-vous dire à quel point il est représentatif du groupe sur l'échelle suivante : 1 = peu représentatif à 7 = très représentatif ? »*

#### **1.1.1.4. Sujets**

Nous avons recruté les sujets par courriel au sein de l'ENTPE (personnels de toutes catégories et étudiants), sur la base d'une expérience quotidienne du bruit et d'une bonne audition déclarées. Nous n'avons pas cherché à étudier un groupe de sujets en particulier, mais plutôt cherché à obtenir un échantillon le plus représentatif possible (en termes de genre, d'âge, de CSP, etc.).

Cinquante huit sujets ont donc été recrutés (30 hommes, 28 femmes ; entre 19 et 57 ans pour un âge moyen de 31 ans avec un écart-type de 11 ans).

L'expérience durait environ 1h et a eu lieu entre les mois d'octobre et novembre 2009.

A l'issue du test, les sujets remplissaient un questionnaire destiné à recueillir des informations sur eux (le questionnaire figure en ANNEXE C).

## 1.1.2. Traitement et analyse des données

Les données récoltées au cours de ce test font l'objet de deux analyses pratiquées séparément puis rapprochées. L'ensemble des partitions des 57 stimuli effectuées par les 58 sujets fait l'objet dans un premier temps d'une analyse statistique. Une analyse linguistique complète des données verbales recueillies au cours de la verbalisation libre a également été pratiquée par D. Dubois (cf. [EEO10, MMDP12]).

### 1.1.2.1. Analyse statistique

#### a. Données brutes

Avant d'effectuer les analyses, une transformation des données est nécessaire. Il s'agit dans un premier temps de créer pour chaque sujet ce qu'on appelle une matrice d'appartenance notée  $[a^i]$  (matrice d'appartenance du sujet  $i$ ). Les matrices d'appartenance sont des matrices carrées de taille  $n \times n$  ( $n$  étant le nombre de stimuli), symétriques par construction. Les éléments de cette matrice se voient attribuer les valeurs suivantes ([Koe05, Nos07]) :

$$a_{kl}^i = \begin{cases} 1, & \text{si les stimuli } \{k, l\} \text{ sont regroupés} \\ 0, & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.1)$$

Prenons l'exemple de 3 sujets (sujets 1, 2 et 3) devant effectuer une catégorisation libre de 5 stimuli {1, 2, 3, 4, 5}. Les 3 sujets ont formé à partir du corpus de 5 stimuli les partitions suivantes :

Sujet 1		Sujet 2		Sujet 3	
Cat. 1	1 et 4	Cat. 1	1, 2 et 4	Cat. 1	1 et 2
Cat. 2	2	Cat. 2	3 et 5	Cat. 2	3
Cat. 3	3 et 5			Cat. 3	4 et 5

Les matrices d'appartenance des sujets s'écrivent donc :

$$[a^1] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad [a^2] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad [a^3] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

A partir des matrices d'appartenance des sujets, on crée la matrice d'appartenance globale notée  $[A]$ . Il s'agit par construction d'une matrice  $n \times n$  symétrique. En notant  $N$  le nombre de sujets,  $[A]$  est obtenue par :

$$[A] = \sum_{i=1}^N [a^i] \quad (3.2)$$

En reprenant notre exemple, la matrice d'appartenance globale vaut alors :

$$[A] = \begin{bmatrix} 3 & 2 & 0 & 2 & 0 \\ 2 & 3 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 3 & 0 & 2 \\ 2 & 1 & 0 & 3 & 1 \\ 0 & 0 & 2 & 1 & 3 \end{bmatrix}$$

Cette matrice d'appartenance globale regroupe le nombre total d'occurrences de regroupement d'une paire {k, l} de stimuli dans une même catégorie. On l'appelle également matrice de co-occurrence.

#### b. Transformation des données brutes

##### Sur les objets

La matrice d'appartenance globale n'est pas immédiatement exploitable pour un traitement statistique permettant de représenter de manière adéquate les données récoltées au cours du test de catégorisation libre.

Une transformation de la matrice d'appartenance globale [A] en une matrice de dissimilarité [D] est nécessaire ([Koe05, Nos07]) :

$$[D] = [1] - \frac{[A]}{N} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N ([1] - [a^i]) \quad (3.3)$$

D'un point de vue mathématique, les coefficients  $d_{kl}$  (dissimilarités) peuvent être des dissemblances, des distances, des distances additives ou des distances ultramétriques (le lecteur peut se référer à Dodge [Dod04] ou Poitevineau [Poi09] pour plus de détails).

En poursuivant notre exemple, [D] s'écrit alors :

$$[D] = \begin{bmatrix} 0 & 0.33 & 1 & 0.33 & 1 \\ 0.33 & 0 & 1 & 0.67 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0.33 \\ 0.33 & 0.67 & 1 & 0 & 0.67 \\ 1 & 1 & 0.33 & 0.67 & 0 \end{bmatrix}$$

Ainsi, dans le cas général, si deux stimuli ont été catégorisés N fois ensemble, leur dissimilarité est nulle. Dans le cas contraire, s'ils n'ont jamais été regroupés ensemble, leur dissimilarité est égale à 1.

##### Sur les sujets

La matrice de dissimilarité [D] doit être constituée à partir d'un échantillon de sujets homogènes, sous peine de pénaliser la lisibilité des résultats. Une transformation des matrices d'appartenance individuelles en une matrice de dissimilarité des sujets est nécessaire pour apprécier l'homogénéité de leurs réponses. Pour ce faire nous reprenons une construction reposant sur l'indice de Rand (cf. [NC05]). La matrice de dissimilarité des sujets est notée [S] et ses éléments  $s_{ij}$ , dissimilarité entre les sujets i et j, s'expriment comme suit ([Maf99, Nos07]) :

$$s_{ij} = 1 - R(P_i, P_j), \quad \forall i, j \in [1, N] \quad (3.4)$$

L'indice de Rand  $R(P_i, P_j)$  est une mesure du pourcentage de concordance entre deux partitions  $P_i$  et  $P_j$  et s'exprime comme suit [NC05] :

$$R(P_i, P_j) = \frac{a + d}{M}, \quad \forall i, j \in [1, N] \quad (3.5)$$

Où :

- a est le nombre de paires possibles de stimuli se retrouvant dans la même catégorie dans chacune des partitions  $P_i$  et  $P_j$  ;



- d est le nombre de paires possibles de stimuli se retrouvant dans deux catégories différentes dans les partitions  $P_i$  et  $P_j$  ;
- M est l'ensemble des paires possibles.

En définitive,  $s_{ij}$  mesure pour deux sujets différents la proportion de groupements différents de stimuli par rapport à l'ensemble des groupements possibles. Par construction, [S] est une matrice carrée de taille  $N \times N$ .

En poursuivant notre exemple, [S] s'écrit :

$$[S] = \begin{bmatrix} 0 & 0.2 & 0.4 \\ 0.2 & 0 & 0.4 \\ 0.4 & 0.4 & 0 \end{bmatrix}$$

Plus les sujets auront formé des partitions proches, plus leur dissimilarité sera proche de 0. A l'inverse, des sujets ayant effectué des partitions totalement différentes auront une dissimilarité maximale égale à 1.

### c. Quelle technique d'analyse ?

Principalement deux types d'analyse peuvent être effectuées sur la matrice [D] : les échelonnements multidimensionnels (couramment noté EMD – en anglais MDS pour MultiDimensional Scaling) ou les analyses arborées (arbres additifs, ou arbres hiérarchiques) :

- **Les échelonnements multidimensionnels** ont pour but de rechercher un espace de faible dimension dans lequel n points vont représenter les n objets étudiés. Les distances entre chaque point de l'espace sont censées représenter au mieux les dissimilarités originales figurant dans [D] [CC01]. L'hypothèse est que chaque dimension de l'espace peut être expliquée par une dimension psychologique, la suite de l'analyse consistant à inférer les coordonnées des points de l'espace avec les métriques associées aux objets étudiés afin d'expliquer les dimensions. Ce type d'analyse est beaucoup utilisé dans le domaine de la qualité sonore, notamment pour traiter les données provenant de tests de comparaison par paires (par exemple [CC76, Bar08, Tro09, PK11], etc.). On peut également l'utiliser pour traiter des données provenant de tests de catégorisation libre (par exemple [Maf99, Gua07, PK11], etc.).
- **Les analyses arborées « additives »** visent à former des arbres dans lesquels les sommets représentent les objets, et la longueur des arêtes entre les sommets représentent les distances entre objets. Les arbres additifs tentent plus de déterminer des relations entre les objets plutôt que des dimensions perceptives sous-tendant l'échelonnement d'objets. L'arbre additif issu du calcul effectué à partir de la matrice [D] est directement interprétable en termes de traits communs et de traits distincts entre les objets [Guy96]. En coupant l'arbre au niveau d'une arête, on constitue des familles d'objets. Ce type d'analyse est beaucoup employé pour exploiter les données issues de tests de catégorisation libre (par exemple [Guy96, Maf99, Gua03], etc.).
- **Les analyses arborées « hiérarchiques »** sont similaires aux analyses arborées « additives ». Elles visent cependant à former des arbres hiérarchiques dont la construction à partir de [D] passe par un regroupement d'objets *via* un processus itératif. L'ensemble des regroupements effectués peut alors être représenté sur un dendrogramme (arbre hiérarchique) sur lequel on reporte en abscisse (sur un dendrogramme horizontal) ou en ordonnée (sur un

dendrogramme vertical) la distance séparant les objets rassemblés. L'algorithme pilotant le processus itératif produit une matrice d'agrégation dans laquelle figurent les distances reportées sur le dendrogramme. Il s'agit de distances ultramétriques (cf. [Dod04, Poi09]). Ce type d'analyse est couramment employé pour traiter des données issues de tests de catégorisation libre (par exemple [Hou03, Koe05, Nos07], etc.).

De manière générale, on peut, sur des données issues de catégorisation libre, effectuer soit un EMD, soit une analyse arborée. Toutefois, comme l'indiquent Susini *et al.* [SMWA98], la nature des stimuli guide le choix de l'analyse. Avec un corpus de stimuli homogène (bruit d'intérieur de voitures) Susini *et al.* indiquent qu'un EMD est plus adapté, résultant en un espace perceptif continu. Avec un corpus hétérogène (différents bruits de l'environnement – autoroute, rue, aéroport, etc.), l'espace est de nature catégorielle et une analyse arborée peut alors paraître plus adaptée. Dans notre cas, notre corpus de stimuli est à la fois homogène dans le sens où il regroupe uniquement des bruits de passage de véhicules routiers, et hétérogène dans le sens où il s'agit de différents véhicules routiers. Nous nous situons donc dans un cas intermédiaire par rapport à Susini *et al.* [SMWA98]. Un EMD, par l'estimation du nombre de dimensions permet de réaliser des inférences avec des métriques pour identifier les attributs qui sous-tendent ces dimensions. Une analyse arborée renseigne plus sur la structure des objets et leurs relations de filiation. Ces deux types de technique sont alors à même d'identifier différents aspects des mêmes données, et les interprétations sont complémentaires [Maf99]. Dans l'immédiat, nous souhaitons avoir une bonne connaissance de la structure perceptive de notre corpus de bruits de passage. **En relation avec notre objectif immédiat, et ce qui a été dit ci-dessus, nous orientons notre choix vers les analyses arborées.**

Nous avons dit plus haut que pour constituer des catégories dans un arbre additif, il suffit de couper une arête de l'arbre, ce qui divise l'arbre en deux catégories. En faisant le nombre de coupures que l'on désire, on forme donc le nombre de catégories que l'on désire. Il n'y a pas de manière unique de constituer les catégories, et il n'y a pas une manière unique de hiérarchiser les catégories obtenues. Au contraire, dans un arbre hiérarchique, fixer le nombre des catégories (couper le dendrogramme à une distance d'agrégation donnée) fixe les catégories elles-mêmes et les catégories de différents niveaux s'emboîtent les unes dans les autres de manière hiérarchique [Poi09]. La classification hiérarchique fournit de plus des critères d'analyse développés permettant de déterminer par exemple la hauteur de coupure optimale du dendrogramme. **Pour ces raisons nous orientons notre choix vers une analyse arborée hiérarchique, et plus précisément une classification ascendante hiérarchique (CAH), pour traiter les données issues de notre test de catégorisation libre.**

#### *d. La classification ascendante hiérarchique*

La constitution d'un arbre hiérarchique est un processus itératif réalisé en trois grandes étapes [Dod04] :

- (1) Repérage de la paire d'objets  $\{k, l\}$  telle que la dissimilarité les séparant soit la plus petite ;
- (2) Agrégation de la paire d'objets  $\{k, l\}$  en un seul élément  $\alpha$ , selon une méthode d'agrégation choisie, et générer une nouvelle matrice de dissimilarité en calculant notamment les dissimilarités entre  $\alpha$  et le reste des objets ;
- (3) Répétition des étapes (1) et (2) jusqu'à ce que les  $n$  objets soient réunis dans une même catégorie.

## Choix de la méthode d'agrégation.

Parmi les méthodes d'agrégation généralement proposées dans les logiciels de traitement de données, on retrouve les 7 suivantes<sup>46</sup> :

- **Méthode du lien simple (simple linkage)** : La distance entre deux catégories est déterminée entre les deux objets les plus proches dans les différentes catégories ;
- **Méthode du diamètre (complete linkage)** : La distance entre deux catégories est déterminée par la plus grande distance entre deux objets des différentes catégories ;
- **Méthode de la moyenne non pondérée (UPGMA)** : La distance entre deux catégories est calculée comme la distance moyenne entre tous les objets deux à deux dans les deux catégories différentes ;
- **Méthode de la moyenne pondérée (WPGMA)** : Il s'agit du même calcul que pour la méthode précédente à cela près que les tailles respectives des catégories (i.e. le nombre d'objets qu'elles comportent) est utilisé comme pondération dans le calcul des moyennes ;
- **Méthode du centroïde non pondéré (UPGMC)** : Le centroïde d'une catégorie est en quelque sorte le centre de gravité de la catégorie. La distance entre deux catégories est calculée comme la distance entre les centroïdes des deux catégories. Pour utiliser cette méthode la matrice doit être euclidienne<sup>47</sup> ;
- **Méthode du centroïde pondéré (WPGMC)** : Il s'agit du même calcul que la méthode précédente, à la différence qu'une pondération est utilisée pour prendre en compte la taille des catégories. Pour utiliser cette méthode, la matrice doit être euclidienne ;
- **Méthode de Ward** : Cette méthode est différente des autres. Elle tente de minimiser la somme des carrés de tous les couples possibles pouvant être formés à chaque étape. Pour utiliser cette méthode, la matrice doit être euclidienne.

Sous réserve du respect d'hypothèses, à partir de [D], on pourrait donc effectuer différentes classifications ascendantes hiérarchiques. Toutefois, certaines classifications représentent mieux les données que d'autres. Il existe des indices pour quantifier la qualité de la représentation d'un arbre hiérarchique par rapport aux données originales. Parmi les indices récapitulés par Gordon [Gor99], certains d'entre eux ont auparavant été utilisés dans des travaux similaires ([Hou03, Ala09, Tro09]). Il s'agit du coefficient de corrélation cophénétique et de l'indice  $\gamma$  de Goodman-Kruskal.

**Le coefficient de corrélation cophénétique C** est une mesure de la distorsion entre la matrice originale [D] et la matrice d'agrégation issue de la construction du dendrogramme (matrice de distance ultramétrique [H] d'éléments  $h_{kl}$ ). On l'exprime par la relation suivante :

$$C = \frac{\sum_{k,l} (d_{kl} - \bar{d})(h_{kl} - \bar{h})}{\sqrt{\sum_{k,l} (d_{kl} - \bar{d})^2 \sum_{k,l} (h_{kl} - \bar{h})^2}} \quad (3.6)$$

<sup>46</sup> Issues du manuel d'utilisation de Statistica<sup>®</sup> (développé par Statsoft). Manuel en ligne disponible sur <[www.statsoft.com](http://www.statsoft.com)>

<sup>47</sup> Une matrice [M] d'éléments  $m_{ij}$  est euclidienne si les valeurs propres de la matrice de Torgerson [W] d'éléments  $w_{ij} = -\frac{1}{2} \left( m_{ij}^2 - \frac{1}{n} \sum_i m_{ij}^2 - \frac{1}{n} \sum_j m_{ij}^2 + \frac{1}{n^2} \sum_{i,j} m_{ij}^2 \right)$  sont positives ou nulles [Sap90].

Où  $\bar{d}$  est la moyenne des  $d_{kl}$  et  $\bar{h}$  est la moyenne des  $h_{kl}$ .

C varie entre 0 et 1. Plus il est proche de 1, plus l'adéquation entre la représentation arborée issue de la CAH et les données originales est importante.

**L'indice  $\gamma$  de Goodman-Kruskal** est basé sur le nombre de paires concordantes et de paires discordantes entre objets de [D] et de [H]. Pour la comparaison de deux paires d'objets  $\{k, l\}$  et  $\{m, n\}$ , la concordance est exprimée par  $d_{kl}R_d d_{mn}$  et  $h_{kl}R_h h_{mn}$ , avec  $R_d$  la relation d'ordre (i.e. supérieur ou inférieur) entre deux paires d'objets  $\{k, l\}$  et  $\{m, n\}$  de [D], et  $R_h$  la relation d'ordre entre deux paires d'objets  $\{k, l\}$  et  $\{m, n\}$  de [H]. Il y a concordance si :

$$(R_d, R_h) = (<, <) \text{ ou } (R_d, R_h) = (>, >) \quad (3.7)$$

Il y a discordance si :

$$(R_d, R_h) = (>, <) \text{ ou } (R_d, R_h) = (<, >) \quad (3.8)$$

L'indice de Goodman-Kruskal s'exprime alors de la manière suivante :

$$\gamma = \frac{S_- - S_+}{S_- + S_+} \quad (3.9)$$

Où  $S_-$  et  $S_+$  sont respectivement le nombre de paires concordantes et le nombre de paires discordantes.  $\gamma$  varie entre 0 et 1 et plus il est proche de 1 plus l'adéquation entre les données originales et leur représentation arborée est grande.

### Détermination de la partition optimale

Couper le dendrogramme à une hauteur donnée fournit une partition de l'ensemble des objets. Le niveau de coupure est difficile à déterminer, et des indices ont été développés pour aider la décision. Ainsi, il est utilisé les indices de Rand brut, noté  $R$ , et de Rand corrigé, noté  $R_c$  (par exemple [Hou03, Tar06, Nos07]). On les définit comme suit :

$$R(P, Q) = \frac{a + d}{a + b + c + d} \quad (3.10)$$

Où :

- P et Q sont deux partitions différentes des n objets catégorisés ;
- a est le nombre de paires d'objet se trouvant dans la même catégorie dans P et Q ;
- b est le nombre de paires d'objets se trouvant dans une même catégorie dans P, et dans une catégorie différente dans Q ;
- c est le nombre de paires d'objets se trouvant dans une même catégorie dans Q et dans des catégories différentes dans P ;
- d est le nombre de paires d'objets se retrouvant dans des catégories différentes dans P et Q.

$$R_c(P, Q) = \frac{a - w}{a - w + (b + c)/2} \quad (3.11)$$

Avec :

$$w = \frac{(a + b)(a + c)}{a + b + c + d} \quad (3.12)$$

Ces deux indices varient entre 0 et 1. Si leur valeur est nulle, cela signifie que les deux partitions comparées sont totalement discordantes. Si leur valeur vaut 1, cela signifie au contraire que les deux partitions comparées sont identiques. L'indice de Rand corrigé a été proposé car l'indice de Rand brut n'est pas forcément nul lorsqu'une correspondance entre deux partitions aléatoires n'est pas due au hasard [NC05].

Dans le cas de la CAH menée sur la matrice [D] de dissimilarité entre objets, il s'agira de comparer pour chaque sujet, la partition  $Q_i$  (du sujet  $i$ ) et la partition  $P$ , obtenue à partir de l'ensemble des réponses des sujets et donnée par la CAH, à tous les niveaux de catégorisation possible (nous avons 57 stimuli, donc il y aura 57 niveaux de catégorisation possible). Ensuite, pour chaque niveau de catégorisation, nous moyennons les valeurs de ces indices  $R_c(P, Q_i)$  sur le nombre de sujets, pour obtenir l'indice de Rand corrigé (ou brut) moyen, selon :

$$\overline{R_c(P)} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N R_c(P, Q_i) \quad (3.13)$$

Dans la pratique, il s'agit de tracer ces indices moyens, en fonction des niveaux de catégorisation possibles. Le nombre optimal de catégories (donc la partition optimale) est obtenue lorsque ces indices atteignent leur maximum ([Koe05, Nos07]).

### 1.1.2.2. Analyse linguistique

Nous l'avons évoqué au cours du Chapitre 1, l'objectif de l'analyse linguistique est d'identifier les attributs pertinents que les sujets ont utilisés dans leur tâche de catégorisation libre. Pour ce genre de travaux cela est réalisé en deux étapes principales :

- (1) **Détermination des outils linguistiques que les sujets ont utilisés au cours de la tâche de verbalisation libre.** Pour cela, une analyse linguistique complète est menée vis-à-vis de la morphologie (la construction des mots), de la syntaxe (la construction des phrases) et de la sémantique (le sens des expressions). Cette étape implique notamment un comptage des mots, adjectifs et constructions verbales en s'attachant notamment à repérer les clauses relatives et marques de la personne (pour plus de détails, le lecteur peut se référer à [DGR06] ou [GD06]) ;
- (2) **Liaison de ces outils linguistiques avec les catégories de la partition optimale fournie par la CAH.**

### 1.1.2.3. Choix des prototypes

Une fois que les catégories de la partition optimale sont obtenues après CAH appliquée à la matrice [D], les prototypes sont simplement déterminés en comptant combien de fois chaque stimulus a été choisi comme élément le plus représentatif (cf. [TSPL08]). Pour les stimuli ayant été choisis plusieurs fois comme élément le plus représentatif, la moyenne des notes de représentativité est calculée. En dernier lieu, cela peut nous permettre de discriminer deux bruits de passage d'une même catégorie ayant été désignés comme élément le plus représentatif le même nombre de fois.

## 1.1.3. Résultats

### 1.1.3.1. CAH

Les 58 sujets ont en moyenne regroupé les 57 stimuli en 9 catégories (minimum 3, maximum 24 catégories). L'ensemble des stimuli a été le plus souvent regroupé en 7 catégories par les sujets.

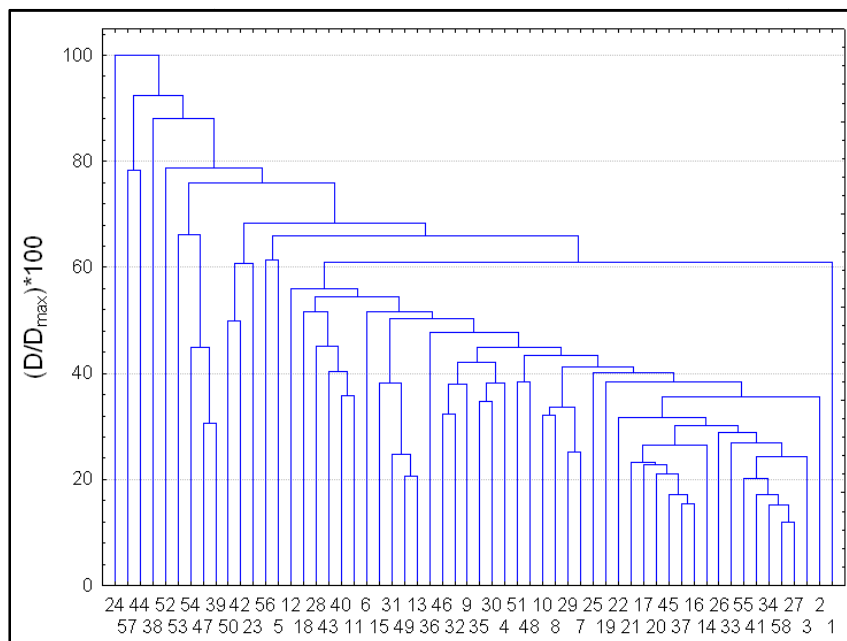
*a. Sur les sujets*

Avant de poursuivre, nous souhaitons déterminer si les sujets forment un ensemble homogène. En cas de présence de sous-groupes de sujets, nous devons déterminer les causes de cette partition et le cas échéant effectuer l'analyse des catégories sur ces différents sous-groupes. Une CAH pratiquée sur la matrice des sujets [S] au moyen de la méthode de la moyenne pondérée, qui maximise le coefficient de corrélation cophénétique et l'indice  $\gamma$  (cf. partie gauche du Tableau 3.1 dédiée à la CAH menée sur la matrice [S]), nous permet d'observer qu'il n'existe pas de sous-groupes de sujets (cf. Figure 3.1).

	[S]				[D]			
	Lien simple	diamètre	Moyenne pondérée	Moyenne non pondérée	Lien simple	diamètre	Moyenne pondérée	Moyenne non pondérée
C	0.89	0.73	<b>0.93</b>	0.87	0.87	<b>0.89</b>	0.91	0.89
$\gamma$	0.73	0.62	<b>0.78</b>	0.74	0.54	<b>0.88</b>	0.70	0.55

**Tableau 3.1 : Coefficient de corrélation cophénétique (C) et indice  $\gamma$  de Goodman-Kruskal pour les CAH effectuées sur les matrices [S] et [D]<sup>48</sup>.**

Le dendrogramme des sujets ne faisant pas apparaître de sous-groupes, nous poursuivons l'analyse sur l'ensemble des sujets.



**Figure 3.1 : Dendrogramme des sujets. D est la distance ultramétrique exprimée en fonction des sujets désignés par un chiffre.**

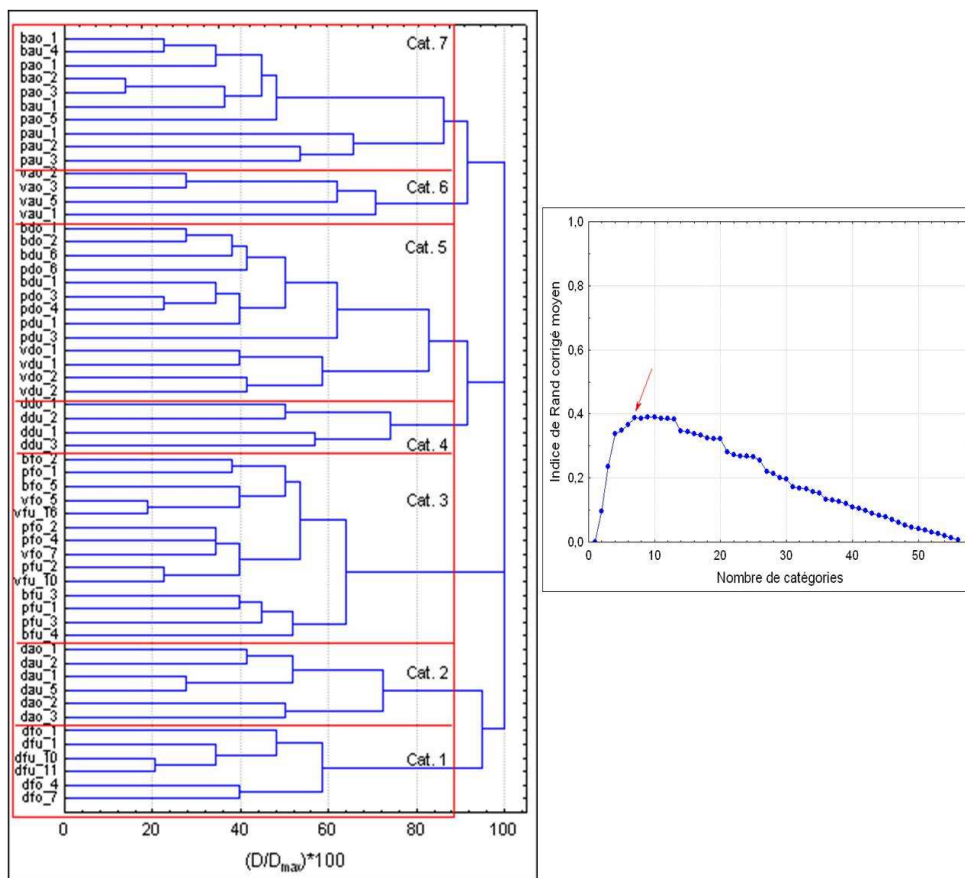
*b. Sur les objets*

En accord avec les valeurs des coefficients C et  $\gamma$  données dans la partie droite du Tableau 3.1, la CAH est effectuée sur la matrice des objets [D] au moyen de la méthode du diamètre. Le dendrogramme résultant ainsi que le tracé de l'indice de Rand corrigé moyen

<sup>48</sup> Notons que les matrices [S] et [D] ne sont pas euclidiennes. Pour cette raison, nous n'avons pas fait figurer les résultats pour les méthodes de Ward, du centroïde, et du centroïde pondéré.

sont donnés dans la Figure 3.2. Notons que C et  $\gamma$  sont élevés, ce qui témoigne d'une bonne adéquation entre la représentation sous-forme de dendrogramme (Figure 3.2) et les dissimilarités originales.

L'indice de Rand corrigé atteint son maximum à 7 catégories, marque un palier, puis diminue. Cela suggère une coupure du dendrogramme en 7 catégories (indiquées par les rectangles rouges sur la Figure 3.2).



**Figure 3.2 : Dendrogramme des objets (à gauche) et évolution de l'indice de Rand corrigé moyen en fonction du niveau de catégorisation (à droite). D est la distance entre objets.**

**NB :** A partir de maintenant, nous utiliserons un code unique pour nous référer aux différents bruits de passage (ce code est utilisé dans la Figure 3.2 pour repérer les différents bruits de passage). Le code prend la forme xyz\_N, avec :

- x = b pour bus, d pour deux-roues, p pour poids lourd, v pour véhicule léger ;
- y = a pour allure accélérée, d pour allure décélérée, et f pour allure stabilisée ;
- z = o pour rue en tissu ouvert, et u pour rue en « U »
- N est une numérotation arbitraire pour différencier différents stimuli ayant en commun les mêmes types de véhicules, d'allures et de morphologies urbaines.

La composition des catégories est résumée dans le Tableau 3.2. A ce stade de l'analyse nous pouvons d'ores et déjà entrevoir une structuration des catégories par les critères *a priori* « type de véhicules » et « type d'allures ». Le critère « type de morphologies » ne semble pas avoir été un critère prioritaire pour former les groupes de bruits de passage de véhicules routiers urbains. Ce premier résultat mérite d'être mis en lumière avec l'analyse linguistique.

Nous avons également fait figurer dans le Tableau 3.2 la durée moyenne et écart-type de la durée des bruits de passage pour chacune des 7 catégories. Nous pouvons voir qu'il y

a une variabilité de la durée des stimuli dans chacune des catégories, ce qui laisse supposer que la durée des bruits de passage n'a pas influencé la tâche de catégorisation comme nous en avons fait l'hypothèse.

### 1.1.3.2. Analyse linguistique et prototypes

L'analyse linguistique complète a été réalisée par D. Dubois dans le cadre du projet de recherche NOISI-EXPO financé par l'ADEME (contrat n°0866C0066). L'analyse complète ne sera donc pas décrite dans cette thèse. Toutefois, pour de plus amples détails, le lecteur peut se référer au rapport complet [EEO10], ou au papier de Morel *et al.* [MMDP12].

L'analyse linguistique est résumée dans le Tableau 3.2 en faisant le lien avec les catégories issues de la CAH. Dans ce tableau nous avons également fait figurer le prototype de chaque catégorie. Les données verbales récoltées ont été regroupées en 4 items : identification de la source, identification du mouvement, description, évaluation. Ces regroupements sont pertinents par rapport à l'analyse effectuée et par rapport aux connaissances accumulées à partir de précédents travaux employant des analyses linguistiques (cf. Chapitre 1 , section 3.4).

Les spectrogrammes auditifs des prototypes des différentes catégories sont donnés en Figure 3.3. Les spectrogrammes auditifs sont établis par le logiciel dBsonic<sup>®</sup>, sur la base des travaux de Terhardt<sup>49</sup> concernant le traitement de l'information auditive par le système auditif et cognitif humain (pour de plus amples détails, le lecteur peut se référer à [dBS05] et [Tro09] pour un exemple d'utilisation). Il s'agit de représentations temps-fréquence auditivement adéquates des signaux, dont la largeur de bande d'analyse fréquentielle est non constante (et exprimée en Barks) et en adéquation avec la sélectivité fréquentielle de l'oreille humaine.

---

<sup>49</sup> TERHARDT E. Gestalt principles and music perception. **In:** YOST W.A. et WATSON C.S. (éd) Perception of complex auditory stimuli. Hillsdale, USA : Erlbaum, 1987, pp. 157-166. (cité dans [Tro09]).

TERHARDT E. From speech to language: on auditory information processing. **In:** SCHOUTEN M.E.H. (éd) The auditory processing of speech: from sounds to words. Berlin, Germany: Mouton de Gruyter, 1992, pp. 363-380. (cité dans [Tro09]).



	Analyse statistique			Analyse linguistique			
	Composition	Prototype	Durée moyenne (écart-type)	Identification source	Identification mouvement	Description	Evaluation
Cat. 1 (6 stimuli)	Deux-roues à allure stabilisée	dfo_4	3.9(0.9)s	« scooter » « mobylettes » « motos »	« elles passent » « la conduite est fluide »	« ronflement » « pas très bruyant » « plus grave »	...
Cat. 2 (6 stimuli)	Deux-roues à allure accélérée	dao_2	4.7(1.0)s	« petites mobylettes » « véhicules »	« elles démarrent »	« assez élevé » « plus strident » « plus aigu »	« plus désagréable »
Cat. 3 (14 stimuli)	Bus, poids lourds et véhicules légers à allure stabilisée	vfo_5	4.5(1.1)s	« bus » « voitures »	« ne font que passer » « ils roulent » « vitesse de croisière »	« ni grave, ni aigu » « classique » « assez léger »	« pas vraiment gênant » « supportable »
Cat. 4 (4 stimuli)	Deux-roues à allure décélérée	ddo_1	3.9(1.1)s	« motos » « mobylettes »	« qui freinent » « qui s'arrêtent »	« un peu grave » « plus grave » « peu bruyant »	...
Cat. 5 (13 stimuli)	Bus, poids lourds et véhicules légers à allure décélérée	pdo_6	5.5(1.3)s	« bus » « camion » « poids lourds »	« ralentissement » « freinage » « ils s'arrêtent »	« ronronnement » « ronflement » « ça tousse » « pschiiiiit » « tchouuuuu »	...
Cat. 6 (4 stimuli)	Véhicules légers à allure accélérée	vau_5	4.9(1.2)s	« véhicules » « voitures »	« départ » « qui démarrent »	« léger » « ne pétaradent pas »	« supportable »
Cat. 7 (10 stimuli)	Bus et poids lourds à allure accélérée	pao_1	5.8(1.0)s	« bus » « véhicules lourds »	« départ » « qui partent »	« ronflement » « pffff »	...

**Tableau 3.2 : Tableau synthétique présentant les compositions des catégories, et leur prototype, ainsi que les principaux résultats de l'analyse linguistique en liaison avec les catégories.**

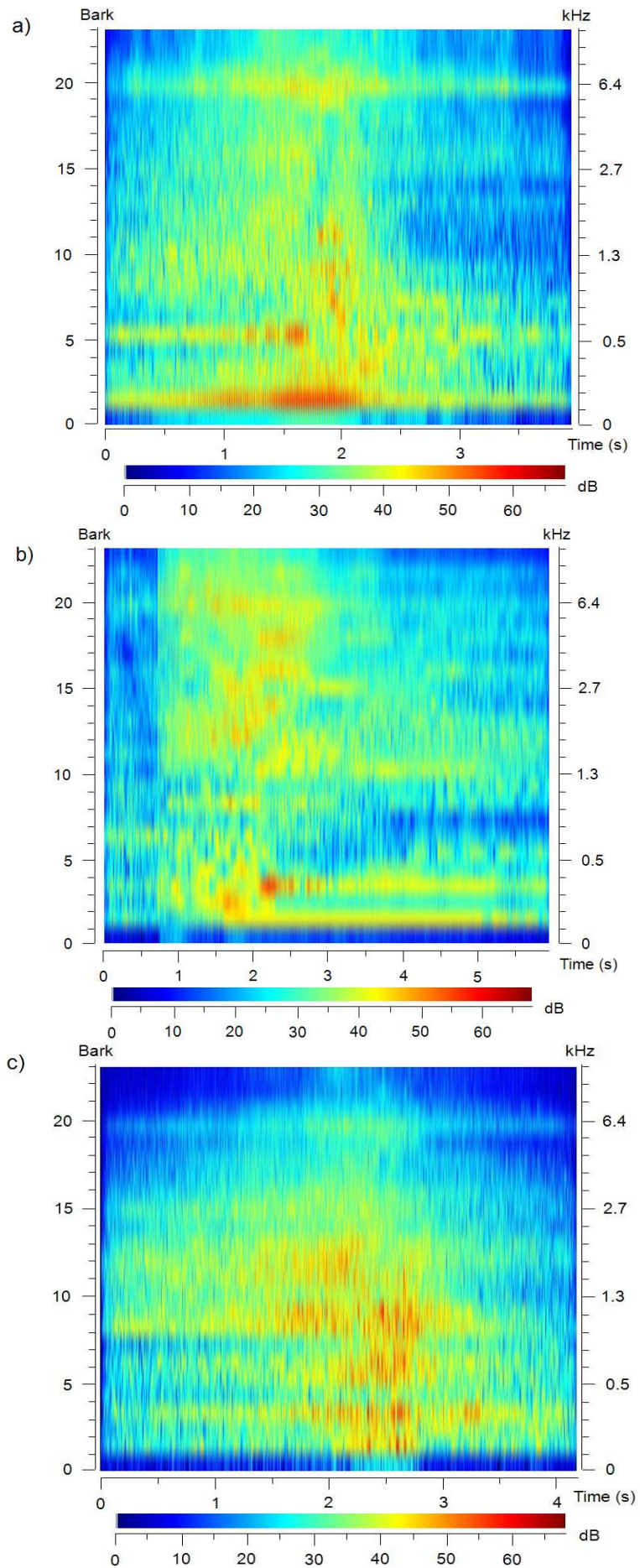


Figure 3.3 : Spectrogrammes auditifs des prototypes. a) dfo\_4 (Cat. 1), b) dao\_2 (Cat. 2), c) vfo\_5 (Cat. 3).

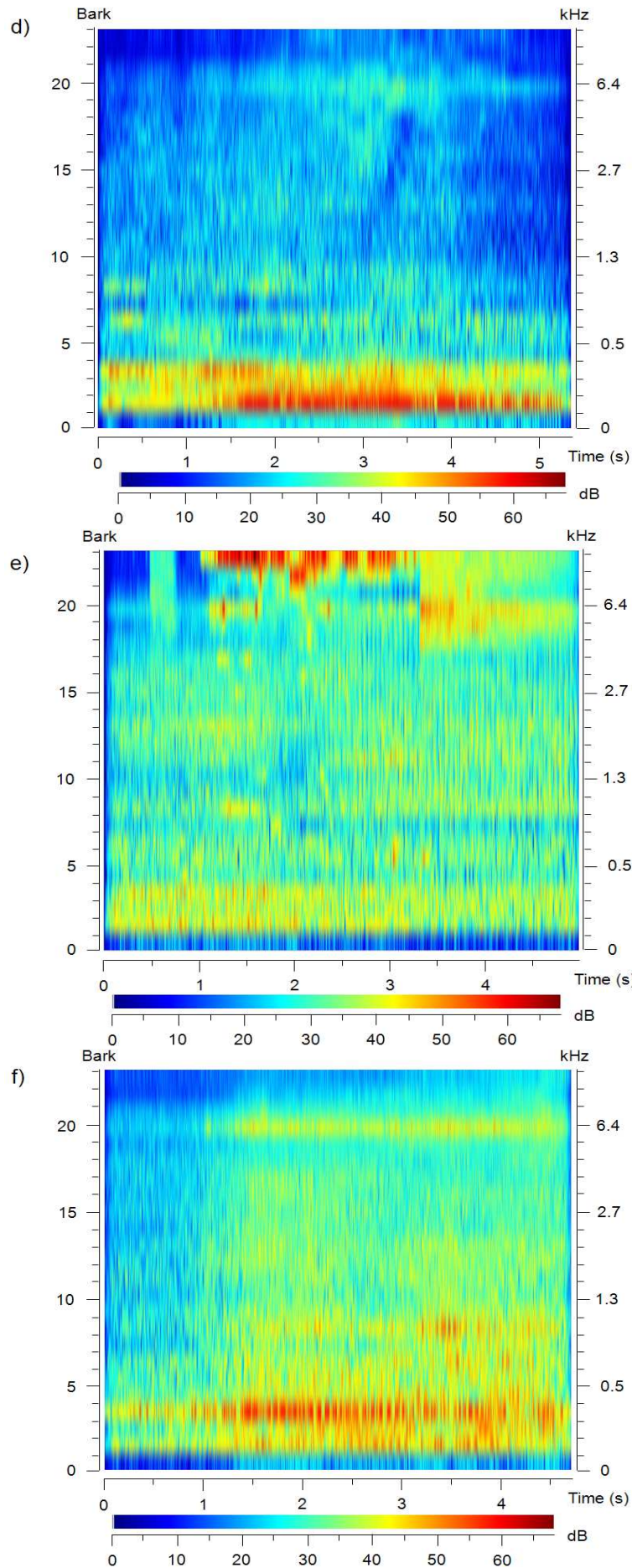
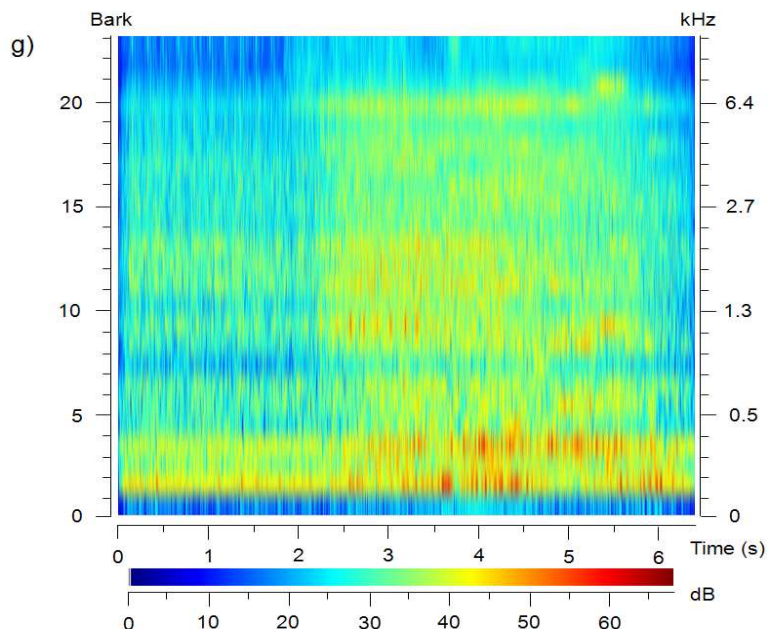


Figure 3.3 (suite) : Spectrogrammes auditifs des prototypes. d) ddo\_1 (Cat. 4), e) pdo\_6 (Cat. 5), f) vau\_5 (Cat. 6).



**Figure 3.3 (fin) : Spectrogramme auditif des prototypes. g) pao\_1 (Cat. 7).**

Ces spectrogrammes auditifs présentent les niveaux de pression sonore (dégradé de couleur) en fonction de la fréquence (découpage en Hz à droite ou en Barks à gauche) sur la durée totale du bruit de passage (en abscisse). De cette manière nous disposons des informations temporelles, fréquentielles et d'intensité sur le même graphique. Nous pouvons d'ailleurs voir des caractéristiques communes émerger sur ces graphiques. Nous constatons par exemple la présence de beaucoup d'énergie entre 1 et 2 Barks puis 3 et 4 Barks, et ce quasiment pour l'ensemble des prototypes. Ce point commun pourrait être relié au bruit du moteur, qui comme nous l'avons évoqué au Chapitre 1 possède des caractéristiques basses fréquences. Nous voyons également que le prototype dao\_2 de la catégorie 2 possède beaucoup d'énergie dans les hautes fréquences, par rapport à certains autres prototypes, ce qui est en accord avec la description donnée par les sujets (cf. Tableau 3.2).

#### 1.1.4. Discussion

Les durées moyennes et écart-types des bruits de passage de chaque catégorie figurant dans le Tableau 3.2 indiquent à première vue que la durée n'a pas influencé le processus de catégorisation. Cela nous est confirmé par l'analyse linguistique qui révèle très peu de descriptions liées à la durée des stimuli (3% des adjectifs employés par les sujets pour décrire les bruits de passage sont liés à la durée de ces derniers, tels que « court », « long », « éphémère » [EEO10]). Ces deux éléments réunis nous permettent de confirmer notre hypothèse de départ, à savoir que d'autres attributs des bruits de passage sont prépondérants devant la durée de ces derniers dans le processus de catégorisation libre.

L'analyse linguistique nous confirme également la structuration des catégories par les critères *a priori* « type de véhicules » et « type d'allures ». De manière générale peu de références sont faites au « type de morphologies » même si cela a été perçu par les sujets : « je suis au cœur de la ville », « ce n'est pas vraiment le centre-ville ». Le critère « type de morphologies » n'est donc pas un critère prioritaire pour discriminer les différents bruits de passage de véhicules routiers.

Les catégories résultantes sont alors structurées par les critères *a priori* « type de véhicule » et « type d'allure ». Cependant, on voit que cette structuration n'est pas simple. En effets, les sujets se sont basés tantôt sur l'identification de la source de bruit (relié au « type de véhicule ») tantôt sur l'identification du mouvement (relié au « type d'allure »). C'est ainsi que les deux-roues sont discriminés des autres véhicules en premier lieu, puis

plus finement discriminés entre eux par leur allure (catégories 1, 2 et 4), tandis que les bus, poids lourds et véhicules légers sont traités de la même manière lorsqu'ils sont à allure stabilisée et décélérée (catégories 3 et 5). En allure accélérée, les véhicules légers constituent une catégorie à part (catégorie 6). Nous voyons également que malgré l'identification de deux différentes sources de bruit, les bus et poids lourds figurent toujours dans la même catégorie, cela confirme qu'en plus de l'hypothèse de proximité en termes de caractéristiques acoustiques faite au Chapitre 1, ces deux véhicules partagent une proximité perceptive.

D'une manière générale, peu d'évaluations ont été faites par les sujets à propos des bruits de passage (cf. Tableau 3.2). Lorsque c'est le cas il s'agit plutôt de jugements négatifs (catégorie 2) ou d'acceptabilité (cf. catégories 3 et 6). Ces évaluations que les sujets font des bruits de passage semblent être liées à des aspects spectraux. Par exemple, pour les sujets, l'aspect aigu des deux-roues en accélération les rend « plus stridents » que les autres véhicules et les sujets les jugent alors « plus désagréables ». En comparaison, les bus, poids lourds et véhicules légers en allure stabilisée sont « ni grave, ni aigu » et les sujets les jugent supportables. Ces jugements ne semblent toutefois pas uniquement liés aux aspects spectraux, mais également aux aspects temporels. En effet les véhicules qui ne font que passer avec une évolution temporelle régulière et continue sont mieux tolérés que les véhicules en accélération ou décélération. Barbot *et al.* [BLC08] ont trouvé des résultats similaires en étudiant des bruits de survol d'avion. En effet, les sujets arrivent mieux à gérer un bruit de survol stable (donc prévisible) qu'un bruit de survol intermittent (et donc imprévisible).

Les résultats que nous avons trouvés confirment les résultats de précédents travaux s'inscrivant dans le même cadre théorique (par exemple [DGR06, Gua07]), dans la mesure où les différentes catégories sont bâties autour de propriétés partagées par les différents stimuli et également autour d'une valeur sémantique qui leur est attribuée par les sujets.

Nous avons, à l'issue d'une analyse statistique de l'ensemble des partitions, associée à une analyse linguistique des données verbales recueillies, proposé une typologie perceptive et cognitive de bruits de passage de véhicules routiers constituée de 7 catégories structurées autour des critères physiques *a priori* « type de véhicules » et « type d'allures ». Il convient dans un deuxième temps de valider cette proposition en la confrontant aux résultats d'un deuxième test d'écoute utilisant un protocole différent.

## 1.2. Comparaison par paires et dissimilarité

Selon Davis et Smith [DS05] il est toujours intéressant de confirmer les résultats d'une expérience par une autre expérience qui a lieu dans différentes conditions et avec différents participants. De cette manière nous éprouvons dans quelle mesure les résultats obtenus ne sont pas un artefact de la procédure expérimentale et pourraient être généralisés. Nous souhaitons par cette deuxième expérience tester nos conclusions concernant la structure de dissimilarité entre les bruits de passage de véhicules routiers étudiés (1) en adoptant une procédure de comparaison par paire avec évaluation continue de la dissimilarité et (2) en impliquant des sujets différents.

Nous faisons l'hypothèse d'une part que les sujets exécutent les deux tâches (catégorisation libre et évaluation continue de la dissimilarité par la méthode de comparaison par paires) en fonction des structures de dissimilarité telles qu'elles sont présentes dans leur mémoire de long-terme et que d'autre part, comme nous l'avons évoqué en section 1.1.2.1.c, que la nature de notre corpus de stimuli nous permet d'effectuer un EMD qui est, nous l'avons dit, complémentaire des analyses arborées.

## 1.2.1. Méthode expérimentale

### 1.2.1.1. Stimuli

L'inconvénient majeur des procédures de comparaison par paires est que le nombre de stimuli doit être faible, étant donné que les sujets doivent évaluer toutes les paires possibles [PK11]. Il est donc envisageable d'utiliser nos 57 bruits de passage pour ce test. Il apparaît naturel de se baser sur les catégories perceptives et cognitives qui résultent de la CAH effectuée sur les données du test de catégorisation libre. En sélectionnant deux bruits de passage par catégories, nous aurions 14 stimuli, et donc 91 paires de stimuli, ce qui demeure envisageable.

Nous avons alors sélectionné les deux éléments les plus représentatifs de chaque catégorie (en nous basant sur les résultats de l'analyse des prototypes, cf. section 1.1.2.3). Les durées des stimuli et le niveau sonore de présentation sont conservés identiques à ceux du test de catégorisation libre (cf. section 1.1.1.1).

### 1.2.1.2. Dispositif expérimental

La passation est assurée par une interface programmée sous Labview<sup>®</sup>, adaptée de l'interface développée par Faure [Fau03] et Trollé [Tro09].

La reproduction des stimuli est assurée par le même système que celui utilisé lors du test de catégorisation libre (cf. section **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

### 1.2.1.3. Procédure

La procédure employée est adaptée de Faure [Fau03] et Trollé [Tro09]. Avant de commencer le test des instructions écrites apparaissent à l'écran :

*« Vous allez comparer différents extraits sonores présentés par paires. Ce sont différents extraits sonores de circulation routière enregistrés dans l'agglomération lyonnaise.*

*Le test comporte 91 paires d'extraits sonores. Afin de vous familiariser avec les extraits sonores qui vous seront présentés par paires, 3 extraits sonores représentatifs vous sont proposés à l'écoute au début du test. Si nécessaire, vous pourrez réécouter ces 3 extraits sonores représentatifs à tout moment au cours du test en appuyant sur le bouton à gauche en haut de l'écran.*

*Pour chaque paire, vous donnerez une note de différence sur une échelle continue allant de « 0 » à « 1 » : « 0 » = deux extraits sonores très semblables ; « 1 » = deux extraits sonores très différents. L'échelle est métrique, c'est-à-dire que pour une position maximale du curseur « 1 », les deux extraits sonores sont deux fois plus différents que pour une position du curseur au milieu de l'échelle.*

*Pour chaque paire, il vous sera également demandé d'indiquer l'extrait sonore que vous jugez le plus désagréable. Même si deux extraits vous paraissent très semblables, indiquez votre jugement de désagrément.*

*Vous pouvez jouer autant de fois que vous le désirez les deux extraits sonores de la paire et passer rapidement de l'un à l'autre des deux extraits sonores par un simple clic.*

*Avant le test, un mini-test d'essai INDEPENDANT, comportant 4 paires, vous est proposé pour vous familiariser avec l'interface graphique et les différentes fonctionnalités mentionnées ci-avant. Après validation de votre choix pour la dernière paire de cet exercice, le test commence automatiquement. »*

Dès que les sujets ont pris connaissance des instructions, un panel de 3 bruits de passage, représentatifs de l'ensemble du corpus, est diffusé. Les sujets peuvent par la suite réécouter dès qu'ils le souhaitent ces 3 bruits de passage représentatifs. De cette manière ils peuvent avoir une idée de stimuli très semblables ou très différents.

Les stimuli de chaque paire sont comparés suivant deux questions. La première question conduit à l'évaluation de la dissimilarité des deux stimuli, représentés par deux boutons sonores :

*« Comment jugez-vous ces extraits sonores ? »*

Les sujets répondent à cette question en déplaçant un curseur le long d'une échelle continue de « 0 » à « 1 » avec 10 graduations équidistantes. Aux notes extrémales sont associés deux descripteurs verbaux : « très semblables » pour la note « 0 », « très différents » pour la note « 1 ». Pour répondre à cette question, les sujets peuvent réécouter la paire de stimuli autant de fois qu'ils le souhaitent.

La deuxième question vise à comparer le désagrément sonore des deux stimuli de chaque paire, et se présente sous forme de choix forcé :

*« Quel extrait sonore jugez-vous le plus désagréable ? »*

Les sujets choisissent alors l'extrait le plus désagréable en cliquant sur l'un des deux boutons prévus à cet effet.

#### **1.2.1.4. Sujets**

25 sujets ont été recrutés au sein du laboratoire. Dix étaient des femmes, 15 étaient des hommes, âgés entre 22 et 59 ans pour une moyenne de 34 ans (écart-type = 12 ans).

Environ la moitié d'entre eux a participé au test de catégorisation libre.

La durée du test était d'environ 30 minutes.

L'expérience a eu lieu au mois de février 2010.

#### **1.2.2. Traitement et analyse des données**

Les analyses effectuées sur les données fournies en réponse à la deuxième question (comparaison par paires avec choix forcé) sont données dans l'ANNEXE D. Cette section ne concerne donc que les évaluations de dissimilarité avec utilisation d'une échelle continue.

Sur des données de dissimilarité, il est possible d'effectuer soit un EMD soit une analyse arborée (cf. section 1.1.2.1.c). Usuellement, les données de dissimilarité récoltées *via* des tests de comparaison par paires sont analysées par EMD. On considère généralement que les EMD sont soit métriques, c'est-à-dire que les données sont de vraies distances que l'on cherche à reproduire le plus exactement possible, soit non-métriques, c'est-à-dire qu'on ne cherche à rendre compte que de l'ordre des dissimilarités [Poi09]. Les EMD métriques se basent sur des données de dissimilarité correspondant à une échelle d'intervalle<sup>50</sup> ou de ratio, tandis que les EMD non-métriques se basent sur des données de dissimilarité correspondant à une échelle nominale ou ordinale [Poi09]. Bien que vérifiant les hypothèses mathématiques d'une distance, c'est usuellement un EMD non-métrique qui est appliqué aux données obtenues *via* un test de catégorisation libre (par exemple [Gua03]). Les données récoltées *via* un test de comparaison par paires font quant à elles généralement l'objet d'un EMD métrique (par exemple [Fau03, Tro09]).

---

<sup>50</sup> On considère que des données peuvent être classifiées selon 4 échelles de mesures [CC01, Poi09] : **l'échelle est nominale** lorsque les données reflètent les propriétés qualitatives des entités ; **l'échelle est ordinale** lorsque l'ordre sur les données reflète un ordre que l'on peut définir sur les entités ; **l'échelle est du niveau d'intervalle** lorsque l'on peut définir une égalité d'écart entre les entités et que cela correspond à l'égalité des différences entre les données ; **l'échelle est du niveau de rapport** lorsque que l'on peut définir l'égalité des rapports entre les entités et que cela se traduit par une égalité de rapport entre les données.

Il existe une multitude de modèles d'EMD métrique et non-métrique. Nous n'en présenterons que deux : le modèle non-métrique de Kruskal et le modèle métrique INDSCAL (Individual Difference Scaling).

### 1.2.2.1. Le modèle non-métrique de Kruskal

Les données soumises à ce modèle se présentent sous la forme d'une matrice carrée et symétrique telle que la matrice [D] (section 1.1.2.1.b), dans laquelle l'élément  $d_{kl}$  représente la dissimilarité de la paire d'objet {k, l}. Le modèle de Kruskal s'écrit alors [Fau03] :

$$f([D]) = [B] + [E] \quad (3.14)$$

Où  $f$  est une fonction monotone qui permet de transformer les dissimilarités en distances à placer dans un espace de dimension donnée. [B] (d'éléments  $b_{kl}$ ) est la matrice des distances entre les objets placés dans cet espace et [E] la matrice d'erreur associée à la transformation.

L'algorithme proposé par Kruskal est itératif (cf. [CC01]) et cherche à trouver la dimensionnalité optimale de l'espace dans lequel on représente les objets après la transformation données par l'équation 3.14. Cette dimensionnalité est trouvée en minimisant le stress  $S$ , défini comme suit [Bon86] :

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{k,l}(b_{kl} - f(d_{kl}))^2}{\sum_{k,l}(b_{kl} - \bar{b})^2}} \quad (3.15)$$

Où  $\bar{b}$  est la moyenne de tous les éléments de la matrice [B]. La valeur donnée par le stress renseigne sur le degré d'adéquation entre les dissimilarités originales et les distances reportées dans l'espace. Poitevineau donne les critères suivants pour juger cette adéquation [Poi09] :

- Si  $0.20 < S$ , l'adéquation est mauvaise ;
- Si  $0.10 < S < 0.20$ , l'adéquation est acceptable ;
- Si  $0.05 < S < 0.10$ , l'adéquation est bonne ;
- Si  $S \leq 0.05$ , l'adéquation est excellente.

Au préalable il convient bien sûr de s'être assuré que l'ensemble des sujets est homogène, ce qui peut être fait en effectuant une CAH sur une matrice de dissimilarité des sujets telle que la matrice [S] (cf. section 1.1.2.1.b).

### 1.2.2.2. Le modèle métrique INDSCAL

Les données soumises à ce modèle se présentent sous la forme de  $N$  ( $N$  est le nombre de sujets) matrices symétriques carrées de taille  $n \times n$  ( $n$  est le nombre de stimuli) dans lesquelles figurent les dissimilarités mesurées entre chaque paire d'objets au moyen de l'échelle continue. Ces matrices sont notées  $\Delta^i$  ( $i = 1$  à  $N$ ) et comportent les éléments  $\delta_{kl}^i$ . Le modèle INDSCAL prend en compte les différences interindividuelles par le calcul de poids accordés par les sujets aux dimensions de l'espace dans lequel on fait figurer les objets. Les poids sont censés représenter l'importance que les sujets accordent à chaque dimension de l'espace perceptif résultant. Ces dernières se réfèrent à des attributs auditifs sur lesquels les sujets ont pu baser leurs jugements de dissimilarité [TMH09]. Chaque dimension peut alors être interprétée comme une dimension psychologique en relation aux attributs auditifs des stimuli employés par les sujets pour effectuer leur jugement de dissimilarité.



Le modèle INDSCAL est formulé comme suit [Bon86] :

$$\delta_{kl}^i = \sqrt{\sum_{t=1}^m w_{it} (x_{kt} - x_{lt})^2} \quad (3.16)$$

Où  $w_{it}$  est le poids affecté par le sujet  $i$  à la dimension  $t$ ,  $x_{kt}$  est la coordonnée du stimulus  $k$  sur la dimension  $t$ ,  $x_{lt}$  est la coordonnée du stimulus  $l$  sur la dimension  $t$ . C'est précisément ces poids et ces coordonnées que nous obtenons en sortie du programme INDSCAL.

Il s'agit ensuite de déterminer la dimensionnalité optimale pour obtenir la meilleure adéquation possible entre les dissimilarités originales et les distances reportées dans l'espace. Comme Trollé [Tro09], nous pouvons alors utiliser le pourcentage cumulé de variance expliquée par les dimensions de l'espace perceptif. En traçant ce pourcentage en fonction du nombre de dimensions, la dimensionnalité la plus vraisemblable est celle pour laquelle on peut détecter un coude sur la courbe (cf. [Tro09]).

Au préalable il convient également de s'assurer que les sujets forment un ensemble homogène. Pour ce faire, nous pouvons créer la matrice carrée symétrique de taille  $N \times N$ , notée  $[S']$  et d'éléments  $s'_{ij}$  dans laquelle figurent les dissimilarités entre les sujets  $i$  et  $j$  calculées suivant [Tro09] :

$$s'_{ij} = 1 - r_{ij} \quad (3.17)$$

Où  $r_{ij}$  est le coefficient de corrélation linéaire de Bravais-Pearson (cf. définition en section 2.2.3.1) entre les notes de dissimilarités données par le sujet  $i$  et celles données par le sujet  $j$ . Une CAH peut être ensuite effectuée sur la matrice  $[S']$  sur le principe détaillé en section 1.1.2.1.d.

### 1.2.3. Résultats

#### 1.2.3.1. Les sujets

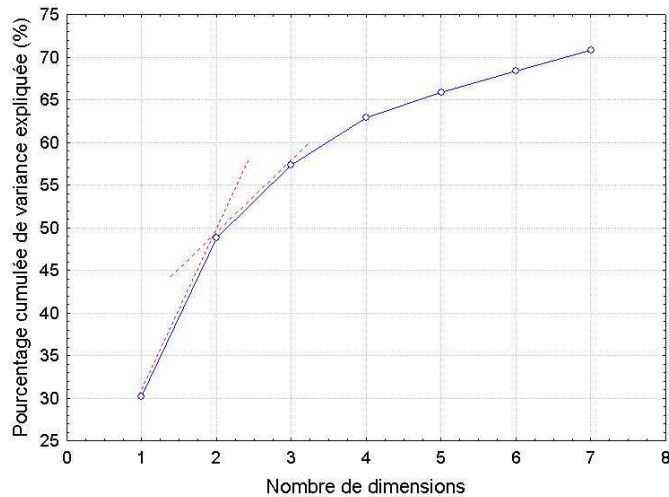
La CAH pratiquée sur la matrice  $[S']$ , en utilisant la méthode de la moyenne non pondérée (qui maximise  $C$  et  $\gamma$ , cf. section 1.1.2.1.d) ne révèle pas de sous-groupes de sujets, si ce n'est un sujet qui semble à l'écart des autres (le sujet n°15).

Par ailleurs, l'examen des poids calculés pour chaque sujet vis-à-vis de chaque dimension révèle que tous les sujets ont des poids positifs, hormis le sujet n°15. Or, d'après Coxon [Cox82], seulement des poids positifs sont autorisés par le modèle INDSCAL. Si le poids est négatif, cela signifie que le modèle ne se vérifie pas pour les données du sujet dont les poids sont négatifs.

Pour ces deux raisons, l'EMD est effectué à partir des données de 24 sujets, après exclusion du sujet n°15.

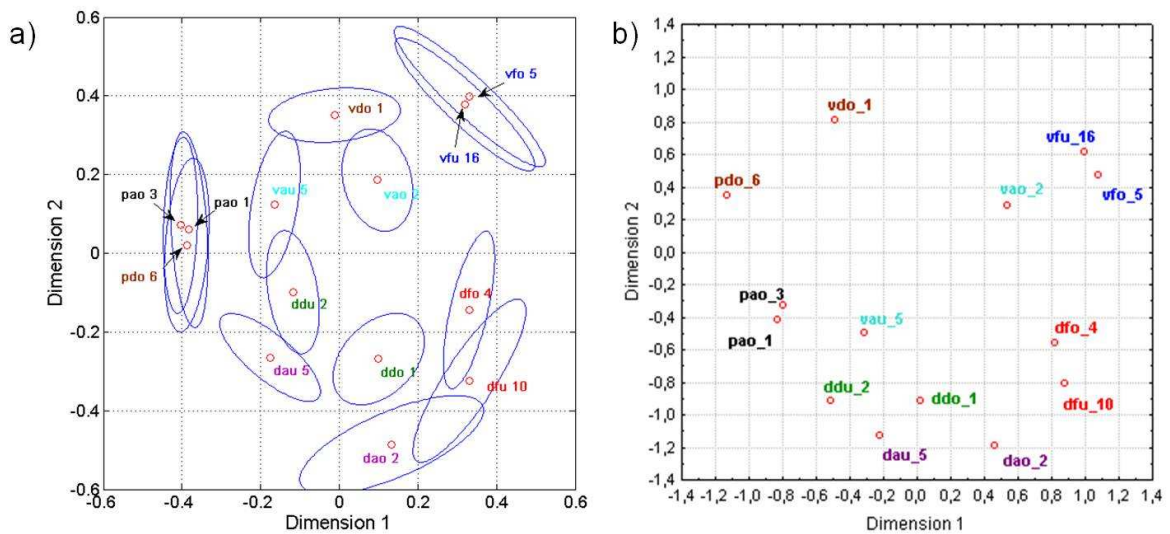
#### 1.2.3.2. L'espace perceptif

Comme on peut le voir sur la Figure 3.4, nous ne voyons pas apparaître de coude net sur le tracé du pourcentage cumulé de variance expliquée en fonction du nombre de dimensions. Toutefois l'observation de la Figure 3.4 montre un changement de pente de la courbe plus important pour un nombre de dimension égal à 2.



**Figure 3.4 : Pourcentage cumulée de variance expliquée par les dimensions de l'espace résultant de l'EMD.**

Nous avons tracé les solutions à 2 et 3 dimensions afin de confirmer notre choix. La Figure 3.5 (panneau a)) montre la solution dans un espace à 2 dimensions. Sur les positions des objets, des ellipsoïdes de confiance à 95% sont construites selon la méthode du Bootstrap avec 250 tirages (pour plus de détails, le lecteur peut se référer à [Tro09]). La construction des ellipsoïdes nous permet à la fois d'estimer le degré de confiance que l'on peut accorder à l'interprétation des dimensions de l'espace, mais également d'identifier les stimuli perçus comme identiques ou non, suivant le recouvrement ou non des ellipsoïdes [Tro09].



**Figure 3.5 : Espaces perceptifs de dissimilarité 2D des bruits de passage de véhicules routiers. Les bruits provenant de la même catégorie perceptive et cognitive partagent la même couleur. a) EMD sur les données du test de comparaison par paires. b) EMD sur les données du test de catégorisation libre.**

Le tracé de la solution dans un espace à 3 dimensions fait apparaître des ellipsoïdes de confiance à 95% trop étendues. Ces dernières ne nous permettent pas d'interpréter les dimensions de la solution, et conduisent à une représentation de moins bonne qualité par rapport à la représentation de la solution dans un espace à deux dimensions. Pour cette raison nous conservons la solution 2D pour la suite de l'analyse.

La Figure 3.4 nous indique que la première dimension de l'espace perceptif de dissimilarité explique 30.1% de la variance constatée dans les jugements de dissimilarité, tandis que la dimension 2 en explique 18.7%.

Les poids attribués aux sujets peuvent être moyennés selon chaque dimension. Les poids moyens donnent alors une idée de la dimension perceptive et donc de l'attribut auditif correspondant qui a été le plus important pour les sujets dans leur jugement de dissimilarité [CC76]. Ces poids moyens sont respectivement égaux à 0.54 et 0.42 pour les dimensions perceptives 1 et 2, ce qui indique que la dimension 1 est apparue légèrement plus importante que la dimension 2 pour les sujets.

### 1.2.3.3. L'interprétation des dimensions perceptives

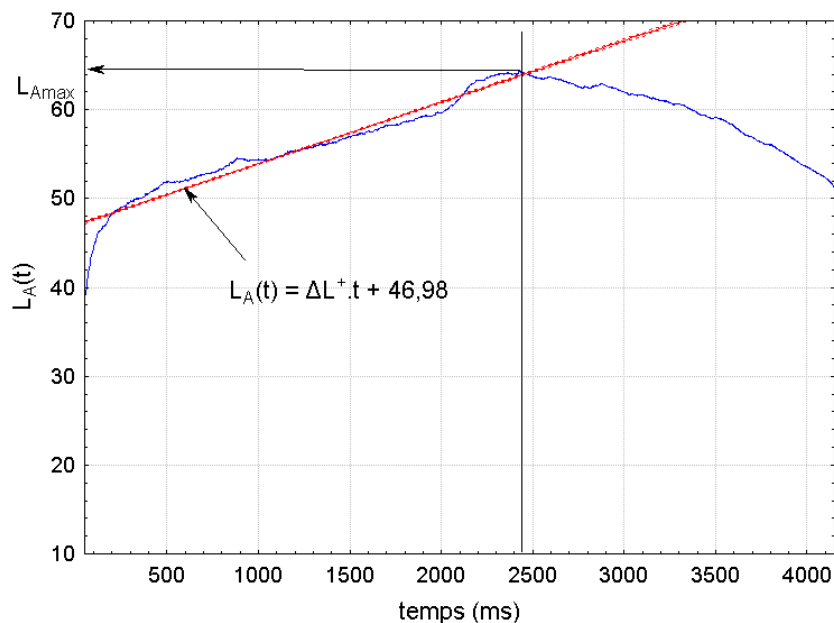
Dans un premier temps il s'agit d'écouter les bruits de passage dans l'ordre de leurs coordonnées selon chaque dimension. En complément nous pouvons également examiner les spectres en 1/3 d'octave et de sonie spécifique, ainsi que le tracé de l'évolution temporelle du niveau de pression sonore ou de la sonie. Cette étape peut renseigner dans l'immédiat si un attribut auditif évident peut être repéré. Dans un deuxième temps, il s'agit de calculer les corrélations entre les coordonnées des stimuli selon chaque dimension avec les indices qui traduisent au mieux l'attribut auditif repéré. Dans notre cas, il a été peu trivial de déceler des attributs auditifs évidents liés aux deux dimensions de l'espace perceptif obtenu.

Nous avons donc calculé les coefficients de corrélation  $r$  de Bravais-Pearson [Dod04], entre les coordonnées des bruits selon chaque dimension et un ensemble d'indices calculés sur les bruits de passage mesurés. Nous nous sommes attachés pour chaque dimension à repérer les indices significativement corrélés aux coordonnées des bruits de passage. Si plusieurs indices sont corrélés aux coordonnées des bruits de passage selon cette dimension, nous avons calculé la corrélation entre les valeurs de ces indices afin d'écartier toute colinéarité éventuelle. Au final nous avons retenu pour chaque dimension uniquement les indices corrélés significativement aux coordonnées et non corrélés entre eux.

**Concernant la dimension 1**, deux indices traduisant des aspects liés à **l'évolution temporelle des bruits de passage** sont corrélés aux coordonnées selon cette dimension. Il s'agit de la rugosité  $R$  et du taux d'accroissement du niveau sonore en fonction du temps, noté  $\Delta L^+$  et exprimé en  $\text{dB(A).s}^{-1}$ . Ce nouvel indice est calculé à partir des valeurs du niveau de pression sonore pondéré  $A$  en fonction du temps (pas de 2ms), noté  $L_A(t)$ . Nous repérons le maximum,  $L_{A\text{max}}$ , dans ces valeurs, et ensuite nous effectuons une régression linéaire (cf. section 2.2.3.2) entre le temps (variable dépendante) et les valeurs  $L_A(t)$  jusqu'à la valeur de  $t$  pour laquelle on trouve le maximum  $L_{A\text{max}}$ . La pente de l'équation de régression est l'indice  $\Delta L^+$ . Ce calcul est illustré sur la Figure 3.6 pour le bruit de passage  $vfo\_5$  (prototype de la catégorie 3). Des bruits de passage situés aux extrémités de l'espace selon la dimension 1 ont donc des valeurs de  $\Delta L^+$  différentes. Par exemple la valeur de l'indice  $\Delta L^+$  du bruit de passage  $pao\_3$  (2<sup>e</sup> meilleur représentant de la catégorie 7) atteint  $2.7\text{dB(A).s}^{-1}$ , tandis que celle du bruit de passage  $vfo\_5$  (prototype de la catégorie 3) atteint  $6.9\text{dB(A).s}^{-1}$  (cf. ANNEXE B). De même, des bruits de passage situés aux extrémités de l'espace selon la dimension 1 ont différentes valeurs de l'indice  $R$ . Par exemple, le bruit de passage  $pao\_1$  (prototype de la catégorie 7) et le bruit de passage  $dfu\_10$  (deuxième meilleur représentant de la catégorie 1) atteignent respectivement 25.5 et 18.6 casper. En somme, plus la valeur de l'indice  $\Delta L^+$  d'un bruit de passage est élevée, plus sa coordonnée selon la dimension 1 sera élevée ( $r = 0.73$  ;  $p < 0.05$ ). A l'inverse, plus la rugosité d'un bruit de passage sera faible, plus sa coordonnée selon la dimension 1 sera élevée ( $r = -0.65$  ;  $p < 0.05$ ). A l'écoute il est possible de déceler l'influence de ces indices, toutefois il est difficile de dire lequel est le plus important. La dimension 1 s'explique donc par une combinaison de la rugosité et de l'indice  $\Delta L^+$  ( $R = 0.88$  ;  $p < 0.001$ ,  $R$  étant le coefficient de corrélation multiple, défini par Fox [Fox99]

comme la mesure du degré d'association entre la rugosité et l'indice  $\Delta L^+$  avec les coordonnées des bruits de passage selon la dimension 1).

**Concernant la dimension 2**, uniquement les valeurs de l'indice  $L_{MF}$  (niveau de pression équivalent pondéré A calculé en moyenne fréquence, entre les bandes de 1/3 d'octave centrées sur 315 et 1250Hz, selon le découpage utilisé par Alayrac [Ala09]) sont corrélées significativement aux coordonnées des bruits de passage selon cette dimension.



**Figure 3.6 : Exemple de calcul de l'indice  $\Delta L^+$  (taux accroissement du niveau de pression sonore pondéré A en fonction du temps) pour le bruit de passage vfo\_5 (prototype de la catégorie 3).**

Si l'on considère des bruits de passage situés aux extrémités de l'espace perceptif selon la dimension 2, on trouve donc des valeurs différentes de l'indice  $L_{MF}$ . En effet, les bruits de passage dao\_2 (prototype de la catégorie 2) et vfu\_16 (2<sup>e</sup> meilleur représentant de la catégorie 3) atteignent respectivement 47.1 et 55.4 dB(A) pour l'indice  $L_{MF}$ . Ainsi, plus la valeur de l'indice  $L_{MF}$  d'un bruit de passage est élevée, plus sa coordonnée selon la dimension 2 est élevée ( $r = 0.62$  ;  $p < 0.05$ ). Notons également que les bruits de passage sont ordonnés selon la dimension 2 par type de véhicules. En effet, des plus faibles coordonnées aux plus élevées, nous trouvons respectivement les deux-roues et les véhicules légers en passant par les poids lourds. Cela nous indique donc que **la dimension 2 est à la fois liée à des aspects spectraux mais également à l'identification de la source de bruit**. Il est toutefois impossible de quantifier l'influence du type de véhicules sur les coordonnées selon la dimension 2.

#### 1.2.4. Discussion

Nos travaux peuvent être rapprochés de ceux de Cermak et Cornillon [CC76]. A l'issue d'un test de comparaison par paires, ces auteurs ont échelonné 13 séquences de bruit de trafic routier dans un espace à 2 dimensions. Leurs séquences n'étaient pas égalisées en niveau sonore, et par conséquent, la première dimension est portée par l'intensité subjective. La deuxième dimension est portée par la nature des sources sonores présentes dans les séquences. Dans notre cas, conformément à nos objectifs, l'intensité subjective n'est pas saillante du fait de l'égalisation de nos bruits de passage. Pour autant, comme dans les travaux de Cermak et Cornillon [CC76], l'identification de la source de bruit joue un rôle important, dans les jugements de dissimilarité donnés par les sujets. Les sujets ne se basent

pas uniquement sur un attribut auditif ou une propriété acoustique pour donner leur jugement. Cette identification des sources se retrouve dans la verbalisation libre menée par les sujets au cours du test de catégorisation libre (cf. section 1.1.3.2.).

Dans leurs travaux, Barbot *et al.* [BLC08] ont échelonné divers bruits de survol d'avion en utilisant le modèle INDSCAL, dans un espace à 4 dimensions. Pour leur corpus de bruits de décollage, ils ont trouvé que les dimensions 1 et 4 sont portées par des aspects spectraux, tandis que les dimensions 2 et 3 sont portées par des aspects temporels. Barbot *et al.* [BLC08] ont notamment relié les aspects temporels à la force de fluctuation et à un autre indice « la durée de l'augmentation du niveau » qui est similaire à l'indice  $\Delta L^+$  introduit en section 1.2.3.3. Rappelons que la force de fluctuation et la rugosité sont définies de manière similaire : il s'agit de sensations de modulation<sup>51</sup> [FZ06].

Nous avons vu que les indices  $\Delta L^+$  et R sont liés aux aspects temporels des bruits de passage. Toutefois, ils ne décrivent pas les mêmes phénomènes, le premier est lié à l'évolution temporelle globale des bruits de passage, le second à une évolution périodique de l'enveloppe temporelle. Sur ce point il paraît intéressant de revenir sur l'analyse linguistique menée sur les données du test de catégorisation libre. Nous avons établi que pour les sujets, l'évolution temporelle (liée au critère *a priori* « type d'allures ») était déterminant dans le processus de catégorisation libre. L'indice  $\Delta L^+$  va traduire différentes approches du véhicule, entre les véhicules « qui ne font que passer » et ceux avec une action, par exemple « ils s'arrêtent ». Nous l'avons dit au Chapitre 1, la sensation de rugosité est produite par des changements temporels rapides et périodiques [FZ06]. Nous pouvons alors attribuer cette sensation de rugosité au bruit du groupe moto-propulseur qui, nous l'avons dit, est prédominant en zone urbaine. Ces changements rapides et périodiques sont visibles sur les spectrogrammes auditifs des prototypes des catégories perceptives et cognitives (cf. Figure 3.3). Nous avons vu que les signes des corrélations des indices R et  $\Delta L^+$  avec les coordonnées selon la dimension 1 sont opposés. Cela semble logique dans la mesure où un véhicule en accélération sollicite le moteur plus intensément qu'un véhicule en allure stabilisée, et que ce même véhicule en accélération suite à un démarrage met plus de temps à arriver et partir qu'un véhicule à allure stabilisée qui est lancé. Il s'agit donc de deux indices qui peuvent caractériser des allures différentes.

### 1.2.5. Catégorisation libre vs. comparaison par paires

Notre objectif initial à travers ce test de comparaison par paires est d'évaluer la robustesse de nos conclusions quant à la structure des catégories perceptives et cognitives résultant de l'analyse des données du test de catégorisation libre.

Un bon moyen d'effectuer une confrontation entre les deux expériences est d'appliquer à la matrice [D] (cf. section 1.1.2.1.b) un EMD en utilisant le modèle non-métrique de Kruskal (cf. section 1.2.2.1). Les 57 bruits de passage du test de catégorisation libre sont donc échelonnés dans un espace à deux dimensions. Le stress calculé est égal à 0.17, ce qui signifie que la représentation des dissimilarités originales dans l'espace 2D est acceptable. En appliquant une rotation de 180° à l'espace résultant, nous obtenons l'espace perceptif présenté en Figure 3.5. Pour améliorer la lisibilité de la figure, nous avons uniquement reporté les coordonnées des bruits de passage communs aux deux expériences.

En comparant les deux espaces perceptifs obtenus (cf. Figure 3.5), nous observons une ressemblance frappante, les bruits de passage sont ordonnés de manière similaire selon les dimensions 1 et 2. En considérant spécifiquement la dimension 1, pour les deux espaces

---

<sup>51</sup> La force de fluctuation définit une perception d'augmentation et de diminution de sonie au cours du temps ; la rugosité donne un « grain » au son, dû à des variations périodiques rapides (fréquence de modulation comprise entre 15Hz et 300Hz [FZ06]).

perceptifs, les bruits de passage pdo\_6, pao\_3 et pao\_1 contrastent avec les bruits de passage dfo\_4, dfu\_10, vfo\_5 et vfu\_16. De même, en considérant spécifiquement la dimension 2, même si les positions des stimuli ne sont pas tout à fait les mêmes, l'ordre des bruits de passage reste globalement le même.

Pour quantifier la similarité entre les deux espaces perceptifs obtenus, nous pouvons calculer 2 corrélations : (1) entre les coordonnées des bruits de passage selon la dimension 1 des deux espaces perceptifs et (2) entre les coordonnées des bruits de passage selon la dimension 2 des deux espaces perceptifs. Les corrélations calculées sont très hautes ( $r = 0.96$  ;  $p < 0.001$  et  $r = 0.90$  ;  $p < 0.001$  pour les dimensions 1 et 2 respectivement), ce qui confirme la consistance des résultats obtenus par ces deux tests d'écoute.

