HAL
archives-ouvertes.fr

Perception des bruits d'impactApplication au bruit de fermeture de porte automobile

Marie-Céline Bezat

To cite this version:

Marie-Céline Bezat. Perception des bruits d'impactApplication au bruit de fermeture de porte automobile. Acoustique [physics.class-ph]. Université de Provence - Aix-Marseille I, 2007. Français. <tel-00278427>

HAL Id: tel-00278427

https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00278427

Submitted on 13 May 2008

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.

UNIVERSITE DE PROVENCE - AIX-MARSEILLE I
Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique – CNRS UPR 7051

Thèse en vue de l'obtention du grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE PROVENCE - AIX-MARSEILLE I

Discipline : ACOUSTIQUE

PERCEPTION DES BRUITS D'IMPACT

APPLICATION AU BRUIT DE FERMETURE DE PORTE AUTOMOBILE

Présentée et soutenue publiquement par
Marie-Céline Bézat
Le mercredi 19 décembre 2007

Sous la direction de
Richard Kronland-Martinet et Sølvi Ystad

En collaboration avec le groupe PSA Peugeot Citroën
Sous la tutelle industrielle de
Vincent Roussarie

JURY

Philippe Depalle, Professeur, Montréal (Rapporteur)
Stephen McAdams, Directeur de recherche, Montréal (Rapporteur)
Mireille Besson, Directeur de Recherche, Marseille (Examinateur)
Bruno Torrésani, Professeur, Marseille (Président)
Richard Kronland-Martinet, Directeur de recherche, Marseille (Co-directeur)
Sølvi Ystad, Chargé de recherche, Marseille (Co-directeur)
Vincent Roussarie, PSA Peugeot Citroën, Velizy-Villacoublay (Tuteur industriel)

Résumé

Le problème industriel des bruits de fermeture de porte consiste à traduire les attentes des automobilistes en spécifications sur les composants mécaniques de la porte. Le client en concession qui manœuvre la porte et perçoit à travers le bruit de fermeture que la porte est fermée, infère également des évocations complexes sur la qualité ou la solidité du véhicule auxquelles l'industriel est particulièrement attentif. La traduction de ces évocations complexes en règles techniques n'est pas immédiate. La caractérisation du ressenti par des critères extraits du signal sonore est une première étape qui, complétée par la caractérisation des sources organiques et des transferts acoustiques, peut aboutir aux spécifications techniques cherchées. Notre travail de thèse s'est attaché à étudier cette première étape qui pose des questions fondamentales sur la perception des bruits d'impact : il s'agit de comprendre ce que l'on perçoit du bruit d'impact entendu après une action humaine dans un environnement, et d'extraire du signal acoustique les critères sous-jacents.

Une expérimentation en situation réelle est d'abord réalisée pour observer qualitativement les usages et le ressenti en situation naturelle, et souligner les facteurs environnementaux influents. Elle est complétée par l'étude quantitative de l'influence des facteurs environnementaux, comme les autres bruits de porte, le geste ressenti, et l'image a priori du véhicule. Après avoir observé les liens entre perception en situation réelle et perception au laboratoire, les bruits sont finement décomposés au laboratoire en propriétés perceptives : les propriétés analytiques (obtenues par analyse sensorielle), les propriétés naturelles (liées à la perception des sources et des évènements) et les évocations. Les relations entre ces propriétés perceptives sont ensuite établies. La caractérisation acoustique du bruit est alors traitée par l'intermédiaire d'un modèle d'analyse-synthèse dont le but n'est pas de reproduire à l'identique les bruits de fermeture de porte, mais qui vise à synthétiser des sons proches des sons réels du point de vue des propriétés perceptives, à partir d'un nombre réduit de paramètres. Le modèle s'appuie sur la décomposition du son en impacts principaux, chaque impact étant modélisé par un ensemble de gains et de coefficients d'amortissement par bandes de fréquence. Il est spécifiquement calibré pour reproduire les propriétés analytiques, plus directement liées au signal acoustique. La synthèse de sons contrôlés permet d'observer les effets de paramètres acoustiques sur les propriétés perceptives, et ainsi de proposer des critères acoustiques sous-jacents. La généralisation des résultats méthodologiques et de l'outil d'analyse-synthèse proposé est discutée à travers l'étude d'un autre bruit d'impact automobile : le bruit de toqué.

Abstract

The industrial field of door closing sounds consists in translating drivers' expectations into specifications for the mechanical components of the door. A client who manipulates a door in a showroom and perceives from the door closing sound that it is indeed closed also induces complex evocations of quality and solidity to which the manufacturer is particularly attentive. The translation of these complex evocations into technical rules is not an immediate process. A first step consists in characterising what is perceived thanks to criteria extracted from the acoustical signal, and this is then completed by a characterisation of the organic sources and acoustic transfers in order to establish the desired technical specifications. This thesis has endeavoured to study the first step of the process, one that raises fundamental questions on the impact sound perception: this has consisted in understanding what we perceive from an action-related impact sound, and to extract the underlying criteria from the acoustic signal.

In Situ experimentation is first carried out in order to observe the qualitative characteristics of the uses and the impressions derived from a natural situation, thus identifying the pertinent environmental factors. This phase is completed with a quantitative study of the influence of environmental factors, such as other door sounds, motion perception and *a priori* image of the vehicle. After observing the links between In Situ and laboratory perception, door closing sounds are finely decomposed into perceptual properties: analytical properties (which are obtained thanks to sensory analysis), natural properties (linked to perception of sources and events) and evocations. The acoustic characterisation of the sound is then processed by means of an analysis-synthesis model which aims, not at reproducing the exact replica of the door closing sounds, but to synthesize sounds that preserve perceptual properties with a reduced number of signal parameters. The model consists in decomposing the sound in several independent impact sources, each impact being modelled by a set of gains and damping factors in frequency bands. The model is specifically calibrated to reproduce the analytical properties that are more directly linked to the acoustic signal. The controlled sounds are then used to observe the effects of acoustic parameters on the perceptual properties, and to propose underlying acoustic criteria. The generalisation of our methodological results and of our analysis-synthesis tool is discussed in the light of the study of another impact sound: the tapping sound.

Remerciements

Ce travail a été initié, supporté, et encadré de près par Vincent Roussarie. Cette rencontre m'a menée du stage de master au poste de recherche en passant par cette extraordinaire expérience de thèse. Je voudrais lui témoigner ma profonde reconnaissance et saluer notre formidable complicité acoustique. Quelle qu'est pu parfois être l'âpreté du long chemin effectué, trois années à fermer des portes tout de même, nous avons toujours su avancer avec passion et force d'humour, et comptons bien poursuivre sous cette forme notre aventure recherche. Belle équation que j'ai pu retrouver à Marseille, avec mes directeurs Richard Kronland-Martinet et Sølvi Ystad, que je tiens à remercier très chaleureusement pour tout ce qu'ils m'ont patiemment transmis, de l'art de traiter des signaux à celui de se questionner sur le sens des sons en passant par l'apprentissage de techniques norvégiennes culinaires pointues. Mes trois encadrants m'ont supportée, écoutée, conseillée, parfois fouettée, et beaucoup amusée, je les remercie pour tout !

Je tiens également à remercier mes rapporteurs, Philippe Depalle et Stephen McAdams, qui par la précision de leurs rapports m'ont nettement fait avancer dans la course finale vers le doctorat, ainsi que mon examinateur Mireille Besson et mon président Bruno Torrésani, pour tous leurs commentaires. Je suis particulièrement fière d'avoir partagé mes travaux avec tous les membres ce jury et les remercie à nouveau d'avoir accepté cette immersion au sein de la porte automobile.

Je voudrais saluer les nombreux acteurs qui ont participé à ce travail de thèse. Je tiens à leur transmettre les compliments que j'ai pu recevoir et leur témoigner toute ma reconnaissance. Thierry Voinier, Grand Maître es MaxMSP, à force de travail (et d'une certaine substance chinoise), a mis en place l'interface temps-réel, en temps réel ! Mistuko Aramaki et Thibaut Necciari m'ont patiemment expliqué leur connaissance sur la synthèse du bruit d'impact. Pauline Faye, Emmanuelle Diaz, Nadia Quiyass et Justin Parchantour m'ont aidée à analyser les (nombreuses) données, m'ont parfois sauvée en debuggant in extremis des interfaces, et m'ont toujours conseillée pour les expérimentations. Olivier Lescop, Emilie Villerette, Jerôme Gailly et Mathieu Hauchecorne, sous l'encadrement de Carine Egoroff, ont passé des heures et des heures à entraîner les panélistes (tôt le matin) et m'ont fournie le cœur expérimental des travaux, l'évaluation de centaines de sons sur un ensemble de descripteurs sensoriels, parfois saugrenus, merci là encore pour votre humour ! Mickaël Sauvage a réalisé les mesures acoustiques, et certaines dans des conditions géographiques extrêmes, accompagné d'un passionné de la porte Anthony Aquilanti. Je remercie également l'institut Repères pour l'étude qualitative, et la société Eurosyn, en particulier Thierry Lageat, pour les 400 sujets recrutés et les passations expérimentales. Je souhaite ici faire un brillant hommage à mon ami des portes, notre acteur spécialisé en fermeture de porte en blouse blanche, Thibaut Jeandel, avec qui j'ai partagé nombre d'expériences et questions sur la porte. Je remercie également Anne Bardot,

Patricia Jonville et Vincent Roussarie pour avoir soutenu mes travaux avec de tels moyens. Je suis très reconnaissante de leur confiance et salue leur volonté à m'aider très concrètement à (presque) tout comprendre sur la porte. Enfin, je remercie Pascal Jeudy et les spécialistes de l'ouvrant chez PSA Peugeot Citroën, qui ont posé la question originelle qui m'a tant préoccupée toutes ces années.

Je suis très heureuse d'avoir rencontré l'accueil chaleureux particulier à la branche marseillaise S2M. Je remercie toute l'équipe : les thésards Fabrice, Jonathan, Mathieu, Thibaut et Aude pour tout ce qui tourne autour du bar, de la table de ping-pong, de la piscine, de la plaine, des calanques, et du pastis ; Mitsuko, ma coloc de bureau, qui m'a apportée beaucoup de soutien jusqu'aux toutes dernières heures du doctorat et m'a ouverte à tant de questions ; Philippe pour tout ce qu'il m'a appris en granularité, tennis de table, et gentillesse ; Christophe et ses amies gossips ; Thierry qui a fait preuve de patience pour me soutenir au quotidien ; Michèle pour tous les cafés esseulée ; Jean pour tout ce qui concerne l'acoustique, en particulier celle entendue à Aix ; et évidemment Richard et Sølvi dont je salue ici la constante bonne humeur.

Je remercie également mon service parisien, et tous ses facteurs humains, les nombreux stagiaires, prestataires et permanents, passionnés et passionnants, qui apportent tous à l'ambiance spéciale, la Peuf Touch, dans laquelle je me suis bien amusée. Je tiens à remercier particulièrement Thomas, mon homologue thésard visionnaire, et l'équipe dynamique (et pêchue) : Florent, Karine, Jean-Michel, Olivier, Maël, Alexis, François, Thibaut, Thomas, ainsi que les nouveaux Gaylord et Jean-François qui ne m'ont connue qu'en rédaction... (Ne vous inquiétez pas, on en revient !) J'ai une pensée toute particulière pour Florent, que je remercie pour la confiance qu'il m'a accordée, alors très très jeune chercheur en stage de master.

Enfin, je suis très heureuse d'avoir cette occasion de remercier mon monde, mes proches, qui me rendent la vie si belle et qui m'ont patiemment aidée et soutenue jusque dans les tréfonds de fin de thèse. Je remercie en particulier mes parents qui me soutiennent tellement, tant par leur confiance et leur fierté irréfléchie, que par leur aide toute pratique, du cocon butte aux caillois aux retraites salvatrices pilataises, en passant par la conception de tant de cannelés et par des relectures de manuscrit. Je remercie mon frère qui me fait tant rire depuis presque 29 ans, mois de rédaction compris (!) ; je remercie également Sonia, avec qui j'espère ne plus avoir à rater de bains de minuit pour de sombres histoires de rédaction. Je remercie Marie et Justine, les amies de toujours, qui m'ont soutenue sans relâche, jusqu'au bout, jusqu'au jour de la soutenance. Merci Marie pour l'écoute, portable constamment ouvert pendant l'isolement rédactionnel. Je remercie tous les autres, les copines filles, le patron du 32bis, le lacandon du 17ème, les amateurs du zazas club, les amis supéléciens, amateurs de bons programmes radio, la bande du 13, amatrice de diamants, les petits voisins, polyglottes et amateurs de bons cafés, et la fidèle courbevoisienne, docteur également. Enfin, je remercie la fameuse dream team de prépa qui a gentiment accepté d'étudier avec moi l'acoustique des théâtres grecs, il y a bien longtemps, et qui m'a dès lors soutenue très tôt dans l'aventure acoustique, même s'il faut bien avouer que le niveau doctorat était alors bien bien loin.

J'ai finalement bénéficié d'un contexte fortement favorable pendant ces trois années de thèse, et j'en remercie à nouveau tous les facteurs !

‘

‘’Mais l’homme qui revient après avoir franchi la Porte dans le Mur ne sera jamais tout à fait le même que l’homme qui y était entré’’

Les Portes de la Perception, Aldous Huxley, 1954

Table des matières

Résumé **3**

Abstract **4**

Remerciements **6**

Table des matières **11**

INTRODUCTION **17**

A. PROBLEMATIQUE ET POSITIONNEMENT METHODOLOGIQUE **19**

Chapitre I. Problématique : le bruit de fermeture de porte automobile **21**
1. Problématique industrielle 21
2. Limites des travaux antérieurs 22
2.1. Quelques éléments sur les bruits de fermeture de porte 23
2.1.1. Jugements perceptifs 23
2.1.2. Analyses acoustiques 23
2.1.3. Modifications techniques 25
2.1.4. Relations entre jugements clients, signal acoustique et mécanique non établies 25
2.2 Prédiction du jugement clients basés sur une ‘’caractérisation perceptive’’ 26
2.2.1. Présentation des modèles de prédiction 26
2.2.2. Limites des modèles de prédictions 27
3. Problématique de la thèse 29
3.1 Positionnement du sujet de thèse 29
3.2 Problématique fondamentale 29

Chapitre II. Perception des bruits d’impact **31**
Introduction 31
1. Perception des bruits d’impact en situation réelle 33
1.1. Complémentarité de l’auditeur et de son environnement 33
1.2. Caractérisation des bruits d’impact en situation réelle 33
1.2.1 Complémentarité des études In Situ/Laboratoire 33
1.2.2. Validité écologique 34
2.1.3. Influence de facteurs environnementaux 34
1.3. Compromis écologie/contrôle 36

Conclusion 37
2. Propriétés perceptives des bruits d'impact 38
2.1 Différentes écoutes et différents types de propriétés perceptives 38
2.1.1 Ecoute analytique vs écoute écologique 38
2.1.2 Propriétés analytiques 38
2.1.3 Propriétés naturelles et évocations 39
2.1.4 Caractérisation perceptive complète : écoutes analytique et écologique 40
2.2. Caractérisation des propriétés perceptives 41
2.2.1. Choix des sons 41
2.2.2. Propriétés analytiques 41
2.2.3. Propriétés naturelles 43
2.2.4. Evocations 45
2.3. Relations entre propriétés perceptives 46
2.3.1. Propriétés analytiques vs propriétés naturelles 46
2.3.2. Propriétés analytiques vs évocations 47
2.3.3. Propriétés naturelles vs évocations 47
Conclusion 49
3. Modélisation des signaux d'impact 50
3.1. Modélisations du système auditif périphérique 50
3.2. Analyse directe des signaux d'impact 51
3.2.1. Descripteurs acoustiques 52
3.2.2. Modélisations statistiques 53
3.2. Analyse par synthèse des signaux d'impact 56
3.2.1. Synthèse par modèle signal 56
3.2.2. Synthèse par modèle physique 56
3.2.3. Vers une synthèse ''perceptivement valide'' 57
Conclusion 59

Chapitre III. Démarche pour l'étude de la perception des bruits d'impact 60

B. APPLICATION AU BRUIT DE FERMETURE DE PORTE AUTOMOBILE 63

Chapitre IV. Perception des bruits de fermeture de porte en situation réelle 65
1. Usages et ressenti en situation réelle 66
1.1 Méthodologie : approche qualitative 66
1.2 Résultats de l'étude qualitative 68
1.2.1 Profils de clients 68
1.2.2 Usages et configurations d'écoute 69
1.2.3 Ressenti et influence du véhicule 70
Conclusion 74
2. De la situation réelle au laboratoire : influence des facteurs environnementaux 76
2.1 Stimuli de laboratoire 76
2.1.1 Configurations 76
2.1.2 Protocoles de mesure et restitution audio 77
2.2 Influence d'autres bruits de porte 78
2.2.1 Influence des portes Avant/Arrière 78

2.2.2 Influence des bruits d'ouverture 80
2.3 Influence de la manœuvre 82
2.3.1 Influence du ressenti lié au geste 82
2.3.2 Influence de l'énergie de fermeture 85
2.4 Influence de l'image du véhicule 87
2.4.1 Influence de l'image du véhicule sur véhicule réel 88
2.4.2 Influence de l'image du véhicule sur vidéos 91
Conclusion 98

Chapitre V. Propriétés perceptives des bruits de fermeture de porte 100
1. Choix des sons 101
2. Ecoute écologique 102
2.1 Ecoute ''naïve'' 102
2.1.1 Identification des propriétés naturelles et évocations 102
2.1.2 Evaluation des propriétés naturelles et évocations 102
2.2 Ecoute ''experte'' 112
2.2.1 Sujets ''experts'' et propriétés naturelles ''expertes'' 112
2.2.2 Evaluation des propriétés naturelles ''expertes'' 112
2.3 Caractérisation par écoute écologique 113
3. Ecoute analytique 115
3.1 Panel sensoriel 115
3.1.1 Méthodologie 115
3.1.2 Identification des propriétés analytiques 116
3.1.3 Performance du panel 116
3.2 Profil sensoriel 118
3.2.1 Propriétés continues 118
3.2.2 Spécificités 118
3.3 Caractérisation par écoute analytique 119
4. Réseau perceptif 120
4.1 Relations entre propriétés 120
4.1.1 Propriétés naturelles vs évocations 120
4.1.2 Propriétés analytiques vs propriétés naturelles 121
4.2 Réseau perceptif 122
Conclusion 124

Chapitre VI. Modélisation acoustique des bruits de fermeture de porte 126
1. Modèle d'analyse-synthèse 127
1.1 Propriétés perceptives étudiées 127
1.1.1 Restriction des propriétés perceptives 127
1.1.2 Propriétés perceptives cibles 127
1.2 Décomposition en bruits élémentaires 128
1.2.1 Choix de la méthode de décomposition 128
1.2.2 Méthode de décomposition : Empirical Mode Decomposition 130
1.2.3 Décomposition en bruit ''serrure'' et bruit ''fermeture'' 134
1.3 Analyse-synthèse des bruits d'impacts 137
1.3.1 Principe de la modélisation 137

1.3.2 Méthode d'analyse 138
1.3.3 Méthode de synthèse 140
1.4 Analyse-synthèse des bruits de fermeture de porte 141
1.4.1 Analyse des impacts du bruit de fermeture de porte 141
1.4.2 Synthèse du bruit de fermeture de porte 146
Conclusion 151
2. Evaluation perceptive du modèle d'analyse-synthèse 153
2.1 Prédiction des propriétés perceptives 153
2.1.1 Descripteurs acoustiques 153
2.1.2 Prédiction des propriétés perceptives 154
2.1.3 Les limites des modèles de prédiction 158
2.2 Comparaison perceptive : sons réels vs sons de resynthèse 158
2.2.1 Distances par propriété perceptive 158
2.2.2 Distances perceptives globales 162
2.3 Proposition d'un modèle de synthèse simplifié 163
2.3.1 Paramètres de contrôle principaux 163
2.3.2 Evaluation perceptive du modèle simplifié 166
Conclusion 168
3. Caractérisation acoustique des sons de synthèse 170
3.1 Espace des sons de synthèse 170
3.2 Prédiction des propriétés analytiques 170
3.2.1 Plan d'expérience 171
3.2.2 Evaluation des propriétés analytiques 172
3.2.3 Prédiction des propriétés analytiques 173
3.3 Effets de seuil 175
3.3.1 Plan d'expérience 175
3.3.2 Evaluation des propriétés analytiques 178
3.3.3 Effets par descripteur acoustique 178
3.4 Organisation des critères acoustiques 185
3.4.1 Plan d'expérience 185
3.4.2 Evaluation des propriétés perceptives 186
3.4.3 Arbres de paramètres acoustiques par propriété perceptive 188
Conclusion 197

C. VERS UNE APPROCHE GENERALE DU BRUIT D'IMPACT 199

Chapitre VII. Etude d'un impact simple : le bruit de toqué 201
1. Propriétés perceptives du bruit de toqué 202
1.1 Choix des sons 202
1.2 Ecoute écologique 203
1.2.1 Evaluation de la qualité du matériau 203
1.3 Ecoute analytique 205
1.3.1 Méthodologie 205
1.3.2 Identification des propriétés analytiques 206
1.3.3 Performance du panel 206
1.3.4 Profil sensoriel 206

1.3.5 Caractérisation par écoute analytique 207
1.4 Relations entre propriétés 208
2. Modélisation acoustique du bruit de toqué 210
2.1 Modèle d'analyse-synthèse 210
2.1.1 Adaptation du modèle d'analyse-synthèse de bruit de fermeture de porte 210
2.1.2 Analyse des bruits de toqué 210
2.1.3 Synthèse des bruits de toqué 210
2.2 Evaluation perceptive du modèle d'analyse-synthèse 211
2.2.1 Conservation de la qualité du matériau 211
2.3 Caractérisation acoustique des sons de synthèse 212
2.3.1 Plan d'expérience 213
2.3.2 Evaluation des propriétés analytiques principales 213
2.3.3 Arbres de paramètres acoustiques par propriété analytique 214
Conclusion 217

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES 219
1. Perception du bruit d'impact 219
2. Perception du bruit de fermeture de porte 221
3. Perspectives 221

ANNEXE I. SONS et ANNEXES TECHNIQUES (CD joint) 223

Bibliographie 227

INTRODUCTION

Le bruit d'impact lié à une action humaine présente la particularité de transmettre à l'auditeur, dans un laps de temps très court, de nombreuses informations sur l'action et son environnement. Les exemples de bruit d'impact associés à une action humaine ne manquent pas. Citons Sherlock Holmes qui tapote sur les murs pour y découvrir des compartiments secrets (cité par Van der Doehl et Pai, 1996) ou les clients automobiles qui tapotent sur les planches de bord pour vérifier la qualité d'un véhicule convoité. Notre problème est de comprendre comment les auditeurs attribuent du sens à ces signaux d'impact qui ponctuent leur action.

Nous choisissons d'étudier la perception du bruit d'impact à travers un exemple de bruit d'impact complexe : le bruit de fermeture de porte. L'étude de ce bruit est soulevée par une problématique industrielle : il s'agit, pour l'industriel, de connaître les attentes des clients et d'être capable de les prendre en compte dans le processus de conception. Le bruit de fermeture de porte est également un cas d'étude intéressant en recherche fondamentale autant pour les aspects cognitifs que psychoacoustiques. Du point de vue cognitif, il induit une information riche sur l'évènement et l'action, en fonction des attentes de l'auditeur et de la situation. L'auditeur attend par exemple un retour d'information sur l'efficacité de la manœuvre. Il peut également inférer des propriétés de plus haut niveau : des évocations de qualité, de solidité, auxquelles l'industriel est particulièrement attentif. Ces propriétés et évocations peuvent du reste être influencées par des facteurs environnementaux, liés à la manœuvre ressentie ou à l'image du véhicule. Du point de vue psychoacoustique, le bruit de fermeture de porte est composé, sur une durée de quelques centaines de millisecondes, d'un ensemble d'impacts successifs associé à une résonance de basse fréquence où de complexes effets psychoacoustiques entrent en jeu.

Nous intéressant à un son de l'environnement, nous choisissons d'aborder son étude en considérant la complexité de sa perception en situation réelle. Nous la complétons ensuite par des études au laboratoire où la perception est focalisée sur le son. Enfin, nous proposons un modèle d'analyse-synthèse qui permet d'approcher les éléments chirurgicaux du son sur lesquels s'appuie la perception. Notre démarche empreinte une voie descendante, du monde réel à l'étude de stimuli contrôlés, au lieu de raffiner progressivement les objets d'étude. Ce choix implique une partie expérimentale conséquente, puisque nous devons parcourir de nombreuses étapes dans le souci de toujours lier les résultats d'études plus écologiques à ceux d'études plus analytiques, mais il nous permet d'expliquer les phénomènes haut niveau qui constituent l'entrée de notre étude.

Après avoir précisé la problématique et positionné nos choix méthodologiques **(Partie A)**, nous développons nos études sur la perception du bruit de fermeture de porte **(Partie B)**. La généralisation des résultats méthodologiques et de l'outil d'analyse-synthèse est ensuite illustrée à travers l'étude d'un autre bruit d'impact automobile : le bruit de toqué **(Partie C)**.

A. PROBLEMATIQUE ET POSITIONNEMENT METHODOLOGIQUE

Le problème industriel du bruit de fermeture de porte pose des questions de recherche fondamentale sur la perception des bruits d'impact. L'exposé de ces questions nous amène à préciser la problématique de la thèse **(Chapitre I)**. Nous cherchons ensuite parmi les études antérieures sur la perception des bruits d'impact les approches méthodologiques adaptées à notre problématique **(Chapitre II)**. Finalement, nous proposons une démarche originale pour l'étude des bruits d'impact **(Chapitre III)**.

Chapitre I. Problématique : le bruit de fermeture de porte automobile

Le bruit de fermeture de porte est souvent cité comme un cas d'application type du design sonore. Ce problème industriel n'est pourtant pas résolu : les constructeurs automobiles ne disposent pas de connaissances suffisantes pour intégrer efficacement cette composante sonore dans leur processus de conception. L'examen des travaux antérieurs sur les bruits de fermeture de porte nous aide à reposer le problème dans le contexte élargi de la recherche sur la perception des bruits d'impact. Le problème industriel est en partie traduit en questions fondamentales qui constituent la problématique de la thèse.

1. Problématique industrielle

Les bruits d'équipement automobile, comme le 'blop' du vide-poche, le 'clic' de ceinture de sécurité, le 'chlaka' de condamnation des portes, ou le 'vlang' de fermeture de porte induisent chez l'utilisateur des indices de qualité, de sécurité, ou de solidité du véhicule. A mesure que l'exigence de qualité des clients s'est renforcée, ces indices acoustiques ont pris de l'importance dans l'acte d'achat. Pour satisfaire cette exigence efficacement, l'acoustique automobile doit intervenir en amont dans les phases de conception pour prendre en compte le ressenti des clients. Il faut savoir dimensionner correctement les pièces mécaniques du véhicule pour être assuré, avant même le développement du véhicule, d'atteindre un niveau de qualité suffisant pour satisfaire les futurs clients. Pour ce faire, il faut d'une part connaître les exigences des clients, et d'autre part être capable de traduire ces exigences en solutions techniques.

Pour identifier les bonnes solutions techniques, il faut se donner les bons objectifs, et donc connaître les *attentes* des clients. Ces attentes doivent être traduites dans un cahier des charges sous forme de *spécifications techniques* : le signal acoustique est analysé pour déterminer et dimensionner les composantes acoustiques caractéristiques du ressenti attendu par les clients. Ensuite, il faut pouvoir répondre techniquement aux spécifications techniques par des *solutions techniques* adaptées : le dimensionnement des composantes acoustiques caractéristiques du ressenti doit être physiquement assuré par les pièces mécaniques impliquées dans le bruit d'équipement. Ainsi, le problème des bruits d'équipement automobile interroge les relations entre jugement client, signal acoustique et mécanique (Figure 1).