Les résultats du test de catégorisation libre et verbalisation libre nous ont montré que notre ensemble de bruits de passage de véhicules routiers est structuré de manière interdépendante par « le type de véhicules » (l'identification de la source de bruit) et « le type d'allures » (lié à l'évolution temporelle des bruits de passage). Les résultats du test de comparaison par paires nous ont permis de relier les deux dimensions de l'espace perceptif dans lequel ont été échelonnés les bruits de passage à (1) des aspects temporels décrits par les indices  $\Delta L^+$  et R et (2) des aspects spectraux et identification du type de véhicule. Nous avons ainsi des conclusions qui sont similaires et complémentaires. D'une part nous avons progressé quant à la connaissance de la structure de la typologie perceptive et cognitive proposée, et d'autre part nous avons mis en évidence des indices nous permettant de décrire cette structure. En rapprochant les conclusions et en considérant les travaux de Susini *et al.* [SMWA98], la structuration interdépendante de la typologie perceptive et cognitive semble être de nature catégorielle (« le type de véhicules »), et de nature continue (« le type d'allures »), décrit par une variation d'indices reflétant l'évolution temporelle globale des bruits de passage et reflétant l'évolution périodique de l'enveloppe temporelle (due au bruit du groupe moto-propulseur). Les résultats des analyses sont en accord avec la nature de notre corpus constitué de bruits de passage (cf. section 1.1.2.1.c), à la fois homogène (des véhicules routiers motorisés) et hétérogène (différents types de véhicules).

La confrontation des résultats similaires et complémentaires des deux tests (de catégorisation libre avec verbalisation libre et de comparaison par paires) soutient la proposition d'une typologie perceptive et cognitive de bruits de passage de véhicules routiers en zone urbaine.

### 1.3. Synthèse partielle

Dans l'objectif de proposer des indicateurs caractéristiques de la gêne sonore due au bruit de la circulation routière qui soient pertinents du point de vue de l'individu, nous avons effectué deux expériences préliminaires.

La première expérience, test de catégorisation libre avec verbalisation libre, avait pour but d'évaluer la pertinence perceptive d'une typologie physique *a priori* constituée de critères physiques sur lesquels sont basés les modèles servant à l'établissement de cartes de bruit. A l'issue de cette expérience, nous avons proposé une typologie perceptive et cognitive constituées de 7 catégories de bruits de passage de véhicules routiers en zone urbaine. L'analyse statistique des partitions et l'analyse linguistique des données verbales ont conjointement montré que ces catégories sont structurées de manière interdépendante par les critères physiques *a priori* « type de véhicules » et « type d'allures ». Le dernier critère « type de morphologies », bien que perçu par les sujets, n'est pas apparu prioritaire dans leur tâche de catégorisation libre. Les deux-roues sont ressortis comme un type de véhicule à part, discriminés des autres types de véhicules dès le départ, puis plus finement discriminés selon leur allure. Les verbalisations ont permis de rapprocher des jugements, négatifs ou d'acceptabilité, à des aspects spectraux et temporels des bruits de passage.

La deuxième expérience, test de comparaison par paires avec évaluation continue de la dissimilarité, avait pour but d'évaluer la robustesse des conclusions relatives à la structure des catégories de la typologie perceptive et cognitive proposée. Les bruits de passage sélectionnés à partir du corpus initial ont été échelonnés dans un espace perceptif à 2 dimensions. La première dimension est interprétée comme étant liée à l'évolution temporelle des bruits de passage. Une combinaison des deux indices  $R$  et  $\Delta L^+$  permet de décrire cette dimension. Ces deux indices décrivent deux phénomènes d'évolution temporelle importants (évolution périodique de l'enveloppe temporelle et évolution temporelle globale), présents lors des différentes allures des véhicules. La deuxième dimension est interprétée comme étant liée à l'identification du type de véhicule. L'indice  $L_{MF}$  permet de décrire cette dimension.

La confrontation des résultats des deux expériences par le biais d'une comparaison de deux espaces perceptifs supporte la proposition de notre typologie perceptive et cognitive de bruits de passage de véhicules routiers en zone urbaine. Cette confrontation nous a permis également d'affiner notre connaissance de la structure de cette typologie. En effet, « le type d'allures » semble être de nature continue et explicable par une variation d'indices décrivant à la fois l'évolution temporelle globale, et l'évolution périodique de l'enveloppe temporelle liée au bruit du groupe moto-propulseur. Le « type de véhicules » comme on s'y attendait semble être de nature catégorielle avec un indice spectral expliquant en partie les dissimilarités entre différents types de véhicules.

Les conclusions complémentaires des deux expériences confirment la proposition d'une typologie perceptive et cognitive de bruits de passage de véhicules routiers en zone urbaine. Dans la section 2 de ce chapitre, chaque catégorie fait l'objet d'une caractérisation du point de vue de la gêne sonore.

## **2. Indicateurs de gêne pour les différentes catégories de bruits de passage de véhicules routiers**

La deuxième partie de ce chapitre prend pour point de départ la typologie perceptive et cognitive de bruits de passage de véhicules routiers que nous avons proposée dans la section 1 de ce chapitre. L'objectif désormais est de caractériser chaque catégorie de la typologie perceptive et cognitive par des indicateurs caractéristiques de gêne sonore.

Dans cette optique, 7 tests d'évaluation de la gêne sonore due à chaque catégorie de bruits de passage sont mis en place, un pour chaque catégorie perceptive et cognitive. Afin de proposer des indicateurs pouvant prendre en compte d'autres aspects que l'intensité sonore, nous veillerons à proposer par catégorie une diversité de bruits de passage, en tenant compte des résultats issus des deux précédentes expériences.

### **2.1. Méthode expérimentale**

#### **2.1.1. Stimuli**

Les stimuli employés pour ces tests d'évaluation de la gêne due à chaque catégorie de bruits de passage proviennent des 57 bruits de passage constituant les 7 catégories perceptives et cognitives.

##### **2.1.1.1. Dynamique de niveaux sonores et sélection des bruits de passage**

Nous savons que les niveaux d'exposition sont un facteur important dans l'émergence de la gêne. Nous cherchons à mettre en évidence, par catégorie de bruits de passage d'autres facteurs acoustiques (temporels, spectraux, etc.) qui pourraient contribuer au jugement de gêne. Pour cela, il convient au sein d'une même catégorie de bruits de passage d'avoir à la fois un panel de niveaux sonores différents, et aussi la plus grande diversité possible dans les bruits de passage.

**Pour l'étude de l'influence du niveau sonore**, nous avons choisi de faire varier les indices  $L_{Aeq,T}$  des bruits de passage de 50 à 62 dB(A) par pas de 2 dB(A). Le choix d'une telle dynamique s'est imposé pour plusieurs raisons : (1) une telle dynamique est incluse dans les niveaux d'exposition observés lors de l'enquête *in situ* (niveaux compris entre 43 et 70 dB(A) pour l'indice  $L_{DEN}$ , cf. [EEO10, PMMR+12] synthétisés en ANNEXE A), aux données de laquelle nous souhaitons confronter nos résultats obtenus en laboratoire (cf. démarche explicitée à l'issue du Chapitre 1, section 5) ; (2) nous étions bornés par un niveau sonore compris entre 60 et 65 dB(A), par rapport au ressenti des sujets durant le test de catégorisation libre et verbalisation libre (cf. section 1.1.1.1.a) ; (3) nous avons choisi de restreindre la dynamique afin de rendre possible l'émergence d'autres facteurs additionnels que l'intensité. Avec une dynamique totale plus élevée, l'influence de ces facteurs additionnels risquerait d'être « écrasée » par l'influence du niveau sonore ; et (4) nous voulions disposer d'un nombre de données suffisant pour construire des indicateurs de gêne sonore par régression linéaire.

**Pour l'étude de l'influence des facteurs acoustiques additionnels**, nous avons choisi de sélectionner plusieurs bruits de passage par catégorie en ayant la plus grande diversité possible. Deux cas de figure se présentent à nous. Pour les catégories comportant au plus 4 bruits de passage, tous sont sélectionnés (cf. catégories 4 et 6). Pour celles comportant au moins 5 bruits de passage (cf. catégories 1, 2, 3, 5 et 7), une sélection a été menée avec les règles suivantes : (1) sélectionner le prototype, le 2<sup>ème</sup> meilleur représentant et le moins bon représentant de la catégorie (en s'appuyant sur les résultats de l'analyse du choix des prototypes, cf. section 1.1.2.3) ; (2) sélectionner les deux autres bruits de passage, dans l'objectif d'équilibrer le nombre de bruits de passage dans chaque type de morphologies et pour équilibrer les durées (disposer de bruits de passage longs, courts, et de durée moyenne).

Au final, suivant les catégories étudiées au cours des 7 tests d'évaluation de la gêne, 35 stimuli (7 « Niveaux Sonores » x 5 « Sources ») ou 28 stimuli (7 « Niveaux sonores » x 4 « Sources ») sont présentés aux sujets. Notons que comme lors des deux précédentes expériences un fade in et fade out de 50ms ont été appliqués en début et fin de chaque stimulus.

#### **2.1.1.2. Durées**

De précédents travaux ont étudié l'influence de la durée de différents stimuli sur divers jugements émis par des sujets.

Little et Mabry [LM69] ont effectué 3 expériences pour étudier l'influence sur la gêne de la durée, du niveau sonore, du contenu spectral de différents stimuli, suivant deux procédures différentes (prise en compte de la durée dans le jugement puis sans instruction particulière). Il est ressorti de leur étude qu'il y a un effet de la durée (les durées testées dans leur article sont comprises entre 1s et 16s) sur la gêne exprimée par les sujets qui est plus prononcée lorsque l'on demande aux sujets de fournir leur jugement en prenant cet aspect en compte. Parry et Parry [PP72] en comparant les résultats d'expériences précédemment publiées par d'autres chercheurs portant sur l'effet de la durée des stimuli sur différents jugements (acceptabilité, gêne, bruyance) ont établi qu'il n'y a pas d'effet de la durée du stimulus, tant qu'on ne demande pas au sujet d'y prêter attention (les durées



testées au cours des expériences comparées pouvaient aller jusqu'à 64s). Ces auteurs finissent notamment par recommander d'abandonner l'usage de pénalités alors proposées pour rendre compte d'une gêne plus importante en fonction de la durée. Poulsen [Pou91] a montré qu'en étudiant la gêne due au trafic routier ou due à des bruits impulsionsnels, en condition de laboratoire et en se référant à une mise en contexte « à la maison », des durées relativement courtes sont suffisantes (les durées testées dans son expérience sont comprises entre 1mn et 30mn). Poulsen [Pou91] rajoute même qu'allonger la durée des stimuli donne plus d'importance à l'effet sur la gêne des facteurs non-acoustiques que des facteurs acoustiques. Paulsen [Pau97] a ensuite montré en étudiant des bruits permanents d'autoroute et un bruit blanc de durée comprise entre 1s et 80s, que si la durée a une influence sur les réponses de gêne, celle-ci est légère.

Considérant (1) l'influence limitée sur la gêne étudiée en laboratoire de la durée des stimuli employés, (2) que l'objectif d'études en laboratoire n'est pas de mettre en évidence en premier lieu les facteurs non-acoustiques, et (3) l'emploi de durées relativement courtes dans d'autres travaux portant sur la gêne étudiée en laboratoire (par exemple [KNF88, Nil07, AMVM+10, KLHL10]), nous avons décidé de conserver une durée des stimuli correspondant à la durée de l'évènement (le passage du véhicule routier). Celle-ci est alors comprise entre 3 et 9s.

### 2.1.1.3. Filtrage

Afin de simuler l'atténuation des bruits environnementaux par les façades des bâtiments d'habitation, certains auteurs filtrent ceux-ci avant restitution aux sujets ([Vos92, VV97, VV02]).

En ce qui nous concerne nous avons pris la décision de n'appliquer **aucun filtrage aux stimuli** pour plusieurs raisons. La première est que les matériaux des murs et le type de fenêtre d'un logement peuvent avoir une influence sur des jugements auditifs [TMF08] ainsi que sur les jugements de gêne [Vos03]. Ainsi, prendre en compte un filtrage donné risquerait de conduire à l'étude d'un cas particulier. La deuxième est que la gêne peut être ressentie dans tous les espaces privatifs dans les limites du logement, à l'intérieur comme à l'extérieur. En addition à cela, suivant les saisons, les individus sont amenés à ouvrir leurs fenêtres et donc à subir de manière plus intense les bruits de l'environnement. Etant donné que nous étudions les impacts du bruit sur les individus, nous préférons prendre le parti de l'étudier dans la configuration la moins favorable, c'est-à-dire fenêtre ouverte ou dans les espaces privatifs extérieurs. Enfin, la dernière raison réside dans le fait que les cartes de bruit sont basées sur des niveaux donnés en façade.

### 2.1.1.4. Mesures des stimuli

La procédure de mesure des stimuli pour le calcul des différentes métriques est identique à celle expliquée en section 1.1.1.1.d

## 2.1.2. Dispositif expérimental

Les tests d'évaluation de la gêne due à chaque catégorie de bruits de passage sont informatisés. La passation s'effectue au moyen d'une interface Matlab<sup>®</sup> comparable à celle utilisée par Alayrac [Ala09] et Alayrac *et al.* [AMVM+10]. Le lieu du test ainsi que le système de restitution sont identiques à celui des précédentes expériences (cf. section **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**)

### 2.1.3. Procédure

La procédure expérimentale employée est la même pour les 7 tests d'évaluation de la gêne. Avant de commencer le test, les consignes générales suivantes s'inscrivent à l'écran :

*« Dans ce test vous écouterez une suite de bruits de circulation routière pour lesquels nous vous demanderons d'évaluer la gêne ressentie. Vous pourrez les écouter à votre guise. Après avoir répondu à la question et validé votre réponse vous ne pourrez pas revenir en arrière.*

*Prenez votre temps pour répondre.*

*Pour évaluer la gêne ressentie pour chacun de ces bruits, imaginez-vous chez vous en train de vous relaxer (par exemple : en lisant, en regardant la télévision, en ayant une conversation, en faisant du jardinage ou toute autre activité relaxante qui vous est coutumière). »*

Nous nous inscrivons bien dans l'étude **de la gêne de court-terme que nous envisageons comme un potentiel de gêne** (cf. Chapitre 1 ). A cette fin, la mise en situation proposée renvoie à une activité relaxante que les sujets s'imaginent faire chez eux. Nous n'avons pas souhaité contraindre les sujets à s'imaginer dans une activité relaxante précise, et nous avons donc proposé un ensemble d'activités pour susciter au mieux leur imagination.

Nous avons adopté la présentation par stimulus unique avec ordre aléatoire. Pour chaque nouveau stimulus, un écran avec le rappel de la situation imaginaire apparaît avec la question :

*« Imaginez-vous chez vous, en train de vous relaxer (par exemple : en lisant, en regardant la télévision, en ayant une conversation, en faisant du jardinage ou toute autre activité relaxante qui vous est coutumière).*

*Pendant votre activité relaxante, vous entendez ce bruit de circulation routière :*

*ECOUTE*

*Ce bruit vous gênerait-il ? »*

La question ainsi que l'échelle de réponse sont inspirées des recommandations de la norme ISO 15666 [ISO03] et de celles adoptées dans de précédents travaux ([Ala09, AMVM+10]). Pour répondre, les sujets déplacent un curseur le long d'une échelle continue allant de 0 à 10 avec 5 indicateurs numériques (0, 2.5, 5, 7.5 et 10) équidistants auxquels sont associés 5 descripteurs verbaux (« pas du tout », « légèrement », « moyennement », « beaucoup », et « extrêmement »).

Avant de donner leur jugement, les sujets sont invités à réécouter les stimuli autant de fois qu'ils le souhaitent.

En préalable, les sujets effectuent un test d'entraînement dans lequel leur est soumis un ensemble représentatif des stimuli à juger, afin qu'ils puissent se familiariser avec l'utilisation de l'interface.

A l'issue du test, les sujets remplissent un questionnaire afin d'obtenir des informations sur certains facteurs non-acoustiques comme la sensibilité au bruit, ainsi que sur la difficulté du test réalisé. Ce questionnaire est disponible en ANNEXE C.

### 2.1.4. Les sujets

Pour chacun des 7 tests, nous avons recruté 30 sujets par courriel parmi les personnels et élèves de l'ENTPE. Dans le mail de recrutement nous avons spécifiquement

demandé des sujets ayant une bonne audition, et avons prévenu qu'ils seraient indemnisés pour la participation à 3 tests minimum.

Ainsi un sujet a pu participer à plusieurs tests parmi les 7 effectués. Dans ce cas, les tests se faisaient toujours à plusieurs jours d'intervalle. En moyenne, 19 hommes et 11 femmes ont participé à chaque test. L'âge moyen des sujets était d'environ 34 ans sur l'ensemble des tests, avec un écart-type égal à 12.4 ans. En moyenne les sujets ont participé à 4 tests sur les 7 proposés, et entre deux tests différents, il y avait en moyenne environ 16 sujets en commun.

Les tests duraient environ 20 minutes chacun et ont eu lieu au cours des mois de mars et avril 2010.

Notons que presque 79% des sujets ont jugé « pas du tout » ou « légèrement » difficile la tâche demandée, à savoir évaluer la gêne dans une mise en situation imaginaire.

## 2.2. Traitement et analyse des données

Le plan expérimental et le type d'analyses statistiques que l'on va conduire sont intimement liés [DS05]. Dans notre cas, les stimuli tels que nous les avons construits permettent l'étude de deux facteurs avec différentes modalités : le facteur « Niveau Sonore » avec 7 modalités (les 7 niveaux sonores de présentation), le facteur « Sources » avec 4 ou 5 modalités suivant les catégories (4 ou 5 bruits de passage différents suivant les catégories). Dans le plan expérimental que nous avons défini, l'ensemble des stimuli (l'ensemble des combinaisons possibles des deux facteurs et leurs modalités<sup>52</sup>) est jugé par l'ensemble des sujets. Un outil statistique qui nous permet d'étudier l'effet sur la variable dépendante « gêne » des deux facteurs (les deux variables indépendantes) dans ce contexte est l'analyse de variance (ANOVA) à deux facteurs à mesures répétées. Une fois que l'on a analysé les réponses de gêne à l'aide de cet outil, nous développerons des indicateurs de gêne en effectuant des régressions linéaires entre réponses de gêne moyenne et différents indices calculés.

Dans cette section nous récapitulerons les bases de l'ANOVA et donnerons les spécificités de l'ANOVA à mesures répétées. Puis nous donnerons les bases de la régression linéaire. Toutefois avant de procéder à ces analyses, il convient d'examiner les réponses des sujets afin de vérifier qu'ils forment un ensemble homogène, nous donnerons donc notre démarche au préalable.

### 2.2.1. Homogénéité des sujets

Les données brutes qui feront l'objet de l'ANOVA se présentent sous forme d'une matrice rectangulaire [M] de taille N x n où N est le nombre de sujets et n le nombre de stimuli. Les éléments  $m_{ij}$  de cette matrice sont les réponses de gêne fournies par le sujet i concernant le stimulus j. Dans un premier temps, il s'agit de transformer ces données brutes en une matrice de distance de sujets [S''] de taille N x N, dans laquelle les éléments  $s_{kl}''$  représentent la distance euclidienne entre les sujets k et l, calculée selon [Dod04] :

$$s_{kl}'' = \sqrt{\sum_{j=1}^n (k_j - l_j)^2} \quad (3.18)$$

Où  $k_j$  est la réponse de gêne du sujet k pour le stimulus j et  $l_j$ , la réponse de gêne du sujet l pour le stimulus j.

---

<sup>52</sup> Un tel plan expérimental est appelé plan factoriel [How98].

Sur cette matrice de distance nous effectuons une CAH (cf. section 1.1.2.1.d). L'objectif est de repérer si des sous-groupes de sujets existent, et le cas échéant, il s'agira de déterminer si les données de ces sous-groupes peuvent être agrégées ou non, pour effectuer l'ANOVA.

Il est alors nécessaire de fixer le cadre de ce que l'on comprendra comme homogénéité des sujets. Nous l'avons expliqué lors du Chapitre 1, l'efficacité de ce type de protocole concernant la mise en évidence de tendances principales est avérée. Evidemment, il ne s'agit pas de prendre des équations qui résulteraient d'études en laboratoire comme des équations absolues que l'on pourrait transférer au terrain directement. Il s'agit plutôt de mettre en évidence l'effet d'un certain nombre de facteurs et de décrire leur magnitude relative.

Dans ce cadre, **si la CAH fait apparaître des sous-groupes de sujets, nous considérerons qu'ils sont homogènes** et qu'à ce titre nous pourrions agréger leurs données pour mener à bien notre analyse, **si les analyses effectuées sur ces sous-groupes séparément comportent les mêmes tendances**. Par exemple, nous pourrions disposer de deux sous-groupes de sujets, un pour lequel le bruit A est plus gênant que le bruit B et l'autre pour lequel le bruit B est plus gênant que le bruit A, avec des réponses moyennes de gêne similaires pour les deux sous-groupes. De tels sous-groupes seraient considérés inhomogènes et nous ne pourrions pas agréger leurs données, étant donné leurs tendances inversées, la moyenne sur ces sous-groupes n'ayant alors plus de signification. Par contre nous pourrions disposer de deux sous-groupes de sujets pour lequel le bruit A est plus gênant que le bruit B (ou l'inverse), la différence résidant dans le fait que les réponses moyennes de gêne des deux sous-groupes ne sont pas similaires. De tels sous-groupes seraient considérés homogènes et nous pourrions agréger leurs données étant donné que les tendances affichées sont similaires.

En parallèle, nous créons un ensemble de sujets factices pour lesquels les réponses sont générées aléatoirement. La CAH effectuée sur la matrice de distance des sujets réels et factices, nous permet de voir si un ou plusieurs sujets réels sont situés parmi les sujets factices. Dans ce cas nous examinerons les réponses brutes de ce ou ces sujets, afin de déterminer si nous pouvons inclure les données correspondantes dans l'analyse de variance.

## 2.2.2. L'analyse de variance

### 2.2.2.1. Les bases

Nous nous plaçons dans un premier temps dans le cas où l'on étudie l'influence d'un facteur A comportant M modalités sur une variable dépendante dont on a au préalable recueilli les scores. Dans ce premier exemple, les modalités ont été jugées par des groupes de sujets différents (pas nécessairement de la même taille), ainsi pour chaque modalité nous disposons des scores de  $N_M$  sujets.

Nous pouvons décomposer les écarts de chaque score à la moyenne totale des scores suivant [Fox99] :

$$(X_i - \bar{X}) = (X_i - \bar{X}_M) + (\bar{X}_M - \bar{X}) \quad (3.19)$$

Où  $X_i$  représente le  $i^{\text{ème}}$  score,  $\bar{X}_M$  représente la moyenne des scores de la modalité M à laquelle appartient le  $i^{\text{ème}}$  score, et  $\bar{X}$  représente la moyenne totale des scores.

Cette équation stipule alors que les écarts entre les scores et la moyenne totale des scores est décomposée entre (1) les écarts entre les scores et leur moyenne associée à la modalité à laquelle ils appartiennent et (2) les écarts entre la moyenne des scores de la modalité M et la moyenne générale.

En sommant sur tous les scores observés ces écarts élevés au carré, nous obtenons l'équation d'analyse de la variance ([Fox99, Dag06]) :

$$\sum (X_i - \bar{X})^2 = \sum (X_i - \bar{X}_M)^2 + \sum N_M (\bar{X}_M - \bar{X})^2 \quad (3.20)$$

Cette équation peut être reformulée avec la somme des carrés des écarts (SCE) [Dag06] :

$$SCE_t = SCE_r + SCE_A \quad (3.21)$$

Où  $SCE_t$  est la somme totale des carrés des écarts qui mesure la variation des scores individuels par rapport à la moyenne totale,  $SCE_A$  est la somme factorielle des carrés des écarts qui mesure la variation des moyennes des modalités du facteur A par rapport à la moyenne générale et  $SCE_r$  est la somme résiduelle des carrés des écarts qui mesure la variation des scores individuels par rapport à la moyenne de leur modalité.

Si l'on considère que nous disposons de N scores au total répartis dans M modalités, nous pouvons transformer ces sommes des carrés des écarts en variance en divisant par les degrés de liberté (ddl) associés. Ces variances sont appelées carrés moyens (CM) :

$$CM_t = \frac{SCE_t}{N - 1}, \quad CM_A = \frac{SCE_A}{M - 1}, \quad CM_r = \frac{SCE_r}{N - M} \quad (3.22)$$

La question que nous nous posons est de savoir si le facteur A affecte notre variable dépendante. Si c'était le cas, il y aurait beaucoup de variation entre les moyennes des modalités, et donc les carrés moyens factoriels  $CM_A$  seraient grands. Si ce n'était pas le cas, il y aurait peu de variation entre les moyennes des modalités, les carrés moyens factoriels  $CM_A$  seraient faibles et par conséquent la plus grande part de la variation se produirait à l'intérieur des modalités et les carrés moyens résiduels  $CM_r$  seraient élevés. Afin de déterminer si l'effet sur la variable dépendante du facteur A est statistiquement significatif, nous formons alors le ratio F :

$$F = \frac{CM_A}{CM_r} \quad (3.23)$$

La probabilité p associée au ratio F dépend des degrés de liberté (ddl). Ainsi en connaissant le ratio F et les degrés de liberté factoriel et résiduel, il est possible à l'aide d'une table statistique d'obtenir la significativité de l'effet du facteur A sur la variable dépendante. Le seuil généralement fixé se situe à  $p=0.05$ . Au-delà de 0.05, nous considérons que l'effet observé du facteur A n'est pas significatif, autrement dit qu'il est probablement dû au hasard et ne pourrait être généralisable.

Il est ensuite utile de calculer le rapport de corrélation  $\eta$  [Dag06] :

$$\eta = \sqrt{\frac{SCE_A}{SCE_t}} \quad (3.24)$$

Ce rapport de corrélation compris entre 0 et 1 nous indique la proportion de variance totale qui est expliquée par le facteur A.

Dans le cas où l'on a établi la significativité statistique de l'effet du facteur A sur la variable dépendante, les résultats de l'ANOVA ne nous permettent pas de savoir s'il existe des différences significatives entre les modalités du facteur A. Pour cela, on peut effectuer des tests *post hoc*. Parmi les tests *post hoc* existants, Howell recommande d'effectuer le test HSD (Highly Significant Difference) de Tuckey dans le cas où nous disposons d'un grand

nombre de modalités [How98]. Le test de Tuckey effectue des comparaisons entre toutes les paires possibles des modalités du facteur A en calculant le rapport suivant [DS05] :

$$HSD = \frac{\overline{X_{M_i}} - \overline{X_{M_j}}}{\sqrt{\frac{CM_r}{n}}} \quad (3.25)$$

Où  $\overline{X_{M_i}}$  est la moyenne des scores de la  $i^{\text{ème}}$  modalité,  $\overline{X_{M_j}}$  est la moyenne des scores de la  $j^{\text{ème}}$  modalité,  $n$  est le nombre de scores dans les modalités. La valeur de ce rapport associée aux degrés de liberté résiduels fournit la probabilité  $p$  associée.

Notons que dans le cas de l'étude de l'effet de deux facteurs A et B sur une variable dépendante, le principe de l'ANOVA reste le même. L'équation d'analyse de variance est alors formulée [Dag06] :

$$SCE_t = SCE_r + SCE_A + SCE_B + SCE_{AB} \quad (3.26)$$

Où  $SCE_t$ ,  $SCE_A$  et  $SCE_r$  ont été définis précédemment, et où  $SCE_B$  et  $SCE_{AB}$  représentent respectivement les sommes des carrés des écarts du facteur B et les sommes des carrés des écarts de l'interaction des facteurs A et B. Pour plus de détails, le lecteur peut se référer à [How98] ou [Dag06].

Enfin toute ANOVA s'applique si les conditions suivantes sont respectées [Fox99] : **(1) variable dépendante d'intervalle/ratio**<sup>53</sup>, **(2) échantillonnage aléatoire**, **(3) indépendance des moyennes de chaque modalité** (les scores sont recueillis pour les différentes modalités sont basés sur des échantillons différents), **(4) distribution normale de la variable dépendante**, **(5) homoscédasticité** (égalité des variances de la variable dépendante à l'intérieur des différentes modalités). Les conditions 1 et 2 dépendent de la manière dont est conçue l'expérience, et dans la pratique pour les conditions 3, 4 et 5, l'ANOVA est calculée et ces conditions sont vérifiées en examinant les résidus [BZ06].

### 2.2.2.2. L'analyse de variance à mesures répétées

Nous avons explicité la logique de l'ANOVA factorielle, lorsque les différentes modalités des facteurs impliquent le recueil de scores sur différents groupes de sujets. Dans notre cas, les mêmes sujets jugent l'ensemble des facteurs et leurs modalités, l'analyse menée est alors une ANOVA factorielle à mesures répétées.

Dans le cas précédent, la variation résiduelle ( $SCE_r$ ) est due à deux paramètres : (1) utilisation de différents sujets pour juger les différentes modalités des facteurs (i.e. variation due aux différences interindividuelles) et (2) variation due aux fluctuations aléatoires, ou due à tout autre paramètre non contrôlé par l'expérimentateur [DR07]. En d'autres termes, ne faire intervenir qu'un seul groupe de sujets permet de diminuer considérablement les variations dues aux différences interindividuelles. C'est l'un des avantages des plans à mesures répétées [How98].

L'utilisation d'un même groupe de sujets pour le recueil des scores poserait un problème pour la condition d'indépendance des moyennes de chaque modalité s'il n'était pas possible de séparer les effets des facteurs et des sujets. Il convient alors avant même de commencer l'ANOVA de procéder à une nouvelle répartition des écarts, en calculant un nouveau terme  $SCE_s$ , la somme des carrés des écarts entre les sujets, et de le soustraire à  $SCE_t$  dès le départ. Ainsi, la variation résiduelle ( $SCE_r$ ) restante n'est plus due qu'aux fluctuations aléatoires ou à tout autre paramètre non contrôlé par l'expérimentateur. C'est là un autre avantage des plans à mesures répétées, dans le sens où par une nouvelle

<sup>53</sup> Cf. note de bas de page n°50.

répartition des écarts, nous réduisons les composantes de l'erreur tout en conservant la condition d'indépendance des moyennes de chaque modalité<sup>54</sup>.

Pour le reste, la logique et la manière de procéder est la même que ce qui a été explicité en section 2.2.2.1. A noter tout de même une hypothèse que nous devons vérifier : la **sphéricité**.

Dans le cas d'un plan factoriel simple, on peut s'attendre à ce que les corrélations entre les scores des différentes modalités soient nulles (respect de la condition d'indépendance). Par contre dans le cas d'un plan factoriel à mesures répétées, il est logique de s'attendre à ce qu'il existe une certaine corrélation entre les scores des différentes modalités. Une condition nécessaire et suffisante, appelée sphéricité, pour effectuer une ANOVA à mesures répétées est que ces corrélations sont similaires ([How98], [DR07]). Si la condition de sphéricité n'est pas respectée, les résultats rapportés pour la significativité statistique du rapport F sont erronés. Dans la pratique le test de Mauchly est effectué pour vérifier si la condition de sphéricité est violée ou non [How98].

Si la condition de sphéricité est violée, il convient de recalculer les degrés de liberté afin d'aboutir au bon ratio F puis à l'aide de la table correspondante, d'obtenir la bonne valeur de la statistique  $p$ <sup>55</sup>. Dans la suite de ce mémoire, lorsque nous effectuerons des ANOVA à mesures répétées nous indiquerons systématiquement si l'hypothèse de sphéricité est violée ou pas. Si elle l'est, seule la bonne valeur de  $p$  sera reportée.

### 2.2.3. Corrélation et régression linéaire

Dès lors que nous avons étudié les effets des facteurs expérimentaux sur les réponses de gêne, à partir des données d'un échantillon de sujets homogène, nous allons essayer de modéliser la gêne à partir de différents indices calculés sur les bruits de passage mesurés.

Dans la logique de ce type d'expérimentation qui est de mettre en évidence des tendances principales, nous ne travaillons plus sur des données brutes, mais nous travaillons à partir d'une nouvelle variable dépendante : la réponse moyenne de gêne. Pour l'obtenir, nous moyennons chaque colonne (les stimuli) de la matrice [M] sur l'ensemble des lignes (les sujets).

Dans un premier temps il est nécessaire d'effectuer une analyse de corrélation avant toute modélisation.

NB : nous faisons l'hypothèse que s'il existe une relation entre les variables que nous manipulons, cette relation est linéaire. Cette hypothèse peut être facilement vérifiée en traçant les diagrammes de dispersion correspondant [Fox99].

#### 2.2.3.1. Corrélation

En considérant les réponses moyennes de gêne comme notre variable dépendante, et les différents indices que l'on peut calculer comme variables indépendantes, il est possible de calculer le coefficient de corrélation de Bravais-Pearson, noté  $r$ <sup>56</sup>. Ce coefficient nous permet à ce stade seulement de dire si la variable dépendante et la variable indépendante sont liées, et quelle est la force du lien éventuel [DR07].

Si l'on note  $A_j$  la réponse moyenne de gêne du stimulus  $j$  et  $X_j$  la valeur de la métrique calculée sur le stimulus  $j$ , alors  $r$  se calcule selon [Dod04] :

---

<sup>54</sup> En réalité, on parle de « dépendance contrôlée » [How98].

<sup>55</sup> Si la sphéricité est beaucoup ou peu violée, Howell recommande respectivement d'utiliser les degrés de liberté recalculés par la méthode de Greenhouse-Geisser ou Huyn-Feldt [How98].

<sup>56</sup> Nous pouvons calculer ce coefficient de corrélation car les variables étudiées sont du niveau d'intervalle.

$$r = \frac{\sum_j (X_j - \bar{X})(A_j - \bar{A})}{\sqrt{\sum_j (X_j - \bar{X})^2 (A_j - \bar{A})^2}} \quad (3.27)$$

Où  $\bar{X}$  et  $\bar{A}$  sont respectivement la moyenne des  $X_j$  et la moyenne des  $A_j$ . Pour déterminer si le coefficient  $r$  calculé est statistiquement significatif, nous calculons le ratio  $F$  selon [Fox99] :

$$F = \frac{r^2(n-2)}{1-r^2} \quad (3.28)$$

Ainsi, avec le calcul de ce ratio associé aux degrés de libertés correspondant (1 et  $n-2$ , avec  $n$  le nombre de stimuli), nous pouvons déterminer la significativité statistique du coefficient de corrélation calculé.

Le cas simple où nous souhaitons déterminer le lien entre deux variables peut être étendu au cas où nous souhaitons déterminer l'effet combiné de deux variables indépendantes ( $X$  et  $Y$ ) sur une variable dépendante ( $A$ ). Dans ce cas il s'agit de calculer le coefficient de corrélation multiple, noté  $R$  [Fox99]. On le définit comme suit [Dag06] :

$$R = \sqrt{\frac{r_{XA}^2 + r_{YA}^2 - 2r_{XY}r_{XA}r_{YA}}{1 - r_{XY}^2}} \quad (3.29)$$

Où  $r_{XY}$ ,  $r_{XA}$ ,  $r_{YA}$ , sont respectivement les coefficients de corrélation de Bravais-Pearson entre les deux variables indépendantes  $X$  et  $Y$ , la variable indépendante  $X$  et la variable dépendante  $A$ , la variable indépendante  $Y$  et la variable dépendante  $A$ .

### 2.2.3.2. La régression linéaire simple

Une fois que nous avons déterminé le lien entre une variable dépendante et une variable indépendante par l'examen des corrélations, nous aimerions savoir de quelle quantité varie la variable dépendante en fonction de la variable indépendante. C'est ce que nous permet la régression linéaire au moyen de la construction de la droite de régression.

Si l'on note  $A_j$  la réponse moyenne de gène observée pour le stimulus  $j$  et  $\hat{A}_j$  la réponse moyenne de gène prédite pour le stimulus  $j$ , alors la droite de régression est l'unique droite permettant de minimiser la somme des carrés des écarts entre la réponse moyenne de gène observée et la réponse moyenne de gène prédite (calculée comme  $\sum_j (A_j - \hat{A}_j)^2$ ) [How98].

Nous pouvons exprimer le modèle de régression linéaire simple selon :

$$A = aX + b + \varepsilon \quad (3.30)$$

Dans cette équation,  $a$  est le coefficient de régression de la variable indépendante  $X$ ,  $b$  l'ordonnée à l'origine et  $\varepsilon$  sont les écarts par rapport à la droite (les résidus).

Pour satisfaire à la condition explicitée plus haut, les coefficients  $a$  et  $b$  sont calculés selon ([How98, Fox99]) :

$$b = \bar{A} - a\bar{X} \quad \text{et} \quad a = \frac{\sum_j (X_j - \bar{X})(A_j - \bar{A})}{\sum_j (X_j - \bar{X})^2} \quad (3.31)$$

Pour juger de la qualité de l'ajustement des données par le modèle de régression nous pouvons calculer le coefficient de détermination  $r^2$  et l'erreur type de l'estimation (err. stand.) selon ([How98, Dod04]) :



$$r^2 = \frac{\sum_j (\hat{A}_j - \bar{A})^2}{\sum_j (A_j - \bar{A})^2} \quad (3.32)$$

$$err. stand. = \sqrt{\frac{\sum_j (A_j - \hat{A})^2}{n - 2}} \quad (3.33)$$

Plus  $r^2$  sera élevé et plus l'erreur type de l'estimation sera faible, plus la qualité de l'ajustement des données par le modèle sera élevée. De par sa formulation, nous voyons que le coefficient de détermination représente la proportion de variance expliquée par le modèle. Un test de significativité est effectué sur les coefficients  $a$  et  $b$  afin de déterminer s'ils sont différents de 0 ou non. En réalité cela revient à tester la significativité du coefficient  $r$  [DR07].

Dans la pratique, on calcule le modèle de régression, puis on vérifie un certain nombre d'hypothèses liées aux résidus afin d'affirmer qu'il est statistiquement valide [How98] : (1) **normalité et moyenne nulle des résidus** et (2) **homoscédasticité des résidus** (homogénéité des variances des résidus pour toutes les valeurs de la variable indépendante).

### 2.2.3.3. La régression linéaire multiple

De manière analogue, une régression multiple est pratiquée lorsque l'on souhaite déterminer de quel degré varie la variable dépendante en fonction de différentes variables indépendantes.

Nous pouvons exprimer le modèle de régression linéaire multiple selon :

$$A = a_1 X_1 + a_2 X_2 + \dots + a_p X_p + b + \varepsilon \quad (3.34)$$

Où  $a_1, \dots, a_p$  sont les coefficients de régression des  $p$  variables indépendantes  $X_1, \dots, X_p$ .

Le modèle de régression linéaire doit trouver les coefficients de régression ainsi que l'ordonnée à l'origine  $b$  en respectant la même contrainte qu'expliquée dans la section 2.2.3.2.

De la même manière, on calcule un coefficient de détermination multiple, noté  $R^2$ , ainsi que l'erreur type de l'estimation du modèle en utilisant les formules (3.32) et (3.33). Les mêmes hypothèses que dans le cas de la régression simple sont à vérifier en examinant les résidus. Usuellement, un test de significativité statistique du  $R^2$  est effectué de manière analogue au test de significativité statistique du  $r^2$  (ou  $r$ ), en calculant le ratio  $F$  par la formule suivante [How98] :

$$F = \left( \frac{R^2}{1 - R^2} \right) \left( \frac{n - p - 1}{p} \right) \quad (3.35)$$

En associant le ratio  $F$  et les degrés de liberté correspondant ( $p$  et  $n-p-1$ , avec  $n$  le nombre de stimuli et  $p$  le nombre de variables indépendantes) il est possible d'obtenir la significativité statistique du  $R^2$  (et donc du  $R$ ) calculé. Avec une seule variable indépendante, on retrouve exactement le calcul de la formule (3.28).

Les coefficients de régression  $a_p$  ne peuvent pas dans le cas général nous renseigner sur la contribution relative de chaque variable indépendante (la valeur des coefficients de régression dépend par exemple de l'unité de mesure de la variable indépendante associée [Fox99]). Il faut pour cela calculer les coefficients de régression standardisés [How98]. Ceux-

ci sont obtenus par exemple en standardisant<sup>57</sup> au préalable les variables indépendantes et en recalculant le modèle sur ces variables standardisées. De telle manière une différence d'une unité dans une variable indépendante est comparable à une différence d'une unité de toutes les autres variables. Ces coefficients sont notés  $\beta_p$ . Par exemple en maintenant constant toutes les autres variables indépendantes, un changement d'une unité de la variable indépendante  $p$  entraînerait un changement de  $\beta_p$  unités dans la variable dépendante.

Enfin, si plusieurs variables indépendantes sont introduites, il faut s'assurer en amont que ces variables ne sont pas colinéaires<sup>58</sup> (par exemple en calculant les coefficients de corrélation entre ces variables et en vérifiant qu'ils sont faibles ou non significatifs). Dans tous les cas, il convient de vérifier que le coefficient de détermination ajusté (noté  $R_{aj}^2$ ), qui tient compte du nombre de variables, est proche du coefficient de détermination  $R^2$  [Ala09]. On le calcule par la formule suivante [How98] :

$$R_{aj}^2 = 1 - \frac{(1 - R^2)(n - 1)}{n - p - 1} \quad (3.36)$$

Dans la pratique, nous examinerons toujours les corrélations entre variables indépendantes potentielles afin de déterminer s'il y a colinéarité. En l'absence de colinéarité (ou s'il y a faible colinéarité), des modèles de régression multiple seront construits, et dans ce cas, nous donnerons toujours le coefficient  $R_{aj}^2$ .

## 2.3. Résultats

### 2.3.1. Sujets

Conformément à la démarche que nous avons décrite en section 2.2.1, nous avons établi que pour chaque test d'évaluation de la gêne due aux 7 catégories de bruits de passage, les réponses des sujets forment un ensemble homogène. Ainsi nous conservons pour toutes les analyses les réponses de gêne données par tous les sujets.

### 2.3.2. Analyse de variance

Comme nous l'avons mentionné en section 2.2.2, nous allons procéder, sur les données relatives à chaque test, à des ANOVA à deux facteurs à mesures répétées, pour examiner l'effet des facteurs principaux « Niveau Sonore » (noté NS) et « Source » (noté S) ainsi que leur interaction sur les réponses de gêne. Le Tableau 3.3 résume les résultats de ces ANOVA, que nous allons examiner plus précisément ci-dessous.

#### 2.3.2.1. Le « facteur Niveau Sonore »

Comme attendu, le facteur « Niveau Sonore » a un effet significatif sur les réponses de gêne et en explique environ 35% de la variance constatée (cf.  $\eta^2$  dans le Tableau 3.3).

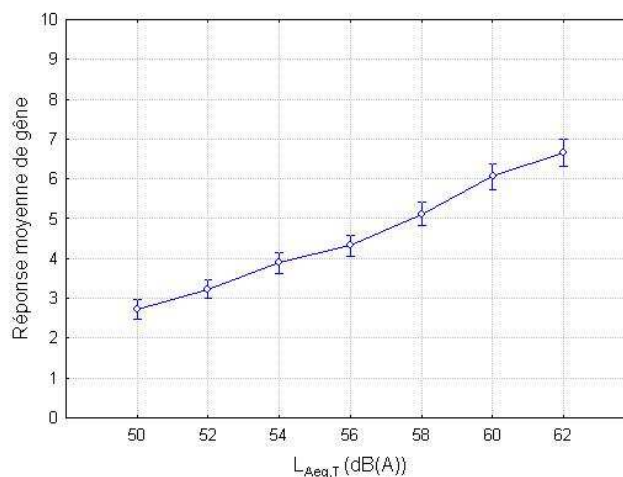
Notons que cette proportion de variance expliquée est plus faible pour la catégorie 2 (deux-roues en allure accélérée) et atteint 18%. L'effet reste toutefois significatif [ $F(6,174) = 92.56$ ;  $p < 0.001$ ]. De manière générale, les réponses de gêne augmentent avec l'augmentation du niveau sonore, comme on peut le voir sur la Figure 3.7 tracée pour la catégorie 1 (deux-roues en allure stabilisée).

<sup>57</sup> Standardiser une variable revient à appliquer une transformation à cette variable qui a pour effet de fixer sa moyenne à 0 et son écart-type à 1 [How98].

<sup>58</sup> Il serait par exemple inutile de faire figurer dans un modèle de régression multiple les indices N et  $L_{Aeq,T}$  – liés à la même caractéristique physique, l'intensité des bruits.

Catégorie	Facteur	SCE	ddl	CM	F	p	$\eta^2$
1	NS*	1880.82	6	313.47	98.38	<0.001	0.36
	S	19.30	4	4.83	2.13	n.s.	...
	NS x S*	39.14	24	1.63	1.95	<0.05	0.01
2	NS*	999.52	6	166.59	92.56	<0.001	0.18
	S*	632.43	4	158.11	20.83	<0.001	0.12
	NS x S*	31.35	24	1.31	1.38	n.s.	...
3	NS*	1822.14	6	303.69	170.97	<0.001	0.35
	S*	189.21	4	47.30	19.15	<0.001	0.04
	NS x S*	59.25	24	2.47	3.01	<0.001	0.01
4	NS*	1544.65	6	257.44	108.12	<0.001	0.32
	S	152.55	3	50.85	20.21	<0.001	0.03
	NS x S	27.48	18	1.53	1.83	<0.05	0.01
5	NS*	2205.57	6	367.60	133.97	<0.001	0.34
	S*	101.73	4	25.43	9.92	<0.001	0.02
	NS x S*	38.91	24	1.62	1.48	n.s.	...
6	NS*	1394.20	6	232.37	106.88	<0.001	0.32
	S	227.99	3	76	29.07	<0.001	0.05
	NS x S	27.32	18	1.52	1.48	n.s.	...
7	NS*	1636.94	6	272.82	138.73	<0.001	0.32
	S*	176.11	4	44.03	14.92	<0.001	0.03
	NS x S*	26.31	24	1.10	1.38	n.s.	...

**Tableau 3.3 : Résultats des ANOVA à mesures répétées menées sur les réponses de gêne collectées au cours des tests relatifs à chaque catégorie. Les effets des facteurs « Niveau Sonore – NS », « Source – S » ainsi que leur interaction « NS x S » sont reportés. \* : l'hypothèse de sphéricité est violée, n.s. : non statistiquement significatif**



**Figure 3.7 : Effet du facteur « Niveau Sonore » sur les réponses de gêne concernant la catégorie 1 (deux-roues en allure stabilisée). Les erreurs-types<sup>59</sup> sont représentées au moyen de barre d'erreur autour des valeurs moyennes.**

<sup>59</sup> Puisque l'on travaille à partir d'échantillons et non de populations, on utilise l'erreur-type pour représenter la dispersion autour des valeurs moyennes. On la définit comme le rapport entre l'écart-type de la moyenne (de l'échantillon) et la racine carrée de la taille de l'échantillon [Dod04].

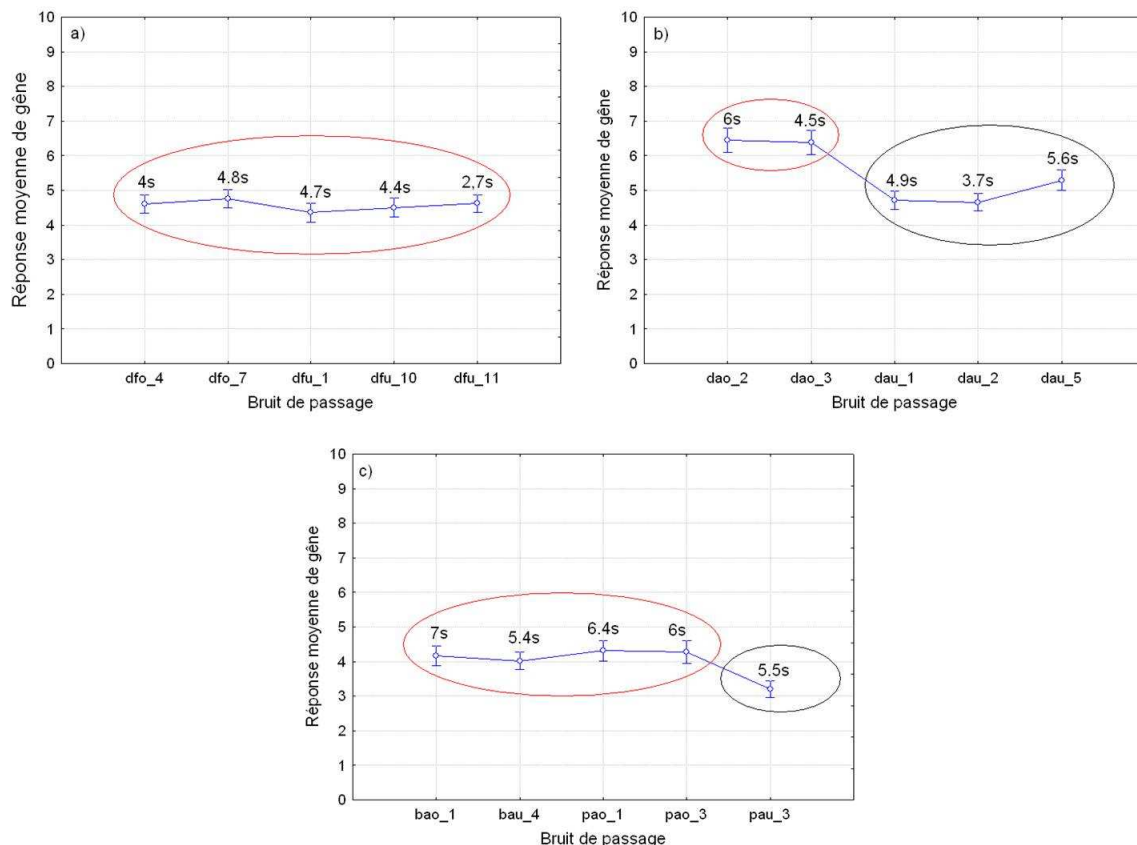
Etant donné que ces résultats sont attendus et prévisibles, nous ne nous appesantirons pas plus sur l'effet de ce facteur.

### 2.3.2.2. Le facteur « Source »

La catégorie 1 est la seule catégorie pour laquelle le facteur « Source » n'a pas d'effet significatif sur les réponses de gêne [ $F(4,116) = 2.13$  ; n.s.], ce qui témoigne d'une certaine homogénéité, du point de vue de la gêne sonore ressentie, des 5 bruits de passage évalués au cours du test.

Pour les 6 autres catégories, l'effet du facteur « Source » sur les réponses de gêne est significatif. Nous distinguons la catégorie 2 des catégories 3 à 7. En effet, si pour les catégories 3 à 7, le facteur « Source » explique en moyenne 3.4% de la variance constatée dans les réponses de gêne, pour la catégorie 2, cela atteint 12%. Nous avons donc suivi les catégories plus ou moins d'hétérogénéité, en termes de gêne ressentie, entre les bruits de passage.

La Figure 3.8 présente l'effet du facteur « Source » pour trois catégories différentes dont l'hétérogénéité, du point de vue de la gêne sonore, entre les bruits de passage varie : catégorie 1 - bruits de passage homogènes, catégorie 2 - bruits de passage très hétérogènes et catégorie 7 - bruits de passage moyennement hétérogène, en termes de gêne sonore ressentie.



**Figure 3.8 : Effet du facteur « Source » pour trois catégories de bruits de passage d'hétérogénéité différente en termes de gêne ressentie. a) Catégorie 1 - homogène ; b) Catégorie 2 - très hétérogène ; c) Catégorie 7 – moyennement hétérogène. Les bruits de passage qui génèrent des réponses de gêne sans différence significative (d'après le test HSD de Tuckey) sont regroupés et entourés sur chaque graphique. La durée des différents bruits de passage est également reportée. Les erreurs-types sont représentées au moyen de barre d'erreur autour des valeurs moyennes.**

Plusieurs éléments sont représentés sur cette figure. Tout d'abord, nous avons indiqué par des ovals de couleurs différentes des groupes de bruits de passage, au sein desquels

les réponses de gêne ne sont pas significativement différentes, d'après le test *post hoc* HSD de Tuckey<sup>60</sup>. Ensuite nous avons fait figurer au dessus des réponses moyennes de gêne dues aux différents bruits de passage leurs durées respectives. En examinant les groupes de bruits de passage rapportés de leur durée respective, il semble que la durée des bruits de passage, mise en jeu dans les différents tests d'évaluation de la gêne, n'ait pas été un critère prioritaire dans la formulation de la réponse de gêne.

Même si les tests d'évaluation de la gêne ont été menés par catégorie de bruits de passage, il semblerait que les bruits de la catégorie 2 (deux-roues à allure accélérée) aient les réponses de gêne les plus importantes. Ce constat est cohérent avec les verbalisations libres recueillies au cours de la première expérience dont on a rendu compte en section 1.1 (cf. Tableau 3.2, les deux-roues en allure accélérée sont jugés « plus désagréables » que les autres bruits de passage). Ce constat est également cohérent avec les scores de désagrément recueillis lors du test de comparaison par paires, dont les résultats sont présentés en ANNEXE D (cf. Figure D.6). En effet, le bruit de passage dao\_2 est le plus désagréable. Toutefois, notons également que des jugements de gêne de court-terme évalués en laboratoire et des jugements de désagrément, même s'ils sont proches, sont des jugements différents (cf. Chapitre 1, section 3.1.2).

### **2.3.2.3. L'interaction des facteurs « Niveau Sonore » et « Source »**

L'interaction des facteurs « Niveau Sonore » et « Source » n'a d'effet significatif sur les réponses de gêne que pour les catégories 1, 3 et 4. Même si l'effet est significatif, la proportion de variance expliquée reste faible, en moyenne 1% pour ces trois catégories.

Etant donné que l'interaction des facteurs principaux n'a pas d'effet significatif pour la majorité des catégories, et qu'en termes de pourcentage de variance expliquée cela reste marginal, nous n'examinerons pas plus en détail cet effet, afin de concentrer nos efforts sur les deux facteurs principaux.

### **2.3.3. Indicateurs caractéristiques de la gêne sonore pour les 7 catégories de bruits de passage**

Les résultats de l'ANOVA nous ont permis de constater les effets sur les réponses de gêne des facteurs « Niveau Sonore » et « Source ». Il s'agira de traduire cela par la proposition d'indices descriptifs à la fois de l'intensité mais également de l'hétérogénéité des sources (excepté pour la catégorie 1). Cette hétérogénéité peut avoir plusieurs origines : spectrale ou temporelle.

Après avoir mis en évidence de tels indices descriptifs nous proposerons des indicateurs de gêne sonore adaptés aux 7 catégories de bruits de passage.

#### **2.3.3.1. Indices descriptifs des facteurs influents**

##### *a. Catégorie 1 : Intensité*

Nous avons vu que les réponses de gêne dues aux bruits de passage de la catégorie 1 (deux-roues en allure stabilisée) sont significativement influencées par le facteur « Niveau Sonore » uniquement. Nous allons donc chercher un indice qui puisse rendre compte au mieux de l'influence de ce facteur sur les réponses de gêne.

Le Tableau 3.4 donne les corrélations entre les réponses moyennes de gêne de la catégorie 1 et divers indices descriptifs de l'intensité calculés.

---

<sup>60</sup> Concernant la catégorie 1, il a été inutile de faire le test HSD de Tuckey étant donné que l'ANOVA a montré que le facteur « Source » n'a pas d'influence significative sur les réponses de gêne.

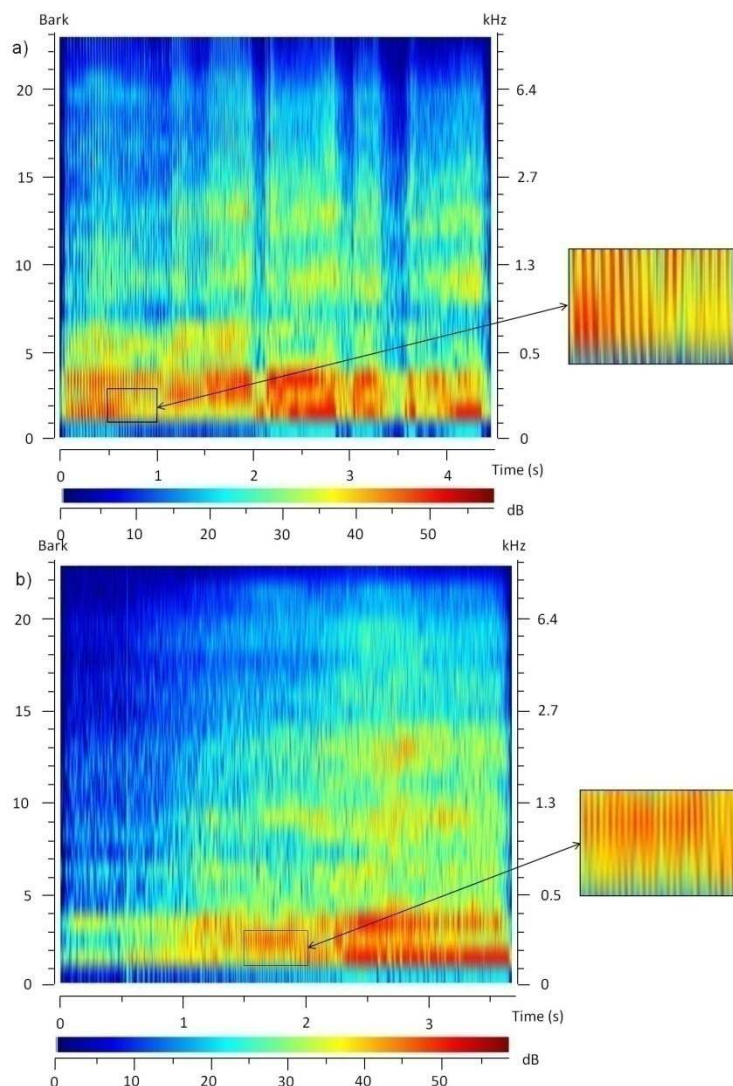
	$L_{Aeq,T}^{61}$	$L_{Amax}$	$L_{Ceq,T}$	$L_{Cmax}$	$L_{C-A}$	$L_{BF}$	$L_{MF}$	$L_{HF}$	N	$L_N$	$N_{max}$
$A_1$	0.98 <sup>d</sup>	0.95 <sup>d</sup>	0.93 <sup>d</sup>	0.90 <sup>d</sup>	0.05 <sup>a</sup>	0.89 <sup>d</sup>	0.98 <sup>d</sup>	0.98 <sup>d</sup>	0.97 <sup>d</sup>	0.97 <sup>d</sup>	0.93 <sup>d</sup>

**Tableau 3.4 : Corrélation entre les réponses moyennes de gêne des bruits de passage de la catégorie 1 ( $A_1$ ) et divers indices descriptifs de l'intensité sonore (calculés pour la voie gauche).  $L_{C-A}$  est la différence entre les indices  $L_{Ceq,T}$  et  $L_{Aeq,T}$ .  $L_{BF}$ ,  $L_{MF}$ ,  $L_{HF}$  sont respectivement les indices  $L_{Aeq,T}$  calculés entre les bandes de tiers d'octave centrées sur 25 et 250Hz, 315 et 1250Hz, 1.6 et 12.5kHz (cf. [AMVM+10]). a : n.s. d :  $p < 0.001$ .**

Nous voyons dans ce Tableau 3.4 que de manière globale les indices énergétiques et psychoacoustiques sont autant corrélés à la gêne. L'indice  $L_{Ceq,T}$  est pour sa part moins corrélé à la gêne que les indices  $L_{Aeq,T}$ , N ou  $L_N$ .

*b. Catégorie 2 : Intensité, caractéristiques spectrales et enveloppe temporelle*

Nous avons établi dans la section 2.3.2 que les facteurs « Niveau Sonore » et « Source » ont un effet significatif sur les réponses de gêne recueillies pour les bruits de passage de la catégorie 2. La Figure 3.9 montre deux spectrogrammes auditifs de bruits de passage (dao\_3 et dau\_2) de la catégorie 2.



**Figure 3.9 : Spectrogrammes auditifs de bruits de passage de la catégorie 2 pour un  $L_{Aeq,T}$  égal à 56 dB(A). a) dao\_3 ; b) dau\_2.**

<sup>61</sup> Pour les métriques mesurées sur la voie droite, les coefficients de corrélation entre  $A_1$  et les indices  $L_{Aeq,T}$ ,  $L_{MF}$  et  $L_{HF}$  sont légèrement inférieurs (respectivement  $r = 0.96$ ,  $r = 0.97$ ,  $r = 0.95$  ;  $p < 0.001$ ), tandis que les coefficients de corrélation entre  $A_1$  et les indices de sonie sont stables et égaux à ceux de la voie gauche.

Nous voyons sur cette Figure 3.9 que ces deux bruits de passage (appartenant à deux groupes de bruits différents en termes de gêne ressentie, d'après le test HSD de Tuckey) montrent un contenu spectral différent. Les parties zoomées illustrent des valeurs différentes des indices F et R (force de fluctuation et rugosité) pour ces deux bruits de passage, étant donné, que les fluctuations rapides et périodiques sont plus rapprochées pour dau\_2 et la profondeur d'amplitude est plus faible pour dau\_2.

Le Tableau 3.5 donne les corrélations entre les réponses moyennes de gêne due aux bruits de passage de la catégorie 2 et divers indices mettant en évidence les caractéristiques spectrales et temporelles de ces bruits.

	$L_{Aeq,T}^{62}$	$L_{Ceq,T}$	$L_{C-A}$	$L_{BF}$	$L_{MF}$	$L_{HF}$	N	$L_N$	$N_{15-18}$	$F_{max}$	F	$R_{max}$	R
$A_2$	0.71 <sup>d</sup>	0.55 <sup>c</sup>	-0.43 <sup>c</sup>	0.33 <sup>a</sup>	0.57 <sup>d</sup>	0.73 <sup>d</sup>	0.72 <sup>d</sup>	0.71 <sup>d</sup>	0.81 <sup>d</sup>	0.75 <sup>d</sup>	0.63 <sup>d</sup>	0.56 <sup>d</sup>	0.62 <sup>d</sup>

**Tableau 3.5 : Corrélation entre les réponses moyennes de gêne des bruits de passage de la catégorie 2 ( $A_2$ ) et divers indices (calculés pour la voie gauche).  $N_{15-18}$  est la sonie intégrée entre 15 et 18 Barks,  $F_{max}$  et  $R_{max}$  sont respectivement la force de fluctuation et la rugosité maximum. <sup>a</sup> : n.s. ; <sup>c</sup> :  $p < 0.01$  ; <sup>d</sup> :  $p < 0.001$ .**

De manière générale, les indices liés à l'intensité sont moins bien corrélés à  $A_2$  que pour la catégorie 1, ce qui est attendu, étant donné que le facteur « Niveau Sonore » explique moins de variance constatée dans les réponses de gêne due à ces bruits de passage (cf. Tableau 3.3). Pour les deux voies, on note que l'indice N est globalement mieux corrélé à  $A_2$  que l'indice  $L_{Aeq,T}$ . Nous voyons que l'indice  $N_{15-18}$  qui représente la sonie intégrée entre 15 et 18 Barks (respectivement 2.7 et 4.4kHz) est le mieux corrélé à  $A_2$ . Cet indice contient à la fois l'information sur l'intensité mais également l'information sur le contenu spectral en hautes fréquences. Nous voyons également que les indices, précédemment identifiés, pour décrire l'évolution périodique de l'enveloppe temporelle (F,  $F_{max}$ , R, et  $R_{max}$ ), liée au bruit du groupe moto-propulseur, sont également corrélés significativement à  $A_2$ .

### c. Catégorie 3 : intensité et évolution temporelle

L'ANOVA nous a révélé une certaine hétérogénéité dans les bruits de passage de la catégorie 3. Nous pouvons nous servir des interprétations (cf. section 1.2.4) données pour la dimension 1 de l'espace perceptif résultant de l'EMD du test de comparaison par paires. Nous avons dit que des indices décrivant l'évolution périodique de l'enveloppe temporelle et l'évolution temporelle globale des bruits de passage permettaient de distinguer des allures différentes. De plus nous savons que les sources correspondant aux bruits de passage de la catégorie 3 sont perçues par les sujets comme des véhicules qui « ne font que passer ». Il serait pertinent de chercher des indices permettant de décrire l'évolution temporelle globale. Nous avons selon une procédure de calcul analogue à celle de l'indice  $\Delta L^+$  calculé de nouveaux indices  $\Delta L^-$ ,  $\Delta N^+$ ,  $\Delta N^-$ , qui sont respectivement le taux de décroissance du niveau sonore en fonction du temps<sup>63</sup> (exprimé en  $dB(A).s^{-1}$ ), le taux de croissance de la sonie en fonction du temps et le taux de décroissance de la sonie en fonction du temps (exprimés en  $sones.s^{-1}$ ).

Le Tableau 3.6 donne les corrélations entre les réponses moyennes de gêne due aux bruits de passage de la catégorie 3 et divers indices descriptifs de l'intensité et de l'évolution temporelle globale.

<sup>62</sup> Pour les métriques calculées sur la voie droite, le coefficient de corrélation entre  $A_2$  et l'indice  $L_{Aeq,T}$  est légèrement plus faible ( $r=0.68$  ;  $p < 0.001$ ), tandis que le coefficient de corrélation entre  $A_2$  et la sonie N est légèrement plus élevée ( $r=0.77$  ;  $p < 0.001$ ).

<sup>63</sup> L'indice  $\Delta L^-$  est calculé en effectuant une régression linéaire entre le temps et les valeurs  $L_A(t)$  après que le maximum soit atteint (cf. Figure 3.6)

	L <sub>Aeq,T</sub>	L <sub>Ceq,T</sub>	L <sub>C-A</sub>	L <sub>BF</sub>	L <sub>MF</sub>	L <sub>HF</sub>	$\Delta L^+$	$\Delta L^-$	N	L <sub>N</sub>	$\Delta N^+$	$\Delta N^-$
A <sub>3</sub>	0.93 <sup>d</sup>	0.96 <sup>d</sup>	0.18 <sup>a</sup>	0.92 <sup>d</sup>	0.90 <sup>d</sup>	0.89 <sup>d</sup>	0.10 <sup>a</sup>	0.10 <sup>a</sup>	0.98 <sup>d</sup>	0.97 <sup>d</sup>	0.67 <sup>d</sup>	-0.55 <sup>d</sup>

**Tableau 3.6 : Corrélation entre les réponses moyennes de gêne des bruits de passage de la catégorie 3 (A<sub>3</sub>) et divers indices calculés pour la voie gauche. <sup>a</sup> : n.s. ; <sup>d</sup> : p<0.001.**

Nous voyons que parmi les indices descriptifs de l'intensité, les indices psychoacoustiques sont mieux corrélés à A<sub>3</sub>. Parmi les indices décrivant l'évolution temporelle globale, les indices  $\Delta N^+$  et  $\Delta N^-$  sont les mieux corrélés à A<sub>3</sub>.

*d. Catégories 4, 5 et 7 : Intensité et enveloppe temporelle*

Pour ces catégories nous avons également mis en évidence l'influence du facteur « Niveau Sonore » et du facteur « Source » sur les réponses de gêne. Ces catégories ont en outre un point commun : elles concernent des bruits de passage en allure décélérée (catégorie 4 et 5) ou accélérée (catégorie 7). Or nous avons dit que pour ces catégories le moteur des véhicules est plus sollicité. Il convient alors de chercher des indices décrivant l'intensité et également le bruit du groupe-motopropulseur. Nous avons mis en évidence dans les précédentes expériences et pour la catégorie 2 que cela pouvait être traduit par la rugosité ou la force de fluctuation.

Le Tableau 3.7 donne les corrélations entre les réponses moyennes de gêne due aux bruits de passage des catégories 4, 5 et 7 et divers indices liés à l'intensité ou l'enveloppe temporelle de ces bruits.

	L <sub>Aeq,T</sub> <sup>64</sup>	L <sub>Ceq,T</sub>	L <sub>C-A</sub>	L <sub>BF</sub>	L <sub>MF</sub>	L <sub>HF</sub>	N	L <sub>N</sub>	F <sub>max</sub>	F	R <sub>max</sub>	R
A <sub>4</sub>	0.87 <sup>d</sup>	0.88 <sup>d</sup>	0.27 <sup>a</sup>	0.75 <sup>d</sup>	0.94 <sup>d</sup>	0.71 <sup>d</sup>	0.98 <sup>d</sup>	0.96 <sup>d</sup>	0.27 <sup>a</sup>	0.32 <sup>a</sup>	0.54 <sup>c</sup>	0.78 <sup>d</sup>
A <sub>5</sub>	0.94 <sup>d</sup>	0.93 <sup>d</sup>	0.05 <sup>a</sup>	0.83 <sup>d</sup>	0.80 <sup>d</sup>	0.94 <sup>d</sup>	0.95 <sup>d</sup>	0.94 <sup>d</sup>	0.42 <sup>b</sup>	0.36 <sup>b</sup>	0.69 <sup>d</sup>	0.93 <sup>d</sup>
A <sub>7</sub>	0.89 <sup>d</sup>	0.94 <sup>d</sup>	0.20 <sup>a</sup>	0.97 <sup>d</sup>	0.90 <sup>d</sup>	0.85 <sup>d</sup>	0.96 <sup>d</sup>	0.95 <sup>d</sup>	0.60 <sup>d</sup>	0.68 <sup>d</sup>	0.35 <sup>b</sup>	0.93 <sup>d</sup>

**Tableau 3.7 : Corrélation entre les réponses moyennes de gêne des bruits de passage de la catégorie 4 (A<sub>4</sub>), 5 (A<sub>5</sub>) et 7 (A<sub>7</sub>) et divers indices calculés pour la voie gauche. <sup>a</sup> : n.s. ; <sup>b</sup> : p<0.05 ; <sup>c</sup> : p<0.01 ; <sup>d</sup> : p<0.001.**

L'examen de ce Tableau 3.7 nous dit que concernant les indices liés à l'intensité, la sonie et le niveau d'isotonie sont généralement mieux corrélés aux réponses moyennes de gêne que les indices énergétiques. Nous voyons également que les indices liés à la force de fluctuation et la rugosité sont également corrélés aux réponses moyennes de gênes, ce qui confirme nos interprétations précédentes.

*e. Catégorie 6 : intensité et caractéristiques spectrales.*

Pour cette catégorie, les facteurs « Niveau Sonore » et « Source » ont un effet significatif sur les réponses de gêne moyenne. Il s'agit d'une catégorie pour laquelle les véhicules sont en allure accélérée. Au vu des indices mis en exergue pour les autres catégories (2, 4, 5 et 7), il est légitime de s'attendre à ce que les indices décrivant l'évolution périodique de l'enveloppe temporelle (liée au bruit du groupe moto-propulseur) ressortent.

Le Tableau 3.8 donne les corrélations entre les réponses moyennes de gêne due aux bruits de passage de la catégorie 6 et divers indices.

<sup>64</sup> Pour les métriques calculées sur la voie droite, l'indice L<sub>Aeq,T</sub> est légèrement mieux corrélé à A<sub>5</sub> (r=0.97 ; p<0.001).



	$L_{Aeq,T}$	$L_{Ceq,T}$	$L_{C-A}$	$L_{BF}$	$L_{MF}$	$L_{HF}$	N	$L_N$	$F_{max}$	F	$R_{max}$	R
$A_6$	0.93 <sup>d</sup>	0.92 <sup>d</sup>	0.16 <sup>a</sup>	0.80 <sup>d</sup>	0.97 <sup>d</sup>	0.89 <sup>d</sup>	0.96 <sup>d</sup>	0.96 <sup>d</sup>	0.54 <sup>c</sup>	0.60 <sup>c</sup>	0.10 <sup>a</sup>	0.72 <sup>d</sup>

**Tableau 3.8 : Corrélation entre les réponses moyennes de gêne des bruits de passage de la catégorie 6 ( $A_6$ ) et divers indices calculés pour la voie gauche. <sup>a</sup> : n.s. ; <sup>c</sup> :  $p < 0.01$  ; <sup>d</sup> :  $p < 0.001$ .**

Nous voyons comme pour les catégories 4, 5 et 7 que les indices liés à la rugosité et la force de fluctuation sont corrélés à  $A_6$ . Concernant les indices liés à l'intensité, la sonie est mieux corrélée à  $A_6$  que l'indice  $L_{Aeq,T}$ , mais semble être moins bien corrélée que l'indice  $L_{MF}$ .

### 2.3.3.2. Proposition d'indicateurs de gêne

Sur la base des indices acoustiques mis en exergue dans la section 2.3.3.1, nous allons construire des modèles de régression entre les réponses moyennes de gêne comme variable dépendante, et différents indices mis précédemment en évidence et considérés comme variable indépendante.

Plusieurs modèles sont construits par catégorie perceptive et cognitive de bruits de passage, mais seulement les modèles statistiquement valides (i.e. qui respectent les conditions inhérentes à l'exécution d'une régression linéaire simple ou multiple) pourront être retenus comme indicateurs.

Dans le cas de régressions multiples, nous veillerons à éviter la colinéarité entre variables indépendantes. Enfin nous nous limiterons à des modèles à deux variables indépendantes, pour les raisons suivantes : (1) nous ne disposons pas de suffisamment de données pour prendre en compte de plus grands nombres de variables indépendantes ([How98, Ala09]), (2) un indicateur de gêne doit rester relativement simple dans son application. En effet, plus il y a de variables indépendantes, plus on augmente la complexité de l'indicateur et son application.

Le Tableau 3.9 présente les indicateurs de gêne retenus. Dans le cas d'indicateurs issus de modèles de régression multiple nous avons également indiqué les coefficients de régression standardisés. Nous faisons également figurer le coefficient de détermination (ajusté dans le cas de régressions multiples) et l'erreur type de l'estimation.

Catégorie	Equations de régression pour les indicateurs	$R^2$ (ou $r^2$ )	Err. stand.
1	$A_1 = 1.03N^d + 0.18$	0.95 <sup>d</sup>	0.32
2	$A_2 = 16.99(0.73)N_{15-18}^d + 0.10(0.52)F^d + 1.45$	0.92 <sup>d</sup>	0.37
3	$A_3 = 1.32(1.11)N^d - 0.32(0.20)\Delta N^d - 0.35$	0.97 <sup>d</sup>	0.23
4	$A_4 = 0.88(0.93)N^d + 0.02(0.09)R_{max}^b + 0.33$	0.96 <sup>d</sup>	0.29
5	$A_5 = 1.06(0.90)N^d + 0.08(0.24)F_{max}^d - 1$	0.95 <sup>d</sup>	0.34
6	$A_6 = 0.29L_{MF}^d - 8.48$	0.95 <sup>d</sup>	0.34
7	$A_7 = 0.95(0.85)N^d + 0.10(0.18)F^c - 0.51$	0.94 <sup>d</sup>	0.34

**Tableau 3.9 : Indicateurs de gêne retenus pour les catégories de bruits de passage de véhicules routiers, calculés pour la voie gauche. Pour les indicateurs issus de régression multiples, nous avons fait figurer entre parenthèse et en italique les coefficients de régression standardisés.  $R^2$  (ou  $r^2$ ) sont les coefficients de détermination associés aux modèles. Err. stand. représente l'erreur type de l'estimation. <sup>b</sup> :  $p < 0.05$  ; <sup>c</sup> :  $p < 0.01$  ; <sup>d</sup> :  $p < 0.001$ .**

D'une manière générale, les coefficients de détermination des modèles de régression sont élevés, entre 0.92 (catégorie 2 – deux-roues à allure accélérée) et 0.97 (catégorie 3 –

bus, poids lourds, et véhicules légers à allure stabilisée) témoignant d'une bonne qualité d'ajustement des données. Nous voyons également qu'à l'exception des catégories 1 (deux-roues à allure stabilisée) et 6 (véhicules légers à allure accélérée), les indicateurs proposés associent la sonie de Zwicker (N) à un indice décrivant des aspects temporels liés aux bruits de passage (évolution périodique de l'enveloppe temporelle pour les indices R,  $R_{\max}$ , F,  $F_{\max}$  et évolution temporelle globale pour l'indice  $\Delta N$ ).

Plus précisément, pour la catégorie 1 (deux-roues à allure stabilisée), la proposition de la sonie de Zwicker N comme indicateur de gêne sonore est en accord avec les résultats de l'ANOVA, où nous avons vu que les réponses de gêne étaient uniquement affectées par le facteur « Niveau Sonore ». Pour les bruits de passage de la catégorie 6 (véhicules légers à allure stabilisée), la proposition de l'indice  $L_{MF}$  comme indicateur de gêne est à même de rendre compte à la fois de l'influence des facteurs « Niveau Sonore » et « Source ». Pour ces bruits de passage, les sujets ont été plus sensibles au contenu spectral en moyenne fréquence (315-1250Hz). En effet, on trouve un écart maximal d'environ 7dB(A) dans les valeurs de cet indice pour les bruits de passage les plus et moins gênants (d'après HSD de Tuckey).

Pour la catégorie 2, l'indice  $N_{15-18}$  est choisi par rapport à l'indice N pour rendre compte à la fois de l'effet de l'intensité, mais également d'une partie de la diversité entre les bruits de passage dus aux aspects spectraux (cf. Figure 3.9). En effet, la valeur de l'indice  $N_{15-18}$  pour un bruit de passage plus gênant (d'après HSD de Tuckey, cf. Figure 3.8) peut représenter jusqu'à 44% d'augmentation par rapport à la valeur d'un bruit de passage moins gênant. L'indice F est lui choisi pour rendre compte des variations périodiques de l'enveloppe temporelle, qui sont dues aux variations dans les bruits du moteur des différents bruits de passage de cette catégorie (cf. Figure 3.9). Nous trouvons un écart maximal d'environ 21 cvacils entre des bruits de passage plus et moins gênants (d'après HSD de Tuckey, cf. Figure 3.8). Pour les bruits de passage de cette catégorie, pour une même intensité en hautes fréquences ceux pour lesquels la sensation de force de fluctuation est plus importante seront jugés plus gênants (et *vice versa*). Les coefficients de régression standardisés de  $N_{15-18}$  et F, montrent que l'indice  $N_{15-18}$  affecte 1.4 fois plus les réponses moyennes de gêne par rapport à l'indice F.

Pour la catégorie 3 (bus, poids lourds et véhicules légers à allure stabilisée), la sonie de Zwicker est utilisée pour rendre compte de la variation de l'intensité perçue (cf. ANNEXE B), et l'indice  $\Delta N$  pour rendre compte de la diversité des bruits de passage en ce qui concerne leur évolution temporelle globale. En effet, pour des bruits de passage plus et moins gênants (d'après HSD de Tuckey), les valeurs des indices N et  $\Delta N$  peuvent représenter jusqu'à respectivement 14% et 88% d'augmentation. Pour les bruits de passage de cette catégorie, à une intensité ressentie égale, les sujets ont trouvé plus gênants des bruits de passage dont les sources semblent mettre plus de temps à partir. Les coefficients de régression standardisés montrent que la sonie affecte près de 6 fois plus les réponses moyennes de gêne que l'indice  $\Delta N$ .

Pour les catégories 4 (deux-roues en allure décélérée), 5 (bus, poids lourds et véhicules légers en allure décélérée) et 7 (bus et poids lourds en allure accélérée), des indicateurs de gêne similaires sont proposés. Ils associent la sonie de Zwicker N pour rendre compte de l'influence de la variation de l'intensité perçue et un indice décrivant les variations périodiques de l'enveloppe temporelle entre les bruits de passage (F,  $F_{\max}$ , R ou  $R_{\max}$ ). Pour les bruits de passage de ces catégories, pour une même valeur de la sonie N, plus les sensations de rugosité ou de force de fluctuation sont prononcées, plus les bruits de passage seront gênants. Les coefficients de régression standardisés de ces modèles de régression montrent que la sonie affecte environ de 4 à 10 fois plus les réponses moyennes de gêne que la rugosité ou la force de fluctuation (respectivement pour les bruits de passage

de la catégorie 4 et 5). Pour les bruits de passage de la catégorie 7, les coefficients de régression standardisés indiquent que les réponses de gêne sont environ 5 fois plus affectées par la sonie en comparaison à la force de fluctuation.

## 2.4. Discussion

Les résultats de l'ANOVA nous ont montré qu'à l'intérieur des catégories, les bruits de passage sont plus ou moins hétérogènes du point de vue de la gêne sonore qu'ils engendrent, rendant le facteur « Source » plus ou moins influent. Nous avons vu également, que lorsqu'il existe des groupes de bruits de passage significativement différents du point de vue de la gêne, il n'est pas possible de relier ces différences significatives à des différences entre les durées des bruits de passage utilisés. De même, nous avons vu pour la catégorie 1 dont les bruits de passage ont des durées différentes, qu'il n'y a pas de différence significative entre ces bruits du point de vue de la gêne. Cela nous amène à penser, que d'autres propriétés des bruits de passage que leur durée objective, affectent les réponses de gêne. Pour nos stimuli et la dynamique de durée considérée (environ entre 3 et 9s), nous ne trouvons pas d'effet de la durée sur les réponses de gêne, ce résultat rejoint le constat fait de précédents travaux (cf. [PP72]).

Nous avons également vu que le facteur « Niveau Sonore » a une grande influence sur les réponses de gêne. De manière logique, les indices rendant compte de ce facteur sont bien corrélés aux réponses moyennes de gêne. Toutefois, nous avons vu que la sonie N est généralement aussi bien voire mieux corrélée aux réponses moyennes de gêne que l'indice  $L_{Aeq,T}$ . Cela est en accord avec Nilsson [Nil07] qui a trouvé dans la sonie un meilleur indicateur de la gêne à court-terme que l'indice  $L_{Aeq,T}$ . Par contre de précédents travaux ont eux accordé du crédit à l'indice  $L_{Aeq,T}$  pour caractériser les réponses subjectives au bruit du trafic routier (cf. [CC76, Cer79, YDB82, VV02]). Malheureusement dans ces travaux, la sonie de Zwicker n'était pas présentée.

Le bruit provenant du trafic routier possède généralement un contenu en basses fréquences important. Les bruits de passage étudiés ne dérogent pas à cette règle comme on a pu le voir sur les spectrogrammes auditifs des prototypes (cf. Figure 3.3). Nous l'avons dit au Chapitre 1, la pondération A a tendance à sous-estimer l'aspect basse-fréquence des bruits de l'environnement [BHJ96], et d'autres chercheurs ont suggéré l'emploi de pondérations différentes. Nilsson [Nil07] a par exemple proposé d'ajouter à l'indice  $L_{Aeq,T}$  un terme de correction ( $L_{C-A}$ , la différence entre les indices  $L_{Ceq,T}$  et  $L_{Aeq,T}$ ) pour prédire la gêne due au bruit du trafic routier (cf. Chapitre 1, équation (1.16)). Dans notre cas, l'indice  $L_{Ceq,T}$  est significativement corrélé aux réponses moyennes de gêne, mais cependant moins bien corrélé que l'indice N. De plus, hormis la catégorie 2, les réponses moyennes de gêne ne sont jamais corrélées significativement à l'indice  $L_{C-A}$ . Cependant cela n'est pas surprenant dans la mesure où Nilsson avait sélectionné dans son expérience des bruits de trafic routier en fonction de leur valeur concernant l'indice  $L_{C-A}$  [Nil07].

Nous avons fait état dans le Chapitre 1 d'indices anciens tels que le  $L_{NP}$  ou le TNI (respectivement le « Level of Noise Pollution » et le « Traffic Noise Index »). Dans de précédents travaux, il a été observé que ces indices étaient bien corrélés aux réponses de gêne récoltées *in situ* (cf. [GL68, Rob71]). En laboratoire, Versfeld et Vos [VV97] ont montré que ces indices sont faiblement corrélés à la gêne pour des stimuli d'une durée de 45s et qu'ils ne permettaient pas d'expliquer des différences entre réponses de gêne dues à différents types de véhicules. Yaniv *et al.* [YDB82] ont montré, pour leurs travaux conduits en laboratoire, que pour des séquences de trafic routier de plus longue durée (3mn), l'indice  $L_{Aeq,T}$  permet une meilleure prédiction de la gêne que les indices TNI ou  $L_{NP}$ . Dans notre cas, nous n'avons pas jugé opportun de calculer ces indices, étant donné qu'ils ont été construits dans l'optique de caractériser un trafic routier de longue durée, en prenant en compte le

niveau de pression sonore équivalent et ses variations au cours du temps. Toutefois, au vu des précédents résultats cités, il est légitime de penser que ces indices seraient plus faiblement corrélés aux réponses moyennes de gêne que la sonie N par exemple.

Nous pouvons également rapprocher les résultats de ces tests d'écoute par catégorie aux résultats de l'analyse linguistique menée sur les données verbales récoltées au cours du test de catégorisation libre et verbalisation libre (cf. section 1.1.3.2). En effet nous avons vu que les bruits de passage de la catégorie 2 (deux-roues à allure accélérée) étaient décrits comme « stridents », « plus aigus ». L'indicateur de gêne proposé pour cette catégorie associe la force de fluctuation F à la sonie intégrée entre 15 et 18 Barks, qui permet de prendre en compte ce caractère aigu. Nous pouvons également prendre l'exemple de la catégorie 5 (bus, poids lourds et véhicules légers à allure décélérée) pour laquelle l'indicateur associe la sonie de Zwicker et la force de fluctuation maximale. En effet, la force de fluctuation permet de rendre compte de l'influence du bruit du groupe moto-propulseur et dans les descriptions verbales, cela a été décrit : « ça tousse ». Nous avons vu dans les précédentes expériences que les différentes allures peuvent être caractérisées au moyen d'indices décrivant l'évolution temporelle globale ou l'évolution périodique de l'enveloppe temporelle des bruits de passage. Dans les indicateurs proposés, les catégories de bruits de passage en accélération ou décélération associent une mesure de l'intensité à une mesure de l'évolution périodique de l'enveloppe temporelle des bruits de passage, exceptée pour la catégorie 6 (véhicules légers en accélération). Toutefois cela n'est pas incohérent avec l'analyse linguistique puisque ces bruits de passage « ne pétaradent pas » (cf. Tableau 3.2).

La structuration des catégories perceptives et cognitives, mise en évidence au cours du test de catégorisation libre et verbalisation libre puis au cours du test de comparaison par paires, est fonction de l'identification de la source (le type de véhicules) mais également d'aspects temporels des bruits de passage (l'allure des véhicules). Les indices associés à la sonie de Zwicker dans les indicateurs proposés (cf. Tableau 3.9) rendent compte d'aspects temporels liés aux différentes allures : ils décrivent en effet l'évolution temporelle globale (à travers l'indice  $\Delta N$ ) ou l'évolution périodique de l'enveloppe temporelle (à travers les indices de rugosité et de force de fluctuation). Par ailleurs, des indices rendant compte d'aspects spectraux ont été mis en évidence (par exemple pour les catégories 2 et 6), ce qui est cohérent avec les verbalisations recueillies au cours du test de catégorisation libre (cf. « plus strident »). La démarche adoptée dans ces travaux a donc permis de proposer des indicateurs de gêne pertinents du point de vue de l'individu, en considérant à la fois les réponses de gêne recueillies par catégorie perceptive, et les verbalisations libres.

### 3. Synthèse

Conformément à nos objectifs initiaux d'amélioration des cartes de bruit par la proposition d'indicateurs caractéristiques de la gêne due au bruit de trafic routier qui soient pertinents du point de vue de l'individu, nous avons proposé une démarche associant typologie perceptive et cognitive de bruits routiers et caractérisation de ces catégories de bruits en termes de gêne. Partant (1) d'une typologie physique *a priori* et (2) d'enregistrements stéréophoniques de bruits de passage de véhicules routiers décrivant les différents éléments de cette typologie physique, nous avons mis en place deux expériences préliminaires destinées à tester la pertinence perceptive de cette typologie physique.

La première expérience (test de catégorisation libre et verbalisation libre) est basée sur une récente théorie cognitive qui vise à accéder, par le biais du langage, aux représentations partagées entre les individus de leurs expériences sensorielles quotidiennes. L'analyse

statistique des partitions nous a permis de proposer une typologie perceptive et cognitive constituée de 7 catégories de bruits de passage. L'analyse linguistique menée par D. Dubois (cf. [EEO10, MMDP12]) a permis de confirmer nos conclusions quant à la structuration des catégories. Ainsi, celles-ci sont structurées de manière interdépendante par les deux critères *a priori* « type de véhicules » et « type d'allures ». Le troisième critère (« type de morphologies ») bien que perçu par les sujets n'est pas apparu prioritaire dans le processus de catégorisation.

La deuxième expérience (test de comparaison par paire) considère un protocole expérimental et des méthodes d'analyse classiques en psychoacoustique et vise à évaluer la robustesse des conclusions de la première expérience. Les bruits de passage sélectionnés ont été échelonnés dans un espace perceptif à deux dimensions. Nous avons interprété la première dimension de cet espace comme étant liée aux aspects temporels des bruits de passage. Plus précisément, nous avons montré qu'une combinaison d'indices décrivant différents aspects temporels (évolution périodique de l'enveloppe temporelle décrite par la rugosité et évolution temporelle globale décrite par le taux d'accroissement du niveau sonore en fonction du temps). Nous avons interprété la deuxième dimension comme étant liée à l'identification de la source de bruit et aux variations du niveau sonore en moyennes fréquences. Une confrontation directe des résultats de ces deux expériences, nous a également rassurés quant à la consistance des résultats.

Non seulement, nous avons conforté la proposition de la typologie perceptive et cognitive, mais nous avons de plus progressé quant à la structuration des catégories. En effet, la typologie perceptive et cognitive est structurée par « le type de véhicules » que l'on peut associer à l'identification de la source de bruit, un critère de nature catégorielle, mais également par « le type d'allures » que l'on peut relier aux aspects temporels des bruits de passage, un critère de nature continue. En tout état de cause, ces deux expériences préliminaires sont apparues complémentaires, et nous ont fournis des résultats qualitatifs et quantitatifs quant à la proposition, la confrontation et la structuration de la typologie perceptive et cognitive.

Dans la suite, nous avons alors mis en place un protocole pour étudier la gêne en laboratoire pour chaque catégorie perceptive séparément. Les analyses de variance menées sur les réponses de gêne ont révélé l'influence du facteur « Niveau Sonore », ce qui ne constitue pas une surprise en soi. Elles ont également révélé une influence importante du facteur « Source » (excepté pour la catégorie 1) ce qui témoigne d'une grande diversité des bruits, en termes de gêne ressentie, à l'intérieur d'une catégorie perceptive. Nous avons ensuite mis en évidence des indices permettant de décrire l'influence de ces facteurs. Puis sur cette base, nous avons proposé un indicateur caractéristique de la gêne sonore pour chaque catégorie perceptive. Ces indicateurs associent une mesure de l'intensité construite à partir de la sonie de Zwicker et une mesure des aspects temporels, soit liés à l'évolution temporelle globale (catégorie 3), soit à l'évolution périodique de l'enveloppe temporelle (catégorie 4, 5 et 7). Pour la catégorie 1, c'est la sonie de Zwicker qui est proposée comme indicateur de gêne, et pour la catégorie 6 c'est le niveau de pression sonore pondéré A en moyennes fréquences qui est retenu. Pour la catégorie 2, la sonie de Zwicker intégrée entre 15 et 18 Barks associée à la force de fluctuation constituent l'indicateur de gêne.

Les indicateurs proposés rendent compte des aspects temporels et spectraux en cohérence avec les deux expériences précédentes, mettant en jeu les bruits issus des différentes catégories perceptives et cognitives. Ils contribuent ainsi à une meilleure caractérisation des bruits routiers qui soit pertinente du point de vue de l'individu. Néanmoins, il s'agit de poursuivre le travail, en nous intéressant à la multi-exposition aux bruits routier et industriel étudiée de manière classique en laboratoire (Chapitre 4 ), puis de confronter ce travail aux données d'une expérience en environnement simulé (Chapitre 5 ),

pour laquelle nous reconstruirons un trafic routier à partir des bruits de passage issus des différentes catégories perceptives et cognitives. Enfin ces résultats seront aussi confrontés aux données d'une enquête *in situ* (Chapitre 5).



## **Chapitre 4 : Caractérisation physique et perceptive de situations de multi-exposition au bruit provenant de la circulation routière et au bruit industriel**

*En partant des catégories perceptives et cognitives de bruits de passage de véhicules routiers établies au Chapitre 3 , et du bruit industriel enregistré (cf. Chapitre 2 ) dans une zone résidentielle dont les habitants ont été l'objet d'une enquête in situ (cf. ANNEXE A), 7 tests d'évaluation de la gêne en situation de multi-exposition au bruit industriel et aux bruits de passage de véhicules routiers, issus des 7 catégories perceptives et cognitives, sont mis en place.*

*La section 1 décrit brièvement le bruit industriel enregistré in situ qui sera utilisé pour ces expérimentations.*

*La section 2 présente le protocole expérimental mis en place. Ce dernier adapte le protocole utilisé au Chapitre 3 pour l'étude de la gêne due à chaque catégorie de bruits de passage, en respectant les recommandations pour l'étude de la gêne en situation de multi-exposition sonore évoquées au Chapitre 1 . Le protocole inclut un face-à-face entre expérimentateur et sujet, à l'issue de chaque test, destiné à récolter des informations quant à la perception qu'ont les sujets des bruits étudiés. La section 3 évoque brièvement le traitement et analyses statistiques menés sur les différentes données.*

*La section 4 donne les résultats des 7 tests d'évaluation de la gêne en situation de multi-exposition au bruit industriel et aux bruits de passage de véhicules routiers, issus des 7 catégories perceptives et cognitives. L'analyse des verbatims issus des différents face-à-face d'une part et l'analyse des gênes spécifiques d'autre part, se révèlent notamment cohérentes (1) avec les travaux décrits dans ce mémoire de thèse pour les catégories de bruits de passage de véhicules routiers et (2) avec de précédents travaux portant sur les bruits industriels permanents et stables. L'analyse conjointe de l'évolution des gênes spécifiques et de la gêne totale pour chaque combinaison (du bruit industriel et des bruits de passage des 7 catégories) nous permet de mettre en évidence un phénomène de source dominante mais également de synergie entre les bruits combinés. Enfin, 5 modèles psychophysiques et 4 modèles perceptifs, selon deux variantes (excepté le modèle de sommation pondérée de Vos), sont évalués vis-à-vis de la prédiction de la gêne totale. Il s'avère alors que les modèles perceptifs, et notamment le modèle de sommation vectorielle, offrent une meilleure prédiction de la gêne totale que les modèles psychophysiques.*

*Les résultats sont ensuite discutés dans la section 5 et synthétisés dans la section 6.*



# 1. Préambule

Conformément à la démarche dont nous avons dessiné les grandes étapes au Chapitre 1 , nous prenons comme point de départ les 7 catégories perceptives et cognitives de bruits de passage de véhicules routiers ainsi que les indicateurs caractéristiques de la gêne proposés à l'issue du Chapitre 3 .

Pour conduire la caractérisation physique et perceptive des situations de multi-exposition au bruit industriel et au bruit routier, il s'agit alors de combiner pour chaque catégorie de la typologie perceptive et cognitive, les bruits de passage de véhicules routiers la constituant avec un bruit industriel.

Dans l'optique de confronter les résultats, établis en laboratoire, aux données d'un test d'évaluation de la gêne en environnement simulé (cf. Chapitre 5 ) puis aux données d'une enquête *in situ* portant sur la gêne due à la multi-exposition au bruit routier et au bruit industriel (cf. ANNEXE A), le bruit industriel a été enregistré *in situ* (cf. Chapitre 2 ) au cœur de la zone résidentielle qui a fait l'objet de l'enquête.

N'ayant enregistré le bruit industriel qu'en un point unique au cœur de la zone enquêtée et ce plus d'un an après le déroulement de l'enquête *in situ*, nous sommes contraints d'effectuer deux hypothèses toutefois plausibles :

- Le bruit industriel est homogène dans l'ensemble de la zone enquêtée et seule la valeur de son niveau de pression sonore équivalent pondéré A varie en fonction de l'éloignement des logements par rapport au site industriel ;
- Le bruit résultant de l'activité du site industriel n'a pas changé depuis le déroulement de l'enquête *in situ* (hypothèse reposant sur les éléments présentés au Chapitre 2 ).

La Figure 4.1 présente le spectrogramme auditif de ce bruit industriel au point d'enregistrement (cf. Chapitre 2 et ANNEXE A), pour un  $L_{Aeq,T}$  de 42dB(A).

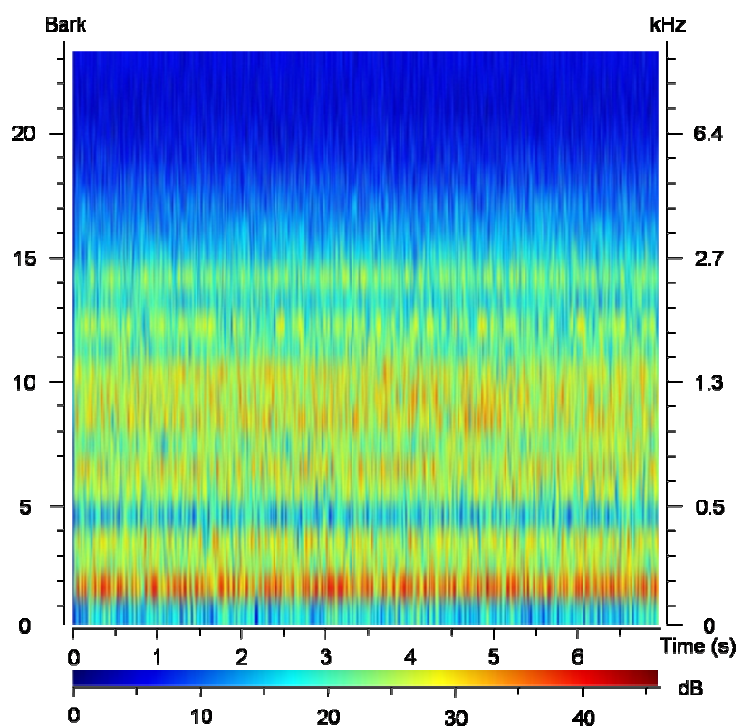


Figure 4.1 : Spectrogramme auditif du bruit industriel enregistré dans la zone enquêtée pour un  $L_{Aeq,T}$  de 42dB(A).

Nous voyons sur la Figure 4.1 que le bruit industriel<sup>65</sup> possède un important contenu en basses fréquences, mais également en moyennes fréquences. Le Tableau 4.1 donne la valeur d'indices descriptifs de ce bruit industriel.

$L_{Ceq,T}$ dB	$L_{C-A}$ dB	N (sones)	$L_N$ (phones)	$N_{4-9}$ (sones)	$N_{2-3}$ (sones)
44.6	2.9	2.6	53.8	0.165	0.122

**Tableau 4.1 : Indices descriptifs du bruit industriel enregistré au cœur de la zone enquêtée (pour un  $L_{Aeq,T}=42dB(A)$ ).**

## 2. Méthode expérimentale

Cette section présente la méthode expérimentale commune aux 7 tests d'évaluation de la gêne en situation de multi-exposition, au bruit industriel et aux bruits de passage de véhicules routiers issus des 7 catégories perceptives et cognitives, que nous avons réalisés.

### 2.1. Stimuli

#### 2.1.1. Dynamique des niveaux sonores et sélection des bruits de passage

La construction des stimuli de ces expérimentations s'appuie sur le principe préconisé par Berglund et Nilsson [BN97], explicité au Chapitre 1 (section 4.3.1.2). L'objectif est d'étudier toutes les combinaisons possibles de 5 niveaux sonores pour le bruit industriel et de 5 niveaux sonores pour le bruit routier. Egalement, le bruit routier et le bruit industriel seront proposés en mono-exposition à ces mêmes niveaux sonores. Récolter les réponses de gêne due aux différentes catégories de bruits de passage en mono-exposition nous permettra en outre de vérifier la pertinence des indicateurs de gêne proposés au Chapitre 3, sous réserve de disposer d'un nombre suffisant de données. Pour cela, il est nécessaire pour chaque test d'impliquer une sélection de bruits de passage.

En ce qui concerne **la sélection des bruits de passage**, dans l'optique de disposer d'une variété suffisante sans toutefois alourdir l'expérience par un trop grand nombre de stimuli, nous avons sélectionné 3 bruits de passage par catégorie en nous imposant les règles suivantes : (1) sélection, le cas échéant, de bruits de passage présentant des réponses moyennes de gêne significativement différentes, en nous basant sur les résultats du test *post hoc* HSD de Tuckey (cf. Chapitre 3, section 2.3.2.2) ; (2) sélection de bruits de passage montrant une diversité dans les valeurs des indices constituant l'indicateur de gêne retenu (cf. Chapitre 3 pour les indicateurs et ANNEXE B pour la valeur des indices) ; (3) sélection de bruits de passage de divers degrés de représentativité en nous appuyant sur l'analyse du choix des prototypes (cf. Chapitre 3, section 1.1.2.3).

En ce qui concerne **les niveaux d'exposition pour les bruits de passage de véhicules routiers**, nous pouvons nous appuyer à la fois sur la dynamique adoptée au Chapitre 3, mais également sur les niveaux d'exposition observés lors de l'enquête *in situ* (cf. ANNEXE A), qui sont compris entre 43 et 70dB(A). Nous avons choisi au Chapitre 3 une

<sup>65</sup> Avec les hypothèses énoncées précédemment, le bruit industriel est issu du fonctionnement de sources de bruit appartenant aux familles perceptives 2, 4 et 6 (Tableau 1.1) de la typologie perceptive de bruits industriels permanents et stables établie par Le Nost [Nos07] (cf. Annexe A, d'après [Ala09, MV09]).

dynamique comprise entre 50 et 62dB(A). Nous proposons alors d'étudier une dynamique comprise entre 47 et 59dB(A), en observant un pas de 3dB(A) pour obtenir 5 niveaux d'exposition. De cette manière nous avons des niveaux sonores communs avec les tests d'évaluation de la gêne due aux bruits de passage des 7 catégories en mono-exposition, menés au Chapitre 3. De plus, cette dynamique de niveaux sonores choisie est incluse dans la dynamique observée *in situ*.

En ce qui concerne les **niveaux d'exposition pour le bruit industriel**, nous avons vu en ANNEXE A que la dynamique observée *in situ* est comprise entre 27 et 51dB(A). De même que pour les bruits de passage nous proposons d'adopter une dynamique incluse dans la dynamique observée *in situ*, en considérant les niveaux compris entre 38 et 46dB(A) par pas de 2dB.

Au final, pour chaque test d'évaluation de la gêne due à la multi-exposition au bruit industriel et aux bruits de passage des 7 catégories, 95 stimuli (3 « Sources » x 5 « Niveaux de bruit routier » x 5 « Niveaux de bruit industriel » + 3 « Sources » x 5 « Niveaux de bruit routier » + 5 « Niveaux de bruit industriel ») sont présentés aux sujets.

D'un point de vue pratique, les stimuli issus de combinaisons sont construits en 3 étapes : (1) égalisation du bruit industriel aux niveaux sonores souhaités, (2) égalisation des bruits de passage au niveau sonore souhaité, (3) mixage des bruits de passage et industriel pour créer les combinaisons souhaitées au moyen du logiciel SoundForge® Sony. Notons que ces opérations sont effectuées à partir des bruits sur lesquels on a au préalable appliqué un fade in et un fade out de 50ms.

### 2.1.2. Durée, filtrage et mesure des stimuli

Nous avons discuté au Chapitre 3 (section 2.1.1.2) de l'influence de la durée sur les jugements de gêne en laboratoire, et nous avons alors décidé de conserver pour les bruits de passage de véhicules routiers les durées originales comprises entre 3s et 9s. Les résultats de l'analyse des réponses de gêne ont par la suite montré que ces durées n'avaient pas d'influence sur les réponses moyennes de gêne, ni sur le groupement des stimuli par catégorie perceptive.

Concernant les bruits de passage étudiés en mono-exposition nous avons décidé de conserver les durées d'origine. Concernant le bruit industriel étudié en mono-exposition, étant donné que celui-ci est permanent et stable (cf. ANNEXE A), le choix de la durée ne s'impose pas de lui-même. Nous avons alors fait le choix d'une durée de 7s, comprise entre la durée la plus faible et la plus élevée des bruits de passage de véhicules routiers.

Concernant les stimuli en multi-exposition, nous avons choisi d'adapter la durée du bruit industriel à la durée du bruit de passage auquel il est combiné, afin d'avoir une présentation simultanée des bruits combinés. Ceux-ci ont donc des durées comprises entre 3s et 9s.

Pour les raisons invoquées au Chapitre 3, nous avons reconduit le choix de ne pas appliquer aux stimuli un filtrage dû à une façade, et ainsi d'étudier la pire situation d'exposition sonore : fenêtres ouvertes ou dans les espaces privatifs extérieurs.

Les stimuli diffusés en mono-exposition et en multi-exposition sont mesurés afin de calculer différentes métriques au moyen de la procédure décrite au Chapitre 3 (section 1.1.1.1.d).

## 2.2. Dispositif expérimental

Les 7 tests d'évaluation de la gêne en situation de multi-exposition, au bruit industriel et aux bruits de passage des 7 catégories, sont informatisés, et la passation s'effectue au moyen d'une interface Matlab®, identique à celle présentée au Chapitre 3 (section **Erreur !**

**Source du renvoi introuvable.**) Le lieu du test, ainsi que le système de reproduction sont identiques à ceux présentés au Chapitre 3 (section **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**)

## 2.3. Procédure

La procédure expérimentale employée est la même pour les 7 tests d'évaluation de la gêne en situation de multi-exposition au bruit industriel et aux bruits de passage de chaque catégorie cognitive et perceptive. Au début du test, les consignes générales suivantes s'inscrivent à l'écran :

*« Dans ce test d'écoute, vous écouterez une suite de séquences d'environnement sonore principalement constituées de bruits de circulation routière et de bruits industriels, pour lesquelles nous vous demanderons d'évaluer la gêne ressentie. Vous pourrez les écouter à votre guise. Après avoir répondu à la question et validé votre réponse, vous ne pourrez pas revenir en arrière.*

*Prenez votre temps pour répondre.*

*Pour évaluer la gêne ressentie pour chacune de ces séquences, imaginez-vous chez vous, en train de vous relaxer (par exemple, en lisant, en regardant la télévision, en ayant une conversation, en faisant du jardinage, ou toute autre activité relaxante qui vous est coutumière). »*

Comme pour l'étude de la gêne due à chaque catégorie perceptive et cognitive de bruits de passage de véhicules routiers, nous nous inscrivons dans l'étude de la gêne à court-terme envisagée comme un potentiel de gêne. La mise en situation est conservée identique, et le mode de présentation unique des stimuli également (cf. Chapitre 3 , section 2.1.3). Pour chaque nouveau stimulus, un écran avec le rappel de la situation imaginaire apparaît avec la question :

*« Imaginez-vous chez vous, en train de vous relaxer (par exemple, en lisant, en regardant la télévision, en ayant une conversation, en faisant du jardinage, ou toute autre activité relaxante qui vous est coutumière).*

*Pendant votre activité relaxante, vous êtes en présence de cette séquence d'environnement sonore :*

**ECOUTE**

*Ce bruit vous gênerait-il ? »*

L'échelle de réponse est identique à celle utilisée précédemment : échelle continue de 0 à 10 comportant 5 indicateurs numériques et 5 descripteurs verbaux associés à 5 graduations équidistantes sur l'échelle. Les sujets sont invités à réécouter les stimuli autant de fois qu'ils le souhaitent.

A l'issue du test, les sujets se retrouvent, pour un face-à-face de quelques minutes avec l'expérimentateur, afin que ce dernier récolte *a posteriori* des données verbales sur les bruits auxquels ont été exposés les sujets. Dans cette phase du test, l'expérimentateur note les réponses des sujets sur un questionnaire présenté en ANNEXE C. Plus précisément, concernant le bruit industriel, la question suivante est posée :

*« Pouvez-vous dire ce que vous avez pensé du bruit industriel ? »*

Concernant les bruits de passage, la question suivante est posée :

« *Pouvez-vous dire ce que vous avez pensé des bruits routiers ?* »

Dans les deux cas, si la réponse du sujet n'est pas suffisamment étayée, l'expérimentateur le relance suivant 3 rubriques prédéfinies : (1) association à une source de bruit familière ; (2) description du bruit ; (3) jugement à propos du bruit.

Enfin, lorsque ce face-à-face est terminé, les sujets remplissent un questionnaire afin d'obtenir des informations sur certains facteurs non-acoustiques, comme leur sensibilité au bruit en général, etc. Ce questionnaire est également disponible en ANNEXE C.

## **2.4. Sujets**

Pour chacun des 7 tests d'évaluation de la gêne en situation de multi-exposition au bruit industriel et aux bruits de passage des 7 catégories, nous avons recruté 30 sujets par courriel parmi les personnels et élèves de l'ENTPE. Dans le courriel de recrutement nous avons spécifiquement demandé des sujets ayant une bonne audition, et avons prévenu qu'ils seraient indemnisés pour leur participation à 3 tests minimum.

Ainsi un sujet a pu participer à plusieurs tests parmi les 7 effectués. Dans ce cas, les tests se faisaient toujours à plusieurs jours d'intervalle. En moyenne, 16 hommes et 14 femmes ont participé à chaque test. L'âge moyen des sujets était d'environ 31 ans sur l'ensemble des tests, avec un écart-type égal à 11.3 ans. En moyenne les sujets ont participé à 3 tests sur les 7 proposés, et entre deux tests différents, il y avait en moyenne environ 12 sujets en commun.

Les tests duraient environ 40 minutes chacun et ont eu lieu au cours des mois de mars et avril 2011.

Notons que presque 65% des sujets ont jugé « pas du tout » ou « légèrement » difficile la tâche demandée, à savoir évaluer la gêne dans une mise en situation imaginaire.

## **3. Traitement et analyse des données**

Les données récoltées au cours de ces 7 tests, font l'objet de différentes analyses : des CAH pour évaluer l'homogénéité des réponses sujets, des ANOVA à mesures répétées pour évaluer l'effet des facteurs expérimentaux, une analyse des verbatims récoltés en fin de test lors du face-à-face entre le sujet et l'expérimentateur, et enfin des analyses de corrélation et de régression linéaire.

### **3.1. Homogénéité des sujets**

Pour chaque test d'évaluation de la gêne en situation de multi-exposition au bruit industriel et aux bruits de passage des 7 catégories, l'ensemble des réponses de gêne peut être subdivisé en 3 sous-ensembles : (1) les réponses de gêne due à la mono-exposition aux bruits de passage de véhicules routiers, (2) les réponses de gêne due à la mono-exposition au bruit industriel, (3) les réponses de gêne due à la multi-exposition aux bruits de passage et au bruit industriel.

Pour ces trois sous-ensembles, nous appliquerons la démarche proposée au Chapitre 3 (section 2.2.1) pour définir des ensembles de sujets homogènes sur lesquels nous appuyer pour pratiquer nos analyses.

### 3.2. Analyses de variance à mesures répétées

Les stimuli tels que nous les avons construits, nous permettent d'effectuer sur les données de chacun des 7 tests d'évaluation de la gêne en situation de multi-exposition au bruit industriel et aux bruits de passage des 7 catégories, 3 ANOVA à mesures répétées :

- **Concernant les réponses de gêne due à la mono-exposition aux bruits de passage**, on examinera l'effet des facteurs « Niveaux de bruit routier » (5 modalités), « Sources » (3 modalités) ainsi que leur interaction au moyen d'une ANOVA à mesures répétées à deux facteurs ;
- **Concernant les réponses de gêne due à la mono-exposition au bruit industriel**, on examinera l'effet du facteur « Niveau de bruit industriel » (5 modalités) au moyen d'une ANOVA à mesures répétées à un facteur ;
- **Concernant les réponses de gêne due à la multi-exposition au bruit industriel et aux bruits de passage**, on examinera l'effet des facteurs « Sources » (3 modalités), « Niveaux de bruit routier » (5 modalités), « Niveaux de bruit industriel » (5 modalités) ainsi que leurs interactions au moyen d'une ANOVA à mesures répétées à 3 facteurs.

D'un point de vue théorique, l'ANOVA à mesures répétées à 3 facteurs est une simple extension de l'ANOVA à mesures répétées à 2 facteurs. Le lecteur est alors invité à se reporter au Chapitre 3 (section 2.2.2) pour plus de détails.

### 3.3. Analyse des verbatims

Il ne s'agira pas d'une analyse linguistique complète comme cela a été effectué par D. Dubois sur les données verbales issues du test de catégorisation libre et verbalisation libre [EEO10], mais plutôt d'un comptage simple des occurrences de mots et adjectifs en ce qui concerne les bruits routiers et le bruit industriel séparément.

Concernant les bruits routiers, cela nous permettra de déterminer si les sujets ont pu identifier correctement les sources de bruit et leur allure, et de mettre en lumière les descriptions effectuées au cours de cette tâche avec les descriptions effectuées lors du test de catégorisation libre et verbalisation libre.

Pour le bruit industriel, l'enjeu est différent puisque nous n'avons pas récolté de verbalisation jusqu'à lors. Nous avons la connaissance des différentes sources à l'origine de ce bruit industriel (cf. ANNEXE A). Nous pourrions alors vérifier si les sujets sont à même d'identifier ce bruit industriel. Nous pourrions également *via* les verbatims liés à la description, avoir connaissance des attributs auditifs de ce bruit industriel qui sont pertinents du point de vue des sujets.

### 3.4. Corrélacion et régression linéaire

Dès lors que nous aurons étudié pour chaque test, sur chacun des trois sous-ensembles de données, les effets des facteurs expérimentaux mis en jeu, nous effectuerons des analyses de corrélation et de régression linéaire.

Concernant le bruit industriel, il s'agira de modéliser la gêne due au bruit industriel en mono-exposition à partir des indices acoustiques et psychoacoustiques mis en évidence par Alayrac *et al.* [AMVM+10], pour les catégories perceptives [Nos07] dont est issu le bruit résultant du site industriel de la zone enquêtée (catégories 2, 4 et 6 [MV09]).

Concernant le bruit routier, il s'agira de modéliser la gêne due aux différentes catégories de bruits de passage en mono-exposition dans le but de vérifier la pertinence des indicateurs proposés au Chapitre 3 (section 2.3.3).

Enfin, nous pratiquerons ces analyses dans l'objectif de tester divers modèles de gêne totale en situation de multi-exposition au bruit industriel et au bruit provenant de la circulation routière.

## 4. Résultats

### 4.1. Sujets

Conformément à la démarche décrite au Chapitre 3 (section 2.2.1), nous avons établi que pour l'ensemble des 7 tests d'évaluation de la gêne en situation de multi-exposition au bruit industriel et aux bruits de passage des 7 catégories, les sujets forment un ensemble homogène pour les 3 sous-ensembles de données considérés (mono-exposition au bruit industriel, mono-exposition aux bruits de passage, multi-exposition au bruit industriel et aux bruits de passage de véhicules routiers).

Ainsi, nous conservons pour toutes les analyses effectuées la totalité des réponses de gêne données par l'ensemble des sujets.

### 4.2. Analyses de variance

#### 4.2.1. Mono-exposition au bruit industriel

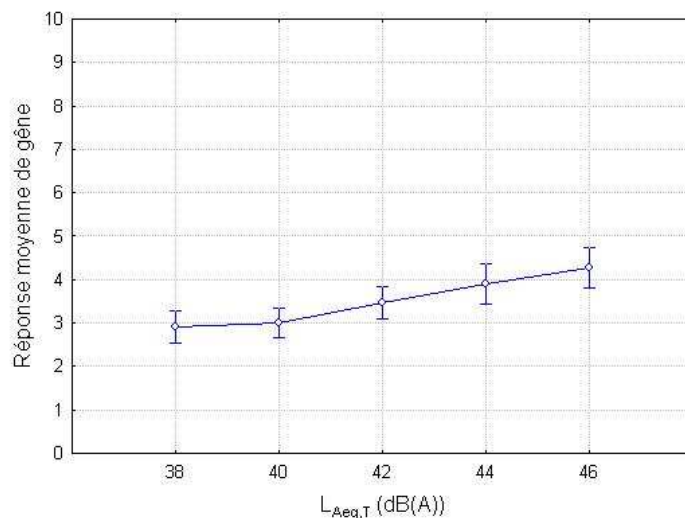
Le Tableau 4.2 présente les résultats des ANOVA à mesures répétées à un facteur effectuées sur les sous-ensembles de données relatifs à la gêne due à la mono-exposition au bruit industriel.

Catégorie	Facteur	SCE	ddl	CM	F	p	$\eta^2$
1	NBI*	44.21	4	11.05	13	<0.001	0.04
2	NBI*	20.53	4	5.13	6.97	<0.001	0.03
3	NBI	47.73	4	11.93	15.58	<0.001	0.06
4	NBI*	30.92	4	7.73	7.26	<0.001	0.04
5	NBI	26.31	4	6.58	12.53	<0.001	0.04
6	NBI*	69.66	4	17.41	14.30	<0.001	0.09
7	NBI*	40.10	4	10.03	14.01	<0.001	0.05

**Tableau 4.2 : Résultats des ANOVA à mesures répétées à un facteur (« Niveau du bruit industriel – NBI »), menées sur les réponses de gêne dues à la mono-exposition au bruit industriel récoltées au cours de chaque test. \* : hypothèse de sphéricité violée.**

Pour chacun des 7 tests, l'effet du facteur « Niveau de bruit industriel » sur les réponses de gêne dues au bruit industriel en mono-exposition est significatif. Mais si cet effet est significatif, il n'en reste pas moins faible, étant donné que le pourcentage de variance expliquée par ce facteur oscille entre 3 et 9% selon les tests. Il en résulte que de manière

générale la gêne due au bruit industriel augmente en fonction du niveau sonore mais que cette augmentation est relativement faible, comme on peut le voir sur la Figure 4.2 en prenant l'exemple des réponses de gêne dues au bruit industriel récoltées lors du test d'évaluation de la gêne en situation de multi-exposition au bruit industriel et aux bruits de passage de la catégorie 7.



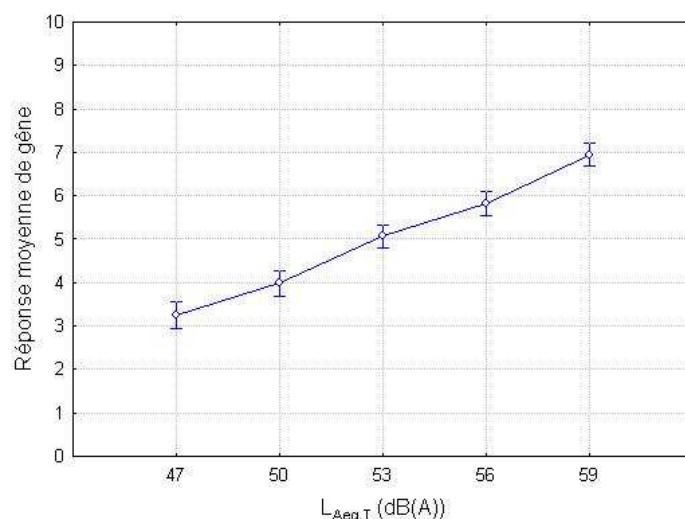
**Figure 4.2 : Effet du facteur « Niveau du bruit industriel » sur les réponses de gêne dues à la mono-exposition au bruit industriel concernant le test d'évaluation de la gêne en situation de multi-exposition au bruit industriel et aux bruits de passage de la catégorie 7. Les erreurs-types sont représentées au moyen de barres d'erreur autour des valeurs moyennes.**

#### 4.2.2. Mono-exposition au bruit routier

Le Tableau 4.3 présente les résultats des ANOVA à mesures répétées à deux facteurs effectuées sur les sous-ensembles de données relatifs à la gêne due à la mono-exposition aux bruits de passage de véhicules routiers.

Comme on peut s'y attendre, le **facteur « Niveau de bruit routier »** a un effet significatif sur les réponses de gêne dues aux bruits de passage, quelle que soit la catégorie considérée. Les pourcentages de variance expliquée oscillent entre 23% (catégorie 2) et 37% (catégories 3 et 7), pour une moyenne d'environ 31% sur l'ensemble des catégories. Nous avons déjà observé au Chapitre 3 que la catégorie 2 était la catégorie pour laquelle le pourcentage de variance expliquée par le facteur « Niveau de bruit routier » était le plus faible, ce qui est confirmé ici. De manière générale, la gêne due à la mono-exposition aux bruits de passage des 7 catégories augmente avec le niveau sonore. Cette augmentation est plus forte que celle du bruit industriel (cf. Figure 4.2), comme on peut l'observer sur la Figure 4.3. Toutefois, il s'agit également d'un résultat attendu, étant donné la dynamique de niveaux sonores plus forte pour le bruit routier que pour le bruit industriel introduite lors de la construction des stimuli.





**Figure 4.3 : Effet du facteur « Niveau du bruit routier » sur les réponses de gêne due à la mono-exposition aux bruits de passage de la catégorie 7. Les erreurs-types sont représentées au moyen de barres d'erreur autour des valeurs moyennes.**

Catégorie	Facteur	SCE	ddl	CM	F	p	$\eta^2$
1	NBR*	821.71	4	205.43	94.64	<0.001	0.33
	S*	34.25	2	17.12	7.19	<0.01	0.01
	NBR x S	10.15	8	1.27	1.19	n.s.	...
2	NBR*	517.44	4	129.36	87.59	<0.001	0.23
	S*	129.34	2	64.67	21.76	<0.001	0.06
	NBR x S	9.24	8	1.15	0.94	n.s.	...
3	NBR*	969.26	4	242.32	124.20	<0.001	0.37
	S	144.46	2	72.23	38.75	<0.001	0.05
	NBR x S	10.59	8	1.32	1.79	n.s.	...
4	NBR*	784.15	4	196.04	101.34	<0.001	0.33
	S	63.36	2	31.68	16.51	<0.001	0.03
	NBR x S*	25.32	8	3.16	2.74	<0.05	0.01
5	NBR*	616.11	4	154.03	62.83	<0.001	0.27
	S	55.14	2	27.57	12.02	<0.001	0.02
	NBR x S	4.96	8	0.62	0.52	n.s.	...
6	NBR*	631.27	4	157.82	90.45	<0.001	0.29
	S	121.85	2	60.93	32.59	<0.001	0.06
	NBR x S	15.03	8	1.88	2.06	<0.05	0.01
7	NBR*	766.93	4	191.73	84.04	<0.001	0.37
	S	23.21	2	11.60	8.89	<0.001	0.01
	NBR x S*	4.21	8	0.53	0.65	n.s.	...

**Tableau 4.3 : Résultats des ANOVA à mesures répétées à deux facteurs « Niveau du bruit routier – NBR », « Source – S » effectuées sur les réponses de gêne due à la mono-exposition aux bruits de passage, récoltées au cours de chaque test. \* : hypothèse de sphéricité violée ; n.s. : non statistiquement significatif.**

**Le facteur « Source »** a un effet significatif sur les réponses de gêne pour l'ensemble des catégories. Le pourcentage de variance expliquée oscille entre 1% (catégories 1 et 7) et

6% (catégories 2 et 6). Notons que nous avons déjà observé au Chapitre 3 que ce pourcentage était le plus élevé pour la catégorie 2. Par contre, nous avons vu que l'effet de ce facteur pour la catégorie 1 n'était pas significatif, alors qu'il est pour ce test, même si le pourcentage de variance expliquée reste faible. De manière générale, les différences entre sources établies au cours des précédents tests d'évaluation de la gêne due aux bruits de passage des 7 catégories (cf. Chapitre 3) se retrouvent au cours des tests présentés ici.

L'**interaction des facteurs « Niveau du bruit routier » et « Sources »** a un effet significatif sur les réponses de gêne uniquement pour les catégories 4 et 6. De manière générale le pourcentage de variance expliquée est très marginal, nous ne rentrerons donc pas plus dans le détail concernant cet effet.

#### **4.2.3. Multi-exposition au bruit industriel et aux bruits de passage des 7 catégories**

Le Tableau 4.4 présente, pour chaque test, les résultats des ANOVA à mesures répétées à 3 facteurs effectuées sur les sous-ensembles de données relatifs à la multi-exposition au bruit industriel et aux bruits de passage des 7 catégories. Pour plus de concision et de clarté, nous avons fait figurer dans le Tableau 4.4 uniquement les résultats concernant les effets des facteurs principaux (« Niveau du bruit routier », « Niveau du bruit industriel », et « Source »). Les effets des interactions entre ces facteurs<sup>66</sup> sont en effet non significatifs dans la majorité des cas, et expliquent des pourcentages de variance très marginaux en comparaison des facteurs principaux, dans les cas où ils sont significatifs.

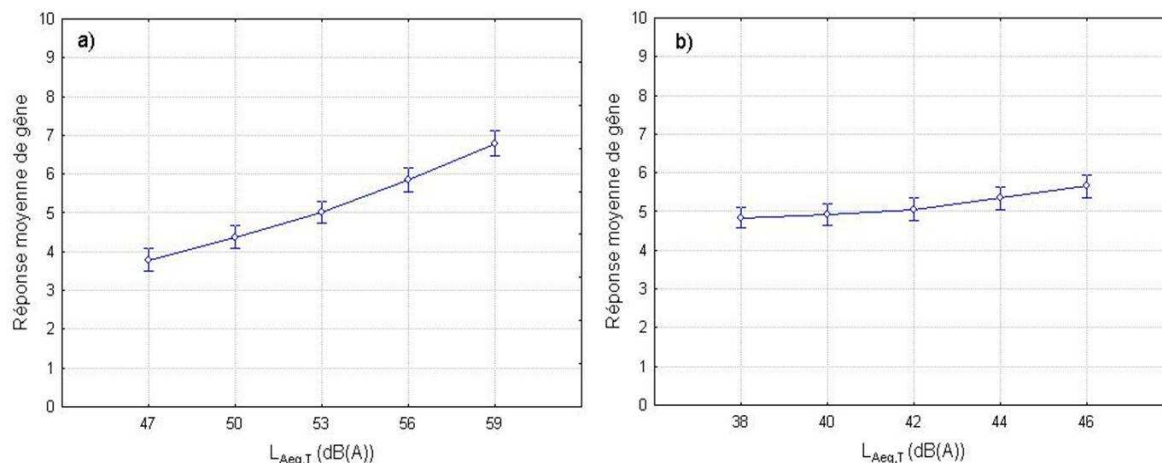
Les 3 facteurs principaux ont un effet significatif sur les réponses de gêne en multi-exposition, et ce quelque soit la catégorie de bruits de passage à laquelle est combinée le bruit industriel. Nous voyons cependant que c'est le **facteur « Niveau de bruit routier »** qui a l'effet le plus prononcé sur les réponses de gêne, celui-ci expliquant entre 19 et 28% de la variance constatée. Une fois de plus nous constatons que pour la catégorie 2, ce pourcentage de variance expliquée est le plus faible. Les facteurs « **Niveau de bruit industriel** » et « **Source** » affichent quant à eux des pourcentages de variance expliquée du même ordre de grandeur (respectivement entre 0.1 et 2% et entre 1 et 5%) et beaucoup plus faibles que les pourcentages de variance expliquée obtenus pour le facteur « Niveau de bruit routier ».

Ces résultats signifient, en considérant les dynamiques de niveaux de bruit adoptées pour ces tests, que quel que soit la catégorie de bruits de passage de véhicules routiers à laquelle est combinée le bruit industriel, c'est le bruit routier qui aura la plus grande influence sur les réponses de gêne en multi-exposition, comme on peut le voir sur la Figure 4.4.

Il s'agit d'effets dont nous devons nous assurer par la suite qu'ils sont bien pris en compte par les différents modèles de gêne totale en situation de multi-exposition que nous serons amenés à considérer.

---

<sup>66</sup> Les interactions entre ces facteurs sont au nombre de 4 : « Niveau de bruit routier » x « Niveau de bruit industriel », « Niveau de bruit routier » x « Source », « Niveau de bruit industriel » x « Source », et « Niveau de bruit routier » x « Niveau de bruit industriel » x « Source ».



**Figure 4.4 : Effet des facteurs a) « Niveau du bruit routier » et b) « Niveau de bruit industriel », sur les réponses de gêne due à la multi-exposition au bruit industriel et aux bruits de passage de la catégorie 3. Les erreurs-types sont représentées au moyen de barres d'erreur autour des valeurs moyennes.**

Catégorie	Facteur	SCE	ddl	CM	F	p	$\eta^2$
1	NBR*	2740.97	4	685.24	123.04	<0.001	0.25
	NBI*	110.06	4	27.51	10.89	<0.001	0.01
	S	66.80	2	33.40	5.92	<0.01	0.01
2	NBR*	1909.14	4	477.29	137.54	<0.001	0.19
	NBI*	21.09	4	5.27	3.10	<0.05	0.00
	S	509.62	2	254.81	29.37	<0.001	0.05
3	NBR*	2546.95	4	636.74	113.18	<0.001	0.22
	NBI*	200.47	4	50.12	28.05	<0.001	0.02
	S	383.99	2	192.00	49.92	<0.001	0.03
4	NBR*	3052.83	4	763.21	176.95	<0.001	0.28
	NBI	86.45	4	21.61	14.71	<0.001	0.01
	S*	247.23	2	123.61	25.72	<0.001	0.02
5	NBR*	2307.30	4	576.82	84.40	<0.001	0.24
	NBI	72.61	4	18.15	12.80	<0.001	0.01
	S*	278.18	2	139.09	18.77	<0.001	0.03
6	NBR*	1937.41	4	484.35	103.89	<0.001	0.20
	NBI*	198.67	4	49.67	17.71	<0.001	0.02
	S	342.60	2	171.30	41.55	<0.001	0.04
7	NBR*	1704.23	4	426.06	78.56	<0.001	0.22
	NBI*	107.15	4	26.79	11.32	<0.001	0.01
	S*	124.56	2	62.28	20.81	<0.001	0.02

**Tableau 4.4 : Résultats des ANOVA à mesures répétées à trois facteurs. Seuls les effets des facteurs principaux « Niveau du bruit routier – NBR », « Niveau de bruit industriel – NBI » et « Source – S » sur les réponses de gêne due à la multi-exposition au bruit industriel et aux bruits de passage des 7 catégories sont présentés. \* : hypothèse de sphéricité violée.**

## 4.3. Analyse des verbatims

### 4.3.1. Concernant les bruits de passage de véhicules routiers

Pour effectuer cette analyse, nous allons partir des connaissances acquises sur la structuration des catégories de la typologie perceptive et cognitive proposée au Chapitre 3 . Nous avons montré que celles-ci sont structurées par les deux critères « type de véhicules » et « type d'allures ». Il s'agit alors pour cette analyse de repérer les verbatims en référence à ces critères et à les regrouper en trois classes : « bonne identification », « mauvaise identification » et « autres ». Le Tableau 4.5 montre les pourcentages, calculés sur le nombre total d'occurrences, relatifs à chaque critère pour ces trois classes.

		Cat. 1	Cat. 2	Cat. 3	Cat. 4	Cat. 5	Cat. 6	Cat. 7	Moy.
« Type de véhicule »	Bonne identification	75%	78%	57%	41%	70%	54%	53%	61%
	Mauvaise identification	15%	5%	...	25%	2%	33%	17%	14%
	autres	10%	17%	43%	34%	28%	13%	30%	25%
« Type d'allure »	Bonne identification	48%	79%	100%	66%	91%	54%	62%	71%
	Mauvaise identification	39%	8%	...	28%	9%	18%	28%	19%
	autres	13%	13%	...	6%	...	28%	10%	10%

**Tableau 4.5 : Récapitulatif de l'analyse des verbatims concernant les bruits de passage en rapport avec l'identification du « type de véhicules » et du « type d'allures ».**

Nous voyons que le « **type de véhicules** » est en général bien identifié : on relève en moyenne environ 61% de bonne identification sur l'ensemble des catégories, pour en moyenne 14% de mauvaise identification. Si la répartition des verbatims dans les classes « bonne identification » et « mauvaise identification » est relativement évidente (on y a respectivement comptabilisé les références aux véhicules qui correspondent ou ne correspondent pas à la catégorie perceptive considérée), il paraît nécessaire de préciser ce que nous avons regroupé dans la classe « autres », dans laquelle on relève en moyenne environ 25% des occurrences. Cette classe regroupe les verbatims suivants :

- « le bruit du moteur », « les freins », « la remorque », etc., liés à l'identification de parties du véhicule ;
- « crissement », « couinement », « crépitement », etc., liés à l'identification d'actions génératrices de bruit sur le véhicule ;
- « bruits de ville », « circulation », etc., liés à une identification en général du bruit dans l'environnement.

Nous voyons que le « **type d'allures** » est en général mieux identifié que le « type de véhicules », comptabilisant en moyenne 71% de bonne identification et 19% de mauvaise identification. Dans la classe « autres », nous avons regroupé des références telles que « à-coups », « en sous-régime », « passe une vitesse », etc. qui traduisent la perception d'une action du conducteur sur son véhicule, mais qui n'influe pas forcément sur l'identification de l'allure du véhicule.

Notons que concernant la catégorie 1 (deux-roues à allure stabilisée), certains sujets n'ont pas fait que des références au « type de véhicules » ou au « type d'allures », mais ont

fait des extrapolations au comportement supposé des conducteurs : « le plaisir sadique du conducteur », « le mec prend un malin plaisir à faire du bordel sous ma fenêtre », « Quand il y a des motos avec des pots d'échappement tunés, ça me dérange », « Je déteste être dérangé chez moi par un bruit fait exprès, illégal », « ça peut tuer en week-end, les mobylettes trafiquées ». A travers ces commentaires, on perçoit un ressentiment de certains sujets qui stigmatisent le comportement de certains conducteurs de deux-roues motorisés par rapport à de précédentes expériences qu'ils auraient pu avoir à leur domicile.

Concernant la description des bruits de passage, nous avons été amenés à regrouper l'ensemble des verbatims en 4 classes différentes : « aspect temporel », « aspect spectral », « durée », « intensité » et « onomatopée ». Le Tableau 4.6 montre les pourcentages, calculés sur le nombre total d'occurrences, de verbatims regroupés dans ces 4 classes pour les 7 catégories.

	Cat. 1	Cat. 2	Cat. 3	Cat. 4	Cat. 5	Cat. 6	Cat. 7	Moy.
Aspect temporel	34%	13%	27%	32%	19%	67%	27%	31%
Aspect spectral	29%	59%	20%	39%	45%	11%	33%	34%
Durée	17%	4%	7%	...	...	...	5%	5%
Intensité	20%	18%	43%	16%	23%	22%	31%	24%
Onomatopée	...	6%	3%	13%	13%	...	4%	6%

**Tableau 4.6 : Récapitulatif de l'analyse des verbatims concernant le bruit routier en rapport avec la description des bruits de passage.**

Nous voyons que les classes « aspect temporel » et « aspect spectral » regroupent en moyenne les deux tiers des occurrences. Dans la classe « aspect temporel », nous avons regroupé par exemple des verbatims tels que : « progressif », « irrégulier », « pétarade », « pas de fluctuation », etc. Dans la classe « aspect spectral », nous avons regroupés par exemples des verbatims tels que : « aigu », « plus grave », « strident », etc. Nous voyons que la classe « durée » regroupant des verbatims tels que « bref », « éphémère », « long », etc. apparait plus marginale (5% des occurrences en moyenne). Il en va de même pour la classe « onomatopée » qui regroupe des verbatims telles que « hiii », « vrrr », « Pschhh », etc. (6% des occurrences en moyenne). Enfin dans la classe « intensité », qui rassemble 24% des occurrences en moyenne, nous avons regroupé des verbatims tels que « très forts », « élevé », « assez doux », etc.

Concernant les jugements à propos des bruits de passage, il a été difficile de répartir sans ambiguïté les verbatims dans des classes différentes. Nous nous contentons donc seulement de donner dans le Tableau 4.7 les pourcentages, calculés sur le nombre total d'occurrences, de verbatims liés au désagrément sonore (par exemple « désagréable », « j'aime pas », « déplaisant », etc.) et à la gêne sonore (par exemple « gênant », « me gêne », « plus gênant », etc.), que nous avons pu repérer sans ambiguïté.

	Cat. 1	Cat. 2	Cat. 3	Cat. 4	Cat. 5	Cat. 6	Cat. 7	Moy.
Désagrément	15%	7%	9%	20%	14%	12%	8%	12%
Gêne	23%	20%	36%	22%	47%	54%	39%	34%

**Tableau 4.7 : Pourcentage des références au désagrément et à la gêne dans les jugements émis par les sujets sur les bruits de passage de chaque catégorie.**

De manière générale, nous voyons que les jugements libres portés par les sujets concernant les bruits de passage sont presque 3 fois moins reliés au désagrément sonore (en moyenne 12%), qu'à la gêne sonore (en moyenne 34%).

De l'analyse des verbatims concernant les bruits de passage, on retient principalement que les sujets ont de manière générale bien identifié le « type de véhicules » et le « type d'allures », ce qui conforte notre démarche. Concernant, les descriptions, nous avons vu également que la majorité d'entre elles concernent les aspects spectraux et temporels des bruits de passage, ce qui est cohérent avec l'analyse linguistique effectuée lors du test de catégorisation libre et verbalisation libre (cf. Chapitre 3 ).

#### 4.3.2. Concernant le bruit industriel

Concernant le bruit résultant de l'activité du site industriel à proximité de la zone enquêtée, il a été montré qu'il provient de trois sources principales : deux groupes de refroidissement et une bouche de ventilation (cf. ANNEXE A, établie notamment à partir de [MV09, Ala09]). Il a été ensuite montré que ces sources appartiennent à 3 différentes catégories perceptives de bruits industriels permanents et stables, respectivement les catégories 2, 4, et 6 (cf. ANNEXE A d'après [MV09, Ala09]). Enfin, Le Nost [Nos07] avait proposé pour ces catégories perceptives les noms suivants : « grosses souffleries » pour la catégorie 2, « machines tournantes » pour la catégorie 4 et « sources peu caractéristiques » pour la catégorie 6.

Le Tableau 4.8 résume les résultats de l'analyse des verbatims concernant l'identification du bruit industriel.

En considérant l'ensemble des verbatims, il nous a paru opportun de les regrouper dans 7 classes différentes :

- « **Circulation d'air** » qui regroupe des verbatims tels que « ventilation », « soufflerie », « climatiseur », etc. ;
- « **Electricité** » qui regroupe des verbatims tels que « groupe électrogène », « turbine », « transformateur », « bruit électrique », etc. ;
- « **Machine** » qui regroupe des verbatims tels que « moteur qui tourne », « machine », « pompe », « machine qui tourne », etc ;
- « **Action** » qui regroupe des verbatims tels que « sifflement », « bourdonnement », « ronronnement », « ronflement » etc. ;
- « **Chantier** » qui regroupe des verbatims tels que « construction », « travaux », « grue », etc. ;
- « **Séquence amorphe** » qui regroupe des verbatims tels que « bruit de fond », « brouhaha », « fond sonore », etc. ;
- « **Autres** » qui regroupe des verbatims tels que « alarme », « sirène », « chauffage », « cours d'eau », « ordi », etc.

	Cat. 1	Cat. 2	Cat. 3	Cat. 4	Cat. 5	Cat. 6	Cat. 7	Moy.
Circulation d'air	27%	31%	32%	40%	21%	35%	33%	31%
Electricité	12%	5%	8%	5%	5%	3%	2%	6%
Machine	6%	7%	4%	9%	12%	5%	12%	8%
Action	10%	11%	10%	14%	12%	11%	13%	12%
Chantier	...	9%	8%	3%	...	...	4%	3%
Séquence amorphe	19%	25%	22%	17%	26%	32%	13%	22%
Autres	26%	12%	16%	12%	26%	14%	23%	18%

**Tableau 4.8 : Récapitulatif de l'analyse des verbatims concernant le bruit industriel.**

En moyenne, 39% des occurrences font référence aux classes « circulation d'air » et « machine », ce qui est en accord avec le fait que ce bruit industriel est notamment composé de sources appartenant aux catégories perceptives « grosse soufflerie » et « machine tournante » (cf. [Nos07]). Nous voyons de plus qu'en moyenne 22% des occurrences sont liées à une classe que nous avons nommée « séquence amorphe », en référence aux travaux de Maffiolo [Maf99] et Guastavino [Gua07] (cf. Chapitre 1 ). Il est intéressant de voir qu'en comparaison aux bruits de passage qui sont fluctuants, le bruit industriel est permanent et stable, et qui plus est de niveau sonore plus faible (cf. section 2.1.1), ce qui est cohérent avec le fait que les sujets le décrivent comme « un fond sonore » ou un « brouhaha ». Nous voyons qu'en moyenne 18% des occurrences sont liées à la classe « autres » pour laquelle il n'a pas été possible de trouver un dénominateur commun. Cette classe témoigne du fait que les bruits industriels sont, de manière générale, plus difficiles à identifier que les bruits provenant de la circulation routière. Le pourcentage moyen d'occurrences liées à la classe « action » est relativement important (12%) et va dans le même sens que les références à la classe « autres ». Les sujets font référence à une action qui peut générer le bruit plus qu'à la source de bruit elle-même peut-être parce la nature de cette source n'est pas claire pour eux. Enfin les classes « électricité » et « chantier » rassemblent quant à elle en moyenne 9% des occurrences.

Le Tableau 4.9 résume l'analyse des verbatims concernant la description du bruit industriel. Comme pour les bruits de passage, nous avons regroupé l'ensemble des verbatims dans 4 classes : « aspect temporel », « aspect spectral », « durée », « intensité » et « onomatopée ».

	Cat. 1	Cat. 2	Cat. 3	Cat. 4	Cat. 5	Cat. 6	Cat. 7	Moy.
Aspect temporel	50%	45%	48%	64%	67%	76%	58%	58%
Aspect spectral	37%	35%	28%	14%	19%	21%	21%	25%
Durée	3%	...	2%	...	...	...	3%	1%
Intensité	10%	14%	17%	20%	12%	3%	18%	13%
Onomatopées	...	6%	5%	2%	2%	...	...	2%

**Tableau 4.9 : Récapitulatif de l'analyse des verbatims concernant la description du bruit industriel.**

Comme pour les bruits de passage ce sont les classes « aspect temporel » et « aspect spectral » qui regroupent la majorité d'occurrences (en moyenne 83% pour ces deux classes cumulées). Ces classes regroupent respectivement des verbatims tels que : « régulier », « monotone », « continu », « stable », « pas fluctuant », etc. et « sourd », « strident », « grave », etc. Les descriptions relatives à l'aspect spectral montrent que les sujets ont repéré la complexité du bruit industriel qui, de par son appartenance à différentes catégories perceptives, possède différentes caractéristiques spectrales : contenu basses fréquences pour la catégorie 2, et contenu important dans les moyennes fréquences pour la catégorie 4. La classe « intensité », moins présente dans les descriptions des sujets, regroupe des verbatims tels que : « plus doux », « moins fort », « faible », « moins bruyant », etc. Ces descriptions sont cohérentes avec le fait que selon le protocole expérimental adopté, les niveaux sonores du bruit industriel sont plus faibles que ceux du bruit routier. Enfin, les classes « durée » et « onomatopée » qui regroupent respectivement des verbatims tels que « prolongé », « qui dure », etc. et « chhhh », « vuuuuuh », « brrrrr », etc. apparaissent très marginales puisqu'elles regroupent à elles deux en moyenne 3% des occurrences.

Pour les mêmes raisons que celles invoquées pour les bruits de passage, nous nous contentons de donner dans le Tableau 4.10 uniquement les pourcentages sur le nombre

total des occurrences liées au désagrément sonore (par exemple « désagréable », « pas agréable », « détestable », etc.) et à la gêne sonore (par exemple « gêne plus », « gênant », etc.), que nous avons pu repérer sans ambiguïté parmi les verbatims traduisant un jugement sur le bruit industriel.

	Cat. 1	Cat. 2	Cat. 3	Cat. 4	Cat. 5	Cat. 6	Cat. 7	Moy.
Désagrément	6%	7%	4%	4%	10%	9%	11%	7%
Gêne	17%	22%	27%	31%	55%	56%	23%	33%

**Tableau 4.10 : Pourcentage des références au désagrément dans les jugements émis par les sujets sur le bruit industriel.**

De manière générale, nous voyons une tendance accentuée par rapport au bruit routier : les sujets ont émis environ 5 fois moins de jugements que l'on pourrait relier au désagrément sonore (en moyenne 7%), que de jugements que l'on pourrait relier à la gêne sonore (en moyenne 33%).

On retient que même si les sujets ont relativement bien identifié les sources du bruit industriel, cette identification est plus dispersée que pour les bruits de passage. Le caractère stable et permanent du bruit industriel ressort au travers du fait que les sujets l'assimilent à un bruit de fond. Dans les descriptions, les aspects spectraux et temporels apparaissent saillants pour les sujets, notamment le caractère continu et non fluctuant que l'on peut recouper avec l'assimilation du bruit industriel avec un fond sonore amorphe. Cela mérite notamment d'être contrasté avec l'aspect variable des bruits de passage auxquels est combiné le bruit industriel dans le cadre de nos travaux.

#### **4.4. Prédiction des gênes spécifiques due au bruit industriel et due au bruit de passage routier issu des différentes catégories**

Dans cette section nous nous intéressons à la prédiction de la gêne spécifique (en mono-exposition) due au bruit industriel puis de la gêne spécifique (en mono-exposition) due aux bruits de passage issus de chacune des 7 catégories perceptives et cognitives.

Plus précisément, nous savons que le bruit industriel résulte de la combinaison de sources de bruit issues des catégories perceptives 2, 4 et 6 de la typologie de bruits industriels permanents et stables proposée par Le Nost [Nos07]. Nous disposons d'indices mis en avant par Alayrac *et al.* [AMVM+10] pour caractériser la gêne due à ces catégories perceptives de bruits industriels. Notre objectif est de déterminer parmi ces indices celui qui nous permettra de prédire la gêne spécifique due au bruit industriel considéré dans notre travail.

Concernant les bruits de passage des différentes catégories de la typologie perceptive et cognitive proposée et caractérisées par des indicateurs de gêne (cf. Chapitre 3), l'objectif sera ici de s'assurer que les indices (et combinaisons d'indices) mis en avant au Chapitre 3 nous permettent, sur les données récoltées au cours de ces expérimentations, une bonne prédiction de la gêne spécifique due aux bruits de passage des différentes catégories.

Nous utiliserons notamment ces résultats pour le test des différents modèles de gêne totale en situation de multi-exposition sonore (cf. section 4.6).

##### **4.4.1. Concernant le bruit industriel**

Le Tableau 4.11 présente les coefficients de corrélation entre les réponses moyennes de gêne spécifique due au bruit industriel (les réponses moyennes sont considérées



séparément pour chaque test) et les indices mis en avant par Alayrac *et al.* [AMVM+10]<sup>67</sup> (cf. Chapitre 1 ) pour caractériser les catégories perceptives de bruits industriels permanents et stables 2, 4 et 6. Nous avons rajouté ici la sonie N par souci de cohérence avec les résultats exposés au Chapitre 3 concernant les bruits de passage issus des différentes catégories.

	$L_{Aeq,T}$	N	$L_N$	$N_{4-9Barks} - N_{2-3Barks}$
$A_{BI1}$	0.971 <sup>c</sup>	0.985 <sup>c</sup>	0.976 <sup>c</sup>	0.911 <sup>b</sup>
$A_{BI2}$	0.955 <sup>b</sup>	0.934 <sup>b</sup>	0.965 <sup>c</sup>	0.813 <sup>a</sup>
$A_{BI3}$	0.926 <sup>b</sup>	0.946 <sup>b</sup>	0.927 <sup>b</sup>	0.981 <sup>c</sup>
$A_{BI4}$	0.983 <sup>c</sup>	0.984 <sup>c</sup>	0.971 <sup>c</sup>	0.873 <sup>a</sup>
$A_{BI5}$	0.955 <sup>b</sup>	0.958 <sup>b</sup>	0.954 <sup>b</sup>	0.879 <sup>b</sup>
$A_{BI6}$	0.965 <sup>c</sup>	0.984 <sup>c</sup>	0.973 <sup>c</sup>	0.952 <sup>b</sup>
$A_{BI7}$	0.979 <sup>c</sup>	0.996 <sup>c</sup>	0.989 <sup>c</sup>	0.983 <sup>c</sup>

**Tableau 4.11 : Coefficients de corrélation calculés entre les réponses moyennes de gêne due au bruit industriel récoltées au cours des 7 tests et divers indices acoustiques et psychoacoustiques.  $A_{Bii}$  est la gêne spécifique du bruit industriel obtenue au cours du test d'évaluation de la gêne en situation de multi-exposition au bruit industriel et aux bruits de passage issus de la catégorie i. <sup>a</sup> : n.s. ; <sup>b</sup>  $p < 0.05$  ; <sup>c</sup> :  $p < 0.01$ .**

Sur les 4 indices figurant dans le Tableau 4.11, 3 indices décrivent uniquement l'intensité du bruit industriel (il s'agit des indices  $L_{Aeq,T}$ , N,  $L_N$ ). Si ces indices montrent de manière générale des corrélations équivalentes avec les réponses moyennes de gêne due au bruit industriel, la sonie N offre le plus souvent la meilleure corrélation. L'indice  $N_{4-9Barks} - N_{2-3Barks}$  qui traduit à la fois l'intensité mais également la balance spectrale offre de moins bonnes corrélations, qui sont notamment pour  $A_{BI2}$  et  $A_{BI4}$  non statistiquement significatives. Pour ces raisons et dans un souci de cohérence avec les indicateurs proposés pour les bruits de passage en mono-exposition (cf. Chapitre 3 ), nous utiliserons la sonie N comme indicateur de la gêne due au bruit industriel en mono-exposition.

Catégorie	Equations de régression pour les indicateurs	$r^2$	Err. stand.
1	$A_{BI1} = 0.80N^c + 1.27$	0.97	0.12
2	$A_{BI2} = 0.52N^b + 1.64$	0.87	0.17
3	$A_{BI3} = 0.80N^b + 1.21$	0.90	0.24
4	$A_{BI4} = 0.68N^c + 0.93$	0.97	0.11
5	$A_{BI5} = 0.60N^b + 1.66$	0.92	0.15
6	$A_{BI6} = 0.98N^c + 0.43$	0.97	0.16
7	$A_{BI7} = 0.75N^c + 1.43$	0.99	0.06

**Tableau 4.12 : Indicateurs de gêne retenus pour la prédiction de la gêne due au bruit industriel en mono-exposition.  $r^2$  est le coefficient de détermination associés aux modèles. Err. stand. représente l'erreur type de l'estimation. <sup>b</sup> :  $p < 0.05$  ; <sup>c</sup> :  $p < 0.01$ .**

<sup>67</sup> Dans nos travaux, il ne sera pas pertinent de considérer l'indice  $N_r$  calculé dans [Ala09], et correspondant au nombre de raies spectrales, variable suivant les différents bruits industriels étudiés dans les travaux de thèse de M. Alayrac [Ala09]. En effet, cet indice ne présentera pas de variation au sein de chaque test de notre étude, puisqu'un seul et même bruit industriel, variant uniquement en niveau sonore, est utilisé lors de nos expérimentations.

Nous avons donc effectué des analyses de régression linéaire entre les réponses moyennes de gêne due au bruit industriel (les  $A_{Bii}$ ) et les valeurs de la sonie N. Le Tableau 4.12 montre le résultat de ces analyses.

Les équations données dans le Tableau 4.12 nous serviront pour la prédiction de la gêne spécifique due au bruit industriel pour le test des modèles de gêne totale en situation de multi-exposition sonore que nous aborderons en section 4.6.

#### 4.4.2. Concernant les bruits de passage

Pour le bruit de la circulation routière, nous disposons déjà des indicateurs caractéristiques de la gêne due aux bruits de passage des différentes catégories (cf. Chapitre 3). Nous nous contenterons de recalculer les modèles de régression à partir des indices mis en avant au Chapitre 3 et des données récoltées au cours des 7 tests présentés dans ce chapitre. L'objectif est de s'assurer que les indices et combinaisons d'indices fournissent, sur de nouvelles données, des qualités de prédiction qui demeurent élevées.

Le Tableau 4.13 récapitule les analyses de régression linéaire entre les réponses moyennes de gêne dues aux différentes catégories de bruits de passage (notées  $A_{BRi}$  pour la gêne spécifique due aux bruits de passage de la catégorie i) et les différents indices mis en évidence au Chapitre 3, pour chacune des catégories.

Nous retenons que les coefficients de détermination des modèles de régression calculés sont élevés ce qui témoigne d'une bonne qualité de prédiction des réponses moyennes de gêne par les indices et combinaisons d'indices mis en avant au Chapitre 3.

Catégorie	Equation de régression	R <sup>2</sup> (ou r <sup>2</sup> )	Err. stand.
1	$A_{BR1} = 0.68N^d + 1.09$	0.86	0.56
2	$A_{BR2} = 11.10(0.78)N_{15-18}^d + 0.07(0.51)F^d + 1.87$	0.93	0.34
3	$A_{BR3} = 0.92(1.04)N^d - 0.12(0.10)\Delta N^a - 0.23$	0.96	0.32
4	$A_{BR4} = 0.53(0.87)N^d + 0.03(0.17)R_{max}^a + 0.87$	0.91	0.44
5	$A_{BR5} = 0.54(0.84)N^d + 0.12(0.43)F_{max}^d + 0.95$	0.96	0.24
6	$A_{BR6} = 0.25L_{MF}^d - 7.01$	0.94	0.35
7	$A_{BR7} = 0.70(0.95)N^d + 0.04(0.14)F^c + 0.77$	0.98	0.20

**Tableau 4.13 : Indicateurs de gêne pour les catégories de bruits de passage de véhicules routiers. Pour les indicateurs issus de régression multiples, il figure entre parenthèse et en italique les coefficients de régression standardisés. R<sup>2</sup> (ou r<sup>2</sup>) sont les coefficients de détermination associés aux modèles. Err. stand. représente l'erreur type de l'estimation.  $A_{BRi}$  est la gêne spécifique due aux bruits de passage de la catégorie i. <sup>a</sup> : n.s. ; <sup>c</sup> : p<0.01 ; <sup>d</sup> : p<0.001.**

Dans l'ensemble, les coefficients standardisés pour les régressions multiples sont du même ordre de grandeur que ceux affichés dans le Chapitre 3 (cf. Tableau 3.9), soulignant qu'en comparaison aux résultats du Chapitre 3, pour les modèles de régression multiple, les influences relatives des différents indices sont dans des proportions comparables. On remarque cependant quelques déviations. Nous voyons notamment que pour les modèles de régressions concernant les bruits de passage de la catégorie 3 et 4, les coefficients de régression des indices décrivant les aspects temporels (respectivement  $\Delta N$  et  $R_{max}$ ) sont non statistiquement significatifs (respectivement p = 0.13 et p = 0.08). Cependant, nous nous situons juste au dessus du seuil de significativité statistique usuellement adopté (p = 0.05).

De plus les indicateurs sont calculés dans cette série de tests sur 15 données (3 « Sources » x 5 « Niveau de bruit routier »), alors que les indicateurs proposés lors du Chapitre 3 ont été calculés sur 35 données pour les bruits de passage de la catégorie 3 (5 « Sources » x 7 « Niveau de bruit routier ») et 28 données pour les bruits de passage de la catégorie 4 (4 « Sources » x 7 « Niveau de bruit routier »). En décidant de diminuer la variabilité entre les sources de bruit (3 bruits de passage différents au lieu de 5 utilisés dans les expérimentations du Chapitre 3), nous avons également diminué les possibilités de prendre en compte les variations entre elles.

## 4.5. Gêne totale et gênes spécifiques

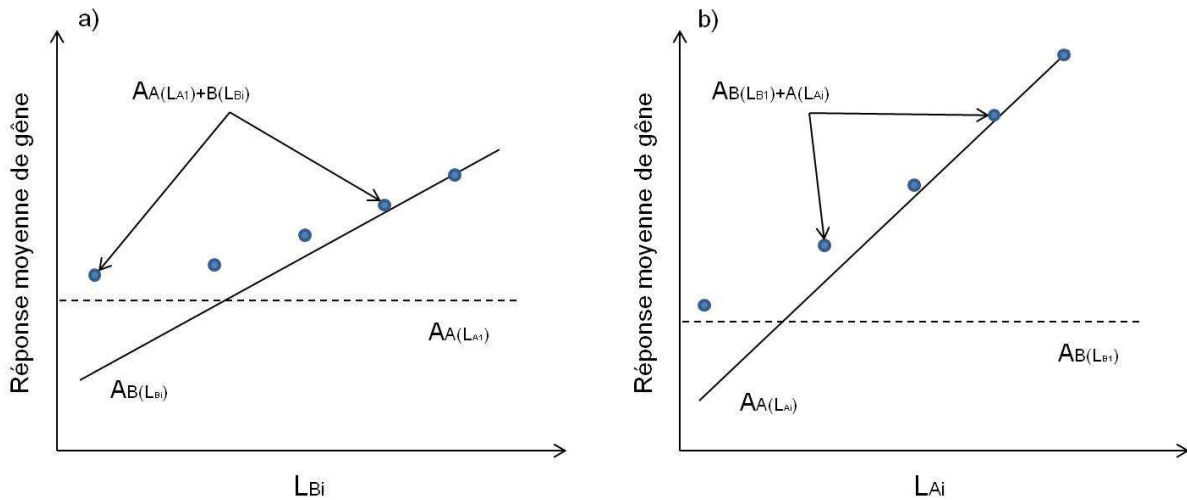
Dans l'optique de comprendre de potentiels effets d'interaction entre les bruits combinés, il est utile de pouvoir représenter sur une même figure l'évolution des gênes spécifiques et celle de la gêne totale. A ce titre, il nous paraît intéressant d'adapter la représentation de Vos [Vos92], déjà utilisée dans de précédents travaux portant sur la gêne en situation de multi-exposition (par exemple [JLYK10, AMV11, MMVA12]).

### 4.5.1. Représentation de Vos [Vos92]

Vos [Vos92] a étudié 2 vecteurs de la matrice de combinaison préconisée par Berglund et Nilsson [BN97] (cf. Chapitre 1, section 4.3.1.2). Dans le cas général, si l'on considère la combinaison de deux bruits A et B, étudier deux vecteurs revient à étudier les combinaisons pour lesquelles (1) A est fixé à  $L_{A1}$  dB(A) et combiné à B à différents niveaux sonores  $L_{Bi}$  dB(A) (on note ces combinaisons  $A(L_{A1})+B(L_{Bi})$  avec par exemple  $i = 1$  à 5) et (2) B est fixé à  $L_{B1}$  et combiné à A à différents niveaux sonores  $L_{Ai}$  dB(A) (on note ces combinaisons  $B(L_{B1})+A(L_{Ai})$  avec par exemple  $i = 1$  à 5). Dans ce cas, la représentation de Vos [Vos92] conduit à construire deux figures :

- La première représente la gêne totale due aux combinaisons  $A(L_{A1})+B(L_{Bi})$ , notée  $A_{A(L_{A1})+B(L_{Bi})}$  en fonction des  $L_{Bi}$  en abscisse. On ajoute la gêne spécifique due à A au niveau  $L_{A1}$ , notée  $A_{A(L_{A1})}$ , et la droite de régression qui correspond à la gêne spécifique due à B aux niveaux  $L_{Bi}$ , notée  $A_{B(L_{Bi})}$  ;
- La deuxième représente la gêne totale due aux combinaisons  $B(L_{B1})+A(L_{Ai})$ , notée  $A_{B(L_{B1})+A(L_{Ai})}$  en fonction des  $L_{Ai}$  en abscisse. On ajoute la gêne spécifique due à B au niveau  $L_{B1}$ , notée  $A_{B(L_{B1})}$  et la droite de régression qui correspond à la gêne spécifique de A aux niveaux  $L_{Ai}$ , notée  $A_{A(L_{Ai})}$ .

La Figure 4.5 en est une illustration dans un cas quelconque de multi-exposition.



**Figure 4.5 : Principe de la représentation de Vos [Vos92]. a) Combinaison  $A(L_{A1})+B(L_{B1})$ . b) Combinaison  $B(L_{B1})+A(L_{A1})$ .**

Dans notre cas, nous étudions la matrice complète préconisée par Berglund et Nilsson [BN97]. Nous devons donc adapter la représentation de Vos [Vos92] illustrée sur la Figure 4.5 à notre configuration. En adaptant les notations des sections précédentes, cela nous conduirait à représenter :

- Sur une première figure, les réponses moyennes de gène totale pour les combinaisons  $Bli(38)+Bri(X), \dots, Bli(46)+Bri(X)$ , notées respectivement  $A_{Bli(38)+Bri(X)}, \dots, A_{Bli(46)+Bri(X)}$ , avec  $X = 47, 50, \dots, 59dB(A)$ , en fonction de  $X$  (le niveau sonore du bruit routier de la catégorie  $i$ ) ; la droite de régression correspondant à la gène spécifique de  $Bri(X)$  notée  $A_{Bri(X)}$  ; les droites horizontales correspondant aux gènes spécifiques dues au bruit industriel  $Bli(38), \dots, Bli(46)$ , notées respectivement  $A_{Bli(38)}, \dots, A_{Bli(46)}$  ;
- Sur une deuxième figure, les réponses moyennes de gène totale pour les combinaisons  $Bri(47)+Bli(Y), \dots, Bri(59)+Bli(Y)$ , notées respectivement  $A_{Bri(47)+Bli(Y)}, \dots, A_{Bri(59)+Bli(Y)}$  avec  $Y = 38, 40, \dots, 46dB(A)$ , en fonction de  $Y$  (le niveau sonore du bruit industriel combiné au bruit routier de la catégorie  $i$ ) ; la droite de régression correspondant la gène spécifique de  $Bli(Y)$ , notée  $A_{Bli(Y)}$  ; les droites horizontales correspondant aux gènes spécifiques dues au bruit routier  $Bri(47), \dots, Bri(59)$ , notées respectivement  $A_{Bri(47)}, \dots, A_{Bri(59)}$ .