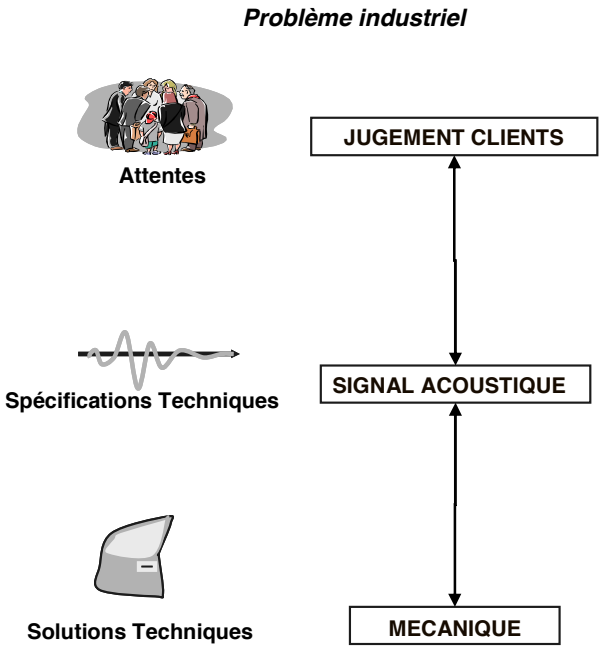


Figure 1 Problématique industrielle pour le traitement des bruits d'équipement

Le bruit de fermeture de porte est un exemple de bruit automobile fortement porteur d'indices de qualité. Il est souvent cité comme l'exemple du bruit traité par l'industrie automobile depuis de nombreuses années. Pourtant, les concepteurs ne disposent pas de règles techniques solides permettant de consolider le processus de conception à travers des spécifications techniques robustes. Le bruit de fermeture de porte est encore principalement travaillé de manière empirique. Les concepteurs connaissent quelques règles de ''bonnes pratiques'' établies d'après les expériences sur les véhicules antérieurs. Le résultat audio de ces ''bonnes pratiques'' est contrôlé par écoute du bruit de porte une fois le véhicule conçu. Mais les structures des véhicules évoluent sans cesse, le bruit résultant n'est en conséquence pas toujours conforme aux attentes. De plus, certaines bonnes pratiques sont coûteuses, mais ne sachant pas prévoir leur impact réel sur le bruit résultant, on ne peut pas proposer de solutions tout aussi satisfaisantes à moindre coût.

Nous constatons que la prestation des bruits de fermeture de porte est mal comprise autant pour les questions liées aux usages et attentes des clients, que pour celles liées aux spécifications et aux solutions techniques. Ce sujet a pourtant été abordé en psychoacoustique. Nous en exposons les principaux résultats et limites.

2. Limites des travaux antérieurs

Nous présentons les résultats d'études antérieures qui apportent des connaissances sur les jugements perceptifs (qualité, préférence), sur l'analyse des signaux sonores mesurés, et sur les modifications techniques de pièces mécaniques de la porte, sans aboutir à une compréhension complète des relations entre ces domaines.
Nous présentons ensuite deux études plus récentes qui s'appuient sur une caractérisation perceptive des bruits de fermeture de porte : en plus des jugements clients, les composantes perceptives

caractéristiques des différents bruits de fermeture de porte (ex : la hauteur) sont évaluées. Ces composantes perceptives sont utilisées pour optimiser la recherche de paramètres acoustiques extraits du signal acoustique. Le jugement clients peut alors être prédit à partir de ces paramètres acoustiques. Mais nous constatons que les modèles prédictifs du jugement clients manquent de robustesse et les paramètres acoustiques ne sont pas assez explicatifs pour être reliés à la physique, si bien que les paramètres acoustiques ne peuvent être utilisés comme spécifications techniques des bruits de fermeture de porte.

2.1. Quelques éléments sur les bruits de fermeture de porte

2.1.1. Jugements perceptifs

Les études antérieures présentent des tests perceptifs réalisés en laboratoire. Un ensemble d'auditeurs y évalue les bruits de fermeture de porte mesurés en chambre semi-anéchoïque et restitués au casque en laboratoire. Les auditeurs évaluent généralement une dizaine de bruits selon leurs préférences (Malen et Hancok, 1995, Champagne et Amman, 1995, Fridrich, 1999, Petniunas et al., 1999, Sholl et Amman, 1999).

Dans le but d'expliquer ces jugements, les auteurs décrivent les bruits de fermeture principalement en terme de hauteur (Malen et Hancock, 1995, Champagne et Amman, 1995, Fridrich, 1999, Petuniunas et al., 1999). De plus, certains de ces bruits laissent entendre des impacts multiples liés aux impacts dans la serrure de porte, tandis que d'autres présentent un seul choc principal (Champagne et Amman, 1995, Sholl et Amman, 1999, Fridrich et al., 1999). Ils peuvent également contenir des bruits additionnels, des spécificités, comme des bruits de vibrations du panneau de porte ou de la caisse, et des sonnettes qui désignent des composantes tonales additionnelles (Champagne et Amman, 1995).
Un bruit de fermeture de porte apprécié est en général grave et ne laisse entendre qu'un seul choc principal. Un bruit de fermeture de porte peu apprécié est plutôt aigu, mais il peut aussi contenir des impacts multiples, ou encore des bruits parasites (Tableau 1). Deux bruits peuvent donc être jugés de la même manière même s'ils ne se ressemblent pas, ce qui rend complexe la modélisation du jugement clients.

Description du son	Référence audio
Son grave avec un impact simple	s20.wav
Son aigu avec des impacts multiples	s26.wav
Son avec vibrations	S21.wav
Son avec sonnette	s22.wav

Tableau 1 Illustrations sonores

2.1.2. Analyses acoustiques

Les signaux de fermeture de porte sont analysés dans le but d'identifier les paramètres acoustiques sous-jacents aux jugements perceptifs. Les analyses réalisées dans les études recensées s'appuient sur l'expertise perceptive des auteurs : il s'agit de caractériser la hauteur des bruits, la présence d'impacts multiples, de vibrations et de sonnette.

Différents outils d'analyse sont proposés pour détecter les impacts multiples et les bruits parasites, ou pour quantifier la hauteur perçue (Tableau 2). Les représentations temps-fréquence, comme les représentations en ondelettes, sont introduites pour visualiser les impacts multiples et les bruits parasites comme les vibrations et sonnettes (Sholl et Yang, 2003, Parizet, Guyader et Nosulenko, 2007). Il reste cependant difficile d'extraire des paramètres acoustiques de ces représentations complexes. Une représentation plus simple qui mesure l'intensité perçue en fonction du temps est utilisée pour extraire des indicateurs capables de détecter impacts multiples et vibrations (Kuwano et al., 2002, Champagne et Amman, 1995, Sholl et Yang, 1999, Petniuanias et al., 1999, Parizet, Guyader et Nosulenko, 2007). Cette analyse intègre une modélisation du système auditif périphérique et devrait donc plus être à même de décrire le ressenti (modèle de Zwicker). Pour à la fois détecter impact multiples et vibrations, et évaluer la hauteur, une méthode d'analyse en percentiles dérivée du calcul de la sonie spécifique en fonction du temps (intensité calculée par le modèle de Zwicker) est introduite (Fridrich, 1999, 2002). Les percentiles fréquentiels correspondent aux fréquences délimitant 10%, 20%, 30%, 50%, 70%, 80%, 90% de la sonie globale. Cet outil permet de réduire l'information tout en conservant un résumé des évolutions temps-fréquence.

Des paramètres acoustiques sont extraits de ces analyses. Par exemple, la hauteur serait caractérisée à partir du calcul de la hauteur perçue en fonction du temps (modèle d'Aurès) ou de simples rapports de niveaux dans différentes bandes de fréquence (Kuwano et al., 2002 ; Champagne et Amman, 1997 ; Malen et Hancok, 1995 ; Petniuanias et al., 1999 ; Parizet, Guyader et Nosulenko, 2007). Cependant la robustesse de ces paramètres n'est pas vérifiée.

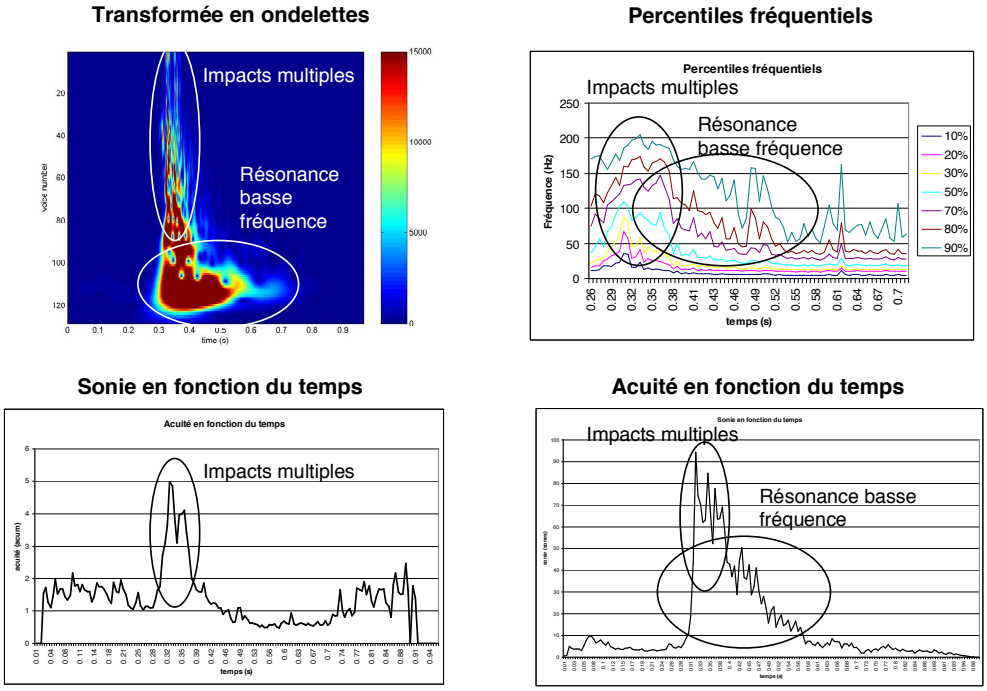


Figure 2 Illustrations d'analyses signal.
Un même son (son.wav) est représenté à partir de 4 outils d'analyse pour visualiser les impacts multiples et la résonance basse fréquence.

Quelles que soient les analyses réalisées, les auteurs cherchent à y visualiser leur ressenti, mais ces études ne proposent pas de paramètres acoustiques robustes permettant de l'expliquer.

2.1.3. Modifications techniques

Le bruit de fermeture de porte est généré par différents impacts au niveau de la serrure (contacts pène / gâche, passage des crans serrure), et par le contact du panneau de porte sur la caisse, par l'intermédiaire des joints, avec éventuellement des vibrations du panneau de porte ou de la caisse après impact. Plusieurs modifications sur les sources organiques d'un même véhicule (la serrure, la gâche, les joints, ou le panneau de porte) sont proposées dans la littérature dans le but d'améliorer son bruit de fermeture de porte (Sholl et Amman, 1999, Fridrich, 1999, Malen et Scott, 1993, Malen et Hancok, 1995, Parizet et al., 2007, Petnunias et al., 1999, Hamilton, 1999). Dans ces études, les modifications sont techniquement réalisées sur véhicule afin de confirmer ou infirmer par des écoutes leur impact sur le bruit (Figure 3).

D'autres auteurs (Sellerbeck, Stanley et Young, 2004) cherchent à simuler les modifications techniques : ils caractérisent les fonctions de transfert des différentes sources du bruit pour synthétiser des sons à partir de fonctions de transfert modifiées simulant des solutions techniques.

Figure 3 Illustrations de modifications techniques

2.1.4. Relations entre jugements clients, signal acoustique et mécanique non établies

Jugement clients et signal acoustique

Les relations entre jugements clients et paramètres acoustiques ne sont pas établies. Les paramètres acoustiques sont recherchés à partir de composantes perceptives qui semblent bien caractériser les bruits, mais elles ne sont pas validées expérimentalement et les paramètres acoustiques s'avèrent insuffisamment robustes pour expliquer la complexité du ressenti.

Jugement clients, signal acoustique et mécanique

Les modifications techniques sont évaluées à partir de paramètres acoustiques et d'évaluations subjectives d'experts automobile. Mais les paramètres acoustiques sont peu prédictifs des évaluations perceptives. De plus, une solution technique appliquée à un véhicule n'est pas nécessairement généralisable pour d'autres architectures. Les solutions techniques proposées sont vues comme autant de leviers possibles pour améliorer la qualité des bruits de fermeture de porte, mais n'apportent pas de réponse généralisable.

Les études citées proposent des outils signaux et quelques leviers techniques pour répondre au problème de la qualité des bruits de fermeture de porte. Mais les relations complexes entre jugements

perceptifs, paramètres acoustiques et modifications techniques ne sont pas établies. Pour plus d'efficacité, la recherche de paramètres acoustiques peut s'appuyer sur une caractérisation perceptive quantitative des différents bruits de fermeture de porte. Ainsi les paramètres acoustiques caractéristiques des composantes perceptives sont optimisés par analyses statistiques.

2.2 Prédiction du jugement clients basés sur une ''caractérisation perceptive''

Les études présentées ci-dessous (Parizet, Guyader et Nosulenko, 2007, Roussarie et Bezat, à soumettre) proposent une caractérisation perceptive quantifiée des bruits de fermeture de porte comme intermédiaire entre jugement perceptif et signal acoustique (Figure 4). Les paramètres acoustiques sont cherchés pour modéliser les composantes perceptives. Les paramètres acoustiques ainsi optimisés sont ensuite reliés aux jugements clients.

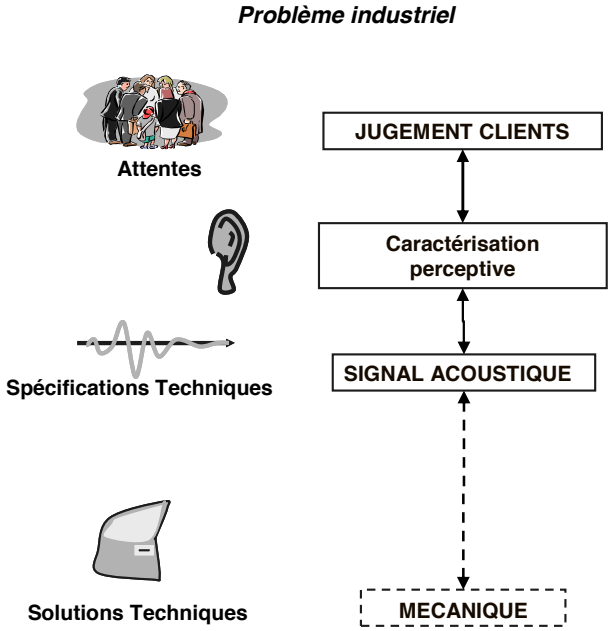


Figure 4 Démarche basée sur une ''caractérisation perceptive''

2.2.1. Présentation des modèles de prédiction

Parizet et al (2007) proposent de caractériser perceptivement un ensemble de bruits de fermeture de porte à partir d'un test de dissemblances : les sujets évaluent les distances perceptives entre paires de bruits de fermeture de porte. Les distances obtenues entre les sons de l'étude sont représentées dans un espace à trois dimensions. La première dimension différencie les bruits selon leur hauteur, elle est corrélée au centre de gravité spectral. La deuxième dimension caractérise la ''propreté'' qui traduit la non multiplicité des impacts entendus, elle est corrélée à un indicateur calculé à partir de la sonie en fonction du temps (modèle de Zwicker). La dernière dimension n'est pas comprise perceptivement, ni caractérisée en signal.
Un modèle est ensuite établi par régression linéaire entre les jugements clients (évaluations par paires de la qualité de la porte) et les deux paramètres acoustiques caractéristiques des deux premières dimensions perceptives. Ce modèle prédit correctement la préférence des sons étudiés, mais il n'est pas testé sur d'autres sons, et sa robustesse n'est pas éprouvée. De plus, la troisième dimension

perceptive qui caractérise pourtant certains sons n'a pas pu être caractérisée par des paramètres acoustiques. Aussi, elle n'est pas considérée dans le modèle de prédiction de la qualité. Il y manque donc de l'information.

Une autre étude cherchant un modèle prédictif de qualité des bruits de fermeture de porte a été réalisée en amont des travaux de thèse (Roussarie et Bezat, à soumettre). Son originalité tient dans le choix de la méthode de l'analyse sensorielle pour la caractérisation perceptive des bruits de fermeture de porte. L'analyse sensorielle est une méthode descriptive qui propose de caractériser un ensemble de bruits par quelques composantes perceptives définies par un groupe de sujets. Les sujets sont entraînés à évaluer les bruits sur ces composantes perceptives. La caractérisation sensorielle de 25 bruits de fermeture de porte est ainsi réalisée. 4 composantes perceptives principales qui décrivent le son, sans référence à l'évènement associé, sont évaluées : la hauteur ; l'intensité ; l'onomatopée ''bonm'' ; la présence de vibrations. Un modèle linéaire est proposé pour prédire les jugements clients (évaluations directes de la qualité que renvoie le véhicule) à partir de ces composantes perceptives. Les composantes perceptives identifiées par analyse sensorielle contiennent donc suffisamment d'information pour prédire le jugement clients. Les paramètres acoustiques, tels le rapport entre l'énergie Haute Fréquence et Basse Fréquence (/200Hz), le coefficient d'amortissement du 2ème mode, les énergies de certaines bandes de tiers d'octave, ainsi qu'un indicateur pour détecter les vibrations calculé à partir des transitoires détectés (par SVP, Röbel, 2003), sont alors sélectionnés pour prédire les composantes perceptives. Les paramètres acoustiques ainsi optimisés sont finalement reliés aux jugements clients. Le modèle linéaire associé permet de prédire la qualité des 25 bruits de fermeture de porte à partir d'un petit nombre de paramètres acoustiques avec une bonne qualité d'ajustement (Figure 5) et de robustesse (assurée par validation croisée, Cornillon et Matzner-Lober, 2007).

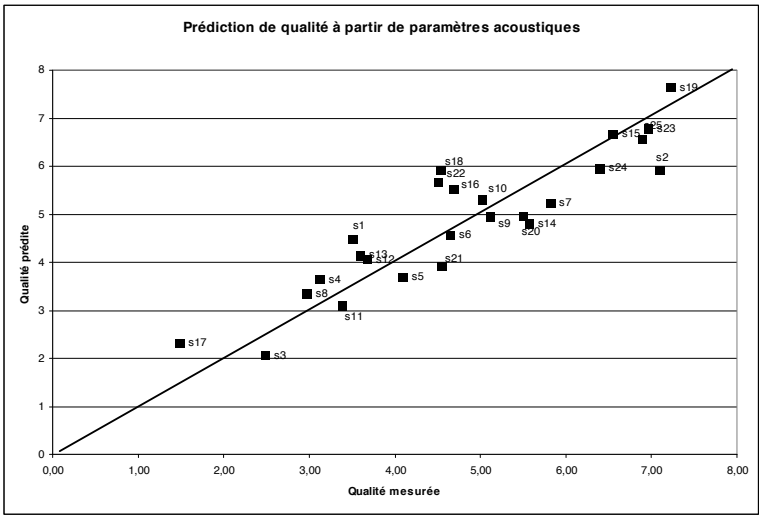


Figure 5 Qualité prédite en fonction de la qualité mesurée expérimentalement (R2=0.82) (Roussarie et Bezat, à soumettre)

Même si la préférence peut être correctement prédite, nous observons ci-dessous que les modélisations obtenues ne sont pas suffisantes pour véritablement comprendre les liens entre signal acoustique et ressenti.

2.2.2. Limites des modèles de prédictions

Que ce soit pour l'étude du jugement clients, de la caractérisation perceptive, ou de l'analyse acoustique, les études précédentes proposent des résultats tout en soulevant des difficultés qui limitent leur application industrielle.

Sur le jugement clients

Les études précédentes présentent des résultats sur le jugement en qualité des bruits de fermeture de porte. Mais elles n'étudient pas le jugement réellement ressenti en situation naturelle.

> Question 1 : Les jugements de préférence sont réalisés au casque en laboratoire : sont-ils représentatifs d'une situation naturelle pour un client automobile ?
> Par ailleurs, les stimuli sont enregistrés à vitesse de fermeture constante (Roussarie et Bezat, soumis) ou à vitesse de fermeture proportionnelle à la vitesse de fermeture minimale pour correctement fermer la porte (Parizet, Guyader et Nosulenko, 2007) : sont-ils représentatifs des bruits de fermeture entendus dans une situation naturelle pour un client ?

Sur la caractérisation perceptive

Les études précédentes révèlent l'apport de la caractérisation perceptive pour étudier les relations entre jugements clients et signal acoustique. Mais les caractérisations perceptives ne semblent pas suffisantes pour caractériser le jugement client.

> Question 2 : Les composantes perceptives identifiées dans ces études décrivent le son de manière analytique, sans référence à l'évènement associé : sont-elles suffisantes pour caractériser la qualité sous-jacente ? Un son mal prédit par les modèles de qualité est en l'occurrence décrit comme ''une porte mal fermée'' dans des portraits verbaux établis par analyse des verbalisations (Parizet, Guyader et Nosulenko, 2007). Ne doit-on pas s'intéresser également à ce type de propriétés ?
> Par ailleurs, les composantes perceptives identifiées n'ont pas la même influence sur la qualité. Il est par exemple inutile de diminuer la hauteur d'un bruit de fermeture tant qu'il présente des vibrations : comment s'organisent les composantes perceptives pour inférer une impression de qualité ?

Sur le signal acoustique

Les études précédentes identifient des paramètres acoustiques qui prédisent le jugement clients. Mais ces paramètres acoustiques ne sont pas assez explicatifs pour être traduits en spécifications acoustiques.

> Question 3 : Les paramètres acoustiques identifiés dans les deux études prédisent la qualité de bruits de fermeture de porte, mais on ne sait pourtant pas comment agir efficacement sur ces paramètres pour améliorer le bruit. Par exemple, les niveaux de certaines bandes de fréquence sont identifiés dans les modèles de prédiction de la qualité, pourtant baisser le niveau de ces bandes de fréquences n'améliore pas nécessairement la qualité de tous les bruits de fermeture de porte. Tout comme les relations entre jugement clients et composantes perceptives, les relations entre paramètres acoustiques et jugement client semblent trop complexes pour être comprises à partir d'un modèle linéaire. De plus, on ne sait pas facilement traduire mécaniquement ces paramètres de niveaux par bandes de

fréquence. Les paramètres acoustiques sont pourtant destinés à spécifier les solutions techniques.

3. Problématique de la thèse

Les études antérieures proposent des paramètres acoustiques pour caractériser le jugement clients et des modifications techniques l'améliorer. De plus, la pertinence de la caractérisation perceptive comme intermédiaire entre jugement perceptif et signal acoustique est démontrée. Mais le problème des bruits de fermeture de porte n'est toujours pas résolu. On ne dispose toujours pas de spécifications ou de solutions techniques robustes pour ces bruits.

3.1 Positionnement du sujet de thèse

L'application industrielle de nos travaux de thèse porte principalement sur les attentes clients et sur leur traduction en spécifications techniques pour les bruits de fermeture de porte. Simultanément aux travaux de thèse, la traduction des spécifications techniques en solutions techniques fait l'objet d'un projet développé en interne chez PSA Peugeot Citroën, qui traite la problématique de l'acoustique physique par la caractérisation des transferts acoustiques.

3.2 Problématique fondamentale

Le problème des bruits de fermeture de porte renvoie à des problèmes de recherche fondamentale en abordant les questions de perception in situ (Question 1), de qualité (évocations en général) et plus généralement de propriétés perceptives (Question 2), ainsi que des questions liées à la modélisation du signal acoustique (Question 3). Notre étude propose de repositionner le problème du bruit de fermeture de porte dans le contexte fondamental de la perception des bruits d'impact (Figure 6). Ce type de bruit pose plus généralement les questions propres à l'étude du bruit de fermeture de porte : il s'agit de bruits de l'environnement liés à une action humaine, qui exigent des outils d'analyse signal spécifiques pour le traitement des signaux impulsionnels.

Nous devons examiner les travaux antérieurs sur les bruits d'impact pour proposer une démarche qui puisse traiter la perception de ces bruits en situation réelle, leur caractérisation par des propriétés perceptives, ainsi que leur modélisation par des critères signaux.

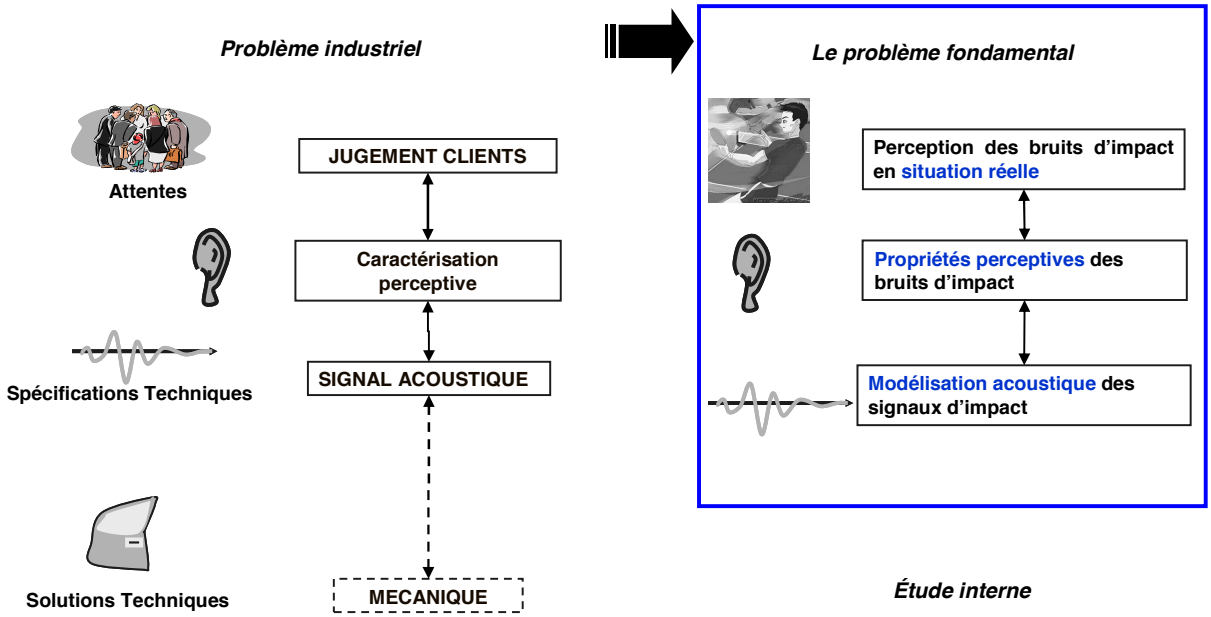


Figure 6 De la problématique industrielle à la problématique fondamentale.
Positionnement de la thèse

Chapitre II. Perception des bruits d'impact

Introduction

La perception des bruits d'impact est déclinée autour de trois questions fondamentales. Comment perçoit-on un bruit d'impact dans un environnement naturel ? Que perçoit-on à l'écoute de ce bruit d'impact isolé ? Comment caractériser le ressenti à partir du signal acoustique du bruit d'impact ?

Pour illustrer ces questions, prenons un exemple de bruit d'impact engendré par une balle de ping-pong. Trois descriptions potentielles de cet évènement sont proposées, elles se différentient par le point de vue choisi : celui de du joueur, celui de l'oreille, et celui du signal acoustique.

- Le joueur de tennis de table frappe sa balle en tournoi, un peu sous tension, sa raquette a vrillé, il entend le 'toc'' de la balle qui lui indique un coup raté, il pense à son match, il peut encore le gagner.
- L'oreille du joueur de tennis de table capte et code un signal acoustique pour transmettre au joueur l'information de la non réussite du coup, elle transmet le ''toc'' de la balle, un peu aigu pour un bruit de balle de ping-pong.
- Le micro capte un signal acoustique, des ondes de pression en fonction du temps. Ce signal est analysé, l'énergie dans les hautes fréquences est élevée, le bruit de la balle de ping-pong est plutôt aigu, d'autres calculs montrent que la balle a été frappée fort.

Notre problème consiste à établir des relations entre ces trois points de vue du bruit de balle de ping-pong : l'évènement, le son et le signal.

Si les processus de perception des bruits d'impact étaient parfaitement connus, on saurait reconstruire la représentation de l'environnement sonore à partir du signal acoustique. L'onde de pression est captée par le système auditif qui transmet au cortex un signal d'influx nerveux. Le contexte y induit un cadre interprétatif général, dans lequel le son prend son sens. Nous disposons bien de modèles du système auditif (De Cheveigné, 2006), de connaissances sur l'architecture fonctionnelle du cerveau (Edeline, 2006), et d'hypothèses sur les processus psychologiques mis en jeu dans l'audition (McAdams, 1994). Mais les processus perceptifs ne sont pas encore suffisamment bien compris pour espérer comprendre le sens induit par le bruit d'une balle de ping-pong dans son environnement naturel à partir d'un signal acoustique mesuré. Seules les modélisations du système auditif périphériques sont abordées dans notre étude.

Par une méthode descriptive, on cherche plutôt à successivement caractériser l'évènement général, puis le son, et enfin le signal acoustique :

- La caractérisation de l'évènement dans son contexte général permet la sélection d'une situation de vie particulière dans laquelle on peut isoler le son des facteurs environnementaux.
- Le son isolé est ensuite décomposé en grandes composantes perceptives.

- Enfin le signal acoustique est découpé en structures acoustiques caractéristiques des composantes perceptives principales.

On espère pouvoir lier ces différentes représentations du problème pour finalement être capable d'extraire du signal acoustique les informations perçues en situation.

L'approche écologique de la perception (Gibson, 1979) est pertinente pour notre problématique sur les bruits d'impact. Cette approche recentre l'environnement au sein même du système perceptif. De plus, elle insiste sur la nécessité de bien comprendre ce que l'auditeur perçoit avant de chercher à l'analyser. Enfin, le processus perceptif en psychologie écologique est supposé être une perception directe de l'évènement (le stimulus distal) par le signal acoustique (le stimulus proximal). L'approche écologique cherche en conséquences à isoler les structures acoustiques sous-jacentes au percept (les invariants). Sans prendre parti sur l'hypothèse de perception directe, notre finalité est bien d'isoler des structures acoustiques caractéristiques de ce qui est perçu.

Nous devons préciser la méthodologie à partir de l'examen des études antérieures sur les bruits d'impact. Suivant un plan gibsonien, nous abordons dans un premier temps la perception des bruits d'impact dans leur environnement naturel.

> *''First, the environment must be described, since what is to be perceived has to be stipulated before one can even talk about perceiving, […]" (Gibson, 1979, p. 2).*

Nous cherchons ensuite à caractériser la perception des bruits d'impact par des propriétés perceptives.

> *''Second, the information available for perception in an […] medium must be described. […]" (Gibson, 1979, p. 2).*

Enfin, nous tentons de modéliser les propriétés perceptives par des critères extraits des signaux d'impact.

> *''Third, the process of perception must be described. This is not the processing of sensory inputs, however, but the extracting of invariants from the stimulus flux'' (Gibson, 1979, p. 2).*

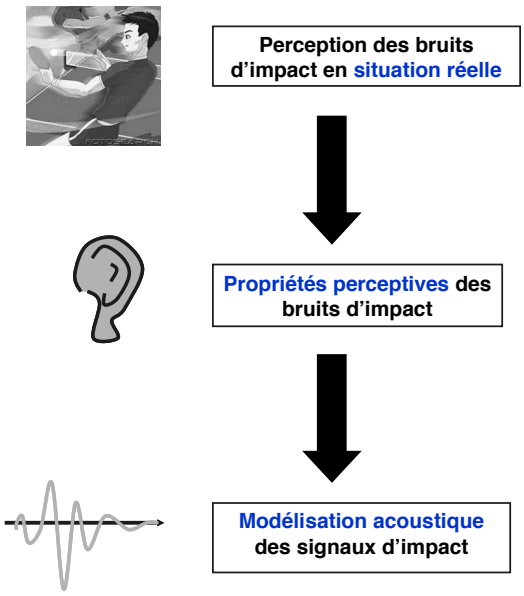


Figure 7 Plan de l'étude de la perception des bruits d'impacts

1. Perception des bruits d'impact en situation réelle

''Perceiving is a process in an animal-environment system, not in an animal'' (Mickaels et Carello, 1981 p.1).

1.1. Complémentarité de l'auditeur et de son environnement

La perception des bruits de l'environnement se produit de fait dans un environnement naturel. Du point de vue de l'approche écologique de la perception (Gibson, 1979), on ne peut étudier ces bruits sans considérer la complémentarité de l'auditeur et de son environnement. En effet, l'auditeur ne détecte que l'information utile qui lui permet d'agir de façon adaptée dans et sur son environnement. Ainsi, les actions, les informations relatives aux autres modalités (en fait tout l'environnement) orientent la perception auditive. Pour s'en convaincre, reprenons l'exemple trivial d'un bruit de balle de ping-pong. Ce bruit est tout à fait primordial pour le joueur de tennis de table, puisqu'il porte des informations sur le jeu, par exemple la force mise dans la raquette. En revanche, ce même bruit est perçu comme une nuisance sonore par le voisin qui se repose dans son jardin. Il est difficile de prévoir comment il serait perçu s'il était écouté au casque dans un laboratoire.
Dans cette logique, le courant de la perception située (Liénard) centre ses recherches sur l'idée que la perception se situe dans un contexte qui ne peut être négligé dans les expérimentations.

1.2. Caractérisation des bruits d'impact en situation réelle

1.2.1 Complémentarité des études In Situ/Laboratoire

L'expérimentation en situation naturelle est primordiale, mais elle n'est pour autant pas triviale. Elle implique des concessions faites au contrôle des stimuli, au protocole expérimental et à la quantité de données recueillies. De plus, l'écoute au laboratoire, allégée des autres facteurs sensoriels, est plus précise. Aussi pour aller de l'environnement naturel jusqu'à la modélisation du signal acoustique, l'expérimentation In Situ est indissociable d'une caractérisation fine du bruit au laboratoire. Les expérimentations en situation réelle et au laboratoire sont donc complémentaires. Mais leur complémentarité n'est effective que si les liens entre les résultats obtenus In Situ et au laboratoire sont connus.

Pour lier perception In Situ et perception au Laboratoire, on commence par comparer les résultats expérimentaux relevés en situation réelle et au laboratoire. S'ils sont équivalents, les résultats de l'expérimentation au laboratoire sont ''écologiquement valides''. Mais il est souvent difficile de configurer le laboratoire pour le rendre écologiquement valide. On cherche alors à évaluer l'influence

de certains facteurs environnementaux sur la perception du bruit de façon à pondérer les résultats obtenus au laboratoire par ces facteurs environnementaux.

1.2.2. Validité écologique

Guastavino et al. (2005) proposent une méthodologie basée sur une exploration linguistique de données verbales pour étudier la validité écologique de systèmes de reproduction sonore. Des sujets sont chargés de décrire l'environnement sonore qui les entoure dans trois configurations : en environnement réel, au laboratoire avec reproduction stéréophonique, et au laboratoire avec reproduction ambisonique. Les descriptions des sources sont comparables entre les trois configurations. En revanche, le fond sonore reproduit avec le système stéréophonique est décrit différemment de la reproduction ambisonique et de la situation naturelle. En effet, dans le cas de l'écoute stéréophonique, il est plutôt décrit de manière analytique sans référence à ce que ressentent les sujets, de plus il est souvent associé au système de reproduction plutôt qu'à l'environnement urbain. La reproduction ambisonique pour laquelle l'immersion spatiale est meilleure, est ici écologiquement validée par l'auteur, à partir d'analyses linguistiques.

Parizet, Langlois et Richard (2007) étudient un autre type de restitution sonore : celui du bruit intérieur véhicule, enregistré avec une tête acoustique. Il est restitué au laboratoire dans deux configurations : au casque seul et au casque associé à un caisson basses fréquences qui corrige la mauvaise restitution des fréquences inférieures à 50 Hz au casque. Ces deux systèmes de restitution sont comparés à la situation en véhicule. Les évaluations sont réalisées dans chacune des situations par un test de dissemblance. Le test de dissemblance permet ici de mesurer les différences d'évaluations du son au laboratoire et en véhicule sans que ce protocole ne prétende refléter une situation naturelle de conduite. La configuration de laboratoire avec le caisson de basse se révèle plus proche de la situation réelle. Mais il est observé que des modifications du contenu basse fréquence des sons sont perçues dans cette configuration, sans qu'elles le soient dans la configuration véhicule. Ces différences perceptives sont dues au contexte multimodal de la situation réelle. L'étude révèle ainsi l'influence de facteurs environnementaux sur la perception du bruit.

2.1.3. Influence de facteurs environnementaux

Autres modalités sensorielles

Les autres modalités sensorielles interagissent avec la modalité auditive, elles peuvent donc avoir un effet sur la perception des bruits.

Abe et al. (2006) étudient l'influence de la modalité visuelle sur la perception des bruits de l'environnement. Il compare l'évaluation de bruits lorsqu'ils sont écoutés seuls, lorsqu'ils sont associés à des informations verbales sur la source (ex : ''aspirateur'', ''pas'', ''fontaine'', ''marteau''…), et lorsqu'ils sont présentés avec les vidéos des évènements associés. Les vidéos, contrairement aux informations verbales, contiennent des informations sur le mouvement des sources et sur leur aspect. Les bruits sont évalués dans les trois configurations par différentiel sémantique sur trois groupes d'items : les items liés au son (ex : hauteur, niveau), les items liés aux émotions (ex : tranquillité, éveil), les items liés à l'identification (ex : facilité à imaginer la scène, familiarité, direction de la source). 7 facteurs principaux obtenus par analyse factorielle résument l'information contenue dans les 38 items. Les effets des informations verbales et visuelles sont différents pour 6 des 7 facteurs

principaux (analyse de variance). L'influence de la modalité visuelle sur les bruits de l'environnement est donc bien observée, toutefois elle n'est pas expliquée de façon systématique.
Viollon, Lavandier et Drake (2002) étudient l'influence de la modalité visuelle sur l'évaluation de bruits d'environnements urbains. Les bruits sont évalués sur leur caractère agréable et stressant, en présence de photos d'environnements plus ou moins urbanisés. Le bruit est d'autant moins apprécié qu'il est associé à un environnement plus urbain. Cet effet dépend du type de bruit étudié, en particulier si le bruit contient des bruits humains (bruits de pas, voix), l'effet n'est plus observé.

Amari, Parizet et Roussarie (2007) étudient l'influence de la modalité visuelle sur l'évaluation du confort vibro-acoustique en véhicule. A l'aide d'un banc vibratoire, de haut-parleurs et d'un caisson de basse fréquence, le signal vibro-acoustique est restitué au laboratoire (vibrations verticales). Les sujets doivent évaluer le confort global dans cette situation, ainsi que dans une situation améliorée d'un écran dans laquelle le stimulus visuel est reproduit. Le confort est surévalué avec l'écran et la discrimination entre les véhicules est meilleure. Même si l'influence est faible, cette étude montre une influence de la modalité visuelle sur l'évaluation de stimuli de l'environnement.

L'action, peu étudiée, est également un facteur potentiellement impactant pour la perception des bruits d'impact générés par une action humaine. Elle génère des attentes sur le bruit, qui en retour informe sur les conséquences de l'action générée.

Facteurs contextuels
L'image de la source, les attentes des auditeurs, sont autant de facteurs contextuels qui peuvent avoir une influence sur la perception des bruits.

Vastfjall (2004) cherche à modéliser les effets de certains facteurs sur l'évaluation de la qualité que renvoient des sons d'avions et d'aspirateur. Il réalise une série d'expérimentations pour observer l'influence des attentes et de l'humeur de l'auditeur sur l'évaluation des préférences et de la gêne. L'humeur et les attentes des sujets sont modifiées juste avant les évaluations des sons, grâce à différentes stratégies : présentation d'items à connotations positives ou négatives, rappel d'expériences personnelles, présentation de rapports de consommateurs sur les objets à évaluer (avion/aspirateur). Ces facteurs influent sur les évaluations des sons. Mais les résultats obtenus ne permettent pas de proposer de conclusion générale sur l'intégration de ces facteurs dans les jugements de préférence ou de gêne des sons. Aussi, chaque effet potentiel doit être observé à l'aide d'expérimentations propres à un type de bruit.

Ellermeier et Legarth (2006) cherchent à quantifier l'influence de l'image du véhicule sur l'évaluation du bruit moteur, en partant de l'image de puissance du véhicule. Il compare les évaluations de puissance de bruits moteurs écoutés seuls ou associés à des véhicules par l'intermédiaire de photographies. Les véhicules proposés sur les photographies évoquent plus ou moins de puissance, celle-ci étant mesurée expérimentalement. Les véhicules puissants induisent un biais positif sur l'évaluation des bruits, au contraire les véhicules peu puissants induisent un biais négatif. L'influence de l'image de puissance du véhicule sur l'évaluation du son est quantifiée par l'examen des proportions de variances expliquées par le véhicule et par le son dans l'évaluation des associations sons – véhicules : elle est d'environ 20%. Mais l'influence du véhicule observée dans cette étude n'est pas nécessairement représentative de l'influence réelle. Les photos de véhicules ne sont en effet peut être pas suffisante pour reproduire l'effet produit par des véhicules réels.

Les effets observés doivent être pondérés par le facteur sujet. En effet différents sujets peuvent avoir des attentes différentes. Lageat (2004) s'intéresse au bruit du briquet qui s'allume, en particulier à l'évocation de luxe inférée par un tel bruit. Il identifie deux groupes de sujets. Sans être caractérisé par des facteurs socio-culturels, le premier groupe associe le luxe aux sons mats, au contraire le second groupe associe les briquets luxueux aux sons clairs, résonants et claquants !

D'autres facteurs, comme les facteurs temporels, le réalisme de l'immersion, le niveau sonore reproduit dans l'environnement très silencieux du laboratoire, le contexte induit par le protocole, etc, sont encore autant de facteurs potentiellement influents sur la perception des bruits.

1.3. Compromis écologie/contrôle

Les études citées observent des effets de facteurs environnementaux spécifiques à certains bruits, sans nécessairement les quantifier. De plus, même quand elles se placent dans un environnement réel, elles ne reflètent pas la situation naturelle d'écoute de bruits de l'environnement, qui n'est jamais associée à un protocole d'évaluations ! Décrire le bruit qui nous entoure n'est pas naturel quand on se ballade en ville, encore moins évaluer les dissemblances entre bruits moteurs quand on roule.
L'introduction de facteurs environnementaux au laboratoire pose des problèmes écologiques, tandis que l'étude des facteurs environnementaux en situation écologique pose des problèmes de modélisation. Les expérimentations doivent être situées au sein du compromis entre recherche d'écologie et contrôle expérimental.

Plusieurs types d'expérimentations sont donc nécessaires pour caractériser la perception des bruits en environnement réel. Les études qualitatives s'approchent de la situation naturelle : les sujets sont invités à réagir naturellement face à un objet sans se focaliser sur son bruit. Ces études génèrent des observations qualitatives utiles autant pour la préparation des études au laboratoire (ex : choix des situations de vie), que pour leurs résultats propres (description du ressenti lié au bruit dans une situation la plus naturelle possible, observation d'effets de facteurs environnementaux). On peut alors les associer à des études spécifiques, quantitatives, pour caractériser les différences entre perception In Situ et perception au laboratoire. Mais quantifier l'influence des effets de facteurs environnementaux pose des questions méthodologiques. Dans quelle mesure peut-on reproduire par exemple les effets de l'image de l'objet industriel au laboratoire ? Les photos des véhicules sont-elles suffisantes pour reproduire l'effet de l'image du véhicule ? Les facteurs environnementaux doivent être observés pas à pas de la situation la plus écologique à la situation de laboratoire (où seul le son est écouté).

Conclusion

L'expérimentation en situation réelle, comme s'en approche l'étude qualitative, est indispensable quand on étudie la perception d'un bruit de l'environnement. Elle permet d'observer les usages et le ressenti et de mettre en évidence les facteurs environnementaux influents, comme les autres modalités et les attentes, par profils de sujets.
Mais pour permettre de générer des données quantitatives, elle est complétée par une caractérisation spécifique du bruit au laboratoire. Les études au laboratoire permettent de décomposer chirurgicalement le bruit en fines composantes perceptives, en vue de son analyse. La caractérisation des différences d'évaluation des bruits en situation naturelle et au laboratoire est alors nécessaire pour relier les résultats obtenus en laboratoire à la situation réelle. Elle est envisagée comme un ensemble d'expérimentations qui évaluent pas à pas l'influence spécifique de facteurs environnementaux. Ces expérimentations doivent gérer au mieux le compromis écologie/contrôle pour être capable de remonter jusqu'à la situation écologique, et de tenter de quantifier autant que possible les effets de facteurs environnementaux sur un grand nombre de stimuli bien contrôlés. La caractérisation précise du bruit au laboratoire peut ainsi être pondérée a posteriori par les facteurs environnementaux.

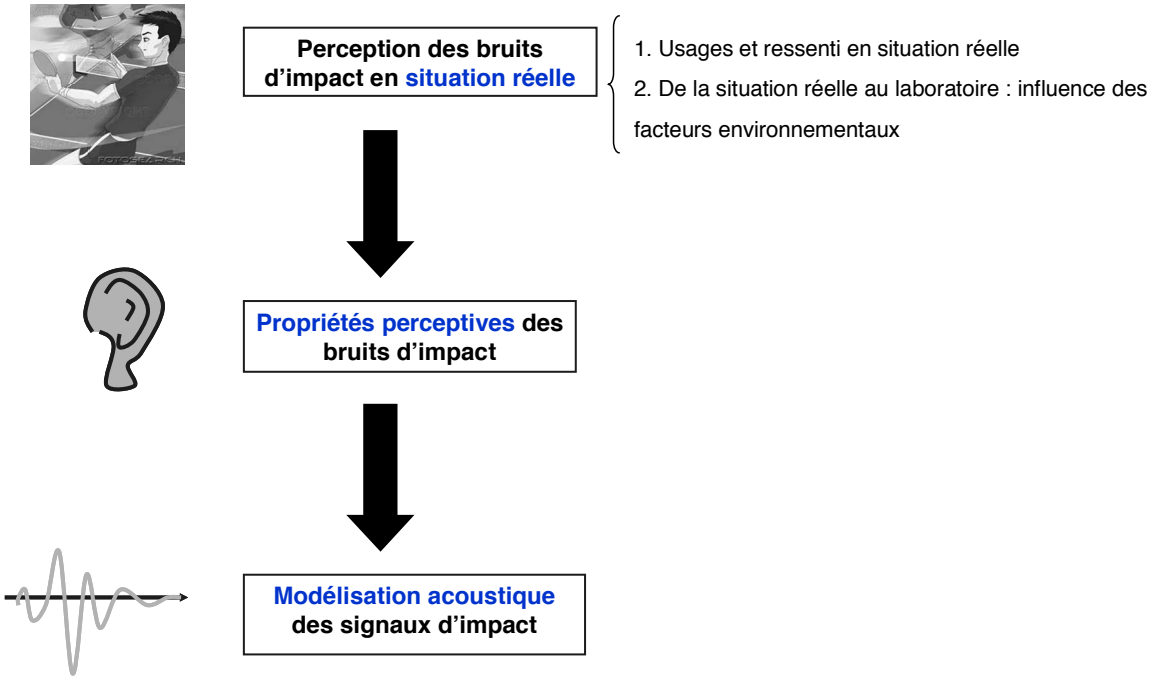


Figure 8 Démarche : perception des bruits d'impact en situation réelle

2. Propriétés perceptives des bruits d'impact

''Having described the environment, I shall now describe the information available to observers for perceiving the environment. Only then will be prepared to consider how they perceive…'' (Gibson, 1979, p.47).

2.1 Différentes écoutes et différents types de propriétés perceptives

2.1.1 Ecoute analytique vs écoute écologique

Gaver (1993) distingue l'écoute analytique (''musical listening'') de l'écoute écologique (''everyday listening'') : ''Everyday listening is the experience of hearing events in the world rather than sounds per se''. Il suggère avec l'écoute écologique que le son contient l'information sur l'évènement, le lieu, et l'environnement et propose un nouveau cadre pour décrire les sons par des attributs relatifs aux sources en se basant sur l'approche écologique. De ces écoutes découlent différentes propriétés perceptives pour décrire le bruit d'impact. Nous illustrons ces différentes propriétés perceptives avec l'exemple du bruit de la balle de ping-pong.

A l'écoute des sonates et interludes de John Cage, pièces pour un piano préparé dans lequel sont logées des balles de ping-pong, l'auditeur entend un ensemble de sensations liées aux rythmes et hauteurs de la séquence sonore. Il entend des propriétés analytiques, relatives au signal sonore.
Face à un match de tennis de table, l'auditeur entend naturellement, par écoute écologique, le bruit de balle de ping-pong qui rebondit sur une table et des raquettes. En plus d'identifier la source, l'auditeur peut entendre des informations sur le matériau de la table, sur la vitesse de la balle ou sur la réussite du coup. L'écoute écologique est la plus naturelle pour écouter un bruit de l'environnement, mais l'auditeur peut éventuellement se concentrer sur une écoute analytique de la même séquence sonore. Il entendra alors un concert de ''plic'' et ''ploc'' plus ou moins forts, plus ou moins aigus etc.

2.1.2 Propriétés analytiques

Les propriétés analytiques décrivent les bruits pour eux-mêmes, sans faire référence à l'évènement originel.

La hauteur, l'intensité, la rugosité, l'harmonicité, la durée, la netteté de l'attaque, etc, sont autant de ***propriétés analytiques*** du son. Il s'agit de l'ensemble des descriptions potentielles du son qui ne font aucunement référence à l'évènement associé. Ces descriptions sont relatives au type de bruits étudié tant dans le choix des descripteurs que dans leurs échelles.

2.1.3 Propriétés naturelles et évocations

Les propriétés naturelles et les évocations renvoient à l'évènement associé au son. Elles sont naturellement perçues par l'auditeur, par écoute écologique.

Propriétés naturelles

Dans le cas d'une source simple, l'auditeur peut percevoir par écoute écologique les propriétés physiques de la source, comme la taille et le matériau. Le bruit d'une balle de ping-pong peut par exemple indiquer si la balle rebondit sur une table en béton ou en granit. Les recherches en psychomécanique caractérisent des bruits d'impact en se basant justement sur les propriétés physiques des sources (Roussarie, 1999, McAdams, Chaigne et Roussarie 2004, Giordano, 2005). Lakatos, McAdams et Caussé (1997) étudient les bruits d'impact de barres en métal de différentes dimensions. Ces bruits sont correctement appariés à des représentations visuelles de la géométrie de la source et se différentient perceptivement selon un paramètre physique : le rapport de la longueur sur la largeur. Roussarie (1999) étudie les bruits d'impact de plaques de différents matériaux à partir de sons de synthèse proposant un morphing sonore du verre à l'aluminium. Les auditeurs doivent catégoriser ces sons selon le matériau perçu : les sons +/- verre sont séparés des sons +/- aluminium. L'expérience montre que les auditeurs cherchent naturellement à ranger les sons dans chaque catégorie de matériau. La reconnaissance des propriétés physiques n'est pour autant pas systématique. Elle est dépendante de l'environnement naturel de l'auditeur : Giordano et McAdams (2006) montrent que les auditeurs reconnaissent des plaques de matériaux très différents (acier-verre vs bois-plexiglas) même lorsqu'elles sont de tailles différentes, mais se trompent pour identifier des matériaux plus proches : les matériaux acier et verre sont confondus. Les auditeurs classent des plaques d'acier de petite taille dans la catégorie verre. Ils croient écouter le matériau alors qu'ils écoutent la taille des objets. L'auteur interprète ces résultats par les régularités de l'environnement acoustique : le bruit de verre est souvent entendu à travers le bruit d'un verre, qui se trouve être de petite taille… L'identification de sources physiques dépend également de la complexité des stimuli et de l'expertise de l'auditeur : un mécanicien peut repérer un problème mécanique à partir du bruit d'un moteur, de même qu'un médecin peut détecter un bruit inhabituel dans les battements du cœur d'un patient (exemples cités par McAdams, 1994). La perception des propriétés naturelles est dans tous ces cas dépendante des besoins de l'auditeur pour appréhender son environnement (et y survivre).
Dans le cas d'une source plus complexe, l'auditeur perçoit des propriétés liées à l'évènement global. Par exemple, Warren et Verbrugge (1984) démontrent que le son suffit à faire reconnaître à des auditeurs un verre qui se brise ou qui rebondit. Les auditeurs sont également capables de se reconnaître applaudir à l'écoute d'une série de 20 applaudissements ; ils reconnaissent également la position des mains de séries d'applaudissements réalisés par une même personne (Repp, 1987). Ces exemples illustrent la capacité naturelle des auditeurs à facilement percevoir, à partir de bruits, les propriétés informant sur les évènements complexes associés.

L'auditeur perçoit également des informations sur l'action liée au bruit d'impact. Par exemple, le bruit d'une balle de ping-pong porte également des informations sur le geste effectué par le joueur. N'a-t-on jamais ressenti le plaisir du beau geste à l'écoute du puissant bruit d'impact de la balle sur la raquette lors d'un smatch réussi ; ou le son désagréable de la balle après un smatch raté. Lorsque la source est excitée par une action humaine, la perception se situe également dans la perception du geste effectué pour émettre le son. Ainsi, selon la Théorie Motrice de la Parole Parlée (Liberman et Mattlingly, 1950, cité par Bailblé, 2004), la perception de la parole ne doit pas être recherchée

seulement dans la ''surface acoustique'' des mots, mais aussi dans le geste articulatoire impliqué dans leur production. Cette théorie est soutenue par la découverte du concept du neurone miroir (Rizzollati, Fogassi et Gallese, 2001) : regarder quelqu'un faire des mouvements active des zones impliquées dans l'exécution de chacun de ses mouvements. Cette découverte a ensuite été généralisée au domaine sonore : les neurones miroirs codent les actions qu'elles soient réalisées, vues ou entendues (Kohler et al., 2002, Pizzamiglio et al., 2005).

Evocations

En plus des propriétés naturelles caractéristiques de la source (ex : table en granit) et de l'action (ex : smatch), le bruit de la balle de ping-pong peut éventuellement évoquer la qualité ou l'état de la raquette. La source identifiée est alors un objet industriel qui peut être de plus ou moins bonne qualité, et les sons émis par cet objet en sont des indicateurs. Blauert et Jekosch (1997) définissent la qualité perçue comme ''adéquation du son associée au produit : la qualité fait référence à l'ensemble des traits attendus du produit, qui sont apparents au sujet, en fonction du contexte cognitif, de l'action associée, du contexte émotionnel''. Ces auteurs illustrent leurs propos en nous rappelant que ''a good coffee machine should certainly not sound like a good electric razor''... Retenons ici qu'un bruit peut de manière générale évoquer des impressions. Les évocations ressenties dépendent du contexte, nous avons vu en introduction que le bruit d'une balle de ping-pong peut être ressenti comme une gêne (par le voisin) ou comme un plaisir (par le joueur).

En plus de propriétés analytiques telles que la hauteur, le bruit d'impact, comme celui de la balle de ping-pong, renvoie à des ***propriétés naturelles*** caractéristiques de la source (ex : table en granit) et de l'action (ex : smatch) et à des ***évocations*** (ex : qualité de la raquette).

2.1.4 Caractérisation perceptive complète : écoutes analytique et écologique

Etant donné notre intérêt pour les bruits de l'environnement, il pourrait être tentant de ne s'intéresser qu'à l'écoute écologique. Pourtant, la double description analytique/écologique des bruits de l'environnement est primordiale. Le concept de multicatégorisation perceptive introduit par Liénard (2002) étend la notion de catégorisation perceptive en proposant une double description des sons :

- une description bas-niveau : description sensorielle qui relève de l'écoute analytique,
- une description haut-niveau : description des fonctions et propriétés cognitives qui relève de l'écoute écologique.

Les sons catégorisés à partir des propriétés haut-niveaux (ex : ''balle brisée'') peuvent présenter des caractéristiques différentes sur les propriétés bas-niveaux (ex : bruit particulièrement aigu, ou contenant plusieurs chocs,…). Même si les propriétés bas-niveaux ne sont pas spécifiquement écoutées par les auditeurs en situation naturelle, qui pratiquent plutôt une écoute écologique, elles contiennent bien de l'information perceptive qui peut en particulier être utile pour la modélisation acoustique. La description acoustique de la balle de ping-pong brisée doit par exemple s'attacher à détecter un contenu haute fréquence énergétique, ou de multiples transitoires.

Ainsi, la caractérisation perceptive des bruits d'impact est d'autant mieux comprise que l'on considère l'ensemble des propriétés perceptives :

- **propriétés analytiques** liées au son, par écoute analytique,
- **propriétés naturelles** liées à l'évènement (source et action), par écoute écologique,
- **évocations** (qualité, adéquation son/objet…,), par écoute écologique.

Chaque type de propriétés est recueilli par des expérimentations spécifiques. Le choix des protocoles et des auditeurs est adapté aux propriétés recherchées.

2.2. Caractérisation des propriétés perceptives

Nous présentons les méthodologies proposées dans la littérature pour évaluer les propriétés analytiques, les propriétés naturelles, et les évocations inférées à l'écoute de bruits d'impact. Ces évaluations sont réalisées dans le cadre d'expérimentations sur des sons mesurés et restitués au laboratoire.