Cependant, le fait d'étudier la matrice complète préconisée par Berglund et Nilsson [BN97] nous conduirait dans ce cas à représenter les mêmes données de deux manières différentes. Pour éviter toute redondance, nous choisirons la représentation qui nous amène à comprendre au mieux les phénomènes mis en jeu.

Pour générer la représentation de Vos, les gènes spécifiques nécessitent d'être exprimées en fonction de l'indice  $L_{Aeq,T}$ . Les équations des droites de régression correspondantes sont données dans le Tableau 4.14. Les droites horizontales sont simplement obtenues à partir des équations fournies.

Cat.	Gêne spécifique due au bruit industriel			Gêne spécifique due aux bruits de passage		
	Equation de régression	r <sup>2</sup>	std. err	Equation de régression	r <sup>2</sup>	std. err
1	$A_{BI1} = 0.19L_{Aeq,T}^c - 4.38$	0.94	0.17	$A_{BR1} = 0.32L_{Aeq,T}^d - 11.44$	0.95	0.35
2	$A_{BI2} = 0.12L_{Aeq,T}^b - 2.21$	0.91	0.14	$A_{BR2} = 0.24L_{Aeq,T}^d - 7.10$	0.87	0.47
3	$A_{BI3} = 0.17L_{Aeq,T}^b - 3.92$	0.86	0.28	$A_{BR3} = 0.34L_{Aeq,T}^d - 13.46$	0.86	0.63
4	$A_{BI4} = 0.16L_{Aeq,T}^c - 3.88$	0.97	0.11	$A_{BR4} = 0.29L_{Aeq,T}^d - 9.88$	0.84	0.59
5	$A_{BI5} = 0.14L_{Aeq,T}^b - 2.66$	0.91	0.16	$A_{BR5} = 0.26L_{Aeq,T}^d - 8.50$	0.85	0.51
6	$A_{BI6} = 0.23L_{Aeq,T}^c - 6.30$	0.93	0.23	$A_{BR6} = 0.27L_{Aeq,T}^d - 9.94$	0.81	0.62
7	$A_{BI7} = 0.18L_{Aeq,T}^c - 3.83$	0.96	0.14	$A_{BR7} = 0.29L_{Aeq,T}^d - 10.18$	0.90	0.45

**Tableau 4.14 : Equations de régression pour les gênes spécifiques des bruits combinés en fonction de l'indice  $L_{Aeq,T}$ , en vue de la représentation de Vos. <sup>b</sup> :  $p < 0.05$ . <sup>c</sup> :  $p < 0.01$ . <sup>d</sup> :  $p < 0.001$ .**

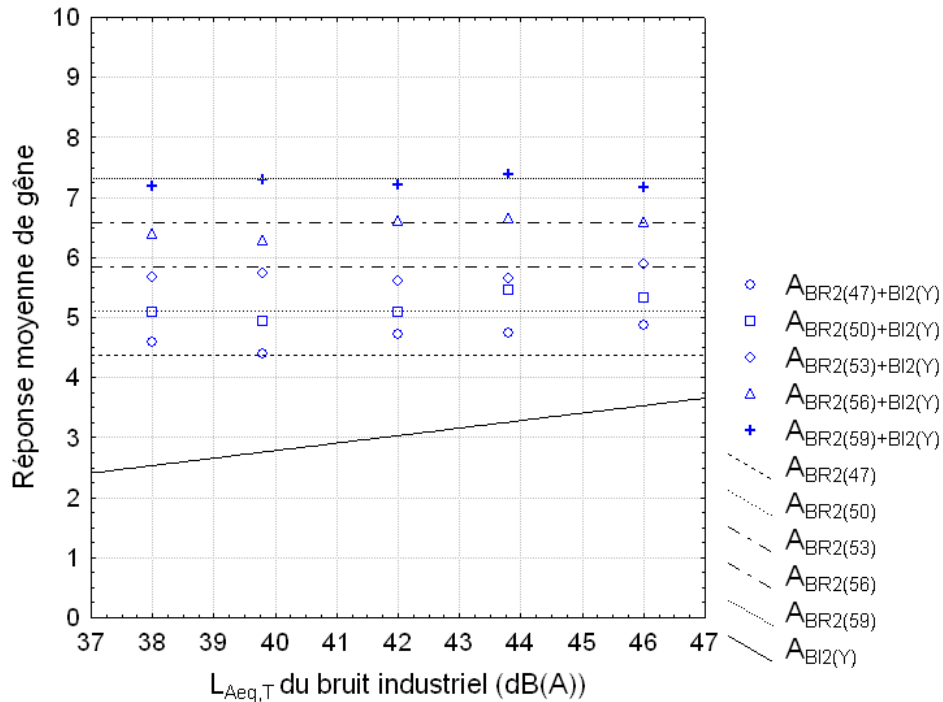
#### 4.5.2. Effet prononcé de source dominante

La Figure 4.6 présente la gêne totale et les gênes spécifiques pour les données du test d'évaluation de la gêne en situation de multi-exposition au bruit industriel et aux bruits de passage de la catégorie 2 en adaptant la représentation de Vos [Vos92]. Pour plus de lisibilité et en accord avec notre approche par catégorie, nous avons moyenné, pour des combinaisons de bruits de passage et de bruit industriel aux niveaux sonores X et YdB(A), les réponses moyennes de gêne totale des 3 bruits de passage. En conséquence, au lieu des 75 points de gêne totale, seulement  $75/3 = 25$  seront représentés.

Rappelons d'abord que selon notre protocole expérimental, le bruit routier domine toujours le bruit industriel dans les combinaisons. Nous constatons d'emblée à l'observation de la Figure 4.6 que sur la dynamique des niveaux sonores étudiés au cours de ce test, la gêne spécifique due au bruit industriel est toujours inférieure à la gêne spécifique due aux bruits de passage de la catégorie 2. Autrement dit, les bruits de passage de la catégorie 2 sont toujours la composante la plus gênante. Cependant, on remarque que pour certaines combinaisons, la gêne spécifique due au bruit industriel se rapproche de la gêne spécifique due au bruit routier. C'est le cas notamment lorsque le bruit industriel est aux niveaux sonores les plus élevés (par exemple 44 ou 46 dB(A)) et que les bruits de passage sont à leur niveau sonore le plus faible (47dB(A)).

La Figure 4.6 nous montre que l'on observe pour la plupart des données le phénomène de source dominante, déjà observé dans de nombreux travaux portant sur la gêne en situation de multi-exposition sonore (par exemple [Vos92, Ala09, MMVA12]), c'est-à-dire que la gêne totale tend vers la gêne spécifique maximale. C'est le cas par exemple des points correspondant aux combinaisons BR2(53)+BI2(Y), BR2(56)+BI2(Y), et BR2(59)+BI2(Y), pour lesquels on observe que la gêne totale est égale ou sinon très proche de la gêne spécifique due à BR2(53), BR2(56), et BR2(59) respectivement. Cependant pour d'autres points, on observe des déviations par rapport au phénomène de source dominante. C'est le cas par exemple pour les points correspondant à BR2(47)+BI2(Y) et BR2(50)+BI2(Y), pour lesquels on observe que la gêne totale est supérieure à la gêne spécifique due à BR2(47) et BR2(50) respectivement. Pour appuyer ces observations, nous avons effectué des tests *t* de

Student<sup>68</sup>, afin d'évaluer s'il existe des différences significatives entre la gêne totale due aux combinaisons BR2(47)+BI2(Y),...,BR2(59)+BI2(Y) et la gêne spécifique due à BR2(47),...,BR2(59), respectivement. Sur les 25 tests *t* réalisés, 8 établissent que la gêne totale est significativement supérieure à la gêne spécifique maximale (i.e. dans ce cas présent la gêne due aux bruits de passage de la catégorie 2), alors que 17 établissent qu'il n'y a pas de différence significative entre gêne totale et gêne spécifique maximale. Pour la multi-exposition au bruit industriel et aux bruits de passage de la catégorie 2, nous avons donc **un effet prononcé de source dominante**.



**Figure 4.6 : Représentation de la gêne totale et des gênes spécifiques relatives aux données du test d'évaluation de gêne en situation de multi-exposition au bruit industriel et aux bruits de passage de la catégorie 2 (deux-roues à allure accélérée), selon la méthode de Vos [Vos92].**

En adoptant le même raisonnement, nous avons montré l'existence d'un effet prononcé de source dominante **pour les multi-expositions au bruit industriel et aux bruits de passage des catégories 4 et 5**.

Pour la multi-exposition au bruit industriel et aux bruits de passage de la catégorie 4, la gêne spécifique due aux bruits de passage est la gêne spécifique maximale pour l'ensemble des combinaisons étudiées. Les tests *t* nous ont permis d'établir que pour 18 combinaisons sur 25, il n'y a pas de différence significative entre la gêne totale et la gêne spécifique maximale, tandis que pour les 7 combinaisons restantes, la gêne totale est significativement supérieure à la gêne spécifique maximale.

Pour la multi-exposition au bruit industriel et aux bruits de passage de la catégorie 5, la gêne spécifique due aux bruits de passage est la gêne spécifique maximale pour l'ensemble des combinaisons étudiées. Les tests *t* nous ont permis d'établir que pour 14 combinaisons sur 25, il n'y a pas de différence significative entre la gêne totale et la gêne spécifique maximale, tandis que pour les 11 combinaisons restantes, la gêne totale est significativement supérieure à la gêne spécifique maximale.

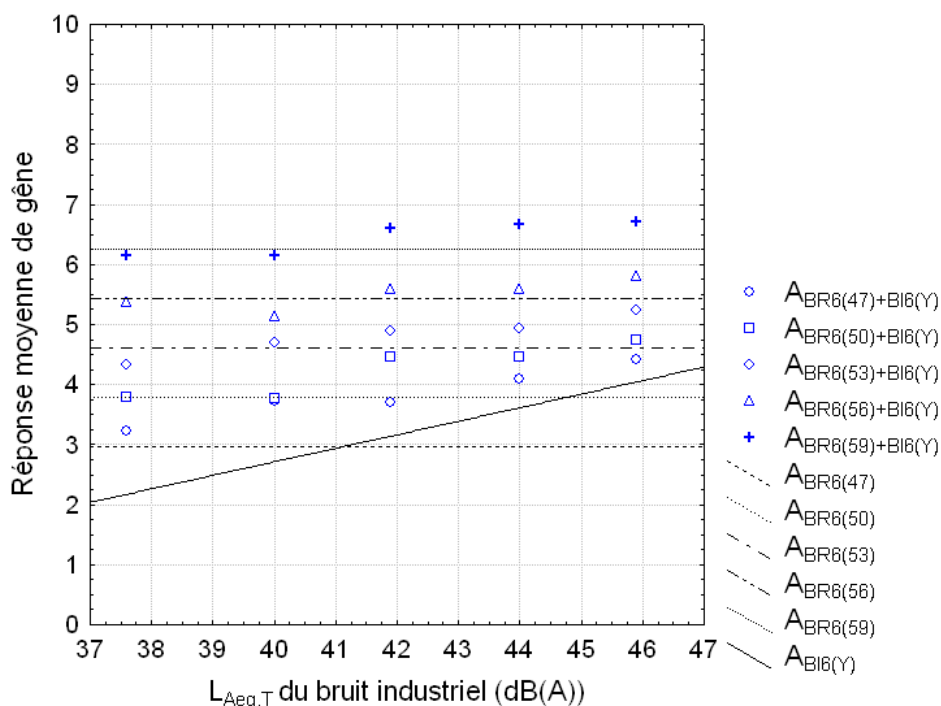
<sup>68</sup> Le principe de la comparaison de deux moyennes par le test *t* de Student est analogue au principe de l'analyse de variance à 1 facteur et deux modalités. Nous ne rentrerons donc pas dans les détails théoriques. Le lecteur peut se reporter à [Fox99, How98].

### 4.5.3. Effet prononcé de synergie

La Figure 4.7 présente la gêne totale et les gênes spécifiques pour les données du test d'évaluation de la gêne en situation de multi-exposition au bruit industriel et aux bruits de passage de la catégorie 6 en adaptant la représentation de Vos [Vos92]. Pour plus de lisibilité et en accord avec notre approche par catégorie, nous avons moyenné pour chaque combinaison les réponses de gêne totale sur les 3 bruits de passage.

Nous voyons que sur la dynamique de niveaux sonores considérés pour cette expérience, le bruit industriel est, pour la plupart des combinaisons, moins gênant que les bruits de passage de la catégorie 6 (cela représente 21 combinaisons sur 25), mais on voit que pour certaines combinaisons, le bruit industriel est plus gênant que le bruit routier (cela représente 4 combinaisons sur 25). De même nous voyons que dans certains cas, la gêne totale semble égale ou très proche de la gêne spécifique maximale, tandis que dans d'autres cas, la gêne totale semble clairement supérieure à la gêne spécifique maximale.

Afin de préciser ces observations, nous avons effectué un ensemble de tests  $t$  de Student afin d'examiner s'il existe des différences significatives entre gêne totale et gêne spécifique maximale des bruits combinés, sur le même principe qu'exposé en section 4.5.2 (par exemple les réponses de gêne totale dues à la combinaison BR6(59)+BI6(46) seront comparées aux réponses de gêne spécifique due à BR6(59) ou de manière analogue, les réponses de gêne totale dues à la combinaison BR6(47)+BI6(46) seront comparées aux réponses de gêne spécifique due à BI6(46)).



**Figure 4.7 : Représentation de la gêne totale et des gênes spécifiques relatives aux données du test d'évaluation de la gêne en situation de multi-exposition au bruit industriel et aux bruits de passage de la catégorie 6 (véhicules légers à allure accélérée), selon la méthode de Vos [Vos92].**

Les tests  $t$  réalisés nous ont montré que pour 13 combinaisons, la gêne totale est significativement supérieure à la gêne spécifique maximale (i.e., suivant les cas, la gêne spécifique due aux bruits de passage de la catégorie 6 ou la gêne spécifique due au bruit industriel). Pour les 12 combinaisons restantes, il n'y a pas de différence significative entre gêne totale et gêne spécifique maximale. Pour la multi-exposition au bruit industriel et aux bruits de la catégorie 6, nous avons donc majoritairement **un effet prononcé de synergie**.

En adoptant le même raisonnement, nous avons montré l'existence d'un effet prononcé de synergie **pour les multi-expositions au bruit industriel et aux bruits de passage des catégories 1, 3 et 7.**

Pour la multi-exposition au bruit industriel et aux bruits de passage de la catégorie 1, la gêne spécifique due aux bruits de passage est la gêne spécifique maximale pour 22 cas tandis que la gêne spécifique du bruit industriel est la gêne spécifique maximale pour les 3 cas restants. Les tests *t* nous ont permis d'établir que pour 7 cas sur 25, il n'y a pas de différence significative entre la gêne totale et la gêne spécifique maximale, tandis que pour les 18 cas restants, la gêne totale est significativement supérieure à la gêne spécifique maximale.

Pour la multi-exposition au bruit industriel et aux bruits de passage de la catégorie 3, la gêne spécifique due aux bruits de passage est la gêne spécifique maximale pour 18 combinaisons tandis que la gêne spécifique due au bruit industriel est la gêne spécifique maximale pour les 7 combinaisons restantes. Les tests *t* nous ont permis d'établir que pour 10 combinaisons sur 25, il n'y a pas de différence significative entre la gêne totale et la gêne spécifique maximale, tandis que pour les 15 combinaisons restantes, la gêne totale est supérieure à la gêne spécifique maximale.

Pour la multi-exposition au bruit industriel et aux bruits de passage de la catégorie 7, la gêne spécifique due aux bruits de passage est la gêne spécifique maximale pour 21 combinaisons tandis que la gêne spécifique due au bruit industriel est la gêne spécifique maximale pour les 4 combinaisons restantes. Les tests *t* nous ont permis d'établir que pour 7 combinaisons sur 25, il n'y a pas de différence significative entre la gêne totale et la gêne spécifique maximale, tandis que pour les 18 combinaisons restantes, la gêne totale est supérieure à la gêne spécifique maximale.

L'observation de l'évolution des gênes spécifiques et gêne totale nous a permis de mettre en évidence deux phénomènes principaux : effet de source dominante classiquement observé qui signifie que la gêne totale est guidée par la gêne spécifique maximale des bruits combinés, et effet de synergie entre les bruits combinés qui signifie que la gêne totale est supérieure à la gêne spécifique maximale des bruits combinés. De manière générale sur l'ensemble des combinaisons, ces deux phénomènes coexistent, mais leur importance dépend de la catégorie de bruits de passage à laquelle est combiné le bruit industriel. L'effet de source dominante est majoritaire lorsque le bruit industriel est combiné aux bruits de passage des catégories 2, 4 et 5, tandis que la synergie entre bruits combinés est majoritaire lorsque le bruit industriel est combiné aux bruits de passage des catégories 1, 3, 6 et 7. Dans l'optique des tests des modèles de gêne totale, il sera intéressant de garder à l'esprit ces phénomènes qui nous permettront de critiquer les modèles.

## **4.6. Prédiction de la gêne totale : test de modèles de multi-exposition**

### **4.6.1. Choix des modèles**

Dans le Chapitre 1, nous avons recensé 11 modèles classiques prédictifs de la gêne totale en situation de multi-exposition sonore. Parmi ces modèles, certains ne seront pas étudiés ici. Il s'agit des modèles suivants : modèle de réponse-sommation ([Oll78, Oll,80]), modèle de sommation-inhibition [Pow,79c], modèle perceptif généralisé [BN01a]. Concernant les deux premiers modèles cités, nous avons dit qu'une des hypothèses est que les pentes d'évolution des gênes spécifiques en fonction du niveau sonore sont les mêmes pour les bruits combinés. Or, nous voyons d'après le Tableau 4.14 que ce n'est pas le cas pour nos données. Concernant le troisième modèle cité, nous avons dit au Chapitre 1 qu'il se



rapprochait d'autres modèles de la littérature, nous n'avons pas alors jugé intéressant de le considérer ici.

Nous avons alors retenu 9 modèles :

- **Cinq modèles psychophysiques** : modèle de sommation énergétique, modèle des différences énergétiques, modèle des effets indépendants, modèle mixte psychophysique, modèle de sommation pondérée de Vos [Vos92] ;
- **Quatre modèles perceptifs** : modèle de source dominante, modèle de régression linéaire, modèle mixte perceptif, modèle de sommation vectorielle.

#### 4.6.2. Variables indépendantes

De manière générale, dans les travaux de la littérature, les variables indépendantes utilisées dans les modèles psychophysiques sont construites à partir des niveaux de pression sonore équivalent pondérés A (par exemple [Tay82, KKKN99, MMVA12]). Nous testerons donc les 5 modèles psychophysiques retenus avec de telles variables indépendantes. Cependant, nous avons vu dans les résultats des différentes expériences menées au cours de ces travaux de thèse que la sonie de Zwicker permettait de manière générale une meilleure prédiction de la gêne que l'indice  $L_{Aeq,T}$ . Gille [Gil10], dans ses travaux de master, a montré que des variables indépendantes construites à partir de la sonie permettaient une meilleure prédiction de la gêne totale que les modèles utilisant des variables indépendantes classiques de niveau sonore. Pour ces raisons, nous testerons également les modèles psychophysiques (à l'exception du modèle de sommation pondérée de Vos) avec les variables indépendantes construites à partir de la sonie. Nous aurons donc une variante « sonie » et une variante « niveau sonore » pour les modèles psychophysiques (à l'exception du modèle de sommation pondérée de Vos).

Les modèles perceptifs utilisent généralement des variables indépendantes construites à partir des gênes spécifiques (ou partielles) observées (par exemple [BV02, BN01a, PMMR+12]). On note  $A_{BRi}$  ou  $A_{Bli}$  de telles gênes spécifiques observées. Nous testerons donc les 4 modèles perceptifs retenus avec de telles variables indépendantes. Cependant, nous disposons d'indicateurs de gêne pour le bruit industriel et pour chaque catégorie de bruits de passage de véhicules routiers (cf. respectivement Tableau 4.12 et Tableau 4.13). Les équations des indicateurs fournies dans ces tableaux permettent donc d'obtenir des valeurs de gêne spécifique prédite par les indicateurs proposés. On note  $\hat{A}_{BRi}$  et  $\hat{A}_{Bli}$  de telles gênes spécifiques prédites. Nous testerons donc les 4 modèles perceptifs avec des variables indépendantes construites avec de telles gênes spécifiques prédites. Ce qui nous permettra de mesurer l'apport de notre démarche pour l'étude de la multi-exposition sonore, en comparant notamment les modèles psychophysiques avec les modèles perceptifs utilisant de telles variables indépendantes. Nous aurons donc une variante de modèles perceptifs avec des données « observées », appelée variante « observée », et une variante de modèles perceptifs avec des données « prédites », appelée variante « prédite ».

Les modèles de gêne totale, ainsi que les variantes considérées, sont résumés dans le Tableau 4.15.

Modèles psychophysiques	Variables indépendantes	Modèles perceptifs	Variables indépendantes
Somme énergétique	$L_T$	Source dominante	$\max(A_{BR}, A_{BI})$
	$N_T$		$\max(\hat{A}_{BR}, \hat{A}_{BI})$
Différences énergétiques	$L_T,  L_{BR} - L_{BI} $	Somme vectorielle	$\sqrt{(A_{BR}^2 + A_{BI}^2 + 2 A_{BR}A_{BI}\cos\alpha_o)}$
	$N_T,  N_{BR} - N_{BI} $		$\sqrt{(\hat{A}_{BR}^2 + \hat{A}_{BI}^2 + 2 \hat{A}_{BR}\hat{A}_{BI}\cos\alpha_p)}$
Effets indépendants	$L_{BR}, L_{BI}$	Régression linéaire	$A_{BR}, A_{BI}$
	$N_{BR}, N_{BI}$		$\hat{A}_{BR}, \hat{A}_{BI}$
Mixte	$L_{BR}, L_{BI},  L_{BR} - L_{BI} $	Mixte	$A_{BR}, A_{BI},  A_{BR} - A_{BI} $
	$N_{BR}, N_{BI},  N_{BR} - N_{BI} $		$\hat{A}_{BR}, \hat{A}_{BI},  \hat{A}_{BR} - \hat{A}_{BI} $
Somme pondérée	$L_t$		

**Tableau 4.15 : Modèles testés et variantes.**  $L_T$  :  $L_{Aeq,T}$  total.  $N_T$  : sonie totale.  $L_{BR}$  :  $L_{Aeq,T}$  des bruits de passage.  $L_{BI}$  :  $L_{Aeq,T}$  du bruit industriel.  $N_{BR}$  : sonie des bruits de passage.  $N_{BI}$  : sonie du bruit industriel.  $L_t$  : indice de bruit global [Vos92].  $A_{BR}$  : Réponse moyenne de gêne spécifique des bruits de passage.  $A_{BI}$  : Réponse moyenne de gêne spécifique du bruit industriel.  $\hat{A}_{BR}$  : gêne spécifique prédite du bruit routier à l'aide des indicateurs fournis.  $\hat{A}_{BI}$  : gêne spécifique prédite du bruit industriel à l'aide des indicateurs fournis.  $\alpha_o$  : angle pour le modèle de sommation vectorielle (variante « observée ».  $\alpha_p$  : angle pour le modèle de sommation vectorielle (variante « prédite »).

### 4.6.3. Démarche

Pour chacun des 7 tests d'évaluation de la gêne en situation de multi-exposition aux bruits de passage des 7 catégories et au bruit industriel, chaque modèle et variante sera testé.

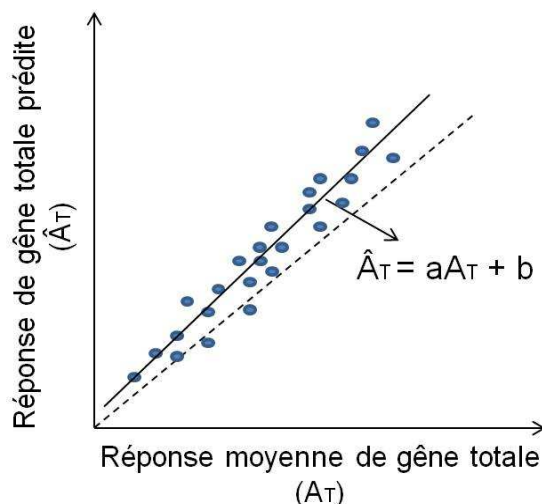
Plus précisément, nous effectuerons pour chaque modèle et variante une analyse de régression linéaire entre les réponses moyennes de gêne totale (notée  $A_T$ ) en tant que variable dépendante, et les variables indépendantes résumées dans le Tableau 4.15. Nous jugerons de la qualité d'ajustement des données par les différents modèles sur la base du **coefficient de détermination** et de **l'erreur type de l'estimation** résultant de l'analyse de la régression linéaire.

Cependant, cela ne nous donne que des informations sur la qualité de l'ajustement des données par les modèles. Afin d'obtenir des informations sur la qualité de la prédiction des données par les modèles, nous injecterons dans les équations de ces modèles les valeurs des variables indépendantes, afin d'obtenir des réponses de gêne totale prédites par les modèles (notée  $\hat{A}_T$ ). Ensuite, nous représenterons les réponses de gêne totale prédites ( $\hat{A}_T$ ) en fonction des réponses moyennes de gêne totale ( $A_T$ ), en calculant la corrélation entre ces deux variables, et en calculant la droite de régression entre elles. Ces informations sont résumées sur un graphique tel que celui présenté sur la Figure 4.8.

Si la prédiction du modèle était parfaite, alors les points se situeraient sur la bissectrice du plan, matérialisée par la droite en pointillés sur la Figure 4.8. Dans ce cas, la droite de régression entre réponse moyenne de gêne totale  $A_T$  et réponse de gêne totale prédite  $\hat{A}_T$  aurait une **pente**  $a$  égale à 1 et une **ordonnée à l'origine**  $b$  égale à 0. De même la **corrélacion** entre  $A_T$  et  $\hat{A}_T$  serait égale à 1. La corrélation calculée, ainsi que les valeurs de la pente  $a$  et ordonnée à l'origine  $b$  nous donnent des informations quant à la prédiction des modèles. Ainsi dans le cas quelconque représenté sur la Figure 4.8, le modèle de gêne totale a tendance à surestimer la gêne totale observée.

C'est en considérant ces différents paramètres (traduisant la qualité de l'ajustement des données et la qualité de la prédiction des données), que nous allons évaluer et comparer les modèles de gêne totale et leurs variantes à partir des données recueillies au

cours de chacun des 7 tests d'évaluation de la gêne en situation de multi-exposition au bruit industriel et aux bruits de passage des différentes catégories.



**Figure 4.8 : Nuage de points représentant les réponses de gêne totale prédite ( $\hat{A}_T$ ) en fonction des réponses moyennes de gêne totale ( $A_T$ ).**

#### **4.6.4. Evaluation et comparaison des modèles de gêne totale**

Afin de ne pas alourdir la lecture, nous présenterons dans cette section une synthèse des résultats de l'évaluation et comparaison des modèles de gêne totale. Le détail des analyses menées en accord avec la démarche expliquée en section 4.6.3 est donné dans les Tableaux E.1 à E.7 de l'ANNEXE E, pour les données relatives à l'évaluation de la gêne totale en situation de multi-exposition au bruit industriel et aux bruits de passage des catégories 1 à 7 respectivement.

##### **4.6.4.1. Remarques générales**

Nous avons vu au Chapitre 1 que le modèle de sommation pondérée de Vos [Vos92] nécessite de choisir une source de référence afin de procéder au calcul des pénalités dépendantes du niveau sonore. Etant donné que les bruits de passage des 7 catégories sont combinés à un même bruit industriel, il nous a paru judicieux de choisir le bruit industriel comme source de référence. Notons que les pénalités dépendantes du niveau ont été calculées selon la procédure décrite au Chapitre 1, en utilisant les équations d'évolution des gênes spécifiques données dans le Tableau 4.14. Le modèle de sommation pondérée nécessite enfin de déterminer un facteur  $k$  qui permet d'optimiser la prédiction de la gêne totale. Nous avons systématiquement testé les valeurs entières de  $k$  comprises entre 7 et 15 et le coefficient  $k$  retenu est celui qui permet de trouver le meilleur compromis dans les 5 paramètres cités dans notre démarche d'évaluation des modèles (section 4.6.3). La valeur optimale pour chaque combinaison de bruit industriel avec les bruits de passage d'une catégorie donnée figurent dans le Tableau 4.16. Nous voyons que les valeurs de  $k$  sont différentes pour les différentes combinaisons. On retrouve néanmoins des valeurs utilisées dans la littérature :  $k = 10$  ([AMV11, MMVA12]),  $k = 15$  [Vos92]. On en déduit que le coefficient  $k$  dépend de la nature des bruits combinés, ce qui rend difficile une généralisation, à moins d'opter pour le choix de  $k = 10$  comme l'a fait Miedema [Mie04].

Nous avons vu au Chapitre 1 que le modèle de sommation vectorielle nécessite la détermination d'un angle  $\alpha$  qui permet d'optimiser la prédiction de la gêne totale. Partant de l'équation (1.37), et en adaptant la formulation du modèle de sommation vectorielle aux deux variantes testées, il vient :

$$\alpha_o = \cos^{-1} \left( \frac{A_T^2 - (A_{BI}^2 + A_{BR}^2)}{2A_{BI}A_{BR}} \right) \quad (4.1)$$

$$\alpha_p = \cos^{-1} \left( \frac{A_T^2 - (\hat{A}_{BI}^2 + \hat{A}_{BR}^2)}{2\hat{A}_{BI}\hat{A}_{BR}} \right) \quad (4.2)$$

	Cat.1	Cat.2	Cat.3	Cat.4	Cat.5	Cat.6	Cat.7	Moy.
k	12	15	10	15	15	8	15	12.8
$\alpha_o$ (degrés)	101	101	101	101	104	102	100	101.4
$\alpha_p$ (degrés)	100	101	101	101	104	102	100	101.3

**Tableau 4.16 : Coefficient k optimal et angles  $\alpha_o$  et  $\alpha_p$  optimaux pour chaque test. k : coefficient pour le modèle de sommation pondérée.  $\alpha_o$  : angle pour le modèle de sommation vectorielle (variante « observée »).  $\alpha_p$  : angle pour le modèle de sommation vectorielle (variante « prédite »).**

Dans ces deux équations, pour chaque combinaison (du bruit industriel avec les bruits de passage des différentes catégories), nous connaissons pour chaque stimulus les différentes variables, donc pour chacun, nous pouvons déterminer un angle  $\alpha_{(o \text{ ou } p)}$ . Nous moyennons ensuite les angles obtenus pour chaque stimulus, et prenons l'angle moyen comme angle optimal. Le Tableau 4.16 donne les angles obtenus pour chaque multi-exposition au bruit industriel et aux différentes catégories de bruits de passage, pour les deux variantes du modèle de sommation vectorielle que nous avons testées. On voit que la valeur de cet angle varie peu et est similaire pour les deux variantes testées.

Concernant le modèle mixte psychophysique, les stimuli tels que nous les avons construits imposent que dans une combinaison le niveau sonore du bruit industriel est systématiquement inférieur au niveau sonore du bruit routier (il en est de même en considérant les sonies). Il en résulte que les variables indépendantes  $L_{BI}$  et  $L_{BR}$  ( $N_{BI}$  et  $N_{BR}$ ) sont redondantes avec la variable indépendante  $|L_{BI} - L_{BR}|$  ( $|N_{BI} - N_{BR}|$ ). D'un point de vue statistique introduire deux variables redondantes dans un modèle de régression multiple n'a pas de sens. Pour cette raison les résultats concernant le modèle mixte psychophysique (dans ses deux variantes) ne sont pas exposés dans l'ANNEXE E. Concernant le modèle mixte perceptif, nous avons vu (cf. section 4.5.2) que pour les catégories 2, 4 et 5, la gêne spécifique due aux bruits de passage est supérieure à la gêne spécifique due au bruit industriel pour l'ensemble des combinaisons. Nous nous retrouvons alors dans la même configuration avec des variables indépendantes redondantes. Pour cette raison, les résultats concernant le modèle mixte perceptif (dans ses deux variantes) ne sont pas exposés dans l'ANNEXE E pour ces 3 catégories.

#### 4.6.4.2. Modèles psychophysiques

De manière générale, les différences entre modèles psychophysiques selon les différents paramètres, décrits en section 4.6.3 (le coefficient de détermination  $R^2$  et l'erreur type de l'estimation pour évaluer la qualité d'ajustement des données ; le coefficient de corrélation de Bravais-Pearson entre les réponses moyennes de gêne totale et les réponses de gêne totale prédites, ainsi que la pente et l'ordonnée à l'origine, pour évaluer la qualité de la prédiction des données), sont légères (cf. Tableaux E.1 à E.7 de l'ANNEXE E). Toutefois, il est possible de dégager des tendances à partir du bilan comparatif des modèles psychophysiques figurant dans le Tableau 4.17. Ce dernier présente le nombre de fois où chaque variante de chaque modèle testé a été la plus performante, la deuxième ou la troisième plus performante pour la prédiction de la gêne totale. A chaque fois, il est indiqué

la catégorie de bruits de passage, à laquelle est combiné le bruit industriel, en correspondance avec ce classement. Par exemple, on voit que la variante « niveau sonore » du modèle de sommation énergétique a été classé une fois comme la plus performante en termes de prédiction de la gêne totale, et ce pour les données relatives à la multi-exposition au bruit industriel et aux bruits de passage de la catégorie 2.

Modèle	Variable(s) Indépendante(s)	Classement		
		1er	2ème	3ème
Sommation énergétique	$L_T$	1 (Cat. 2)	1 (Cat. 5)	...
	$N_T$	...	1 (Cat. 7)	3 (Cat. 3, 4, 6)
Différences énergétiques	$L_T,  L_{BR} - L_{BI} $	2 (Cat. 1, 5)	1 (Cat. 2)	...
	$N_T,  N_{BR} - N_{BI} $	2 (Cat. 3, 7)	2 (Cat. 4, 6)	...
Effets indépendants	$L_{BR}, L_{BI}$	...	1 (Cat. 1)	...
	$N_{BR}, N_{BI}$	2 (Cat. 4, 6)	1 (Cat. 3)	1 (Cat. 7)
Sommation pondérée	$L_t$	...	...	3 (Cat. 1, 2, 5)

**Tableau 4.17 : Bilan de l'évaluation des modèles psychophysiques pour la prédiction de la gêne totale.**

De manière générale, on voit que le modèle de sommation pondérée, pourtant souvent mis en avant dans divers travaux de la littérature ne figure pas parmi les modèles les plus performants par rapport à nos données. Si l'on considère ensuite les 3 autres modèles et leurs variantes, on se rend compte que la variante « sonie » des modèles psychophysiques est globalement plus performante que la variante « niveau sonore » pour la prédiction de la gêne totale.

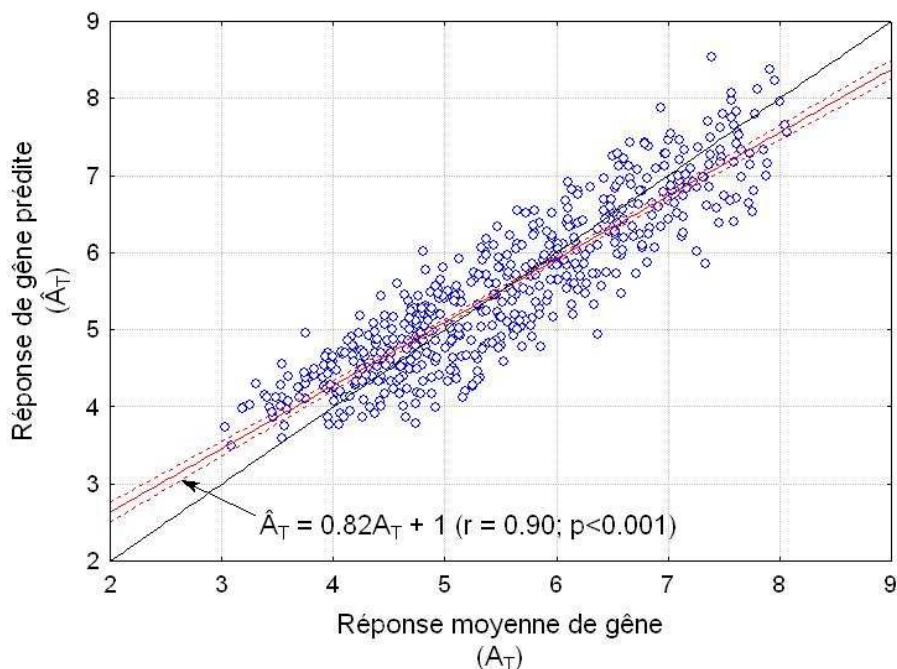
En examinant plus précisément les résultats des modèles pour leur variante « sonie », on voit que le modèle des différences énergétiques est le plus performant. Le modèle des effets indépendants est ensuite le deuxième plus performant, suivi du modèle de sommation énergétique. En examinant ensuite les résultats des modèles pour la variante « niveau sonore », c'est également le modèle des différences énergétiques qui apparaît le plus performant, suivi du modèle de sommation énergétique et enfin du modèle des effets indépendants. Sans distinguer les deux variantes, on observe que les deux modèles les plus performants sont dans l'ordre le modèle des différences énergétiques et le modèle des effets indépendants. Cependant, le coefficient de régression de la variable indépendante  $|L_{BI} - L_{BR}|$  ( $|N_{BI} - N_{BR}|$ ) n'est pas statistiquement significatif pour la plupart des combinaisons (cf. ANNEXE E). Cela signifie que cette variable a de manière générale une influence faible sur la gêne totale par rapport à la variable indépendante  $L_T$  ( $N_T$ ), et dans ce cas, le modèle des différences énergétiques se ramène au modèle simple de sommation énergétique.

En bilan global, c'est donc la variante « sonie » du modèle des effets indépendants que nous retenons parmi les modèles psychophysiques. Il nous apparaît alors intéressant de définir une équation prédictive moyenne pour ce modèle des effets indépendants. Nous testerons ensuite la qualité de la prédiction de ce modèle en confrontant l'ensemble des réponses moyennes de gêne totale obtenues au cours des 7 tests avec l'ensemble des réponses de gêne totale prédites correspondant à ces tests, et générées par l'équation prédictive moyenne. Celle-ci est obtenue en moyennant les coefficients de régression des 7 équations données dans les Tableaux E.1 à E.7 pour la variante sonie du modèle des effets indépendants et est données ci-après.

$$A_T = 0.31(0.19)N_{BI} + 0.53(0.91)N_{BR} + 1.59 \quad (4.3)$$

Dans l'équation (4.3), les nombres entre parenthèses représentent les coefficients de régression standardisés moyens correspondants aux coefficients de régression moyens.

La Figure 4.9 présente la confrontation entre réponses de gêne prédite par l'équation (4.3), notée  $\hat{A}_T$ , et les réponses moyennes de gêne observées au cours des 7 tests d'évaluation de la gêne en situation de multi-exposition au bruit industriel et aux bruits de passage des 7 catégories, notée  $A_T$ .



**Figure 4.9 : Nuage de points représentant les réponses de gêne prédites ( $\hat{A}_T$ ) par l'équation moyenne (4.3) du modèle des effets indépendants en fonction des réponses moyennes de gêne observées ( $A_T$ ).**

Nous voyons notamment que le nuage de points est équitablement réparti autour de la bissectrice, ce qui signale qu'il n'existe aucune tendance marquée à la surestimation ou la sous-estimation. Néanmoins, le nuage de points est relativement dispersé ce qui peut témoigner d'erreurs de prédiction non négligeables.

#### 4.6.4.3. Modèles perceptifs

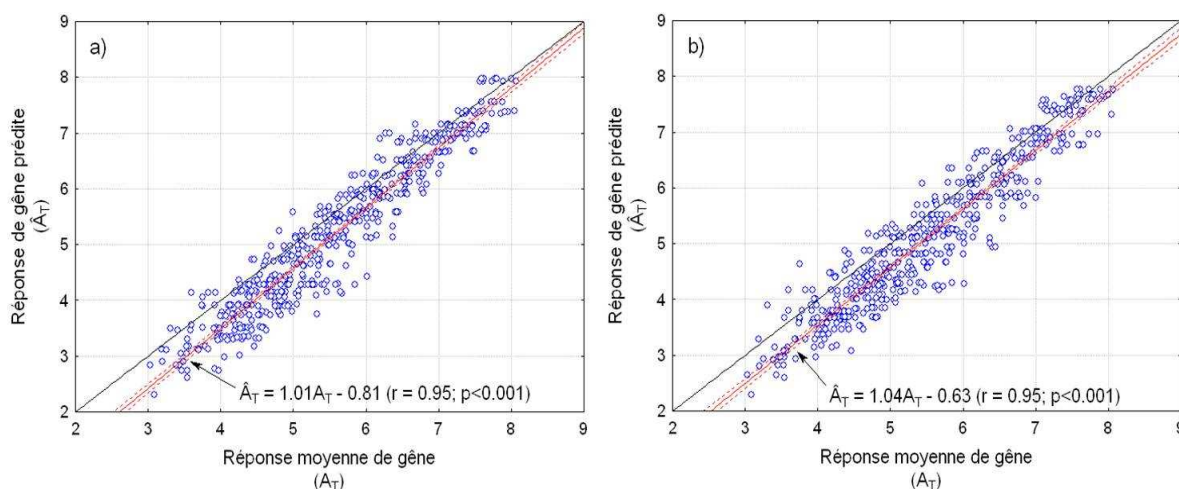
Comme nous l'avons fait pour les modèles psychophysiques, nous dressons dans le Tableau 4.18 un bilan de l'évaluation des modèles perceptifs, à partir des résultats exposés dans les Tableaux E.1 à E.7 de l'ANNEXE E. Etant donné que les modèles perceptifs à variante « prédite » sont quasiment systématiquement moins performants que les modèles perceptifs à variante « observée », nous avons décidé de faire un bilan séparé pour ces deux variantes. Cependant ces différences ne sont pas discriminantes. Le Tableau 4.18 montre ainsi le nombre de fois où chaque modèle perceptif (pour les variantes « prédite » et « observée » séparément) apparaît comme le plus performant, le deuxième plus performant ou le troisième plus performant vis-à-vis de la prédiction de la gêne totale due à la multi-exposition au bruit industriel et aux bruits de passage issus de chaque catégorie.

D'emblée nous observons que le modèle de source dominante n'est jamais le modèle le plus performant quelle que soit la variante envisagée. La Figure 4.10 présente les confrontations des réponses de gêne totale prédites ( $\hat{A}_T$ ) par le modèle de source dominante aux réponses moyennes de gêne totale observées ( $A_T$ ) au cours des 7 tests d'évaluation de la gêne en situation de multi-exposition au bruit industriel et aux bruits de passage des 7 catégories. Nous constatons un ajustement des données par le modèle acceptable. Mais,

nous remarquons que le modèle de source dominante a tendance à sous-estimer la gène totale, ce qui est cohérent avec les phénomènes mis en avant en section 4.5.

Modèle	Variante « observée »			Variante « prédite »		
	1er	2ème	3ème	1er	2ème	3ème
Source dominante	...	...	3 (Cat. 2, 4, 5)	...	...	4 (Cat. 2, 4, 5, 6)
Sommation vectorielle	7 (Cat. 1 à 7)	...	...	3 (Cat. 3, 4, 5)	3 (Cat. 2, 6, 7)	1 (Cat. 1)
Régression linéaire	...	3 (Cat. 2, 4, 5)	4 (Cat. 1, 3, 6, 7)	2 (Cat. 1, 2)	2 (Cat. 4, 5)	2 (Cat.3, 7)
Mixte	...	4 (Cat. 1, 3, 6, 7)	...	2 (Cat. 6, 7)	2 (Cat. 1, 3)	...

**Tableau 4.18 : Bilan de l'évaluation des modèles perceptifs de prédiction de la gène totale.**



**Figure 4.10 : Nuage de points représentant les réponses de gène prédites par le modèle de source dominante ( $\hat{A}_T$ ) en fonction des réponses moyennes de gène observées ( $A_T$ ). a) variante « observée ». b) variante « prédite ».**

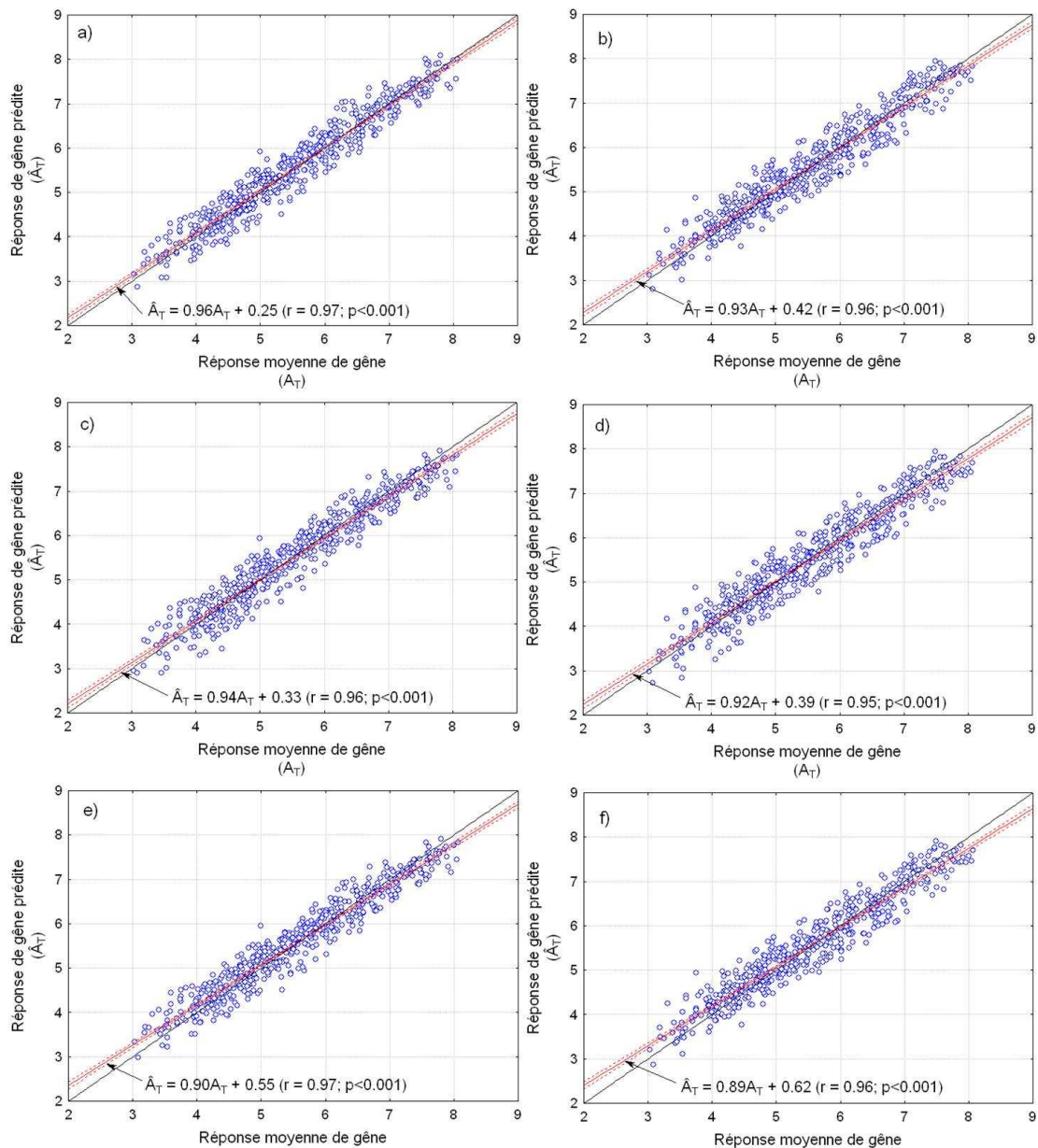
Le bilan de l'évaluation des modèles perceptifs désigne le modèle de sommation vectorielle avec un angle de  $101^\circ$  (cf. Tableau 4.16), comme étant le modèle perceptif le plus performant. Toutefois, comme alternative, on peut tout de même proposer les modèles de régression linéaire et mixte qui proposent un principe de pondération des gènes spécifiques, principe reconnu pour permettre de prendre en compte des synergies potentielles entre bruits combinés (cf. [SW96, PMMR+12]). De la même manière que nous l'avons fait pour le modèle des effets indépendants, les équations (4.4) à (4.7) présentent les équations moyennes respectives pour ces deux modèles et leurs deux variantes.

$$A_T = 0.39(0.18)A_{BI} + 0.79(0.94)A_{BR} + 0.24 \quad (4.4)$$

$$A_T = 0.42(0.19)\hat{A}_{BI} + 0.81(0.94)\hat{A}_{BR} + 0.06 \quad (4.5)$$

$$A_T = 0.55(0.29)A_{BI} + 0.57(0.73)A_{BR} + 0.22(0.22)|A_{BI} - A_{BR}| + 0.43 \quad (4.6)$$

$$A_T = 0.57(0.30)\hat{A}_{BI} + 0.60(0.74)\hat{A}_{BR} + 0.20(0.22)|\hat{A}_{BI} - \hat{A}_{BR}| + 0.22 \quad (4.7)$$



**Figure 4.11 : Nuages de points représentant les réponses de gène prédites ( $\hat{A}_T$ ) en fonction des réponses moyennes de gène observées ( $A_T$ ). a) Modèle de sommation vectorielle, variante « observée ». b) Modèle de sommation vectorielle, variante « prédite ». c) Modèle de régression linéaire, variante « observée ». d) Modèle de régression linéaire, variante « prédite ». e) Modèle mixte, variante « observée ». f) Modèle mixte, variante « prédite ».**

La Figure 4.11 ci-dessus présente les confrontations des réponses de gène totale prédites ( $\hat{A}_T$ ) par les modèles de sommation vectorielle, régression linéaire et mixte, aux réponses moyennes de gène totale observées ( $A_T$ ) au cours des 7 tests d'évaluation de la gène en situation de multi-exposition au bruit industriel et aux bruits de passage issus des 7 catégories. Les réponses de gène prédites sont obtenues en utilisant un angle de  $101^\circ$  pour les deux variantes du modèle de sommation vectorielle, et en utilisant les équations moyennes (4.4) à (4.7) pour les deux variantes des modèles de régression linéaire et mixte respectivement.

De manière générale on voit sur la Figure 4.11 que les différences entre ces trois modèles sont ténues, même si on voit que le modèle de sommation vectorielle avec un angle à  $101^\circ$  permet une meilleure prédiction de la gène totale, les nuages de points étant légèrement moins dispersés autour de la bissectrice du plan que pour les autres modèles.



En comparant la Figure 4.9 et la Figure 4.11, on se rend compte que la qualité de la prédiction offerte par les modèles perceptifs (excepté le modèle de source dominante) est supérieure à celle offerte par le modèle des effets indépendants, qui est, rappelons-le, le modèle psychophysique retenu. En effet on voit pour le modèle des effets indépendants que le nuage de points est plus dispersé autour de la bissectrice que pour les modèles perceptifs, il en résulte donc plus d'erreurs de prédiction.

## 5. Discussion

### 5.1. Sur l'analyse des verbatims

Au cours des 7 tests d'évaluation de la gêne due à la multi-exposition au bruit industriel et aux bruits de passage des 7 catégories, nous avons recueilli des données verbales destinées à (1) apporter du crédit à l'approche par catégorie perceptive et cognitive en ce qui concerne le bruit routier, et (2) obtenir des informations sur la manière dont est perçu le bruit industriel introduit au cours de ces expériences.

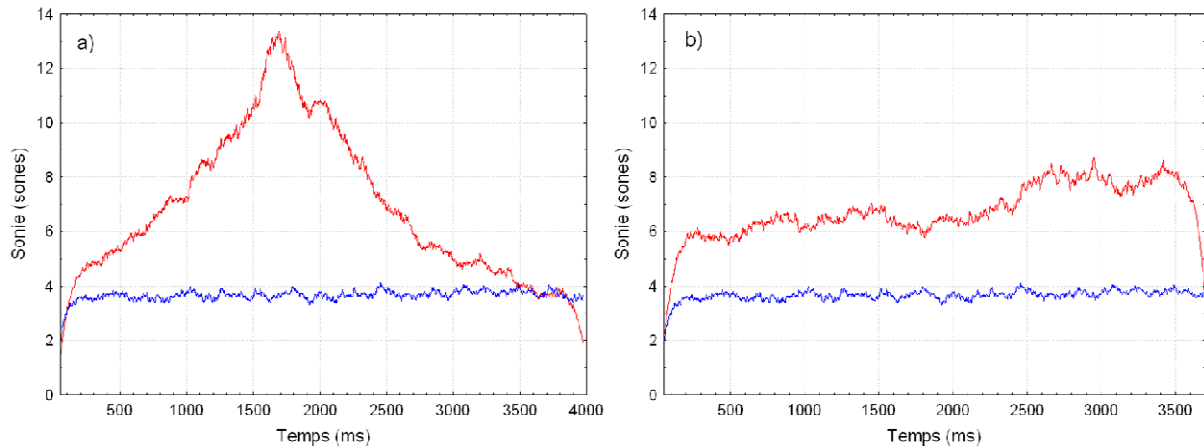
Concernant les bruits de passage de véhicules routiers, il apparaît au travers l'analyse des verbatims, que les sujets ont bien identifié à la fois les véhicules et les allures de bruits de passage de chaque catégorie. Il s'agit d'un résultat attendu, mais qui confirme la cohérence de l'approche par catégorie. Concernant les verbatims liés à la description des bruits de passage, les résultats sont cohérents avec l'analyse linguistique dont on a rendu compte au Chapitre 3. La grande majorité des verbatims est en effet liée aux aspects temporels des bruits de passage ou à leurs aspects spectraux. On a noté une très faible proportion des verbatims en relation avec la durée des bruits de passage, ce qui confirme notre hypothèse : la durée dans le contexte de nos expériences ne peut pas être considérée comme une variable indépendante.

Concernant le bruit industriel, nous avons vu que sur l'ensemble des tests, 40% des occurrences liées à l'identification font référence à deux classes sémantiques « circulation d'air » ou « machine ». Le bruit industriel résultant du site à proximité duquel nous avons effectué nos enregistrements, est composé de plusieurs sources qui appartiennent à trois catégories perceptives de bruits industriels permanents et stables de la typologie proposée par Le Nost [Nos07] : catégorie 2 « grosses souffleries », catégorie 4 « machines tournantes » et catégorie 6 « sources peu caractéristiques » [MV09]. Les résultats de l'analyse des verbatims effectués dans le cadre de ces travaux sont donc cohérents. Concernant la description du bruit industriel, la grande majorité des verbatims sont associés aux aspects temporels et spectraux, comme cela est le cas pour les bruits de passage. Les descriptions relatives aux aspects spectraux sont cohérentes avec les particularités spectrales des catégories perceptives 2 et 4 de la typologie proposée par Le Nost [Nos07], et précédemment mise en évidence par Alayrac [Ala09]. Les verbatims liés aux aspects temporels désignent le bruit industriel comme un bruit de fond amorphe, dans la mesure où celui-ci est perçu comme « constant », « stable ». Il est intéressant de contraster les descriptions des aspects temporels du bruit industriel avec celles des bruits de passage décrits comme « progressifs », « irréguliers ». Si pour les combinaisons étudiées, la multi-exposition est simultanée, il s'agit néanmoins d'une multi-exposition associant deux types de bruits dont les évolutions temporelles sont perçues de manière très différente.

## 5.2. Sur les gênes spécifiques et la gêne totale

L'analyse de la gêne spécifique due au bruit industriel souligne que parmi les indices mis en avant par Alayrac *et al.* [AMVM+10], pour caractériser les bruits des catégories perceptives 2, 4 et 6 de bruits industriels permanents et stables, auxquels nous avons ajouté la sonie de Zwicker, cette dernière est au moins aussi bien, sinon mieux corrélée à la gêne que les autres indices, y compris l'indice  $L_{Aeq,T}$ . De même, l'analyse de la gêne spécifique due aux bruits de passage de véhicules routiers des différentes catégories de la typologie perceptive et cognitive proposée au Chapitre 3 confirme les indices mis en avant précédemment pour les différentes catégories. En considérant de précédents travaux (cf. [Nil07, AMVM+10]), nos résultats appuient le discours de Genuit et Fiebig [GF06] qui plaident pour l'utilisation de la psychoacoustique pour contribuer à la compréhension de la gêne causée par les bruits de l'environnement.

Les analyses de variance pratiquées sur les réponses de gêne totale ont révélé une influence limitée mais significative du facteur « Niveau de bruit industriel » par rapport au facteur « Niveau de bruit routier », ce qui était attendu, étant donné les dynamiques de niveaux sonores utilisées pour la construction des stimuli. De ce fait on s'attendait alors à observer un effet de source dominante prononcé. Or l'analyse conjointe des gênes spécifiques et de la gêne totale, au moyen d'une adaptation de la représentation de Vos [Vos92], nous a révélé que l'effet de source dominante (c'est-à-dire que la gêne totale est très proche ou égale à la gêne spécifique maximale) coexiste avec un phénomène de synergie entre les bruits combinés (c'est-à-dire que la gêne totale est supérieure à la gêne spécifique maximale) et ce dans des proportions différentes suivant la catégorie de bruits de passage à laquelle est combiné le bruit industriel. De précédents travaux ont montré qu'une telle synergie est observée lorsque les gênes spécifiques des bruits combinés sont proches (cf. [Vos92]). De manière logique, c'est même ce à quoi on s'attend (cf. [Mie04]). Toutefois, généralement, lorsque les gênes spécifiques sont très différentes, on s'attend à ce que la gêne totale se rapproche de la gêne spécifique maximale [Mie04], et cela a déjà été corroboré par des résultats expérimentaux (par exemple [Vos92, AMV11, MMVA12]). Dans notre cas, la gêne totale est apparue, pour différentes combinaisons, supérieure à la gêne spécifique maximale, même lorsque les gênes spécifiques sont très différentes. Nous pouvons expliquer cela notamment par les caractéristiques temporelles des bruits combinés, dont nous avons vu, par l'analyse des verbatims, qu'il s'agit de caractéristiques saillantes pour le bruit industriel ainsi que pour les bruits de passage des différentes catégories. Nous avons tracé sur les deux panneaux de la Figure 4.12 l'évolution temporelle de la sonie (1) du bruit industriel et d'un bruit de passage de la catégorie 1 (deux-roues à allure stabilisée) sur le panneau a) et (2) du bruit industriel et d'un bruit de passage de la catégorie 4 (deux-roues à allure décélérée) sur le panneau b). Sur ces deux panneaux le bruit industriel et les deux bruits de passage sont à des  $L_{Aeq,T}$  respectivement égaux à 46dB(A) et 56dB(A).



**Figure 4.12 : Evolution de la sonie en fonction du temps d'un bruit de passage (en rouge, pour un  $L_{Aeq,T} = 56\text{dB(A)}$ ) et du bruit industriel (en bleu, pour un  $L_{Aeq,T} = 46\text{dB(A)}$ ). a) bruit de passage dfo\_4 (catégorie 1). b) bruit de passage ddu\_1 (catégorie 4).**

On voit clairement que, bien que les bruits de passage des différentes catégories soient au même  $L_{Aeq,T}$ , le bruit industriel peut potentiellement être plus audible lorsqu'il est mélangé au bruit de la catégorie 1 plutôt qu'à celui de la catégorie 4. Or nous avons montré que lorsque les bruits de passage de la catégorie 1 sont combinés au bruit industriel, nous avons une synergie prononcée entre les bruits combinés, tandis que lorsque les bruits de passage de la catégorie 4 sont combinés au bruit industriel, nous avons un effet prononcé de source dominante. Pour compléter cela, il convient de citer des verbalisations tirées du questionnaire en face-à-face avec les sujets, pour la combinaison du bruit industriel avec les bruits de passage de la catégorie 1 : « *le bruit de la circulation s'arrête, ouf, la moto passe, mais non, il y a encore le bruit industriel* » ou encore « *on a l'impression de ne plus entendre le bruit industriel quand le véhicule passe. Le bruit industriel augmente la gêne car il est tout le temps présent, même après le passage d'un véhicule alors qu'on s'attend à un retour au calme* ». Ainsi, le passage du véhicule semble toléré par les sujets puisque ceux-ci savent que l'évènement sonore (le passage du véhicule) aura une fin. C'est précisément la présence du bruit industriel, même lorsque l'évènement sonore arrive à sa fin, qui augmente la gêne totale due à l'ensemble. On voit alors clairement que cela est dépendant de l'évolution temporelle des bruits de passage auxquels est combiné le bruit industriel.

### 5.3. Sur les modèles de gêne totale

Nous avons au total testé 9 modèles (5 modèles psychophysiques et 4 modèles perceptifs) de gêne totale, et 2 variantes pour chaque modèle (excepté le modèle psychophysique de sommation pondérée de Vos).

Pour les modèles psychophysiques les deux variantes utilisent des variables indépendantes (1) issues de niveaux de pressions sonores équivalents, comme cela se fait classiquement que ce soit pour des études en laboratoire ou *in situ* (par exemple [Tay82], [KKKN99, Vos92, MMVA12]) ou (2) issues de sonie de Zwicker, ce qui jusqu'à lors a été peu réalisé [Gil10]. Pour les modèles perceptifs, les deux variantes utilisent des variables indépendantes (1) issues des réponses de gêne moyennes observées comme cela se fait classiquement que ce soit pour des études en laboratoire ou *in situ* (par exemple [BBGL81], [BN01a, BV02, PMMR+12]) ou (2) issues de réponses de gêne spécifique prédite par les indicateurs proposés.

Parmi les modèles psychophysiques, la variante « sonie » est généralement plus performante que la variante « niveau sonore », ce qui rejoint l'intérêt porté à la psychoacoustique pour la caractérisation de l'impact dû aux bruits de l'environnement déjà

évoqué plus haut. Parmi les modèles perceptifs, la variante « observée » est de manière logique plus performante que la variante « prédite ». En effet, en utilisant les gènes spécifiques prédites, on cumule à la fois l'erreur de la prédiction des gènes spécifiques proprement dites, en addition à l'erreur de prédiction du modèle de gêne totale. En retour, la variante prédite des modèles perceptifs est de manière générale plus performante que les modèles psychophysiques (sans distinction de variante). Nous pouvons d'ailleurs mesurer l'apport de notre proposition d'indicateurs caractéristiques de la gêne, déterminés par catégories de bruit de passage, en comparant la variante « sonie » du modèle des effets indépendants et la variante « prédite » du modèle de régression linéaire. Le fait de prédire les réponses de gènes spécifiques à partir d'indicateurs adaptés à chaque catégorie nous permet d'obtenir moins d'erreurs de prédiction qu'en utilisant une sonie simple, comme cela peut-être remarqué en comparant la Figure 4.9 et la Figure 4.11.d. Ce constat mené à l'observation de ces figures est conforté par l'examen des Tableaux E.1 à E.7 de l'ANNEXE E. En effet, en considérant la multi-exposition entre les bruits de passage de la catégorie 1 et le bruit industriel (Tableau E.1), on voit que les performances de la variante « sonie » du modèle des effets indépendants et de la variante « prédite » du modèle de régression linéaire sont équivalentes. Pour cette catégorie, la gêne due aux bruit de passage est prédite par la sonie seule, donc la variante « sonie » du modèle des effets indépendants se ramène alors à la variante « prédite » du modèle de régression linéaire. Par contre, en prenant l'exemple de la multi-exposition entre les bruits de passage de la catégorie 2 et le bruit industriel (Tableau E.2), on voit que la variante « prédite » du modèle de régression linéaire a des performances supérieures à la variante « sonie » du modèle des effets indépendants. La gêne due aux bruit de passage de la catégorie 2 est prédite par une combinaison des indices  $N_{15-18}$  et F (cf. Tableau 3.9). La variante « prédite » du modèle de régression linéaire est donc de meilleure qualité prédictive par rapport à la variante « sonie » du modèle des effets indépendants. Les autres multi-expositions représentent des cas intermédiaires à ces deux situations considérées à titre d'exemple.

De manière générale, les modèles perceptifs (et notamment leur variante « observée »), sont plus performants, en termes de prédiction de la gêne totale, que les modèles psychophysiques. Ceci est cohérent avec des résultats provenant de précédents travaux (par exemple [NYNS09, NYNH+10, PMMR+12]). Cependant à ce stade nous pouvons prédire les gènes spécifiques uniquement en considérant les facteurs acoustiques influents. Il serait intéressant de considérer des facteurs non-acoustiques pertinents et d'apprécier l'amélioration potentielle de la qualité prédictive des modèles, mais cela dépasse le cadre de ces expérimentations.

Nous avons par ailleurs établi de nouveaux éléments nous permettant de critiquer l'emploi du modèle de source dominante. En effet, nous avons montré que ce dernier a tendance à sous-estimer la gêne totale parce qu'il échoue de par sa simplicité à prendre en compte les synergies entre bruit combinés, même lorsque les gènes spécifiques sont très différentes. Ceci additionné aux critiques de Morel *et al.* [MMVA12] sur son incapacité à prendre en compte les phénomènes d'inhibition entre bruits combinés et aux critiques émises précédemment sur le fait que ce modèle est incapable de prendre en compte les synergies entre bruits combinés lorsque les gènes spécifiques sont proches (par exemple [Mie04, SW97]). Il est donc préférable d'utiliser une sommation pondérée des gènes spécifiques, comme le propose le modèle de régression linéaire ou le modèle mixte. En outre de manière surprenante, nous avons établi que le modèle de sommation vectorielle avec un angle pris égal à  $101^\circ$  permettait une prédiction optimale et ne souffrait plus d'une tendance à la surestimation comme l'avaient suggéré auparavant Botteldooren et Verkeyn [BV02], Berglund *et al.* [BBGL81], et Morel *et al.* [MMVA12]. Toutefois dans les travaux de ces auteurs, l'angle était pris égal à  $90^\circ$ . D'autres travaux de Berglund et Nilsson [BN98a] ont

trouvé que des angles compris entre 102° et 105° pe rmettaient une prédiction optimale dans le cas de combinaisons de différents bruits de transports (bruits d'autoroute combinés à des bruits d'avion puis à des bruits de train). La valeur de cet angle est plus conforme à celui trouvé dans nos travaux, et selon Berglund et Nilsson [BN98a], cette valeur varie de manière marginale avec les bruits combinés. Il serait intéressant de calculer la valeur optimale de cet angle pour d'autres combinaisons de bruits avec d'autres dynamiques de niveaux sonores afin de voir s'il existe une possibilité de généralisation.

## 6. Synthèse

Dans la logique de notre démarche générale énoncée à l'issue du Chapitre 1 et la logique des résultats exposés au Chapitre 3 , cette nouvelle étape a eu pour objectif la caractérisation physique et perceptive des situations de multi-exposition au bruit industriel et aux bruits de passage de véhicules routiers des différentes catégories perceptives et cognitives. Le bruit industriel utilisé a été enregistré au sein de la zone résidentielle qui a fait l'objet d'une enquête *in situ* (résumée dans l'ANNEXE A). L'objectif est de pouvoir par la suite confronter les résultats de cette enquête *in situ* avec nos résultats obtenus en laboratoire.

Dans cette optique, 7 tests d'évaluation de la gêne en situation de multi-exposition au bruit industriel et aux bruits de passage issus des 7 catégories de la typologie perceptive et cognitive proposée au Chapitre 3 ont été mis en place. Le protocole utilisé est adapté de celui utilisé pour la définition d'indicateurs de la gêne due aux 7 catégories de bruits de passage en situation de mono-exposition (cf. Chapitre 3 ), et s'inspire de préconisations de chercheurs du domaine [BN97]. Le protocole permet ainsi d'évaluer pour chacune des 7 combinaisons (de bruit industriel et de bruits de passage issus des 7 catégories) séparément, la gêne spécifique (en mono-exposition) du bruit industriel, la gêne spécifique due aux bruits de passage de la catégorie considérée, et la gêne totale due au bruit industriel combiné aux différents bruits de passage de la catégorie considérée. Nous avons également inclus dans le protocole un face-à-face entre l'expérimentateur et les sujets à l'issue du test. Ces face-à-face sont destinés à obtenir des informations complémentaires sur la manière dont sont perçus les bruits de passage et le bruit industriel.

L'analyse des verbatims issus des face-à-face est cohérente avec les résultats de l'analyse linguistique résumés au Chapitre 3 en ce qui concerne les catégories de bruits de passage. En effet, l'identification des sources est portée par l'identification du type de véhicules et du type d'allures majoritairement. Enfin les verbatims reliés à la description des bruits de passage concernent également majoritairement les aspects spectraux et temporels déjà mis en avant au Chapitre 3 . Concernant le bruit industriel, l'identification est cohérente avec la provenance du bruit industriel et notamment l'appartenance des sources qui le composent aux différentes catégories de bruits industriels permanents et stables définies par Le Nost [Nos07]. Nous avons alors établi que les sujets associent le bruit industriel à une « circulation d'air » ou à une « machine ». De même nous avons vu que les sujets considèrent également le bruit industriel comme un bruit de fond amorphe. Cela est notamment dû à la perception de la constance et de la non-variabilité du bruit industriel dans le temps, par rapport à la fluctuation du bruit routier.

L'analyse des gênes spécifiques nous a permis de conforter la proposition de nos indicateurs de gêne au Chapitre 3 , concernant les bruits de passage des différentes catégories. Pour le bruit industriel, c'est la sonie de Zwicker qui a été désignée comme

indicateur de gêne dans le contexte de nos travaux, ce qui conforte une fois de plus l'apport de l'approche psychoacoustique pour la caractérisation de l'impact des bruits de l'environnement.

L'analyse conjointe des réponses de gêne totale et des gênes spécifiques, en adaptant la représentation de Vos [Vos92], nous a montré la coexistence de deux phénomènes. Le premier phénomène de source dominante est classiquement observé et veut que la gêne totale soit très proche de la gêne spécifique maximale. Le deuxième phénomène de synergie entre les bruits combinés veut que la gêne totale soit supérieure à la gêne spécifique maximale. Dans la littérature, une synergie entre bruits combinés est observée lorsque les gênes spécifiques sont proches, mais dans notre cas, cela peut être observé même lorsque les gênes spécifiques sont très différentes. Nous avons également montré que lorsque le bruit industriel est combiné aux bruits de passage des catégories 1, 3, 6 et 7, le phénomène de synergie est majoritaire. Par contre lorsque le bruit industriel est combiné aux bruits de passage des catégories 2, 4 et 5, le phénomène de source dominante est majoritaire. Nous avons interprété ces résultats en examinant les évolutions temporelles des bruits combinés et les reliant à des verbatims. Il apparaît alors que les sujets tolèrent un passage de véhicule mais le fait de s'attendre à un retour au calme après le passage, alors que le bruit industriel est permanent et stable, augmente la gêne totale.

Nous avons ensuite testé un ensemble de modèles psychophysiques et perceptifs vis-à-vis de la prédiction de la gêne totale, selon deux variantes différentes (excepté le modèle de sommation pondérée de Vos [Vos92]). Nous avons établi que de manière générale, les modèles perceptifs prédisent mieux la gêne totale que les modèles psychophysiques. Parmi ces derniers c'est le modèle des effets indépendants en utilisant comme variables indépendantes les sonies des bruits combinés qui s'est avéré le plus performant. Parmi les modèles perceptifs, le modèle de source dominante a montré une tendance généralisée à la sous-estimation, notamment par le fait qu'il ne peut prendre en compte la synergie entre bruits combinés. Le modèle de sommation vectorielle avec un angle alpha optimal égal à  $101^\circ$  apporte la meilleure qualité de prédiction. Toutefois, l'amélioration par rapport au modèle de régression linéaire et au modèle mixte est apparue non-discriminante. Nous avons également pu mesurer l'apport des indicateurs proposés pour la prédiction de la gêne totale en construisant les variables indépendantes des modèles perceptifs à partir des indicateurs de gêne proposés. Nous avons vu que l'erreur de prédiction est moins importante que pour les modèles psychophysiques en général.

Afin de pouvoir confronter nos résultats aux données de l'enquête *in situ* décrite en ANNEXE A, il conviendra de mettre en place une nouvelle expérimentation en environnement simulé qui nous permettra d'étudier la gêne en situation de multi-exposition au bruit industriel et au bruit routier. Les séquences utilisées seront de plus longue durée et concernant le bruit routier elles mélangeront toutes les catégories perceptives et cognitives mises en évidence au Chapitre 3 .



# Chapitre 5 : Gêne en situation de multi-exposition au bruit de la circulation routière et au bruit industriel : expérience en environnement simulé

*A partir des résultats obtenus dans les précédents chapitres, une nouvelle expérimentation d'évaluation de la gêne en situation de multi-exposition au bruit industriel et au bruit de la circulation routière, en laboratoire avec mise en contexte en environnement simulé (désigné par « environnement simulé » pour la distinguer des expérimentations dites « en laboratoire » décrites au Chapitre 4 , selon la terminologie adoptée au Chapitre 1 , section 3.3.2.1), est mise en place.*

*La section 1 rappelle les objectifs de cette nouvelle étape, et notamment la confrontation des résultats obtenus en laboratoire et en environnement simulé, avec les données de l'enquête in situ.*

*La section 2 décrit la procédure expérimentale employée, qui est très différente des procédures mises en œuvre au cours des chapitres 3 et 4. Notamment, les sujets ne sont pas placés dans l'écoute, puisqu'ils sont installés dans un salon aménagé et peuvent effectuer un panel d'activités différentes. De plus, les séquences sonores de longue durée, construites pour l'expérimentation, sont diffusées de l'extérieur vers l'intérieur du salon aménagé.*

*La section 3 décrit brièvement les traitements et analyses statistiques menés sur les données recueillies au cours de cette expérimentation.*

*La section 4 expose les résultats, en commençant par l'étude de l'influence des facteurs acoustiques, puis l'étude de l'influence des facteurs non-acoustiques, sur les réponses recueillies. L'évolution conjointe des gênes partielles et de la gêne totale est examinée à l'aide de la représentation de Vos [Vos92]. Puis l'évaluation et la comparaison des modèles de gêne totale sont données.*

*La section 5 présente la confrontation entre (1) les équations moyennes des modèles de gêne totale proposées en laboratoire (Chapitre 4 ) et les données recueillies en environnement simulé d'une part et in situ d'autre part, et (2) les équations des modèles de gêne totale proposées en environnement simulé et les données de l'enquête in situ. Il en ressort notamment la supériorité des modèles perceptifs sur les modèles psychophysiques.*

*La section 6 propose une discussion des résultats qui sont ensuite synthétisés en section 7.*



# 1. Objectifs

Notre démarche prévoit, dans une troisième et dernière étape, la mise en place d'un test d'évaluation de la gêne en situation de multi-exposition au bruit de la circulation routière et au bruit industriel en environnement simulé. Cette nouvelle expérimentation, dans un contexte moins abstrait que les précédentes (cf. chapitres 3 et 4), nous permettra *in fine*, en nous focalisant sur les modèles de gêne totale, de réaliser les confrontations suivantes :

- Les équations moyennes proposées à l'issue des expériences en laboratoire (cf. Chapitre 4 ) seront confrontées aux données de cette expérimentation en environnement simulé d'une part, puis aux données de l'enquête *in situ* (rendues publiques dans [EEO10]) d'autre part ;
- Les équations qui seront proposées dans ce chapitre à l'issue de l'expérimentation en environnement simulé, seront également confrontées aux données de l'enquête *in situ*.

Outre les confrontations, l'intérêt d'une telle expérimentation est qu'elle nous permettra entre autres d'accéder à certains facteurs non-acoustiques (cf. [KMM99a, KMM99b, CBML+05, CBBN+07]) dont on pourra évaluer l'influence sur les réponses de gêne recueillies.

D'un point de vue méthodologique, il s'agira de se rapprocher au mieux des conditions de l'enquête *in situ* (en termes de niveaux d'exposition, de composition du trafic pour la constitution des séquences sonores, des données récoltées pour l'étude des différents facteurs, etc.), tout en conservant l'apport de notre démarche par catégorie.

## 2. Méthode expérimentale

Dans cette section, nous présentons une méthode expérimentale différente de celles présentées auparavant (cf. chapitres 3 et 4). En effet, l'expérience a lieu dans une villa du campus de l'ENTPE dont une des pièces a été aménagée en salon typique. De plus, des séquences sonores de longue durée sont construites à partir des différents bruits précédemment étudiés. De manière générale, la méthode expérimentale est pensée de manière à s'approcher au mieux des conditions de l'enquête *in situ* (cf. ANNEXE A).

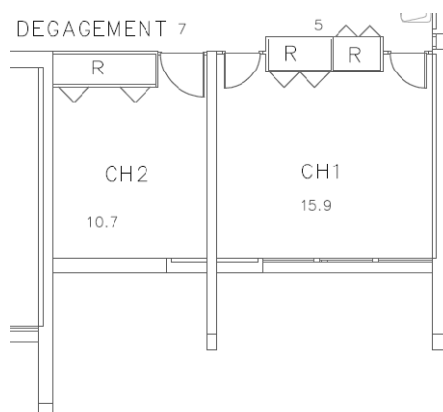
### 2.1. Environnement simulé : présentation de la villa

La villa, de plain-pied, se situe sur le campus de l'ENTPE. Il s'agit anciennement d'un lieu d'habitation, construit au début des années 70, dont certaines pièces ont été depuis reconverties en salles informatiques dédiées à la formation. Le côté nord de la villa (cf. Figure 5.1) donne sur d'autres villas situées sur le campus de l'ENTPE. Le côté sud de la villa (cf. Figure 5.1) donne sur un jardin d'environ 10m de profondeur. Derrière la clôture du jardin se trouve une allée piétonne, puis ensuite une place qui est investie par un marché certains jours de la semaine. Enfin après la place, à environ 200m de la villa, se trouve une route desservant les quartiers alentours. De manière générale, l'environnement sonore est assez calme aux alentours de la villa, mais dans certaines périodes de la journée et de la semaine, il peut y avoir plus d'animation, et cela peut résulter en un bruit de fond plus élevé.



**Figure 5.1 : Vue aérienne de la villa (encadrée en rouge).**

Pour les besoins de notre expérience, deux pièces de cette villa sont mises à notre disposition. Il s'agit des pièces CH2 et CH1 de respectivement 11m<sup>2</sup> et 16m<sup>2</sup> (cf. Figure 5.2). Ces deux pièces adjacentes auxquelles on peut accéder par un dégagement donnant sur le jardin situé côté sud de la villa (cf. Figure 5.1).



**Figure 5.2 : Plan des pièces de la villa mises à disposition pour l'expérience.**

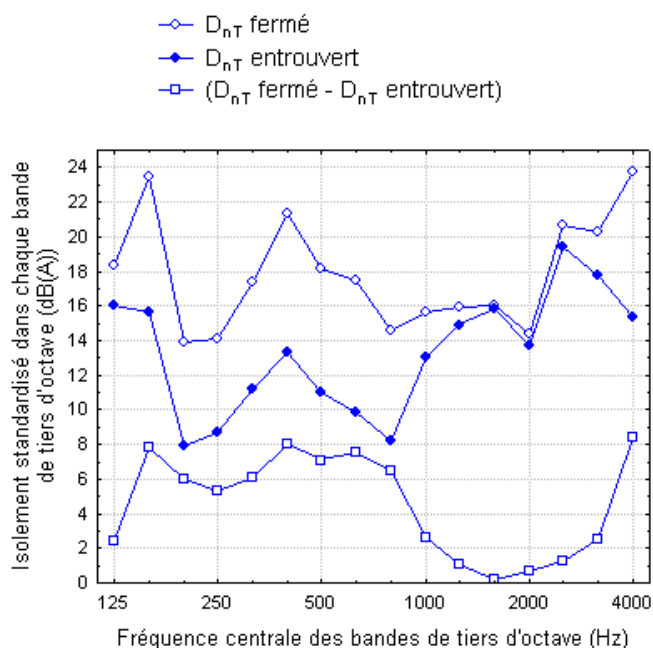
La pièce la plus grande (CH1) est destinée à accueillir les sujets. A cet effet, elle est aménagée par nos soins en salon typique. Nous avons placé au centre de la pièce un tapis et une table basse. Autour de cet élément central figurent un canapé trois places, face à la fenêtre, et deux fauteuils en vis-à-vis, de part et d'autre du canapé. Nous avons également rajouté une petite étagère, le long de la paroi séparant les pièces CH1 et CH2, sur laquelle nous avons disposé une plante verte et une lampe d'appoint. Dans cette étagère, nous avons placé des jeux de société, et des magazines. Nous avons ajouté un luminaire à côté du canapé à proximité du mur faisant face à la paroi séparative. La Figure 5.3 présente l'aménagement du salon.



**Figure 5.3 : Aménagement du salon (pièce CH1).**

La pièce CH2 est destinée à accueillir l'expérimentateur et son équipement (ordinateur, etc.) pour le contrôle du déroulement de l'expérience (lancement des séquences sonores, etc.). Les façades de chaque pièce sont pourvues d'une fenêtre coulissante (simple vitrage) occupant une grande partie de leur longueur.

Des étudiants de l'ENTPE en 3<sup>e</sup> année (cours d'Acoustique du Bâtiment) ont effectué des mesures du temps de réverbération ( $T_r$ ) de la pièce CH1 et de l'isolement standardisé vis-à-vis de bruits extérieurs ( $D_{nT}$ ) de cette même pièce [EKR10]. Le  $T_r$  moyen mesuré est de 0.7s. La Figure 5.4 présente l'isolement standardisé mesuré dans les cas où la fenêtre du salon est (1) fermée, puis (2) entrouverte (15cm d'ouverture). Les écarts entre ces deux mesures sont également présentés. L'isolement standardisé moyen « fenêtre fermée » est de 18dB, tandis que l'isolement standardisé moyen « fenêtre entrouverte » est de 13dB.



**Figure 5.4 : Isolement standardisé mesuré lorsque la fenêtre du salon est fermée ( $D_{nT}$  fermé) et entrouverte ( $D_{nT}$  entrouvert) [EKR10].**

La Figure 5.4 nous donne une appréciation du filtrage qui est occasionné par la façade pour la transmission de bruits extérieurs vers l'intérieur du salon. Ce filtrage est plus important, pour les deux cas « fenêtre fermée » et « fenêtre entrouverte », dans plusieurs zones du spectre : entre les bandes de tiers d'octave centrées sur 125 et 160Hz, entre les

bandes de tiers d'octave centrées sur 315 et 630Hz, et entre les bandes de tiers d'octave centrées sur 2500 et 4000Hz. Nous voyons également que l'écart entre les deux cas est quasi constant, (1) égal à 7dB entre les bandes de tiers d'octave centrées sur 160 et 800Hz, puis (2) égal environ à 1dB entre les bandes de tiers d'octave centrées sur 1000 et 3150Hz.

Le bruit de fond mesuré dans le salon aménagé avec fenêtre entrouverte atteint un niveau de 36 dB(A) (mesure effectuée en fin d'après-midi, un jour de semaine).

## **2.2. Stimuli : constitution des séquences sonores de longue durée**

### **2.2.1. Durée des séquences**

Pour un test d'évaluation de la gêne en environnement simulé, les séquences sonores doivent être suffisamment longues pour permettre aux sujets d'effectuer différentes activités sans se focaliser sur le bruit diffusé, au contraire d'un test d'évaluation de la gêne en laboratoire où le sujet est placé dans l'écoute.

Dans la littérature, il n'y a généralement pas de préconisation pour la durée des séquences, et la durée choisie est alors le résultat d'un compromis entre le nombre de séquences et la durée globale de l'expérimentation. Des durées de 5 minutes constituent un minimum (par exemple [Fli82, OYT08]) et des durées de 30 minutes sont un maximum (cf. [KMM99a, KMM99b]). D'autres chercheurs ont employé des durées intermédiaires : 10 minutes [CBBN+07] ou 15 minutes [Pow79a, Pow79b].

Dans le cas présent, nous avons adopté une **durée de 7mn30s** pour les séquences sonores.

### **2.2.2. Construction des séquences sonores**

#### **2.2.2.1. Concernant le bruit industriel**

Etant donné que nous souhaitons nous rapprocher au mieux des conditions de l'enquête *in situ* (cf. ANNEXE A, d'après [MV09]), nous utilisons pour cette nouvelle expérimentation le bruit industriel enregistré au cœur de la zone enquêtée (cf. Chapitre 2 ). Etant donné que ce bruit est permanent et stable (cf. Chapitre 2 et [MV09]), il nous suffit juste de créer un fichier au format wav dans lequel le bruit industriel de 7s, utilisé au cours du Chapitre 4 , est dupliqué jusqu'à atteindre la durée de 7mn30s adoptée ici (cf. section 2.2.1), et ce à l'aide du logiciel SoundForge®Sony.

#### **2.2.2.2. Concernant le bruit de la circulation routière**

##### *a. Restriction aux bruits de passage pour les rues en tissu ouvert*

De même que pour le bruit industriel, et en accord avec notre objectif, il apparaît nécessaire de construire les séquences de circulation routière à partir de bruits de passage qui auraient pu être entendus au cœur de la zone enquêtée. A ce titre, rappelons que la zone enquêtée est essentiellement constituée de logements pavillonnaires (cf. ANNEXE A), et donc les rues sont en tissu ouvert. Dès lors, nous utiliserons, parmi les bruits de passage des 7 catégories perceptives et cognitives, uniquement des bruits de passage correspondant à des rues en tissu ouvert.

##### *b. Introduction d'une dynamique de niveaux sonores entre bruits de passage*

En un point de réception donné, les niveaux de bruit mesurés pour différents véhicules à différentes allures ne sont généralement pas les mêmes. Il s'agit d'introduire, entre les différents bruits de passage de véhicules de la séquence, une certaine dynamique de

niveaux qui permet de représenter de manière adéquate ces différences de niveaux de bruit mesurés.

Nous proposons pour cela de calculer une telle dynamique par rapport aux niveaux de bruit mesurés pour les véhicules légers à allure stabilisée. En effet, il s'agit des véhicules les plus répandus et les niveaux de bruit émis sont parmi les plus stables (cf. Chapitre 1 ). Nous considérons les niveaux de bruit émis par les véhicules légers comme référence pour calculer un écart «  $\Delta_{vfo}$  » entre niveaux de bruit moyens mesurés des véhicules légers à allure stabilisée et les niveaux de bruit moyens mesurés pour les autres types de véhicules et les autres types d'allures. La démarche adoptée pour le calcul de l'écart  $\Delta_{vfo}$  est la suivante :

- Pour chaque point d'enregistrement, et chaque voie d'enregistrement du système ORTF (cf. Chapitre 2 ), il s'agit de calculer un écart  $\Delta_{vfo}$  entre les niveaux de bruit moyens mesurés pour les véhicules légers à allure stabilisée et les niveaux de bruit moyens mesurés pour tous les autres types de véhicules aux autres allures ;
- Pour chaque voie d'enregistrement, il s'agit ensuite de moyenner les écarts  $\Delta_{vfo}$  obtenus au cours de l'étape précédente sur l'ensemble des points d'enregistrement ;
- Enfin, on moyenne les écarts  $\Delta_{vfo}$  de l'étape précédente sur les deux voies d'enregistrement, et on obtient des écarts globaux à introduire entre les types de véhicules aux différentes allures par rapport aux véhicules légers à allure stabilisée.

Les écarts  $\Delta_{vfo}$  ainsi obtenus (cf. Tableau 5.1) sont représentatifs des enregistrements effectués sur le terrain, et doivent permettre une construction de séquences sonores les plus proches possibles de situations rencontrées *in situ*.

	bao	bdo	bfo	dao	ddo	dfo	pao	pdo	pfo	vao	vdo
$\Delta_{vfo}$ (dB(A))	9.1	4.2	7.5	7.2	4.0	5.3	9.1	4.2	7.3	-2.4	-4.5

**Tableau 5.1 : Ecarts globaux ( $\Delta_{vfo}$ ) entre niveaux de bruits moyens mesurés pour les véhicules légers à allure stabilisée et les niveaux de bruit moyens mesurés des autres types de véhicules aux autres allures, en vue de la construction des séquences sonores de circulation routière.**

Ainsi, pour construire nos séquences sonores de circulation routière, nous devons au préalable égaliser les bruits de passage de bus en accélération à 9.1dB(A) plus fort que les bruits de passage de véhicules légers, les bruits de passage de véhicules légers en accélération à 2.4dB(A) moins forts que les bruits de passage de véhicules légers à allure stabilisée, etc.

### c. Composition du trafic routier

Dans le même souci de vraisemblance des séquences sonores construites, il convient de respecter les proportions des différents types de véhicules tel que cela a pu être constaté lors de l'enquête *in situ*.

Les comptages automatiques réalisés, dont on a rendu compte dans l'ANNEXE A (Tableau A.1), révèlent que sur les deux infrastructures bordant la zone enquêtée, le trafic est composé à 97% de véhicules légers et à 3% de poids lourds en moyenne, sur l'ensemble de la période de comptage.

Notons que ces proportions prennent en compte les périodes de nuit où le trafic de poids lourds est quasiment nul. Il conviendra alors d'augmenter légèrement la proportion de poids lourds, tout en conservant cet ordre de grandeur, pour l'expérimentation en environnement simulé menée en journée.

De même, les comptages réalisés prennent en compte uniquement les véhicules légers et les poids lourds, sans distinguer les autres types de véhicules (deux-roues et bus). Comme le préconise le nouveau Guide du Bruit [SETRA09a], nous considérerons que la proportion de véhicules légers comprend également les deux-roues. De même nous considérerons que la proportion de poids lourds comprend également les bus.

#### d. Dans la pratique

D'un point de vue pratique, les bruits de passage en tissu ouvert dont nous disposons illustrent le mouvement d'un véhicule de la gauche vers la droite, ou de la droite vers la gauche. A l'aide du logiciel SoundForge<sup>®</sup>Sony, nous avons dupliqué chacun de ces bruits de passage en intervertissant les voies droite et gauche afin de disposer d'autant de véhicules dans les deux sens de circulation.

Pour construire la séquence, nous créons un fichier au format wav à l'aide du logiciel SoundForge<sup>®</sup>Sony, dans lequel nous mixons les différents bruits de passage (égalisés de manière à introduire les écarts  $\Delta_{vto}$ ) afin de créer de manière alternative des passages de véhicules à allure stabilisée et des arrêts et redémarrages de véhicules, tels qu'on pourrait les trouver à un feu de signalisation.

### 2.2.2.3. Dynamique de niveaux sonores des séquences

Pour l'étude en environnement simulé de la gêne en situation de multi-exposition au bruit de la circulation routière et au bruit industriel, nous adaptons le principe préconisé par Berglund et Nilsson [BN97]. Cependant nous devons limiter le nombre de combinaisons, puisqu'étudier toutes les combinaisons possibles de 5 séquences de bruit de la circulation routière et de 5 séquences de bruit industriel (à 5 niveaux différents d'exposition chacune) conduirait à proposer aux sujets 25 séquences de 7mn30s, soit une exposition totale de plus de 3h, sans compter les temps de réponses aux questions, etc. Il nous paraissait peu probable d'arriver à recruter des sujets pour une expérimentation aussi longue. Nous avons alors décidé de limiter à 4 les niveaux sonores des séquences, ce qui nous donne un total de 16 séquences de 7mn30s, soit une exposition totale de 2h.

En ce qui concerne le bruit industriel, par souci de cohérence avec les expérimentations du Chapitre 4 et la dynamique des niveaux sonores observée *in situ* (cf. ANNEXE A), nous considérons des niveaux sonores compris entre 38 et 44dB(A) par pas de 2dB(A).

En ce qui concerne le bruit de la circulation routière, pour les mêmes raisons que celles évoquées pour le bruit industriel, nous considérons des niveaux sonores compris entre 44 et 53dB(A). Notons que nous n'avons pas étudié au Chapitre 4 le niveau de 44dB(A).

Au final, pour cette expérimentation, nous étudions 16 séquences sonores (4 « Niveaux de bruit routier » x 4 « Niveaux de bruit industriel »). Remarquons qu'au contraire des expérimentations du Chapitre 4 (en laboratoire) nous n'étudions pas les séquences sonores en mono-exposition. En effet, nous souhaitons nous rapprocher au maximum des conditions d'exposition des personnes enquêtées, et le bruit industriel étant permanent et stable, il est impossible qu'*in situ* le bruit de la circulation routière soit entendu en mono-exposition.

D'un point de vue pratique, les séquences sont construites en 3 étapes : (1) égalisation<sup>69</sup> de la séquence de bruit industriel aux niveaux sonores souhaités, (2) égalisation de la séquence de bruit de la circulation routière aux niveaux sonores souhaités,

---

<sup>69</sup> L'égalisation des séquences de bruit industriel, et de bruit de la circulation routière se fait dans les conditions de reproduction sonore propres à cette expérimentation (cf. section **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

(3) mixage des séquences égalisées de bruit industriel et de bruit de la circulation routières pour créer les combinaisons souhaitées, au moyen du logiciel SoundForge® Sony.

### 2.2.3. Mesure des séquences

Les séquences sont diffusées et mesurées avant la réalisation de l'expérimentation afin de calculer, sur ces différentes mesures, différents indices acoustiques et psychoacoustiques.

Trois mesures successives sont réalisées. La première est effectuée au moyen du mannequin artificiel Cortex MANIKIN MK2/NCF1®. Ce dernier est placé à un point central par rapport aux futurs emplacements des sujets (au centre du tapis, à la place de la table basse). La hauteur du mannequin est réglée de telle manière à ce que la tête artificielle soit à la même hauteur d'assise que les sujets dans les fauteuils et le canapé. La deuxième est réalisée au moyen d'un microphone omnidirectionnel GRAS 40AE® (que l'on place successivement aux positions de l'oreille droite puis de l'oreille gauche du mannequin artificiel). Les enregistrements effectués au mannequin sont stockés sur un PC portable via une carte son externe CREATIVE SoundBlaster Extigy®. Les mesures effectuées au microphone omnidirectionnel sont stockées sur un enregistreur portable Tascam HD-P2® (échantillonnés à 44.1 kHz avec une amplitude de résolution de 24 bits). Avant mesure, les microphones sont étalonnés au moyen d'un calibre acoustique de classe 1 Norsonic 1251®. La troisième mesure est réalisée au moyen du microphone omnidirectionnel décrit ci-dessus, en façade de la villa. Le microphone est alors placé à 2m de la façade à une hauteur de 1m50 du sol.

Les deux premières mesures sont respectivement destinées au calcul des indices acoustiques et psychoacoustiques (cf. Chapitre 3). Ces indices ont été calculés au moyen du logiciel dBsonic® commercialisé par 01dB-Metravib, et à partir de scripts Matlab®. Notons que le calcul des métriques concernant le bruit industriel se fait à partir des séquences mesurées dans lesquelles on a supprimé les instants où le bruit de la circulation routière est présent, tandis que le calcul des métriques concernant le bruit de la circulation routière se fait à partir des séquences dans lesquelles on a supprimé les instants où le bruit industriel n'est pas masqué par la présence de bruits routiers.

Le Tableau 5.2 ci-après présente les valeurs calculées d'indices caractérisant la séquence de bruit de la circulation routière (pour un niveau sonore de 50 dB(A), noté BR(50)). Nous avons fait figurer les indices mis en avant au cours des précédents chapitres, mais également des indices anciennement utilisés, tels que l'indice  $L_{NP}$  et l'indice TNI.

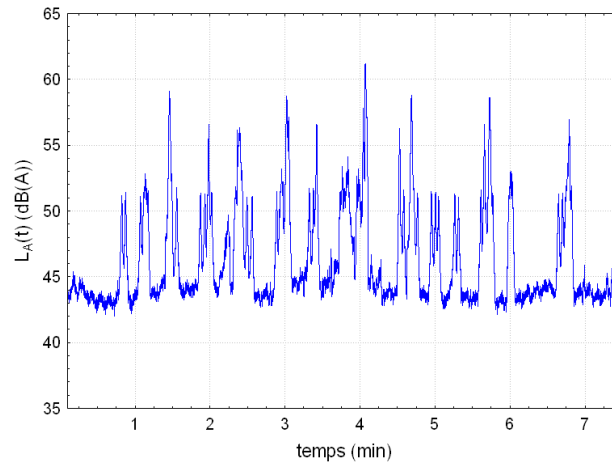
N (sones)	$N_{15-18}$ (sones)	$L_{MF}$ (dB(A))	R (casper)	$R_{max}$ (casper)	F (cvacil)	$F_{max}$ (cvacil)	$L_{NP}$ (dB(A))	TNI (dB(A))
6.9	0.2	50.7	22.7	51.7	8.3	35.9	64.9	65

**Tableau 5.2 : Indices (calculés pour la voie gauche) décrivant la séquence de bruit de la circulation routière (pour l'indice  $L_{Aeq,T}$  égal à 50 dB(A)).**

Le bruit industriel est le même que celui diffusé lors des expérimentations en laboratoire décrites au Chapitre 4 (cf. valeurs des indices données dans le Tableau 4.1). Pour l'indice  $L_{Aeq,T}$  d'une valeur de 44dB(A), la sonie calculée à partir du bruit industriel mesuré dans ces conditions de diffusion est de 3.8 sones.

### 2.2.4. Description d'une séquence

La Figure 5.5 présente l'évolution du niveau sonore en fonction du temps mesuré pour la combinaison de la séquence de bruit industriel à 44dB(A) avec la séquence de bruit de la circulation routière à 47dB(A), notée BI(44)+BR(47).



**Figure 5.5 : Evolution du niveau de pression sonore pondéré A ( $L_A(t)$ ) en fonction du temps pour la séquence combinant le bruit industriel à 44dB(A) et le bruit de la circulation routière à 47 dB(A) (notée BI(44)+BR(47)).**

Nous voyons que la séquence de bruit de la circulation routière construite est très variable dans le temps avec des pauses entre des passages de véhicules pendant lesquels le bruit industriel est clairement audible. Cet aspect est cohérent avec ce qui est observé *in situ* (cf. ANNEXE A).

Le Tableau 5.3 récapitule la composition de la séquence de bruit de la circulation routière en faisant apparaître le nombre de bruits de passage de chaque type de véhicules et de chaque type d'allures, et en faisant apparaître l'appartenance aux différentes catégories perceptives et cognitives de bruits de passage (cf. Chapitre 3).

Chaque cellule du Tableau 5.3 représente un cas de la typologie physique *a priori* proposée au Chapitre 2. Une couleur de remplissage de cellule représente une catégorie perceptive et cognitive. Nous lisons par exemple que dans la séquence de bruit de la circulation routière on trouve par exemple 27 véhicules légers à allure stabilisée, et 5 bruits de passage de la catégorie 5 (véhicules légers, poids lourds et bus à allure décélérée). Le nombre total de bruits de passage de la séquence est égal à 54.

	Allure stabilisée	Allure accélérée	Allure décélérée	Total
Véhicules légers	27	4	3	34 (63%)
Poids lourds	4	1	1	6 (11%)
Bus et autocars	1		1	2 (4%)
Deux-roues	10	1	1	12 (22%)
Total	42 (78%)	6 (11%)	6 (11%)	54 (100%)

**Tableau 5.3 : Composition de la séquence de bruit de la circulation routière. Gris : bruits de passage de la catégorie 1. Bleu ciel : Bruits de passage de la catégorie 2. Vert : bruits de passage de la catégorie 3. Rose : bruits de passage de la catégorie 4. Violet : bruits de passage de la catégorie 5. Orange : bruits de passage de la catégorie 6. Blanc : bruits de passage de la catégorie 7.**

En effectuant les regroupements entre types de véhicules selon le Guide du Bruit [SETRA09a], alors la proportion de véhicules légers de la séquence construite s'élève à 85% (en comptant véhicules légers et deux-roues), tandis que la proportion de poids lourds est égale à 15% (en comptant poids lourds et bus). Les proportions sont conformes à l'objectif fixé (cf. 2.2.2.2.c) : les ordres de grandeur sont les mêmes qu'*in situ* et la proportion de poids



lourds est augmentée. Sur la séquence, le bruit de la circulation routière est présent environ 43% de la durée et le bruit industriel environ 57%.

### 2.3. Dispositif expérimental

Le test d'évaluation de la gêne en situation de multi-exposition au bruit de la circulation routière et au bruit industriel est contrôlé par l'expérimentateur depuis la pièce CH2 (cf. Figure 5.2). L'expérimentateur diffuse les séquences en ordre aléatoire, au moyen du logiciel SoundForge<sup>®</sup> Sony, au groupe de sujets se trouvant dans le salon aménagé (pièce CH1). La reproduction stéréophonique est assurée par un système 2.1 (deux haut-parleurs actifs Dynaudio Acoustics BM5A Actif<sup>®</sup> sont associés à un caisson de basses Dynaudio Acoustics BM9S<sup>®</sup>) via un ordinateur et une carte son haute qualité Lynx Studio Technology LynxTwo<sup>®</sup>. Ces haut-parleurs se situent à l'extérieur du salon, dans le jardin. Le système de reproduction est relié à l'ordinateur de l'expérimentateur situé dans la pièce CH2, de telle sorte qu'on ne trouve dans le salon aménagé aucun élément rappelant l'expérimentation.

La disposition des haut-parleurs s'inspire des recommandations de Bech et Zacharov [BZ06]. Les haut-parleurs situés à l'extérieur sont placés à une hauteur de 1m20, et forment avec le centre de la table basse un triangle équilatéral de 5m de côté. Le caisson de basses est placé au centre de ceux-ci, légèrement surélevé pour le protéger du sol. Comme pour les précédentes expérimentations, la fréquence de recouvrement entre caisson de basses et haut-parleurs est fixée à 80Hz.

La Figure 5.6 montre un schéma du dispositif expérimental et une photo prise depuis le jardin de la villa. Pour un sujet en position assise dans le salon aménagé, il est difficile d'apercevoir les haut-parleurs situés à l'extérieur.

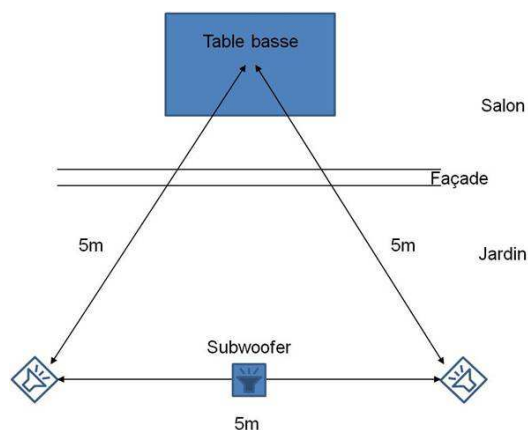


Figure 5.6 : Dispositif expérimental.

Notons que les séquences sonores sont diffusées depuis l'extérieur vers l'intérieur du salon aménagé dans le cas où la fenêtre coulissante est entrouverte (environ 15cm). Il en résulte un filtrage fréquentiel illustré sur la Figure 5.4. Notons également que les séquences sonores mesurées prennent en compte ce filtrage. Il s'agit là d'une différence notable avec les expérimentations en laboratoire, dont on a rendu compte dans les précédents chapitres.

### 2.4. Procédure

Pour des raisons pratiques, le test se déroule en deux parties distinctes, que les sujets effectuent à plusieurs jours d'intervalle. Dans chaque partie, ils sont exposés à 8 séquences sonores sur les 16.

### 2.4.1. Instructions

A leur arrivée dans le salon aménagé, l'expérimentateur distribue à chaque sujet un feuillet (disponible en ANNEXE C), contenant les instructions et le questionnaire que les sujets sont amenés à remplir. Les instructions générales sont les suivantes :

*« Au cours de cette expérience vous serez en présence de diverses séquences d'environnements sonores dont les principales sources de bruit sont de nature industrielle ou liées à la circulation routière.*

***Imaginez-vous chez vous avec des amis ou des collègues. Vous menez une activité calme et reposante. Par exemple, vous pouvez avoir une conversation, lire, profiter d'une boisson, etc. A l'extérieur du logement se trouve une route avec une intersection. De l'autre côté de la route, il y a un site industriel émettant du bruit.***

*A la fin de chaque séquence, veuillez répondre aux questions correspondantes. »*

Ils remplissent ensuite la première page du feuillet puis l'expérimentateur les récupère et donne des précisions sur le déroulement de l'expérience. Il leur est notamment précisé que le bruit industriel est de nature continue. L'expérimentateur leur indique qu'ils peuvent lire, discuter, jouer aux cartes, etc. Il n'est pas possible d'écouter de musique, téléphoner ou regarder une vidéo. Les sujets ne peuvent également ni ouvrir plus, ni fermer la fenêtre. Ils peuvent néanmoins ajuster la température du salon grâce au radiateur présent.

Une fois ces précisions apportées, l'expérimentateur sort du salon aménagé et rejoint la pièce CH2 d'où il lance la première séquence. A la fin de la séquence, l'expérimentateur rejoint les sujets, leur distribue leur feuillet, et ceux-ci doivent répondre aux questions concernant la séquence (cf. questionnaire en ANNEXE C).

### 2.4.2. Le questionnaire

#### 2.4.2.1. Activités

Les sujets doivent écrire l'activité pratiquée durant l'exposition à la séquence puis évaluer à quel point leur activité a été perturbée en répondant à la question suivante :

**« Votre (vos) activité(s) a-t-elle (ont-elles) été perturbée(s) par la séquence sonore ?**  
*Pour répondre à cette question veuillez choisir un chiffre compris entre 0 et 10 correspondant au mieux à la perturbation ressentie.*

0 \_\_\_\_\_ 10  
*Pas du tout Extrêmement »*

La perturbation des activités est évaluée au moyen d'une échelle continue.

#### 2.4.2.2. Fenêtre

Etant donné, que nous avons explicitement demandé aux sujets de ne pas fermer la fenêtre entrouverte, il leur est demandé ensuite de répondre à la question suivante :

**« Auriez-vous souhaité fermer les fenêtres à cause du bruit ? :  Oui  Non »**

Cette question dont la réponse est exprimée par un choix dichotomique a pour objet de voir quel impact les expositions auraient sur le comportement des sujets.

#### 2.4.2.3. Identification

Etant donné que les séquences présentées aux sujets sont complexes, il nous apparaît pertinent de leur demander les sources de bruit identifiées au cours de la séquence.

L'objectif serait par exemple de déterminer si une catégorie perceptive apparaît plus saillante qu'une autre lorsque ces dernières sont mélangées dans un trafic reconstitué, et ainsi orienter le choix d'un indicateur de gêne adapté à un tel trafic.

#### 2.4.2.4. Questions relatives aux gênes partielles et à la gêne totale

Les questions sur les gênes partielles et la gêne totale interviennent après les questions détaillées dans les sections précédentes (cf. questionnaire en ANNEXE C). Nous avons fait le choix de poser en premier les questions sur les gênes partielles avant la question sur la gêne totale, comme cela a été mené dans de précédents travaux traitant d'enquête *in situ* (cf. [CCL03, PMMR+12]). La formulation des questions s'inspire des recommandations de la norme ISO 15666 [ISO03].

##### a. Gêne partielle due au bruit de la circulation routière

Avant la question il est explicitement demandé aux sujets de considérer uniquement le bruit de la circulation routière dans la séquence à laquelle ils ont été exposés. La question est alors la suivante :

**« Lorsque vous vous imaginiez chez vous en présence de cette séquence d'environnement sonore, le bruit de la circulation routière vous a-t-il gêné ?**

*Pour répondre à cette question veuillez choisir un chiffre compris entre 0 et 10 correspondant au mieux à la gêne ressentie.*

0 \_\_\_\_\_ 10  
Pas du tout Extrêmement »

##### b. Gêne partielle due au bruit industriel

Avant la question il est explicitement demandé aux sujets de considérer uniquement le bruit industriel dans la séquence à laquelle ils ont été exposés. La question est alors la suivante :

**« Lorsque vous vous imaginiez chez vous en présence de cette séquence d'environnement sonore, le bruit du site industriel vous a-t-il gêné ?**

*Pour répondre à cette question veuillez choisir un chiffre compris entre 0 et 10 correspondant au mieux à la gêne ressentie.*

0 \_\_\_\_\_ 10  
Pas du tout Extrêmement »

##### c. Gêne totale

Avant la question, il est explicitement demandé aux sujets de considérer l'ensemble de la séquence à laquelle ils ont été exposés.

**« Lorsque vous vous imaginiez chez vous en présence de cette séquence d'environnement sonore, le bruit global, dû au bruit de la circulation routière et au bruit du site industriel, vous a-t-il gêné ?**

*Pour répondre à cette question, veuillez choisir un chiffre compris entre 0 et 10 correspondant au mieux à la gêne ressentie.*

0 \_\_\_\_\_ 10  
Pas du tout Extrêmement »

### 2.4.3. Cohérence de l'évaluation entre les deux parties de l'expérimentation

Les sujets répondent aux questions (cf. section 2.4.2) pour 8 séquences sur les 16, puis l'expérimentateur les avertit de la fin de la première ou deuxième partie de l'expérience.

Etant donné que les sujets effectuent les deux parties de l'expérimentation à plusieurs jours d'intervalle, nous avons besoin de savoir si ces mêmes sujets seraient à même de fournir des évaluations similaires de séquences identiques, à plusieurs jours d'intervalle. Si nous démontrons que cela est possible alors nous pouvons agréger les données des deux parties pour nos analyses. Pour cela, nous avons coupé à partir de certaines séquences des extraits sonores plus courts (45s). Les extraits se situent au même moment sur la séquence, la seule source de variation entre les extraits provient des niveaux d'exposition des bruits combinés. Les extraits sont obtenus à partir des séquences suivantes : BI(38)+BR(44), BI(38)+BR(53), BI(44)+BR(44), BI(44)+BR(53).

Pour cela, l'expérimentateur distribue à chaque sujet à la fin de chaque partie de l'expérimentation une nouvelle feuille de questionnaire (cf. ANNEXE C). Les sujets sont avertis qu'ils vont devoir **écouter** des séquences sonores plus brèves et répondre aux questions correspondantes. Il leur est expliqué que chaque courte séquence ne sera diffusée qu'une fois, et qu'ils auront 15s pour formuler leur réponse.

Pour chaque extrait la question est la même. Les sujets sont invités à considérer l'ensemble de l'extrait puis répondent à la question suivante :

**« Lorsque vous vous imaginiez chez vous en présence de cette séquence d'environnement sonore, le bruit global, dû au bruit de la circulation routière et au bruit du site industriel, vous a-t-il gêné ?**

*Pour répondre à cette question, veuillez choisir un chiffre compris entre 0 et 10 correspondant au mieux à la gêne ressentie.*

0 \_\_\_\_\_ 10  
Pas du tout Extrêmement »

### 2.4.4. Questionnaire général

A l'issue de l'expérimentation (à la fin de la deuxième partie du test), les sujets remplissent la dernière page du feuillet (cf. ANNEXE C). Ils y trouvent des questions relatives à des facteurs non-acoustiques : sensibilité au bruit en général, crainte vis-à-vis d'une installation industrielle, crainte vis-à-vis d'une infrastructure routière. Les questions pour ces trois facteurs sont formulées ainsi :

**« Diriez-vous que vous êtes sensible au bruit en général ?**

*Pour répondre à cette question veuillez choisir un chiffre compris entre 0 et 10 correspondant au mieux à votre sensibilité au bruit en général.*

0 \_\_\_\_\_ 10  
Pas du tout sensible Extrêmement sensible

**Est-ce que pour vous une infrastructure routière est synonyme de danger ?**

*Pour répondre à cette question veuillez choisir un chiffre compris entre 0 et 10 correspondant au mieux à votre appréciation du danger.*

0 \_\_\_\_\_ 10  
Pas du tout Extrêmement

### ***Est-ce que pour vous une installation industrielle est synonyme de danger ?***

*Pour répondre à cette question veuillez choisir un chiffre compris entre 0 et 10 correspondant au mieux à votre appréciation du danger.*

0 \_\_\_\_\_ 10  
*Pas du tout* *Extrêmement »*

Nous avons fait le choix d'évaluer la sensibilité au bruit en général au moyen d'une unique question comme cela a été fait dans des travaux similaires (cf. [KMM99a, CBML+05]), même si la sensibilité au bruit peut être évaluée de manière plus précise à l'aide de plusieurs items (par exemple [MV09]).

Les sujets sont ensuite invités à donner un retour personnel sur l'expérimentation et notamment dire s'ils ont éprouvé des difficultés à s'imaginer chez eux dans ce contexte, pour effectuer la tâche demandée (cf. ANNEXE C).

## **2.5. Sujets**

Nous avons recruté, pour ce test d'évaluation en environnement simulé de la gêne en situation de multi-exposition au bruit de la circulation routière et au bruit industriel, 51 sujets par courriel parmi les personnels et étudiants de l'ENTPE. Dans le courriel de recrutement, nous avons spécifiquement demandé des sujets ayant une bonne audition et avons prévenu que le test se déroulait en deux parties et ferait l'objet d'une indemnisation.

Les sujets ont effectué l'expérience par groupe de 4 ou 5 (12 groupes au total). Seize femmes et 35 hommes, d'une moyenne d'âge de 29 ans (entre 20 et 59 ans) avec un écart-type égal à 9.6 ans, ont ainsi participé à l'expérience.

L'expérience d'une durée totale d'environ 3h (1h30 pour chaque partie) s'est déroulée au cours des mois d'octobre et novembre 2010.

Notons que 75% des sujets ont trouvé que les bruits de la circulation routière leur étaient « beaucoup » à « extrêmement » familiers, tandis que 66% des sujets environ ont jugé que le bruit industriel était « légèrement » à « beaucoup » familier. En outre 75% des sujets ont déclaré n'avoir eu aucune difficulté à s'imaginer chez eux pour la réalisation de cette expérience.

## **3. Traitement et analyse des données**

Nous l'avons expliqué au Chapitre 1 puis dans la section 1 de ce chapitre, l'intérêt d'une telle expérience est de permettre l'étude de certains facteurs acoustiques et non-acoustiques.

En préalable à toute analyse il convient de vérifier s'il est possible d'agrèger les données provenant des deux parties de l'expérimentation. Pour cela, nous effectuerons 4 tests *t* qui nous permettront de juger s'il existe des différences significatives entre les réponses de gêne concernant les 4 extraits courts (section 2.4.3) soumis aux jugements des sujets à l'issue des 2 parties.

Par le biais du questionnaire rempli par les sujets, nous obtenons des réponses par rapport à un certain nombre de variables dépendantes que nous étudions, par exemple, les gênes partielles, la gêne totale, la perturbation ressentie, etc. Sur ces variables indépendantes, nous étudierons alors l'influence de facteurs acoustiques et non-acoustiques. Les facteurs acoustiques sont ceux introduits expérimentalement de par la construction des séquences sonores, tandis que les facteurs non-acoustiques sont introduits

par le recrutement de différents sujets et ces données individuelles ont été également recueillies au moyen du questionnaire. Il s'agit par exemple des craintes exprimées, de la sensibilité au bruit en général, etc.

Le Tableau 5.4 récapitule l'ensemble des variables indépendantes dont nous testerons l'effet sur les différentes variables dépendantes. Nous y avons également fait figurer les analyses statistiques correspondantes. On lit par exemple dans le Tableau 5.4 que nous allons étudier l'effet des facteurs acoustiques « Niveau de bruit industriel » et « Niveau de bruit routier » sur la gêne partielle due au bruit industriel au moyen d'une ANOVA à mesures répétées à deux facteurs. Nous lisons également que nous étudierons l'effet du facteur non-acoustique « sensibilité au bruit en général » sur la gêne due au bruit de la circulation routière au moyen d'une ANOVA à 1 facteur.

Nous décrivons dans cette section succinctement les analyses statistiques pratiquées.

Variables dépendantes	Variables indépendantes	
	Facteurs acoustiques	Facteurs non-acoustiques
Gêne partielle due au bruit industriel (A <sub>BI'</sub> )	« Niveau de bruit industriel » et « Niveau de bruit routier ». <i>ANOVA à mesures répétées à 2 facteurs</i>	« Crainte vis-à-vis d'une installation industrielle » ; « Sensibilité au bruit en général » ; « Activité pratiquée ». <i>ANOVA à 1 facteur</i>
Gêne partielle due au bruit de la circulation routière (A <sub>BR'</sub> )	« Niveau de bruit industriel » et « Niveau de bruit routier ». <i>ANOVA à mesures répétées à 2 facteurs</i>	« Crainte vis-à-vis d'une infrastructure routière » ; « Sensibilité au bruit en général » ; « Activité pratiquée ». <i>ANOVA à 1 facteur</i>
Gêne totale (A <sub>T</sub> )	« Niveau de bruit industriel » et « Niveau de bruit routier ». <i>ANOVA à mesures répétées à 2 facteurs</i>	« Crainte vis-à-vis d'une installation industrielle » ; « Crainte vis-à-vis d'une infrastructure routière » ; « Sensibilité au bruit en général » ; « Activité pratiquée ». <i>ANOVA à 1 facteur</i>
Perturbation ressentie (Per)	« Niveau de bruit industriel » et « Niveau de bruit routier ». <i>ANOVA à mesures répétées à 2 facteurs</i>	« Crainte vis-à-vis d'une installation industrielle » ; « Crainte vis-à-vis d'une infrastructure routière » ; « Sensibilité au bruit en général » ; « Activité pratiquée ». <i>ANOVA à 1 facteur</i>
Ouverture/fermeture de la fenêtre	« Niveau de bruit industriel » et « Niveau de bruit routier ». <i>Régression logistique multiple</i>	...

**Tableau 5.4 : Récapitulatif des variables dépendantes et des variables indépendantes mises en jeu. En italique figurent les analyses à effectuer.**

### 3.1. Homogénéité des sujets

Pour l'étude de l'effet des facteurs acoustiques « Niveau de bruit routier » et « Niveau de bruit industriel » sur les gênes partielles, la gêne totale et la perturbation ressentie, il convient au préalable d'évaluer l'homogénéité des sujets en suivant la procédure décrite au Chapitre 3 (section 2.2.2).

### 3.2. ANOVA à mesures répétées

Les séquences sonores telles que nous les avons construites introduisent expérimentalement 2 facteurs acoustiques : « le Niveau de bruit industriel – NBI » et le « Niveau de bruit routier – NBR ». Ces facteurs peuvent avoir une influence sur les réponses de gêne (partielle ou totale) et sur les réponses de perturbation ressentie.

Nous testerons ainsi les effets des facteurs « Niveau de bruit routier - NBR » et « Niveau de bruit industriel - NBI » sur les gênes partielles, sur la gêne totale, ainsi que sur la perturbation ressentie, au moyen d'ANOVA à mesures répétées à 2 facteurs.

Nous nous appuierons pour cela sur les considérations théoriques récapitulées au Chapitre 3 (section 2.2.2).

### 3.3. ANOVA à 1 facteur

Les facteurs non-acoustiques, introduits par le recrutement de sujets différents, peuvent également avoir une influence sur les réponses de gêne (partielle ou totale) et sur les réponses de perturbation ressentie. Ces facteurs (« Crainte exprimée vis-à-vis d'une infrastructure routière –  $C_{BR}$  », « Crainte exprimée vis-à-vis d'une installation industrielle –  $C_{BI}$  », « Sensibilité au bruit en général –  $Se$  ») traduisant des différences interindividuelles, la logique n'est donc pas la même que celle utilisée pour l'étude des facteurs acoustiques. Nous n'avons pas besoin d'évaluer l'homogénéité des sujets vis-à-vis de ces facteurs. Nous testerons ainsi les effets de ces facteurs non-acoustiques «  $C_{BI}$  », «  $C_{BR}$  » et «  $Se$  » sur les réponses de gêne (partielles et totale) ainsi que sur les réponses de perturbation ressentie au moyen de différentes ANOVA à un facteur.

Le point important est la manière dont nous allons coder les différentes modalités de ces facteurs non-acoustiques. Les données des facteurs «  $C_{BI}$  », «  $C_{BR}$  » et «  $Se$  » sont récoltées au moyen d'une échelle continue (cf. section 2.4.4). Les modalités de ces facteurs sont toutes les notes différentes exprimées (la plupart du temps, il s'agit de notes entières), et par conséquent chaque modalité  $i$  disposera de  $N_i$  données. En ce qui concerne le facteur « activité pratiquée -  $Ac$  », il s'agira de regrouper les différentes activités recensées en différentes classes d'activités, chaque classe d'activités représentant ensuite une modalité avec un nombre de données dans chaque modalité *a priori* différente.

La mise en œuvre de l'ANOVA à 1 facteur et  $i$  modalités est expliquée au Chapitre 3 (section 2.2.2).

### 3.4. Régression logistique

La réponse à la question portant sur l'ouverture/fermeture de la fenêtre représente un choix dichotomique (« oui » ou « non ») et les données obtenues sont donc binaires. Le moyen le plus usuel de modéliser l'influence d'une ou plusieurs variables continues sur une variable binaire est la régression logistique [GH07].

La régression logistique est basée sur la fonction mathématique  $\text{logit}^{-1}$  exprimée selon l'équation suivante :

$$\text{logit}^{-1}(x) = \frac{e^x}{1 + e^x} \quad \forall x \in \mathbb{R} \quad (5.1)$$

L'intérêt d'une telle fonction est qu'elle transforme des valeurs continues en valeurs appartenant à l'intervalle  $[0, 1]$  [GH07].

Dans le cas simple où l'on souhaite prédire le choix codé « 1 » d'une variable binaire  $Y$ , en fonction de deux variables continues  $X_1$  et  $X_2$ , la régression logistique permet de modéliser la probabilité d'avoir le choix « 1 » pour la variable  $Y$  (notée  $\text{Pr}(Y=1)$ ) connaissant les variables  $X_1$  et  $X_2$ , soit :

$$\text{Pr}(Y = 1) = \text{logit}^{-1}(aX_1 + bX_2 + c) \quad (5.2)$$

Dans l'équation (5.2), «  $aX_1$  » et «  $bX_2$  » sont appelés prédicteurs linéaires [GH07]. Les coefficients de régression logistique  $a$  et  $b$  sont statistiquement significatifs s'ils se situent à plus de deux écarts-types de 0 [GH07]. Dans la pratique,  $a$ ,  $b$  et  $c$  sont obtenus en déterminant la quantité qui maximise la fonction de vraisemblance (méthode du maximum de vraisemblance, se référer par exemple à [Dod04] pour plus de détails).

Il existe ensuite une règle très simple permettant d'interpréter les coefficients de régression logistique, en exploitant les propriétés de la fonction  $\text{logit}^{-1}$ . La valeur que l'on obtient en divisant «  $a$  » et «  $b$  » par 4 permet d'obtenir la valeur maximale de la différence prédite correspondant à l'augmentation d'une unité pour respectivement  $X_1$  et  $X_2$  [GH07]. Ainsi, d'après l'équation (5.2), une différence d'une unité pour  $X_1$  et une différence d'une unité pour  $X_2$  correspondent respectivement au maximum à une augmentation égale à  $100a/4\%$  et  $100b/4\%$  dans la probabilité d'obtenir le choix codé « 1 » pour la variable  $Y$  [GH07].

### 3.5. Identification des sources de bruit

L'analyse effectuée sera des plus simples puisqu'il s'agira uniquement de compter les occurrences de mots qui concernent l'identification des bruits liés à la circulation routière et du bruit industriel.

Concernant les bruits liés à la circulation routière, cela nous permettra de déterminer si parmi l'ensemble des séquences de longue durée certains types de véhicules et/ou certaines allures sont saillantes, ce qui nous permettrait de proposer un indicateur de gêne adapté à de telles séquences.

### 3.6. Corrélation et régression linéaire

Ces analyses de corrélation et régression linéaire seront réalisées dès lors que nous aurons étudié l'effet des facteurs mis en jeu.

Il s'agira de déterminer pour les gênes partielles (due au bruit industriel et due au bruit de la circulation routière) quel indice est le mieux corrélé en s'appuyant sur les résultats établis au Chapitre 4, en vue de la prédiction de ces gênes partielles.

Des régressions linéaires seront également pratiquées pour tester les divers modèles de gêne totale déjà envisagés au Chapitre 4.



## 4. Résultats

Dans cette section, nous donnerons les résultats relatifs à l'étude des facteurs acoustiques puis des facteurs non-acoustiques, selon la démarche résumée dans le Tableau 5.4. L'étude des facteurs acoustiques nous servira ensuite pour la prédiction de la gêne partielle due au bruit de la circulation routière d'une part puis au bruit industriel d'autre part, en mettant à profit les résultats exposés dans les précédents chapitres. Puis les différents modèles prédictifs de la gêne totale sélectionnés au Chapitre 4 seront testés sur les données provenant de cette expérimentation.

Au préalable, il convient de vérifier s'il est possible d'agrèger les données recueillies au cours des deux parties de l'expérimentation.

### 4.1. Agrégation des données recueillies à l'issue des deux parties

Les sujets ont effectué l'ensemble du test en deux parties distinctes d'égale durée, à plusieurs jours d'intervalle. Dans le but de vérifier si les sujets ont été capables de fournir des jugements de gêne similaires sur de mêmes stimuli durant les deux parties de l'expérience, nous avons réalisé des tests  $t$  de Student portant sur les réponses de gêne due aux 4 courtes séquences communes aux deux parties de l'expérience.

Les résultats des tests  $t$ , exposés dans le Tableau 5.5, montrent que, bien qu'en moyenne les sujets aient jugé les 4 séquences courtes légèrement plus gênantes à l'issue de la partie 2 qu'à l'issue de la partie 1, ces différences ne sont pas significatives pour l'ensemble de ces séquences courtes.

Séquence courte	Partie 1	Partie 2	$t$	$p$
BI(38)+BR(44)	3.6	4.1	-1.6	0.11
BI(38)+BR(53)	5.7	6.0	-1.0	0.31
BI(44)+BR(44)	5.3	5.6	-1.3	0.20
BI(44)+BR(53)	6.5	6.8	-1.2	0.24

**Tableau 5.5 : Résultats des tests  $t$  effectués sur les réponses de gêne due aux 4 séquences courtes recueillies à l'issue des deux parties de l'expérience. Les 2<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup> colonnes représentent les réponses moyennes de gêne.**

Nous en déduisons que les sujets ont utilisé l'échelle de réponse de la même manière au cours des deux parties de l'expérience. Nous pouvons donc légitimement agréger les données recueillies au cours des deux parties en supposant que les jugements auraient été similaires dans le cas où l'expérience aurait été menée en une seule partie.

### 4.2. Facteurs acoustiques

#### 4.2.1. Effet des facteurs acoustiques sur les réponses de gêne et sur la perturbation ressentie

##### 4.2.1.1. Homogénéité des sujets

Conformément à la démarche décrite au Chapitre 3 (section 2.2.1), nous avons étudié l'homogénéité des sujets vis-à-vis des variables dépendantes suivantes : gêne partielle due au bruit industriel ( $A_{BI}$ ), gêne partielle due au bruit de la circulation routière ( $A_{BR}$ ), gêne totale ( $A_T$ ) et perturbation ressentie ( $Per$ ). Cela est réalisé dans le but d'étudier l'effet des facteurs « Niveau de bruit industriel – NBI » et « Niveau de bruit routier - NBR », introduits expérimentalement, sur ces variables dépendantes (cf. Tableau 5.4).

Nous avons établi que vis-à-vis de ces variables dépendantes les sujets forment un ensemble homogène. Ainsi nous conservons les données des 51 sujets pour l'étude de l'effet de ces facteurs acoustiques.

#### 4.2.1.2. ANOVA à mesures répétées

En accord avec le Tableau 5.4, une ANOVA à mesures répétées est pratiquée sur chaque variable dépendante considérée dans le but de tester l'effet des facteurs « NBI » et « NBR ». Les résultats des ANOVA à mesures répétées figurent dans le Tableau 5.6.

Concernant les réponses de gêne partielle due au bruit industriel ( $A_{BI}'$ ), on voit que le facteur « NBI », ainsi que l'interaction des facteurs « NBI » et « NBR » ont un effet significatif. La gêne partielle due au bruit industriel augmente à mesure que l'exposition au bruit industriel augmente. Cependant, l'effet est peu important comme l'indique la proportion de variance expliquée. On voit que concernant l'interaction des facteurs principaux, cette proportion de variance expliquée est marginale. L'absence d'effet significatif du facteur « NBR » nous indique que pour une même exposition au bruit industriel, la gêne due au bruit industriel n'est pas affectée par une augmentation de l'exposition au bruit de la circulation routière. En d'autres termes, dans notre cas, la gêne partielle due au bruit industriel n'est pas inhibée par la présence du bruit de la circulation routière (cf. [Bot71]).

Concernant les réponses de gêne partielle due au bruit de la circulation routière ( $A_{BR}'$ ), les résultats sont similaires. On voit que le facteur « NBR » et l'interaction des facteurs « NBI » et « NBR » ont un effet significatif. Toutefois l'effet de l'interaction des facteurs principaux reste marginal. De même, l'absence d'effet significatif du facteur « NBI » nous indique que, dans notre cas, la gêne partielle due au bruit de la circulation routière n'est pas inhibée par la présence de bruit industriel.

V.D.	Facteur	SCE	ddl	CM	F	p	$\eta^2$
$A_{BI}'$	NBI	311.43	3	103.81	44.59	<0.001	0.09
	NBR	6.69	3	2.23	1.32	n.s.	...
	NBI x NBR*	45.97	9	5.11	2.44	<0.05	0.01
$A_{BR}'$	NBI	2.97	3	0.99	0.41	n.s.	...
	NBR*	497.12	3	164.71	61.48	<0.001	0.11
	NBI x NBR	44.37	9	4.93	1.98	<0.05	0.01
$A_T$	NBI*	65.90	3	21.97	9.17	<0.001	0.02
	NBR	364.91	3	121.64	51.88	<0.001	0.09
	NBI x NBR*	65.42	9	7.27	3.14	<0.01	0.02
Per	NBI*	29.96	3	9.99	4.63	<0.01	0.01
	NBR	305.10	3	101.7	47.07	<0.001	0.08
	NBI x NBR*	39.3	9	4.37	2.16	<0.05	0.01

**Tableau 5.6 : Résultats des ANOVA à mesures répétées à 2 facteurs (« Niveau de bruit industriel – NBI », « Niveau de bruit routier – NBR ») menées sur les différentes variables dépendantes (V.D.).  $A_{BI}'$  représente les réponses de gêne partielle due au bruit industriel.  $A_{BR}'$  représente les réponses de gêne partielle due au bruit de la circulation routière.  $A_T$  représente les réponses de gêne totale. Per représente les réponses de perturbation ressentie. \* : hypothèse de sphéricité violée.**

Concernant les réponses de gêne totale et les réponses de perturbation ressentie, les résultats sont similaires. Les facteurs « NBI » et « NBR » ainsi que leur interaction ont un effet significatif sur ces variables dépendantes. C'est toutefois le facteur « NBR » qui explique la plus grande proportion de variance constatée.

## 4.2.2. Effet des facteurs acoustiques sur l'ouverture/fermeture de la fenêtre

### 4.2.2.1. Description des réponses au moyen de proportions

Une manière très simple de décrire la variable binaire obtenue par la réponse à la question sur l'ouverture/fermeture de la fenêtre est de calculer les proportions de réponses « oui » ou « non » pour chaque séquence de l'expérimentation.

La Figure 5.7 illustre un tel calcul. On voit de manière générale que pour un même niveau d'exposition au bruit industriel, une plus grande proportion de sujets ont exprimé le souhait de fermer les fenêtres à mesure que l'exposition au bruit de la circulation routière augmente. De même, pour un même niveau d'exposition au bruit de la circulation routière une plus grande proportion de sujets ont également exprimé le souhait de fermer les fenêtres à mesure que l'exposition au bruit industriel augmente.

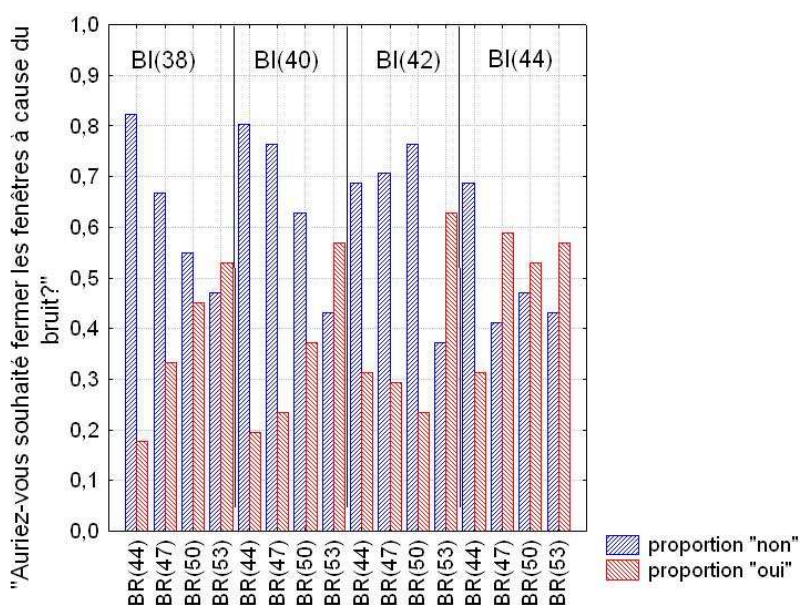


Figure 5.7 : Proportion des différentes réponses à la question sur l'ouverture/fermeture de la fenêtre.

Si l'on considère les séquences où le bruit industriel est à un niveau de 38 à 42 dB(A), on constate qu'une plus grande proportion de sujets n'aurait pas souhaité fermer les fenêtres lorsque le bruit de la circulation routière est à 44, 47 et 50 dB(A). Par contre dès lors que le bruit de la circulation routière est à 53 dB(A), quelle que soit l'exposition au bruit industriel, un plus grand nombre de sujets aurait souhaité fermer les fenêtres. Si l'on considère désormais, les séquences où le bruit industriel est à un niveau de 44 dB(A), on voit alors que la proportion de sujets qui n'auraient pas souhaité fermer la fenêtre est la plus grande uniquement lorsque le bruit de la circulation routière est à 44 dB(A), son plus faible niveau. Cela dénote une perte de tolérance au bruit accrue lorsqu'un seuil d'exposition au bruit industriel est atteint.

La régression logistique nous aidera par la suite à quantifier les résultats décrits dans cette section.

### 4.2.2.2. Régression logistique

Nous utilisons donc la régression logistique (cf. section 3.4) pour modéliser la probabilité d'obtenir la réponse « oui » à la question sur l'ouverture/fermeture de la fenêtre, c'est-à-dire que nous cherchons à modéliser la probabilité que les sujets souhaitent fermer la

fenêtre en fonction des niveaux d'exposition au bruit industriel et au bruit de la circulation routière. Nous obtenons l'équation suivante :

$$Pr(\text{fermeture}) = \text{logit}^{-1}(-12.29 + 0.09L_{BI} + 0.16L_{BR}) \quad (5.3)$$

Dans l'équation (5.3) les coefficients de régression pour les niveaux d'exposition du bruit industriel ( $L_{BI}$ ) et du bruit de la circulation routière ( $L_{BR}$ ) sont significatifs (respectivement  $p < 0.05$  et  $p < 0.001$ ). En divisant les coefficients de régression par 4, nous pouvons avoir une interprétation rapide de cette équation (cf. section 3.4 et [GH07]) : une augmentation de 1 dB(A) de l'exposition au bruit industriel et de l'exposition au bruit de la circulation routière augmente au maximum respectivement de 2.2% et de 4% la probabilité que les sujets souhaitent fermer les fenêtres. Nous voyons donc qu'à augmentation de niveau d'exposition égale, le bruit de la circulation routière aura plus d'influence sur le souhait émis de fermer les fenêtres que le bruit industriel. Il s'agit d'un résultat auquel on pouvait s'attendre dans la mesure où le bruit de la circulation routière fait apparaître des pics de niveaux sonores par rapport au bruit industriel permanent et stable (cf. Figure 5.5), ainsi que des niveaux sonores équivalents relativement plus importants.

### 4.3. Facteurs non-acoustiques

#### 4.3.1. Descriptions des variables indépendantes

Pour rappel (cf. Tableau 5.4) nous étudierons l'effet sur les différentes variables dépendantes de 4 variables indépendantes traduisant des facteurs non-acoustiques permettant d'expliquer les réponses de gêne : « Crainte vis-à-vis d'une installation industrielle -  $C_{BI}$  », « Crainte vis-à-vis d'une infrastructure routière -  $C_{BR}$  », « Sensibilité au bruit en général -  $Se$  », « Activité pratiquée -  $Ac$  ».

Il convient dans un premier temps de décrire ces variables indépendantes.

##### 4.3.1.1. Crainte vis-à-vis d'une installation industrielle

La crainte est évaluée au moyen d'une échelle continue qui va de 0 « pas du tout » à 10 « extrêmement ». Cependant l'ensemble des sujets n'a donné que 10 notes différentes (entre 2 et 10). Le Tableau 5.7 présente les proportions de sujets ayant choisi la note correspondante.

$C_{BI}$	2	2.5	3	4	5	6	6.5	7	8	10
Proportion	0.08	0.02	0.14	0.11	0.06	0.31	0.02	0.08	0.14	0.04

**Tableau 5.7 : Proportion des différentes réponses de crainte exprimée vis-à-vis d'une installation industrielle -  $C_{BI}$ .**

Nous voyons que la proportion des sujets ayant exprimés une crainte strictement supérieure à 5 est plus élevée que celle des sujets ayant exprimés une crainte inférieure ou égale à 5 (0.59 contre 0.41). Cela traduit qu'une installation industrielle est plutôt synonyme de danger pour la majorité des sujets recrutés.

Pour les ANOVA à 1 facteur que nous réaliserons, nous voyons donc que nous avons des effectifs inégaux dans les 10 différentes modalités de cette variable dépendante.

##### 4.3.1.2. Crainte vis-à-vis d'une infrastructure routière

L'évaluation est similaire à celle décrite concernant le bruit industriel. Les sujets ont donné 12 notes différentes (entre 1 et 10), et le Tableau 5.8 présente les proportions de sujets ayant choisi la note correspondante.

C <sub>BR</sub>	1	2	3	3.5	4	5	6	7	7.5	8	9	10
Proportion	0.06	0.06	0.08	0.02	0.10	0.25	0.15	0.14	0.02	0.04	0.06	0.02

**Tableau 5.8 : Proportion des différentes réponses de crainte exprimée vis-à-vis d'une infrastructure routière - C<sub>BR</sub>.**

Nous voyons que la proportion des sujets ayant exprimé une crainte strictement supérieure à 5 est moins élevée que celle des sujets ayant exprimé une crainte inférieure ou égale à 5 (0.43 contre 0.57). Cela traduit au contraire de l'installation industrielle que pour la majorité des sujets recrutés une infrastructure de transport routier n'est plutôt pas synonyme de danger.

Pour les ANOVA à 1 facteur que nous réaliserons, nous voyons donc que nous avons des effectifs inégaux dans les 12 modalités de cette variable dépendante.

#### 4.3.1.3. Sensibilité au bruit en général

Comme pour les craintes exprimées, les sujets ont évalué leur sensibilité au bruit en général au moyen d'une échelle continue allant de 0 à 10. Onze notes de sensibilité différentes, entre 1 et 9, ont été reportées par les sujets, et le Tableau 5.9 récapitule les proportions correspondant aux différentes notes.

Se	1	2	3	3.5	4	4.5	5	6	7	8	9
Proportion	0.02	0.02	0.12	0.02	0.15	0.02	0.06	0.14	0.21	0.2	0.04

**Tableau 5.9 : Proportion des différentes réponses de sensibilité au bruit en général - Se.**

Nous voyons que la proportion des sujets ayant exprimé une sensibilité au bruit en général strictement supérieure à 5 est plus élevée que celle des sujets ayant exprimé une sensibilité inférieure ou égale à 5 (0.6 contre 0.4). Cela traduit que la majorité des sujets se déclare plutôt sensible au bruit en général.

Pour les ANOVA à 1 facteur que nous réaliserons, nous voyons donc que nous avons des effectifs inégaux dans les 11 modalités de cette variable dépendante.

#### 4.3.1.4. Activité pratiquée

Pour rappel, après chaque séquence, les sujets étaient amenés à écrire l'activité effectuée au cours de l'exposition sonore. Au total, 31 activités différentes ont été mentionnées par les sujets. Il a été nécessaire de regrouper ces différentes activités en un plus faible nombre de classes d'activités afin de déterminer un nombre de modalités acceptable pour cette variable, tout en étant cohérent avec les activités reportées. Au final, nous avons conservé 4 classes d'activités :

- Une classe **discussion** qui regroupe des activités telles que : « discussion », « débat », etc. ;
- Une classe **concentration individuelle** qui regroupe des activités telles que : « lecture », « mots fléchés », « écriture », « travail », etc. ;
- Une classe **jeu de société** qui regroupe des activités telles que : « mikado », « jeu de cartes », « uno », « bataille corse », etc ;
- Une classe **repos** qui regroupe des activités telles que : « rien », « comater », « repos », etc.

Le Tableau 5.10 récapitule les proportions correspondant aux différentes classes d'activités, calculées sur l'ensemble des activités pratiquées par les sujets.

Ac	Discussion	Concentration individuelle	Jeu de Société	Repos
Proportion	0.42	0.32	0.25	0.01

**Tableau 5.10 : Proportion des différentes activités reportées par l'ensemble des sujets sur l'ensemble des séquences.**

On voit donc que peu d'activités liées au repos ont été pratiquées au cours de l'expérimentation. De même, pour les ANOVA à 1 facteur que nous réaliserons, nous voyons que nous n'avons pas les mêmes effectifs dans chacune des 4 modalités.

#### 4.3.2. ANOVA à 1 facteur

Le Tableau 5.11 donne les résultats des différentes ANOVA à 1 facteur effectuées, selon la démarche exposée précédemment (cf. Tableau 5.4).

Les analyses montrent que les variables indépendantes ont toutes un effet significatif sur les différentes variables dépendantes, les effets étant de magnitudes différentes.

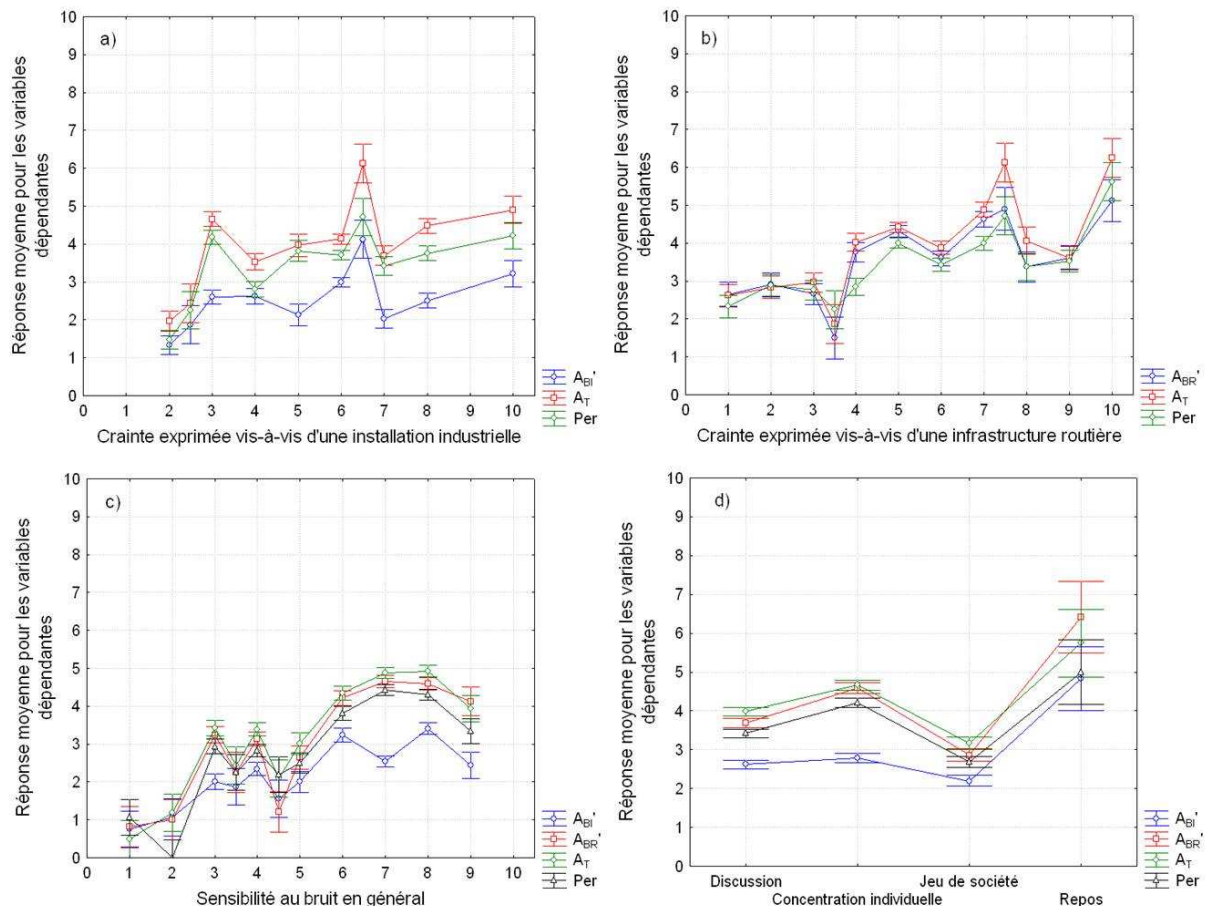
V.D.	V.I.	SCE	ddl	CM	F	p	$\eta^2$
A <sub>BI</sub> '	C <sub>BI</sub>	232.22	9	25.80	6.52	<0.001	0.08
	Se	327.05	10	32.71	8.51	<0.001	0.10
	Ac	72.66	3	24.22	5.87	<0.001	0.02
A <sub>BR</sub> '	C <sub>BR</sub>	464.04	11	42.12	8.43	<0.001	0.10
	Se	815.38	10	81.54	17.87	<0.001	0.18
	Ac	390.71	3	130.24	25.80	<0.001	0.09
A <sub>T</sub>	C <sub>BI</sub>	507.80	9	56.42	13.21	<0.001	0.13
	C <sub>BR</sub>	583.63	11	53.06	12.67	<0.001	0.15
	Se	832.49	10	83.25	21.49	<0.001	0.21
	Ac	273.37	3	91.12	20.12	<0.001	0.07
Per	C <sub>BI</sub>	451.84	9	50.20	12.77	<0.001	0.12
	C <sub>BR</sub>	355.52	11	32.32	7.96	<0.001	0.10
	Se	744.45	10	74.44	20.83	<0.001	0.21
	Ac	282.42	3	94.14	22.90	<0.001	0.08

**Tableau 5.11 : Résultats des ANOVA à 1 facteur menées sur les différentes variables dépendantes (V.D. – mêmes notations qu'utilisées précédemment) visant à tester l'effet des différentes variables indépendantes (V.I.). C<sub>BI</sub> et C<sub>BR</sub> sont les craintes exprimées respectivement vis-à-vis d'une installation industrielle et d'une infrastructure routière. Se est la sensibilité au bruit en général. Ac est l'activité pratiquée.**

On voit notamment que parmi les différents facteurs non-acoustiques étudiés, l'activité pratiquée et la crainte exprimée vis-à-vis d'une installation industrielle expliquent le moins de variance constatée dans les réponses. Ce constat est mené pour l'ensemble des variables dépendantes concernant l'activité pratiquée (par exemple entre 2% pour A<sub>BI</sub>' et 9% pour A<sub>BR</sub>'). Concernant la crainte vis-à-vis d'une installation industrielle, le constat est mené pour les variables dépendantes A<sub>BI</sub>', A<sub>T</sub> et Per (par exemple entre 8% pour A<sub>BI</sub>' et 13% pour A<sub>T</sub>). La sensibilité déclarée au bruit en général explique quant à elle pour l'ensemble des variables dépendantes le plus grand pourcentage de variance expliquée (entre 10% pour A<sub>BI</sub>' et 21% pour A<sub>T</sub> et Per), suivie par la crainte exprimée vis-à-vis d'une infrastructure routière (entre 10% pour Per et 15% pour A<sub>BR</sub>').

Ces effets peuvent être visualisés sur la Figure 5.8. On voit ainsi que pour un facteur non-acoustique donné les tendances sont globalement les mêmes pour l'ensemble des

variables dépendantes. En considérant spécifiquement la Figure 5.8 a), b) et c), on voit qu'une augmentation des variables indépendantes a tendance à entraîner une augmentation des variables dépendantes. Par exemple, si l'on considère la Figure 5.8 c), nous voyons que de manière générale, plus les sujets se déclarent sensibles au bruit en général, plus ils se disent gênés par les bruits en présence et perturbés dans leurs activités. Ces résultats rejoignent ceux de la littérature (par exemple [MPA05]).



**Figure 5.8 : Effet des différents facteurs non-acoustiques sur les variables dépendantes considérées. A<sub>BI</sub>' , A<sub>BR</sub>' , A<sub>T</sub> et Per représentent respectivement, les réponses de gêne spécifique due au bruit industriel, les réponses de gêne spécifique due au bruit de la circulation routière, les réponses de gêne due à la gêne totale, et les réponses de perturbation ressentie. Les erreurs-types sont représentées au moyen de barres d'erreur autour des valeurs moyennes.**

Il est intéressant de s'attarder sur le facteur non-acoustique « activité pratiquée ». Nous voyons sur la Figure 5.8 d) des tendances très similaires concernant l'effet de l'activité pratiquée sur les variables dépendantes A<sub>BR</sub>' , A<sub>T</sub> et Per. Pour la variable dépendante A<sub>BI</sub>' , les tendances affichées sont proches mais semblent toutefois moins importantes, ce qui est cohérent avec les proportions de variance expliquée (cf. Tableau 5.11). Nous voyons logiquement que les sujets ayant pratiqué l'activité « repos » ont été les plus gênés et perturbés par les séquences proposées. Cependant les différences visualisées ne sont pas systématiquement significatives (dans la moitié des cas, d'après le test post hoc HSD de Tuckey). Cela est notamment dû au fait que nous disposons de peu de données pour cette activité, étant donné que peu de sujets l'ont pratiquée (cf. Tableau 5.10). L'activité pratiquée (sans considérer le « repos ») a peu d'importance lorsque l'on considère la gêne due au bruit industriel. En effet, seule les activités « concentration individuelle » et « jeu de société » entraînent des réponses de gêne significativement différentes (p<0.05). Par contre si l'on considère la gêne due au bruit de la circulation routière, la gêne totale et la perturbation

ressentie, alors l'activité « jeu de société » entraîne des réponses significativement plus faibles que l'activité « discussion » qui en retour entraîne des réponses significativement plus faibles que l'activité « concentration individuelle ».

#### 4.4. Identification des sources de bruit

A partir de l'ensemble des sources citées par les sujets à l'issue de chaque séquence, nous avons regroupé l'ensemble des verbatims dans 10 classes différentes. Quatre classes sont relatives aux types de véhicules :

- La classe **véhicules légers** regroupe par exemple les verbatims « voiture », « véhicule léger », etc. ;
- La classe **deux-roues** regroupe par exemple les verbatims « moto », « deux-roues », « mob' », etc. ;
- La classe **bus** regroupe essentiellement les verbatims « bus » ;
- La classe **poids lourds** regroupe essentiellement les verbatims « camion ».

Trois classes sont relatives aux types d'allures :

- La classe **accélérée** regroupe par exemple les verbatims « accélération », « redémarrage », « démarrage », etc. ;
- La classe **décélérée** regroupe par exemple les verbatims « freinage », « qui freine », « ralentissement », etc. ;
- La classe **stabilisée** regroupe par exemple les verbatims « en passage », « passante », « qui passe », etc.

Une classe est relative au **bruit industriel** et regroupe par exemple les verbatim « bruit industriel », « bruit sourd », « machine », « ventilation », etc.

Deux classes regroupent enfin (1) les verbatims liés aux bruits contrôlés dans l'expérimentation mais pas clairement identifiés et (2) les verbatims liés aux bruits de l'environnement non contrôlés dans l'expérimentation :

- La classe **général** regroupe par exemple les verbatim « bruit de transport », « circulation », « bruit routier », etc. ;
- La classe **autres** regroupe par exemple les verbatim « chien », « avion », « quad », « enfants », etc.

Ensuite pour chaque séquence, nous avons comptabilisé le nombre total d'occurrences pour chaque classe et avons ensuite calculé les proportions d'occurrences de la classe correspondante. Enfin nous avons moyenné ces proportions sur l'ensemble des séquences. Les résultats se trouvent ainsi résumés dans le Tableau 5.12.

	Véhicules légers	Poids lourds	Bus	Deux-roues	Accélérée	Décélérée	Stabilisée	Général	Autres
Proportion	0.28 (0.04)	0.16 (0.04)	0.07 (0.03)	0.17 (0.04)	0.02 (0.02)	0.03 (0.02)	0.03 (0.02)	0.18 (0.05)	0.06 (0.05)

**Tableau 5.12 : Proportion moyenne (sur l'ensemble des séquences) des occurrences de chaque classe. L'écart-type est indiqué entre parenthèses.**

Nous voyons dans le Tableau 5.12, que les écart-types sont faibles, ce qui montre que les proportions calculées sont peu variables pour les différentes séquences. Nous voyons également que les différents types de véhicules ont été plus reconnus et identifiés que les



différents types d'allures, dont les proportions apparaissent marginales. Parmi les types de véhicules, ce sont les véhicules légers qui ont été les plus identifiés, suivi par les deux-roues et les poids lourds dans des proportions comparables. Comparativement, les bus ont été très peu identifiés. Si l'on se réfère à la composition du trafic routier reconstitué (cf. Tableau 5.3) nous observons un décalage entre proportions de véhicules identifiés et celle de véhicules introduits. Notamment, la proportion de poids lourds identifiés est très supérieure à la proportion réelle introduite, tandis que la proportion de véhicules légers identifiés est très inférieure à la proportion réelle introduite. Ce décalage montre que les événements sonores les plus bruyants dans un trafic urbain sont les plus marquants pour les sujets et ce, malgré le plus grand temps de présence des véhicules légers.

## 4.5. Gênes partielles et gêne totale

Dans cette section, nous nous intéressons à la prédiction des gênes partielles due au bruit de la circulation routière et due au bruit industriel, sur la base des facteurs acoustiques. Pour cela, nous nous baserons sur les résultats des chapitres 3 et 4. Concernant le bruit industriel, étant donné que celui-ci est permanent et stable, les indices testés au Chapitre 4 seront naturellement testés de nouveau. Concernant le bruit de la circulation routière, dans les chapitres 3 et 4, nous avons mis en évidence des indices par catégorie de bruit de passage. La problématique est différente dans ce chapitre, puisqu'il s'agit ici d'un trafic reconstitué à partir de bruits de passage des différentes catégories. Il s'agira alors de voir si les indices proposés par catégorie permettent de décrire un trafic reconstitué. Il s'agira également de tester si d'anciens indices présentés au Chapitre 1 (tels que les indices  $L_{NP}$  et  $TNI$ ), sont à même de décrire des trafics de longue durée.

Nous étudierons également de potentielles interactions entre bruit industriel et bruit de la circulation routière au moyen de la représentation de Vos [Vos92] décrite au Chapitre 4 .

### 4.5.1. Prédiction de la gêne partielle due au bruit industriel

Le Tableau 5.13 présente les coefficients de corrélation entre les réponses moyennes de gêne partielle due au bruit industriel ( $A_{BI}'$ ) et les indices testés au Chapitre 4 et mis en avant par Alayrac *et al.* [AMVM+10]<sup>70</sup> pour caractériser les catégories perceptives de bruits industriels 2, 4 et 6, dont est issu le bruit industriel étudié dans ces travaux.

	$L_{Aeq,T}$ <sup>71</sup>	N	$L_N$	$N_{4-9Barks} - N_{2-3Barks}$
$A_{BI}'$	0.85 <sup>d</sup>	0.91 <sup>d</sup>	0.90 <sup>d</sup>	0.28 <sup>a</sup>

**Tableau 5.13 : Coefficients de corrélation calculés entre les réponses moyennes de gêne partielle due au bruit industriel ( $A_{BI}'$ ) et divers indices, calculés pour la voie gauche. <sup>a</sup> : non statistiquement significatif. <sup>d</sup> :  $p < 0.001$ .**

En considérant les deux voies indépendamment pour le calcul des indices, on voit que les indices  $L_{Aeq,T}$ , N et  $L_N$  sont corrélés de manière équivalente à  $A_{BI}'$ . Dans un souci de cohérence avec le Chapitre 4 , nous utiliserons la sonie N pour prédire cette gêne spécifique.

Nous avons donc effectué une analyse de régression linéaire entre les réponses moyennes de gêne partielle due au bruit industriel et les valeurs de la sonie N. Le résultat de cette analyse est montré dans le Tableau 5.14. On y a également fait figurer l'équation de

<sup>70</sup> Pour les raisons déjà données au chapitre 4 (non-variation du nombre de composantes spectrales de l'unique bruit industriel étudié ici), l'indice  $N_r$  (nombre de raies spectrales, cf. [AMVM+10]), ne sera pas considéré puisque cet indice, ne présentant pas de variation, ne conduira donc pas à une corrélation significative avec  $A_{BI}'$ .

<sup>71</sup> Notons que pour la voie droite les coefficients de corrélations pour les indices N et  $L_N$  sont légèrement inférieurs (respectivement  $r = 0.84$  ;  $p < 0.001$  et  $r = 0.84$  ;  $p < 0.001$ ).

régression entre les réponses moyennes de gêne partielle du bruit industriel et les valeurs de l'indice  $L_{Aeq,T}$ , en vue de l'utilisation de la représentation de Vos (cf. Chapitre 4, section 4.5.1).

Equation de régression	$r^2$	Err. stand.
$A_{BI}' = 0.27L_{Aeq,T} - 8.62$	0.72 <sup>d</sup>	0.38
$A_{BI}' = 1.25N - 1.31$	0.82 <sup>d</sup>	0.30

**Tableau 5.14 : Equations de régression pour la prédiction de la gêne partielle due au bruit industriel ( $A_{BI}'$ ) et en vue de l'utilisation de la représentation de Vos [Vos92]. <sup>d</sup> :  $p < 0.001$ .**

Si nous comparons les corrélations calculées sur les données de cette expérimentation avec les corrélations calculées au Chapitre 4 (cf. Tableau 4.11), nous observons que celles-ci sont plus faibles. Cela peut avoir différentes origines : (1) l'évaluation de la gêne en environnement simulé permet l'étude de facteurs non-acoustiques, et limite l'influence des facteurs acoustiques sur les réponses de gêne et (2) les conditions de cette expérimentation sont moins contrôlées que lors des précédentes expériences. D'autres sources de bruit présentes dans l'environnement extérieur de la villa peuvent avoir « pollué », malgré toute l'attention qui a été portée, la mesure des séquences sonores diffusées en façade de la villa, voire peut-être aussi « pollué » les jugements eux-mêmes. Ce dernier aspect rejoint le cas des personnes enquêtées à leur domicile lorsqu'il leur est demandé d'évaluer la gêne ressentie en pensant à une source de bruit de leur environnement.

#### 4.5.2. Prédiction de la gêne partielle due au bruit de la circulation routière

Le Tableau 5.15 présente les corrélations calculées entre différents indices et les réponses moyennes de gêne partielle due au bruit de la circulation routière. Nous avons fait figurer les indices mis en avant pour caractériser les différentes catégories perceptives et cognitives de bruits de passage (cf. Chapitre 3, section 2.3.3), ainsi que des indices plus adaptés pour la caractérisation de trafic routiers de longues durées (cf. Chapitre 1, section 2.1.3).

	$L_{Aeq,T}$ <sup>72</sup>	$L_{MF}$	N	$N_5$	$N_{15-18}$	R	$R_{max}$	F	$F_{max}$	$L_{NP}$	TNI
$A_{BR}'$	0.94 <sup>d</sup>	0.93 <sup>d</sup>	0.92 <sup>d</sup>	0.94 <sup>d</sup>	0.94 <sup>d</sup>	0.94 <sup>d</sup>	0.39 <sup>a</sup>	0.90 <sup>d</sup>	0.83 <sup>d</sup>	0.95 <sup>d</sup>	0.65 <sup>c</sup>

**Tableau 5.15<sup>73</sup> : Coefficients de corrélation calculés entre les réponses moyennes de gêne partielle due au bruit de la circulation routière ( $A_{BR}'$ ) et divers indices, calculés pour la voie gauche. <sup>a</sup> : non statistiquement significatif. <sup>c</sup> :  $p < 0.01$ . <sup>d</sup> :  $p < 0.001$ .**

Nous voyons que les indices mis en avant par catégorie sont hautement corrélés à la gêne spécifique due au bruit de la circulation routière (excepté  $R_{max}$ ). Les indices plus

<sup>72</sup> Notons que pour la voie droite les coefficients de corrélations sont globalement les mêmes. A noter des différences pour les indices N,  $F_{max}$ ,  $R_{max}$  et TNI (respectivement  $r = 0.94$ ,  $p < 0.001$  ;  $r = 0.7$ ,  $p < 0.01$  ;  $r = -0.14$ , n.s. ; et  $r = 0.91$ ,  $p < 0.001$ )).

<sup>73</sup> Dans l'ANNEXE D, nous avons mis en évidence deux indices (CGS exprimé en Barks et l'indice  $N_5-N$ ), pour expliquer le désagrément sonore des bruits de passage toutes catégories perceptives confondues. Les notions de désagrément sonore et de gêne sonore, bien que différentes, sont deux notions proches dans le contexte d'études en laboratoire. Les séquences de bruit de la circulation routière étudiées dans cette expérimentation ne variant qu'en niveau sonore, la non-variation de ces indices conduira à des corrélations non significatives. Pour cette raison, ces deux indices ne sont pas considérés dans le contexte de cette expérimentation.

anciens adaptés à la caractérisation d'un trafic routier de longue durée (TNI et  $L_{NP}$ ) ne sont pas mieux corrélés que des indices classiques tels que l'indice  $L_{Aeq,T}$  ou la sonie N.