2.2.1. Choix des sons

Pour que les résultats obtenus soient généralisables sur la classe de bruits étudiée, les sons mesurés doivent, d'une part, être mesurés dans des conditions naturelles et correctement restitués par un système adapté, d'autre part, être représentatifs de l'ensemble des bruits de la classe étudiée. Comme les expérimentations ne peuvent supporter un nombre trop important de sons, une tâche de catégorisation (tri libre) sur un large corpus de sons est souvent réalisé en amont de l'étude. Il permet de sélectionner un petit nombre de sons représentatifs de chaque groupe de sons formés, et donc représentatif de la diversité des sons étudiés (Susini et al., 2004, sur les bruits de climatisation, Parizet, Guyader et Nosulenko, 2007 sur les bruits de fermeture de porte). Les groupes de sons ainsi constitués peuvent être caractérisés par différentes propriétés perceptives.

2.2.2. Propriétés analytiques

Différentiel sémantique

Les propriétés analytiques décrivent le son en lui-même, plutôt que l'évènement ou la source associé. Des propriétés bien connues comme la hauteur et l'intensité peuvent être directement proposées pour caractériser analytiquement des groupes de sons. Bjork (1983) propose de caractériser un ensemble de bruits de l'environnement par différentiel sémantique (0sgood, 1952, cité par Bjork). 15 bruits de l'environnement (bruits d'oiseaux, d'alarme incendie, de vent dans les arbres etc) sont évalués sur 24 échelles bornées par des items de type analytique (ex : fast/slow ; loud/soft ; rough/smooth ; low/high) et de type émotionnel (ex : powerful/weak ; tense/relaxed ; mellow/harsh). 5 facteurs principaux obtenus par analyse factorielle résument l'ensemble des échelles sémantiques et sont corrélés à des items analytiques : la rugosité, la hauteur, le niveau, la simplicité et la rapidité.

Les propriétés analytiques de divers bruits de l'environnement (Bjork, 1983), de bruits de fermeture de porte (Kuwano et al., 2002), ou de bruits moteur (Sköld, Väsffjäll et Kleiner, 2005) sont caractérisées par différentiel sémantique. Mais il est possible que certaines propriétés analytiques majeures pour ces bruits ne soient pas représentées par les items des échelles sémantiques, puisque ceux-ci sont proposés a priori.

Dissemblance

La méthode non-verbale des dissemblances, utilisée pour l'étude des timbres (Grey, 1977, cité par McAdams, 1994) est prisée car elle n'émet justement pas d'hypothèse sur les propriétés analytiques. Elle consiste en l'évaluation des dissemblances de paires de sons. L'analyse multidimensionnelle des évaluations de dissemblance met en évidence un espace perceptif représentant les distances perceptives entre les sons. Les dimensions de cet espace perceptif sont les propriétés analytiques

implicites propres au type de sons étudiés. Elles sont associées à des descriptions sémantiques a posteriori, lorsqu'elles sont reconnues par les auteurs, ou directement corrélées à des paramètres acoustiques.
Susini et al. (2004) mettent en évidence un espace perceptif de sons de climatiseurs formé de 3 dimensions principales. Ces dimensions perceptives sont caractérisées par des paramètres acoustiques liés à l'harmonicité, à la hauteur et à l'intensité des sons. La méthode des dissemblances est sans a priori sur le nombre et l'identité des propriétés perceptives, contrairement aux échelles sémantiques. En revanche cette méthode n'identifie qu'un petit nombre de propriétés supposées continues et orthogonales. De plus, les auteurs n'arrivent parfois pas à interpréter perceptivement les dimensions. Parizet et al. (2007) identifient deux dimensions pour caractériser les bruits de fermeture de porte : la hauteur et la présence d'impact multiples. Mais il n'arrive pas à identifier la troisième dimension perceptive de son espace. Enfin, la méthode des dissemblances n'assure pas que les distances entre les bruits soient évaluées d'après écoute analytique, certaines dimensions obtenues peuvent donc être de nature écologique. Par exemple, si on introduit quelques bruits de porte mal fermées dans un corpus de bruits de fermeture de porte, il est probable qu'une des dimensions tirée d'un test de dissemblance caractérise ces bruits de ''porte mal fermée'', même s'ils sont analytiquement très différents (bruit avec des chocs serrure très espacés, un bruit violent suivi d'un rebond d'ouverture…).

Analyse sensorielle

La méthode de l'analyse sensorielle est une méthode descriptive qui présente l'avantage d'identifier des dimensions perceptives bien définies, sans a priori sur leur nature catégorielle ou continue. De plus, elle autorise l'évaluation d'un grand nombre de sons, limité dans le cas des dissemblances par les présentations par paires de stimuli qui démultiplie le nombre d'évaluations. Enfin, elle procède par essence par écoute analytique.
La méthode de l'analyse sensorielle a été introduite par l'industrie agro-alimentaire et reste encore rarement utilisée en psychoacoustique (Roussarie, Richard et Bezat, 2004, Lageat, 2004, Poirson 2005, Petiot et Caussé, 2007). Elle consiste à identifier les descripteurs sensoriels qui caractérisent un ensemble de sons et à évaluer les sons sur chaque descripteur sensoriel. Les descripteurs sensoriels ne font pas référence à l'évènement associé, il s'agit bien d'une description analytique. Un panel constitué de personnes non spécialistes est entraîné. Les premières séances de travail consistent à générer des mots pour qualifier les sons puis à conserver par consensus un nombre minimal de descripteurs, chacun étant associé à une définition rigoureuse. Les séances suivantes permettent au panel de s'entraîner à classer les sons en fonction des descripteurs choisis. Enfin, les dernières séances sont prévues pour évaluer les sons sur chaque descripteur. Le validité des évaluations est vérifiée a posteriori à l'aide de trois critères de performance : la discriminabilité des sons, la répétabilité des panélistes et le consensus entre les panélistes. Une fois entraîné, le panel constitue un véritable instrument de mesure objectif des propriétés analytiques d'un groupe de bruits.
Une étude par analyse sensorielle sur les bruits de fermeture de porte a déjà été réalisée par Roussarie et Bezat (à soumettre). Des propriétés analytiques propres aux bruits de fermeture de porte ont été identifiées : la hauteur ; l'intensité ; l'onomatopée ''bonm'' ; la présence de vibrations.

Les onomatopées sont souvent relevées en analyse sensorielle. Le bruit moteur est par exemple décrit en terme de ''ON''/''AN'' (Roussarie, Richard et Bezat 2004). Elles ouvrent une voie d'étude pour la caractérisation analytique des bruits. Par exemple, les analogies entre les sons de guitare et

les sons vocaux sont fructueusement utilisées pour la synthèse de sons de guitare par imitation vocale (Traube et Depalle, 2004, Traube et D'Alessandro, 2005).

2.2.3. Propriétés naturelles

Les bruits d'impact portent également de l'information sur l'évènement ; cette information est caractérisée par les propriétés naturelles.

Evaluations directes sur échelles catégorielles ou continues

Dans le cas d'un impact simple, l'auditeur perçoit des propriétés naturelles liées aux propriétés physiques de l'objet impacté, comme sa géométrie (Lakatos, McAdams et Caussé, 1997, Tucker et Brown, 2002), son matériau (Klazky, Giordano, 2006, Tucker et Brown, 2002), ou sa dureté (Giordano, 2003), et des propriétés physiques de l'objet impactant, comme sa dureté (Giordano et Petrini, 2003, Freed, 1990).

Tucker et Brown (2002) s'interrogent sur la perception de géométrie et du matériau d'objets impactés. Pour étudier la perception de forme et de matériau, ils enregistrent des bruits d'impact de plaques circulaires, triangulaires et carrées de différents matériaux : métal, bois, plastique. Ces bruits d'impact sont écoutés par des sujets chargés de les classer parmi les catégories : circulaire, triangulaire, carré, et les catégories : métal, bois, plastique (catégorisation à choix forcé). Pour étudier la perception de la taille, les auteurs enregistrent des bruits d'impact de plaques carrées de différents matériaux (métal, bois, plastique) et de trois tailles différentes (de côté 25cm, 50cm, 100cm). Les sujets sont chargés d'évaluer la taille relative de paires de bruits d'impact sur une échelle continue. Pour plus de facilité, une représentation visuelle des tailles des deux objets est indexée au curseur de l'échelle continue. Les auditeurs identifient les objets métalliques, tandis que les objets en plastique et en bois sont souvent confondus. Ce résultat est cohérent avec les travaux de Giordano et McAdams (2006) qui mettent en évidence une bonne reconnaissance de matériaux de différentes macro-catégories acier-verre vs bois-plexiglas, et des erreurs pour des matériaux plus proches comme le bois et le plexiglas. Les auditeurs sous-estiment globalement les rapports de taille entre plaques, tout en respectant l'ordre de ces rapports. En revanche, les formes ne sont pas reconnues, excepté les cercles métalliques. Cette propriété de forme est moins sollicitée dans la nature que les propriétés de matériau et de taille ; la capacité à reconnaître des propriétés physiques des sources à partir de bruits d'impact est dépendante également de l'environnement naturel de l'auditeur.

Freed (1990) s'intéresse à la perception spécifique de la dureté du maillet qui impacte une casserole. En émettant l'hypothèse que cette propriété est unidimensionnelle, il propose un protocole par évaluation directe plutôt qu'un test de dissemblances qui génère des propriétés non identifiées. Les bruits d'impact de 6 maillets de différents matériaux sur 4 casseroles de dimensions différentes sont enregistrés. Les stimuli sont évalués 4 fois par 9 sujets sur une échelle de dureté. Les résultats présentent un classement intuitif des maillets, sans influence systématique du type de casserole (lié à la hauteur). La propriété de dureté de l'excitateur est donc bien isolée dans ces bruits d'impact. Les auditeurs ont extraits l'information utile des signaux complexes.

Dans le cas d'impacts multiples, l'auditeur perçoit des propriétés naturelles plus complexes sur l'évènement global. Warren et Verbrugge (1984) s'intéressent aux objets qui rebondissent et qui se brisent. Les évènements de rebondissement vs brisure sont parfaitement identifiés par des auditeurs. Une expérimentation de catégorisation forcée (l'objet a rebondit ? - a éclaté ? - Ne sais pas) sur des bruits enregistrés à partir de 3 objets en verre montre une performance quasi parfaite.

Les auditeurs sont également capables de se reconnaître applaudir à l'écoute d'une série de 20 applaudissements (catégorisation à choix forcé parmi les 20 participants aux enregistrements) ; ils reconnaissent également la position des mains de séries d'applaudissements réalisés par une même personne (catégorisation à choix forcé parmi 3 configurations illustrées par des photos) (Repp, 1987).
Un dernier exemple d'impacts multiples concerne la reconnaissance par les auditeurs du genre d'une personne qui marche à partir de ses bruits de pas (catégorisation à choix forcé : homme/femme sur 16 séquences de 8 bruits de pas enregistrés avec 8 hommes et 8 femmes) (Li, Logan et Pastore, 1991).
Ces exemples illustrent la capacité des auditeurs à facilement percevoir, à partir de bruits complexes, les propriétés sur les sources associées.

Pour les caractériser, ces études proposent des propriétés a priori et qui sont validées ou non a posteriori par des évaluations directes sur échelle continue pour les propriétés continues, par catégorisation à choix forcé pour les propriétés catégorielles. Mais on peut aussi étudier la perception de propriétés écologiques sans hypothèse sur l'identité des propriétés. Les tâches de verbalisation, de dissemblance et de tri libre sont alors utilisées.

Verbalisations

Giordano et Petrini (2003) s'interrogent sur la perception de variations physiques des résonateurs et des excitateurs dans les bruits d'impact. 16 bruits d'impact sont générés par synthèse ; les paramètres de synthèse sont liés à la géométrie du résonateur, au matériau du résonateur, et à l'interaction résonateur/excitateur. Des séries de 4 bruits d'impacts modifiés sur le résonateur ou sur l'excitateur sont décrites par des sujets. Les verbalisations sont principalement des propriétés naturelles (vs analytiques), surtout pour décrire les variations du résonateur ; les variations de l'excitateur sont plus difficilement verbalisables. De plus, les descriptions des impacts modifiés sur l'excitateur renvoient à un même résonateur, tandis que les descriptions des impacts modifiés sur le résonateur font bien référence à un ensemble de résonateurs différents. Dans tous les cas, le résonateur est principalement décrit.

Dissemblances et tri libre

McAdams, Chaigne et Roussarie (2004) proposent un test de ***dissemblances*** sur un ensemble de bruits d'impact synthétisés par modèle physique et différentiés sur des propriétés liées à la géométrie et au matériau des barres. Les dimensions perceptives de l'espace perceptif établi sont bien écologiques, elles sont corrélées aux paramètres mécaniques de la source.
Houix, McAdams et Caussé (1999) propose une tâche de ***catégorisation*** (tri libre) sur un ensemble de bruits d'impact de barres d'acier. Les sujets sont chargés de grouper les bruits qui se ressemblent, sans a priori sur le nombre de groupes. Les barres d'acier sont +/- hautes et larges, et sont impactées à différents endroits. Les bruits d'impact ne sont pas groupés suivant les formes des barres, mais suivant la hauteur des bruits ; les auditeurs ont donc procédé par écoute analytique. La difficulté à regrouper les bruits sur des catégories écologiques claires a probablement conduit les sujets à privilégier les propriétés analytiques pour former leurs groupes de sons.

La tâche de catégorisation s'inspire du processus naturel de catégorisation perceptive décrit par Rosh (1978), pour justement décrire écologiquement un ensemble de bruits. Cette tâche propose une description plus écologique des bruits que le test de dissemblance. Mais elle est non-métrique et ne fournit donc pas de distances quantifiées entre les stimuli. Parizet et Koehl (2006) compare les espaces perceptifs déduits de tests de dissemblance et de catégorisation pour 2 groupes de bruits :

des bruits de fermeture de porte et des bruits d'impacts de plaques présentant de légères variations de paramètres physiques. Les bruits de plaques sont décrits par deux espaces tout à fait comparables. En revanche, les bruits de porte sont décrits par deux espaces différents : les bruits de fermeture de porte sont regroupés de la même manière dans les deux espaces, mais les distances entre les groupes de bruits diffèrent. Dans la tâche de catégorisation, les sujets ne sont pas chargés d'établir des distances entre les groupes formés (méthode non-métrique), contrairement au test de dissemblance qui leur demande d'évaluer des distances entre tous les sons (méthode métrique). Comme les bruits de plaque varient très peu, les groupes formés dans le tri libre sont fortement variables selon les sujets et cette variabilité induit les mêmes distances relatives entre les groupes mesurés dans le test de dissemblance. L'exemple des animaux proposé par Parizet illustre parfaitement ces propos : si on demande à des sujets de former des groupes homogènes parmi 2 chats, 2 chiens et 2 poules, il est probable que tous les sujets identifient 3 groupes : les 2 chats ; les 2 chiens ; les 2 poules. Aucune information concernant les distances perceptives entre chats, chiens et poules n'est alors obtenues par la tâche de catégorisation. Au contraire, un test de dissemblance sur ces mêmes stimuli indiquerait que les chiens et les chats sont plus proches que les poules et les chiens et les poules et les chats.
La tâche de catégorisation associée à la verbalisation est un moyen privilégié pour accéder aux propriétés écologiques, par étiquetage des catégories principales. Une évaluation directe de ces propriétés peut alors être envisagée a posteriori.

Mise en contexte et expertise des auditeurs
L'ensemble des études pose une question fondamentale sur l'écoute écologique en laboratoire, qui par nature n'est jamais réellement atteinte puisque réalisée en environnement artificiel, mais dont on cherche à s'approcher. Les protocoles doivent en particulier chercher à contextualiser les sujets dans une scène naturelle. Par ailleurs, de l'expertise des sujets dépend la caractérisation des propriétés naturelles. D'une part, les sujets musiciens ou acousticiens risquent de dévier plus facilement vers une écoute analytique. D'autre part, les sujets experts des bruits à caractériser peuvent identifier des propriétés liées aux sources que des sujets naïfs n'identifient pas : les oreilles d'or de la marine n'écoutent pas les fonds sous marins comme un plongeur du dimanche ! En revanche, ces mêmes sujets ne sont pas nécessairement plus capables d'identifier les bruits de leur environnement. Un reportage montre une oreille d'or de la marine en difficulté par rapport à sa femme pour reconnaître des bruits mesurés dans leur appartement (E=M6). Ces sujets experts sont spécifiquement entraînés pour un type de bruits. Ceux de Lufti et Oh (1997) sont entraînés pendant les expérimentations dans le but d'observer les capacités auditives à discriminer des sons de synthèse de barres excitées dont les paramètres physiques ne varient que très légèrement. Dans le cas industriel, pour préciser les liens entre le ressenti à la mécanique, il peut être pertinent d'interroger des professionnels qui ont une écoute experte des sources sur lesquelles ils travaillent.

2.2.4. Evocations

Evocations et émotions
Västfjäll (2002) suggère que les bruits de l'environnement évoquent des impressions en fonction des émotions ressenties par les auditeurs. Il cherche à caractériser les réactions affectives qui peuvent être la conséquence d'un son de l'environnement sans que l'auditeur ne s'en rende compte. Les émotions sont caractérisées par Merhabian et Russel (1974, cité par Västfjäll) dans un espace à deux dimensions : la valence – évaluation (désagréable-agréable) et l'éveil - ''activity'' (activé-désactivé).

Västfjäll (2002) caractérise les réactions affectives à des bruits d'avion sur ces dimensions. Les dimensions émotionnelles de valence et d'éveil sont corrélées aux évaluations de préférences. Cependant les critères psychoacoustiques ne sont pas bien corrélés à ces dimensions.
Dans ce sens, Bjork (1983) caractérise un ensemble de bruits de l'environnement par différentiel sémantique. 15 bruits de l'environnement (ex : oiseaux, alarme incendie, vent dans les arbres…) sont évalués sur 24 échelles de type émotionnel : par exemple, powerful/weak ; tense/relaxed ; mellow/harsh. Les 2 premières dimensions principales résumant ces variables sont interprétées par les dimensions émotionnelles de Merhabian et Russel.

Evaluations des évocations

Les évocations peuvent aussi être directement évaluées, comme par exemple, la gêne occasionnée par des bruits de pas (Johansson, Hammer et Nilsson, 2004), l'urgence évoquée par des avertisseurs sonores (Lemaître, Susini, Winsberg et McAdams, 2007), les préférences de bruits de climatiseurs (Susini et al., 2004), ou la qualité des portes de voiture (Parizet, Guyader et Nosulenko, 2007). L'évaluation de ces évocations est souvent réalisée par des tests par paires : les auditeurs choisissent le son préféré, le plus gênant etc. Une évaluation directe des sons sur échelle continue, moins précise, mais moins coûteuse en temps d'expérimentation, est également possible. Elle est testée sur la qualité des véhicules que renvoient des bruits de fermeture de porte (Roussarie et Bezat, à soumettre) ou sur la sportivité du bruit moteur (Bezat, 2003).

Protocoles et auditeurs

Tout comme les propriétés naturelles, la caractérisation des impressions ne peut se passer d'un questionnement particulier sur les protocoles et les auditeurs interrogés. Pour étudier les bruits de fermeture de porte, certains auteurs évaluent des préférences, d'autres la gêne, d'autres encore la qualité de la porte ou enfin la qualité du véhicule… Si on cherche à évaluer la ''convenance'' (Blauert et Jekosch, 1997) ou la compatibilité son/produit (Guski, 1997), il faut bien interroger les sujets sur les évocations liées au produit et non sur le son lui-même. De plus, la mise en contexte du sujet, qui se trouve, rappelons le, au laboratoire, peut être travaillée. Par exemple, avant d'évaluer la gêne de bruits de pas, les sujets de Jonhansson, Hammer et Nilsson (2004) sont invités à s'imaginer dans un open space. Enfin, les sujets invités à livrer leurs impressions doivent être habituellement confrontés à ces bruits : une étude de la qualité de bois dédiés à la fabrication de xylophones est réalisée avec des facteurs de xylophone (Aramaki et al., 2007), tandis qu'une étude sur la qualité de bruits de porte implique d'interroger des possesseurs d'automobile (Roussarie et Bezat, à soumettre).

2.3. Relations entre propriétés perceptives

Les propriétés analytiques, naturelles et les évocations sont autant de descriptions potentielles d'un même bruit. Une fois évaluées sur un même groupe de sons, les liens entre propriétés analytiques, naturelles et évocations sont recherchés par analyses statistiques.

2.3.1. Propriétés analytiques vs propriétés naturelles

L'approche écologique suppose une perception directe de l'environnement offert à l'auditeur, par affordance. ''An affordance is an invariant combination of variables, it is easier to perceive such an invariant unit than it is to perceive all the variables individually'' (Gibson, 1979, chap.8). La perception auditive s'attache à remarquer - à ''cueillir'' - les invariants contenus dans le signal acoustique. ''The

perceptual system simply extracts the invariants from flowing array; it resonates to the invariant structure''. (Gibson, 1979, chap.14.). Ainsi les propriétés naturelles seraient directement perçues, sans s'appuyer sur les propriétés analytiques.
Au contraire, la théorie du traitement de l'information (Anderson, 1985, Lindsay et Norman, 1977, cité par McAdams, 1994) stipule que les propriétés analytiques sont analysées par l'auditeur pour inférer des propriétés naturelles. La perception est décrite comme une suite de processus qui analysent et manipulent l'information sensorielle et l'information additionnelle provenant du sujet. Le signal acoustique est analysé et transformé en informations sensorielles codées dans le nerf auditif. Ces informations sensorielles sont ensuite comparées à une représentation stockée en mémoire à long terme (ajustement). L'information sémantique résultante dépend du contexte local.

L'approche écologique a orienté l'étude des bruits d'impact simple dont le signal acoustique peut être modélisé par des propriétés physiques des sources. Les corrélats acoustiques des propriétés naturelles sont alors directement recherchés à partir des connaissances physiques de la source, sans passer par les propriétés analytiques.
Pour les sons plus complexes, dont on ne connaît pas de modélisation physique, les corrélats acoustiques des propriétés naturelles sont avantageusement cherchés à partir des propriétés analytiques. Quels que soient les processus psychologiques, les propriétés analytiques ont un lien particulier avec le signal acoustique puisqu'elles décrivent le son du point de vue sensoriel. Or des sons sensoriellement différents peuvent avoir les mêmes propriétés naturelles (cf multicatégorisation). Citons à nouveau l'exemple du bruit de fermeture d'une porte qui peut être perçue comme ''mal fermée'', que des chocs très espacés ou qu'un bruit violent suivi d'un rebond d'ouverture soient perçus. Que les propriétés analytiques soient un intermédiaire représentatif de processus perceptifs ou non, si elles sont statistiquement liées aux propriétés naturelles, elles permettent d'avancer dans la modélisation acoustique des bruits.

2.3.2. Propriétés analytiques vs évocations

Susini et al. (2004) cherchent à caractériser les jugements de bruits de climatiseurs avec des paramètres acoustiques. Ils s'appuient sur les propriétés analytiques évaluées par dissemblances pour identifier les paramètres, ces propriétés étant elles-mêmes liées aux préférences. Notre étude sur les bruits de porte est construite sur le même principe, même si les propriétés analytiques sont évaluées par analyse sensorielle (Roussarie et Bezat, à soumettre). Il s'agit d'utiliser les propriétés analytiques comme intermédiaire entre les évocations et le signal acoustique.

2.3.3. Propriétés naturelles vs évocations

Les propriétés analytiques, même si elles sont parfois statistiquement liées aux évocations, ne suffisent pas toujours à les caractériser. Par exemple, le bruit de fermeture de porte est mieux jugé quand il est grave. Mais un son grave, comme celui d'un gong, n'est pas pour autant perçu comme un bruit de fermeture de porte de bonne qualité. La source, et l'ensemble des propriétés naturelles inférées, participent à l'évocation. On ne connaît pas, avec la hauteur du son et d'autres propriétés analytiques, les attentes des auditeurs sur les bruits de fermeture de porte. Un client qui ferme sa porte en concession n'écoute certainement pas la hauteur du son. Par exemple, si l'auditeur a l'impression que la porte est mal fermée (même si elle ne l'est pas), le bruit pourra être aussi grave que possible, il ne sera jamais jugé de bonne qualité. Les propriétés naturelles, qui caractérisent la

source et l'évènement perçus, nous semblent alors constituer une voie raisonnable pour mieux comprendre les évocations.

Conclusion

Après avoir étudié la perception du bruit d'impact en situation réelle et isolé les facteurs environnementaux, nous nous focalisons sur le son. Sa perception est précisée au laboratoire, à partir d'un corpus de bruits mesurés, choisi pour être représentatif de la classe de bruits étudiée.

Les bruits d'impact sont caractérisés par un ensemble de propriétés perceptives induites par écoutes analytique et écologique. Les propriétés analytiques décrivent les bruits pour eux-mêmes, sans faire référence à l'évènement originel. Elles sont avantageusement identifiées et évaluées par analyse sensorielle à l'aide d'un groupe de sujets entraînés. Les propriétés naturelles et les évocations qui renvoient à l'évènement associé au son, sont naturellement perçues par l'auditeur, par écoute écologique. L'expertise de l'auditeur lui permet d'accéder à des propriétés plus ou moins précises sur les sources impliquées. Ces propriétés peuvent être évaluées directement, au laboratoire, tant que les sujets sont mis en contexte pour les orienter vers une écoute écologique.

Les propriétés perceptives participent toutes à la caractérisation perceptive des bruits d'impact. D'une part, les propriétés analytiques, qui décrivent le signal acoustique, constituent un intermédiaire privilégié pour modéliser les propriétés naturelles des sons complexes. D'autre part, les évocations dépendent des propriétés naturelles, caractéristiques de l'évènement perçu. Ainsi, les différentes propriétés perceptives sont placées au sein d'un réseau perceptif qui propose une caractérisation perceptive d'un type de bruits d'impact.

Il reste à identifier les corrélats acoustiques des propriétés perceptives.

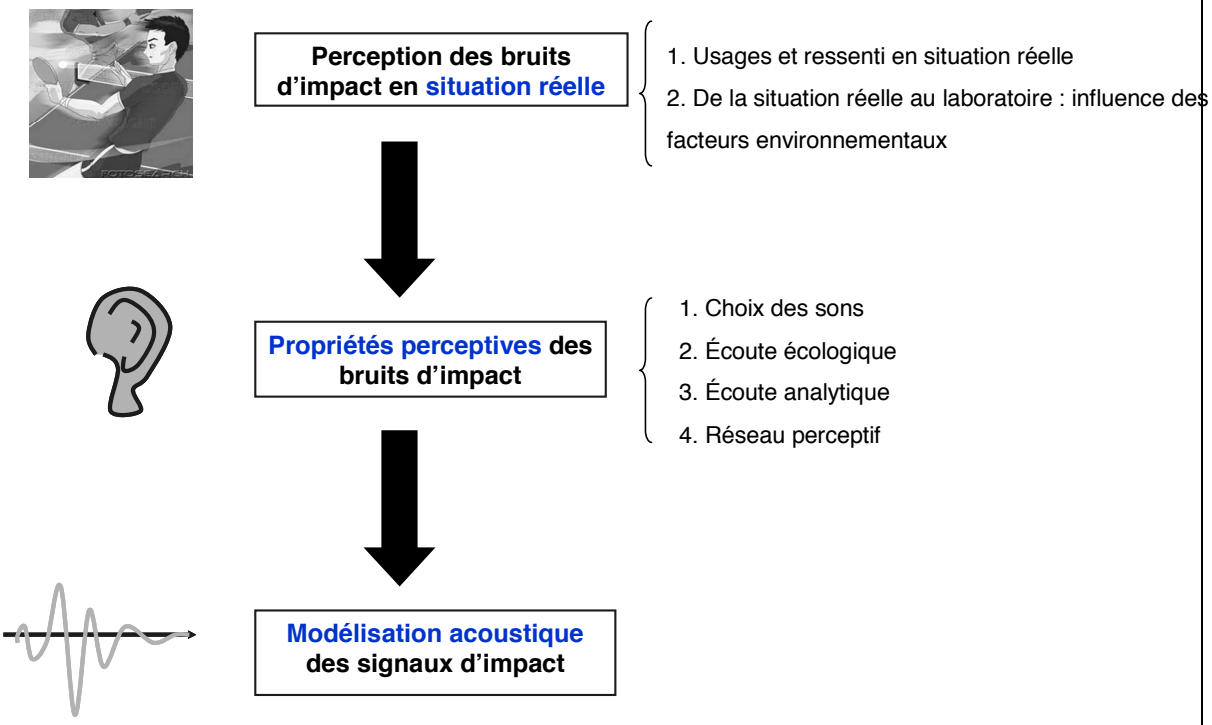
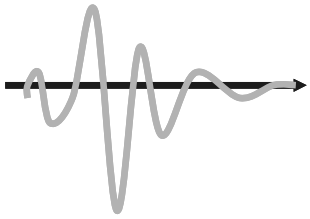


Figure 9 Démarche : propriétés perceptives des bruits d'impact

3. Modélisation des signaux d'impact



''A theory of how presupposes a theory of what'' (Mickaels et Carello, p.165)

Une fois caractérisé *ce que l'on perçoit* à l'écoute de bruits d'impact, on cherche à comprendre *comment on le perçoit*. Les propriétés perceptives décrites précédemment sont détectées par les auditeurs à partir de structures acoustiques extraites des signaux que l'on cherche maintenant à identifier.

Les bruits d'impact renvoient à de nombreuses propriétés perceptives, très facilement identifiées par l'auditeur à partir du signal acoustique, pourtant très court (~100ms) ! De plus, les auditeurs sont capables d'identifier très facilement des sons (Ballas, 1993), même lorsqu'ils sont dégradés. Par exemple, reconnaître la voix d'un ami proche qui nous appelle au téléphone par faible réseau, est très facilement réalisée par l'auditeur, alors que le signal reçu est très différent du signal émis. Gygi, Kidd et Watson (2004) observent la capacité des auditeurs à identifier un large corpus de sons de l'environnement à partir d'une information spectro-temporelle limitée, en utilisant des méthodes empruntées aux études sur la transmission dégradée de la parole. Certains sons restent identifiables même sévèrement traités. Les structures acoustiques utiles à l'auditeur pour identifier ces sons sont donc préservées malgré les modifications drastiques du signal acoustique. Bien que la modélisation acoustique des bruits d'impact apparaisse très complexe, elle peut tirer partie des connaissances sur les traitements réalisés par le système auditif périphérique. L'étude du système auditif fait en particulier apparaître la notion de masquage fréquentiel et temporel : un son peut ne pas être entendu s'il est présenté avec un autre son masquant apparaissant simultanément, antérieurement ou postérieurement. Aussi la prise en compte de ce traitement auditif en amont des analyses ne peut qu'améliorer le pouvoir explicatif des descripteurs calculés pour caractériser les propriétés perceptives.

Après avoir succinctement présenté des modélisations du système auditif périphérique, nous présentons des méthodes de recherche de corrélats acoustiques par analyse de signaux réels, puis par synthèse sonore. La synthèse de signaux permet d'observer les effets spécifiques de paramètres acoustiques parfaitement contrôlés sur les propriétés perceptives.

3.1. Modélisations du système auditif périphérique

Les modèles de système auditif périphérique comptent plusieurs étapes associées à la physiologie du système auditif : l'oreille externe et de l'oreille moyenne, la membrane basilaire, les cellules ciliées, les neurones du nerf auditif.
Beaucoup d'attention est en particulier portée au concept de bande critique dû au fonctionnement tonotopique de la membrane basilaire. Le son provoque des oscillations de la membrane basilaire de façon sélective : la base de la cochlée reçoit les hautes fréquences (jusqu'à 20kHz) alors que l'apex

est affecté par les fréquences plus basses (20Hz). Chaque point de la membrane basilaire peut être considéré comme un filtre passe-bande centré sur une certaine fréquence caractéristique, celle qui induit le maximum d'amplitude. La largeur de bande d'un tel filtre est appelée bande critique. Aussi, si la membrane basilaire est excitée à une certaine fréquence, une nouvelle excitation à une fréquence proche ne sera perçue que si elle induit une vibration qui surmonte la vibration initiale, liée à la première fréquence. Cette compétition entre les vibrations est à l'origine des phénomènes de masquage. La sélectivité fréquentielle dépend non seulement de propriétés mécaniques de la membrane basilaire, mais également de structures biologiques. La membrane basilaire réagit de manière non linéaire, particulièrement aux niveaux moyens et aux fréquences proches de la fréquence caractéristique. Ce processus est également actif, il dépend de la condition physiologique. Les vibrations de la membrane basilaire induisent ensuite un signal neural complexe dans le système nerveux auditif par l'intermédiaire des cellules ciliées (De Cheveigné, 2006).

Modélisation de la membrane basilaire

La modélisation de la membrane basilaire a été améliorée ces dernières années, à partir des données expérimentales de masquage et des données physiologiques.

Le filtrage est réalisé par bandes critiques obtenues à partir des courbes de masquage selon Zwicker. Le diagramme d'excitation représentatif des mouvements de la cochlée a la même forme que les courbes de masquage d'un son pur masqué par un bruit à spectre étroit. Moore et Glasberg (1983) ont proposé de décrire les patterns d'excitation de la membrane basilaire comme la sortie d'un banc de filtres auditifs, dont la largeur de bandes augmente avec la fréquence centrale. Les paramètres du banc de filtres sont optimisés pour qu'il simule au mieux le filtrage de la cochlée, décrit par les données de masquage. Patterson et al. (1987) montrent que les filtres ''gammatone'' simulent raisonnablement le filtrage de la cochlée humaine. Cette étude est suivie d'une succession de propositions pour améliorer la simulation de la cochlée à partir de tels filtres. Pour bien expliquer les données de masquage et la compression, l'introduction de filtres non linéaires et dépendants du niveau est nécessaire (filtres asymétriques pour des niveaux élevés). En 1997, Irino et Patterson introduisent un signal linéairement modulé en fréquence (''chirp'') dans la porteuse du ''gammatone'' pour produire un banc de filtres capable de simuler l'asymétrie des filtres auditifs à haute fréquence. Cependant, le filtre ''gammachirp'' ne prend pas en compte la dépendance en niveau du gain, ni la compression observée autour du pic de fréquence. Aussi, ils introduisent en 2001 le ''gammachirp compressif'' qui explique les données physiologiques de Carney et al (1999) et les non linéarités des données de masquage obtenues par Rosen et Baker (1994). La proposition de Patterson et Irino (2003) d'un ''gammachirp compressif'' consiste à ajouter une fonction asymétrique qui augmente en fréquence avec le niveau du stimulus. Les filtres sont ajustés aux données de masquage humain publiées par Glasberg et Moore (2000) et Baker et al. (1998). Enfin, Irino et Patterson (2006) introduisent une version dynamique du gammachirp compressif, capable de resynthétiser les sons à partir des sorties du banc filtres.

Ces modélisations sont utilisées en amont des analyses pour faciliter la recherche de paramètres acoustiques caractéristiques des propriétés perceptives.

3.2. Analyse directe des signaux d'impact

On cherche à extraire les structures acoustiques capables d'expliquer l'information perçue. Les ***descripteurs acoustiques*** sont calculés directement à partir des signaux acoustiques. Les propriétés perceptives sont ensuite ***modélisées*** à partir de ces descripteurs acoustiques.

3.2.1. Descripteurs acoustiques

Qu'ils soient calculés directement sur les signaux, qu'ils prennent en compte au préalable le traitement réalisé par le système auditif, ou qu'ils s'appuient sur les connaissances des propriétés physiques des sources, ces descripteurs sont autant de candidats à la modélisation acoustique des propriétés perceptives.

Descripteurs statistiques

On peut chercher, par analyses statistiques, les descripteurs intrinsèques à un ensemble de signaux acoustiques. Repp (1987) réalise une analyse en composantes principales d'un ensemble de spectres de claquement de mains. Les spectres prototypes obtenus constituent des signatures acoustiques de la position des mains, positions qui sont en l'occurrence reconnues par les auditeurs. Cavaco et Lewicki (2007) cherchent les structures intrinsèques de bruits d'impact par analyses en composantes principales et indépendantes d'un ensemble de spectrogrammes de bruits d'impact. Ces bruits sont presque entièrement caractérisés par un petit nombre de fonctions de base. Les auteurs n'ont pas cherchés ici à décrire des propriétés perceptives, mais à extraire des fonctions de bases caractéristiques de signaux d'impact, indépendamment de toute connaissance a priori. Les fonctions isolées offrent des perspectives pour la caractérisation perceptive.

D'autres descripteurs sont calculés à partir des signaux temporels, des représentations fréquentielles et temps-fréquence. Ces descripteurs cherchent à caractériser les enveloppes spectrales, les enveloppes temporelles et les évolutions spectro-temporelles de signaux acoustiques. Par exemple, le centre de gravité spectral, l'étendue spectrale qui mesure l'étendue du spectre autour de sa valeur moyenne, et les moments d'ordre supérieur caractérisent l'enveloppe spectrale. Les temps d'attaque et de décroissance, le centre de gravité temporel caractérisent l'enveloppe temporelle. Le flux spectral, lié aux variations spectrales au cours du temps, et l'ensemble des variations temporelles des descripteurs spectraux calculés en fonction du temps caractérisent les évolutions spectro-temporelles. (Pour une revue cf Herrera, Peeters et Dubnov, 2003, cité par Peeters, 2003).

Descripteurs auditifs

Le signal acoustique est modifié par le système auditif. Aussi, la prise en compte du traitement auditif en amont des analyses ne peut qu'améliorer la pertinence des descripteurs calculés.

Les descripteurs auditifs intègrent des modélisations du système auditif. Fastl (1997) propose une revue des descripteurs auditifs bien connus, utilisés couramment dans le domaine de la qualité sonore. Par exemple, la sonie (Loudness) calcule l'intensité perçue en prenant en compte les phénomènes de masquage. Elle intègre l'énergie perçue par bandes critiques, l'énergie ''démasquée''. L'acuité (Sharpness) caractérise le contenu fréquentiel d'un son en calculant le centre de gravité spectral du son par bandes critiques.

Pour les sons brefs, les modèles de calcul de sonie intègre la dépendance temporelle de la sonie, qui augmente avec la durée jusqu'à 100 à 200ms. La sonie court-terme est intégrée à partir du calcul de la sonie instantanée : elle augmente rapidement quand le son apparaît, et diminue doucement quand le son s'arrête. Cette dernière est elle-même intégrée pour obtenir la sonie globale (Glasberg et Moore, 2002). Boullet (2005) a spécifiquement étudié la sonie des bruits impulsionnels et a proposé de nouveaux indicateurs. Il est notamment montré que les énergies et les temps de décroissance des bruits impulsionnels par bandes critiques sont proportionnels à la sonie (Boullet et al., 2006).

D'autres études utilisent les modèles auditifs en amont du calcul de descripteurs. Freed en 1990 traite des signaux d'impact sur des casseroles avec le modèle de Stautner (1983), qui propose un filtrage en bandes critiques définies par Moore et Glasberg (1983). Giordano et McAdams (2006) simulent les oreilles externes et moyennes par filtrage pour prendre en compte le maximum de sensibilité vers 2000Hz et les pertes de sensibilité à basses et hautes fréquences, puis simule la cochlée par les filtres ''gammatones'' définis par Patterson, Allerhand et Giguère (1995), pour traiter ces signaux d'impact de matériau avant calcul des descripteurs.

Descripteurs physiques

Les chercheurs en psychomécanique entreprennent l'étude des relations entre les propriétés physiques des sources et le signal acoustique (Li, Logan et Pastore, 1991). Pour les bruits d'impact simples, les descripteurs acoustiques sont ainsi établis à partir des connaissances des propriétés physiques des sources. Ces descripteurs sont pertinents pour caractériser les propriétés naturelles liées aux propriétés physiques des sources comme la géométrie et le matériau.

Dans cette perspective, Carello et al. (1998) concluent que la perception de la géométrie s'effectue principalement à travers la perception des fréquences propres de la structure. On associe généralement un son grave à un objet de grande dimension, et un son aigu à un objet de petite dimension. Pour modéliser la perception de matériau, Wildes et Richard (1988) introduisent un paramètre physique intrinsèque au matériau, le coefficient interne de friction $\tan\phi$, qui est lié à l'amortissement des composantes fréquentielles (Eq 1):

$$\tan\phi = \alpha / \pi f, \qquad \text{(Éq 1)}$$

avec α le coefficient d'amortissement d'une composante, i.e. l'inverse du temps nécessaire pour que l'amplitude de la composante perde $1/e$, et f sa fréquence. Le bruit d'impact d'un objet en bois décroît plus rapidement que celui d'un objet métallique.

Les descripteurs physiques peuvent également être calculés à partir des signaux préalablement traités par le système auditif. Ainsi Giordano et McAdams (2006) introduisent le coefficient de friction interne auditif $\tan\phi_{aud}$ calculé à partir des signaux modifiés par un modèle du système auditif.

3.2.2. Modélisations statistiques

Les descripteurs acoustiques sont confrontés aux propriétés perceptives par analyses statistiques. Les modélisations proposées dépendent de la nature des propriétés perceptives. Certaines propriétés sont continues (ex : hauteur), les modèles cherchent à prédire leurs valeurs. D'autres sont catégorielles (ex : type de matériau), les modèles sont alors construits pour détecter les catégories de sons. L'interprétation des modèles de prédiction ou de détection obtenus est ensuite discutée.

Propriétés continues

Qu'elles soient analytiques, naturelles ou d'évocations, les propriétés continues sont confrontées aux descripteurs acoustiques par corrélations et régressions linéaires. Les modèles cherchent à sélectionner un petit nombre de descripteurs linéairement reliés aux propriétés perceptives.

Susini et al. (2004) caractérisent un ensemble de bruits de climatiseurs à l'aide de propriétés analytiques obtenues par un test de dissemblances. A l'aide de corrélations, les descripteurs acoustiques les plus explicatifs sont sélectionnés : la première propriété analytique est corrélée au rapport de l'énergie de la partie non harmonique sur l'énergie de la partie harmonique, la deuxième

est corrélée au centre de gravité spectrale de la partie non harmonique, et la troisième est corrélée à la sonie ISO532B (modèle de Zwicker, 1990).
Freed (1990) cherche à caractériser la perception de dureté de maillets qui tambourinent des casseroles. L'information est cherchée dans les premières millisecondes (300ms) de l'impact puisqu'on s'intéresse à l'attaque du bruit. Le calcul des niveaux et des centres de gravité spectral en fonction du temps est réalisé après traitement du son par un modèle auditif. L'auteur extrait 4 paramètres de ces vecteurs : la valeur moyenne des niveaux, la pente des niveaux, la valeur moyenne des centres de gravité spectral, la moyenne temporelle pondérée par le temps des centres de gravité spectral (~ distribution temporelle). Les 4 paramètres combinés par un modèle linéaire prédisent l'évaluation de la dureté de 24 stimuli (R2=0.72).
Johansson, Hammer et Nilsson (2004) modélisent l'impression de gêne de bruits de pas. Une série de descripteurs liés à l'intensité perçue est proposée. Le 10ème centile de la sonie est bien corrélé à la gêne.

Les modèles proposés ajustent les descripteurs acoustiques calculés aux évaluations perceptives, pour un ensemble donné de sons (Susini et al., 2004, Freed, 1990, Johansson et al., 2004). Mais la robustesse des modèles n'est pas évaluée. Aussi, on ne sait pas si un autre son que ceux de l'ensemble d'apprentissage serait bien prédit. L'utilisation des procédures de validation croisée optimise la robustesse des modèles, en utilisant les données à la fois comme données d'apprentissage et données de validation. La robustesse du modèle peut par exemple être estimée par procédure de validation croisée dite de 'leave-one-out''. Il s'agit de déterminer différents modèles par apprentissage sur tous les ensembles de n-1 données, et de calculer le coefficient de détermination à partir de ces prédictions (Cornillon et Matzner-Lober, 2007). Il s'en suit un modèle moins bon en ajustement, mais plus robuste.

Propriétés catégorielles

Les propriétés catégorielles simples sont modélisées à partir de descripteurs acoustiques continus capables de classer les sons dans les catégories adéquates.
Tucker et Brown (2002) s'appuient sur les connaissances auditives et physiques pour identifier un corrélat acoustique de la perception de matériau. Ils estiment le coefficient interne de friction après modélisation du système auditif périphérique. Le descripteur acoustique proposé est calculé pour des bruits d'impact de plaques de différentes formes géométriques et de différents matériaux. Il permet de séparer les matériaux métal, plastique et bois, bien reconnus perceptivement.
Giordano et McAdams (2006) cherchent également à modéliser la perception du matériau d'une plaque. Des descripteurs acoustiques sont proposés, comme le coefficient de friction interne, mais aussi la sonie et le centre de gravité spectral, calculés sur l'attaque et la résonance du son, la fréquence du premier mode, la durée etc. Ces descripteurs sont calculés après traitement des signaux d'impact par un modèle de système auditif. Des régressions logistiques (Agresti, 1996, cité par Giordano et McAdams, 2006) entre ces paramètres et l'évaluation expérimentale du matériau permettent d'identifier les descripteurs caractéristiques de la perception du matériau : le coefficient de friction interne, mais aussi la durée, la sonie de l'attaque du son, et la pente du centre de gravité spectral en fonction du temps.

Ce dernier résultat soulève le problème de l'indépendance perceptive des descripteurs acoustiques. Les descripteurs acoustiques peuvent être statistiquement liés à une propriété perceptive sans que l'on sache quel indice est extrait par le système perceptif. Par ailleurs, les analyses statistiques

proposées n'identifient pas les valeurs seuils qui délimitent les différentes catégories des propriétés perceptives. L'estimation du coefficient interne de friction sépare les catégories de matériaux des exemples étudiés, mais on ne sait pas à partir de quelle valeur la perception du matériau est différente.

Les propriétés catégorielles peuvent être également caractérisées par classifications automatiques de données acoustiques.
Repp (1987) cherche à comprendre comment les auditeurs arrivent à classer des bruits de claquement de mains en fonction de la position des mains ; la classification automatique des spectres de ces bruits en fonction de la position des mains est réalisée. Elle est cohérente avec les données perceptives.
L'algorithme de classification automatique de Brown, Houix et McAdams (2001) est capable d'identifier le timbre de sons de hautbois, saxophone, flûte et clarinette avec autant de réussite qu'un auditeur. L'algorithme fonctionne à partir d'un grand nombre de descripteurs acoustiques.
Les méthodes de classifications sont efficaces pour la détection, mais elles n'induisent par de corrélats perceptifs utiles à notre problème. Pour traiter les sons complexes, une approche par propriétés perceptives permet de mieux comprendre quelles structures acoustiques sont extraites dans les processus de perception.

Interprétation
Les modélisations obtenues s'appuient sur des combinaisons de descripteurs acoustiques statistiquement liés aux propriétés perceptives, mais les descripteurs acoustiques identifiés ne sont pas nécessairement les structures acoustiques extraites par l'auditeur. Ainsi, les phénomènes perceptifs sont bien prédits mais ils ne sont pas expliqués.

Même si les descripteurs sont sélectionnés à partir de connaissances sur les sources physiques et sur les propriétés perceptives des sons, la relation causale entre les descripteurs sélectionnés et les propriétés perceptives n'est jamais assurée avec les procédures de corrélation proposées. Pour vérifier les effets des paramètres sur les propriétés perceptives, on peut procéder par modifications des signaux (Li, Logan et Pastore 1991). Mais les modifications des paramètres ne sont pas nécessairement indépendantes.
Warren et Verbrugge (1984) procèdent par simplifications de signaux. Pour montrer que le contenu temporel des bruits de verre qui tombent sur le sol suffit à catégoriser l'évènement en verre qui rebondit ou verre qui se brise, les signaux sont dégradés jusqu'à ne plus contenir que l'information temporelle. Les auditeurs sont encore capables de classer les 2 évènements à partir de ces signaux dégradés. L'hypothèse des auteurs est validée : l'information sur ces évènements est contenue dans la structure temporelle des signaux.
Caclin, McAdams, Smith et Winsberg (2005) proposent d'utiliser la synthèse sonore. Les valeurs des paramètres acoustiques des sons synthétisés sont parfaitement contrôlées, ce qui permet d'observer les effets spécifiques de paramètres acoustiques sur les propriétés perceptives. En l'occurrence, il est montré que le temps d'attaque, le centre de gravité spectral, et la structure fine du spectre discriminent les différences de timbre, tandis que l'influence du flux spectral est moindre. L'analyse par la synthèse est effectivement une voie privilégiée pour la modélisation acoustique, mais la synthèse n'est pas triviale pour nos sons complexes.

3.2. Analyse par synthèse des signaux d'impact

La synthèse sonore permet la construction de stimuli calibrés pour des expérimentations perceptives, et d'observer directement les relations entre signal acoustique et propriétés perceptives.

La synthèse sonore est abordée selon deux approches principales : par modèles signal et par modèles physiques. La synthèse par modèle signal cherche à reconstruire le son perçu à partir du signal acoustique, tandis que la synthèse par modèle physique simule le comportement physique des sources. Dans tous les cas les paramètres sont extraits par l'analyse de signaux réels (Kronland-Martinet, Guillemain et Ystad, 1997). Mais notre ambition n'est pas ici de reproduire parfaitement un son : on cherche à identifier un nombre restreint de paramètres de contrôle liés aux propriétés perceptives des sons.

3.2.1. Synthèse par modèle signal

La plupart des sons complexes peuvent être parfaitement resynthétisés à partir de représentations temps-fréquence (Transformées de Gabor, en ondelettes) (Guillemain et Kronland-Martinet, 1996). Les sons synthétisés sont perceptivement identiques aux sons réels. Par exemple, Jaillet (2006) propose un modèle de resynthèse de bruits réels à partir d'une décomposition de Gabor dont la fenêtre d'analyse est adaptée au signal à analyser afin d'optimiser la résolution temps-fréquence. Il choisit ainsi une petite fenêtre d'analyse pour les parties transitoires et une grande pour les résonances. Cet outil permet de modifier certaines parties du plan temps-fréquence et de resynthétiser des sons ainsi modifiés. On peut donc facilement synthétiser des stimuli utiles pour étudier l'influence de modifications signal d'un groupe de sons sur la perception. Même si un tel outil permet une analyse fine des signaux, les modifications du plan temps-fréquence sont potentiellement très nombreuses et on ne connaît pas les combinaisons de paramètres qui régissent principalement le rendu perceptif.
Pour comprendre les relations entre paramètres acoustiques et propriétés perceptives, il faut un modèle de synthèse géré par un ensemble plus restreint de données, et que leur contrôle soit plus pertinent.

3.2.2. Synthèse par modèle physique

Pour étudier les propriétés naturelles qui dépendent des propriétés physiques des sources, par exemple leur taille ou leur matériau, on peut envisager, dans le cas de sources simples, de synthétiser les bruits par modèle physique.

Modèles physiques
Le bruit rayonné par un objet excité est déterminé par les propriétés physiques de l'objet, comme sa taille, sa géométrie, son matériau, par les propriétés physiques de l'excitation comme la force et l'emplacement de l'impact. Les relations entre ces propriétés physiques et l'onde acoustique sont établies avec des modèles physiques. Gaver (1993) décrit les solutions analytiques des modèles comme une somme de fréquences exponentiellement amorties (Eq 2):

$$y(t) = \sum_{n=1}^{N} \alpha_n e^{-\delta_n t} \sin(\omega_n t) \,, \qquad \textit{(Éq 2)}$$

avec ω_n la fréquence du partiel n, α_n son amplitude initiale, et $e^{-\delta_n t}$ la fonction de décroissance de ce partiel.
Les valeurs de ces paramètres dérivent des solutions d'équations physiques résolues pour des objets simples, comme des plaques ou des barres (Chaigne et Doutaut, 1997, Van der Doel et Pai, 1996). Les sons d'impact sont alors parfaitement resynthétisés. Des plans d'expérience établis sur les paramètres physiques ou sur les paramètres acoustiques de ces modèles permettent d'étudier leur influence sur les propriétés perceptives des bruits d'impact.

Plans d'expérience

McAdams, Chaigne et Roussarie (2004) étudient les bruits d'impact de barres à section constante et de barres à sections variables à l'aide de sons de synthèse simulés par modèles physiques (Chaigne et Doutaut, 1997). Les stimuli varient systématiquement selon les *paramètres physiques* de densité massique, de coefficient d'amortissement viscoélastique et de longueur. Les propriétés perceptives caractéristiques de ces stimuli sont établies à partir de tests de dissemblance. Les dimensions perceptives correspondent aux modifications physiques, après transformation par des lois de puissance. De plus, les dimensions sont corrélées à des paramètres acoustiques calculés sur les stimuli de synthèse, après modélisation du traitement du système auditif. Les dimensions perceptives liées à la densité massique et à la longueur sont corrélées à la fréquence du 1er mode. La dimension perceptive liée au coefficient d'amortissement viscoélastique est corrélée à une combinaison linéaire du coefficient d'amortissement calculé sur l'enveloppe spectrale et du centre de gravité spectral. Les liens entre paramètres physiques, acoustiques et perceptifs sont établis.
Klaztky, Pai et Krotkov (2000) créénent des stimuli de synthèse de bruits d'impact de barres en faisant varier des *paramètres acoustiques* : la fréquence du 1er mode et le temps d'amortissement. Des tests de dissemblances sur le matériau perçu montrent l'effet principal du temps d'amortissement sur la perception du matériau.

Les modèles de synthèse par modèle physique permettent d'étudier l'effet de modifications physiques sur la perception. Mais ils ne permettent que l'étude de bruits d'impact simples. Quand la structure de la source est complexe, on ne dispose pas de solutions analytiques pour reproduire le comportement vibratoire de la source, et synthétiser le bruit résultant. De plus, les propriétés perceptives des bruits d'impact ne sont pas nécessairement directement liées aux paramètres physiques de la source, mais sont parfois de plus haut niveau.

3.2.3. Vers une synthèse ''perceptivement valide''

Modèles d'analyse-synthèse

Après s'être intéressé aux sons d'impact simples, Gaver (1993) cherche à synthétiser des sons de machines complexes. Il cherche un modèle de synthèse simple qui puisse retranscrire les propriétés perceptives principales du son. Il ne part donc pas d'une modélisation mécanique détaillée de la machine. A partir de considérations générales sur la taille globale de la machine liée aux fréquences du son, son cycle lié à la répétitivité du son, et le travail effectué lié à la largeur de bande du son, il synthétise différents sons de machine. Les sons de synthèse ne contiennent pas tous les détails de sons réels, mais ces sons ont le mérite de caricaturer certains aspects de l'évènement mécanique. Gaver parle de ''cartoon sounds''.

Dans la même logique, Aramaki (2003), Aramaki et Kronland-Martinet (2006) proposent de synthétiser des sons produits par des structures complexes en reproduisant perceptivement globalement les contributions des deux grandeurs physiques a priori importantes pour l'oreille, la loi d'amortissement liée à la nature du matériau, et les composantes tonales plus particulièrement caractéristiques de la forme géométrique de la source. La loi d'amortissement est simulée par un filtre numérique évolutif (Smith et Van Duyne, 1995). La partie tonale est simulée par guide d'onde numérique. Les lois d'amortissements et les fréquences des composantes tonales sont estimées à partir de l'analyse des signaux réels et non des connaissances mécaniques des sources. Ce modèle permet de traiter a priori n'importe quel type de signaux d'impact. Il est appliqué à l'étude de sons d'impact de matériau : la catégorisation en matériau est étudiée à partir de données électro-physiologiques relevées sur des auditeurs écoutant des sons de synthèse hybrides entre des sons de bois, verre et métal (Aramaki, Besson, Kronland-Martinet et Ystad, soumis).

Evaluation perceptive des modèles

Les sons de synthèse créés par de tels modèles doivent être contrôlés a posteriori par des tests perceptifs, pour s'assurer que les propriétés perceptives importantes sont bien modélisées. Lufti et al. (2005) proposent une méthodologie pour proposer un modèle de synthèse ''perceptivement valide''. Ce modèle ne cherche pas à reproduire parfaitement un bruit d'impact, mais à conserver la perception du matériau. Les auteurs simplifient un modèle physique de bruits d'impact synthétisés par une somme de modes exponentiellement amortis. Ils proposent un modèle physique à 4 degrés de liberté, en figeant les relations entre les paramètres d'amplitudes, fréquences et amortissements des modes. Le modèle proposé est testé expérimentalement par comparaison de sons de synthèse ajustés à l'oreille avec des bruits d'impact réels. Les sons de synthèse doivent respecter 3 critères : ne pas être reconnus comme des sons de synthèse quand ils sont comparés à des sons réels, être aussi bien catégorisés en matériaux que les sons réels, et ne pas être différentiés si on complexifie le modèle. Le modèle ainsi proposé est capable de synthétiser les bruits de matériaux à partir d'une information restreinte.

Conclusion

Après avoir identifié les propriétés perceptives saillantes pour décrire les bruits d'impact, on cherche à y associer des corrélats acoustiques : par quelles structures du signal les auditeurs perçoivent-ils les propriétés perceptives des bruits d'impact ?