Nous avons pratiqué des analyses de régression linéaire simples et multiples dans l'optique de prédire la gêne partielle due au bruit de la circulation routière en testant les indices et combinaisons d'indices mis en avant au cours des précédents chapitre. Etant donné la forte colinéarité de ces indices, imputable au fait que nous avons une séquence unique de bruit routier dont seul le niveau sonore varie, aucune des combinaisons d'indices n'est pertinente dans ce cas présent. Pour tester leur apport, il faudrait construire différentes séquences dont la composition (en termes de catégories perceptives représentées) varie également.

Par souci de cohérence avec les chapitres précédents, nous utiliserons la sonie N pour prédire la gêne partielle due au bruit de la circulation routière. Ce choix est par ailleurs pertinent étant donné qu'il s'agit du dénominateur commun entre toutes les catégories (excepté pour la catégorie 6, mais faiblement représentée à hauteur de 7.4% du nombre total de bruits de passage de la séquence).

Le Tableau 5.16 montre les résultats de l'analyse de régression linéaire menée entre les réponses moyennes de gêne partielle due au bruit de la circulation routière et les valeurs de la sonie N. On y a fait également figurer l'équation de régression qui permet de prédire la gêne partielle due au bruit de la circulation routière en fonction de l'indice  $L_{Aeq,T}$ , en vue de la représentation de Vos [Vos92].

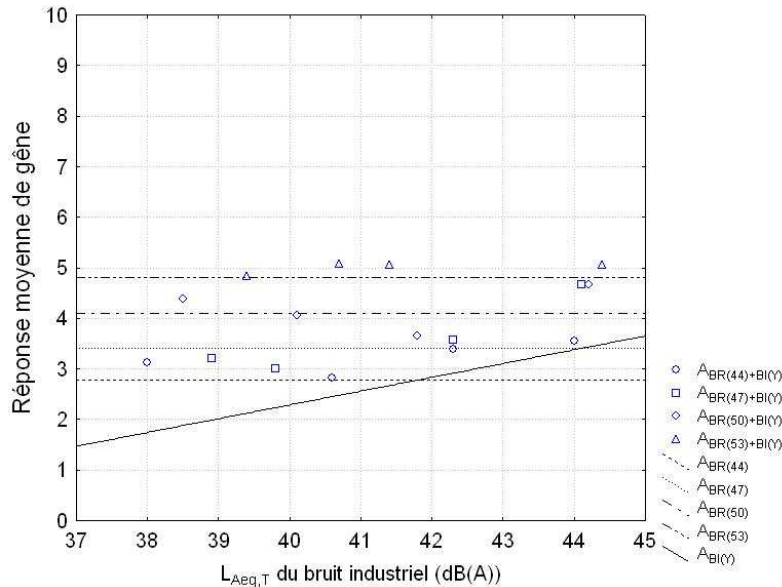
Equation de régression	$r^2$	Err. stand.
$A_{BR}' = 0.25L_{Aeq,T} - 9.11$	0.88 <sup>d</sup>	0.31
$A_{BR}' = 0.58N - 0.14$	0.85 <sup>d</sup>	0.34

**Tableau 5.16 : Equations de régression pour la prédiction de la gêne partielle due au bruit de la circulation routière et en vue de la représentation de Vos [Vos92].<sup>d</sup> :  $p < 0.001$ .**

### 4.5.3. Représentation de Vos [Vos92]

Afin de mettre à jour d'éventuelles interactions entre les séquences de bruit combinées dans le cadre de ce test d'évaluation de la gêne due à la multi-exposition au bruit industriel et au bruit de la circulation routière en environnement simulé, nous représentons la gêne totale et les gênes partielles des bruits combinés en adaptant la représentation de Vos [Vos92] selon le principe décrit au Chapitre 4 (section 4.5.1).

La Figure 5.9 illustre la représentation de Vos [Vos92] appliquée à nos données, en utilisant notamment les équations fournies dans le Tableau 5.14 et le Tableau 5.16.



**Figure 5.9 : Représentation de la gêne totale et des gênes partielles pour le test d'évaluation de la gêne en situation de multi-exposition au bruit industriel et au bruit de la circulation routière en environnement simulé, selon la méthode de Vos [Vos92].**

Nous voyons que sur la dynamique de niveaux sonores envisagés pour cette expérimentation, le bruit industriel est généralement la source de bruit jugée la moins gênante (c'est le cas pour 13 combinaisons sur 16). On voit également que la gêne totale semble généralement guidée par la gêne de la source la plus gênante.

Afin de confirmer ces observations nous avons effectué une série de tests *t* afin de voir s'il existe, pour les 16 combinaisons, des différences significatives entre la gêne totale et la gêne spécifique maximale. Ces tests *t* nous ont révélé que pour 15 des 16 combinaisons il n'existe aucune différence significative entre gêne totale et gêne spécifique maximale. Dans ce cas, nous observons donc **un effet de source dominante prononcé entre les bruits combinés.**

#### 4.6. Prédiction de la gêne totale : test des modèles de multi-exposition

A partir des données récoltées dans le cadre de ces expérimentations, nous présentons dans cette section l'évaluation des 9 modèles de gêne totale retenus au Chapitre 4 (5 modèles psychophysiques et 4 modèles perceptifs – cf. Chapitre 4 , section 4.6.1). Nous conservons les différentes variantes envisagées : une variante « niveau sonore » et une variante « sonie » pour les modèles psychophysiques, une variante « observée » et une variante « prédite » pour les modèles perceptifs (cf. Chapitre 4 , section 4.6.2). La démarche d'évaluation des modèles est identique à celle développée au Chapitre 4 (section 4.6.3) : une évaluation de la qualité d'ajustement des données et ses paramètres (le coefficient de détermination  $R^2$  et l'erreur type de l'estimation), et une évaluation de la qualité prédictive des modèles et ses paramètres (le coefficient de corrélation de Bravais-Pearson, la pente et l'ordonnée à l'origine).

Les gênes partielles observées et prédites sont respectivement notées  $A_{BI}$  ou  $BR'$  et  $\hat{A}_{BI}$  ou  $\hat{BR}'$ .

##### 4.6.1. Remarques générales

Nous avons de nouveau (cf. Chapitre 4 , section 4.6.4) choisi le bruit industriel comme source de référence pour le calcul des pénalités dépendantes du niveau en ce qui concerne

le modèle de sommation pondérée. C'est pour un paramètre  $k$  égal à 7 que nous obtenons une prédiction optimale. Cette valeur n'avait pas été trouvée lors des précédentes expérimentations en laboratoire (cf. Tableau 4.16).

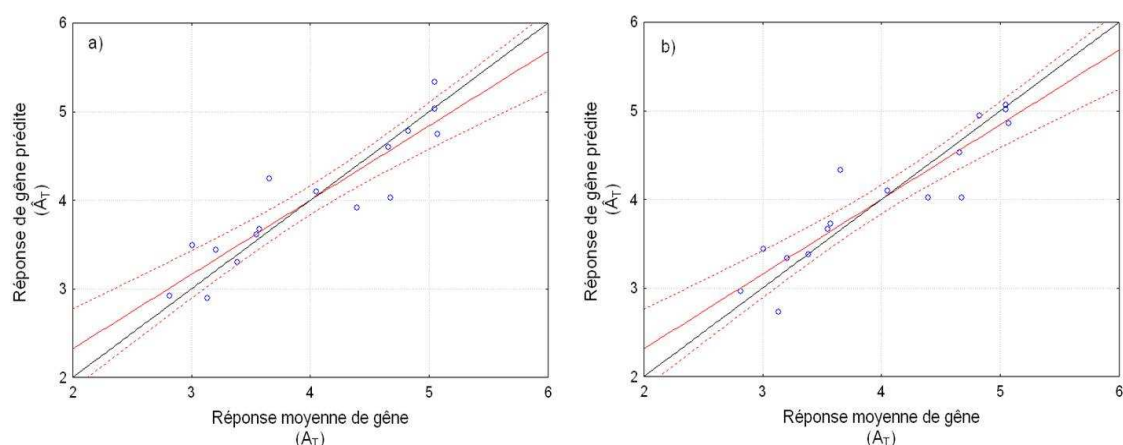
Concernant le modèle de sommation vectorielle l'angle  $\alpha$  optimal pour les deux variantes a été calculé à l'aide des équations (4.1) et (4.2). Pour les variantes « observée » et « prédite », des angles  $\alpha_o$  et  $\alpha_p$  valant respectivement  $106^\circ$  et  $105^\circ$  sont obtenus afin d'atteindre une prédiction optimale. Ces valeurs sont assez proches des angles obtenus au cours du Chapitre 4 pour ces deux variantes (cf. Tableau 4.16).

Comme lors des expérimentations dont on a rendu compte au Chapitre 4, les résultats du modèle mixte psychophysique ne sont pas exposés étant donné la redondance des variables indépendantes, résultant de la dynamique des niveaux sonores choisie.

#### 4.6.2. Evaluation et comparaison des modèles de gêne totale

Les résultats des analyses menées dans le cadre de ce test d'évaluation de la gêne en environnement simulé, sont donnés dans le Tableau 5.17.

**Concernant les modèles psychophysiques**, on voit selon les paramètres définis (cf. Chapitre 4, section 4.6.3), les différences entre les modèles psychophysiques sont ténues. On constate également qu'il n'est pas possible d'établir la supériorité d'un modèle (ou de ses variantes) sur un autre modèle. On note toutefois que le modèle de sommation pondérée semble afficher une prédiction optimale de la gêne totale. La variante « sonie » du modèle des effets indépendants, qui était ressortie au travers du bilan effectué au Chapitre 4 (section 4.6.4.2), conduit à une prédiction de la gêne totale légèrement plus faible que le modèle de sommation pondérée, et on remarque que le coefficient de régression (et le coefficient de régression standardisé) de la variable indépendante  $N_{BI}$ , même s'il est non significatif, est du même ordre de grandeur que ceux apparaissant dans l'équation moyenne (4.3) donnée au Chapitre 4. La Figure 5.10 confronte les réponses de gêne prédites respectivement par le modèle des effets indépendants à variante « sonie » (panneau a)) et par le modèle de sommation pondérée (panneau b)) aux réponses moyennes de gêne totale observée au cours de cette expérimentation. Nous voyons que pour ces deux modèles les nuages de points sont très proches et ne montrent aucune tendance à la sous-estimation ni à la surestimation.



**Figure 5.10 : Nuages de points représentant les réponses de gêne prédites ( $\hat{A}_T$ ) en fonction des réponses moyennes de gêne totale observée ( $A_T$ ) pour a) le modèle des effets indépendants à variante « sonie » et b) le modèle de sommation pondérée.**

**Concernant les modèles perceptifs**, nous constatons d'emblée que la variante « observée » fournit de meilleurs résultats que la variante « prédite ». On note toutefois que la différence entre les deux variantes est moindre pour le modèle de source dominante. En

considérant uniquement la variante « observée », le modèle de source dominante fournit de moins bons résultats que les autres modèles perceptifs. Les différences entre les modèles restant (somme vectorielle, régression linéaire et mixte perceptif) sont ténues, même si le modèle de somme vectorielle ressort. On voit aussi que le coefficient de régression de la variable indépendante  $|A_{BR}'-A_{BI}'|$  n'est pas significatif, ce qui signifie que le modèle mixte se ramène dans ce cas au modèle de régression linéaire. Si l'on considère uniquement la variante « prédite », on voit que les différences entre les modèles perceptifs sont ténues. Nous voyons que le modèle de somme vectorielle affiche cependant la meilleure prédiction de la gêne totale. Notons que la gêne partielle prédite due au bruit de la circulation routière ( $\hat{A}_{BR}'$ ) est toujours supérieure à la gêne partielle prédite due au bruit industriel ( $\hat{A}_{BI}'$ ). Les variables indépendantes du modèle mixte perceptif apparaissent alors redondantes, et nous n'avons donc pas affiché dans le Tableau 5.17 les résultats concernant la variante « prédite » de ce modèle.

	modèle	Equation de régression	R <sup>2</sup>	Std. err.	r <sup>d</sup>	pente	Ord. Or.
Modèles psychophysiques	Somme énergétique	$A_T = 0.25L_T^d - 8.12$ $A_T = 1.03N_T^d - 0.66$	0.82 0.80	0.35 0.37	0.91 0.89	0.82 0.80	0.72 0.81
	Différences énergétiques	$A_T = 0.30(1.08)L_T^d - 0.05(-0.22) L_{BR}-L_{BI} ^a - 9.82$	0.82	0.34	0.92	0.84	0.63
		$A_T = 0.79(0.68)N_T^d + 0.17(0.29) N_{BR}-N_{BI} ^a - 0.20$	0.81	0.35	0.92	0.84	0.64
	Effets indépendants	$A_T = 0.22(0.85)L_{BR}^d + 0.08(0.21)L_{BI}^a - 10.36$	0.80	0.36	0.91	0.82	0.70
		$A_T = 0.52(0.87)N_{BR}^d + 0.25(0.15)N_{BI}^a - 0.32$	0.81	0.35	0.92	0.84	0.64
Mixte	...	...	...	...	...	...	
Somme pondérée	$A_T = 0.31L_T^d - 10.24$	0.84	0.33	0.92	0.84	0.62	
Modèles perceptifs	Source dominante	$A_T = 0.93\max(A_{BR}', A_{BI}')^d + 0.44$ $A_T = 0.96\max(\hat{A}_{BR}', \hat{A}_{BI}')^d + 0.37$	0.88 0.82	0.29 0.36	0.94 0.90	0.95 0.85	0.04 0.38
	Somme vectorielle	$A_T = 1.05\sqrt{(A_{BR}'^2 + A_{BI}'^2 + 2A_{BR}'A_{BI}'\cos\alpha_0)^d} - 0.18$	0.99	0.10	0.99	0.94	0.23
		$A_T = 1.04\sqrt{(\hat{A}_{BR}'^2 + \hat{A}_{BI}'^2 + 2\hat{A}_{BR}'\hat{A}_{BI}'\cos\alpha_p)^d} - 0.17$	0.83	0.34	0.91	0.80	0.83
	Régression linéaire	$A_T = 0.81(0.85)A_{BR}'^d + 0.48(0.41)A_{BI}'^d - 0.29$ $A_T = 0.90(0.87)\hat{A}_{BR}'^d + 0.20(0.15)\hat{A}_{BI}'^a + 0.07$	0.98 0.81	0.13 0.35	0.99 0.92	0.98 0.84	0.08 0.64
Mixte	$A_T = 0.64(0.67)A_{BR}'^d + 0.62(0.53)A_{BI}'^d + 0.19(0.21) A_{BR}'-A_{BI}' ^a - 0.27$	0.98	0.12	0.99	0.98	0.07	
		...	...	...	...	...	

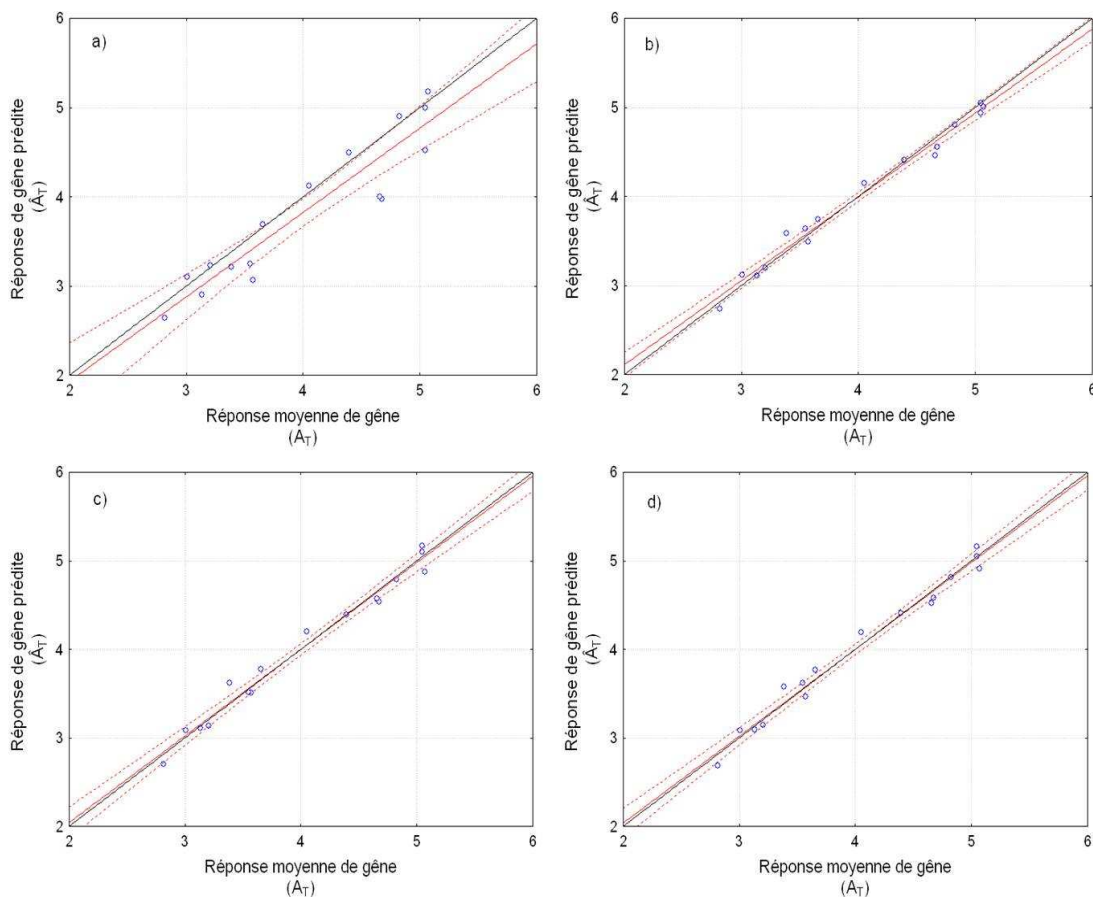
**Tableau 5.17 : Evaluation des modèles de gêne totale pour la multi-exposition au bruit industriel et au bruit de la circulation routière évaluée en environnement simulé. Dans les équations de régression, les chiffres en italique entre parenthèses correspondent aux coefficients de régression standardisés. <sup>a</sup> : n.s. <sup>b</sup> : p<0.05. <sup>c</sup> : p<0.01. <sup>d</sup> : p<0.001.**

La Figure 5.11 présente les confrontations des réponses de gêne totale prédites par la variante « observée » des modèles perceptifs aux réponses moyennes de gêne totale observée. On voit sur la Figure 5.11 que le modèle de source dominante a notamment tendance à sous-estimer la gêne totale. Le modèle de source dominante conduit aux résultats les moins bons, alors que nous avons observé en section 4.5.3 un effet de source dominante prononcé puisque la gêne totale n'était significativement supérieure à la gêne spécifique maximale que pour une combinaison. Les situations de multi-exposition auraient

donc pu être favorables à ce modèle. Ce constat est en accord avec celui observé lors de l'étude de la gêne en situation de multi-exposition au bruit industriel et aux bruits de passage des différentes catégories (cf. Chapitre 4 , Figure 4.10). Nous voyons par ailleurs que les 3 autres modèles perceptifs montrent un nuage de points très peu dispersé et bien aligné le long de la bissectrice, ce qui signifie que la prédiction est de très bonne qualité, et ne montre aucune tendance à la sous-estimation ou à la surestimation.

Dans le but d'alléger la lecture, nous avons choisi de ne pas montrer une figure analogue à la Figure 5.11, en ce qui concerne la variante « prédite » des modèles perceptifs. Les tendances sont en effet analogues à celles présentées sur la Figure 5.10 et obtenues pour les modèles psychophysiques retenus : les nuages de points sont assez dispersés, et ne montrent aucune tendance à la sous-estimation ni à la surestimation, excepté pour le modèle de source dominante (tendance à la sous-estimation de la gêne totale).

**Le bilan de l'évaluation des modèles de gêne totale** que l'on peut dresser à la suite de cette expérimentation en environnement simulé est semblable au bilan dressé au Chapitre 4 (section 4.6.4), **concernant les expérimentations en laboratoire : la qualité de prédiction des modèles perceptifs est, quelle que soit la variante considérée, généralement supérieure à la qualité de prédiction des modèles psychophysiques.** Par ailleurs, comme au Chapitre 4 (section 5.3), on constate concernant les modèles perceptifs, que la variante « observée » est plus performante que la variante « prédite ». Ceci est imputable au cumul des erreurs de prédiction des gênes partielles et des erreurs de prédiction du modèle de gêne totale.



**Figure 5.11 : Nuages de points représentant les réponses de gêne prédite (variante « observée ») en fonction des réponses moyennes de gêne observées pour a) le modèle de source dominante, b) le modèle de sommation vectorielle, c) le modèle de régression linéaire, et d) le modèle mixte perceptif.**

## 5. Confrontations

Conformément à la démarche générale décrite à l'issue du Chapitre 1 (section 5), il s'agit désormais, concernant les modèles de gêne totale, d'effectuer la confrontation des différents résultats obtenus en laboratoire aux données récoltées en environnement simulé d'une part, puis aux données de l'enquête *in situ* d'autre part. Les résultats obtenus en environnement simulé seront également confrontés aux données de l'enquête *in situ* (ces dernières sont disponibles dans le rapport final du projet de recherche NOISI-EXPO [EEO10]).

On considèrera uniquement les modèles mis en exergue au Chapitre 4 : effets indépendants (variante « sonie ») pour les modèles psychophysiques, sommation vectorielle, régression linéaire et mixte perceptif pour les modèles perceptifs.

### 5.1. Mise en œuvre

#### 5.1.1. A partir des résultats obtenus en laboratoire

Dans le Chapitre 4, nous avons proposé des équations moyennes pour les différents modèles prédictifs de la gêne totale, qui sont ressortis pertinents au travers de nos analyses. Les données relatives au test en environnement simulé d'une part et à l'enquête *in situ* d'autre part vont être injectées dans ces équations moyennes (cf. équations (4.3) à (4.7)), et dans l'équation du modèle de sommation vectorielle en utilisant les valeurs moyennes des angles  $\alpha_o$  et  $\alpha_p$  (cf. Tableau 4.16). Le Tableau 5.18 résume cette procédure.

Modèle	Variante (équations en laboratoire)	Données (Environnement simulé)	Données ( <i>In situ</i> )
Effets indépendants	« sonie » Equation (4.3)	$N_{BI}, N_{BR}$	...
Sommation Vectorielle	« observée » $\alpha_o = 101^\circ$ « prédite » $\alpha_p = 101^\circ$	$A_{BI}', A_{BR}'$ $\hat{A}_{BI}', \hat{A}_{BR}'$	$A_{BI}', A_{BR}'$ ...
Régression linéaire	« observée » Equation (4.4) « Prédite » Equation (4.5)	$A_{BI}', A_{BR}'$ $\hat{A}_{BI}', \hat{A}_{BR}'$	$A_{BI}', A_{BR}'$ ...
Mixte perceptif	« observée » Equation (4.6) « Prédite » Equation (4.7)	$A_{BI}', A_{BR}'$ $\hat{A}_{BI}', \hat{A}_{BR}'$	$A_{BI}', A_{BR}'$ ...

**Tableau 5.18 : Mise en œuvre des confrontations à partir des résultats obtenus en laboratoire.**

Par exemple, nous lisons que nous injecterons les valeurs de sonie du bruit industriel et du bruit de la circulation routière, mesurées au cours de l'expérimentation en environnement simulé, dans l'équation moyenne (4.3) du modèle des effets indépendants, proposée au Chapitre 4. De la même manière, nous injecterons les valeurs de la gêne partielle prédite due au bruit industriel et de la gêne partielle prédite due au bruit de la



circulation routière obtenue lors de l'expérimentation en environnement simulé dans l'équation moyenne (4.5) du modèle de régression linéaire, proposée au Chapitre 4 . Les valeurs de la gêne partielle prédite due au bruit industriel et celles de gêne partielle prédite due au bruit de la circulation routière sont calculées à partir de la sonie des bruits mesurés, et des équations correspondantes (cf. Tableau 5.14 et Tableau 5.16).

Etant donné que nous ne disposons pas des valeurs de sonie mesurée lors de l'enquête *in situ*, nous limitons la confrontation à l'injection des gênes spécifiques observées *in situ* (et données dans [EEO10]) dans les équations moyennes de la variante « observée » des modèles perceptifs, proposées au Chapitre 4 .

Nous pourrions alors apprécier la qualité prédictive (à l'aide du coefficient de corrélation de Bravais-Pearson, de l'ordonnée à l'origine et de la pente) des modèles de gêne totale en confrontant la gêne totale prédite aux réponses de gêne totale observées en environnement simulé ou *in situ*.

### 5.1.2. A partir des résultats obtenus en environnement simulé

Le Tableau 5.19 résume la procédure employée. On y lit par exemple que nous injecterons les valeurs de la gêne partielle observée due au bruit industriel et de la gêne partielle observée due au bruit de la circulation routière obtenue lors de l'enquête *in situ* dans l'équation du modèle de régression linéaire, proposée au Chapitre 5 (cf. Tableau 5.17).

Nous apprécierons la qualité prédictive de ces modèles en confrontant les réponses de gêne totale ainsi prédites aux réponses de gêne totale observées *in situ*.

Modèle	Variante (Equations en environnement simulé)	Données ( <i>In situ</i> )
Sommation Vectorielle	« observée » $\alpha_0 = 106^\circ$	$A_{BI}'$ , $A_{BR}'$
Régression linéaire	« observée » Equation (4.4)	$A_{BI}'$ , $A_{BR}'$
Mixte perceptif	« observée » Equation (4.6)	$A_{BI}'$ , $A_{BR}'$

**Tableau 5.19 : Mise en œuvre des confrontations à partir des résultats obtenus en environnement simulé.**

## 5.2. Résultats des confrontations

Les résultats des confrontations sont donnés dans le Tableau 5.20, selon la mise en œuvre décrite en sections 5.1.1 et 5.1.2. Les résultats sont donnés au moyen du coefficient de corrélation entre les réponses de gênes totale récoltées au cours des différentes expérimentations et les réponses de gêne totale prédites par les équations des modèles considérés. Nous avons fait figurer également la pente et l'ordonnée à l'origine (ord. or.) de la droite des équations de régression correspondantes.

**Concernant la confrontation entre les équations moyennes établies en laboratoire et les données récoltées via l'expérimentation en environnement simulé**, l'évaluation de la qualité prédictive montre que le modèle des effets indépendants surestime très largement la gêne totale. Les modèles perceptifs confrontés, considérant soit les gênes partielles observées soit les gênes partielles prédites dans les équations moyennes, ont de meilleures performances que le modèle des effets indépendants. Pour les modèles perceptifs considérés, les confrontations menées à partir des gênes partielles observées montrent que les trois modèles ont des performances similaires, avec une légère tendance à

la surestimation, ce que l'on peut observer sur le panneau a) de la Figure 5.12. Les confrontations menées à partir des gènes partielles prédites montrent également la proximité entre les trois modèles testés, avec également une légère tendance à la surestimation de la gène totale (cf. panneau b) de la Figure 5.12). D'après le Tableau 5.20 et les panneaux a) et b) de la Figure 5.12, nous constatons que la différence entre les résultats obtenus à partir des variantes « observées » et ceux obtenus à partir des variantes « prédites » réside dans le fait que les nuages de points sont plus dispersés lorsque l'on utilise les gènes partielles prédites.

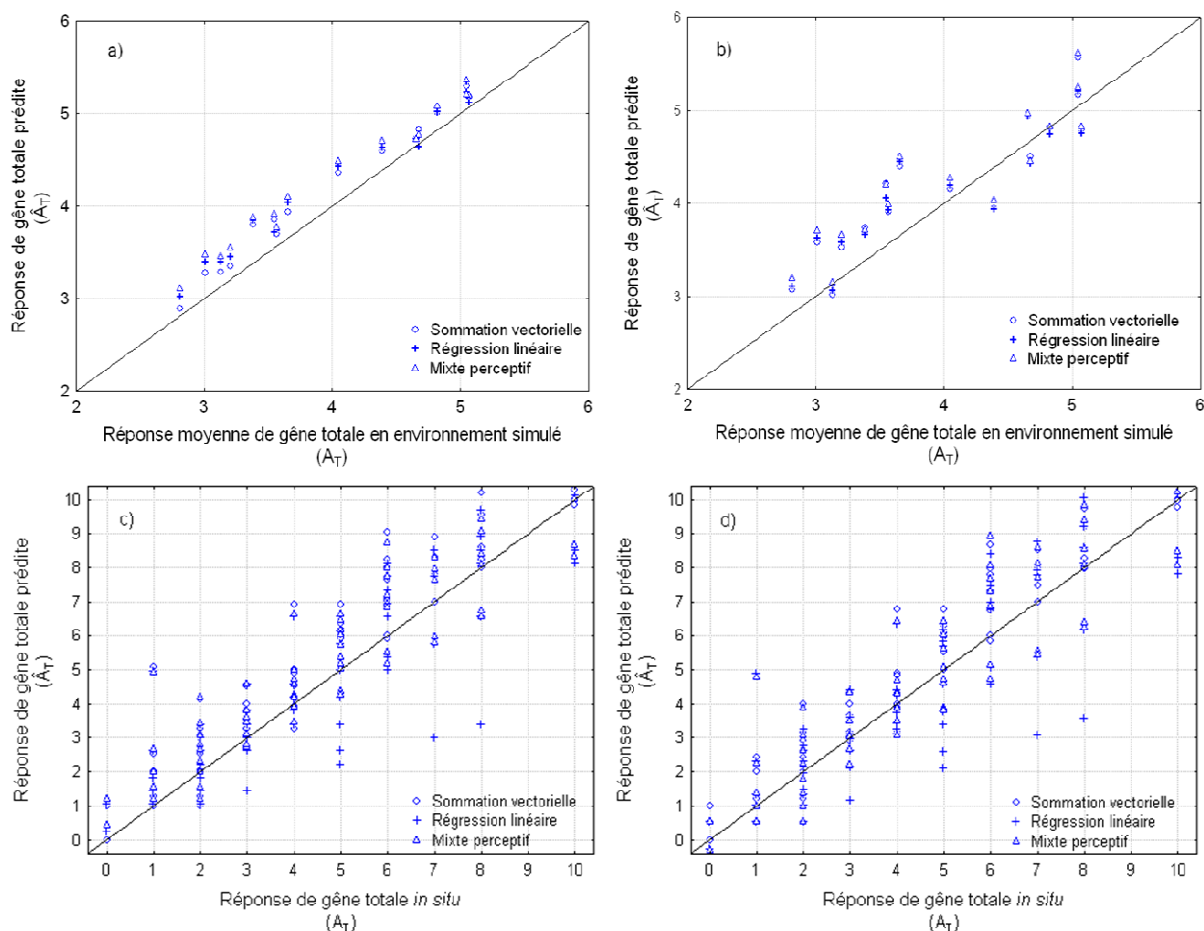
**Concernant la confrontation entre les équations moyennes établies en laboratoire et les données récoltées via l'enquête *in situ***, le Tableau 5.20 et le panneau c) de la Figure 5.12 nous montrent que les trois modèles affichent une légère tendance générale à la surestimation. Les modèles de sommation vectorielle et mixte perceptif sont assez proches même si le modèle de sommation vectorielle affiche les meilleures performances (cf. Tableau 5.20). Le modèle de régression linéaire montre quant à lui de moins bonnes performances, et notamment un nuage de points bien plus dispersé par rapport aux autres modèles.

	modèle	données	$r^d$	penne	Ord. or.
Equations laboratoire vs Données environnement simulé	Effets indépendants	$N_{BI}, N_{BR}$	0.92	0.86	2.70
	Sommation Vectorielle	$A_{BI}', A_{BR}'$	0.99	0.98	0.28
		$\hat{A}_{BI}', \hat{A}_{BR}'$	0.90	0.83	0.90
	Régression linéaire	$A_{BI}', A_{BR}'$	0.99	0.92	0.55
		$\hat{A}_{BI}', \hat{A}_{BR}'$	0.90	0.81	0.96
	Mixte perceptif	$A_{BI}', A_{BR}'$	0.99	0.90	0.71
$\hat{A}_{BI}', \hat{A}_{BR}'$		0.90	0.79	1.11	
Equations laboratoire vs Données <i>in situ</i>	Sommation Vectorielle	$A_{BI}', A_{BR}'$	0.95	1.05	0.49
	Régression linéaire	$A_{BI}', A_{BR}'$	0.85	0.85	0.75
	Mixte perceptif	$A_{BI}', A_{BR}'$	0.93	0.90	0.89
Equations environnement simulé vs Données <i>in situ</i>	Sommation Vectorielle	$A_{BI}', A_{BR}'$	0.96	1.02	0.47
	Régression linéaire	$A_{BI}', A_{BR}'$	0.86	0.92	0.26
	Mixte perceptif	$A_{BI}', A_{BR}'$	0.92	0.99	0.23

**Tableau 5.20 : Bilan des confrontations. <sup>d</sup> :  $p < 0.001$ .**

**Concernant la confrontation entre les équations établies en environnement simulé et les données récoltées via l'enquête *in situ***, le bilan tiré à partir du Tableau 5.20 et du panneau d) de la Figure 5.12 est très similaire à celui dressé au paragraphe précédent : les modèles affichent une légère tendance générale à la surestimation et le

modèle de sommation vectorielle, s'il apparait le plus performant, est suivi de près par le modèle mixte perceptif ; le modèle de régression linéaire affichant quant à lui un nuage de points bien plus dispersé.



**Figure 5.12 : Représentation graphique des confrontations. a) Equations moyennes établies en laboratoire testées sur les réponses de gène partielle observées récoltées en environnement simulé. b) Equations moyennes établies en laboratoire et testées sur les réponses de gène partielle prédites récoltées en environnement simulé. c) Equations moyennes établies en laboratoire et testées sur les données observées lors de l'enquête *in situ*. d) Equations établies en environnement simulé et testées sur les données observées lors de l'enquête *in situ*.**

En comparant les panneaux c) et d) de la Figure 5.12, nous voyons que les équations établies en laboratoire et en environnement simulé, et testées sur les données récoltées *in situ*, offrent une qualité prédictive similaire. On remarque notamment que les équations établies en environnement simulé et testées sur les données *in situ* sembleraient moins surestimer la gène totale que les équations moyennes établies en laboratoire, dans le cas des modèles mixte perceptif et de régression linéaire (cf. ordonnées à l'origine dans le Tableau 5.20 et nuages de points des panneaux c) et d) de la Figure 5.12). Soulignons que pour le modèle le plus performant (le modèle de sommation vectorielle), sa qualité prédictive lorsqu'il est construit en laboratoire (angle de 101°) est comparable à sa qualité prédictive lorsqu'il est construit en environnement simulé (angle de 106°), et confrontés dans les deux cas aux données provenant de l'enquête *in situ*.

Ces observations sont confirmées par l'analyse des résultats présentés dans le Tableau 5.20. Pour un modèle perceptif donné, il apparaît une qualité prédictive similaire des équations établies en laboratoire et en environnement simulé, et testées sur les données récoltées *in situ*. Les différences constatées entre les coefficients de corrélation donnés, bien

que légères, sont significatives [How98]. L'observation des panneaux c) et d) de la Figure 5.12 attestent alors que bien que les équations testées aient été établies à partir de données récoltées au cours de deux expériences aux protocoles très différents (« en laboratoire », et « en environnement simulé »), les qualités prédictives sont très proches lorsqu'elles sont confrontées à des données recueillies *in situ*. L'intérêt de conduire une évaluation de la gêne en laboratoire est de pouvoir étudier un plus grand nombre de stimuli en contrôlant un plus grand nombre de facteurs expérimentaux. L'intérêt de conduire une évaluation de la gêne en environnement simulé est de pouvoir accéder à certains facteurs non-acoustiques, mais par la durée de l'expérimentation plus importante cela limite le nombre de facteurs expérimentaux contrôlés, et donc le nombre de stimuli. Tout en ayant conscience de ces différents intérêts, nos résultats tendent à montrer que les évaluations de la gêne en laboratoire restent pertinentes.

## 6. Discussion

### 6.1. Facteurs acoustiques et facteurs non-acoustiques

Lorsque nous avons étudié l'effet des facteurs acoustiques introduits expérimentalement, i.e. « le Niveau de bruit industriel » et « le Niveau de bruit routier », nous avons montré au travers des ANOVA à mesures répétées pratiquées que l'exposition au bruit routier n'a pas d'effet significatif sur la gêne partielle due au bruit industriel, et que l'exposition au bruit industriel n'a pas non plus d'effet significatif sur la gêne partielle due au bruit de la circulation routière. Ainsi, nous ne constatons pas d'effet d'inhibition de la gêne partielle due à un bruit en présence de l'autre bruit, comme cela a pu être le cas dans de précédents travaux (par exemple [Bot71]). Une explication peut résider dans le fait que généralement dans les séquences choisies, la différence de niveaux entre le bruit industriel et le bruit de la circulation routière est élevée, notamment en raison de pics d'énergie dus au passage des différents véhicules. Etant donné la nature du bruit industriel (permanent et stable), lorsque les véhicules routiers sont présents, ceux-ci masquent presque totalement le bruit industriel. On se ramène alors au cas où nous aurions des expositions au bruit de la circulation routière et au bruit industriel successives dans le temps, sans recouvrement temporel.

Etant donné que nous avons pu évaluer les pourcentages de variance expliquée par chacun des facteurs acoustiques et non-acoustiques, il nous paraît intéressant de les comparer. En prenant l'exemple de la gêne partielle due au bruit de la circulation routière, nous voyons dans le Tableau 5.6 et le Tableau 5.11 que le facteur acoustique « Niveau de bruit routier » explique environ 11% de la variance constatée tandis que les facteurs non-acoustiques « crainte exprimée vis-à-vis d'une infrastructure de transport », « sensibilité au bruit en général », et « activité pratiquée » expliquent respectivement environ 10%, 18% et 9% de la variance constatée. Ces différences dans les proportions rappellent des ordres de grandeurs rapportés à partir de données d'enquêtes *in situ*. Par exemple Langdon [Lan76a, Lan76c] a montré que la sensibilité au bruit explique une plus grande part de variance que l'exposition au bruit. Job [Job88] rapporte que la sensibilité permet d'expliquer un pourcentage de variance constatée équivalent à celui expliqué par l'exposition au bruit. Les résultats rapportés dans ce Chapitre 5 sont donc cohérents avec ceux de la littérature. Cependant il est nécessaire de garder en mémoire que (1) une expérimentation en environnement simulé même si elle nous permet d'accéder à certains facteurs non-

acoustiques reste éloignée d'une enquête *in situ* et (2) les facteurs acoustiques et non-acoustiques n'ont pas été étudiés par les mêmes analyses (ce qui aurait été possible en employant un échantillonnage des sujets adapté à cet effet) il est donc possible qu'au cours d'une même analyse les proportions se révèlent différentes.

De précédents travaux relatent des expérimentations similaires, d'un point de vue méthodologique, à celle dont on a fait le compte rendu dans ce chapitre. Notamment De Coensel *et al.* [CBML+05] ont montré que le seuil à partir duquel les sujets se disent gênés pour un niveau d'exposition moyen est négativement corrélé avec la sensibilité rapportée par les sujets. Cela est cohérent avec nos résultats (cf. Tableau 5.11 et Figure 5.8). En effet nous avons montré que la sensibilité a un effet significatif sur les réponses de gêne (partielle ou totale) et que ces dernières ont tendance à augmenter à mesure que la sensibilité déclarée au bruit en général augmente. Kurra *et al.* [KMM99b] ont quant à eux étudié la gêne comprise comme la perturbation d'activités quotidiennes requérant un certain degré de concentration. Deux tâches prédéfinies sont ainsi envisagées dans leur article : la lecture d'un magazine et l'écoute d'un enregistrement audio. Kurra *et al.* [KMM99b] ont alors montré que le type d'activité a un effet significatif sur les réponses de gêne recueillies, et notamment que les sujets dans l'activité de lecture semblent moins gênés que les sujets dans l'activité d'écoute d'un enregistrement audio. Nous avons également constaté un effet significatif du type d'activité pratiquée par les sujets sur les réponses de gêne récoltées (partielles ou totale). Cependant nous ne pouvons pas comparer nos résultats à ceux de Kurra *et al.* [KMM99b], notamment parce que l'activité d'écoute d'une bande audio n'a pas été pratiquée par les sujets de notre expérimentation.

## 6.2. Prédiction des gênes partielles

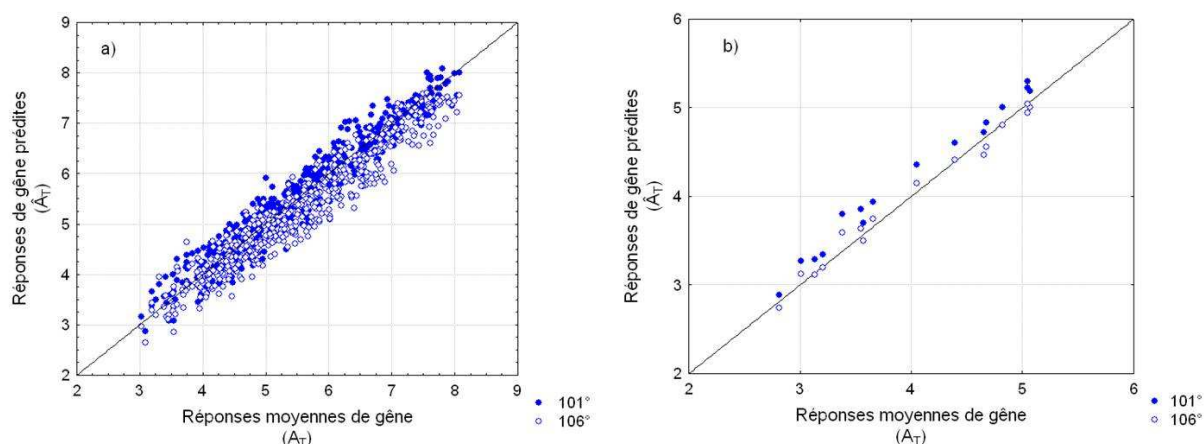
En vue de l'évaluation et de la comparaison des modèles de gêne totale en situation de multi-exposition, nous souhaitons pouvoir prédire les gênes partielles due au bruit industriel et due au bruit de la circulation routière. Concernant le bruit industriel, c'est la sonie de Zwicker N qui est utilisée, comme au Chapitre 4 . Concernant le bruit de la circulation routière nous avons testé l'ensemble des indices mis en avant au Chapitre 3 puis utilisés au Chapitre 4 , mais dans les combinaisons utilisées en environnement simulé, seul le niveau sonore d'une même séquence de bruit de la circulation routière varie, tandis que la composition du trafic reste la même. En conséquence, il n'a pas été possible de mettre en avant d'autres indices que la sonie de Zwicker N, proposés pour caractériser les bruits de passage des différentes catégories perceptives. Cela aurait pu être possible si nous avions pu construire et tester d'autres séquences en faisant varier la composition du trafic, mais cela n'a pas été envisageable dans le temps imparti.

Pour la prédiction des gênes partielles, nous avons donc modélisé l'évolution des réponses moyennes de gêne en fonction de la sonie de Zwicker. Auparavant, nous avons établi les effets de facteurs non-acoustiques sur les réponses de gêne partielle. Mais il n'était pas possible d'utiliser les données de ces facteurs non-acoustiques pour modéliser les gênes partielles conjointement aux données des facteurs acoustiques, notamment en raison du protocole expérimental adopté. Pour pouvoir faire cela, il aurait fallu au préalable échantillonner les sujets selon différentes modalités de ces facteurs non-acoustiques et faire participer différents groupes de sujets (de nombre important), ce qui aurait été également très couteux en temps, et pas envisageable dans le cadre de ces travaux.

Soulignons que la prise en compte de facteurs non-acoustiques dans la modélisation n'était pas un des objectifs de l'expérimentation, ni même de ces travaux de thèse. Il serait toutefois intéressant, dans une perspective de recherches futures, de monter une expérimentation qui permette de les prendre en compte.

### 6.3. Evaluation et comparaison des modèles de gêne totale

Nous avons évalué sur les données de l'expérimentation en environnement simulé les modèles de gêne totale déjà testés sur les données des expérimentations en laboratoire (cf. Chapitre 4 ). Il est intéressant de constater que l'angle  $\alpha_{(o \text{ ou } p)}$  déterminé dans le présent contexte ( $106^\circ$  pour la variante « observée » ou  $105^\circ$  pour la variante « prédite ») est très proche de celui trouvé dans le contexte des expérimentations en laboratoire (cf. Chapitre 4 et Tableau 4.16 : environ  $101^\circ$  pour les deux variantes). De surcroît, ces différentes valeurs d'angle optimal sont très proches de celles trouvées par Berglund et Nilsson [BN98a] dans le contexte de leur expérimentation :  $102^\circ$  et  $105^\circ$  pour des combinaisons de bruits d'autoroute à des bruits d'avions puis à des bruits de train (ces angles sont obtenus en utilisant les sonies spécifiques pour la prédiction de la sonie totale, dans le contexte des expériences de Berglund et Nilsson [BN98a]). Cet angle  $\alpha$  est souvent pris égal à  $90^\circ$  (cf. [BBGL81, BV02, MMVA12]). Par conséquent le modèle de sommation vectorielle ne permet pas la prise en compte d'interactions potentielles entre bruits combinés, et son utilisation n'est donc pas optimale. Pour apprécier l'influence sur la prédiction de la gêne totale, de la dynamique de la valeur optimale de l'angle  $\alpha$ , nous construisons la Figure 5.13. Nous voyons que passer de  $101^\circ$  à  $106^\circ$  entraîne une diminution des valeurs prédites par le modèle de sommation vectorielle (de l'ordre de 5%). La valeur optimale de cet angle obtenu dans nos travaux et dans de précédents travaux de recherche apparaît alors assez prometteuse.



**Figure 5.13 : Nuages de points représentant les réponses de gêne totale observées en fonction des réponses de gêne totale prédite par le modèle de sommation vectorielle dans la variante « observée ». a) données provenant des expérimentations en laboratoire. b) données provenant de l'expérimentation en environnement simulé.**

De manière générale l'évaluation et la comparaison des modèles de gêne totale nous démontrent la supériorité des modèles perceptifs, ce qui est cohérent notamment avec les résultats exposés au Chapitre 4 et avec les résultats de l'enquête *in situ* (cf. ANNEXE A d'après [PMMR+12]). Il paraît logique de poursuivre en se focalisant sur les modèles perceptifs, notamment parce qu'*in situ*, les niveaux d'exposition n'expliquent qu'un faible pourcentage de variance constatée dans les réponses de gêne (cf. [Job88]) et de ce fait il peut en résulter, si les corrélations entre niveaux d'exposition et réponses de gêne sont faibles, que les modèles psychophysiques n'apportent rien quant à la prédiction de la gêne totale (cf. [PMMR+12]). Pour de futures recherches, il apparaît alors intéressant dans un but prospectif d'incorporer dans la prédiction des gênes spécifiques ou partielles les facteurs non-acoustiques qui sont pertinents (cf. section 6.2). Par ailleurs les résultats exposés dans ce chapitre et au Chapitre 4 suggèrent de ne pas considérer le modèle de source dominante, en raison de sa trop grande simplicité, qui a pour conséquence de le rendre incapable d'anticiper d'éventuelles interactions entre les bruits combinés (cf. [PMMR+12, MMVA12]).

Le bilan de ces travaux met en lumière 3 modèles perceptifs : le modèle de sommation vectorielle, le modèle mixte perceptif et le modèle de régression linéaire. Globalement ces trois modèles sont aussi compliqués à appliquer, puisqu'ils nécessitent de connaître les gênes spécifiques ou partielles des bruits combinés (qu'elles soient prédites ou observées). Le modèle de sommation vectorielle nécessite ensuite de choisir un angle  $\alpha$ , qui dans le contexte de nos expérimentations se situe entre  $101^\circ$  et  $106^\circ$ . Les modèles de régression linéaire et mixte perceptif nécessitent quant à eux de déterminer des pondérations pour chaque variable indépendante du modèle correspondant.

## 6.4. Confrontations menées dans ces travaux

Les confrontations réalisées à partir des équations moyennes proposées à l'issue des expérimentations en laboratoire dans lesquelles nous avons injecté les données de l'expérimentation en environnement simulé, confirment la supériorité des modèles perceptifs retenus sur le modèle des effets indépendants dans la variante « sonie », retenu comme étant le plus performant des différents modèles psychophysiques testés.

L'observation des panneaux a) et b) de la Figure 5.12 nous montre que les équations moyennes proposées à l'issue des expérimentations menées en laboratoire et testées sur les données de l'expérimentation en environnement simulé ont tendance à surestimer la gêne totale en environnement simulé. De même, la comparaison des panneaux c) et d) de cette même Figure 5.12, montre que les équations moyennes proposées à l'issue des expérimentations menées en laboratoire sembleraient plus surestimer la gêne totale recueillie *in situ* que les équations proposées à l'issue de l'expérimentation menée en environnement simulé. Une explication peut être qu'en conditions de laboratoire, les sujets sont plus concentrés sur les bruits qui leur sont diffusés et de ce fait expriment des degrés de gêne plus élevés [KMM99a].

A l'issue des confrontations réalisées, il apparaît que le modèle de sommation vectorielle et le modèle mixte perceptif, permettent une meilleure prédiction de la gêne totale mesurée *in situ* que ne le permet le modèle de régression linéaire, et ce, qu'il s'agisse des équations moyennes proposées en laboratoire ou des équations proposées en environnement simulé. Ces résultats montrent qu'il est nécessaire de proposer des modèles qui font apparaître un terme qui peut prendre en compte d'éventuelles interactions entre les bruits combinés. Du point de vue des expérimentations mises en œuvre, il est intéressant de mentionner qu'il est apparu, pour les modèles perceptifs étudiés, une qualité prédictive similaire de leurs équations établies respectivement en laboratoire et en environnement simulé, puis confrontées aux données récoltées *in situ*.

Pour l'expérimentation en environnement simulé, les équations des modèles perceptifs ont été construites à partir de réponses moyennes de gêne due à (1) un trafic routier urbain reconstitué à partir d'enregistrements menés en différents lieux urbains et respectant les proportions de véhicules observées *in situ*, et (2) un bruit industriel permanent et stable enregistré au cœur de la zone enquêtée, 1 an après l'enquête *in situ*. La bonne qualité prédictive des modèles de gêne totale ainsi construits puis confrontés aux données de l'enquête *in situ*, nous permet d'effectuer un retour positif sur les hypothèses réalisées dans nos travaux, en particulier (1) la possibilité de reconstruire un trafic routier urbain à partir de bruits de passage des différentes catégories (cf. Chapitre 2 , section 1.2), et (2) un bruit industriel inchangé entre la tenue de l'enquête *in situ* et la période d'enregistrement (cf. Chapitre 4 , section 1).

## 7. Synthèse

Conformément à la démarche entreprise dans ces travaux de thèse et résumée au Chapitre 1, la dernière étape de nos travaux, traitant de l'étude de la gêne en situation de multi-exposition au bruit de la circulation routière et au bruit industriel, a eu pour objectif la confrontation des résultats obtenus *via* les expérimentations en laboratoire (cf. Chapitre 4) aux données obtenues dans une nouvelle expérimentation en environnement simulé, puis aux données de l'enquête *in situ* (cf. ANNEXE A, d'après [EEO10, PMMR+12]). Les résultats obtenus *via* l'expérimentation en environnement simulé sont également confrontés aux données de l'enquête *in situ*.

Pour l'évaluation en environnement simulé de la gêne en situation de multi-exposition au bruit de la circulation routière et au bruit industriel, nous avons mis en place un nouveau protocole expérimental. Pour cela, dans une des villas située sur le campus de l'ENTPE, nous avons aménagé une pièce en salon typique, destiné à l'accueil des sujets pour l'expérimentation. L'une des spécificités de l'expérimentation est de proposer aux sujets des séquences sonores de longue durée (7mn30s), diffusées de l'extérieur du salon aménagé (dont on a maintenu la fenêtre entrouverte), et dont la gêne ressentie est évaluée *a posteriori*. Les sujets pouvaient effectuer un panel d'activités différentes pendant l'exposition sonore. Les séquences sonores ont été construites à partir du bruit industriel permanent et stable, ainsi que des bruits de passage des différentes catégories perceptives, enregistrés *in situ* (cf. Chapitre 2). Dans un souci de vraisemblance, nous avons veillé à respecter une dynamique des niveaux sonores entre véhicules.

Un des avantages de cette expérimentation par rapport à une expérimentation en laboratoire est de permettre l'étude de certains facteurs non-acoustiques sur les réponses de gêne recueillies. Concernant les facteurs acoustiques (« Niveau de bruit industriel » et « Niveau de bruit routier »), nous n'avons constaté aucun effet d'inhibition. Compte tenu des niveaux d'exposition considérés, nous avons vu que de manière logique, le niveau d'exposition au bruit de la circulation routière a un effet plus important sur la gêne totale et le souhait de fermer la fenêtre que le niveau d'exposition au bruit industriel. Concernant les facteurs non-acoustiques nous avons constaté des effets significatifs de l'ensemble de ces facteurs (« sensibilité au bruit en général », « crainte exprimée vis-à-vis d'une installation industrielle », « crainte exprimée vis-à-vis d'une infrastructure routière », « activité pratiquée »). Nous avons par ailleurs constaté que les pourcentages de variance expliquée pour les facteurs non-acoustiques (par exemple la sensibilité au bruit en général) semblent être du même ordre de grandeur que ceux des facteurs acoustiques, ce qui est cohérent avec des résultats observés *in situ* [Lan76a, Lan76c].

Dans l'optique d'évaluer et de comparer les modèles prédictifs de la gêne totale, nous nous sommes attachés à prédire les gênes partielles sur la base des facteurs acoustiques. Concernant le bruit industriel, nous avons utilisé la sonie de Zwicker N pour la prédiction de la gêne partielle, et ce en cohérence avec le Chapitre 4. Concernant le bruit de la circulation routière, étant donné que nous avons pu tester une unique séquence ne variant qu'en niveau sonore, le seul dénominateur commun entre les différentes catégories perceptives et cognitives de bruits de passage, apparu comme le meilleur prédicteur de la gêne partielle, était donc la sonie de Zwicker N. L'évolution conjointe des gênes partielles et de la gêne totale a été examinée au moyen de la représentation de Vos [Vos92], comme cela a été mené au Chapitre 4. Dans le contexte de cette expérimentation, nous avons conclu à un effet de source dominante prononcé.

Par la suite, l'évaluation des modèles de gêne totale a confirmé la supériorité des modèles perceptifs, déjà entrevue au Chapitre 4. Concernant les modèles psychophysiques, de légères différences ont été remarquées et le modèle de sommation pondérée est apparu



le plus performant. Cependant, étant donné les différences ténues entre les modèles psychophysiques, nous avons considéré la variante « sonie » du modèle des effets indépendants, et ce en cohérence avec le Chapitre 4 . Concernant les modèles perceptifs, le modèle de sommation vectorielle avec un angle  $\alpha$  optimal de  $106^\circ$  (pour la variante « observée ») ou  $105^\circ$  (pour la variante « prédite ») ressort comme étant le plus performant. On remarque que l'angle obtenu lors de cette expérimentation en environnement simulé est très proche de l'angle obtenu au cours des expérimentations en laboratoire ( $101^\circ$ ; cf. Chapitre 4 ). Le modèle mixte et le modèle de régression linéaire sont également performants. Le modèle de source dominante est le moins performant et montre une tendance à la sous-estimation de la gêne totale.

Enfin, nous avons réalisé une confrontation (1) des résultats obtenus en laboratoire avec les données récoltées en environnement simulé et *in situ*, et (2) des résultats obtenus en environnement simulé avec les données *in situ*. Ces confrontations ont porté sur les équations des modèles de gêne totale proposées au cours du Chapitre 4 et du présent chapitre. Elles ont notamment confirmé la supériorité et la stabilité des modèles perceptifs par rapport au modèle psychophysique retenu (la variante « sonie » du modèle des effets indépendants). Nous avons également constaté une qualité prédictive similaire des équations moyennes proposées en laboratoire et en environnement simulé lorsqu'elles sont confrontées aux données récoltées *in situ*. Les équations en laboratoire semblent surestimer légèrement plus la gêne totale recueillie *in situ* que les équations proposées en environnement simulé. L'ensemble des résultats invite à poursuivre de futures recherches en se focalisant sur les modèles perceptifs et en visant à intégrer dans la prédiction des gênes spécifiques et/ou partielles, les différents facteurs non-acoustiques pertinents.

# Conclusion Générale

Les travaux relatés dans ce mémoire de thèse ont pour objectif de contribuer à l'amélioration des cartes de bruit par la proposition d'indicateurs de gêne sonore pertinents du point de vue de l'individu<sup>74</sup>, en situation de mono-exposition au bruit de la circulation routière, puis en situation de multi-exposition au bruit de la circulation routière et au bruit industriel.

En considérant les bruits de la circulation routière en milieu urbain et le bruit d'un site industriel (étudié dans de précédents travaux de recherche impliquant notre laboratoire [Ala09, MV09]), trois étapes ont été mises en œuvre afin d'atteindre notre objectif :

1. **Caractérisation physique et perceptive des bruits de la circulation routière en milieu urbain** : proposition d'indicateurs caractéristiques de la gêne sonore en situation de mono-exposition, pertinents du point de vue de l'individu, et déterminés à partir d'expérimentations conduites en laboratoire ;
2. **Caractérisation physique et perceptive des situations de multi-exposition au bruit de la circulation routière et au bruit industriel** : proposition de modèles de gêne totale en cohérence avec les indicateurs proposés en situation de mono-exposition, et ce à partir d'expérimentations conduites en laboratoire ;
3. **Confrontation des résultats obtenus en laboratoire aux données issues d'une nouvelle expérimentation conduite en environnement simulé, puis confrontation aux données d'une enquête *in situ*** : validation des modèles de gêne totale obtenus en laboratoire.

Dans les sections suivantes, nous résumons les principaux résultats obtenus au cours de chaque étape, puis nous évoquons les perspectives potentielles de ces travaux.

## Synthèse des principaux résultats

Pour mener à bien nos différentes expérimentations en laboratoire, nous avons été amenés à enregistrer des bruits de la circulation routière *in situ*, à partir d'un protocole d'enregistrement rigoureux, et adapté à une technique de diffusion en laboratoire, en cohérence avec les objectifs visés.

Nous avons extrait de ces enregistrements 57 bruits de passage de véhicules routiers décrivant l'ensemble des situations d'une typologie physique *a priori*. Cette typologie physique est obtenue à partir de l'étude bibliographique des modèles d'émission, de propagation du bruit de trafic routier, utilisés dans la génération des cartes de bruit (cf. Chapitre 2 ). Elle croise trois critères *a priori* « type de véhicules » (bus, deux-roues, poids lourds et véhicules légers), « type d'allures » (accélérée, décélérée et stabilisée), et « type de morphologies » (rue en tissu ouvert, rue en « U »).

---

<sup>74</sup> Rappelons que dans le contexte de nos travaux, l'individu est le riverain, qui subit la nuisance à son domicile, plutôt que l'usager de la ville.

Au cours de **la première étape**, nous avons évalué la pertinence perceptive d'une telle typologie physique *a priori*. Pour ce faire, nous avons mis en place deux expérimentations : (1) un premier test de catégorisation libre et de verbalisation libre, puis (2) un test de comparaison par paires. La procédure de catégorisation libre et de verbalisation libre (décrite par exemple dans [Gai09]) est particulièrement adaptée à la compréhension des principes psychologiques qui sous-tendent le processus de catégorisation naturelle [Dub00, Dub09]. L'intérêt est alors de confronter une organisation *a priori*, choisie avec des critères physiques, à l'organisation partagée par un panel d'auditeurs, en lien avec leurs expériences sensorielles passées. Le test de catégorisation libre et de verbalisation libre nous a conduits à la proposition d'une typologie perceptive et cognitive de bruits de passage de véhicules routiers en milieu urbain. Le test de comparaison par paires avec évaluation directe de la dissimilarité a pour but d'évaluer la robustesse de la typologie perceptive et cognitive proposée. Les analyses pratiquées sur les données obtenues ont révélé les conclusions suivantes :

- L'analyse statistique menée sur les données du test de catégorisation libre, rapprochée de l'analyse linguistique, menée conjointement sur les verbalisations libres par D. Dubois (cf. [EEO10]), a montré que les sujets structurent les bruits de passage en 7 catégories perceptives et cognitives ;
- Les catégories sont structurées par les critères physiques *a priori* « type de véhicules » et « type d'allures », de manière interdépendante. Le critère « type de morphologies », bien que perçu par les sujets, n'est pas apparu prioritaire dans leur tâche de catégorisation libre ;
- Les jugements négatifs ou d'acceptabilité qui ont été émis par les sujets ont été rapprochés de différents aspects spectraux et temporels des bruits de passage ;
- L'analyse statistique des jugements de dissimilarité a révélé que les bruits de passage peuvent être échelonnés dans un espace à deux dimensions ;
- La première dimension, expliquée par une combinaison des indices R (rugosité) et  $\Delta L^+$  (taux d'accroissement du niveau sonore en fonction du temps) est liée à l'évolution temporelle (évolution périodique de l'enveloppe temporelle, et évolution temporelle globale) des bruits de passage. Ces deux aspects temporels sont présents dans les différentes allures des véhicules routiers urbains ;
- La deuxième dimension, liée à l'identification des différents véhicules, est expliquée par l'indice  $L_{MF}$  (l'indice  $L_{Aeq, T}$  calculé entre les bandes de tiers d'octave centrées sur 315 et 1250Hz).
- La confrontation des résultats issus des deux expériences confirme et affine notre connaissance quant à la structure de la typologie perceptive et cognitive proposée. Le « type d'allures » semble être un critère de nature continue, explicable par une variation d'indices décrivant l'évolution temporelle globale et l'évolution périodique de l'enveloppe temporelle. Le « type de véhicules » semble être un critère de nature catégorielle, avec toutefois un indice permettant de décrire en partie les dissimilarités entre différents véhicules.

Dans un deuxième temps, chaque catégorie de la typologie perceptive et cognitive est caractérisée séparément du point de vue de la gêne sonore à court-terme. Ainsi, 7 tests d'évaluation de la gêne due à chaque catégorie de bruits de passage sont mis en place. Deux facteurs expérimentaux « Niveau Sonore » et « Source » sont testés. Les analyses pratiquées ont abouti aux résultats suivants :

- Comme attendu, le facteur « Niveau Sonore » a un effet important sur les réponses de gêne. Excepté pour les bruits de passage de la catégorie 1 (deux-roues à allure stabilisée), le facteur « Source » a également révélé une influence importante, ce qui témoigne d'une grande diversité entre bruits de passage à l'intérieur d'une même catégorie perceptive et cognitive, en termes de gêne ressentie ;
- Les indicateurs de gêne proposés pour chaque catégorie rendent compte de l'effet de ces deux facteurs expérimentaux, et associent (excepté pour les catégories 1 et 6) une mesure de l'intensité sonore, construite à partir de la sonie de Zwicker, à une mesure des aspects temporels :
  - Concernant la catégorie 1, c'est la sonie de Zwicker qui est choisie comme indicateur de gêne. Pour la catégorie 6 (véhicules légers à allure accélérée), c'est le niveau de pression sonore pondéré A en moyenne fréquence qui est retenu (l'indice  $L_{MF}$ ) ;
  - Concernant la catégorie 2 (deux-roues à allure accélérée), c'est la sonie de Zwicker intégrée entre 15 et 18 Barks, associée à la force de fluctuation (qui rend compte de l'évolution périodique de l'enveloppe temporelle), qui constituent l'indicateur de gêne retenu ;
  - Concernant la catégorie 3 (bus, poids lourds et véhicules légers à allure stabilisée), l'indicateur associe la sonie de Zwicker au taux de décroissance de la sonie en fonction du temps, un indice qui décrit l'évolution temporelle globale ;
  - Concernant les catégories 4 (deux-roues à allure décélérée), 5 (bus, poids lourds et véhicules légers à allure décélérée) et 7 (bus et poids lourds à allure accélérée), les indicateurs de gêne retenus associent la sonie de Zwicker à une mesure de l'évolution périodique de l'enveloppe temporelle.

Pour la **deuxième étape**, nous avons pris pour point de départ les 7 catégories perceptives et cognitives de bruits de passage de véhicules routiers. Dans l'optique de confronter les résultats obtenus en laboratoire aux données d'une enquête *in situ* menée auprès de riverains d'un site industriel [MV09], nous avons également réalisé un enregistrement *in situ* du bruit provenant du site industriel. Ainsi, 7 tests d'évaluation de la gêne à court-terme en situation de multi-exposition au bruit industriel et aux bruits routiers urbains des 7 catégories ont été réalisés. Chaque test se terminait par un face-à-face entre l'expérimentateur et les sujets afin de recueillir des informations sur la perception des bruits impliqués dans les tests. Les réponses de gêne spécifique et de gêne totale ont été analysées séparément, puis de manière conjointe au moyen de la représentation de Vos [Vos92]. Enfin, 9 modèles de gêne totale (5 modèles psychophysiques et 4 modèles perceptifs) ont été évalués et comparés. Les principaux résultats obtenus au cours de cette étape sont les suivants :

- Concernant les bruits de passage de véhicules routiers, l'analyse des verbatims (recueillis au cours des face-à-face) s'est révélée cohérente avec l'analyse linguistique pratiquée sur les verbalisations libres par D. Dubois [EEO10]. Les bruits de passage sont identifiés au moyen de leur allure et du type de véhicules, et sont décrits majoritairement selon leurs aspects spectraux et temporels ;
- Concernant le bruit industriel, l'identification révélée à travers les verbatims s'est, sans surprise, avérée moins aisée, mais toutefois cohérente avec les sources de bruit émettrices identifiées *in situ* [Ala09, MV09]. La non-variabilité

du bruit industriel permanent et stable, en opposition à la variabilité des bruits de passage, a été notamment mise en exergue ;

- L'analyse des gênes spécifiques a conforté la proposition des indicateurs de gêne en étape 1 pour les catégories de bruits routiers. Pour le bruit industriel, compte tenu des variations considérées dans nos travaux, c'est la sonie de Zwicker qui a été choisie comme indicateur de gêne ;
- Pour les combinaisons entre le bruit industriel et les bruits routiers des catégories 1, 3, 6, et 7, on observe un phénomène de synergie, c'est-à-dire que la gêne totale est majoritairement plus forte que la gêne spécifique maximale ;
- Pour les combinaisons entre le bruit industriel et les bruits routiers urbains des catégories 2, 4 et 5, on observe le phénomène de source dominante, c'est-à-dire que la gêne totale est majoritairement égale à la gêne spécifique maximale. Ces deux effets constatés entre les bruits combinés ont été notamment reliés à l'évolution temporelle des bruits de passage de véhicules routiers ;
- Parmi les modèles psychophysiques testés, c'est le modèle des effets indépendants en utilisant les sonies des bruits combinés, qui s'est avéré le plus performant ;
- Parmi les modèles perceptifs testés, c'est le modèle de sommation vectorielle avec un angle  $\alpha$  égal à  $101^\circ$ , qui apporte la meilleure qualité de prédiction. Toutefois, l'amélioration par rapport au modèle de régression linéaire et au modèle mixte n'apparaît pas discriminante. Le modèle de source dominante a montré une tendance généralisée à la sous-estimation de la gêne totale, en lien avec son incapacité à anticiper les synergies entre bruits combinés ;
- Les modèles perceptifs à variante « observée » (les variables indépendantes sont construites à partir des gênes spécifiques observées) sont généralement plus performants que les modèles perceptifs à variante « prédite » (les variables indépendantes sont construites à partir des gênes spécifiques prédites à l'aide des indicateurs définis en étape 1), qui eux-mêmes sont généralement plus performants que les modèles psychophysiques.

La **troisième étape** a eu pour but de confronter les résultats obtenus au cours des différents travaux réalisés, notamment concernant les modèles de gêne totale, aux données de l'enquête *in situ* (données rendues publiques dans [EEO10], dont les éléments principaux sont décrits en ANNEXE A de ce mémoire). Dans un premier temps les résultats obtenus en laboratoire au cours de l'étape 2 sont confrontés aux données d'une nouvelle expérimentation conduite en environnement simulé et aux données de l'enquête *in situ*. Dans un deuxième temps, ce sont les résultats de l'expérimentation en environnement simulé qui sont confrontés aux données de la même enquête *in situ*.

Un nouveau test d'évaluation de la gêne en situation de multi-exposition au bruit de la circulation routière et au bruit industriel est donc mis en place. Cette expérience se déroule dans un contexte moins abstrait que les expériences en laboratoire dont on a rendu compte au cours des précédentes étapes. Les séquences sonores combinées sont de plus longue durée (7mn30s), et diffusées de l'extérieur d'un salon aménagé, dont la fenêtre est gardée légèrement entrouverte. La séquence de bruit de la circulation routière est reconstituée à partir des bruits de passage des différentes catégories perceptives. La séquence du bruit industriel est construite à partir du bruit que nous avons enregistré *in situ*. Pendant l'exposition sonore, les sujets peuvent effectuer l'activité de leur choix, et l'expérimentation permet l'étude de l'influence de certains facteurs non-acoustiques (sensibilité au bruit en

général, activité pratiquée, etc.) sur les réponses de gêne recueillies. Cette expérience menée en environnement simulé nous a permis d'obtenir les résultats suivants :

- Concernant les facteurs acoustiques contrôlés (« Niveau de bruit industriel » et « Niveau de bruit routier »), nous n'avons constaté aucun effet d'inhibition entre les bruits combinés. Nous avons également vu que l'exposition au bruit routier a une plus grande influence que l'exposition au bruit industriel sur le souhait exprimé par les sujets de fermer la fenêtre ;
- Concernant les facteurs non-acoustiques contrôlés (« sensibilité au bruit en général », « crainte exprimée par rapport à une installation industrielle », « crainte exprimée par rapport à une infrastructure routière », « activité pratiquée »), tous ont des effets significatifs sur les réponses obtenues pour les différentes variables dépendantes étudiées (gênes partielles, gêne totale, perturbation ressentie) ;
- A l'instar d'enquêtes *in situ*, les pourcentages de variance expliquée par les facteurs non-acoustiques semblent être du même ordre de grandeur que les pourcentages de variance expliquée par les facteurs acoustiques ;
- L'évolution conjointe des gênes partielles et de la gêne totale étudiée au moyen de la représentation de Vos [Vos92], montre un effet de source dominante ;
- Concernant les modèles psychophysiques, les différences entre modèles dans leur capacité de prédiction de la gêne totale sont très ténues, mais c'est toutefois le modèle de sommation pondérée qui semble le plus performant ;
- Concernant les modèles perceptifs, c'est le modèle de sommation vectorielle, avec un angle  $\alpha_{(o \text{ ou } p)}$  égal à  $106^\circ$  (variante « observée ») ou  $105^\circ$  (variante « prédite ») qui apparaît le plus performant. Le modèle de source dominante est une nouvelle fois le moins performant avec une tendance à la sous-estimation de la gêne totale.

Enfin, les confrontations réalisées attestent de la supériorité des modèles perceptifs sur les modèles psychophysiques pour la prédiction de la gêne totale. Elles ont consisté à (1) confronter les modèles générés en laboratoire aux données observées en environnement simulé, (2) confronter les modèles générés en laboratoire aux données issues de l'enquête *in situ* [EEO10], et (3) confronter les modèles générés en environnement simulé aux données de l'enquête *in situ*. Il apparaît que les équations obtenues en laboratoire ont tendance à légèrement plus surestimer la gêne totale obtenue lors de l'enquête *in situ*, que les équations obtenues en environnement simulé.

De plus, ces confrontations ont permis une comparaison des 2 protocoles mis en place dans ces travaux (évaluation de la gêne en laboratoire, et évaluation de la gêne en environnement simulé), en termes de qualité prédictive des modèles de gêne totale construits en laboratoire et en environnement simulé, et testés sur des données récoltées *in situ*. Cette comparaison montre des qualités prédictives très proches, ce qui suggère que les évaluations de la gêne en laboratoire restent pertinentes pour étudier et caractériser les facteurs acoustiques qui peuvent influencer les jugements de gêne.

## Perspectives

Les résultats des travaux dont nous avons rendu compte dans ce mémoire apportent une contribution à l'amélioration des cartes de bruit, par (1) la proposition d'indicateurs de gêne caractéristiques des bruits de la circulation routière en milieu urbain et pertinents du point de vue de l'individu, et (2) par la mise en évidence de modèles de gêne totale,

confirmés par la confrontation aux données d'une enquête *in situ*. Toutefois, par leur limite ou au contraire leur intérêt, ces résultats suggèrent d'approfondir certains aspects lors de futures recherches ou d'envisager certaines opportunités pour de futures applications opérationnelles.

Nous n'avons pas pu évaluer complètement l'apport des indicateurs proposés pour chaque catégorie, dans le cas où des séquences de longues durées, reconstruites à partir des bruits de passage des différentes catégories perceptives et cognitives, sont évaluées. La raison est que dans le temps imparti, nous n'avons pu tester qu'une séquence de circulation routière, dont nous avons uniquement fait varier le niveau sonore. Cela suggère d'effectuer de nouvelles expérimentations similaires, avec différentes séquences de bruit de la circulation routière, dont la composition, en termes de catégories perceptives, varie. En effet, Berglund et Nilsson [BN00] ont montré au travers d'une enquête *in situ*, que la gêne due à un trafic routier est influencée par le type de véhicules qui composent ce trafic, mais également par leur pourcentage de présence.

Dans l'optique que les cartes de bruit, qui actuellement représentent quelque chose d'abstrait pour les individus (les niveaux d'exposition exprimés par l'indice  $L_{den}$ ), puissent représenter quelque chose de concret (la gêne ressentie), il est nécessaire de compléter les informations produites. Cela pourrait être réalisé dans un premier temps par l'intégration de facteurs acoustiques pertinents, tels que ceux mis en évidence dans ces travaux (aspects spectraux et temporels), et dans un deuxième temps par l'intégration de facteurs non acoustiques pertinents (sensibilité au bruit en général, crainte exprimée, etc.). Cela a d'ailleurs été identifié par l'OMS [WHO11] comme une possible amélioration des relations dose-effet proposées jusqu'à lors [MO01]. Cela pose alors au moins deux questions : comment les informations relatives à ces facteurs non-acoustiques peuvent-elles être récoltées massivement ? Comment intégrer les facteurs acoustiques et non-acoustiques pertinents aux relations dose-effet déjà existantes ? La première question pourrait être en partie résolue en imaginant que ces informations soient recueillies en même temps que sont effectués les recensements de population, qui sont annuels depuis 2004. La deuxième question est ouverte et nécessite de nouvelles productions en termes de recherche.

Les résultats concernant l'évaluation des modèles prédictifs de la gêne totale ont montré la supériorité des modèles perceptifs sur les modèles psychophysiques. Actuellement, le modèle de gêne équivalente (modèle de sommation pondérée avec  $k=10$ ) est suggéré pour prendre en compte la multi-exposition sur les cartes de bruits [CERTU08, EEA10]. Cependant, comme tous les modèles psychophysiques, celui-ci nécessite de fortes corrélations entre réponses de gêne et niveaux d'exposition afin d'être performant. Or, des études ont montré que les réponses de gêne exprimées peuvent être très faiblement corrélées aux niveaux d'exposition, rendant les modèles psychophysiques inopérants [PMMR+12]. Cela suggère de chercher à représenter non pas la situation de multi-exposition sonore, mais plutôt la gêne totale ressentie dans la situation de multi-exposition sonore. En disposant d'un modèle perceptif convenable (par exemple le modèle de sommation vectorielle) et en injectant dans ce modèle les gênes prédites, cela devient possible. Toutefois les besoins en termes de recherches nouvelles rejoignent le point évoqué précédemment, et nécessitent l'amélioration des relations dose-effet existantes. En attendant de pouvoir fournir une prédiction complète des gênes spécifiques ou partielles, il serait possible d'exploiter l'efficacité des variantes observées des modèles de régression linéaire ou mixte. En effet ces modèles fournissent, par le biais des coefficients de régression standardisés, la contribution de chaque variable indépendante à la gêne totale. En imaginant qu'il soit possible de réaliser une enquête simplifiée et automatisée sur les zones identifiées comme bruyantes et multi-exposées (de telles zones sont actuellement identifiées dans les plans de prévention du bruit dans l'environnement, découlant de la

directive 2002/49/CE), l'application de tels modèles fournirait alors une base juste pour identifier la contribution financière que devrait apporter les gestionnaires de chaque infrastructure occasionnant la gêne.

Enfin, comme de précédents travaux [Nil07, AMVM+10], nous avons trouvé en la sonie de Zwicker un meilleur indicateur de la gêne que l'indice  $L_{Aeq,T}$ . Il est certain que les professionnels de l'acoustique sont habitués depuis des décennies à l'emploi du décibel pour mesurer le bruit. Toutefois concernant les cartes de bruit, dont le but est notamment d'informer le public des effets de l'exposition au bruit (par exemple en termes de gêne) [PECE02], il serait opportun d'envisager l'intégration de la sonie dans les appareils de mesures du bruit de l'environnement. Cependant, cela nécessite de s'assurer que les modèles de sonie actuels sont fiables pour caractériser l'intensité perçue pour des expositions de longue durée, mais également de développer des appareils de mesure adaptés.





## Références bibliographiques

**[ACEM04]**, ASSOCIATION DES CONSTRUCTEURS EUROPEENS DE MOTOCYCLES. Striving against traffic noise – how powered two-wheelers can contribute ?, ACEM, Bruxelles, 2004, 16p.

**[AFNOR96]**, AGENCE FRANCAISE DE NORMALISATION. Acoustique : Caractérisation et mesurage des bruits de l'environnement. NF S 31-010. Paris : AFNOR, 1996, 48p.

**[AFNOR02]**, AGENCE FRANCAISE DE NORMALISATION. Acoustique : Caractérisation et mesurage du bruit dû au trafic routier. NF S 31-085. Paris : AFNOR, 2002, 50p.

**[AFNOR08]**, AGENCE FRANCAISE DE NORMALISATION. Acoustique : Cartographie du bruit en milieu extérieur – Elaboration des cartes et représentation graphique. NF S 31-130. Paris : AFNOR, 2008, 32p.

**[AFSSE04]**, AGENCE FRANÇAISE DE SECURITE SANITAIRE DE L'ENVIRONNEMENT. Impact sanitaires du bruit – Etat des lieux : indicateurs bruit – santé, AFSSE, Maisons-Alfort : novembre 2004, 346 p.

**[Ala09]**, ALAYRAC M. Indicateurs de gêne sonore pour l'étude d'impact du bruit industriel : caractérisation physique et perceptive. Thèse d'Acoustique. Lyon : ENTPE, 2009, 255 p.

**[AMVM+10]**, ALAYRAC M., MARQUIS-FAVRE C., VIOLLON S., MOREL J., LE NOST G. Annoyance from industrial noise: indicators for a wide variety of industrial sources. Journal of the Acoustical Society of America, 2010, vol. 128, n°3, pp. 1128-1139.

**[AMV11]**, ALAYRAC M., MARQUIS-FAVRE C., VIOLLON S. Total annoyance from an industrial noise source with a main spectral component combined with a background noise. Journal of the Acoustical Society of America, 2011, vol. 130, n°1, pp. 189-199.

**[ANB10]**, AXELSSON, Ö., NILSSON M.E., BERGLUND B. A principal components model of soundscape perception. Journal of the Acoustical Society of America, vol. 128, n°5, pp. 2836-2846.

**[Aub95]**, AUBREE D. Quand vous parlez du bruit, qu'entendez-vous ? Acoustique & Techniques, 1995, n°3, pp. 19-23.

**[Auz03]**, AUZILLEAU S. Le bruit des deux-roues à moteur – rapport du groupe interministériel de travail, Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, Paris, 1999, 23 p.

**[Bar08]**, BARBOT B. Qualité sonore du bruit des avions. Approche vers la gêne ressentie par les riverains autour des aéroports. Thèse d'Acoustique. Cergy-Pontoise : Université de Cergy-Pontoise, 2008, 278p.