L'analyse directe des signaux d'impact consiste à calculer des descripteurs acoustiques, en tenant compte du traitement du système auditif et, si les sources sont simples, de leurs propriétés physiques. Les descripteurs acoustiques sont ensuite liés aux propriétés perceptives à partir de modélisations statistiques. Mais de telles modélisations n'assurent pas que les descripteurs soient effectivement les structures acoustiques extraites par l'auditeur. D'une part, il faut s'interroger sur la robustesse des modèles établis sur des corpus sonores restreints, d'autre part, il faut être attentif à la dépendance des descripteurs acoustiques. De plus, les descripteurs acoustiques caractéristiques des propriétés catégorielles doivent être associés à des valeurs seuils qui délimitent les catégories.

Une autre alternative pour modéliser les signaux d'impact est l'analyse par synthèse. L'ambition de l'analyse-synthèse n'est pas ici de reproduire parfaitement un son, mais de synthétiser des sons proches des sons réels du point de vue des propriétés perceptives. Selon Liénard (2002), ''la description haut niveau d'un signal est […] complète si l'on est capable par synthèse de reconstruire un signal perceptivement équivalent au signal initial''. La réalisation de tests perceptifs sur des sons de synthèse contrôlés permet alors d'étudier les relations entre signal acoustique et propriétés perceptives.

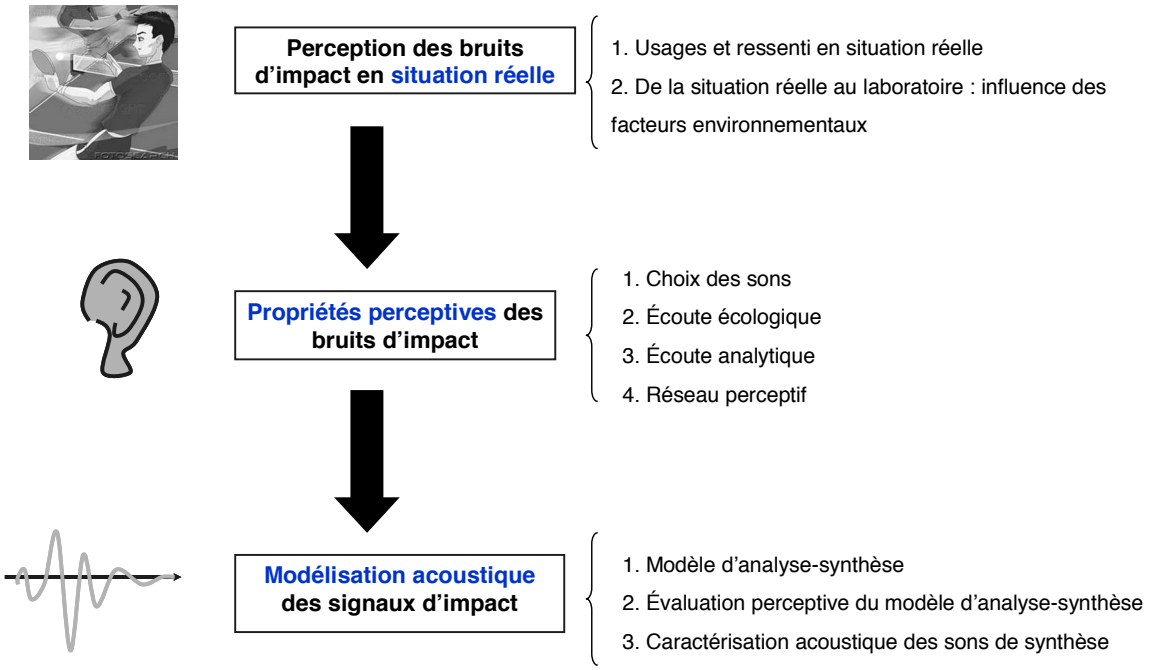


Figure 10 Démarche : modélisation acoustique des signaux d'impact

Chapitre III. Démarche pour l'étude de la perception des bruits d'impact

Le problème des bruits de fermeture de porte renvoie à des problèmes de recherche fondamentale en posant les questions de perception en situation réelle, de qualité (évocations en général) et plus généralement de propriétés perceptives, ainsi que des questions liées à la modélisation du signal acoustique. Le problème du bruit de fermeture de porte est donc reposé dans le contexte fondamental de la perception des bruits d'impact pour être décliné en trois questions fondamentales. Comment perçoit-on un bruit d'impact dans un environnement naturel ? Que perçoit-on à l'écoute de ce bruit d'impact ? Comment caractériser le ressenti à partir du signal acoustique du bruit d'impact ?

Notre problème de recherche concerne la perception de bruits de l'environnement lié à une action humaine. Nous l'abordons naturellement par une approche écologique. L'examen des travaux antérieurs nous amène à proposer une démarche complète pour cette approche de la perception des bruits d'impact (Figure 11). Notre démarche consiste à étudier successivement l'évènement perceptif en situation réelle, le son isolé au laboratoire, le son de synthèse, pour finalement identifier les critères acoustiques sous-jacents.

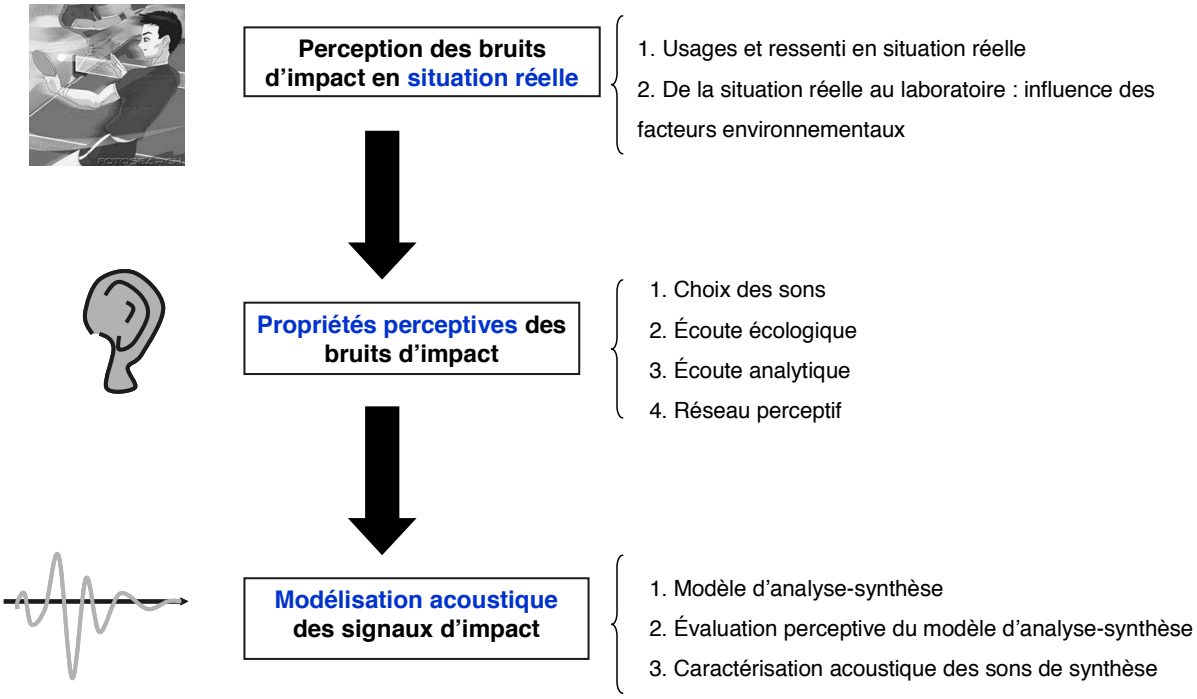


Figure 11 Démarche pour l'étude de la perception des bruits d'impact

Perception des bruits d'impact en situation réelle

La perception des bruits d'impact est d'abord étudiée dans en situation réelle. L'expérimentation en situation réelle, comme le propose l'approche qualitative, permet d'observer les usages et le ressenti en situation presque naturelle, et de mettre en évidence les facteurs environnementaux influents, comme les autres modalités sensorielles et les attentes des sujets. Mais pour générer les données quantitatives nécessaires à la modélisation acoustique, elle est complétée par l'étude spécifique du son au laboratoire. La caractérisation des différences d'évaluation des bruits en situation naturelle et au laboratoire est alors nécessaire pour relier les résultats obtenus en laboratoire à la situation réelle. Nous choisissons de réaliser un ensemble d'expérimentations qui évaluent pas à pas l'influence spécifique de facteurs environnementaux.

Propriétés perceptives des bruits d'impact

Nous cherchons ensuite à caractériser finement les bruits d'impact par des propriétés perceptives évaluées au laboratoire. Les bruits d'impact sont caractérisés par un ensemble de propriétés perceptives induites par écoutes analytique et écologique. Les propriétés analytiques décrivent les bruits pour eux-mêmes, sans faire référence à l'évènement originel. Elles sont avantageusement identifiées et évaluées par analyse sensorielle à l'aide d'un groupe de sujets entraînés. Les propriétés naturelles et les évocations, qui renvoient à l'évènement associé au son, sont naturellement perçues par l'auditeur, par écoute écologique. L'expertise de l'auditeur lui permet d'accéder à des propriétés plus ou moins précises sur les sources impliquées. Ces propriétés peuvent être évaluées directement, au laboratoire, tant que les sujets sont mis en contexte pour les orienter vers une écoute écologique. Les propriétés perceptives participent toutes à la caractérisation perceptive des bruits d'impact. D'une part, les propriétés analytiques, qui décrivent le signal acoustique, constituent un intermédiaire privilégié pour modéliser les propriétés naturelles des sons complexes. D'autre part, les évocations dépendent des propriétés naturelles, qui caractérisent l'évènement perçu. Ainsi, les différentes propriétés perceptives sont placées au sein d'un réseau perceptif pour proposer une caractérisation perceptive d'un type de bruits d'impact.

Modélisation acoustique des signaux d'impact

Enfin, nous tentons de modéliser les propriétés perceptives avec des critères extraits des signaux d'impact par l'intermédiaire d'un modèle d'analyse-synthèse. Sans chercher à reproduire précisément chaque son, le modèle d'analyse-synthèse vise à synthétiser des sons proches des sons réels du point de vue des propriétés perceptives, à partir d'un nombre réduit de paramètres. Il est construit sur la base d'un modèle simple, et calibré à partir d'analyse des signaux réels et d'écoutes des sons synthétisés. Le modèle est affiné par itérations d'analyses et d'écoutes jusqu'à ce que les sons de synthèse soient suffisamment proches des sons réels du point de vue des propriétés perceptives. Il doit ensuite être évalué par des tests perceptifs. La synthèse de sons parfaitement contrôlés selon des plans d'expérience permet alors d'observer les effets spécifiques de paramètres acoustiques sur les propriétés perceptives, et de déduire les critères acoustiques sous-jacents aux propriétés perceptives.

La démarche proposée pour étudier la perception des bruits d'impact insiste sur la complémentarité des études In situ/laboratoire, sur l'indispensable caractérisation des propriétés perceptives déduites des écoutes analytique et écologique, ainsi que sur le potentiel de la synthèse sonore pensée comme modélisation des propriétés perceptives. De la situation réelle au laboratoire, des sons réels aux sons

de synthèse, chaque étape est nécessaire pour caractériser un évènement perceptif complexe par des critères acoustiques simples.

Plan des travaux

Nous appliquons la démarche d'étude des bruits d'impact au cas des bruits de fermeture de porte. Les bruits de fermeture de porte sont d'abord étudiés en situation réelle (**Chapitre IV**) ; les propriétés perceptives sont ensuite caractérisées à partir d'expérimentations au laboratoire (**Chapitre V**) ; un modèle d'analyse-synthèse est enfin proposé pour modéliser les signaux de fermeture de porte et étudier les relations entre paramètres acoustiques et propriétés perceptives à partir de signaux contrôlés (**Chapitre VI**).

La généralisation des résultats méthodologiques et de l'outil d'analyse-synthèse déduits de l'étude des bruits de fermeture de porte est ensuite discutée à travers l'étude d'un autre bruit d'impact automobile : le bruit de toqué (**Chapitre VIII**).

B. APPLICATION AU BRUIT DE FERMETURE DE PORTE AUTOMOBILE

Les bruits de fermeture de porte sont d'abord étudiés en situation réelle **(Chapitre IV)** ; les propriétés perceptives sont ensuite caractérisées à partir d'expérimentations au laboratoire **(Chapitre V)** ; un modèle d'analyse-synthèse est enfin proposé pour modéliser les signaux de fermeture de porte **(Chapitre VI)**.

Chapitre IV. Perception des bruits de fermeture de porte en situation réelle

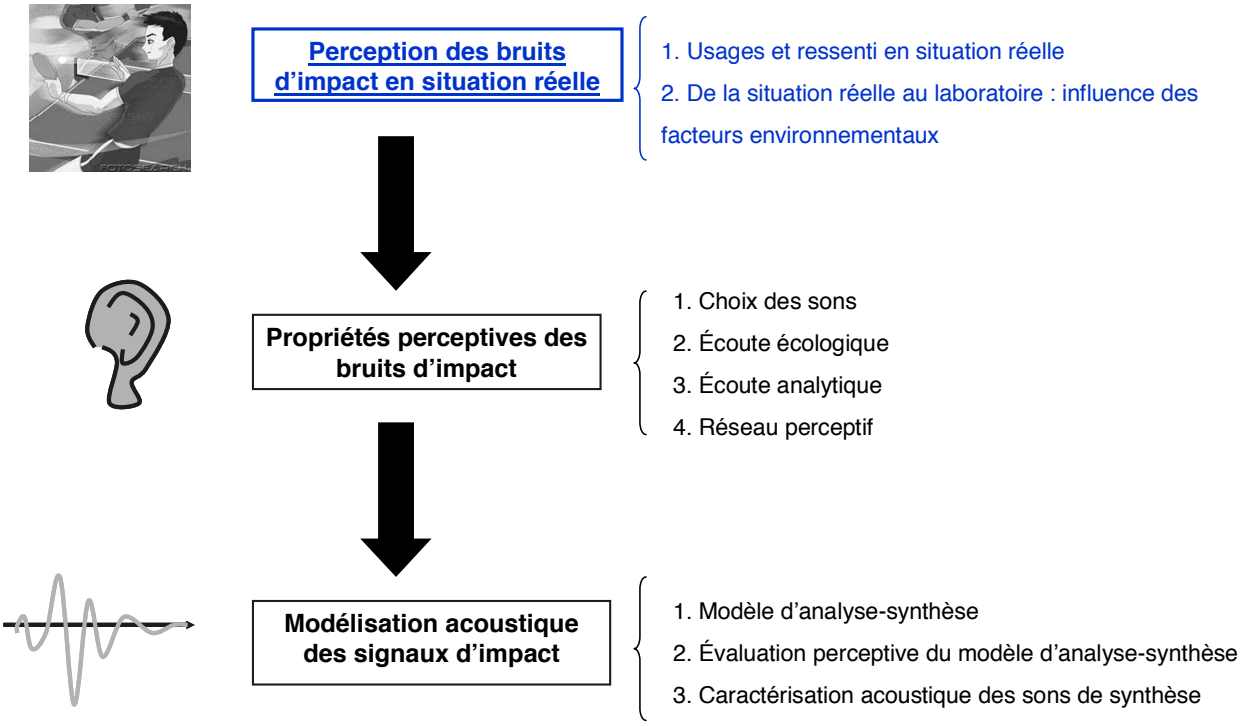


Figure 12 Démarche pour l'étude des bruits de fermeture de porte

Suivant la démarche précisée Figure 12, la perception des bruits d'impact est d'abord étudiée en situation réelle. L'approche qualitative permet d'observer les usages et le ressenti dans une situation proche de la réalité, et met en évidence les facteurs environnementaux influents, comme les autres modalités sensorielles et les attentes des sujets **(1)**. Pour générer des données quantitatives, elle est complétée par une caractérisation spécifique du bruit au laboratoire. La caractérisation des différences d'évaluation des bruits en situation naturelle et au laboratoire est alors nécessaire pour relier les résultats obtenus en laboratoire à la situation réelle. Elle est envisagée comme un ensemble d'expérimentations qui évaluent pas à pas l'influence spécifique de facteurs environnementaux **(2)**.

1. Usages et ressenti en situation réelle

La perception des bruits de fermeture de porte est abordée dans une situation réelle, proche de la situation d'un client qui découvre des véhicules au salon de l'automobile (même si notre salle d'étude est plus calme).

D'une part, nous cherchons à observer les ***usages*** des clients dans l'approche globale des véhicules, pour en déduire les configurations dans lesquelles les bruits de fermeture de porte sont sollicités. Un ensemble de bruits de porte potentiels est émis lors de la découverte d'un véhicule : les bruits d'ouverture et de fermeture de porte, les bruits à l'intérieur et à l'extérieur du véhicule, les bruits à l'avant ou à l'arrière du véhicule, les bruits de porte avec vitres ouvertes ou vitre fermées. De plus, on observe le comportement du client, et le rôle du son dans la manœuvre. A l'approche d'un nouveau véhicule, le client doit adapter l'énergie mise dans le geste de fermeture, en fonction de la facilité de fermeture de la porte et en fonction du bruit entendu, puisque l'énergie mise dans la fermeture de la porte influe sur le bruit résultant. Il adapte son geste à la ''bonne façon'' de fermer la porte.
D'autre part, nous cherchons à décrire le ***ressenti*** lié au bruit de fermeture de porte à son écoute spécifique mais aussi sans que le client y porte explicitement son attention. On observe ainsi l'intérêt que le client porte naturellement à un tel bruit. On cherche également à décrire le ressenti par un ensemble d'évocations et de critères d'évaluation associés. Enfin, on cherche si le véhicule, à travers la manœuvre et l'image a priori, influence l'évaluation du bruit.

Après avoir décrit la méthodologie de l'étude qualitative **(1.1)**, nous présentons les principaux résultats **(1.2)**.

1.1 Méthodologie : approche qualitative

L'étude qualitative est réalisée avec l'institut Repères. Cet institut a proposé un protocole ethno-qualitatif pour répondre aux objectifs consignés dans un brief *(cf annexe ''brief étude qualitative'')*, puis réalisé les entretiens et observations, et enfin analysé les résultats : les analyses sont réalisées par des psychologues sur la base d'entretiens et d'observations ethnologiques. Nous ne sommes pas intervenus dans ces analyses. Notre participation ne porte que sur le choix des stimuli et la réalisation pratique de l'étude. L'ensemble des résultats est rassemblé dans un document interne (''Recherche de critères de d'évaluation d'un bruit d'ouvrant de qualité'' Rapport d'étude Etude n°7570-79, Mars 2006, Repères). Nous en résumons ici la méthodologie et extrayons les résultats utiles à notre problématique.

EXPERIENCE 1

Stimuli
6 véhicules de marques et gammes différentes sont choisis pour représenter une large gamme de qualité de bruit de porte, connue grâce à des expérimentations antérieures. Certains véhicules présentent par ailleurs des spécificités liées au bruit de fermeture ou à la manœuvre de porte, précisées Tableau 2. De plus, ces véhicules couvrent un panel de véhicule d'images très différentes :

de la berline plutôt luxe à petite voiture peu chère, des marques références aux marques plus généralistes.

Véhicule	Segment	Bruit de porte / Spécificités
V1	M1	bruit particulier, plutôt serrure
V2	M2	bruit bien perçu
V3	M2	bruit de porte arrière très différent en qualité du bruit de la porte avant Porte très lourde et autofermante (se ferme avec une énergie de fermeture particulièrement faible)
V4	B1	bruit particulièrement bien perçu pour ce niveau de gamme
V5	B2	bruit mal perçu
V6	M1	bruit bien perçu

Tableau 2 Véhicules choisis pour l'étude qualitative.
Les segments (B1-B2-M1-M2) représentent les tailles de véhicule
Exemples : B1 : Citroën C2 / B2 : Citroën C3 / M1 : Citroën C4 / M2 : Citroën C5.

Sujets

30 personnes âgées de 25 à 60 ans ont participé à l'étude : 15 personnes possédant un véhicule du segment B (9 hommes et 6 femmes) ont évalué les véhicules V4, V5 et V6 (segments B et M1) ; 15 personnes possédant un véhicule du segment M (9 hommes et 6 femmes) ont évalué les véhicules V1, V2 et V2 (segments M1 et M2). Les sujets sont indemnisés pour leur participation.

Protocole

Les sujets sont introduits dans une salle de grand volume dans laquelle sont présentés les 6 véhicules. Chaque sujet commence par évaluer en global un des six véhicules, sans qu'il soit fait référence au bruit de porte. Puis, il doit évaluer plus spécifiquement les bruits de porte de 3 véhicules (dont celui évalué en global). Chacune de ces parties fait l'objet d'une analyse mixte : à la fois éthologique et qualitative.

L'analyse mixte se décompose en deux étapes :

Une 1ère étape d'observation : partie éthologique avec une observation fine du comportement des clients. Les sujets sont filmés par de discrètes caméras pendant l'expérimentation. Les films sont analysés en mesurant les pourcentages d'occurrence des répertoires comportementaux propres à l'évaluation globale et à l'évaluation des bruits de porte, basés sur des critères de :

- comportements d'évaluations,
- localisation/distance,
- zones d'intérêt,
- position, posture,
- mobilité – déplacement,
- angle d'ouverture,
- intensité geste.

Une 2nde étape d'approfondissement : partie qualitative avec l'interrogation individuelle du sujet sur :

- les représentations des bruits de porte,

- le comportement observé (ce qui explique sa gestuelle, ses focalisations sur certaines zones, les difficultés rencontrées, …),
- les différents critères d'évaluation des bruits de porte,
- la hiérarchisation des critères,
- la définition du bruit de porte idéal.

Cette technique enrichit les données de la phase éthologique.

L'ensemble du test dure 1 heure et se déroule comme indiqué Figure 13.

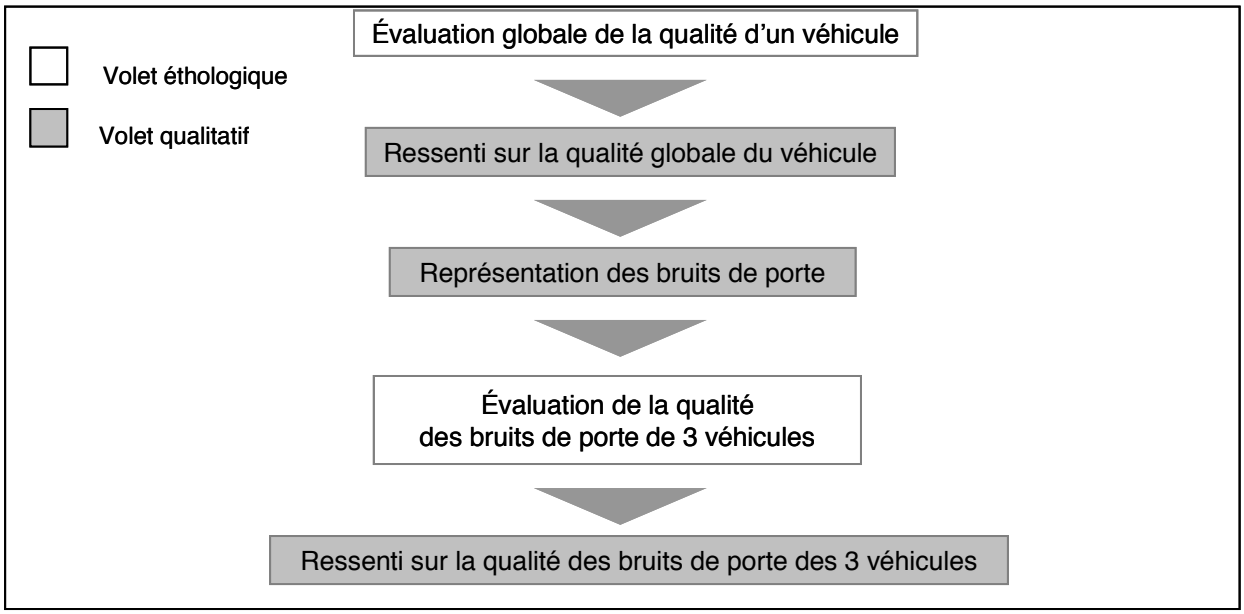


Figure 13 Protocole de l'étude qualitative

1.2 Résultats de l'étude qualitative

Trois profils de clients sont d'abord identifiés. Nous présentons ensuite les résultats sur les usages et le ressenti et constatons que les trois profils de clients se différentient sur les usages et sur le ressenti du bruit de fermeture de porte.

1.2.1 Profils de clients

Trois grandes dimensions sont mises en évidence pour apprécier la qualité globale d'un véhicule.
- La dimension solidité/sécurité : un véhicule doit exprimer des notions de protection vis-à-vis des « dangers extérieurs » (*« Il faut que ce soit quand même quelque chose d'assez costaud » ; « la solidité de la voiture en cas de crash »).*
- La dimension confort : les clients accordent de l'importance à la qualité des matériaux (*« le cuir, et la disposition des équipements »),* et à l'espace « à l'intérieur » (*« l'habitabilité, étant la mère de 2 enfants, ce n'est pas la voiture rêvée pour moi parce que derrière il n'y a pas vraiment d'espace »).*
- La dimension esthétisme/beauté : la ligne globale du véhicule, ses formes, sa couleur doivent être agréables (*« J'aime bien les voitures un peu sportives, qui ont de la gueule. »),* la présence de gadgets, d'éléments distinctifs sont souhaitées (*« Les petits trucs qui font la différence. »).*

Même si ces trois grandes dimensions coexistent pour l'ensemble des clients, certaines dimensions sont priorisées différemment en fonction de 3 profils (Tableau 3) :
- les ''inquiets'' : prédominance de la dimension de sécurité et de solidité (*« On dirait qu'on est en en sécurité dans la voiture au niveau de la carrosserie »),*
- les ''conviviaux'' : prédominance de la dimension de confort (*« Le confort de la conduite, les sièges, la forme des sièges»),*
- les ''esthètes'' : prédominance des éléments statutaires et de distinction (*«j'aime bien les trucs osés, oser les couleurs »).*

Profils de sujets différentiés…	…sur les critères d'évaluation d'un véhicule,
Inquiets	Solidité/Sécurité
Conviviaux	Confort
Esthètes	Distinction

Tableau 3 Profils de sujets différentiés sur les critères d'évaluations d'un véhicule.

1.2.2 Usages et configurations d'écoute

Evaluation du véhicule

Pendant l'évaluation globale du véhicule, le client s'intéresse autant aux éléments intérieurs qu'extérieurs. Lors de l'exploration de l'intérieur de l'habitacle, le conducteur ne porte aucune attention aux portes (l'intérieur des portes est très peu regardé ou touché) mais davantage aux éléments de conduite (levier de vitesse, volant, position de conduite) ou de confort (console centrale, boite à gants). Lors de l'évaluation de l'extérieur du véhicule, les portes, de préférence à l'avant-gauche du véhicule, sont rapidement sollicitées à la fois visuellement, dans le cadre de l'évaluation des côtés du véhicule qui prend une part importante dans l'analyse visuelle globale, et tactilement, pour entrer, dans la majorité des cas, dans le véhicule (et démarrer l'exploration de l'intérieur). Néanmoins cette sollicitation de la porte ne fait pas partie d'une évaluation spécifique de la porte mais s'intègre totalement dans l'évaluation globale du véhicule. La porte n'est pas un élément à part entière dans le véhicule mais fait partie intégrante d'un tout. De ce fait, les portes sont regardées pour juger de l'aspect extérieur de la voiture et manipulées pour juger de l'aspect intérieur du véhicule.
Finalement, très peu d'actions sont réalisées spécifiquement pour évaluer la porte en tant que telle. Toutefois lors des actions réalisées sur les portes, le client récolte des informations visuelles, tactiles et auditives qui lui permettent de juger des bruits de porte du véhicule. La moitié des clients réalisent tout de même entre 4 et 6 manœuvres d'ouverture/fermeture.

Evaluation du bruit de porte

L'évaluation des bruits de portes se fait par des manœuvres d'ouverture et de fermeture des portes à l'extérieur du véhicule, mais aussi par des va-et-vient avec la porte et des tâtonnements de la poignée. Nous précisons ces gestes ci-après.
- L'ouverture de la porte en 1 temps, avec une faible amplitude, permet au conducteur d'évaluer la présence ou non de bruit annexe désagréable lié au bruit d'ouverture. L'ouverture de la porte en 2 temps, avec une amplitude finale importante, n'a pas de lien direct avec l'évaluation du bruit de la porte. En effet, le conducteur marque des arrêts au niveau des différents crans de la porte pour évaluer ses niveaux d'angle et juger de la facilité de manœuvre (*« Ça veut dire qu'il y a un palier et*

quand elle est ouverte, il faut se pencher pour la ramener jusqu'au 1er palier ») et de la praticité d'accès (*« on n'a pas beaucoup de place dans les parkings »).*
- La fermeture en 1 temps, avec une faible intensité, permet au conducteur de juger de la facilité de fermeture de la porte, qui sera alors déterminée par la qualité du bruit. Le conducteur pousse la porte doucement : si le bruit est de qualité, alors la porte est correctement fermé (*« à la fermeture, j'ai à peine besoin d'accompagner la portière. On n'a pas besoin de claquer la porte ») ;* si le bruit est de mauvaise qualité, alors la porte n'est pas fermée correctement. L'accompagnement du geste lors de la fermeture permet d'atténuer l'intensité du bruit et peut alors servir de « bruit de référence » par rapport à la fermeture sans accompagnement. (*« Je l'ai accompagnée pour voir si mon bras allait encore diminuer le son par rapport au claquement et si en la tenant ça allait amortir encore plus. Il n'y a pas de différence. C'est bien amorti. »)* Les fermetures incorrectes correspondent principalement à une anomalie sensorielle sur l'évaluation du poids de la porte : le poids pressenti de la porte n'est pas en adéquation avec la facilité réelle de fermeture. (*« je les pensais plus légères, portes assez lourdes »).*
- Les mouvements de va-et-vient permettent une meilleure appréhension du poids de la porte et donc de l'effort nécessaire à fournir pour une bonne fermeture : la fermeture réussie de la porte étant déterminante dans l'évaluation d'un bruit de porte. (*« J'ai fait de courts aller-retour avec la porte pour juger de son poids »).*
- Le tâtonnement de la poignée, sans ouverture de la porte, n'a pas de lien direct avec l'évaluation du bruit de la porte. Le conducteur saisit la poignée pour évaluer son ergonomie, sa bonne prise en main. (« la poignée tombe vraiment sous la main…c'est vraiment parfait en terme d'ergonomie »). Toutefois, à cette étape, l'absence de bruit est valorisante *(«Très bien, un très bon a priori, la poignée ne fait pas de bruit… Il n'y a pas de bruits de cliquetis et de clac»).*

Quel que soit leur profil, les clients s'intéressent principalement à la porte avant de la voiture, avec un rapide comparatif de l'arrière et privilégient l'ouverture et la fermeture en 1 temps de la porte. Par ailleurs, ils se distinguent selon leurs usages (Tableau 4) :
- Les ''inquiets'' manœuvrent plus,
- Les ''conviviaux'' effectuent plus de va-et-vient,
- Les ''esthètes'' effectuent plus de « petits gestes tactiles » (exploration de la porte et tâtonnement de la poignée).

Profils de sujets différentiés…	…sur les critères d'évaluation d'un véhicule,	**…sur les usages.**
Inquiets	Solidité/Sécurité	**Plus de manœuvres**
Conviviaux	Confort	**Plus de va-et-vient**
Esthètes	Distinction	**Plus de petits gestes tacites**

Tableau 4 Profils de sujets différentiés sur les critères d'évaluations d'un véhicule, sur les usages.

1.2.3 Ressenti et influence du véhicule

On observe d'abord l'intérêt que le client porte naturellement au bruit de fermeture de porte. On cherche ensuite à décrire le ressenti par un ensemble d'évocations et de critères d'évaluation associés. Enfin, on observe, à partir des évaluations des 6 véhicules, l'influence du véhicule sur l'évaluation du bruit.

Intérêt porté au bruit de fermeture de porte

La place du bruit de porte dans l'appréciation globale de la qualité d'un véhicule dépend du profil de client (Tableau 5). Pour les ''inquiets'', le bruit de porte est un élément plutôt actif de la qualité d'un véhicule. Pour ce profil, le bruit de porte a spontanément des connotations plutôt positives car il est lié à leur recherche de sécurité. Pour les conviviaux et les esthètes, le bruit de porte est un élément périphérique de leur appréciation globale du véhicule. Pour ces profils, le bruit de porte a spontanément des connotations négatives car il est lié à un disfonctionnement. Néanmoins, les conviviaux recherchent un bruit « calme et doux », et les esthètes un bruit « personnalisé » *(« des bruits que l'on n'entend pas sur les autres voitures»).*

Profils de sujets différentiés…	…sur les critères d'évaluation d'un véhicule,	…sur les usages.	**…sur l'intérêt porté au bruit de porte,**
Inquiets	Solidité/Sécurité	Plus de manœuvres	**Ecoute spécifique**
Conviviaux	Confort	Plus de va-et-vient	**Pas d'écoute spécifique**
Esthètes	Distinction	Plus de petits gestes tacites	**Pas d'écoute spécifique**

Tableau 5 Profils de sujets différentiés sur les critères d'évaluations d'un véhicule, sur les usages, sur l'intérêt porté aux bruits de fermeture de porte.

Que les bruits soient spécifiquement écoutés ou non, ils sont très souvent entendus lors de la découverte du véhicule. De plus ils induisent pour l'ensemble des sujets des évocations générales sur le véhicule.

Evocations

Les bruits de fermeture de porte renvoient à des évocations générales sur le véhicule :

- la sécurité/solidité : plus le bruit sera amorti, plus la voiture sera fiable, solide et plus le client sera rassuré *« ça donne une solidité une robustesse au véhicule »* (V2) *« c'est moins molletonné, on se sent moins en sécurité »* (V5) *« Le bruit de charnière me rassure moins »* (V5),
- le confort : avec la sensation d'un espace confiné, d'un cocon, d'un lieu convivial dans lequel le conducteur sera à l'aise et pourra se concentrer *« c'est sourd, étouffé, ça donne une idée de cossu »* (V2) *« c'est un beau bruit, on peut parler d'autre chose»* (V3) *« on se sent comme dans un caisson, donc bien isolé du froid, du bruit, de l'humidité »* (V6) ; et en mineur, le sentiment que le moteur ne fera pas de bruit non plus *« on sera moins gêné par le bruit du moteur, elle sera agréable à conduire »* (V6)

Mais d'autres dimensions plus secondaires peuvent être touchées :

- le niveau de gamme : plus le bruit sera amorti, plus la voiture sera haut de gamme *« le bruit est plus sourd parce que la voiture est de gamme supérieure »* (V6),
- la qualité de finition : plus le bruit sera amorti, plus la voiture sera bien finie *« ça permet de juger le côté finition »* (V2),
- l'esthétisme (très mineur) : un bruit amorti renvoyant à l'idée d'une belle voiture « *la voiture on la trouve belle »* (V3).

Critères d'évaluation

Quatre dimensions, précisées Figure 14, sont mises en évidence pour évaluer un bruit de fermeture de porte.

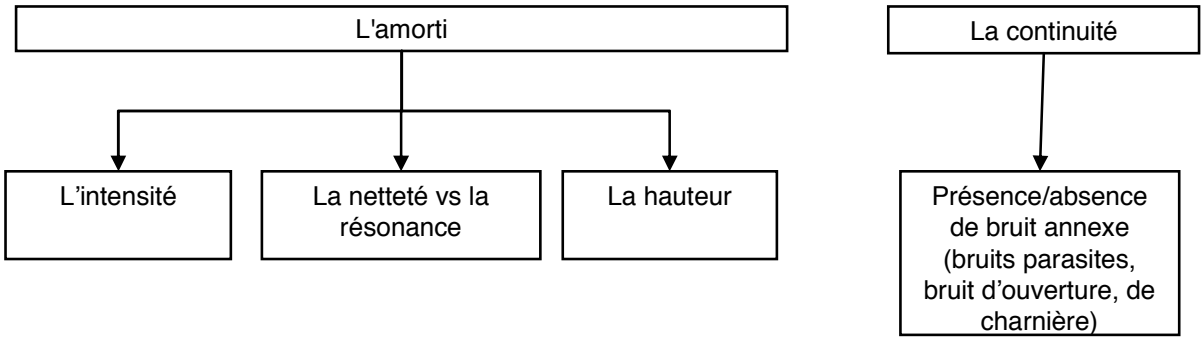


Figure 14 Critères d'évaluation des bruits de fermeture de porte

Ces critères d'évaluation sont exprimés par tous les clients, mais ils sont valorisés et connotés différemment suivant les 3 profils identifiés (Tableau 6).

Profils de sujets différentiés…	…sur les critères d'évaluation d'un véhicule,	…sur les usages.	…sur l'intérêt porté au bruit de porte,	…sur les critères d'évaluation d'un bruit de porte,
Inquiets	Solidité/Sécurité	Plus de manœuvres	Ecoute spécifique	**Hauteur**
Conviviaux	Confort	Plus de va-et-vient	Pas d'écoute spécifique	**Intensité, netteté**
Esthètes	Distinction	Plus de petits gestes tacites	Pas d'écoute spécifique	**Netteté**

Tableau 6 Profils de sujets différentiés sur les critères d'évaluations d'un véhicule, sur les usages, sur l'intérêt porté aux bruits de fermeture de porte, et sur leurs critères d'évaluation.

Les critères sont évalués à partir du bruit, mais ils sont associés à d'autres facteurs :
- l'énergie dépensée pour ouvrir ou fermer la porte, qui est un indicateur du volume sonore à venir (une manœuvre douce doit provoquer un son faible),
- le poids ressenti qui induit des exigences différentes en terme de hauteur (une porte lourde induit une plus grande exigence sur la hauteur du son, qui doit être d'autant plus grave) et d'intensité (plus la porte est lourde, plus l'intensité sera tolérée),
- les a priori sur le véhicule, sur la porte (Avant vs Arrière).

Les clients attendent une cohérence entre ces facteurs : une porte lourde et un son aigu disqualifient la voiture : « Je me dis ils ont loupé quelque chose dans la conception, dans la fabrication ». Pourtant, quelles que soient la gamme et la marque du véhicule, les clients attendent un unique bruit de porte : le bruit de porte ''idéal''. Une porte jugée légère peut présenter un son grave : cela suggère une voiture moderne avec des matériaux « high tech » « Ça montrerait que la voiture utilise des matériaux modernes car aujourd'hui plus besoin de choses lourdes et c'est tout autant solide » (V4).

Finalement, le bruit ''idéal'', décrit Figure 15, renvoie à un véhicule grand et une porte lourde, il doit être grave. Il est associé à une manœuvre douce, il est faible mais pas trop pour être sûr que la porte est bien fermée (*« il faut quand même un claquement pour qu'on se sente enfermé »).*

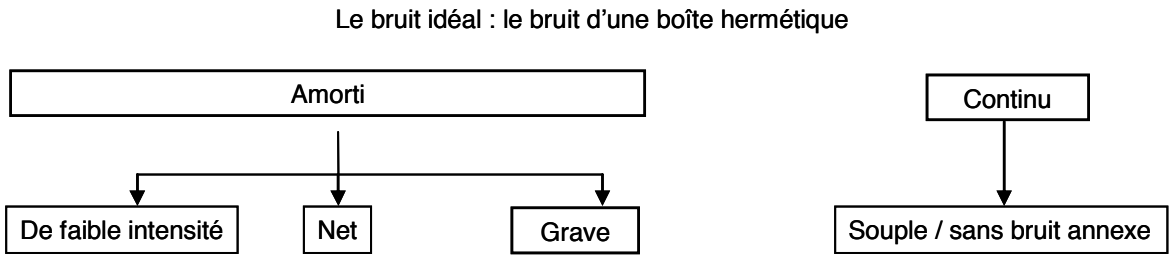


Figure 15 Bruit de fermeture de porte idéal

Les critères d'évaluation font référence à des propriétés analytiques (intensité, hauteur, netteté, bruits annexes) et des propriétés naturelles (poids de la porte, taille du véhicule, énergie de fermeture, porte bien fermée). Ces propriétés constituent un premier niveau de description du bruit de fermeture de porte, mais elles pourront être précisées à partir de tests quantitatifs en laboratoire.

Influence des véhicules

L'évaluation des bruits de fermeture de porte est parfois biaisée par l'influence du véhicule.

Le véhicule V3, dont les bruits de fermeture de porte avant présentent les caractéristiques du bruit idéal, est pénalisé par la manœuvre ressentie. La porte a besoin d'une très faible énergie pour être fermée (porte autofermante), ce qui est surprenant au regard du poids très élevé de la porte. L'adaptation du geste n'est en conséquence pas immédiate, et la porte est souvent fermée trop fortement, ce qui pénalise le bruit. A l'usage, le client adaptera son geste, et sera alors satisfait du bruit.

Le bruit de porte de V4 est pénalisé par l'image négative du véhicule. Il s'agit de l'image liée à la marque, mais également (surtout ?) au segment du véhicule.

Les sujets sont influencés par la manœuvre et de l'image du véhicule, dans le sens d'une meilleure évaluation pour une image positive. Ils croient pourtant être moins exigeants sur les bruits quand le véhicule a une mauvaise image.

Conclusion

L'approche qualitative permet de s'approcher de la situation réelle pour observer les usages et le ressenti en situation naturelle, et de mettre en évidence les facteurs environnementaux influents sur la perception du bruit de fermeture de porte.

Usages

Le bruit de fermeture de porte est un évènement fréquent lors de la découverte d'un véhicule. Le bruit de la porte avant gauche à l'extérieur du véhicule est principalement sollicité. Les vitres, présentées fermées lors de l'étude, ne sont pas ouvertes par les sujets. Les bruits d'ouverture, de poignée et de charnière sont perçus comme des bruits annexes, ces bruits doivent rester discrets. L'énergie de fermeture de porte est minimisée, de telle sorte qu'elle soit juste suffisante pour que la porte soit bien fermée. Pour minimiser l'énergie de fermeture, le client fait des va-et-vient pour estimer le poids de la porte. De plus, il accompagne la porte pour diminuer l'intensité du bruit. La perception d'une fermeture réussie de la porte est déterminante dans l'évaluation du bruit de porte.

Ressenti

Les bruits de fermeture de porte évoquent des impressions de solidité, de confort, de sécurité, de distinction, et plus généralement de qualité. Ces évocations sont ressenties par l'intermédiaire de :

- la hauteur, liée au poids de la porte et à la taille du véhicule, qui renvoie à des impressions de solidité et de sécurité, auxquelles les sujets ''inquiets'' sont plus attentifs,
- l'intensité, liée à l'énergie de fermeture et qui renvoie au confort, auquel les sujets ''conviviaux'' sont plus attentifs,
- la résonance vs la netteté, qui renvoie aux impressions de confort et de distinctions, auxquelles les sujets ''conviviaux'' et ''esthètes'' sont plus attentifs,
- la présence de bruits parasites, rejetés par tous.

Le bruit de fermeture de porte ''idéal'' attendu par les clients est de faible intensité, mais sans exagération pour entendre que la porte est correctement fermée. Le bruit doit être également net, grave, et sans bruit annexe. En plus d'informer que la porte est bien fermée, il doit renvoyer à un grand véhicule, un poids de porte ressenti lourd, et une manœuvre de faible énergie.

Les propriétés perceptives proposées par les sujets de cette étude constituent un premier niveau de description du bruit de fermeture de porte.

Facteurs environnementaux

Les facteurs environnementaux influencent l'évaluation des bruits de fermeture de porte. Les autres bruits de porte, comme ceux des portes arrière, les bruits d'ouverture et de poignée, les bruits de charnière pénalisent l'évaluation des bruits de fermeture de porte s'ils sont ratés. De plus, une image négative du véhicule induit une évaluation négative du bruit. Enfin la manœuvre est également un facteur influent : d'une part un geste désagréable peut pénaliser le bruit ; d'autre part, une manœuvre trop énergique génère des bruits moins bien perçus.

L'influence des facteurs environnementaux est observée qualitativement dans cette étude, et nous souhaitons encore la préciser à l'aide d'études quantitatives.

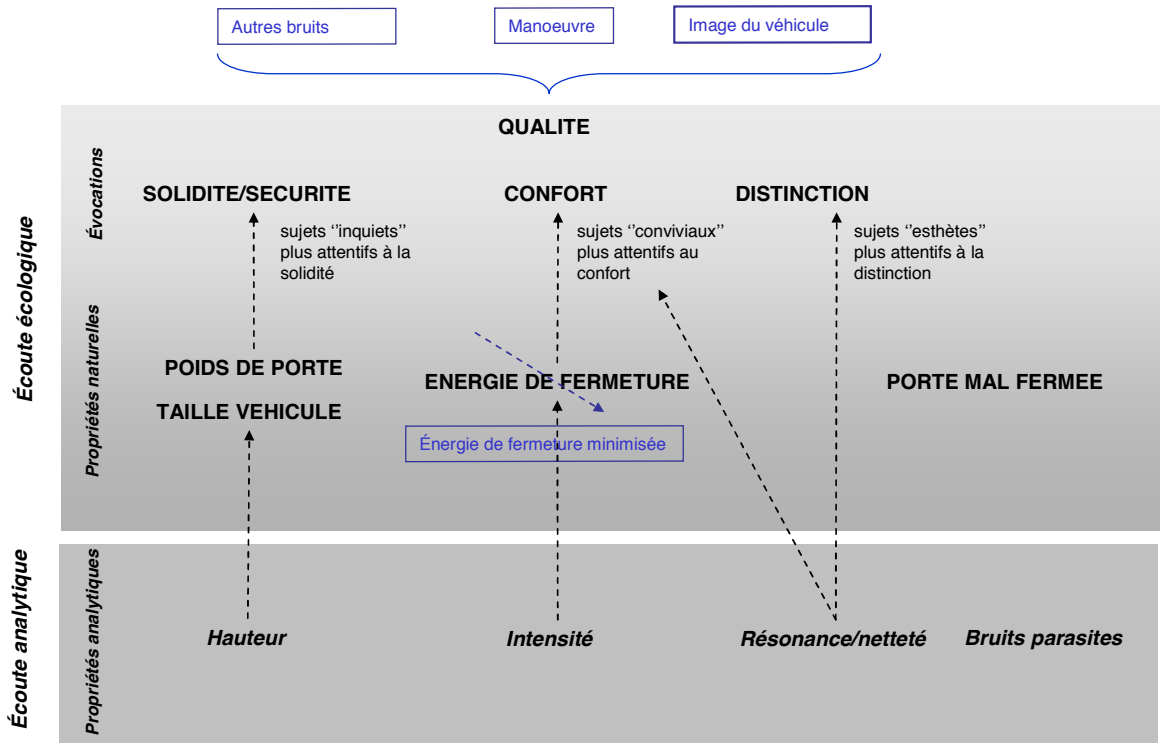


Figure 16 Evocations, propriétés naturelles et analytiques caractéristiques du ressenti – Facteurs environnementaux

L'étude qualitative permet d'observer les usages et le ressenti en situation presque réelle, et de mettre en évidence les facteurs environnementaux influents, comme la manœuvre ressentie et l'image du véhicule (Figure 16). Nous proposons de la compléter par une caractérisation spécifique du bruit au laboratoire en vue de la modélisation acoustique. La caractérisation des différences d'évaluation des bruits en situation naturelle et au laboratoire est alors nécessaire pour relier les résultats obtenus en laboratoire à la situation réelle. Elle est envisagée comme un ensemble d'expérimentations qui évaluent pas à pas l'influence spécifique des facteurs environnementaux observé qualitativement dans la présente étude.

2. De la situation réelle au laboratoire : influence des facteurs environnementaux

Nous cherchons dans cette partie à établir les liens entre les résultats obtenus au laboratoire et la perception en situation réelle. Nous spécifions d'abord, d'après les usages observés dans l'étude qualitative, un protocole de mesure des bruits de fermeture de porte pour les expérimentations en laboratoire **(section 2.1)**. En nous appuyant sur les facteurs environnementaux mis en évidence dans l'étude qualitative, nous réalisons ensuite une série d'expérimentations qui visent à évaluer l'influence des autres bruits de porte **(section 2.2)**, de la manœuvre **(section 2.3)**, et de l'image du véhicule **(section 2.4)** sur l'évaluation de la qualité que renvoie le bruit de fermeture de porte.

2.1 Stimuli de laboratoire

L'étude qualitative identifie les configurations d'écoute des bruits de fermeture de porte entendus par les clients dans une situation réelle de type découverte d'un véhicule. Ces configurations alimentent les protocoles de mesure des bruits de fermeture de porte nécessaires pour les études en laboratoire.

2.1.1 Configurations

Les bruits de fermeture de porte d'un véhicule peuvent être mesurés à partir de différentes configurations dont dépend le rendu sonore. La salle et la position des vitres influencent le bruit de porte. Les bruits peuvent être écoutés à l'intérieur ou à l'extérieur du véhicule. Les différentes portes d'un même véhicule émettent différents bruits. Enfin, pour une même porte, différents bruits sont émis en fonction de l'énergie de la fermeture. L'énergie de fermeture peut être contrôlée par un capteur de vitesse. Le bruit de fermeture de porte d'un véhicule est donc conditionné par la réponse de salle, la position des vitres, le lieu de l'écoute par rapport au véhicule (intérieur/extérieur), la porte mesurée, et la vitesse de fermeture (Tableau 7).

Salle et position des vitres

Les concessions présentent toutes des architectures différentes, et les véhicules y sont plus souvent présentés avec les vitres ouvertes. Mais les clients écoutent également les bruits de porte dans leur garage, en extérieur, et la plupart du temps les vitres sont fermées. Pour rester général, on choisit d'effectuer les mesures avec les vitres fermées, en Chambre Semi Anéchoïque (CSA). La mesure en CSA correspond à un parking extérieur infini. Sans être écologiquement parfaite, elle reste un lieu parfaitement contrôlé.

Porte et point d'écoute

D'après l'étude qualitative, lors de la découverte d'un véhicule, les bruits de fermeture des portes avant, à l'extérieur du véhicule, sont principalement écoutés. Néanmoins toutes les portes sont ensuite utilisées par le client et ses passagers. Pour plus de généralité, nous choisissons alors de travailler sur l'ensemble des portes. Le bruit intérieur, moins important pour la concession, n'est pas étudié.

Vitesse de fermeture

Les clients ‘’minimisent’’ l’énergie mise dans la fermeture, de telle sorte qu’elle soit juste suffisante pour que la porte soit bien fermée. Le client actionne en réalité la porte avec un peu plus d’énergie que celle juste suffisante, sinon il manquerait très souvent la fermeture. La vitesse minimale de fermeture est très variable selon les architectures de véhicules. Nous définissons alors une vitesse de fermeture ‘’client’’ (*Vclient*) qui correspond à la vitesse de fermeture minimale à laquelle on ajoute une constante. Mais l’énergie de fermeture de porte varie probablement selon les clients, selon leurs humeurs, ou selon leur connaissance ou non du véhicule. Pour parfaitement caractériser les bruits de fermeture de porte, indépendamment de la manœuvre, nous faisons le choix d’étudier les bruits de porte à différentes vitesses de fermeture. En plus de la vitesse de fermeture client, nous spécifions la vitesse minimale (*Vmin*) et une vitesse de référence constante, plutôt élevée, appelée *Vmax*.

Salle	Vitres	Intérieur/extérieur	Porte	Vitesse de fermeture
CSA	Fermées	Extérieur	Toutes	Vmin Vclient = Vmin + Cste Vmax=1.5m/s

Tableau 7 Configurations de mesure

2.1.2 Protocoles de mesure et restitution audio

Le véhicule est placé en Chambre Semi Anéchoïque (CSA). Un mannequin acoustique Head Acoustics enregistre le bruit de fermeture de porte, avec une calibration de 104dB. La tête acoustique est placée dans une position représentative d’une fermeture de porte, à l’extérieur du véhicule. Elle est montée sur un pied à 1m60, à 70cm à l’extérieur de la porte et 40cm en arrière, avec un angle de 45°, comme indiqué Figure 17. Un capteur de vitesse contrôle la vitesse de fermeture.

Figure 17 Protocole de mesure : position de la tête acoustique et du capteur de vitesse

Dans l’ensemble des expérimentations, sauf mention contraire, les stimuli sont écoutés dans le laboratoire de la société Eurosyn (chargée du recrutement), pour que les sujets ne soient pas

influencés par la connaissance du commanditaire de l'étude, avec des systèmes de restitution composés de :

- PC Hewlett Packard
- pré-amplificateurs Head Acoustics PEQ IV
- amplificateurs Head Acoustics PV A IV.2
- casques électrostatiques Head Acoustics HA II

L'écoute se fait en binaural, dans une salle non contrôlée au bruit ambiant faible.

Maintenant que nous avons décrit les stimuli de laboratoire, nous cherchons à caractériser les différences entre les évaluations des bruits de fermeture de porte relevées au laboratoire et en situation réelle. Nous réalisons à cet effet une série d'expérimentations qui visent à évaluer l'influence des autres bruits de porte, de la manœuvre et de l'image du véhicule sur l'évaluation de la qualité que renvoie le bruit de fermeture de porte.

2.2 Influence d'autres bruits de porte

En plus du bruit de porte avant, les bruits des portes arrière, les bruits d'ouverture, de poignée et de charnière sont également entendus et peuvent influencer l'évaluation du bruit. Les bruits de fermeture des portes arrière doivent être de bonne qualité ; les bruits d'ouverture, de poignée et de charnière sont perçus comme des bruits annexes, ils doivent rester discrets. Nous proposons d'étudier spécifiquement l'influence des portes arrière, puis l'influence du bruit d'ouverture de porte.

2.2.1 Influence des portes Avant/Arrière

L'expérimentation suivante cherche à quantifier le poids des portes avant et arrière dans l'évaluation globale du bruit de fermeture de porte.

EXPERIENCE 2a

Stimuli

Parmi l'ensemble des mesures disponibles, 8 couples de bruits de fermeture de portes avant et arrière sont sélectionnés. Parmi ces couples, 4 bruits sont mesurés à Vmin et 4 bruits à Vmax. Ces bruits présentent des différences perceptives établies d'après des expérimentations internes (rapports internes). De plus, certains couples Avant/Arrière présentent des bruits très différents, tandis d'autres sont homogènes.

Sujets

100 sujets participent à l'expérimentation, dont 60 hommes et 40 femmes. 30 ont moins de 35 ans, 48 ont entre 35 et 50 ans, 22 ont plus de 50 ans. Ils possèdent tous un véhicule neuf acheté dans les 4 dernières années. Les sujets sont indemnisés pour leur participation.

Protocole

L'ensemble des sujets doit évaluer en monadique « la qualité du véhicule que renvoie(nt) le(s) bruit(s) de fermeture de porte » sur une échelle continue allant de « très mauvaise qualité » à « très bonne qualité » de 3 séries de bruits de fermeture de porte :

- 8 bruits de porte Avant,

- 8 bruits de porte Arrière,
- 8 couples de portes Avant et Arrière.

Les interfaces sont réalisées sous Labview.

Pour les 3 séries, les stimuli sont présentés selon un plan de présentation de type carré latin, pour éviter d'éventuels effets d'ordre, après écoute de 3 exemples très différents.

Ces évaluations sont dispersées dans une expérimentation d'une heure (*EXPERIENCE 2*), si bien que les sujets ne se rappellent pas des bruits de la série des portes Avant et Arrière, quand ils évaluent les séries des portes Avant, puis des portes Arrière.

Résultats *(cf annexe INSITU_LABORATOIRE)*

Aucune classe de sujets n'est identifiée pour les évaluations des 3 séries de stimuli (Classification Ascendante Hiérarchique et comparaison des Duncan par classes éventuelles). Les évaluations moyennes des bruits pour les 3 séries sont présentées Figure 18. Les stimuli sont évalués sur des échelles allant de 0 (très mauvaise qualité) à 10 (très bonne qualité). Ils sont bien discriminés (test de Duncan).