- [BBGL81]**, BERGLUND B., BERGLUND U., GOLDTSEIN M., LINDVALL T. Loudness (or annoyance) summation of combined community noises. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1981, vol. 70, n°6, pp.1628-1634.
- [BBL75]**, BERGLUND B., BERGLUND U., LINDVALL T. Scaling loudness, noisiness, and annoyance of aircraft noise. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1975, vol. 57, n°4, pp. 930-934.
- [BBLS73]**, BERGLUND B., BERGLUND U., LINDVALL T., SVENSSON L.T. A quantitative principle of perceived intensity summation in odor mixtures. *Journal of Experimental Psychology*, 1973, vol. 100, n°1, pp. 29-38.
- [BCM06]**, BOTTELDOOREN D., DE COENSEL B., DE MUER T. The temporal structure of urban soundscapes. *Journal of Sound and Vibration*, vol. 292, n°1, pp. 105-123.
- [BHJ96]**, BERGLUND B., HASSMEN P., JOB R.F.S. Sources and effects of low-frequency noise. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1996, vol. 99, n°5, pp. 2985-3002.
- [BK88]**, BRUEL & KJAER. Acoustic noise measurements. 4<sup>th</sup> Ed. Denmark: Larsen and Son, 1988. ISBN 87-87355-30-2.
- [BKG11]**, BROWN A.L., KANG J., GJESTLAND T. Towards standardization in soundscape preference assessment. *Applied Acoustics*, 2011, vol. 72, n°6, pp. 387-392.
- [Bla97]**, BLAUERT J. Spatial Hearing – The psychophysics of human sound localization. Revised Ed. Cambridge, USA: MIT Press, 1997, 494p. ISBN 13-978-0-262-02413-6.
- [BL95]**, BERGLUND B., LINDVALL T. Community noise. In: Archives of the Center for Sensory Research, Stockholm University, Suède, 1995, 233 p.
- [BL07]**, BRINK M., LERCHER P. The effects of noise from combined traffic sources on annoyance: the interaction between aircraft and road traffic noise. In: Proceedings of InterNoise 2007, Istanbul, Turkey, 2007, 8p.
- [BLC08]**, BARBOT C., LAVANDIER C., CHEMINEE P. Perceptual representation of aircraft sounds. *Applied Acoustics*, 2008, vol. 69, n°11, pp. 1003-1016.
- [BN97]**, BERGLUND B., NILSSON M.E. Empirical issues concerning annoyance models for combined community noise. In: Proceedings of InterNoise 1997, vol. 2, Budapest, Hungary, 1997, pp. 1053-1058.
- [BN98a]**, B., NILSSON M.E. Loudness of combined noises derived from singular and concurrent community noises. In: Proceedings of International Congress on Acoustics 1998, Seattle, USA, 1998, pp. 1129-1130.
- [BN98b]**, BERGLUND B., NILSSON M.E. Total annoyance model for community noise explicated. In: Proceedings of InterNoise 1998, Christchurch, New-Zealand, 1998, 4p.
- [BN00]**, BERGLUND B., NILSSON M.E. Total annoyance and perceptually discernible noise sources. In: Proceedings of InterNoise 2000, vol. 6, Nice, France, 2000, pp. 3541-3544.

- [BN01a]**, BERGLUND B., NILSSON M.E. Total and source-specific loudness of singular and combined traffic sounds. In: Archives of the Center for Sensory Research, vol. 6, n<sup>3</sup>, Stockholm University, Suède, 2001, pp.71-93.
- [BN01b]**, BERGLUND B. Nilsson M.E. Identification of sound from traffic. In: Archives of the Center for Sensory Research, vol. 6, n<sup>3</sup>, Stockholm University, Suède, 2001, pp. 61-70.
- [Bon86]**, BONNET C. Manuel pratique de psychophysique. Paris : Armand Colin Editeur, 1986, 254p. ISBN 2-200-31208-3.
- [Bot71]**, BOTTOM C.G. A social survey into annoyance caused by the interaction of aircraft noise and traffic noise. Journal of Sound and Vibration, 1971, vol. 19, n<sup>4</sup>, pp. 473-476.
- [BP92]**, BERRY B.F., PORTER N.D. The subjective and objective assessment of industrial noise. In: Proceedings of EuroNoise 1992, vol. 14, n<sup>4</sup>, Londres, Angleterre, 1992, pp. 383-395.
- [BP04]**, BERRY B.F., PORTER N. Review and analysis of published research into the adverse effects of industrial noise, in support of the revision of planning guidance. DEFRA report n<sup>o</sup>NANR 5. London: DEFRA Publications, 2004, 91p.
- [BV02]**, BOTTELDOOREN D., VERKEYN A. Fuzzy models for accumulation of reported community noise annoyance from combined sources. Journal of the Acoustical Society of America, 2002, vol. 112, n<sup>4</sup>, pp. 1496-1508.
- [BZ06]**, BECH S. ZACHAROV N. Perceptual audio evaluation. Theory, method and application. Chichester, England: Wiley & Sons, 2006. ISBN 0-470-86923-2.
- [Cat01]**, CATUSSEAU G. Etude physique et perceptive de techniques d'enregistrement et restitution sonore. DEA d'Acoustique. Marseille : Université de Marseille, 2001, 46p.
- [CBBN+07]**, DE COENSEL B., BOTTELDOOREN D., BERGLUND B., NILSSON M.E., DE MUER T., LERCHER P. Experimental investigation of noise annoyance caused by high-speed trains. Acta Acustica united with Acustica, 2007, vol. 93, n<sup>4</sup>, pp. 589-601.
- [CBMB+09]**, DE COENSEL B., BOTTELDOOREN D., DE MUER T., BERGLUND B., NILSSON M.E., LERCHER P. A model for the perception of environmental sound based on notice-events. Journal of the Acoustical Society of America, 2009, vol. 126, n<sup>2</sup>, pp. 656-665.
- [CBML+05]**, DE COENSEL B., BOTTELDOOREN D., DE MUER T., LERCHER P., BERGLUND B., NILSSON M.E. Observation on the influence of non-acoustical factors on perceived annoyance in a field experiment. In: Proceedings of InterNoise 2005, Rio de Janeiro, Brésil, 2005, 9p.
- [CBM03]**, DE COENSEL B., BOTTELDOOREN D., DE MUER T. 1/f noise in rural and urban soundscapes. Acta Acustica united with Acustica, 2003, vol. 89, n<sup>2</sup>, pp. 287-295.
- [CC76]**, CERMAK G.W., CORNILLON P.C. Multidimensional analyses of judgments about traffic noise. Journal of the Acoustical Society of America, 1976, vol. 59, n<sup>6</sup>, pp. 1412-1420.
- [CC01]**, COX T.F., COX M.A.A. Multidimensional Scaling. 2<sup>nd</sup> Ed. London, England : Chapman&Hall/CRC, 2001. ISBN 1-58488-094-5.

**[CCL03]**, CHAMPELOVIER P., CREMEZI-CHARLET C. LAMBERT J. Evaluation de la gêne due à l'exposition combinée aux bruits routier et ferroviaire. Rapport de recherche n°242, INRETS, Bron, France, 2003, 150 p. ISBN 2-85782-572-2.

**[Cer79]**, CERMAK G.W. Exploratory laboratory studies of the relative aversiveness of traffic sounds. Journal of the Acoustical Society of America, 1979, vol. 65, n°1, pp. 112-123.

**[CERTU98]**, CENTRE D'ETUDE SUR LES RESEAUX, LES TRANSPORTS, L'URBANISME ET LES CONSTRUCTIONS PUBLIQUES. Classement sonore des infrastructures de transports terrestres – arrêté du 30 mai 1996, Ministère de l'Equipement, des Transports et du Logement, CERTU, Lyon, mars 1998, 183p.

**[CERTU08a]**, CENTRE D'ETUDE SUR LES RESEAUX, LES TRANSPORTS, L'URBANISME ET LES CONSTRUCTIONS PUBLIQUES. Cartes de bruit – comment prendre en compte la multi-exposition sonore ? Fiche n°6, 2008, Lyon : CERTU, 10p.

**[CERTU08b]**, CENTRE D'ETUDE SUR LES RESEAUX, LES TRANSPORTS, L'URBANISME ET LES CONSTRUCTIONS PUBLIQUES. Cartes de bruit – comment prendre en compte le bruit industriel ? Fiche n°8, 2008, Lyon : CERTU, 11p.

**[CETUR80]**, CENTRE D'ETUDE SUR LES TRANSPORTS URBAINS. Guide du bruit des transports terrestres, Ministère de l'Environnement et du Cadre de Vie – Ministère des Transports, CETUR, Paris, novembre 1980, 330 p.

**[CETUR81]**, CENTRE D'ETUDE SUR LES TRANSPORTS URBAINS. Bruit et formes urbaines – propagation du bruit routier dans les tissus urbains, Ministère de l'Environnement et du Cadre de Vie – Ministère des Transports, CETUR, Paris, 1981, 144 p.

**[Cou93]**, COURVILLE D. Procédés et systèmes d'enregistrement et de reproduction sonore en trois dimensions. Mémoire de maîtrise en communication, Montréal : Université du Québec, 1993. Disponible en ligne <<http://www.er.uqam.ca/nobel/k24305/memoire.html>>.

**[Cox82]**, COXON A.P.M. The user's guide to multidimensionnal scaling. Heinemann Educational Books, London, England, 1982.

**[CPM05]**, CELIK E., PERSSON-WAYE K., MOLLER H. The importance of recording and playback technique for the assessment of annoyance. **In:** Proceedings of Forum Acusticum 2005, Budapest, Hongrie, 2005, pp. 187-192.

**[Dag06]**, DAGNELIE P. Statistique théorique et appliquée. 2. Inférence statistique à une et à deux dimensions. 2<sup>ème</sup> Ed. Bruxelles, Belgique : De Boeck Université, 2006. ISBN 2-8041-5229-4.

**[Dan01]**, DANIEL J. Représentation de champs acoustiques, application à la transmission et à la reproduction de scènes sonores complexes dans un contexte multimédia. Thèse d'Acoustique. Paris : Université de Paris 6, 2001, 319p.

**[dBS05]**, dBsonic User manual. 01dB-Metravib, 2005, 186p.

**[Del79]**, DELAGE B. Paysage sonore urbain. Recherche n°79-27, Paris : Plan Construction, 1979, 58p.

- [DGR06]**, DUBOIS D., GUASTAVINO C., RAIMBAULT M. A cognitive approach to urban soundscapes: using verbal data to access everyday life auditory categories. Acta Acustica united with Acustica, 2006, vol. 92, n°6, pp.865-874.
- [DIN91]**, DIN. Berechnung des Lautstärkepegels und der Lautheit aus dem Geräuschspektrum; Verfahren nach E. Zwicker. DIN 45631, 1991.
- [Dod04]**, DODGE Y. Statistique. Dictionnaire encyclopédique. Paris, France : Springer-Verlag, 2004. ISBN 2-287-21325-2.
- [DR07]**, DANCEY C.P., REIDY J. Statistiques sans maths pour psychologies. 1<sup>ère</sup> Ed. Bruxelles, Belgique : De Boeck Université, 2007. ISBN 978-2-8041-5384-7.
- [DS05]**, DAVIS S.F., SMITH R.A. An introduction to statistics and research methods. Becoming a psychological detective. New Jersey, USA: Pearson Prentice Hall, 2005. ISBN 0-13-150511-4.
- [Dub00]**, DUBOIS D. Categories as acts of meaning: the case of categories in olfaction and audition. Cognitive Science Quarterly, 2000, n°1, pp. 35-68.
- [Dub09]**, DUBOIS D. Le sentir et le dire : définir l'objet et construire la démarche. In: Le sentir et le dire. Concepts et méthodes en psychologie et linguistique cognitives. Paris, France : Collection l'Harmattan, 2009, pp. 13-45. ISBN 978-2-296-10826-4.
- [DW97]**, DANIEL P., WEBER R. Psychoacoustical roughness: implementation of an optimized model. Acta Acustica united with Acustica, 1997, vol. 83, n°1, pp. 113-123.
- [EEA10]**, EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY. Good practice guide on noise exposure and potential health effects. EEA Technical report n°11/2010, Copenhagen: EEA, 2010, 38p.
- [EEO10]**, EDF, ENTPE, ORELIA. Projet de recherché NOISI-EXPO. Rapport final, ADEME, contrat n°0866C0066, 2010.
- [EKR10]**, ELALOUF Z., KELLER M., RICHEZ A. Projet d'acoustique : Diagnostique acoustique de la villa IRIS. Cours de CIA, ENTPE, 2010. 33p.
- [Fau03]**, FAURE J., Influence des paramètres structuraux d'une plaque rayonnante sur la perception sonore. Thèse d'Acoustique. Lyon : INSA de Lyon, 2003, 304p.
- [Fid03]**, FIDELL S. The Schultz curve 25 years later: a research perspective. Journal of the Acoustical Society of America, 2003, vol. 114, n°6, pp. 3007-3015.
- [Fie01]**, FIELDS J.M. An updated catalog of 521 surveys of resident's reactions to environmental noise (1943-2000). CR-2001-211257. Hanover: NASA Center for Aerospace Information, 2001, 149p.
- [Fie93]**, FIELDS J.M. Effect of personal and situational variables on noise annoyance in residential areas. Journal of the Acoustical Society of America, 1993, vol. 93, n°5, pp. 2753-2763.
- [FJGF+01]**, FIELDS J.M., DE JONG R.G., GJESTLAND T., FLINDELL I.H., JOB R.F.S., KURRA S., LERCHER P., VALLET M., YANO T., GUSKI R., FELSCHER-SUHR U., SCHUMER R. Standardized general-purpose noise reaction questions for community noise

surveys: research and a recommendation. *Journal of Sound and Vibration*, 2001, vol. 242, n°4, pp. 641-679.

**[Fli82]**, FLINDELL I.H. Community Response to multiple noise sources. Ph. D. Thesis. Southampton: University of Southampton, 1982, 205p.

**[Fox99]**, FOX W. *Statistiques Sociales*. 3è Ed. Paris, France : De Boeck Université, 1999. ISBN 2-8041-3348-6.

**[FZ06]**, FASTL H., ZWICKER E. *Psycho-acoustics. Facts and models*. 3rd Ed. Berlin : Springer Verlag, 2006, 432 p.

**[Gai09]**, GAILLARD P. Laissez-nous trier ! TCL-LabX et les tâches de catégorisation libre de sons. In: DUBOIS D. (éd) *Le sentir et le dire. Concepts et méthodes en psychologie et linguistique cognitives*. Paris, France : L'Harmattan, 2009, pp. 189-210. ISBN 978-2-296-10826-4.

**[Gau03]**, GAUTIER J.-L. Vers une pérennité accrue des performances acoustiques des revêtements routiers. *Acoustique & Techniques*, 2003, n°32 (Spécial bruit de roulement), pp. 28-33.

**[GD06]**, GUASTAVINO C., DUBOIS, D. From language and concepts to acoustics: how do people cognitively process soundscapes? In: *Proceedings of InterNoise 2006*, Honolulu, Haway, 2006, 7p.

**[GF06]**, GENUIT K., FIEBIG A. Psychoacoustics and its benefits for the soundscape approach. *Acta Acustica united with Acustica*, 2006, vol. 92, n°6, pp. 952-958.

**[GFS99]**, GUSKI R., FELSCHER-SUHR U., SCHUEMER R. The concept of noise annoyance: how international experts see it. *Journal of Sound and Vibration*, 1999, vol. 223, n°4, pp. 513-527.

**[GH07]**, GELMAN A., HILL J. *Data analysis using regression and multilevel/hierarchical models*. New-York, USA: Cambridge University Press, 2007. ISBN 978-0-52168589-1.

**[Gil10]**, GILLE L.-A. Contribution à l'étude de la gêne sonore due aux bruits routiers en situations de mono-exposition et de multi-exposition : rapport de master de recherche. Master MEGA spécialité Acoustique. Vaulx-en-Velin : ENTPE, 2010, 164p.

**[GK04]**, GUASTAVINO C., KATZ B.F.G. Perceptual audio evaluation of multi-dimensional spatial audio reproduction. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2004, vol. 116, n°2, pp. 1105-1115.

**[GL68]**, GRIFFITHS I.D., LANGDON F.J. Subjective response to road traffic noise. *Journal of Sound and Vibration*, 1968, vol. 8, n°1, pp. 16-32.

**[Gor99]**, GORDON A.D. *Classification*. 2<sup>nd</sup> Ed. New-York, USA: Chapman&Hall/CRC, 1999. ISBN 1-58488-013-9.

**[GSPG07]**, GRIEFAHN B., SANDROCK S., PREIS A., GJESTLAND T. The significance of traffic flow and traffic composition for annoyance and performance. In: *Proceedings of InterNoise 2007*, Istanbul, Turkey, 2007, 10p.

**[GT307]**, GROUPE DE TRAVAIL N°3. Instauration d'un environnement respectueux de la santé. Grenelle de l'Environnement, 2007, 100p. Disponible sur <[http://www.legrenelle-environnement.fr/IMG/pdf/Synthese\\_Rapport-2.pdf](http://www.legrenelle-environnement.fr/IMG/pdf/Synthese_Rapport-2.pdf)> (consulté la dernière fois le 29 décembre 2011).

**[Gua03]**, GUASTAVINO C. Etude sémantique et acoustique de la perception des basses fréquences dans l'environnement sonore urbain. Thèse d'Acoustique. Paris : Université Paris 6, 2003, 245 p.

**[Gua06]**, GUASTAVINO C. The ideal urban soundscape: Investigating the sound quality of French cities. Acta Acustica united with Acustica, 2006, vol. 92, n°6, pp. 945-951.

**[Gua07]**, GUASTAVINO C. Categorization of environmental sounds. Canadian Journal of Experimental Psychology, 2007, vol. 61, n°1, pp. 54-63.

**[Gus97]**, GUSKI R. Psychological methods for evaluating sound quality and assessing acoustic information. Acta Acustica united with Acustica, 1997, vol. 83, pp. 765-774.

**[Guy96]**, GUYOT F. Etude de la perception sonore en termes de reconnaissance et d'appréciation qualitative : une approche par la catégorisation. Thèse d'Acoustique. Le Mans : Université du Maine, 1996, 269p.

**[GVBJ+09]**, VAN GERVEN P.W.M., VOS H., VAN BOXTEL M.P.J., JANSSEN S.A., MIEDEMA H.M.E. Annoyance from environmental noise across the lifespan. Journal of the Acoustical Society of America, 2009, vol. 126, n°1, pp. 187-194.

**[GVK03a]**, GULBOL M.-A. VÄSTFJÄLL D., KLEINER M. A subjective test to characterize the sound quality of exterior vehicle noise. **In:** Proceedings of EuroNoise 2003, Naples, Italy, 2003, 6p.

**[GVK03b]**, GULBOL M.-A. VÄSTFJÄLL D., KLEINER M. A comparison of subjective response to vehicle pass-by sound recorded under different urban conditions. **In:** Proceedings of EuroNoise 2003, Naples, Italy, 2003, 6p.

**[Ham03]**, HAMET J.-F. Les mécanismes de génération du bruit de roulement et l'influence des caractéristiques de la chaussée. Acoustique & Techniques, 2003, n°32 (Spécial bruit de roulement), pp. 2-10.

**[Hel82]**, HELLMAN R.P. Loudness, annoyance, and noisiness produced by single-tone-noise complexes. Journal of the Acoustical Society of America, 1982, vol. 72, n°1, pp. 62-73.

**[Hel84]**, HELLMAN R.P. Growth rate of loudness, annoyance, and noisiness as a function of tone location within the noise spectrum. Journal of the Acoustical Society of America, 1983, vol. 75, n°1, pp. 209-218.

**[Hel85]**, HELLMAN R.P. Perceived magnitude of two-tone-noise complexes: loudness, annoyance, and noisiness. Journal of the Acoustical Society of America, 1985, vol. 77, n°4, pp. 1497-1504.

**[HDS84]**, HABERLE M., DOVENER D., SCHMID D. Inquiry on noise causing complaints in residential areas near chemical plants. Applied Acoustics, 1984, vol. 17, pp. 329-344.



**[HJ04]**, HUGREL C., JOUMARD L. Transport routier – parc, usage, et émission des véhicules en France de 1970 à 2025. Rapport LTE n° 420. Bron : INRETS, 2004, 133 p.

**[HKJ06]**, HATFIELD J., VAN KAMP I., JOB R.F.S. Clarifying “soundscape”: effects of question formats on reaction to noise from combined sources. Acta Acustica united with Acustica, 2006, vol. 92, n°6, pp. 922-928.

**[Hou03]**, HOUIX O. Catégorisation auditive des sources sonores. Thèse d’Acoustique. Le Mans : Université du Maine, 2003, 281p.

**[How98]**, HOWELL D.C. Méthodes statistiques en sciences humaines. 1<sup>ère</sup> Ed. Bruxelles, Belgique : De Boeck Université, 1998. ISBN 978-2-7445-0008-4.

**[HW03]**, HUGONNET C., WALDER P. Théorie et pratique de la prise de son stéréophonique. 2<sup>e</sup> Ed. Paris : Eyrolles, 2003, 252p. ISBN 978-2-212-11334-1.

**[ISO75]**, ISO. Acoustique : méthode de calcul du niveau d’isophonie. ISO 532, 1975, 21p.

**[ISO03]**, ISO. Acoustique : évaluation de la gêne causée par le bruit au moyen d’enquêtes sociales et d’enquêtes socio-acoustiques. ISO/TS 15666, 2003, 23 p.

**[Izu88]**, IZUMI K. Annoyance due to mixed source noises – a laboratory study and field survey on the annoyance of road traffic and railway noise. Journal of Sound and Vibration, 1988, vol. 127, n°3, pp. 485-489.

**[JLYK10]**, JEON J.Y., LEE P.J., YOU J., KANG J. Perceptual assessment of quality of urban soundscapes with combined noise sources and water sounds. Journal of the Acoustical Society of America, 2010, vol. 127, n°3, pp. 1357-1 366.

**[Job88]**, JOB R.F.S. Community response to noise: a review of factors influencing the relationships between noise exposure and noise reaction. Journal of the Acoustical Society of America, 1988, vol. 83, n°3, pp. 991-1001.

**[KKKN99]**, KAKU J., KATO T., KUWANO S., NAMBA S. Predicting overall reaction to multiple noise sources. In: Proceedings of Forum Acusticum & ASA joint meeting 1999, Berlin, Allemagne, 1999, 4p.

**[KLHL10]**, KIM J., LIM C., HONG J., LEE S. Noise-induced annoyance from transportation noise: short-term responses to a single noise source in a laboratory. Journal of the Acoustical Society of America, 2010, vol. 127, n°2, pp.804-814.

**[KMM99a]**, KURRA S., MORIMOTO M., MAEKAWA Z.I. Transportation noise annoyance – a simulated-environment study for road, railway and aircraft noises; part 1: overall annoyance. Journal of Sound and Vibration, 1999, vol. 220, n°2 , pp. 251-278.

**[KMM99b]**, KURRA S., MORIMOTO M., MAEKAWA Z.I. Transportation noise annoyance – a simulated-environment study for road, railway and aircraft noises; part 2: activity disturbance and combined results. Journal of Sound and Vibration, 1999, vol. 220, n°2, pp. 279-295.

**[KNF88]**, KUWANO S., NAMBA S., FASTL H. On the judgment of loudness, noisiness and annoyance with actual and artificial noises. Journal of Sound and Vibration, 1988, vol. 127, n°3, pp. 457-465.

- [Koe05]**, KOEHL V. Influence des dispersions de structure sur la perception sonore. Thèse d'Acoustique. Lyon : INSA de Lyon, 2005, 168p.
- [Lam02]**, LAMBERT J. La gêne due au bruit des transports terrestres. *Acoustiques & Techniques*, 2002, n°28, pp. 20-25.
- [Lan76a]**, LANGDON F.J. Noise nuisance caused by road traffic noise in residential areas: part I. *Journal of Sound and Vibration*, 1976, vol. 47,n°2, pp. 243-263.
- [Lan76b]**, LANGDON F.J. Noise nuisance caused by road traffic noise in residential areas: part II. *Journal of Sound and Vibration*, 1976, vol. 47,n°2, pp. 265-282.
- [Lan76c]**, LANGDON F.J. Noise nuisance caused by road traffic noise in residential areas: part III. *Journal of Sound and Vibration*, 1976, vol. 49, n°2, pp. 241-256.
- [LCCA+09]**, LAM K.-C., CHAN P.-K., CHAN T.-C., AU W.-H., HUI W.-C. Annoyance response to mixed transportation noise in Hong-Kong. *Applied Acoustics*, 2009, vol. 70, n°1, pp. 1-10.
- [Lec02]**, LECLERCQ L. Modélisation dynamique du trafic et applications à l'estimation du bruit routier. Thèse de Génie Civil. Lyon : INSA de Lyon, 2002. 317 p.
- [Lei99]**, LELONG J. Vehicle noise émission: evaluation of Tyre/road and motor-noise contribution. In: Proceedings of InterNoise 1999, Fort Lauderdale, USA, 1999, 6p.
- [LD06]**, LAVANDIER C., DEFREVILLE B. The contribution of sound source characteristics in the assessment of urban soundscapes. *Acta Acustica united with Acustica*, 2006, vol. 92, n°6, pp. 912-921.
- [Léo95]**, LEOBON A. La quantification des ambiances sonores urbaines. *Natures – Sciences – Sociétés*, 1995, vol. 3, n°1, pp. 26-41.
- [LBGD+07]**, LERCHER P., BOTTELDOOREN D., DE GREVE B., DEKONICK L., RUDISSLER J. The effects of noise from combined traffic sources on annoyance: the case of interactions between rail and road noise. In: Proceedings of InterNoise 2007, Istanbul, Turkey, 2007, 8p.
- [LKHL08]**, LIM C., KIM J., HONG J., LEE S. Effect of background noise levels on community annoyance from aircraft noise. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2008, vol. 123, n°2, pp. 766-771.
- [LM69]**, LITTLE J.W., MABRY J.E. Sound duration and its effect on judged annoyance. *Journal of Sound and Vibration*, 1969, vol. 9, n°2, pp. 247-262.
- [LP08]**, LAMBERT J., PHILIPPS-BERTIN C. Perception and attitudes to transportation noise in France: a national survey. In: Proceedings of 9<sup>th</sup> International Congress on Noise as a Public Health Problem, Foxwoods, USA, 2008, 7p.
- [LTDB10]**, LEFEVRE H., TOUSSAINT L., DUTILLEUX G., BARGUET L. Emission acoustique des deux-roues motorisés : motocyclettes. In: Actes du 10<sup>e</sup> Congrès Français d'Acoustique, Lyon, France, 2010, 5p.

- [Maf99]**, MAFFIOLO V. De la caractérisation sémantique et acoustique de la qualité sonore de l'environnement sonore urbain. Thèse d'acoustique. Le Mans : Université du Maine, 1999, 285p.
- [MB11]**, MEUNIER P., BOUILLON C., Rapport d'information n°3592 sur les nuisances sonores. Assemblée Nationale, Paris, 2011, 176 p. Disponible sur : <<http://www.assemblee-nationale.fr/13/rap-info/i3592.asp>> (consulté la dernière fois le 28 décembre 2011).
- [Meu01]**, MEUNIER S. Critères psychoacoustiques des nuisances sonores : évaluation perceptives de bruits de circulation routière et ferroviaire. Acoustique & Techniques, 2001, n°26, pp. 30-35.
- [Mie85]**, MIEDEMA H.M.E. Annoyance caused by two noise sources. Journal of Sound and Vibration, 1985, vol. 98, n°4, pp. 592-595.
- [Mie96]**, MIEDEMA H.M.E. Quantification of annoyance caused by environmental noise and odour. Ph. D. Thesis. Leiden: TNO, 1996, 202p.
- [Mie04]**, MIEDEMA H.M.E. Relationship between exposure to multiple noise sources and noise annoyance. Journal of the Acoustical Society of America, 2004, vol. 116, n°2, pp. 949-957.
- [MGLB08]**, MENARD C., GIRARD D., LEON C., BECK F. Baromètre santé environnement 2007. Saint-Denis : INPES coll. Baromètre Santé, 2008, 420p. ISBN 978-2-9161-9205-5.
- [MM98]**, MEUNIER S., MARCHIONI A. Relations entre les caractéristiques physiques et les attributs subjectifs des signaux acoustiques, Rapport CNRS n°95N84/0113, Marseille : CNRS/LMA, 1998.
- [MMDP12]**, MOREL J., MARQUIS-FAVRE C., DUBOIS D., PIERRETTE M. Road traffic in urban areas: a perceptual and cognitive typology of pass-by noises. Acta Acustica united with Acustica, 2012, vol.98, n°1, pp. 166-178.
- [MMVA10]**, MOREL J., MARQUIS-FAVRE C., VIOLLON S., ALAYRAC M. Proposal for a simple model predicting the total annoyance due to industrial noises with low-frequency content mixed to industrial noises with a 100Hz main component. **In:** Proceedings of InterNoise 2010, Lisbonne, Portugal, 2010, 8p.
- [MMVA12]**, MOREL J., MARQUIS-FAVRE C., VIOLLON S., ALAYRAC M. A laboratory study on total noise annoyance due to combined industrial noises. Acta Acustica united with Acustica, 2012, vol.98, n°2, pp. 286-300.
- [MO01]**, MIEDEMA H.M.E., OUDSHOORN C. Annoyance from transportation noise: relationships with exposure metrics DNL and DENL and their confidence intervals. Environmental Health Perspectives, 2001, vol. 109, n°4, pp. 409-416.
- [MPA05]**, MARQUIS-FAVRE C., PREMAT E., AUBREE D. Noise and its effect – a review on qualitative aspects of sound. Part II: Noise and annoyance. Acta Acustica united with Acustica, 2005, vol. 91, n°4, pp. 626-642.
- [MPAV05]**, MARQUIS-FAVRE C., PREMAT E., AUBREE D., VALLET M. Noise and its effect – a review on qualitative aspects of sound. Part I: Notions and acoustic ratings. Acta Acustica united with Acustica, 2005, vol. 91, n°4, pp. 613-625.

**[MPV03]**, MIEDEMA H.M.E, PASSCHIER-VERMEER W., VOS H. Elements for a position paper on night-time transportation noise and sleep disturbance. TNO Inro report 2002-59, 2003, 64p.

**[MR02]**, MARTIN-HOUSSART G., RIZK C., Mesurer la qualité de vie dans les grandes agglomérations. INSEE Première n°868, 2002, 4p.

**[MV95]**, MOURET J., VALLET M. Les effets du bruit sur la santé. Ministère des Affaires Sociales, de la Santé et de la Ville. 1995. 131p.

**[MV04]**, MIEDEMA H.M.E., VOS H. Noise annoyance from stationary sources: Relationships with exposure metrics day-evening-night level (DENL) and their confidence intervals. Journal of the Acoustical Society of America, 2004, vol. 116, n°1, pp. 334-343.

**[MV09]**, MARQUIS-FAVRE C., VIOLLON S. Détermination d'un indicateur intégré caractéristique de l'impact environnemental d'un site industriel en termes de nuisance sonore. Rapport final, convention AFSSE/CNRS n°ES-2 005-018, 2009, 311p.

**[NB06]**, NILSSON M.E., BERGLUND B. Noise annoyance and activity disturbance before and after the erection of a roadside noise barrier. Journal of the Acoustical Society of America, 2006, vol. 119, n°4, pp. 2178-2188.

**[NC05]**, NAKACHE J.-P., CONFAIS J. Approche pragmatique de la classification. Paris, France : Technip, 2005. ISBN 2-7108-0848-X.

**[NIC02]**, NORDIC INNOVATION CENTER. Acoustics: human sound perception – guidelines for listening tests. NT ACOU 111. Espoo : NIC, 2002, 13p.

**[Nii07]**, NILSSON M.E. A-weighted sound pressure level as an indicator of short-term loudness or annoyance of road-traffic sound. Journal of Sound and Vibration, 2007, vol. 302, n°1-2, pp. 197-207.

**[Nos07]**, LE NOST G. Contribution à l'étude de l'impact environnemental sonore des sites industriels : une typologie perceptive de sources de bruit. Thèse d'acoustique. Lyon : INSA de Lyon, 2007, 247p.

**[NYNH+10]**, NGUYEN T.L. YANO T., NGUYEN H.Q., HOANG T.L., NISHIMURA T., MORIHARA T., HASHIMOTO Y., SATO T. Community responses to aircraft and combined noises in Hanoi. In: Proceedings of InterNoise 2010, Lisbonne, Portugal, 2010, 10p.

**[NYNS09]**, NGUYEN T.L., YANO T., NISHIMURA T., SATO T. Social survey on community response to aircraft noise in Ho Chi Minh City. Journal of Temporal Design in Architecture and the Environment, 2009, vol. 9, n°1, pp. 154-157 .

**[OBAS+07]**, ÖHRSTRÖM E., BARREGARD L., ANDERSSON E., SKANBERG A., SVENSSON H., ANGERHEIM P. Annoyance due to single and combined sound exposure from railway and road traffic. Journal of the Acoustical Society of America, 2007, vol. 122, n°5, pp. 2642-2652.

**[Oii78]**, OLLERHEAD J.B. Predicting public reaction to noise from mixed sources. In: Proceedings of InterNoise 1978, San Fransisco, USA, 1978, pp. 579-584.

**[Oll80]**, OLLERHEAD J.B. Accounting for time of day and mixed source effects in the assessment of community noise exposure. **In:** Proceedings of the Third International Congress on Noise as a Public Health Problem 1978, Freiburg, Germany, 1980, pp. 556-561.

**[Oui01]**, OUIS D. Annoyance from road traffic noise: a review. Journal of Environmental Psychology, 2001, vol. 21, pp. 101-120.

**[OYT07]**, OTA A., YOKOSHIMA S., TAMURA A. Comparison of dose-response relationships among different traffic noises – social survey on residential areas exposed to combined noises. **In:** Proceedings of InterNoise 2007, Istanbul, Turkey, 2007, 8p.

**[OYT08]**, OTA O., YOKOSHIMA S., TAMURA A. The metrics of mixed traffic noise: results of simulated environments experiments. **In:** Proceedings of ICBEN 2008, Mashantucket, USA, 2008, 8p.

**[Pal06]**, PALLAS M.-A. Source de bruit des poids lourds ; mesure des véhicules du trafic et analyse de leur comportement. Acoustique & Techniques, 2006, n°44 (Dossier Spécial Journée SFA/Renault-SNCF), pp. 22-26.

**[Par08]**, PARIZET E. Acoustique automobile – cours de master recherche MEGA. Lyon : Laboratoire Vibrations Acoustique, 2008, 64 p.

**[Pau97]**, PAULSEN R. On the influence of the stimulus duration in psychophysical judgment of environmental noises taken in the laboratory. **In:** Proceedings of InterNoise 1997, Budapest, Hungary, 1997, pp. 1175-1178.

**[PBB08]**, PEDERSEN E., BOUMA J., BAKKER R., VAN DEN BERG F. Annoyance caused by community noise – interaction of sounds from road traffic and wind turbines. SAE Technical Paper series 2008-36-0544, 2008, 11p.

**[PBRL+07]**, POLACK J.-D., BEAUMONT J., ROBIN B., LESAUX S., PRONELLO C., CAMUSSO C., ARRAS C., BOZZETO D., DROIN L. Pertinence des descripteurs d'ambiance sonore urbaine : application aux bruits des transports pendant les périodes sensibles. Programme « bruit et nuisances sonores », 2007, 191p. Disponible en ligne <<http://www.ecologie.gouv.fr/Pertinence-des-descripteurs-d.html>>

**[PECE02]**, PARLEMENT EUROPEEN, CONSEIL EUROPEEN. Directive 2002/49/CE du 25 juin 2002 relative à l'évaluation et à la gestion du bruit dans l'environnement. Journal Officiel des Communautés Européennes, n°189 du 18 juillet 2002, 12 p.

**[PK11]**, PARIZET E., KOEHL V. Application of free sorting tasks to sound quality experiments. Applied Acoustics, 2011, vol. 73, n°1, pp. 61-65.

**[PHG05]**, PARIZET E., HAMZAOUI N., SABATIE G. Comparison of some listening test methods: a case study. Acta Acustica united with Acustica, 2005, vol. 91, n°2, pp. 356-364.

**[PITO98]**, PREIS A., ISHIBASHI M., TACHIBANA H., OSHINO Y. Perception of the vehicle pass-by noise on different road surfaces. **In:** Proceedings of InterNoise 1998, Christchurch, New-Zealand, 1998, pp. 935-938.

**[PMMR+12]**, PIERRETTE M., MARQUIS-FAVRE C., MOREL J., RIOUX L., VALLET M., VIOLLON S., MOCH A. Noise annoyance due to industrial and road traffic combined noises:

a survey and a total annoyance model comparison. *Journal of Environmental Psychology*, 2012, vol. 32, n°2, pp. 178-186.

**[Poi09]**, POITEVINEAU J. Prendre ses distances! De l'usage raisonné (raisonnable) de quelques statistiques pour les arbres additifs. In: DUBOIS D. (éd) *Le sentir et le dire. Concepts et méthodes en psychologie et linguistique cognitives*. Paris, France : L'Harmattan, 2009, pp. 255-278. ISBN 978-2-296-10826-4.

**[Pou91]**, POULSEN T. Influence of session length on judged annoyance. *Journal of Sound and Vibration*, 1991, vol. 145, n°2, pp. 217-224.

**[Pow79a]**, POWELL C.A. Effect of road-traffic background noise on judgments of individual airplane noises. NASA Technical paper n°1433, 1979, 42 p.

**[Pow79b]**, POWELL C.A. Laboratory study on combined airplane and road-traffic noise. NASA Technical paper n°1478, 1979, 41 p.

**[Pow79c]**, POWELL C.A. A summation and inhibition model of annoyance response to multiple community noise sources. NASA Technical paper n°1479, 1979, 24p.

**[PP72]**, PARRY H.J., PARRY J.K. The interpretation and meaning of laboratory determinations of the effect of duration on the judged acceptability of noise. *Journal of Sound and Vibration*, 1972, vol. 20, n°1, pp. 51-57.

**[PR75]**, POWELL C.A., RICE C.G. Judgments of aircraft noise in a traffic noise background. *Journal of Sound and Vibration*, 1975, vol. 38, n°1, pp. 39-50.

**[Pre96]**, PREIS A. Measurement of annoyance components. In: *Proceedings of InterNoise 1996*, Liverpool, England, 1996, pp. 2289-2294.

**[Pre98]**, PRESSNITZER D. Perception de rugosité psychoacoustique : d'un attribut élémentaire de l'audition à l'écoute musicale. Thèse d'acoustique. Paris : Université Paris VI, 1998, 249p.

**[PSA00]**, PEDERSEN T.H., SONDERGAARD M, ANDERSEN B. Objective method for assessing the audibility of tones in noise – Joint Nordic Method version 2. DELTA Acoustics&Vibration Report n°AV 1952/99, 2000, 18 p.

**[Rai06]**, RAIMBAULT M. Qualitative judgements of urban soundscapes: questioning questionnaires and semantic scales. *Acta Acustica united with Acustica*, 2006, vol.92, n°6, pp. 929-937.

**[RD05]**, RAIMBAULT M., DUBOIS D. Urban soundscapes: Experiences and knowledge. *Cities*, 2005, vol.22, n°5, pp. 339-350.

**[RI84]**, RICE C.G., IZUMI K. Annoyance due to combinations of noises. In: *Proceedings of the Institute of Acoustics*, Swansea, England, 1984, pp. 287-294.

**[Ric75]**, RICE C.G. Subjective assessment of transportation noise. *Journal of Sound and Vibration*, 1975, vol. 43, n°2, pp. 407-417.

- [Ric77]**, RICE C.G. Development of cumulative noise measure for the prediction of general annoyance in an average population. *Journal of Sound and Vibration*, 1977, vol. 52, n°3, pp. 345-364.
- [Ric96]**, RICE C.G. Human response effects of impulse noise. *Journal of Sound and Vibration*, 1996, vol. 190, n°3, pp. 525-543.
- [RLCW04]**, RAIMBAULT M., LANVANDIER C., CREMEZI-CHARLET C., WALKER E. Situations de multi-exposition aux bruits routier et ferroviaire : quelles pistes de recherche pour de nouveaux indicateurs ? *Acoustique & Techniques*, 2004, n°37, pp. 22-27.
- [Rob71]**, ROBINSON D.W. Towards a unified system of noise assessment. *Journal of Sound and Vibration*, 1971, vol. 14, n°3, pp. 279-298.
- [Ros78]**, ROSCH E. Principles of categorization. In: *Cognition and categorization*. Hillsdale, USA : Lawrence Erlbaum Associates, 1978, pp. 27-48. ISBN 0-470-26377-6.
- [RSW96]**, RONNEBAUM T., SCHULTE-FORTKAMP B., WEBER R. Synergetic effects of noise from different sources: a literature study. In: *Proceedings of InterNoise 1996*, Liverpool, England, 1996, pp. 2241-2246.
- [San01]**, SANDBERG U. Tyre/road noise – myths and realities. In: *Proceedings of InterNoise 2001*, La Hague, Pays-Bas, 2001, 22 p.
- [Sap90]**, SAPORTA G. Probabilités, analyse des données et statistique. Paris, France : Technip, 1990. ISBN 2-7108-0565-0.
- [SB76]**, SARDIN P., BAR P. Aspects de la gêne due au bruit de la circulation routière. Ministère de l'Équipement, Direction des Routes et de la Circulation Routière, SETRA-IRT, Paris, 1976, 125p.
- [SETRA09a]**, SERVICE D'ÉTUDE SUR LES TRANSPORTS, LES ROUTES, ET LEURS AMÉNAGEMENTS. Prévion du bruit routier 1 – Calcul des émissions sonores dues au trafic routier, Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire, SETRA, Bagneux, 2009, 124p.
- [SETRA09b]**, SERVICE D'ÉTUDE SUR LES TRANSPORTS, LES ROUTES, ET LEURS AMÉNAGEMENTS. Prévion du bruit routier 2 – Méthode de calcul de propagation du bruit incluant les effets météorologiques (NMPB 2008), Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire, SETRA, Bagneux, 2009, 133p.
- [SD06]**, SCHULTE-FORTKAMP B., DUBOIS D. Recent advances in soundscape research. *Acta Acustica united with Acustica*, 2006, vol. 92, n°6, pp. v-viii.
- [Sch78]**, SCHULTZ T.J. Synthesis of social survey on noise annoyance. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1978, vol. 78, n°2, pp. 377-404.
- [Sch00]**, SCHOMER P. Loudness-Level weighting for environmental noise assessment. *Acta Acustica united with Acustica*, 2000, vol. 86, n°1, pp. 49-61.
- [SMWA98]**, SUSINI P., MISDARIIS N., WINSBERG S., MCADAMS S. Caractérisation perceptive de bruits. *Acoustique&Techniques*, 1998, n°13, pp. 11-15.

- [Sol96]**, SOLBERG S. Total noise rating at Oslo airport GarderMoen. In: Proceedings of InterNoise 1996, Liverpool, England, 1996, pp. 2501-2504.
- [SSS01]**, SCHOMER P., SUZUKI Y., SAITO F. Evaluation of loudness-level weightings for assessing the annoyance of environmental noise. Journal of the Acoustical Society of America, 2001, vol. 110, n°5, pp. 2390-2397.
- [SW97]**, SCHULTE-FORTKAMP B., WEBER R. Overall annoyance ratings in a multisource environment. In: Proceedings of InterNoise 1997, vol. 2, Budapest, Hungary, pp.1041-1046.
- [Tar06]**, TARDIEU J. De l'ambiance à l'information sonore dans un espace public. Méthodologie et réalisation appliquées aux gares. Thèse d'Acoustique. Paris : Université de Paris 6, 2006, 248p.
- [Tay82]**, TAYLOR S.M. A comparison of models to predict annoyance reactions to noise from mixed sources. Journal of Sound and Vibration, 1982, vol. 81, n°1, pp. 123-138.
- [TDL10]**, TOUSSAINT L., DUTILLEUX G., LEFEVRE H. Emission acoustique des deux-roues motorisés : scooters et cyclomoteurs. In: Actes du 10<sup>e</sup> Congrès Français d'Acoustique, Lyon, France, 2010, 5p.
- [TMF08]**, TROLLE A, MARQUIS-FAVRE C., FAURE J. An analysis of the effects of structural parameter variations on the auditory perception of environmental noises transmitted through a simulated window. Applied Acoustics, 2008, vol. 69, n°12, pp. 1212-1223.
- [TMH09]**, TROLLE A., MARQUIS-FAVRE C., HAMZAOUI N. Auditory evaluation of sounds radiated from a vibrating plate inside a damped cavity. Acta Acustica united with Acustica, 2009, vol. 95, n°2, pp. 343-355.
- [TNS10]**, TNS SOFRES. Les Français et les nuisances sonores – principaux résultats. Institut TNS SOFRES, 2010, 19p.
- [Tro09]**, TROLLE A. Evaluation auditive de sons rayonnés par une plaque vibrante à l'intérieur d'une cavité amortie : ajustement des efforts de calcul vibro-acoustique. Thèse d'Acoustique. Lyon : INSA de Lyon, 2009, 194p.
- [TSPL08]**, TARDIEU J., SUSINI P., POISSON F., LAZAREFF P., MC ADAMS S. Perceptual study of soundscapes in train stations. Applied Acoustics, 2008, vol. 69, n°12, pp. 1224-1239.
- [Ver83]**, VERNET M. La gêne due au bruit des deux-roues à moteur. TEC, 1983, n°59, pp. 29-32.
- [VLD02]**, VIOLLON S., LAVANDIER C., DRAKE C. Influence of visual setting on sound rating in an urban environment. Applied Acoustics, 2002, vol. 63, n°5, pp. 493-511.
- [VMB04]**, VIOLLON S., MARQUIS-FAVRE C., BAUMANN C. Annoyance due to industrial noise: perceptual assessment of legislation standard. In: CFA/DAGA 2004, Strasbourg, France, 2004, 2p.



**[Vog99]**, VOGEL C. Etude sémiotique et acoustique de l'identification des signaux sonores d'avertissement en contexte urbain. Thèse d'Acoustique. Paris : Université Paris 6, 1999, 178p.

**[Vos92]**, VOS J. Annoyance caused by simultaneous impulse, road-traffic, and aircraft sounds: a quantitative model. Journal of the Acoustical Society of America, 1992, vol. 91, n°6, pp. 3330-3345.

**[Vos03]**, VOS J. A- and C-weighted sound levels as predictors of the annoyance caused by shooting sounds, for various façade attenuation types. Journal of the Acoustical Society of America, 2003, vol. 113, n°1, pp. 336-347.

**[VV97]**, VERSFELD N.J., VOS J. Annoyance caused by sounds of wheeled and tracked vehicles. Journal of the Acoustical Society of America, 1997, vol. 101, n°5, pp. 2677-2685.

**[VV02]**, VERSFELD N.J., VOS J. A-weighted sound level as a predictor of the annoyance caused by road traffic consisting of various proportions of light and heavy vehicles. Journal of Sound and Vibration, 2002, vol. 253, n°2, pp. 389-399.

**[WHO11]**, WORLD HEALTH ORGANIZATION. Burden of disease from environmental noise: quantification of healthy life years lost in Europe. WHO Regional Office for Europe, 2011, 128p. ISBN 978-92-890-0229-5.

**[YDB82]**, YANIV S.L., DANNER W.F., BAUER J.W. Measurement and prediction of annoyance caused by time-varying highway noise. Journal of the Acoustical Society of America, 1982, vol. 72, n°1, pp. 200-207.

**[YOT07]**, YOKOSHIMA S., OTA A., TAMURA A. Application of covariance structure analysis to the evaluation structure of mixed noise. **In:** Proceedings of InterNoise 2007, Istanbul, Turkey, 2007, 8p.

# Références personnelles

## Publications dans revue internationale à comité de lecture

**MOREL J.**, MARQUIS-FAVRE C., GILLE L.-A., PIERRETTE M. Noise annoyance indicators for various pass-by noises in isolation and combined with industrial noise. Rédaction en cours pour soumission, 2013.

**MOREL J.**, MARQUIS-FAVRE C., VIOLLON S., ALAYRAC M. A laboratory study on total annoyance due to combined industrial noises. Acta Acustica united with Acustica, 2012, vol. 98, n°2, pp. 286-300.

Article sélectionné par la Direction Générale de l'Environnement de la Commission Européenne pour une synthèse dans European Commission's Science for Environment Policy News Alert (News Alert, 2012, n°284).

**MOREL J.**, MARQUIS-FAVRE C., DUBOIS D., PIERRETTE M. Road traffic in urban areas: a perceptual and cognitive typology of pass-by noises. Acta Acustica united with Acustica, 2012, vol.98, n°1, pp. 166-178.

PIERRETTE M., MARQUIS-FAVRE C., **MOREL J.**, RIOUX L., VALLET M., VIOLLON S., MOCH A. Noise annoyance due to industrial and road traffic combined noises: a survey and a total noise annoyance comparison. Journal of Environmental Psychology, 2012, vol. 32, n°2, pp. 178-186.

Corrigendum to Noise Annoyance due to industrial and road traffic combined noises: a survey and a total annoyance model comparison. [Journal of Environmental Psychology, 2012, vol. 32, n°2, pp. 178-186, PIERRETTE M., MARQUIS-FAVRE C., **MOREL J.**, RIOUX L., VALLET M., VIOLLON S., MOCH A.]. Journal of Environmental Psychology, 2012, vol. 32, n°3, p. 285.

ALAYRAC M., MARQUIS-FAVRE C., VIOLLON S., **MOREL J.**, LE NOST G. Annoyance from industrial noise: indicators for a wide variety of industrial sources. Journal of the Acoustical Society of America, 2010, vol. 128, n°3, pp. 1128-1139.

## Publications dans revue nationale après sélection des communications aux congrès de la société savante française d'acoustique

**MOREL J.**, MARQUIS-FAVRE C., PIERRETTE M., GILLE L.-A. Caractérisation physique et perceptive de bruits routiers urbains pour une meilleure évaluation de la gêne sonore. Acoustique & Techniques, 2012, n°68, pp. 32-37.

**MOREL J.**, MARQUIS-FAVRE C., VIOLLON S., ALAYRAC M. Modèles prédictifs de gêne en situation de multi-exposition à des bruits industriels. Acoustique & Techniques, 2011, n°65, pp. 19-23.

## Rapports de recherche

**MOREL J.**, MARQUIS-FAVRE C. Rapport d'étude bibliographique : la gêne sonore en situation de multi-exposition. Contrat ADEME n°0866 C0066, 2010, 34p.

**MOREL J.**, MARQUIS-FAVRE C. Rapport d'étude bibliographique : une typologie physique de bruit routier. Contrat ADEME n°0866C0066, 2009, 37p.

**MOREL J.**, MARQUIS-FAVRE C., PIERRETTE M. Enregistrements stéréophoniques de bruits routiers. Contrat ADEME n°0866C0066, 2009, 20p.

**MOREL J.**, MARQUIS-FAVRE C. Mesures acoustiques du trafic routier à proximité du site industriel choisi. Contrat ADEME n°0866C0066, 2009, 9p.

**MOREL J.**, MARQUIS-FAVRE C. Caractérisation du trafic routier à proximité du site industriel choisi. Contrat ADEME n°0866C0066, 2009, 9p.

MARQUIS-FAVRE C., REYDELLET F., OLYN X., PIERRETTE M., **MOREL J.** Cartographie du bruit routier aux abords du site industriel étudié. Contrat ADEME n°0866C0066, 2009, 17p.

## Communications avec acte

MARQUIS-FAVRE C., **MOREL J.**, RICHEZ A. Comparison of short-term noise annoyance assessment methods. In: Proceedings of InterNoise 2012, New York, USA, août 2012, 11p. Conférence invitée.

**MOREL J.**, MARQUIS-FAVRE C. Physical and perceptual characterization of road traffic in urban areas for a better noise annoyance assessment. In: Proceedings of Acoustics 2012, Nantes, France, avril 2012, 6p.

**MOREL J.**, MARQUIS-FAVRE C. Caractérisation physique et perceptive de bruits routiers en milieu urbain. In: Actes des RIDAD 2011, Vaulx-en-Velin, France, mars 2011, 13p.

**MOREL J.**, MARQUIS-FAVRE C., DUBOIS D., PIERRETTE M. A perceptive and cognitive typology of vehicle pass-by noises. In: Proceedings of InterNoise 2010, Lisbon, Portugal, juin 2010, 9p.

**MOREL J.**, MARQUIS-FAVRE C., VIOLLON S., ALAYRAC M. Proposal for a simple model predicting the total annoyance due to industrial noises with low-frequency content mixed to industrial noises with a 100Hz main component. In: Proceedings of InterNoise 2010, Lisbon, Portugal, juin 2010, 8p.

**MOREL J.**, MARQUIS-FAVRE C., VIOLLON S., ALAYRAC M. Modèles prédictifs de gêne en situation de multi-exposition à des bruits industriels. In: Actes du 10<sup>ème</sup> Congrès Français d'Acoustique, Lyon, France, avril 2010, 5p.

## Communications sans acte

**MOREL J.**, MARQUIS-FAVRE C. Why free sorting tasks? In: COST workshop WG2: Collecting and documenting soundscape, Nantes, France, avril 2012. Conférence invitée.

**MOREL J., MARQUIS-FAVRE C.** Road traffic in urban areas: proposal of noise annoyance indicators. **In:** Journées du GDR VISIBLE, Bron, France, mai 2011.

**MOREL J., MARQUIS-FAVRE C., DUBOIS D., PIERRETTE M.** Free sorting task and road traffic pass-by noises. **In:** 3<sup>rd</sup> LAM/INCAS<sup>3</sup> workshop. Free sorting tasks and measures of similarities: On some structural and formal properties of human categories, Paris, France, novembre 2010. Conférence invitée.

### **Posters**

PIERRETTE M., MARQUIS-FAVRE C., VALLET M., VIOLLON S., **MOREL J.**, MOCH A., RIOUX L. Gêne sonore en situation de multi-exposition aux bruits routier et industriel : une enquête *in situ*. **In:** 10<sup>ème</sup> Congrès Français d'Acoustique, Lyon, France, avril 2010.

**MOREL J., VIOLLON S., MARQUIS-FAVRE C., ALAYRAC M.** Gêne en situation de multi-exposition à différents bruits industriels. **In:** Journées des Jeunes Chercheurs en Audition, Acoustique musicale et Signal audio, Marseille, France, novembre 2009.

### **Relecture d'article pour revue internationale**

Un article pour la revue NCEJ (Noise and Control Engineering Journal).



# ANNEXES

ANNEXE A : LA GENE SONORE EN SITUATION DE MULTI-EXPOSITION AUX BRUITS ROUTIER ET INDUSTRIEL - RESULTATS D'UNE ENQUETE <i>IN SITU</i> .....	251
ANNEXE B : INDICES ACOUSTIQUES ET PSYCHOACOUSTIQUES CALCULES SUR L'ENSEMBLE DES BRUITS DE PASSAGE DE VEHICULES ROUTIERS .....	257
ANNEXE C : QUESTIONNAIRES ADRESSES AUX SUJETS A L'ISSUE DES EXPERIMENTATIONS.....	261
ANNEXE D : TEST DE COMPARAISON PAR PAIRES – RESULTATS DU CHOIX FORCE POUR LE DESAGREMENT SONORE .....	275
ANNEXE E : EVALUATION ET COMPARAISON DES MODELES PREDICTIFS DE LA GENE TOTALE : LES RESULTATS EN DETAIL .....	283



# **ANNEXE A : La gêne sonore en situation de multi-exposition aux bruits routier et industriel - résultats d'une enquête *in situ***

Cette annexe résume les résultats d'une enquête *in situ* portant sur la gêne en situation de multi-exposition aux bruits routier et industriel. Le lecteur trouvera plus de détails dans les références publiques suivantes :

- **Rapport final du projet financé par l'AFSSET [MV09]**, pour la réalisation de la cartographie de bruit du site industriel ;
- **Mémoire de thèse de Marion Alayrac [Ala09]**, pour l'étude du bruit provenant du site industriel ;
- **Rapport final du projet NOISI-EXPO [EEO10] et l'article de Pierrette *et al.* [PMMR+12]**, pour la réalisation de la cartographie de bruit routier dans la zone enquêtée, la présentation des données recueillies, leur analyse sous l'angle de la multi-exposition, et enfin la confrontation de modèles de gêne totale.

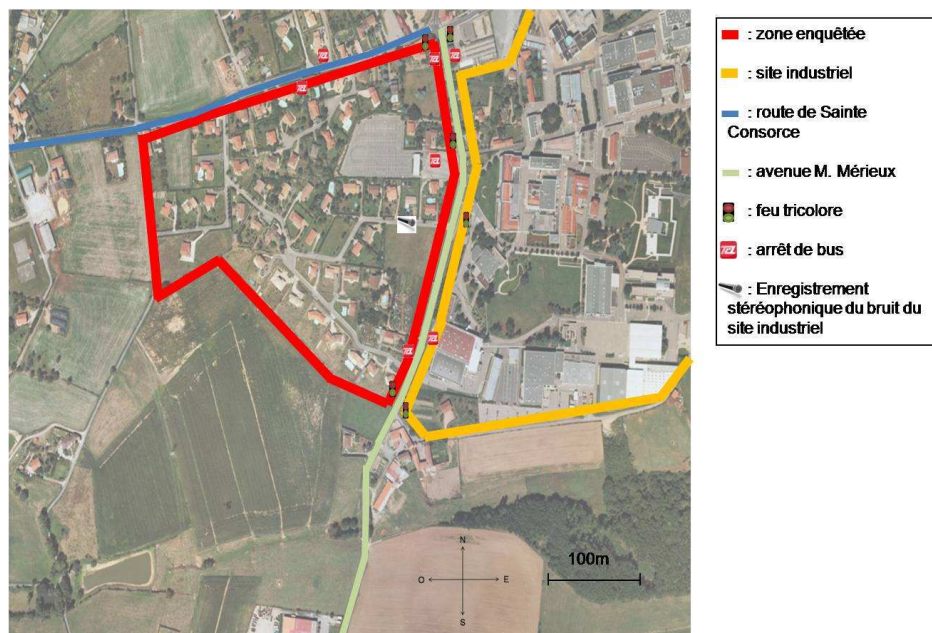
Nous synthétiserons ici seulement les éléments pertinents pour la compréhension de notre travail.

## **1. L'enquête**

### **1.1. La zone enquêtée**

La zone enquêtée se situe dans l'ouest de l'agglomération Lyonnaise, à Marcy l'Etoile. Elle est principalement constituée de logements pavillonnaires. Deux routes départementales à double sens de circulation la bordent : (1) la route de Sainte Consoce sur un axe est-ouest, (2) l'avenue Marcel Mérieux sur un axe nord-sud. Le site industriel est également bordé par l'avenue Marcel Mérieux et s'étend du nord au sud de la zone enquêtée (cf. Figure A.1). On trouve le long de ces deux routes départementales ainsi qu'à leur intersection plusieurs feux tricolores et arrêts de bus.





**Figure A.1 : Carte de la zone enquêtée.**

Plusieurs voies croisent la route de Sainte Consoerce et l'avenue Marcel Mérieux, en direction ou en provenance de la zone enquêtée. Il s'agit de chemins communaux desservant la zone d'habitation. Le trafic sur ces entrées de lotissement est négligeable par rapport au trafic sur les routes délimitant la zone enquêtée.

Le site industriel a été sélectionné en cohérence avec les bruits industriels permanents et stables étudiés dans le projet financé par l'AFSSET [MV09]. Il s'agit d'un site fonctionnant 24h/24 dans lequel se trouvent des sources de bruit permanent et stable.

## 1.2. Caractérisation du trafic routier

Dans l'optique de caractériser l'impact du trafic routier dans la zone enquêtée, une cartographie du bruit routier a été réalisée. En préalable, un comptage automatique des données de trafic routier a été effectué en parallèle à des mesures acoustiques (cf. [EEO10]).

Les données de trafic, dont les principaux éléments sont résumés dans le Tableau A.1, servent de données d'entrée pour la modélisation du bruit routier sous Mithra<sup>®</sup>CSTB. Les mesures acoustiques sont utilisées pour le recalage du modèle.

	Avenue M. Mérieux		Route de Sainte Consoerce	
	Nord-Sud	Sud-Nord	Est-Ouest	Ouest-Est
Tous véhicules	4728	4814	1309	1344
Poids Lourds	165	168	18	20
Véhicules Légers	4563	4646	1291	1324

**Tableau A.1 : Tableau récapitulatif des données de trafic (moyen journalier).**

La cartographie obtenue a permis de regrouper la population interrogée selon des classes de niveaux de bruit. Ces classes sont exprimées en fonction de l'indice  $L_{den}$ , et figurent dans le Tableau A.2.

Classes de niveaux sonores	$L_{den,route}$ (dB(A))	$L_{den,ind}$ (dB(A))	$L_{den,tot}$ (dB(A))
1	[43 ; 46]	[27.1 ; 29.8]	[43 ; 46]
2	[46 ; 49]	[29.8 ; 32.5]	[46 ; 49]
3	[49 ; 52]	[32.5 ; 35.2]	[49 ; 52]
4	[52 ; 55]	[35.2 ; 37.9]	[52 ; 55]
5	[55 ; 58]	[37.9 ; 40.6]	[55 ; 58]
6	[58 ; 61]	[40.6 ; 43.3]	[58 ; 61]
7	[61 ; 64]	[43.3 ; 46]	[61 ; 64]
8	[64 ; 67]	[46 ; 48.7]	[64 ; 67]
9	[67 ; 70]	[48.7 ; 51.4]	[67 ; 70]

**Tableau A.2 : Classes de niveaux d'exposition sonore, exprimées au moyen de l'indice  $L_{den}$ .**  $L_{den,route}$  : indice  $L_{den}$  pour le bruit routier ;  $L_{den,ind}$  : indice  $L_{den}$  pour le bruit industriel ;  $L_{den,tot}$  : indice  $L_{den}$  pour le bruit total.

### 1.3. Caractérisation du site industriel

Le site industriel comporte un grand nombre de sources de bruit. Il présente trois types de sources de bruit principales : des groupes froids, les pompes des groupes froids, des bouches de ventilation.

Des mesures ont été effectuées à l'intérieur ainsi qu'à l'extérieur du site dans la zone enquêtée. Elles ont permis l'établissement de la cartographie du bruit industriel, réalisée au moyen du logiciel TYMPAN<sup>®</sup>EDF.

La cartographie obtenue a permis de regrouper la population interrogée selon des classes de niveau de bruit. Ces classes sont exprimées en fonction de l'indice  $L_{den}$ , et figurent dans le Tableau A.2.

Le logiciel TYMPAN<sup>®</sup>EDF a permis de déterminer qu'en certains points de la zone d'habitation (dont le point où nous avons par la suite réalisé nos enregistrements stéréophoniques de bruit industriel, cf. Figure A.1), le bruit du site industriel est principalement composé de 3 sources de bruit dont il a été établi qu'elles appartiennent à trois catégories perceptives différentes (établies par G. Le Nost dans ses travaux de thèse [Nos07]) : catégories 2, 4 et 6.

Ainsi, pour caractériser le bruit du site industriel que nous avons enregistré, nous utiliserons les indices mis en avant par Alayrac [Ala09] concernant ces différentes catégories.

### 1.4. Caractérisation du bruit total

Le niveau du bruit total a été obtenu par sommation énergétique des niveaux de bruits routier et industriel. Sur cette base, nous avons ensuite regroupé la population interrogée en classes de niveaux d'exposition sonore de bruit total (cf. Tableau A.2).

Etant donné les différences entre les valeurs des indices  $L_{den}$  pour le bruit routier et le bruit industriel, il est logique que les niveaux d'exposition totaux soient identiques aux niveaux d'exposition du bruit routier.

Il a été souligné par les acousticiens ayant effectué les mesures *in situ* que le bruit industriel est clairement audible dans la zone enquêtée en l'absence de bruit routier [MV09], donc principalement la nuit ou en l'absence de passage de véhicules routiers en journée.

## 1.5. Le questionnaire

Le questionnaire se compose de 53 questions pour la plupart fermées, simplifiant ainsi la comparaison des réponses entre les enquêtés [EEO10].

Le questionnaire permet de recueillir des informations relatives aux différents facteurs non-acoustiques pouvant influencer les réponses de gêne : caractéristiques démographiques, attitude face au bruit et à ses sources, contexte dans lequel est perçu le bruit. Il permet également de récolter des informations sur des facteurs acoustiques pouvant également influencer les réponses de gêne : évaluation des caractéristiques du bruit telles que le caractère intermittent, fort, aigu, etc. Enfin on trouve également des questions permettant de récolter les réponses de gêne dues au bruit industriel, au bruit routier ainsi qu'au bruit total. Ces questions respectent la démarche préconisée par la norme ISO 15666 [ISO03] pour la réalisation d'enquêtes socio-acoustiques.

## 2. Résultats

### 2.1. La population

L'enquête concerne 99 personnes, dont les caractéristiques socio-démographiques sont données dans le Tableau A.3.

En général les enquêtés ont évalué leur environnement de vie de manière positive. En effet 44% déclarent que leur ville est calme, 22% la jugent tranquille, et 84% assurent qu'ils n'ont pas prévu de déménager. 92% des enquêtés sont propriétaires de leur logement, et sur l'ensemble, seulement 1 individu déclare ne pas avoir de vue directe sur le site industriel.

Concernant le site industriel, 98% des enquêtés disent qu'il contribue au développement économique de la région, même si seulement 8% des enquêtés y travaillent ou ont des proches qui y travaillent.

		N(%)	Moyenne (écart-type)
Genre		50.5% H ; 49.5% F	
Age			45.9 (17.9)
Durée de résidence			11.6 (10.3)
Activité	Salarié	45.5%	
	Non salarié	54.5%	
	Retraité	29.3%	
	Etudiant	20.2%	
	Chômeur	2%	
	Au foyer	3%	

**Tableau A.3 : Caractéristiques socio-démographiques de la population enquêtée.**

### 2.2. Facteurs non-acoustiques

**La sensibilité au bruit** est évaluée par 5 items qui ont servi à la construction d'un indice global de sensibilité. Il est ressorti que la population enquêtée est de manière générale légèrement à modérément sensible au bruit. En conséquence, il n'y a pas de corrélation significative entre la sensibilité (via l'indice global construit) et réponses de gêne. Par contre il y a une corrélation significative avec un des 5 items.

En dépit du fait que le site industriel est perçu comme important pour le développement économique de la région, 21% des enquêtés déclarent ressentir souvent ou très souvent **une crainte en rapport avec le site industriel**. Cette crainte ressentie semble en liaison avec la gêne due au bruit industriel étant donné que ces deux variables sont significativement corrélées ( $r = 0.31$  ;  $p < 0.001$ ).

La gêne ressentie par les enquêtés est plus accentuée suivant **les périodes de la journée** (plutôt en matinée pour la gêne due au bruit de la circulation routière et plutôt la nuit pour la gêne due au bruit provenant du site industriel), et suivant **les saisons** (pour les gênes spécifiques respectives aux deux bruits, la saison la plus défavorable est l'été).

De manière générale, les enquêtés jugent que les deux bruits **ne perturbent pas leurs activités** à domicile. Par contre, ils empêchent parfois les enquêtés de **jouir de leurs espaces privatifs extérieurs** ou **d'ouvrir leur fenêtres** à certaines périodes de la journée.

### 2.3. Facteurs acoustiques

A la question « pourriez-vous dire quels types de bruits vous entendez chez vous ? », 79% des enquêtés ont mentionné le bruit routier et 58% d'entre eux le bruit industriel. De manière générale, la proportion des gens gênés par le bruit industriel est plus faible que celle des gens gênés par le bruit routier, ce qui est cohérent avec les niveaux d'exposition observés (cf. Tableau A.2) Plus particulièrement, 51% des enquêtés ont trouvé le bruit industriel moins gênant que le bruit routier, tandis que 27% d'entre eux les ont jugés également gênants, et 22% ont jugés que le bruit industriel était plus gênant que le bruit de la circulation routière.

De manière générale, les indices acoustiques sont peu corrélés aux réponses de gêne. Le Tableau A.4 récapitule ces corrélations.

	$A_{ind}$	$A_{route}$	$A_{tot}$
$L_{den,i}$	0.27 <sup>c</sup>	0.38 <sup>d</sup>	0.25 <sup>c</sup>

**Tableau A.4 : Coefficients de corrélation entre les réponses de gêne ( $A_{ind}$  : gêne spécifique due au bruit industriel,  $A_{route}$  : gêne spécifique due au bruit routier,  $A_{tot}$  : gêne totale) et les indices  $L_{den,i}$ ,  $i = ind, route$  ou total. <sup>c</sup>  $p < 0.01$  ; <sup>d</sup> :  $p < 0.001$ .**

### 2.4. Prédiction de la gêne totale : test de modèles de multi-exposition

Au total, 7 modèles de prédiction de la gêne totale ont été confrontés aux données recueillies : 4 modèles perceptifs (source dominante, régression linéaire, sommation vectorielle et mixte) et 3 modèles psychophysiques (sommation énergétique, différences énergétiques, et effets indépendants) [PMMR+12].

Les résultats de ces confrontations ont montré que les modèles psychophysiques ne permettent pas d'expliquer les variations dans les réponses de gêne totale (cf. Tableau A.5). Ceci n'est pas étonnant, étant donné les faibles corrélations entre réponses de gêne et niveaux d'exposition exprimés en  $L_{den}$  (cf. Tableau A.4). Les modèles perceptifs permettent une meilleure prédiction de la gêne que les modèles psychophysiques. Parmi les modèles perceptifs, les modèles de source dominante et mixte sont ceux qui maximisent la prédiction (ces deux modèles permettent d'expliquer 92% de la variance constatée dans les réponses de gêne totale).

Modèle	Equation de régression pour les modèles de gêne totale	R <sup>2</sup>	Err. stan.
Source dominante	$A_{tot} = 0.94\max(A_{ind}, A_{route})^d - 0.10$	0.92 <sup>d</sup>	0.71
Régression linéaire	$A_{tot} = 0.45A_{ind}^d + 0.61A_{route}^d + 0.60$	0.74 <sup>d</sup>	1.30
Mixte	$A_{tot} = 0.47A_{ind}^d + 0.51A_{route}^d + 0.44 A_{ind} - A_{route} ^d - 0.09$	0.92 <sup>d</sup>	0.71
Sommation vectorielle	$A_{tot} = 0.79\sqrt{(A_{ind}^2 + A_{route}^2)}^d + 0.06$	0.88 <sup>d</sup>	0.89
Sommation énergétique	$A_{tot} = 0.12L_{den,tot}^d - 3.03$	0.05 <sup>b</sup>	2.49
Effets indépendants	$A_{tot} = 0.03L_{den,ind}^a + 0.098L_{den,route}^d - 2.43$	0.04 <sup>b</sup>	2.49
Différences énergétiques	$A_{tot} = 0.11L_{den,tot}^a + 0.003 L_{den,ind} - L_{den,route} ^a - 2.93$	0.04 <sup>a</sup>	2.50

**Tableau A.5 : Modèles de gêne totale testés sur les réponses de gêne collectées. Les résultats de l'analyse de régression sont donnés (R<sup>2</sup> est le coefficient de détermination, err. stan. est l'erreur type de l'estimation). <sup>a</sup> : n.s. ; <sup>b</sup> : p<0.05 ; <sup>d</sup> : p<0.001.**

On voit à partir des coefficients de régression du modèle mixte que les contributions à la gêne totale des gênes spécifiques du bruit industriel et du bruit routier sont du même ordre de grandeur. L'examen des seuls niveaux d'exposition ne permet pas d'anticiper ce résultat. En effet on s'attend de fait à ce que le modèle de source dominante soit performant étant donné les écarts entre niveaux d'exposition au bruit routier et industriel. Toutefois l'examen des facteurs acoustiques et non-acoustiques a révélé que si le bruit de la circulation routière est plus gênant en matinée, généralement en journée, celui-ci masque le bruit industriel ; le bruit industriel quant à lui est gênant en période de soirée et de nuit. De plus, 27% des enquêtés ont jugé les bruits routier et industriel également gênants. Or l'utilisation du modèle de source dominante est critiquée notamment pour ce type de configuration où les gênes spécifiques ne sont pas clairement différentes. Un modèle comme le modèle mixte permet de mieux rendre compte de ces situations par l'attribution de pondérations aux gênes spécifiques.

## ANNEXE B : Indices acoustiques et psychoacoustiques calculés sur l'ensemble des bruits de passage de véhicules routiers

Le Tableau B.1 donne les valeurs des indices acoustiques et psychoacoustiques calculés sur la voie gauche (comme mentionné au Chapitre 3 , section 1.1.1.1.d), à partir des bruits de passage mesurés (à 60 dB(A)). Les notations non usuelles employées sont les suivantes :

- $L_{Ceq,T}$  : le niveau de pression sonore équivalent pondéré C ;
- $L_{C-A}$  : la différence entre  $L_{Ceq,T}$  et  $L_{Aeq,T}$  ;
- $L_{BF}$  : le niveau de pression sonore équivalent pondéré A en basses fréquences (calculé entre les bandes de tiers d'octave centrées sur 25 et 250Hz), (cf. par exemple [Ala09, AMVM+10]) ;
- $L_{MF}$  : le niveau de pression sonore équivalent pondéré A en moyennes fréquences (calculé entre les bandes de tiers d'octave centrées sur 315 et 1250Hz), (cf. par exemple [Ala09, AMVM+10]) ;
- $L_{HF}$  : le niveau de pression sonore équivalent pondéré A en hautes fréquences (calculé entre les bandes de tiers d'octave centrées sur 1.6 et 12.5kHz), (cf. par exemple [Ala09, AMVM+10]) ;
- $\Delta L^+$  et  $\Delta L^-$  : les taux d'accroissement et de décroissance du niveau de pression sonore pondéré A en fonction du temps ;
- $N_{15-18}$  : la sonie intégrée entre 15 et 18 Barks ;
- $\Delta N^+$  et  $\Delta N^-$  : les taux d'accroissement et de décroissance de la sonie en fonction du temps.

	bruit	Durée s	$L_{Ceq,T}$ dB(C)	$L_{C-A}$ dB	$L_{BF}$ dB(A)	$L_{MF}$ dB(A)	$L_{HF}$ dB(A)	$\Delta L^+$ dB(A)/s	$\Delta L^-$ dB(A)/s	N sones	S acum	R casper	$R_{max}$ casper	F cvacil	$F_{max}$ cvacil	$N_{15-18}$ sones	$\Delta N^+$ sones/s	$\Delta N^-$ sones/s
Cat. 1	df0_1	3	59.4	-0.8	35.2	49.7	59.7	12,2	-13.7	6	1.5	21.9	26	20.3	26.1	0.32	6	-5
	<b>†df0_4</b>	<b>4</b>	<b>59.3</b>	<b>1.4</b>	<b>40.7</b>	<b>51.6</b>	<b>56.5</b>	<b>10,6</b>	<b>-6.7</b>	<b>6.5</b>	<b>1.5</b>	<b>20.4</b>	<b>28.8</b>	<b>13.7</b>	<b>19.7</b>	<b>0.30</b>	<b>4.5</b>	<b>-4.1</b>
	†df0_7	4.8	60.4	4.5	42.9	48.3	54.7	6,2	-4.4	6.1	1.3	19.5	26.4	11	15	0.28	2.3	-2
	dfu_1	4.7	58.7	0.4	40.3	51	57.2	4,5	-6.4	7.4	1.5	24.3	34.8	8.9	11.3	0.38	2.6	-2.4
	†dfu_10	4.4	60.1	0.8	43.4	51	58.5	6	-8.4	7.1	1.4	19.3	24.5	18.6	28.6	0.33	2.5	-4.6

	<u>dfu_11</u>	<u>2.7</u>	<u>60.8</u>	<u>1.8</u>	<u>43.3</u>	<u>51.3</u>	<u>58</u>	<u>13,4</u>	<u>-9</u>	<u>7</u>	<u>1.4</u>	<u>21.6</u>	<u>28.3</u>	<u>14.9</u>	<u>16.4</u>	<u>0.30</u>	<u>5.5</u>	<u>-4.7</u>
Cat. 2	dao_1	3.5	59	3.9	43	49.5	53,3	17,8	-2.6	7.2	1.4	27.7	38.9	8.4	16.1	0.36	6.8	-1.6
	<b>†dao_2</b>	<b>6</b>	<b>56.1</b>	<b>-0.2</b>	<b>35.4</b>	<b>47.1</b>	<b>55.6</b>	<b>8,6</b>	<b>-3.9</b>	<b>6.4</b>	<b>1.6</b>	<b>23.5</b>	<b>73.9</b>	<b>12.1</b>	<b>24.7</b>	<b>0.36</b>	<b>4.6</b>	<b>-1.5</b>
	†dao_3	4.5	60	1.9	43.3	51.2	56.9	5,5	-1.8	6.6	1.1	51.8	99.7	25.7	35.5	0.19	1	-0.2
	dau_1	4.9	60.6	2.2	43.8	51.1	57.5	4,5	-5.7	6.9	1.3	27.9	41.3	7.4	19.1	0.28	2.1	-7
	†dau_2	3.7	61	2.6	45.3	52.4	57	8,9	-5.8	7	1.2	25.1	40.3	8.9	11.3	0.25	3.3	-2.7
	dau_5	5.6	60.8	3.2	44.7	46.4	56.9	6	-11	5.4	1.4	35.6	69.7	13.6	21.4	0.26	1.9	-2.3
Cat. 3	bfo_2	6.9	59.4	0.3	39.3	50.6	58.3	4,5	-7.7	5.7	1.3	23.7	32.9	8.2	17.1	0.27	1.8	-3.4
	bfo_5	4.5	60	0.6	39.2	54.9	57.3	4,8	-5	7.2	1.2	25.5	30.9	7.6	9.3	0.28	2.3	-2.8
	<b>†bfu_3</b>	<b>3</b>	<b>59.7</b>	<b>0.6</b>	<b>39.7</b>	<b>51.8</b>	<b>58.1</b>	<b>10,2</b>	<b>-10.9</b>	<b>7.3</b>	<b>1.5</b>	<b>26.6</b>	<b>35.8</b>	<b>11.9</b>	<b>14.3</b>	<b>0.34</b>	<b>5.3</b>	<b>-5</b>
	bfu_4	4.8	59	1.1	39.9	51.9	56.5	8,3	-4.3	7	1.3	24.8	31.7	8.2	12.1	0.30	4.1	-2.1
	pfo_1	5.5	59.6	1.5	41	52.1	56.6	5	-6.6	6.3	1.2	25.4	36.3	7.5	10.9	0.26	2.1	-4
	pfo_2	6	59.8	0.9	40.9	53.8	57.1	8,8	-9.4	5.4	1.2	21.8	39.2	10.7	14	0.20	3.9	-3.3
	pfo_4	4.3	60.2	0.5	41.1	53.8	58.2	7,3	-7.5	6.9	1.3	24.5	33.6	9.1	11.6	0.26	3.5	-4.1
	pfu_1	4	60.3	-0.4	38.2	51.7	60	9,6	-12.9	6.3	1.4	25.1	37.9	15.2	17.8	0.29	3.7	-6.3
	pfu_2	5	60.1	0.3	39.5	53.4	58.5	5,6	-8.5	6.7	1.3	25	35.6	8.2	13.8	0.27	2.8	-4.5
	pfu_3	4.2	60.7	0.8	41.7	52.9	58.7	5,8	-7.4	6.8	1.2	23.8	30.7	9.9	16.4	0.28	2.8	-4.5
	<b>†vfo_5</b>	<b>4.2</b>	<b>59.1</b>	<b>-0.2</b>	<b>34.9</b>	<b>54.4</b>	<b>57.6</b>	<b>6,9</b>	<b>-7</b>	<b>6.4</b>	<b>1.3</b>	<b>24.3</b>	<b>32.3</b>	<b>10</b>	<b>14.6</b>	<b>0.26</b>	<b>3.1</b>	<b>-4.5</b>
	vfo_7	3.5	60.2	-0.3	36.5	53.1	59.6	10,2	-11.2	6.4	1.3	25.7	32.7	14.8	17.5	0.29	4.3	-5.3
	vfu_10	3	60.8	-0.3	38.9	54.5	60	9,9	-9	7.4	1.4	26.4	33.1	9.8	11.3	0.31	4.5	-5.9
	<b>†vfu_16</b>	<b>4.5</b>	<b>59.3</b>	<b>0.8</b>	<b>39.8</b>	<b>55.4</b>	<b>55.3</b>	<b>9,1</b>	<b>-5.2</b>	<b>6.6</b>	<b>1.1</b>	<b>23.2</b>	<b>28.4</b>	<b>6.6</b>	<b>10.1</b>	<b>0.22</b>	<b>4.4</b>	<b>-2.4</b>
Cat. 4	<b>†ddo_1</b>	<b>5.4</b>	<b>60.6</b>	<b>10</b>	<b>46.8</b>	<b>44.5</b>	<b>45.9</b>	<b>3</b>	<b>-5.2</b>	<b>4.8</b>	<b>1.1</b>	<b>17</b>	<b>21.5</b>	<b>10.8</b>	<b>15</b>	<b>0.16</b>	<b>1</b>	<b>-2</b>
	†ddu_1	3.7	60.4	1.2	43.4	48.1	58.4	3	-26.9	7	1.3	23.1	27.5	8.6	13.7	0.30	1.1	-17.2
	†ddu_2	3.5	61	6.7	44.1	49.9	51.7	2,7	-1.3	6.5	1.4	24.3	46.8	27.6	44.9	0.25	1.5	-0.6
	ddu_3	2.8	61.5	0.7	41.6	52.4	60.2	3	-1.7	7.6	1.3	27.1	34	5	5.6	0.30	2.5	0.3
Cat. 5	bdo_1	6	61.2	-0.4	39	54	60.7	1,3	-12.1	7	1.4	29.1	43.7	28.8	74.1	0.28	0.5	-3.7
	bdo_2	4.5	60.6	0.1	39.1	54.6	59.4	1,2	-27.4	7.5	1.5	26.9	36.4	18.3	30.8	0.28	0.8	-8.7
	bdu_1	5.4	59.3	0.5	40.1	52.4	57.5	2	-9.1	6.8	1.3	25.7	34.2	10.2	19.3	0.26	1.4	-0.7
	bdu_6	5.5	59.3	0.3	39.5	52.2	57.8	7,3	-2.1	7.2	1.4	25.6	40	26.6	45.6	0.29	0.9	-12.1
	pdo_3	8.7	59.2	0.9	40.2	51.9	57	2,5	-1.3	6.6	1.4	26.5	43.1	11.7	22.2	0.29	1.5	-10
	pdo_4	5.7	59.2	1.1	40.9	51.6	57	3,5	-6.5	6.6	1.4	27	42.7	21.4	32.2	0.30	2.5	-2.1
	<b>†pdo_6</b>	<b>5</b>	<b>58.9</b>	<b>-0.8</b>	<b>35.9</b>	<b>48.2</b>	<b>59.3</b>	<b>3</b>	<b>-1.8</b>	<b>7.2</b>	<b>1.8</b>	<b>30.8</b>	<b>46.9</b>	<b>12.8</b>	<b>19.4</b>	<b>0.34</b>	<b>2.8</b>	<b>-0.3</b>
	pdu_1	5.4	59.4	-0.5	35.4	50.9	59.1	10,4	-1.5	6.2	1.5	24.2	30.5	14.7	29.2	0.29	4.1	-0.8
pdu_3	5.2	60.7	0.5	41.2	53.1	59.3	0,6	-4	7.5	1.3	24.1	30.1	9.5	13.9	0.31	0.4	-27	

	<sup>†</sup> vdo_1	<u>5.3</u>	<u>60.4</u>	<u>-0.2</u>	<u>39.5</u>	<u>54</u>	<u>59.3</u>	<u>2,9</u>	<u>-5.1</u>	<u>7.1</u>	<u>1.3</u>	<u>26.4</u>	<u>46.6</u>	<u>7</u>	<u>10.5</u>	<u>0.31</u>	<u>1.5</u>	<u>-2.3</u>
	vdo_2	3	60.9	-0.1	39.6	53.1	60.3	3,5	-3.1	7.8	1.3	27.7	36.4	9.7	11	0.30	2.2	-3.2
	vdu_1	6.6	61.2	-0.3	39.3	51.9	61	2,2	-1.1	6.8	1.3	28.9	46	6	9.8	0.25	0.9	-1.4
	<sup>†</sup> vdu_2	<u>4.7</u>	<u>61</u>	<u>1.6</u>	<u>42.2</u>	<u>52.3</u>	<u>58.4</u>	<u>2</u>	<u>-3.4</u>	<u>7.3</u>	<u>1.2</u>	<u>26.7</u>	<u>34.2</u>	<u>6.9</u>	<u>9.7</u>	<u>0.29</u>	<u>1.1</u>	<u>-2.1</u>
Cat. 6	vao_2	<u>5.5</u>	<u>60.1</u>	<u>3.8</u>	<u>42.6</u>	<u>48.5</u>	<u>55.1</u>	<u>4.3</u>	<u>-5.5</u>	<u>5.3</u>	<u>1.3</u>	<u>20.6</u>	<u>28.9</u>	<u>11</u>	<u>18.1</u>	<u>0.24</u>	<u>2.2</u>	<u>-3.4</u>
	<sup>†</sup> vao_3	<u>5.9</u>	<u>59.4</u>	<u>-0.8</u>	<u>34.4</u>	<u>48.5</u>	<u>59.8</u>	<u>3.8</u>	<u>-6.5</u>	<u>5.8</u>	<u>1.4</u>	<u>28.2</u>	<u>51.8</u>	<u>8.7</u>	<u>15.4</u>	<u>0.29</u>	<u>1.7</u>	<u>-2.6</u>
	<sup>†</sup> vau_1	<u>3.2</u>	<u>59.8</u>	<u>-0.1</u>	<u>38.9</u>	<u>52</u>	<u>59</u>	<u>4.2</u>	<u>-8.1</u>	<u>7.9</u>	<u>1.6</u>	<u>26</u>	<u>34.3</u>	<u>6.6</u>	<u>8.6</u>	<u>0.42</u>	<u>2.6</u>	<u>-4.6</u>
	<sup>†</sup> vau_5	<u>4.7</u>	<u>60.2</u>	<u>1</u>	<u>39.9</u>	<u>53.8</u>	<u>57.7</u>	<u>2,9</u>	<u>-11.9</u>	<u>7.8</u>	<u>1.4</u>	<u>25.8</u>	<u>32.8</u>	<u>9.3</u>	<u>17.5</u>	<u>0.32</u>	<u>1.8</u>	<u>-1.5</u>
Cat. 7	<sup>†</sup> bao_1	<u>7</u>	<u>59.4</u>	<u>1.2</u>	<u>39.3</u>	<u>53</u>	<u>56.5</u>	<u>4,2</u>	<u>-3.6</u>	<u>6.1</u>	<u>1.3</u>	<u>24.2</u>	<u>41.6</u>	<u>18.5</u>	<u>40.4</u>	<u>0.25</u>	<u>1.7</u>	<u>-2.1</u>
	bao_2	7.2	59.5	0.1	38.1	49.3	58.8	2,9	-1.3	6.7	1.3	27.1	37.7	11.3	41.3	0.30	1.6	-1.7
	bau_1	4.2	61.4	0.3	41.4	53.4	60.3	2,2	-11	7.3	1.3	25.6	31	9.6	16.8	0.30	0.9	-29.1
	bau_4	5.4	60.4	0.6	40.3	52.8	58.7	3,1	-1.9	7	1.4	25.2	33.9	15.5	40.7	0.30	1.8	-5.5
	<sup>†</sup> pao_1	<u>6.4</u>	<u>58</u>	<u>1.3</u>	<u>39.7</u>	<u>51.2</u>	<u>55</u>	<u>3,3</u>	<u>-2.7</u>	<u>7.3</u>	<u>1.4</u>	<u>25.5</u>	<u>35</u>	<u>8.5</u>	<u>14.2</u>	<u>0.36</u>	<u>1.4</u>	<u>-2.3</u>
	pao_3	<u>6</u>	<u>59.8</u>	<u>0.1</u>	<u>38.5</u>	<u>49.5</u>	<u>59.1</u>	<u>2,7</u>	<u>-0.9</u>	<u>7</u>	<u>1.3</u>	<u>27.9</u>	<u>38.3</u>	<u>12.6</u>	<u>41.4</u>	<u>0.31</u>	<u>1.7</u>	<u>-2</u>
	pao_5	6	58.7	1.5	40.3	52	55.4	2,4	-5.1	6.1	1.3	30.2	53.5	17.1	50.8	0.25	1.7	-2
	pau_1	4.5	58.8	-1	34.5	47.5	59.4	16,5	-9.7	5.1	1.4	22	33.4	15.5	22.6	0.26	5.4	-2.9
	pau_2	5.8	61.1	-0.3	38	52.4	60.6	6,3	-8.2	6.2	1.4	23.8	34.8	7.4	10.8	0.25	2.2	-4.7
	<sup>†</sup> pau_3	<u>5.5</u>	<u>59.3</u>	<u>-0.5</u>	<u>35.9</u>	<u>51.9</u>	<u>58.9</u>	<u>7,9</u>	<u>-4.5</u>	<u>6.3</u>	<u>1.4</u>	<u>25.3</u>	<u>33.8</u>	<u>10.4</u>	<u>13.7</u>	<u>0.31</u>	<u>3</u>	<u>-2.3</u>

**Tableau B.1 : Indices acoustiques et psychoacoustiques calculés sur les bruits de passage mesurés (à 60dB(A)). En gras : prototype de chaque catégorie ; en italique : 2è meilleur représentant de chaque catégorie ; souligné : bruits de passage sélectionnés pour les tests d'évaluation de la gêne due aux catégories de bruits de passage en mono-exposition ; † : bruits de passage sélectionnés pour les tests d'évaluation de la gêne en situation de multi-exposition au bruit industriel et aux bruits de passage des différentes catégories.**





# ANNEXE C : Questionnaires adressés aux sujets à l'issue des expérimentations

## 1. Test de catégorisation libre et verbalisation libre

N :

Test acoustique – ENTPE Vaulx-en-Velin - 2009

*Pour compléter le questionnaire ci-dessous, veuillez cocher la case correspondante à votre réponse ou formuler votre réponse si cela vous est demandé.*

Sexe :  Homme  Femme

Age : .....

Profession : .....

Vous habitez....  en ville  à la campagne

Nombre approximatif d'habitants sur votre commune : .....

*(Si vous ne savez pas, merci d'indiquer votre lieu de résidence)*

Avez-vous déjà participé à un ou plusieurs tests d'écoute en 2008/2009 :  oui  non

*Si oui, combien ? .....*

Diriez-vous que vous êtes sensible au bruit en général ?

Pas du tout  Légèrement  Moyennement  Beaucoup  Extrêmement

Etes-vous exposé au bruit ?

Pas du tout  Légèrement  Moyennement  Beaucoup  Extrêmement

*Si c'est le cas, quelle(s) est (sont) la (les) source(s) de bruit ?*

.....  
.....

Si vous pensez aux douze derniers mois environ, quand vous êtes chez vous, le bruit en général vous gêne-t-il ?

Pas du tout  Légèrement  Moyennement  Beaucoup  Extrêmement

*Si c'est le cas, quelle(s) est (sont) la (les) source(s) de bruit ?*

.....  
.....  
.....

**Si vous pensez aux douze derniers mois environ, quand vous êtes sur votre lieu de travail, le bruit en général vous gêne-t-il ?**

- Pas du tout     Légèrement     Moyennement     Beaucoup     Extrêmement

*Si c'est le cas, quelle(s) est (sont) la (les) source(s) de bruit ?*

.....  
.....  
.....

**Habitez-vous à proximité d'une route ?**     oui     non

*Si oui, de quel type de route s'agit-il ? (Plusieurs réponses possibles)*

- une nationale     une autoroute     un périphérique ou une voie rapide  
 une avenue, un boulevard     une petite rue  
 Autre type de voie (*précisez*) .....

*Si oui, en repensant aux douze derniers mois environ, quand vous êtes chez vous, le bruit de cette route vous gêne-t-il ?*

- Pas du tout     Légèrement     Moyennement     Beaucoup     Extrêmement

**Votre logement actuel est :**     collectif (appartement)     individuel (maison)

*S'il s'agit d'un appartement, merci de préciser à quel étage vous habitez :*

.....

**De votre logement, avez-vous une vue directe sur la route ?**     oui     non

**En ce qui concerne le test d'écoute que vous venez de réaliser :**

**Les bruits que vous avez entendus vous semblent-ils globalement familiers ?**

- Pas du tout     Légèrement     Moyennement     Beaucoup     Extrêmement

**Avez-vous trouvé le test d'écoute difficile ?**

- Pas du tout     Légèrement     Moyennement     Beaucoup     Extrêmement

**Autres commentaires :**

.....  
.....  
.....  
.....

**Merci de votre participation.**

## 2. Tests de gêne par catégorie perceptive et cognitive de bruits de passage de véhicules routiers

N :

### Test acoustique – ENTPE Vaulx-en-Velin - 2010

Pour compléter le questionnaire ci-dessous, veuillez cocher la case correspondante à votre réponse ou formuler votre réponse si cela vous est demandé.

**Sexe :**         Homme     Femme

**Age :** .....

**Profession :** .....

**Vous habitez....**  en ville     à la campagne

**Nombre approximatif d'habitants sur votre commune :** .....

*(Si vous ne savez pas, merci d'indiquer votre lieu de résidence)*

**Avez-vous déjà participé à un ou plusieurs tests d'écoute en 2009/2010 :**  oui     non

*Si oui, combien ? .....*

**Diriez-vous que vous êtes sensible au bruit en général ?**

Pas du tout     Légèrement     Moyennement     Beaucoup     Extrêmement

**Etes-vous exposé au bruit ?**

Pas du tout     Légèrement     Moyennement     Beaucoup     Extrêmement

*Si c'est le cas, quelle(s) est (sont) la (les) source(s) de bruit ?*

.....  
.....

**Si vous pensez aux douze derniers mois environ, quand vous êtes chez vous, le bruit en général vous gêne-t-il ?**

Pas du tout     Légèrement     Moyennement     Beaucoup     Extrêmement

*Si c'est le cas, quelle(s) est (sont) la (les) source(s) de bruit ?*

.....  
.....  
.....

**Si vous pensez aux douze derniers mois environ, quand vous êtes sur votre lieu de travail, le bruit en général vous gêne-t-il ?**

Pas du tout     Légèrement     Moyennement     Beaucoup     Extrêmement

*Si c'est le cas, quelle(s) est (sont) la (les) source(s) de bruit ?*

.....  
.....  
.....

**Habitez-vous à proximité d'une route ?**  oui  non

*Si oui, de quel type de route s'agit-il ? (Plusieurs réponses possibles)*

- une nationale  une autoroute  un périphérique ou une voie rapide
- une avenue, un boulevard  une petite rue
- Autre type de voie (précisez) .....

*Si oui, en repensant aux douze derniers mois environ, quand vous êtes chez vous, le bruit de cette route vous gêne-t-il ?*

- Pas du tout  Légèrement  Moyennement  Beaucoup  Extrêmement

**Votre logement actuel est :**  collectif (appartement)  individuel (maison)

*S'il s'agit d'un appartement, merci de préciser à quel étage vous habitez :*

.....

**De votre logement, avez-vous une vue directe sur la route ?**  oui  non

**En ce qui concerne le test d'écoute que vous venez de réaliser :**

**Les bruits que vous avez entendus vous semblent-ils globalement familiers ?**

- Pas du tout  Légèrement  Moyennement  Beaucoup  Extrêmement

**Avez-vous trouvé le test d'écoute difficile ?**

- Pas du tout  Légèrement  Moyennement  Beaucoup  Extrêmement

**Pouvez vous décrire en quelques mots les bruits que vous avez entendus au cours du test :**

.....  
.....  
.....

**Avez-vous eu du mal à vous projeter dans la situation imaginaire proposée ? :**

.....  
.....  
.....  
.....

**Autres commentaires :**

.....  
.....  
.....  
.....

**Merci de votre participation.**

### 3. Test de gêne en situation de multi-exposition aux bruits routiers et industriels

#### 3.1. Questionnaire général

N :

##### Test acoustique – ENTPE Vaulx-en-Velin - 2011

Pour compléter le questionnaire ci-dessous, veuillez cocher la case correspondante à votre réponse ou formuler votre réponse si cela vous est demandé.

Sexe :  Homme  Femme

Age : .....

Profession : .....

Vous habitez....  en ville  à la campagne

Nombre approximatif d'habitants sur votre commune : .....

(Si vous ne savez pas, merci d'indiquer votre lieu de résidence)

Avez-vous déjà participé à un ou plusieurs tests d'écoute en 2010/2011 :  oui  non

Si oui, combien ? .....

Diriez-vous que vous êtes sensible au bruit en général ?

Pas du tout  Légèrement  Moyennement  Beaucoup  Extrêmement

Etes-vous exposé au bruit ?

Pas du tout  Légèrement  Moyennement  Beaucoup  Extrêmement

Si c'est le cas, quelle(s) est (sont) la (les) source(s) de bruit ?

.....  
.....

Si vous pensez aux douze derniers mois environ, quand vous êtes chez vous, le bruit en général vous gêne-t-il ?

Pas du tout  Légèrement  Moyennement  Beaucoup  Extrêmement

Si c'est le cas, quelle(s) est (sont) la (les) source(s) de bruit ?

.....  
.....  
.....

Si vous pensez aux douze derniers mois environ, quand vous êtes sur votre lieu de travail, le bruit en général vous gêne-t-il ?

Pas du tout  Légèrement  Moyennement  Beaucoup  Extrêmement

Si c'est le cas, quelle(s) est (sont) la (les) source(s) de bruit ?

.....  
.....  
.....

Habitez-vous à proximité d'une route ?  oui  non

– Si oui, de quel type de route s'agit-il ? (Plusieurs réponses possibles)

- une nationale       une autoroute       un périphérique ou une voie rapide
- une avenue, un boulevard       une petite rue
- Autre type de voie (*précisez*) .....
- *Si oui, avez-vous une vue directe sur la route ?*  oui       non
- *Si oui, en repensant aux douze derniers mois environ, quand vous êtes chez vous, le bruit de cette route vous gêne-t-il ?*
- Pas du tout       Légèrement       Moyennement       Beaucoup       Extrêmement

**Habitez-vous à proximité d'une installation industrielle ?**  oui       non

Si oui :

- *Quel(s) type(s) d'installation industrielle :* .....
- *Avez-vous une vue directe sur l'installation industrielle ?*  oui       non
- *En repensant aux douze derniers mois environ, quand vous êtes chez-vous, le bruit de cette installation industrielle vous gêne-t-il ?*
- Pas du tout       Légèrement       Moyennement       Beaucoup       Extrêmement

**Votre logement actuel est :**  collectif (appartement)       individuel (maison)

*S'il s'agit d'un appartement, merci de préciser à quel étage vous habitez :*  
 .....

**En ce qui concerne le test d'écoute que vous venez de réaliser :**

**Les bruits que vous avez entendus vous semblent-ils globalement familiers ?**

- Pas du tout       Légèrement       Moyennement       Beaucoup       Extrêmement

**Avez-vous trouvé le test d'écoute difficile ?**

- Pas du tout       Légèrement       Moyennement       Beaucoup       Extrêmement

**Avez-vous eu du mal à vous projeter dans la situation imaginaire proposée ? :**

.....  
 .....  
 .....  
 .....

**Autres commentaires :**

.....  
 .....  
 .....  
 .....

Merci de votre participation

**3.2. Feuille de route destinée à l'expérimentateur pour récolter les données verbales**

Nom sujet :





## 4. Test de gêne en situation de multi-exposition en environnement simulé

### 4.1. Questionnaire test d'entraînement

Groupe : .....

Nom : .....

Prénom : .....

#### SEQUENCE 1

Veillez considérer l'ensemble de la séquence sonore :

**Lorsque vous vous imaginiez chez vous en présence de cette séquence d'environnement sonore, le bruit global, dû au bruit de la circulation routière et au bruit du site industriel, vous a-t-il gêné ?**

Pour répondre à cette question, veuillez choisir un chiffre compris entre 0 et 10 correspondant au mieux à la gêne ressentie.

0 \_\_\_\_\_ 10  
Pas du tout Extrêmement

#### SEQUENCE 2

Veillez considérer l'ensemble de la séquence sonore :

**Lorsque vous vous imaginiez chez vous en présence de cette séquence d'environnement sonore, le bruit global, dû au bruit de la circulation routière et au bruit du site industriel, vous a-t-il gêné ?**

Pour répondre à cette question, veuillez choisir un chiffre compris entre 0 et 10 correspondant au mieux à la gêne ressentie.

0 \_\_\_\_\_ 10  
Pas du tout Extrêmement

#### SEQUENCE 3

Veillez considérer l'ensemble de la séquence sonore :

**Lorsque vous vous imaginiez chez vous en présence de cette séquence d'environnement sonore, le bruit global, dû au bruit de la circulation routière et au bruit du site industriel, vous a-t-il gêné ?**

Pour répondre à cette question, veuillez choisir un chiffre compris entre 0 et 10 correspondant au mieux à la gêne ressentie.

0 \_\_\_\_\_ 10  
Pas du tout Extrêmement

#### SEQUENCE 4

Veillez considérer l'ensemble de la séquence sonore :

Lorsque vous vous imaginiez chez vous en présence de cette séquence d'environnement sonore, le bruit global, dû au bruit de la circulation routière et au bruit du site industriel, vous a-t-il gêné ?

Pour répondre à cette question, veuillez choisir un chiffre compris entre 0 et 10 correspondant au mieux à la gêne ressentie.

0 \_\_\_\_\_ 10  
Pas du tout Extrêmement

## 4.2. Questionnaire véritable test

**ENTPE**

**Expérience**

**octobre 2010**

*Au cours de cette expérience vous serez en présence de diverses séquences d'environnements sonores dont les principales sources de bruit sont de nature industrielle ou liées à la circulation routière.*

**Imaginez-vous chez vous** avec des amis ou des collègues. Vous menez une activité calme et reposante. Par exemple, vous pouvez avoir une conversation, lire, profiter d'une boisson, etc. A l'extérieur du logement se trouve une route avec une intersection. De l'autre côté de la route, il y a un site industriel émettant du bruit.

*A la fin de chaque séquence, veuillez répondre aux questions correspondantes.*

**Groupe** : .....

**Nom** : .....

**Prénom** : .....

**Profession** : .....

**Sexe** :  Homme  Femme

**Vous habitez** :  En ville  A la campagne

**Nombre approximatif d'habitants de votre commune** : .....

SEQUENCE X

**Quelle(s) activité(s) avez-vous effectuée(s) durant cette séquence d'environnement sonore ?**

.....  
.....  
.....  
.....  
.....

**Votre (vos) activité(s) a-t-elle (ont-elles) été perturbée(s) par la séquence sonore ?**

Pour répondre à cette question veuillez choisir un chiffre compris entre 0 et 10 correspondant au mieux à la perturbation ressentie.

0 \_\_\_\_\_ 10  
Pas du tout Extrêmement

**Auriez-vous souhaité fermer les fenêtres à cause du bruit ?** :  Oui  Non

**Pouvez-vous dire quelles sources de bruit vous avez identifiées au cours de cette séquence d'environnement sonore ?**

.....  
.....  
.....  
.....  
.....

Veuillez considérer le bruit provenant de la circulation routière dans la séquence d'environnement sonore.

**Lorsque vous vous imaginiez chez vous en présence de cette séquence d'environnement sonore, le bruit de la circulation routière vous a-t-il gêné ?**

Pour répondre à cette question veuillez choisir un chiffre compris entre 0 et 10 correspondant au mieux à la gêne ressentie.

0 \_\_\_\_\_ 10  
Pas du tout Extrêmement

Veuillez considérer le bruit provenant du site industriel dans la séquence d'environnement sonore.

**Lorsque vous vous imaginiez chez vous en présence de cette séquence d'environnement sonore, le bruit du site industriel vous a-t-il gêné ?**

Pour répondre à cette question veuillez choisir un chiffre compris entre 0 et 10 correspondant au mieux à la gêne ressentie.

0 \_\_\_\_\_ 10  
Pas du tout Extrêmement

Veuillez considérer désormais l'ensemble de la séquence d'environnement sonore :

**Lorsque vous vous imaginiez chez vous en présence de cette séquence d'environnement sonore, le bruit global, dû au bruit de la circulation routière et au bruit du site industriel, vous a-t-il gêné ?**

Pour répondre à cette question, veuillez choisir un chiffre compris entre 0 et 10 correspondant au mieux à la gêne ressentie.

0 \_\_\_\_\_ 10  
Pas du tout Extrêmement

Répondez aux questions suivantes à la fin de l'expérience

**Diriez-vous que vous êtes sensible au bruit en général ?**

Pour répondre à cette question veuillez choisir un chiffre compris entre 0 et 10 correspondant au mieux à votre sensibilité au bruit en général.

0 \_\_\_\_\_ 10  
Pas du tout sensible Extrêmement sensible

**Est-ce que pour vous une infrastructure routière est synonyme de danger ?**

Pour répondre à cette question veuillez choisir un chiffre compris entre 0 et 10 correspondant au mieux à votre appréciation du danger.

0 \_\_\_\_\_ 10  
Pas du tout Extrêmement

**Est-ce que pour vous une installation industrielle est synonyme de danger ?**

Pour répondre à cette question veuillez choisir un chiffre compris entre 0 et 10 correspondant au mieux à votre appréciation du danger.

0 \_\_\_\_\_ 10  
Pas du tout Extrêmement

**Les bruits routiers que vous avez entendus vous semblent-ils globalement familiers ? :**

- Pas du tout  Légèrement  Moyennement  Beaucoup  Extrêmement

**Pourquoi ?**

.....  
.....  
.....  
.....  
.....

**Les bruits industriels que vous avez entendus vous semblent-ils globalement familiers ? :**

- Pas du tout  Légèrement  Moyennement  Beaucoup  Extrêmement

**Pourquoi ?**

.....  
.....  
.....  
.....  
.....

**Avez-vous eu des difficultés à vous imaginer chez vous lors de l'expérience ? :**

- Oui  Non

**Pourquoi ? :**

.....  
.....  
.....  
.....  
.....

**Avez-vous trouvé cette expérience difficile ? :  Oui  Non**

**Si oui, pourquoi ? :**

.....  
.....  
.....

.....  
.....  
**Avez-vous des remarques/suggestions/commentaires à formuler ? :**  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....



# ANNEXE D : Test de comparaison par paires – résultats du choix forcé pour le désagrément sonore

Pour rappel, l'objet de cette annexe est de présenter les résultats concernant la partie du test de comparaison par paires correspondant au choix forcé. La question posée visait à comparer le désagrément sonore des bruits de passage en répondant à la question :

« *Quel extrait sonore jugez-vous le plus désagréable ?* »

Les sujets doivent choisir l'un ou l'autre des bruits de passage présentés par paire. Il s'agit donc d'un choix dichotomique.

## 1. Traitement et analyse des données

Les données résultant de ce choix dichotomique peuvent être analysées de manière complémentaire selon différentes techniques : par exemple (1) les échelonnements multidimensionnels dont nous avons parlé au chapitre 3 ou (2) l'utilisation de modèles de choix probabilistes qui recherchent une mesure unidimensionnelle d'un attribut (dans notre cas le désagrément) sur la base des choix effectués sur les paires de stimuli [Tro09].

Il existe différents modèles qui correspondent aux différentes techniques. Dans le cadre de ces travaux nous présenterons le modèle MDPREF (échelonnement multidimensionnel de la préférence) et le cas V de la loi du jugement comparatif de Thurstone (modèle de choix probabiliste).

### 1.1. Echelonnement multidimensionnel : le modèle MDPREF

#### 1.1.1. Données brutes

Comme tout échelonnement multidimensionnel, le modèle MDPREF vise à représenter dans un espace de dimensionnalité donnée  $n$  points (correspondant aux  $n$  stimuli). La particularité est de représenter également  $N$  vecteurs passant par l'origine (correspondant aux  $N$  sujets). Cette configuration de  $n$  points et  $N$  vecteurs est organisée de manière à ce que les projections orthogonales de chaque point sur les vecteurs sujets soient en adéquation maximale avec les choix exprimés par chaque sujet vis-à-vis de chaque paire de stimuli ([Cox82, Tro09]). Plus un stimulus se projette proche de l'extrémité d'un vecteur sujet donné, plus il aura été choisi par ce sujet. Les dimensions de l'espace représentent alors des facteurs associés aux stimuli à partir desquels les sujets se basent pour formuler leur choix.

Les données brutes issues de ce choix dichotomique se présentent sous forme d'une matrice rectangulaire  $[U]$  de taille  $N \times n$  ( $N$  est le nombre de sujets,  $n$  le nombre de stimuli). Les éléments  $u_{ik}$  de la matrice  $[U]$  représentent les scores de désagrément de chaque stimulus, i.e. combien de fois le sujet  $i$  a choisi le stimulus  $k$  comme étant le plus désagréable par rapport aux autres.



L'algorithme utilisé par le modèle MDPREF repose sur la décomposition en valeurs singulières de la matrice [U] (cf. [CC01]). Cela consiste à calculer deux matrices intermédiaires [U][U]<sup>75</sup> et [U]<sup>t</sup>[U] dont il s'agit ensuite de déterminer les valeurs propres (ce sont les mêmes pour ces deux matrices) et vecteurs propres. La magnitude des valeurs propres nous permet de définir la dimensionnalité de l'espace. Les composantes des vecteurs des sujets sont obtenues en multipliant la matrice des vecteurs propres de [U][U]<sup>t</sup> par la matrice diagonale de ses valeurs propres. Les coordonnées des stimuli sont données par les vecteurs propres de la matrice [U]<sup>t</sup>[U].

### 1.1.2. Dimensionnalité

Nous l'avons dit, la magnitude des valeurs propres de la matrice [U][U]<sup>t</sup> nous permet de définir la dimensionnalité de l'espace dans lequel nous allons représenter nos points et vecteurs sujets.

Comme Trollé [Tro09], nous tracerons un diagramme présentant en abscisse le nombre de dimensions (de valeurs propres) avec en ordonnée la magnitude des valeurs propres correspondantes. La dimensionnalité choisie est celle pour laquelle la valeur propre associée se situe à l'extrémité d'une droite pouvant relier d'un seul trait un nombre maximal de valeurs propres.

### 1.1.3. Bilan des différences interindividuelles

L'intérêt du modèle MDPREF est de pouvoir regarder l'agencement des vecteurs sujets entre eux, et ainsi de pouvoir étudier les différences existantes entre sujets pour un même ensemble de données.

Au préalable, il convient de tracer les vecteurs sujets dans un espace de dimensionnalité faible (par exemple 2) afin d'examiner la direction vers laquelle pointent les vecteurs sujets. Nous pourrions ainsi avoir une idée du degré de consensus entre les sujets. Nous pourrions également repérer d'éventuels sujets outliers.

Dans tous les cas, l'analyse MDPREF doit être effectuée sur les sous-groupes de sujets le cas échéant, ou sur l'ensemble des données après exclusion des sujets outliers.

### 1.1.4. Interprétation de l'espace perceptif de désagrément

Pour l'interprétation de l'espace perceptif, nous pouvons procéder de manière analogue à l'interprétation de l'espace perceptif issu de l'application du modèle INDSCAL. Nous ne décrivons donc pas ici cette procédure. Le lecteur peut se référer au chapitre 2, section 1.2.3.3 pour de plus amples détails.

## 1.2. Choix probabiliste : le cas V de la loi du jugement comparatif

### 1.2.1. Le modèle

En considérant le cas de choix dichotomiques de désagrément effectués par N sujets sur les paires possibles de n stimuli, le cas V de la loi du jugement comparatif de Thurstone s'exprime de la manière suivante [Bon86] :

$$U_k - U_l = z_{kl} \quad (D.1)$$

Où :

- $U_k$  est le score de désagrément du stimulus k ;
- $U_l$  est le score de désagrément du stimulus l ;

---

<sup>75</sup> [U]<sup>t</sup> est la transposée de [U].

- $z_{kl}$  exprime la différence entre les scores de désagrément des stimuli  $k$  et  $l$ , i.e. exprime une estimation de la probabilité que le stimulus  $k$  soit jugé plus désagréable que le stimulus  $l$ .

L'idée de cette loi est de proposer pour l'attribut étudié (dans notre cas le désagrément) une échelle unidimensionnelle métrique (d'intervalle) à partir de jugements de dominance dichotomiques, de manière à ce que si le stimulus  $k$  domine (est plus désagréable que) le stimulus  $l$  alors  $U_k > U_l$ .

Il s'agit ensuite de déterminer les inconnues de cette équation.

### 1.2.2. Données brutes

Les données brutes se présentent sous la forme d'une matrice de proportion  $[P]$  carrée symétrique de taille  $n \times n$ , dont les éléments  $p_{kl}$  sont définis suivant [Tro09] :

$$p_{kl} = \frac{f_{kl}}{N} \quad (D.2)$$

Où  $N$  est le nombre total de sujets dans l'expérience, et  $f_{kl}$  représente le nombre de sujets pour lesquels le stimulus  $k$  a été jugé plus désagréable que le stimulus  $l$ . Une nouvelle matrice  $[Z]$  d'éléments  $z_{kl}$  est ensuite obtenue en réduisant et en centrant les  $p_{kl}$ , soit en appliquant la transformation suivante :

$$z_{kl} = \frac{p_{kl} - \bar{p}}{\sigma_{p_{kl}}} \quad (D.3)$$

Où  $\bar{p}$  est la moyenne des  $p_{kl}$  et  $\sigma_{p_{kl}}$  est l'écart-type des  $p_{kl}$ .

Les scores de désagrément  $U_k$  sont ensuite estimés par les  $\mu_k$ , obtenus en moyennant chaque colonne de la matrice  $[Z]$  [Tro09] :

$$\mu_k = \frac{1}{n} \sum_{l=1}^n z_{kl} \quad (D.4)$$

Ces scores de désagrément nécessitent d'être estimés à partir d'un échantillon homogène de sujets. Pour ce faire, nous pouvons au préalable créer une matrice  $[S''']$  carrée et symétrique de taille  $N \times N$ , dont les éléments  $s'''_{ij}$  représentent les dissimilarités entre les sujets  $i$  et  $j$ , calculées selon ([NC05, Tro09]) :

$$s'''_{ij} = \frac{p - m_{ij}}{p} \quad (D.5)$$

Où  $p$  est le nombre de paires possibles, soit  $p = n(n-1)/2$  et  $m_{ij}$  est le nombre de paires pour lesquelles les sujets  $i$  et  $j$  ont prononcé le même choix. Nous effectuerons une CAH (le lecteur peut se reporter au chapitre 2, section 1.1.2.1.d) sur la matrice  $[S''']$  afin de repérer d'éventuels sous-groupes de sujets ou des sujets outliers.

Il sera intéressant à ce titre de mettre en lumière les résultats de cette CAH avec le bilan des différences interindividuelles dressé par l'EMD, afin de confirmer le cas échéant la présence de sous-groupes de sujets ou de sujets outliers.

### 1.2.3. Interprétation des scores de désagrément

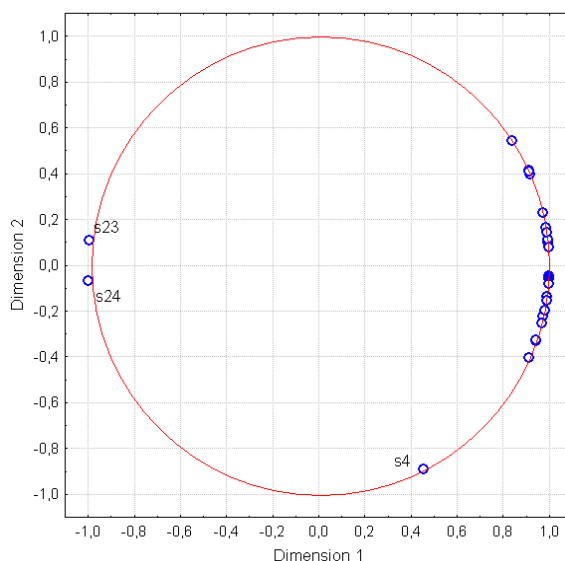
Il s'agit ensuite de calculer des corrélations entre les scores de désagrément estimés et divers indices acoustiques et psychoacoustiques calculés sur les bruits de passage

mesurés. Il est également intéressant de pouvoir comparer l'interprétation des dimensions de l'espace perceptif résultant de l'EMD avec l'interprétation des scores de désagrément.

## 2. Résultats

### 2.1. Les sujets

Le bilan des différences interindividuelles est dressé en appliquant le modèle MDPREF<sup>76</sup> dans un espace à deux dimensions, comme le montre la Figure D.1.



**Figure D.1 : Bilan des différences interindividuelles à partir de l'espace de préférence à deux dimensions obtenu via MDPREF. ○ : extrémités des vecteurs des sujets ; ● : extrémité du vecteur sujet « moyen ».**

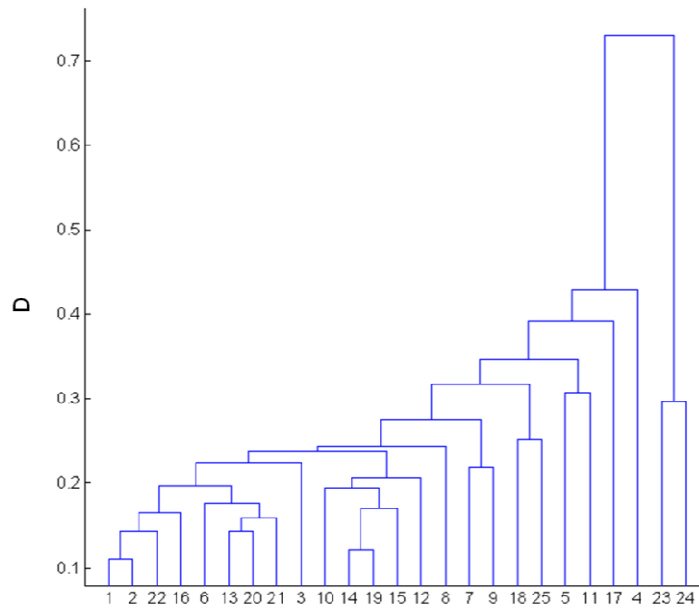
Nous avons représenté sur cette figure uniquement les extrémités des vecteurs des sujets pour ne pas pénaliser la lisibilité. Nous avons également représenté l'extrémité du vecteur du sujet « moyen », obtenu comme la somme vectorielle de tous les vecteurs sujets, divisée par sa norme [Tro09]. Nous voyons que les vecteurs des sujets 23 et 24 pointent dans des directions opposées au reste des sujets (et du sujet « moyen »), tandis que l'extrémité du vecteur du sujet 4 paraît légèrement à l'écart des vecteurs restants. A l'examen de la Figure D.1 nous pouvons considérer *a priori* que les sujets 23 et 24 sont des outliers. Il nous faut toutefois comparer cela avec le dendrogramme résultant de la CAH effectuée sur la matrice [S''].

La Figure D.2 montre le dendrogramme résultant de cette CAH, effectuée au moyen de la méthode de la moyenne non pondérée, qui maximise le coefficient de corrélation cophénétique C et l'indice  $\gamma$  de Goodman-Kruskal (cf. chapitre 2, section 1.1.2.1.d). Nous voyons que les sujets 23 et 24 se démarquent clairement des autres sujets, ce qui n'est pas le cas du sujet 4. Hormis les sujets 23 et 24, nous n'observons pas de sous-groupes de sujets.

Cela nous confirme que les sujets 23 et 24 peuvent être considérés comme des outliers. Nous effectuerons donc nos analyses sur un corpus de 23 sujets après exclusion des sujets 23 et 24, afin de poursuivre l'analyse sur un groupe de réponses homogènes. Il

<sup>76</sup> Le modèle MDPREF est appliqué à nos données au moyen de scripts MATLAB<sup>®</sup> développés par A. Trollé [Tro09].

est par exemple probable à l'examen de la Figure D.1 que ces deux sujets aient mal compris la consigne et qu'au lieu de choisir le bruit de passage le plus désagréable, ils aient choisi le bruit de passage le plus agréable.

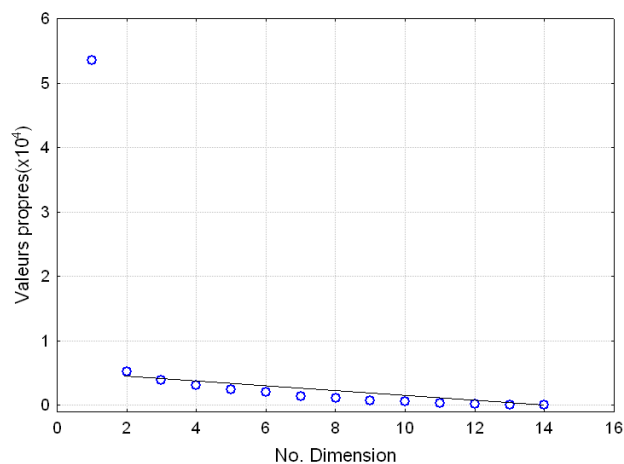


**Figure D.2 : Dendrogramme résultant de la CAH effectuée sur la matrice [S''']. D est la distance ultramétrique (en ordonnée) entre les sujets (en abscisse).**

## 2.2. Espace perceptif de désagrément

### 2.2.1. Dimensionnalité

La Figure D.3 présente le tracé des valeurs propres en fonction de la dimension associée.

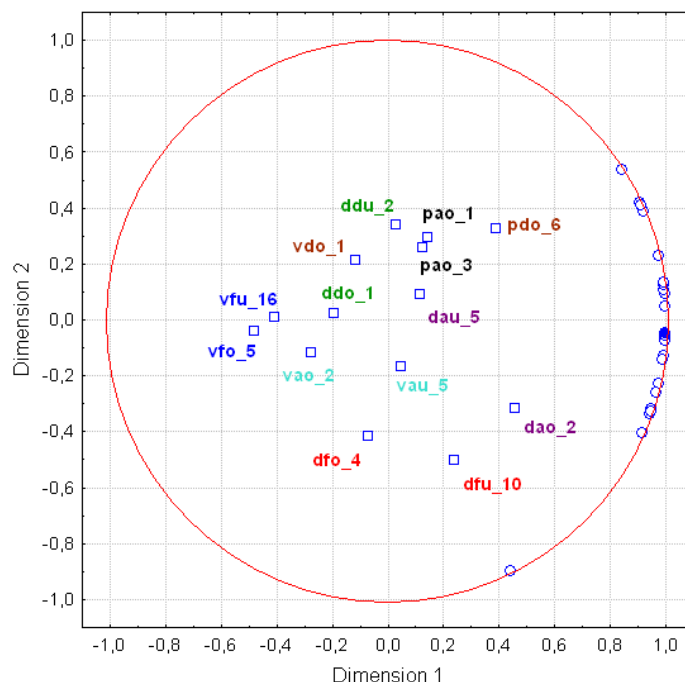


**Figure D.3 : Tracé des valeurs propres en fonction de la dimension associée.**

Nous voyons que nous pouvons tracer une droite entre les valeurs propres 2 à 14, d'après la méthode décrite en section 1.1.2 [Tro09], un espace à deux dimensions pour représenter l'ensemble de nos 23 vecteurs sujets et 14 stimuli paraît adapté.

### 2.2.2. L'espace perceptif

L'espace perceptif de désagrément à deux dimensions dans lequel nous avons échelonné nos 14 bruits de passage de véhicules routiers à partir des données de 23 sujets est donné dans la Figure D.4.



**Figure D.4 : Espace perceptif de désagrément à deux dimensions obtenu via MDPREF.**

□ : bruits de passage de véhicules routiers (ceux appartenant à la même catégorie perceptive et cognitive partagent la même couleur) ; ○ : extrémité des vecteurs sujets ; ● : extrémité du vecteur du sujet « moyen ».

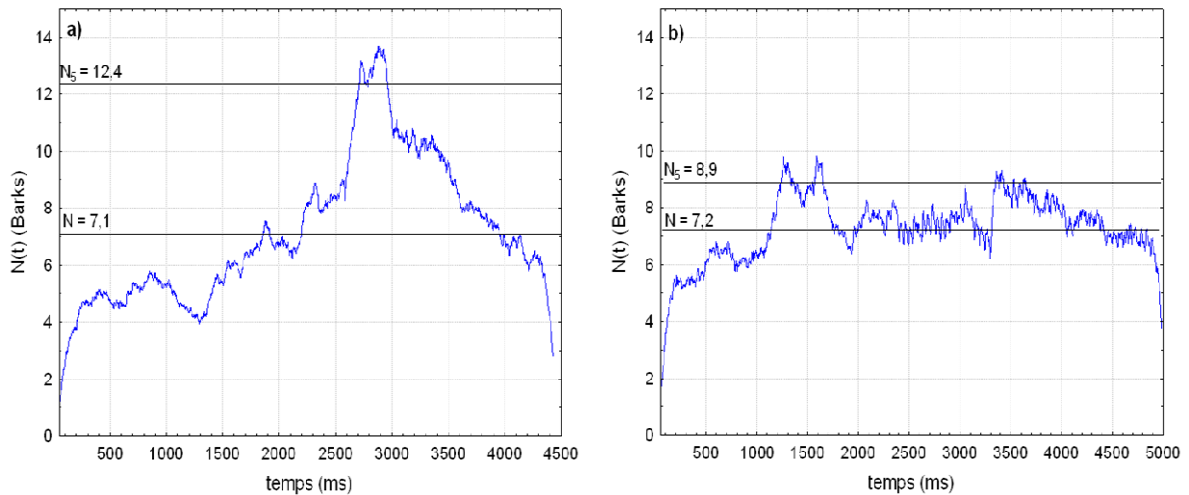
Les proportions de variance expliquée, calculées comme le rapport entre la valeur propre de la dimension concernée, et la somme de l'ensemble des valeurs propres, atteint 72% pour la dimension 1 et 7% pour la dimension 2. Cela montre l'importance de la dimension 1 dans le choix de désagrément.

Concernant les sujets, nous voyons que les vecteurs sujets extrêmes forment un angle n'excédant pas 90°, ce qui est signe d'un consensus élevé parmi eux [Cox82]. Nous voyons également que les sujets se situent tous du même côté de la dimension 1, et que le vecteur du sujet moyen est quasiment confondu avec l'axe de la dimension 1, ce qui confirme le consensus autour de cette dimension. Par contre, nous voyons que les vecteurs sujets se situent des deux côtés de la dimension 2, ce qui signifie qu'il s'agit d'une dimension provoquant des différences interindividuelles.

Concernant les bruits de passage, nous voyons par les positionnements dans l'espace perceptif des stimuli appartenant à une même catégorie perceptive (écrit dans la même couleur) que certaines catégories seront plus ou moins homogènes au niveau du désagrément causé. Par exemple, les bruits de passage de la catégorie 6 (pao\_1 et pao\_3) sont quasiment confondus, tandis les bruits de passage de la catégorie 2 (dao\_2 et dau\_5) sont plus éloignés.

Nous avons ensuite repéré, conformément à la démarche décrite à la section 1.2.3.3 du chapitre 3, les indices qui permettent d'expliquer au mieux l'agencement des bruits de passage selon chaque dimension. Pour la dimension 1, c'est le CGS (exprimé en Barks) calculé à partir des données représentées sur les spectrogrammes auditifs qui est le mieux corrélé aux coordonnées des bruits de passage selon la dimension 1 ( $r = 0.82$  ;  $p < 0.001$ ). Il semblerait donc que la dimension 1 se rapporte à la balance spectrale des bruits de passage. En effet, deux bruits de passage opposés sur la dimension 1 ont deux valeurs de

CGS différentes : par exemple respectivement 10.6 Barks (environ 1400Hz) et 11.9 Barks (environ 1700Hz) pour les bruits de passage vfo\_5 et dao\_2. Plus un bruit de passage semblera aigu plus il sera jugé désagréable. Pour la dimension 2, c'est l'indice exprimant la différence entre  $N_5$  (la sonie dépassée 5% du temps) et  $N$  qui est le mieux corrélée aux coordonnées des bruits de passage ( $r = -0.70$  ;  $p < 0.01$ ). En effet, deux bruits de passage opposés sur la dimension 2 ont deux valeurs de  $N_5-N$  différentes : par exemple respectivement 5.3 sones et 1.7 sones pour les bruits de passage dfu\_10 et pdo\_6. La Figure D.5 permet de comprendre la signification de l'indice  $N_5-N$ .

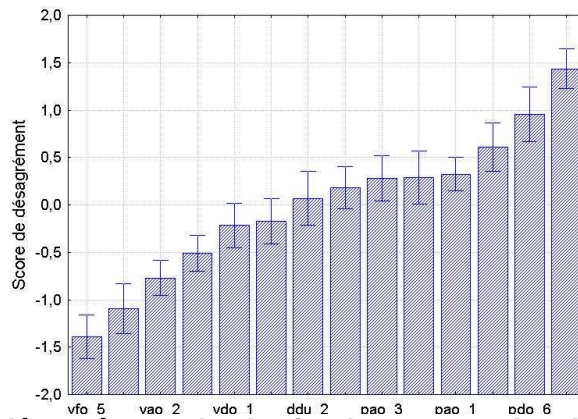


**Figure D.5 : Evolution de la sonie en fonction du temps ( $N(t)$ ) pour deux bruits de passage situés aux extrêmes de la dimension 2. a) bruit de passage dfu\_10 pour lequel  $N_5-N = 5.3$  sones. b) bruit de passage pdo\_6 pour lequel  $N_5-N = 1.7$  sones.**

L'exemple de ces deux bruits de passage montre que l'indice  $N_5-N$  peut renseigner sur l'évolution temporelle des bruits de passage. En effet, plus le véhicule sera en approche lente et stagnant (Figure D.5.b), moins l'indice  $N_5-N$  sera élevé. Au contraire, plus le véhicule approche rapidement et part rapidement, plus l'indice  $N_5-N$  sera élevé (Figure D.5.a). Ainsi, nous avons de cette manière un indice qui peut également traduire différentes allures, comme les indices  $\Delta L^+$  et  $R$  mis en évidence en au cours du chapitre 3 (section 1.2.3.3).

### 2.3. Scores de désagrément

Les scores de désagrément calculés selon le cas V de la loi du jugement comparatif de Thurstone sur les choix effectués, par les 23 sujets retenus, sur les paires possibles des 14 stimuli sont donnés sur la Figure D.6. Parmi les indices des bruits de passage, c'est le CGS (exprimé en Barks) calculé à partir des spectrogrammes auditifs qui est le mieux corrélé aux scores de désagrément ( $r = 0.81$  ;  $p < 0.001$ ). Cela n'est pas surprenant, puisque les scores de désagrément sont hautement corrélés aux coordonnées des bruits de passage selon la dimension 1 de l'EMD présenté en Figure D.4 ( $r = 0.995$  ;  $p < 0.001$ ). Nous retrouvons bien l'idée que plus un bruit de passage est perçu aigu, plus il est désagréable.



**Figure D.6 : Score de désagrément des bruits de passage. Les barres représentent les intervalles de confiance à 95%.**

### 3. Discussion et conclusion

Nous avons vu que les résultats fournis par l'EMD et le cas V de la loi du jugement comparatif de Thurstone vont dans le même sens. Deux dimensions sont suffisantes pour expliquer le désagrément des bruits de passage issus de différentes catégories perceptives et écoutés à 60dB(A) : une dimension portée par la balance spectrale et dans une moindre mesure une dimension portée par l'évolution temporelle des bruits de passage.

Il est intéressant de recouper ces résultats avec les résultats de l'analyse linguistique effectuée sur les données verbales recueillies au cours du test de catégorisation libre et verbalisation libre (chapitre 3, section 1.1.3.2). En effet, nous avons alors vu que peu de catégories faisaient l'objet de jugements hédoniques, à l'exception notamment de la catégorie 2 (deux-roues à allure accélérée). Les bruits de passage de cette catégorie étaient alors décrits comme « plus stridents », « plus aigus », ce qui leur conférait un caractère « plus désagréable ». Or, nous voyons aussi bien au travers de l'EMD et des scores de désagrément que le bruit de passage dao\_2 (prototype de la catégorie 2) a été considéré comme étant le plus désagréable, notamment en rapport à sa balance spectrale qui tire plus vers les aigus. A l'inverse, les bruits de passage de la catégorie 3 décrits comme « ni graves, ni aigus » et jugés comme « pas vraiment gênants » ont pour leur part des scores de désagrément parmi les plus faibles, en relation avec un centre de gravité spectral moins élevé.

# ANNEXE E : Evaluation et comparaison des modèles prédictifs de la gêne totale : les résultats en détail

Dans cette annexe l'évaluation et la comparaison des modèles prédictifs de la gêne totale est donnée en détail pour chacun des 7 tests d'évaluation de la gêne en situation de multi-exposition au bruit industriel et aux bruits de passage des 7 catégories.

## 1. Multi-exposition aux bruits de passage de la catégorie 1 et au bruit industriel

	modèle	Equation de régression	R <sup>2</sup>	Std. err.	r <sup>d</sup>	pente	Ord. Or.
Modèles psychophysiques	Sommation énergétique	$A_T = 0.29L_T^d - 9.71$ $A_T = 0.63N_T^d - 1.68$	0.907 0.845	0.36 0.47	0.952 0.919	0.91 0.84	0.53 0.88
	Différences énergétiques	$A_T = 0.33(1.08)L_T^d - 0.04(-0.16) L_{BR}-L_{BI} ^c - 11.38$	0.915	0.34	0.958	0.92	0.47
		$A_T = 0.70(1.03)N_T^d - 0.07(-0.12) N_{BR}-N_{BI} ^a - 1.42$	0.843	0.46	0.921	0.85	0.87
	Effets indépendants	$A_T = 0.26(0.94)L_{BR}^d + 0.08(0.18)L_{BI}^d - 10.88$	0.911	0.35	0.956	0.91	0.49
		$A_T = 0.55(0.91)N_{BR}^d + 0.32(0.18)N_{BI}^d - 1.51$	0.853	0.45	0.926	0.86	0.82
Mixte	...	...	...	...	...	...	
Sommation pondérée	$A_T = 0.19L_T^d - 4.16$	0.912	0.35	0.955	0.91	0.50	
Modèles perceptifs	Source dominante	$A_T = 0.86\max(A_{BR}, A_{BI})^d + 1.21$ $A_T = 0.86\max(\hat{A}_{BR}, \hat{A}_{BI})^d + 1.26$	0.905 0.832	0.36 0.48	0.951 0.912	1.05 0.97	-0.78 -0.36
	Sommation vectorielle	$A_T = 1.00\sqrt{(A_{BR}^2 + A_{BI}^2 + 2A_{BR}A_{BI}\cos\alpha)^d} - 0.01$	0.926	0.32	0.963	0.93	0.43
		$A_T = 1.01\sqrt{(\hat{A}_{BR}^2 + \hat{A}_{BI}^2 + 2\hat{A}_{BR}\hat{A}_{BI}\cos\alpha)^d} - 0.06$	0.853	0.45	0.924	0.84	0.89
	Régression linéaire	$A_T = 0.79(0.94)A_{BR}^d + 0.38(0.18)A_{BI}^d - 0.32$	0.917	0.34	0.959	0.92	0.46
$A_T = 0.82(0.91)\hat{A}_{BR}^d + 0.40(0.18)\hat{A}_{BI}^d - 0.10$		0.853	0.45	0.925	0.86	0.82	
Mixte	$A_T = 0.62(0.74)A_{BR}^d + 0.53(0.24)A_{BI}^d + 0.21(0.23) A_{BR}-A_{BI} ^b + 0.34$ $A_T = 0.71(0.78)\hat{A}_{BR}^d + 0.50(0.23)\hat{A}_{BI}^d + 0.12(0.14) \hat{A}_{BR}-\hat{A}_{BI} ^a + 0.12$	0.921 0.852	0.33 0.45	0.962 0.926	0.92 0.86	0.43 0.81	

**Tableau E.1 : Evaluation des modèles de gêne totale pour la multi-exposition au bruit industriel et aux bruits de passage de la catégorie 1. Dans les équations de régression, les chiffres en italique entre parenthèses correspondent aux coefficients de régression standardisés. Les notations sont celles introduites au Chapitre 4. <sup>a</sup> : n.s.; <sup>b</sup> : p<0.05 ; <sup>c</sup> : p<0.01 ; <sup>d</sup> : p<0.001.**



Le Tableau E.1 présente les résultats de l'analyse de régression linéaire pour les modèles de gêne totale et leurs variantes concernant les données relatives à l'évaluation de la gêne totale due à la multi-exposition aux bruits de passage de la catégorie 1 et au bruit industriel. Il figure également les coefficients de corrélation entre la gêne totale prédite  $\hat{A}_T$  et la gêne totale observée  $A_T$ , ainsi que les pentes et ordonnées à l'origine de la droite de régression entre ces deux variables, selon la démarche expliquée au Chapitre 4.

## 2. Multi-exposition aux bruit de passage de la catégorie 2 et au bruit industriel

Le Tableau E.2 présente les résultats de l'analyse de régression linéaire pour les modèles de gêne totale et leurs variantes concernant les données relatives à l'évaluation de la gêne due à la multi-exposition aux bruits de passage de la catégorie 2 et au bruit industriel. Il figure également les coefficients de corrélation entre la gêne totale prédite  $\hat{A}_T$  et la gêne totale observée  $A_T$ , ainsi que les pentes et ordonnées à l'origine de la droite de régression entre ces deux variables, selon la démarche expliquée au Chapitre 4.

	modèle	Equation de régression	R <sup>2</sup>	Std. err.	r <sup>d</sup>	pente	Ord. Or.
Modèles psychophysiques	Sommation énergétique	$A_T = 0.24L_T^d - 6.82$ $A_T = 0.53N_T^d - 2.45$	0.841 0.733	0.43 0.56	0.916 0.856	0.84 0.73	0.93 1.56
	Différences énergétiques	$A_T = 0.24(0.91)L_T^d + 0.002(0.01)L_{BR} - L_{BI}^a - 6.71$ $A_T = 0.45(0.73)N_T^d + 0.08(0.14)N_{BR} - N_{BI}^a - 2.72$	0.836 0.730	0.43 0.55	0.917 0.844	0.84 0.51	0.93 2.38
	Effets indépendants	$A_T = 0.21(0.91)L_{BR}^d + 0.03(0.08)L_{BI}^a - 6.26$ $A_T = 0.48(0.86)N_{BR}^d + 0.13(0.08)N_{BI}^a + 2.68$	0.825 0.744	0.45 0.54	0.911 0.867	0.83 0.75	1.00 1.46
	Mixte	...	...	...	...	...	...
	Sommation pondérée	$A_T = 0.11L_i^d - 1.42$	0.836	0.44	0.914	0.84	0.96
Modèles perceptifs	Source dominante	$A_T = 0.85\max(A_{BR}, A_{BI})^d + 1.10$ $A_T = 0.87\max(\hat{A}_{BR}, \hat{A}_{BI})^d + 0.98$	0.937 0.926	0.27 0.29	0.968 0.962	1.10 1.06	-0.87 -0.62
	Sommation vectorielle	$A_T = 0.99\sqrt{(A_{BR}^2 + A_{BI}^2 + 2A_{BR}A_{BI}\cos\alpha)^d} + 0.04$ $A_T = 1.01\sqrt{(\hat{A}_{BR}^2 + \hat{A}_{BI}^2 + 2\hat{A}_{BR}\hat{A}_{BI}\cos\alpha)^d} - 0.06$	0.944 0.938	0.26 0.27	0.971 0.964	0.95 0.92	0.29 0.48
	Régression linéaire	$A_T = 0.85(0.97)A_{BR}^d + 0.22(0.08)A_{BI}^c + 0.44$ $A_T = 0.87(0.96)\hat{A}_{BR}^d + 0.25(0.08)\hat{A}_{BI}^b + 0.23$	0.941 0.930	0.26 0.28	0.971 0.966	0.94 0.93	0.34 0.40
	Mixte	...	...	...	...	...	...

**Tableau E.2 : Evaluation des modèles de gêne totale pour la combinaison du bruit industriel avec les bruits de passage de la catégorie 2. Dans les équations de régression, les chiffres en italique entre parenthèses correspondent aux coefficients de régression standardisés. Les notations sont celles introduites au Chapitre 4. <sup>a</sup> : n.s.; <sup>b</sup> : p<0.05 ; <sup>c</sup> : p<0.01 ; <sup>d</sup> : p<0.001.**

### 3. Multi-exposition aux bruits de passage de la catégorie 3 et au bruit industriel

Le Tableau E.3 présente les résultats de l'analyse de régression linéaire pour les modèles de gêne totale et leurs variantes concernant les données relatives à l'évaluation de la gêne due à la multi-exposition aux bruits de passage de la catégorie 3 et au bruit industriel. Il figure également les coefficients de corrélation entre la gêne totale prédite  $\hat{A}_T$  et la gêne totale observée  $A_T$ , ainsi que les pentes et ordonnées à l'origine de la droite de régression entre ces deux variables, selon la démarche expliquée au Chapitre 4.

	modèle	Equation de régression	R <sup>2</sup>	Std. err.	r <sup>d</sup>	pente	Ord. Or.
Modèles psychophysiques	Sommation énergétique	$A_T = 0.29L_T^d - 9.99$ $A_T = 0.73N_T^d + 0.76$	0.809 0.918	0.54 0.35	0.899 0.958	0.81 0.92	0.99 0.42
	Différences énergétiques	$A_T = 0.35(1.10)L_T^d - 0.06(-0.26)/L_{BR}-L_{BI}^d - 12.68$	0.831	0.50	0.914	0.84	0.85
		$A_T = 0.89(1.16)N_T^d - 0.15(-0.22)/N_{BR}-N_{BI}^c - 0.27$	0.927	0.33	0.964	0.93	0.37
	Effets indépendants	$A_T = 0.25(0.87)L_{BR}^d + 0.10(0.24)L_{BI}^d - 11.82$	0.816	0.53	0.906	0.82	0.93
		$A_T = 0.63(0.93)N_{BR}^d + 0.44(0.24)N_{BI}^d + 0.47$	0.926	0.33	0.963	0.93	0.37
Mixte	...	...	...	...	...	...	
Sommation pondérée	$A_T = 0.17L_T^d - 3.56$	0.821	0.52	0.906	0.82	0.93	
Modèles perceptifs	Source dominante	$A_T = 0.88\max(A_{BR}, A_{BI})^d + 1.02$	0.933	0.32	0.966	1.06	-0.77
		$A_T = 0.86\max(\hat{A}_{BR}, \hat{A}_{BI})^d + 1.14$	0.909	0.37	0.953	1.06	-0.78
	Sommation vectorielle	$A_T = 0.98\sqrt{(A_{BR}^2 + A_{BI}^2 + 2A_{BR}A_{BI}\cos\alpha)^d} + 0.11$	0.962	0.24	0.981	0.98	0.09
		$A_T = 0.97\sqrt{(\hat{A}_{BR}^2 + \hat{A}_{BI}^2 + 2\hat{A}_{BR}\hat{A}_{BI}\cos\alpha)^d} + 0.14$	0.943	0.29	0.971	0.97	0.16
Régression linéaire	$A_T = 0.73(0.94)A_{BR}^d + 0.51(0.24)A_{BI}^d + 0.22$	0.944	0.29	0.972	0.95	0.28	
	$A_T = 0.73(0.94)\hat{A}_{BR}^d + 0.55(0.24)\hat{A}_{BI}^d + 0.04$	0.936	0.31	0.968	0.94	0.32	
Mixte	$A_T = 0.59(0.77)A_{BR}^d + 0.58(0.27)A_{BI}^d + 0.21(0.21)/A_{BR}-A_{BI}^d + 0.22$ $A_T = 0.63(0.80)\hat{A}_{BR}^d + 0.61(0.27)\hat{A}_{BI}^d + 0.15(0.16)/\hat{A}_{BR}-\hat{A}_{BI}^c + 0.08$	0.958 0.941	0.25 0.30	0.979 0.972	0.96 0.94	0.21 0.29	

**Tableau E.3 : Evaluation des modèles de gêne totale pour la combinaison du bruit industriel avec les bruits de passage de la catégorie 3. Dans les équations de régression, les chiffres en italique entre parenthèses correspondent aux coefficients de régression standardisés. Les notations sont celles introduites au Chapitre 4. <sup>a</sup> : n.s.; <sup>b</sup> : p<0.05 ; <sup>c</sup> : p<0.01 ; <sup>d</sup> : p<0.001.**

### 4. Multi-exposition aux bruits de passage de la catégorie 4 et au bruit industriel

Le Tableau E.4 présente les résultats de l'analyse de régression linéaire pour les modèles de gêne totale et leurs variantes concernant les données relatives à l'évaluation de la gêne due à la multi-exposition aux bruits de passage de la catégorie 4 et au bruit industriel. Il figure également les coefficients de corrélation entre la gêne totale prédite  $\hat{A}_T$  et

la gêne totale observée  $A_T$ , ainsi que les pentes et ordonnées à l'origine de la droite de régression entre ces deux variables, selon la démarche expliquée au Chapitre 4.

	modèle	Equation de régression	R <sup>2</sup>	Std. err.	r <sup>d</sup>	pente	Ord. Or.
Modèles psychophysiques	Sommutation énergétique	$A_T = 0.31L_T^d - 10.43$	0.877	0.44	0.934	0.88	0.69
		$A_T = 0.58N_T^d + 1.51$	0.934	0.33	0.966	0.93	0.37
	Différences énergétiques	$A_T = 0.33(1.02)L_T^d - 0.03(-0.11) L_{BR}-L_{BI} ^a - 11.58$	0.878	0.44	0.939	0.88	0.66
		$A_T = 0.65(1.09)N_T^d - 0.07(-0.13) N_{BR}-N_{BI} ^a + 1.28$	0.934	0.32	0.968	0.94	0.36
	Effets indépendants	$A_T = 0.26(0.92)L_{BR}^d + 0.07(0.15)L_{BI}^c - 10.84$	0.859	0.47	0.929	0.86	0.76
$A_T = 0.53(0.96)N_{BR}^d + 0.27(0.15)N_{BI}^d + 1.29$		0.943	0.30	0.972	0.94	0.31	
Mixte	...	...	...	...	...	...	
Sommutation pondérée	$A_T = 0.16L_T^d - 3.96$	0.864	0.47	0.930	0.86	0.76	
Modèles perceptifs	Source dominante	$A_T = 0.86\max(A_{BR}, A_{BI})^d + 1.04$	0.899	0.40	0.948	1.05	0.56
		$A_T = 0.90\max(\hat{A}_{BR}, \hat{A}_{BI})^d + 0.81$	0.913	0.37	0.956	1.02	-0.36
	Sommutation vectorielle	$A_T = 0.98\sqrt{(A_{BR}^2 + A_{BI}^2 + 2A_{BR}A_{BI}\cos\alpha)^d} - 0.10$	0.923	0.35	0.961	0.93	0.38
		$A_T = 1.03\sqrt{(\hat{A}_{BR}^2 + \hat{A}_{BI}^2 + 2\hat{A}_{BR}\hat{A}_{BI}\cos\alpha)^d} - 0.39$	0.939	0.31	0.969	0.90	0.55
Régression linéaire	$A_T = 0.85(0.95)A_{BR}^d + 0.40(0.14)A_{BI}^d - 0.05$	0.915	0.37	0.958	0.92	0.46	
	$A_T = 0.89(0.95)\hat{A}_{BR}^d + 0.42(0.15)\hat{A}_{BI}^d - 0.33$	0.932	0.33	0.966	0.93	0.37	
Mixte	...	...	...	...	...	...	
		...	...	...	...	...	

**Tableau E.4 : Evaluation des modèles de gêne totale pour la combinaison du bruit industriel avec les bruits de passage de la catégorie 4. Dans les équations de régression, les chiffres en italique entre parenthèses correspondent aux coefficients de régression standardisés. Les notations sont celles introduites au Chapitre 4. <sup>a</sup> : n.s.; <sup>b</sup> :  $p < 0.05$  ; <sup>c</sup> :  $p < 0.01$  ; <sup>d</sup> :  $p < 0.001$ .**

## 5. Multi-exposition aux bruits de passage de la catégorie 5 et au bruit industriel

Le Tableau E.5 présente les résultats de l'analyse de régression linéaire pour les modèles de gêne totale et leurs variantes concernant les données relatives à l'évaluation de la gêne due à la multi-exposition aux bruits de passage de la catégorie 5 et au bruit industriel. Il figure également les coefficients de corrélation entre la gêne totale prédite  $\hat{A}_T$  et la gêne totale observée  $A_T$ , ainsi que les pentes et ordonnées à l'origine de la droite de régression entre ces deux variables, selon la démarche expliquée au Chapitre 4.

	modèle	Equation de régression	R <sup>2</sup>	Std. err.	r <sup>d</sup>	pen	Ord. Or.
Modèles psychophysiques	Sommation énergétique	$A_T = 0.25L_T^d - 7.87$ $A_T = 0.57N_T^d + 2.16$	0.787 0.776	0.52 0.53	0.887 0.881	0.79 0.78	1.24 1.30
	Différences énergétiques	$A_T = 0.29(1.02)L_T^d - 0.04(-0.17) L_{BR}-L_{BI} ^a - 9.53$ $A_T = 0.68(1.05)N_T^d - 0.10(-0.19) N_{BR}-N_{BI} ^a + 1.79$	0.792 0.777	0.51 0.53	0.893 0.885	0.80 0.78	1.17 1.26
	Effets indépendants	$A_T = 0.22(0.87)L_{BR}^d + 0.06(0.16)L_{BI}^c - 8.84$ $A_T = 0.49(0.85)N_{BR}^d + 0.27(0.16)N_{BI}^c + 2.13$	0.771 0.737	0.53 0.57	0.882 0.863	0.78 0.74	1.29 1.48
	Mixte	...	...	...	...	...	...
	Sommation pondérée	$A_T = 0.14L_T^d - 2.40$	0.782	0.53	0.884	0.78	1.26
Modèles perceptifs	Source dominante	$A_T = 0.87\max(A_{BR}, A_{BI})^d + 0.96$ $A_T = 0.88\max(\hat{A}_{BR}, \hat{A}_{BI})^d + 0.91$	0.913 0.908	0.33 0.34	0.956 0.953	1.05 1.03	-0.53 -0.43
	Sommation vectorielle	$A_T = 1.06\sqrt{(A_{BR}^2 + A_{BI}^2 + 2A_{BR}A_{BI}\cos\alpha)^d} - 0.33$ $A_T = 1.07\sqrt{(\hat{A}_{BR}^2 + \hat{A}_{BI}^2 + 2\hat{A}_{BR}\hat{A}_{BI}\cos\alpha)^d} - 0.41$	0.938 0.936	0.28 0.29	0.968 0.967	0.89 0.87	0.65 0.73
	Régression linéaire	$A_T = 0.86(0.95)A_{BR}^d + 0.40(0.15)A_{BI}^d - 0.32$ $A_T = 0.88(0.95)\hat{A}_{BR}^d + 0.44(0.16)\hat{A}_{BI}^d - 0.53$	0.930 0.928	0.30 0.30	0.965 0.964	0.93 0.93	0.39 0.41
	Mixte	...	...	...	...	...	...

**Tableau E.5 : Evaluation des modèles de gêne totale pour la combinaison du bruit industriel avec les bruits de passage de la catégorie 5. Dans les équations de régression, les chiffres en italique entre parenthèses correspondent aux coefficients de régression standardisés. Les notations sont celles introduites au Chapitre 4. <sup>a</sup> : n.s.; <sup>b</sup> : p<0.05 ; <sup>c</sup> : p<0.01 ; <sup>d</sup> : p<0.001.**

## 6. Multi-exposition aux bruits de passage de la catégorie 6 et au bruit industriel

Le Tableau E.6 présente les résultats de l'analyse de régression linéaire pour les modèles de gêne totale et leurs variantes concernant les données relatives à l'évaluation de la gêne due à la multi-exposition aux bruits de passage de la catégorie 6 et au bruit industriel. Il figure également les coefficients de corrélation entre la gêne totale prédite  $\hat{A}_T$  et la gêne totale observée  $A_T$ , ainsi que les pentes et ordonnées à l'origine de la droite de régression entre ces deux variables, selon la démarche expliquée au Chapitre 4.

	modèle	Equation de régression	R <sup>2</sup>	Std. err.	r	pente	Ord. Or.
Modèles psychophysiques	Sommation énergétique	$A_T = 0.25L_T^d - 8.15$ $A_T = 0.56N_T^d + 1.55$	0.754 0.863	0.55 0.41	0.868 0.929	0.75 0.86	1.22 0.68
	Différences énergétiques	$A_T = 0.31(1.10)L_T^d - 0.06(-0.30) L_{BR}-L_{BI} ^d - 11.01$ $A_T = 0.62(1.04)N_T^d - 0.07(-0.12) N_{BR}-N_{BI} ^a + 1.34$	0.785 0.862	0.51 0.41	0.889 0.931	0.79 0.87	1.03 0.67
	Effets indépendants	$A_T = 0.21(0.84)L_{BR}^d + 0.10(0.27)L_{BI}^d - 10.43$ $A_T = 0.49(0.92)N_{BR}^d + 0.43(0.27)N_{BI}^d + 0.99$	0.774 0.914	0.52 0.32	0.883 0.957	0.78 0.92	1.09 0.41
	Mixte	...	...	...	...	...	...
	Sommation pondérée	$A_T = 0.23L_T^d - 6.39$	0.780	0.52	0.883	0.78	1.09
Modèles perceptifs	Source dominante	$A_T = 0.87\max(A_{BR}, A_{BI})^d + 0.97$ $A_T = 0.93\max(\hat{A}_{BR}, \hat{A}_{BI})^d + 0.72$	0.898 0.875	0.35 0.39	0.948 0.935	1.03 0.94	-0.53 -0.11
	Sommation vectorielle	$A_T = 0.98\sqrt{(A_{BR}^2 + A_{BI}^2 + 2A_{BR}A_{BI}\cos\alpha)^d} + 0.08$ $A_T = 1.02\sqrt{(\hat{A}_{BR}^2 + \hat{A}_{BI}^2 + 2\hat{A}_{BR}\hat{A}_{BI}\cos\alpha)^d} - 0.10$	0.928 0.895	0.30 0.36	0.963 0.946	0.95 0.88	0.29 0.61
	Régression linéaire	$A_T = 0.77(0.92)A_{BR}^d + 0.42(0.27)A_{BI}^d + 0.24$ $A_T = 0.77(0.89)\hat{A}_{BR}^d + 0.44(0.27)\hat{A}_{BI}^d + 0.18$	0.913 0.865	0.32 0.40	0.957 0.932	0.92 0.87	0.42 0.65
	Mixte	$A_T = 0.60(0.72)A_{BR}^d + 0.54(0.34)A_{BI}^d + 0.22(0.24) A_{BR}-A_{BI} ^d + 0.26$ $A_T = 0.54(0.62)\hat{A}_{BR}^d + 0.64(0.40)\hat{A}_{BI}^d + 0.35(0.35) \hat{A}_{BR}-\hat{A}_{BI} ^c + 0.01$	0.926 0.899	0.30 0.35	0.964 0.950	0.93 0.90	0.35 0.48

**Tableau E.6 : Evaluation des modèles de gêne totale pour la combinaison du bruit industriel avec les bruits de passage de la catégorie 6. Dans les équations de régression, les chiffres en italique entre parenthèses correspondent aux coefficients de régression standardisés. Les notations sont celles introduites au Chapitre 4. <sup>a</sup> : n.s.; <sup>b</sup> : p<0.05 ; <sup>c</sup> : p<0.01 ; <sup>d</sup> : p<0.001.**

## 7. Multi-exposition aux bruits de passage de la catégorie 7 et au bruit industriel

Le Tableau E.7 présente les résultats de l'analyse de régression linéaire pour les modèles de gêne totale et leurs variantes concernant les données relatives à l'évaluation de la gêne due à la multi-exposition aux bruits de passage de la catégorie 7 et au bruit industriel. Il figure également les coefficients de corrélation entre la gêne totale prédite  $\hat{A}_T$  et la gêne totale observée  $A_T$ , ainsi que les pentes et ordonnées à l'origine de la droite de régression entre ces deux variables, selon la démarche expliquée au Chapitre 4.

	modèle	Equation de régression	R <sup>2</sup>	Std. err.	r <sup>d</sup>	penne	Ord. Or.
Modèles psychophysiques	Sommation énergétique	$A_T = 0.22L_T^d - 6.07$ $A_T = 0.59N_T^d + 2.11$	0.808 0.960	0.42 0.19	0.899 0.980	0.81 0.96	1.08 0.22
	Différences énergétiques	$A_T = 0.27(1.07)L_T^d - 0.04(-0.23)/ L_{BR}-L_{BI} ^c - 7.93$ $A_T = 0.68(1.12)N_T^d - 0.08(-0.16) N_{BR}-N_{BI} ^d + 1.83$	0.825 0.965	0.40 0.18	0.911 0.983	0.83 0.97	0.97 0.19
	Effets indépendants	$A_T = 0.19(0.87)L_{BR}^d + 0.07(0.23)L_{BI}^d - 7.38$ $A_T = 0.50(0.95)N_{BR}^d + 0.32(0.23)N_{BI}^d + 2.06$	0.803 0.957	0.42 0.18	0.899 0.979	0.81 0.96	1.09 0.24
	Mixte	...	...	...	...	...	...
	Sommation pondérée	$A_T = 0.15L_t^d - 2.51$	0.816	0.41	0.903	0.82	1.04
Modèles perceptifs	Source dominante	$A_T = 0.73\max(A_{BR}, A_{BI})^d + 1.91$ $A_T = 0.74\max(\hat{A}_{BR}, \hat{A}_{BI})^d + 1.91$	0.915 0.929	0.28 0.26	0.957 0.964	1.25 1.26	-1.94 -2.05
	Sommation vectorielle	$A_T = 0.86\sqrt{(A_{BR}^2 + A_{BI}^2 + 2A_{BR}A_{BI}\cos\alpha)^d} + 0.75$ $A_T = 0.87\sqrt{(\hat{A}_{BR}^2 + \hat{A}_{BI}^2 + 2\hat{A}_{BR}\hat{A}_{BI}\cos\alpha)^d} + 0.72$	0.947 0.963	0.22 0.18	0.973 0.981	1.10 1.11	-0.52 -0.58
	Régression linéaire	$A_T = 0.67(0.94)A_{BR}^d + 0.42(0.23)A_{BI}^d + 0.84$ $A_T = 0.68(0.95)\hat{A}_{BR}^d + 0.42(0.23)\hat{A}_{BI}^d + 0.76$	0.931 0.954	0.25 0.20	0.966 0.977	0.93 0.96	0.38 0.25
	Mixte	$A_T = 0.48(0.67)A_{BR}^d + 0.56(0.31)A_{BI}^d + 0.23(0.29) A_{BR}-A_{BI} ^c + 0.90$ $A_T = 0.53(0.73)\hat{A}_{BR}^d + 0.54(0.29)\hat{A}_{BI}^d + 0.18(0.24) \hat{A}_{BR}-\hat{A}_{BI} ^c + 0.82$	0.940 0.958	0.23 0.19	0.971 0.980	0.94 0.96	0.33 0.23

**Tableau E.7 : Evaluation des modèles de gêne totale pour la combinaison du bruit industriel avec les bruits de passage de la catégorie 7. Dans les équations de régression, les chiffres en italique entre parenthèses correspondent aux coefficients de régression standardisés. Les notations sont celles introduites au Chapitre 4. <sup>a</sup> : n.s.; <sup>b</sup> : p<0.05 ; <sup>c</sup> : p<0.01 ; <sup>d</sup> : p<0.001.**



THESE SOUTENUE DEVANT L'ECOLE NATIONALE DES TRAVAUX PUBLICS DE L'ETAT

NOM : MOREL

DATE de SOUTENANCE : 07 septembre 2012

Prénoms : Julien

TITRE :

Caractérisation physique et perceptive du bruit routier urbain pour la définition d'indicateurs de gêne sonore en situation de mono-exposition et de multi-exposition en présence de bruit industriel

NATURE : Doctorat

Numéro d'ordre : 2012-ENTP-0006

Ecole doctorale : Mécanique, Energétique, Génie Civil et Acoustique

Spécialité : Acoustique

Cote B.I.U. - /

et bis

CLASSE :

RESUME :

Le bruit dans l'environnement représente une nuisance majeure au quotidien pour nos concitoyens. De nombreux outils sont employés dans la lutte contre les nuisances sonores. Parmi ces outils, les cartes de bruit, rendues obligatoires par la directive Européenne 2002/49/CE, visent à représenter l'état acoustique moyen d'une zone donnée au moyen de l'indice énergétique  $L_{den}$ . Les limites de ce type d'indices ont été mises en évidence dans de nombreuses études, notamment en ce qui concerne la caractérisation de la gêne sonore. Dans ce contexte, ces travaux de thèse se donnent pour objectif de contribuer à l'amélioration des cartes de bruit par la proposition d'indicateurs acoustiques pertinents du point de vue de l'individu pour rendre compte de la gêne ressentie, en situation de mono-exposition au bruit de la circulation routière, et en situation de multi-exposition au bruit de la circulation routière et au bruit industriel.

Dans cette optique, une démarche en 3 étapes est mise en œuvre : (1) la caractérisation physique et perceptive des bruits de la circulation routière en milieu urbain avec proposition d'indicateurs de gêne sonore en situation de mono-exposition, (2) la caractérisation physique et perceptive de situations de multi-exposition au bruit de la circulation routière et au bruit industriel avec propositions d'indicateurs de gêne sonore, et (3) la confrontation des indicateurs proposés aux données d'une expérimentation menée en environnement simulé en laboratoire, puis aux données d'une enquête conduite *in situ*.

MOTS-CLES :

Gêne sonore, bruit routier, bruit industriel, multi-exposition sonore, indicateur, catégorisation libre, données verbales, typologie perceptive et cognitive, caractéristique spectrale, caractéristique temporelle, modèle de gêne totale, laboratoire, environnement simulé, *in situ*.

Laboratoire (s) de recherche :

Département Génie Civil et Bâtiment (DGCB) de l'Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat (ENTPE)

Directrice de thèse:

Mme Catherine Marquis-Favre

Président de jury :

Composition du jury :

Mme Catherine Lavandier (rapporteur)

Mr Reinhard Weber (rapporteur)

Mme Danièle Dubois (membre du jury)

Mme Sabine Meunier (membre du jury)

Mr Nacer Hamzaoui (membre du jury)

Mr Etienne Parizet (membre du jury)

Mr Joos Vos (membre du jury)