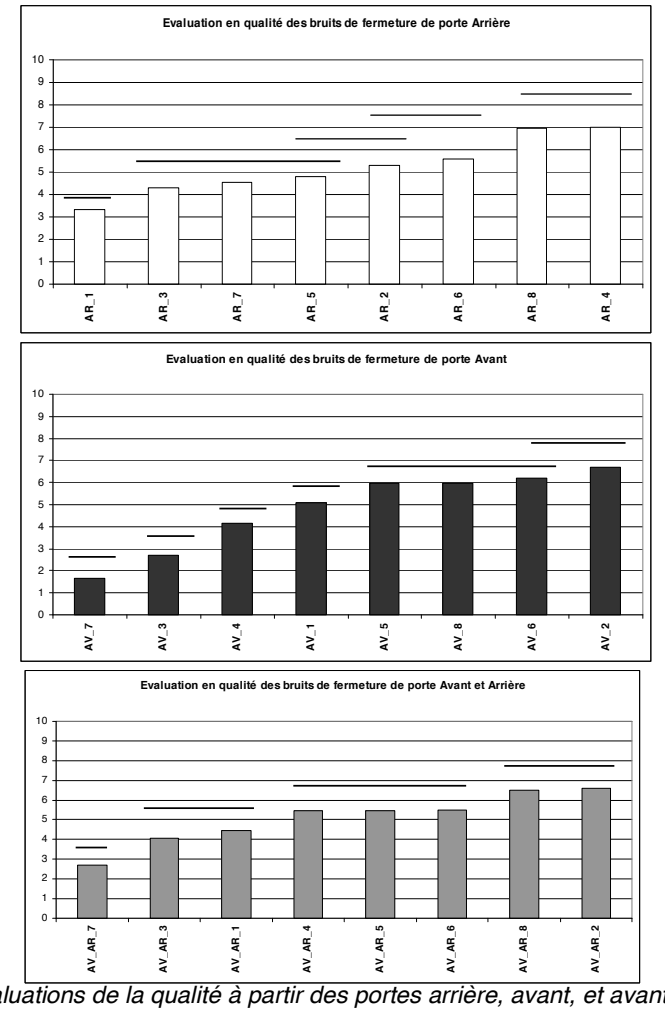


Figure 18 Evaluations de la qualité à partir des portes arrière, avant, et avant-arrière
(0 : très mauvaise qualité) / 10 : très bonne qualité)
Les barres horizontales regroupent les stimuli qui ne sont pas discriminés (par test de Duncan).

Certains véhicules présentent des portes avant et arrière de même niveau de qualité (ex : 3, 8), d'autres ont une porte avant mieux perçue (ex : 2), ou une porte arrière mieux perçue (ex : 4).

Les évaluations des portes avant et des portes arrière sont indépendantes. La relation entre les évaluations des portes Avant/Arrière et celles de portes Avant seul et Arrière seul est établie par régression linéaire sur les moyennes normées (Eq 3).

AV/AR_estimé = aAV + bAR (R2=0.93), a>b (Éq 3)

La régression linéaire permet de prédire correctement le jugement des bruits de portes Avant/Arrière (Figure 19).

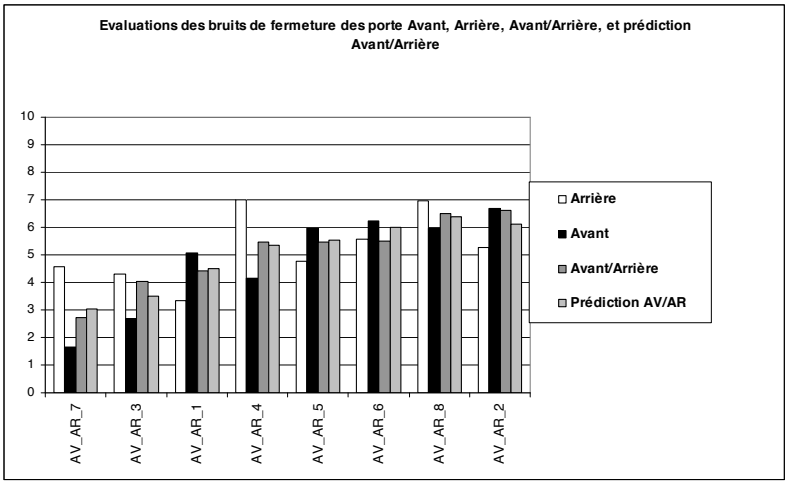


Figure 19 Influence des portes avant et arrière.
(0 : très mauvaise qualité) / 10 : très bonne qualité).
Comparaison des évaluations de la qualité à partir des portes arrière, avant, avant-arrière, et prédiction des évaluations avant-arrière à partir des évaluations arrière et avant (Eq. 3)

Conclusion

Comme dans l'étude qualitative, on retrouve la prédominance des portes Avant sur les portes Arrière pour évaluer le bruit de fermeture de porte. Cette prédominance est ici quantifiée : les portes Avant sont plus influentes que les portes Arrière pour évaluer globalement le bruit de fermeture de porte d'un véhicule, à partir du moment où le bruit de porte arrière est entendu (ce qui n'est pas toujours le cas en situation réelle). L'homogénéité ou l'inhomogénéité de certains couples n'influence pas le jugement.

2.2.2 Influence des bruits d'ouverture

L'expérimentation suivante est réalisée pour évaluer l'influence du bruit d'ouverture sur la qualité que renvoie le bruit de fermeture de porte.

EXPERIENCE 2b

Stimuli

Parmi l'ensemble des mesures disponibles, 25 bruits de fermeture de portes sont sélectionnés, dont 13 sont mesurés à Vmin et 12 à Vmax. De plus, les mesures de 20 bruits d'ouverture sont réalisées sur ces mêmes véhicules suivant le même protocole. 25 stimuli d'ouverture et fermeture sont créés par concaténation d'un bruit d'ouverture et d'un bruit de fermeture, séparés de 1.2s.

Sujets

100 sujets participent à l'expérimentation, dont 60 hommes et 40 femmes. 30 ont moins de 35 ans, 48 ont entre 35 et 50 ans, 22 ont plus de 50 ans. Ils possèdent tous un véhicule neuf acheté dans les 4 dernières années. Les sujets sont indemnisés pour leur participation.

Protocole

L'ensemble des sujets doit évaluer en monadique « la qualité du véhicule que renvoient le bruit de fermeture (ouverture) de porte » sur une échelle continue allant de « très mauvaise qualité » à « très bonne qualité » de 3 séries de sons :

- 20 bruits d'ouverture,
- 25 bruits de fermeture,
- 25 bruits d'ouverture/fermeture des portes.

Les interfaces sont réalisées sous Labview.

Pour les 3 séries, les stimuli sont présentés selon un plan de présentation de type carré latin, pour éviter d'éventuels effets d'ordre, après écoute de 3 exemples très différents.

Ces évaluations sont dispersées dans une expérimentation d'une heure (*EXPERIENCE 2*), si bien que les sujets ne se rappellent pas des bruits de la série des bruits d'ouverture/fermeture, Avant et Arrière, quand ils évaluent les séries de bruits d'ouverture, puis de bruits de fermeture.

Résultats *(cf annexe INSITU_LABORATOIRE)*

Aucune classe de sujets n'est identifiée pour résumer les évaluations des stimuli d'ouverture et d'ouverture/fermeture (Classification Ascendante Hiérarchique et comparaison des Duncan par classes éventuelles). Deux classes de sujets sont envisagées pour les évaluations des bruits d'ouverture, mais seuls 4 bruits sont classés différemment selon les classes de sujets : 2 bruits d'ouverture très faibles (des_13 et des_14) et 2 bruits d'ouverture plutôt bruyants (des_5 et des_6). Ces classes n'apportent pas d'informations pour modéliser l'influence du bruit d'ouverture sur l'évaluation des bruits de porte. Dans la suite, nous ne considérons que les évaluations moyennes pour l'ensemble des sujets.

Les évaluations moyennes des bruits pour les 3 séries sont présentés Figure 20, les stimuli sont évaluées sur des échelles allant de 0 (très mauvaise qualité) à 10 (très bonne qualité).

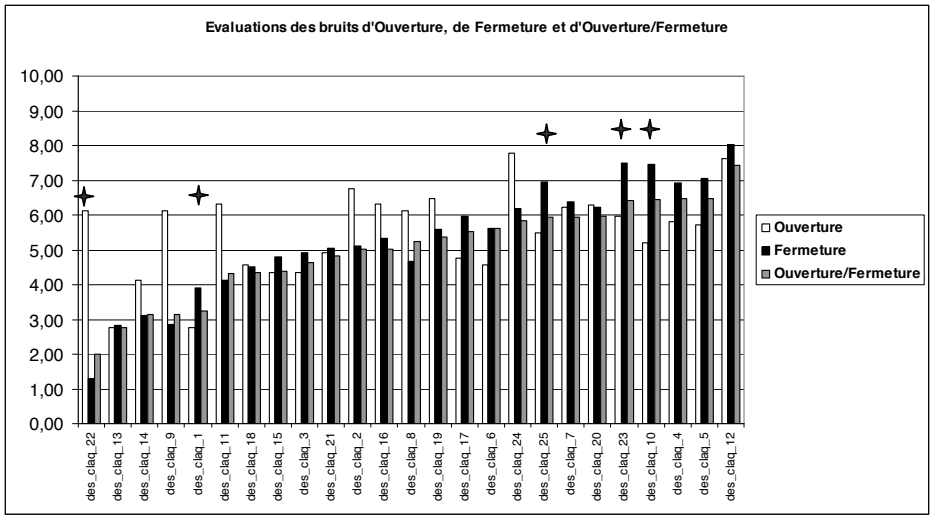


Figure 20 Influence du bruit d'ouverture
Comparaison des évaluations de la qualité à partir des bruits d'ouverture, de fermeture et d'ouverture/fermeture (0 : très mauvaise qualité) / 10 : très bonne qualité).
Les croix signalent les évaluations fermeture vs ouverture/fermeture discriminés (Duncan 5%).

Les évaluations des bruits de fermeture et des bruits d'ouverture/fermeture sont fortement liées (R=0.98), même dans les cas où les évaluations des bruits d'ouverture sont différentes de celles des bruits de fermeture. La comparaison des évaluations moyennes de fermeture et de fermeture/ouverture (ANOVA) montre que seuls 5 stimuli sont évalués légèrement différemment. Il n'y a globalement pas d'effet de l'ouverture sur l'évaluation du bruit de fermeture de porte ($F(24,4851)=3.13$, $p<0.001$).

Conclusion
Comme observé dans l'étude qualitative, le bruit d'ouverture est un bruit annexe. Il est négligeable tant qu'il reste discret. Au laboratoire, il n'influence pas du tout l'évaluation du bruit de fermeture de porte. Il ne faut pas le négliger pour autant, il peut tout de même dégrader l'évaluation globale du véhicule s'il est tout à fait raté.

2.3 Influence de la manœuvre

La manœuvre influence la perception du bruit de fermeture de porte : d'une part un geste désagréable peut pénaliser l'évaluation du bruit ; d'autre part, la manœuvre génère des bruits très différents en fonction de l'énergie affectée, qui sont donc évalués différemment. Nous proposons d'évaluer l'influence de la manœuvre, puis celle de l'énergie de fermeture.

2.3.1 Influence du ressenti lié au geste

L'influence du ressenti de la manœuvre sur la perception du bruit de fermeture ne peut s'observer que face à des véhicules. Il s'agit de faire évaluer à des sujets la qualité du véhicule que renvoient des bruits de fermeture de porte avec et sans manœuvre. La comparaison des évaluations permet de conclure sur l'influence de la gestuelle.

EXPERIENCE 1bis a

Stimuli
Les 6 véhicules (V1 à V6) choisis sont ceux utilisés pour l'étude qualitative. Ces véhicules sont de gamme et de marque différentes. Le véhicule V3 présente une porte très lourde mais autofermante : il se ferme avec une énergie de fermeture particulièrement faible. Cette caractéristique pénalise ce véhicule lors de l'étude qualitative.
Les portes Avant Droite et Arrière Droite des 6 véhicules sont mesurées en CSA (insitu_1 à insitu_12) (Tableau 8).

Insitu_s1	V2_AV
Insitu_s2	V2_AR
Insitu_s3	V1_AV
Insitu_s4	V1_AR
Insitu_s5	V5_AV
Insitu_s6	V5_AR
Insitu_s7	V4_AV
Insitu_s8	V4_AR
Insitu_s9	V3_AV
Insitu_s10	V3_AR
Insitu_s11	V6_AV
Insitu_s12	V6_AR

Tableau 8 Stimuli pour évaluer l'influence du ressenti lié au geste

Sujets

30 personnes, dont 18 hommes et 12 femmes, ont participé à cette expérimentation. 8 ont moins de 35 ans, 16 ont entre 35 et 50 ans, 6 ont plus de 50 ans. Ils possèdent tous un véhicule neuf acheté dans les 4 dernières années, ils sont donc bien des ''clients'' pour l'automobile. Les sujets sont indemnisés pour leur participation.

Protocole

L'ensemble des sujets doit évaluer en monadique « la qualité du véhicule que renvoie le bruit de fermeture de porte » sur une échelle continue allant de « très mauvaise qualité » à « très bonne qualité » dans 2 séries de 2 configurations :

- le sujet manœuvre,
- l'expérimentateur manœuvre.

On demande au sujet et à l'expérimentateur de manœuvrer naturellement. Le sujet prend le temps d'effectuer quelques manœuvres avant de réaliser l'évaluation, pour bien adapter son geste au véhicule. L'expérimentateur cherche de plus à être le plus reproductible possible. Mais les vitesses de fermeture ne sont pas relevées pour des raisons pratiques.

Des évaluations des bruits de fermeture de porte sur d'autres items sont demandées entre les 2 passations, pour que les sujets se rappellent le moins possible de leur première série d'évaluation. De plus, la moitié des sujets commencent par manœuvrer, l'autre termine par la manœuvrer pour contrôler l'effet d'ordre.

Pour chaque série, les portes sont présentées selon un plan d'expérience de type carré latin.

Les interfaces sont réalisées sous Fizz papier.

Résultats *(cf annexe INSITU_LABORATOIRE)*

Les sujets sont consensuels pour les 2 séries d'évaluations (Classification Ascendante Hiérarchique et comparaison des Duncan par classes éventuelles). Nous remarquons que les bruits de fermeture de porte sont mieux discriminés lorsque le sujet manœuvre (Figure 21).

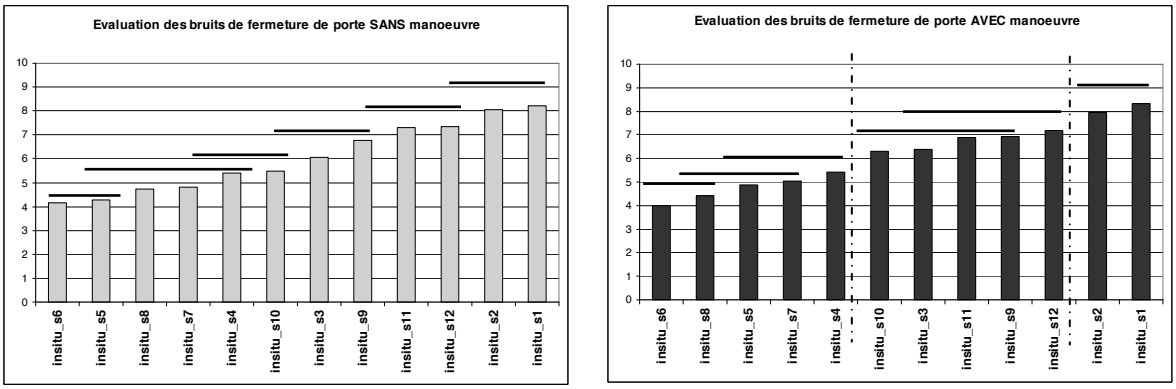


*Figure 21 Evaluations de la qualité SANS manœuvre (à gauche) et **AVEC manœuvre** (à droite)*
(0 : très mauvaise qualité) / 10 : très bonne qualité)
Les barres horizontales regroupent les stimuli qui ne sont pas discriminés (par test de Duncan).

Les évaluations des bruits de fermeture de porte avec et sans manœuvre sont fortement liées (R=0.97). L'ANOVA montre qu'il n'y a pas d'effet d'interaction manœuvre/bruit (F(11,666)=0.83, p=0.61). La manœuvre n'influence donc pas l'évaluation du bruit de fermeture de porte (Figure 22).

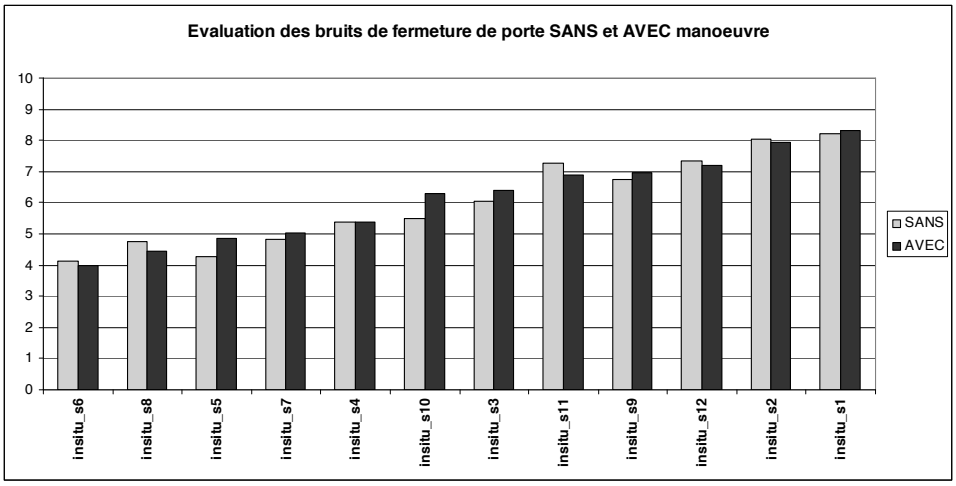


Figure 22 Influence de la manœuvre
Comparaison des évaluations de la qualité SANS et AVEC manœuvre
(0 : très mauvaise qualité) / 10 : très bonne qualité)

D'après les résultats de l'étude qualitative, Le véhicule V3 (insitu_s9 et insitu_s10) est pénalisé par la manœuvre ressentie. La porte a besoin d'une très faible énergie pour être fermée (porte auto-fermante), ce qui est surprenant au regard du poids très élevé de la porte. L'adaptation du geste n'est en conséquences pas immédiate, et la porte est souvent fermée trop fortement, ce qui pénalise le bruit. Nous n'observons pas de tels résultats dans cette expérimentation spécifique. Plusieurs hypothèses peuvent expliquer ce résultat. Dans cette expérience, les sujets prennent le temps de s'habituer au geste, ils appréhendent l'aspect auto fermant de la porte. Si le geste est bien adapté, le bruit est perçu de façon optimale. Par ailleurs, les sujets se concentrent peut-être plus sur le bruit lors de ce type d'évaluation.

Conclusion
Le ressenti lié au geste n'influence donc pas l'évaluation de la qualité que renvoie le bruit de fermeture de porte.

2.3.2 Influence de l'énergie de fermeture

Nous étudions à présent l'influence de l'énergie de fermeture sur la qualité que renvoie le bruit de fermeture de porte.

EXPERIENCE 3a

Stimuli

13 couples de bruits de fermeture de porte (P1 à P13) sont mesurés sur une même portière à deux vitesses de fermeture différentes. Pour 5 d'entre eux, les bruits sont mesurés à Vmin et Vclient ; pour 8 d'entre eux, les bruits sont mesurés à Vmin et Vmax. Ces bruits sont sélectionnés a priori pour leurs diversités perceptives, à partir d'études internes.

Sujets

120 personnes, dont 72 hommes et 48 femmes, sont recrutées. 48 ont moins de 35 ans, 46 ont entre 35 et 50 ans, 26 ont plus de 50 ans. Ils possèdent tous un véhicule neuf acheté dans les 4 dernières années. Les sujets sont indemnisés pour leur participation.

Protocole

Les sujets évaluent en monadique « la qualité du véhicule que renvoient le bruit de fermeture de porte » sur une échelle continue allant de « très mauvaise qualité » à « très bonne qualité ». On les informe auparavant que les portes sont fermées parfois doucement, et d'autre fois plutôt fortement.
Les bruits de fermeture de porte sont présentés selon un plan de présentation de type carré latin, après écoute de 4 exemples très différents.
L'interface est gérée sous Labview.

Résultats *(cf annexe INSITU_LABORATOIRE)*

Les 26 bruits de fermeture de portes sont discriminés en 4 groupes principaux (Duncan), illustrés Figure 23.

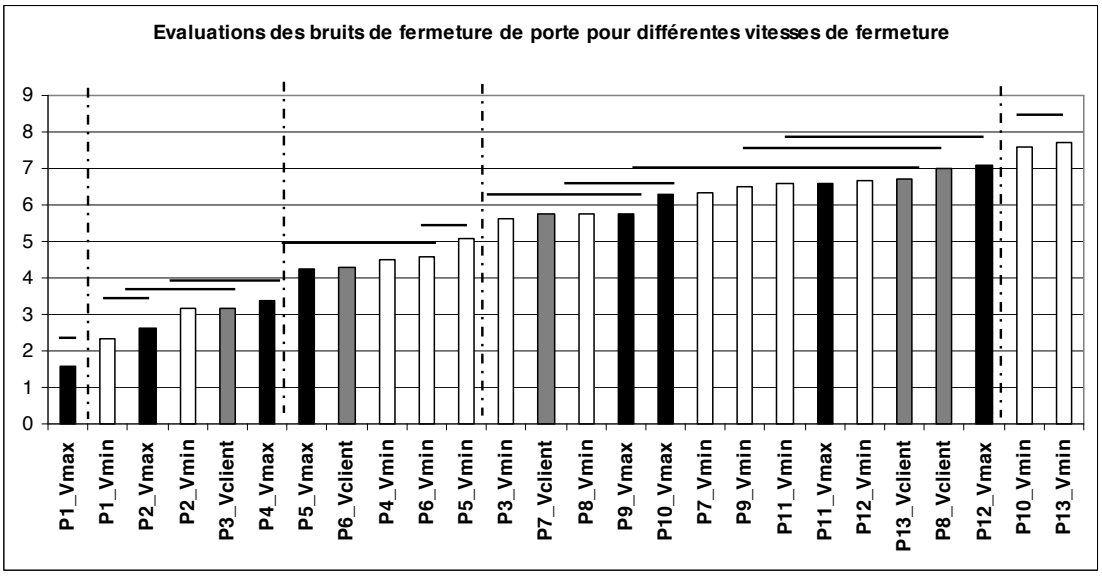


Figure 23 Evaluations de la qualité à partir de portes fermées à des vitesses différentes :
Vmin, Vclient, Vmax
(0 : très mauvaise qualité) / 10 : très bonne qualité)
Les barres horizontales regroupent les stimuli qui ne sont pas discriminés, par test de Duncan.
8 groupes de bruits principaux sont séparés (barres verticales).

6 portes sur 13 sont significativement jugées différemment en fonction de la vitesse de fermeture, dont 5 significativement dévalués par augmentation de la vitesse de fermeture (Figure 24).

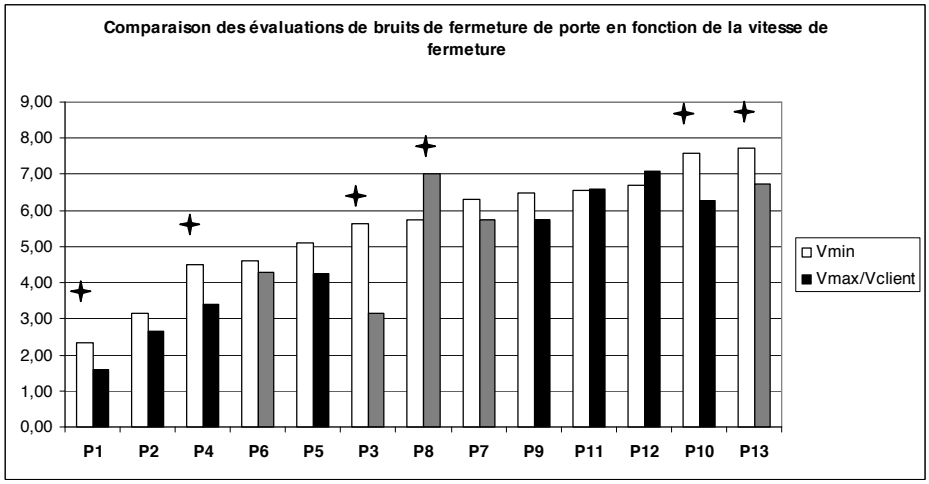


Figure 24 Influence de l'énergie de fermeture
Comparaison des évaluations à partir de portes fermées à des vitesses différentes :
Vmin, Vclient, Vmax
(0 : très mauvaise qualité) / 10 : très bonne qualité).
Les croix signalent les évaluations Vmin vs Vclient/Vmax significativement discriminés (Duncan 5%).

L'augmentation de la vitesse de fermeture a tendance à diminuer le jugement de qualité, mais l'effet n'est pas systématique. Il dépend des caractéristiques sensorielles des bruits de porte, et des vitesses de fermeture minimale : certaines sont très éloignées de Vmax (P5), d'autre non (P12).

L'effet de la vitesse de fermeture de porte est également dépendant des sujets. La classification ascendante hiérarchique suggère de séparer les 120 sujets en 2 classes de 41 et 79 sujets. La classe de 41 sujets ne pénalise pas les bruits à vitesse de fermeture élevée, contrairement à la classe de 79

sujets. Les classes de sujets sont caractérisées grâce à un questionnaire rempli en fin de test. A la question : ‘’Pensez-vous fermer votre portière doucement, modérément ou fortement ?’’, les sujets qui rejettent le plus les bruits à vitesse de fermeture élevée, répondent plus souvent ‘’doucement’’ que les sujets qui ne pénalisent pas les bruits à vitesse de fermeture élevée. Comme les ‘’conviviaux’’ de l’étude qualitative, on observe ici une classe de sujets plus sensible à l’énergie de fermeture de porte.

Les classes de sujets sont illustrées par analyse en composantes principales. L’ACP permet de représenter un ensemble de données multidimensionnel dans un espace à faible dimension de façon à obtenir une vision d’ensemble des données. Le principe de l’ACP est de trouver le meilleur modèle à k variables synthétiques (k<p : nombre de variables quantitatives) qui représente au mieux l’ensemble des informations de la matrice de données. Les données d’origine sont systématiquement centrées pour limiter l’impact de l’ordre de grandeur des variables. L’obtention des composantes principales se fait par diagonalisation de la matrice de variance – covariance. La première composante construite représente en fait l’axe de rotation autour duquel le nuage de points a la plus faible inertie, donc celui qui explique le mieux la dispersion des individus, qui maximise la variance expliquée. En étendant cette démarche au sous espace orthogonal, on trouve la seconde composante et ainsi de suite.
Les bruits de fermeture et les réponses des sujets sont projetés sur un plan à deux dimensions définies par les deux premières composantes principales, qui expliquent 64% de la variance totale (Figure 25).

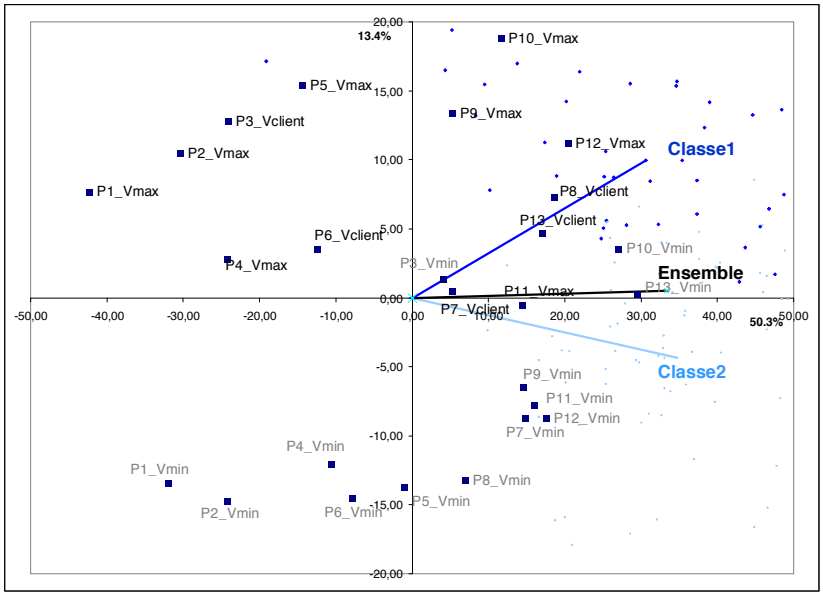


*Figure 25 Analyse en Composantes Principales des évaluations de la qualité : projection des bruits de fermeture de portes fermées à Vmin, **Vclient**, **Vmax** et de sujets sur les CP1 e CP2.*
Les traits désignent les directions moyennes des évaluations de l’ensemble des sujets, des sujets de la classe1 (sujets moins sensibles à la vitesse de fermeture), et des sujets de la classe2 (sujets plus sensibles à la vitesse de fermeture)

Conclusion
L’augmentation de la vitesse de fermeture pénalise l’évaluation de la qualité que renvoie le bruit de fermeture de porte, mais certains sujets y sont moins sensibles.

2.4 Influence de l’image du véhicule

Une partie des travaux de cette section a donné lieu à un acte de congrès :

[Bezat, M-C., Roussarie, V., Kronland-Martinet, R., Ystad, S., McAdams, S. (2006). Perceptual analysis of action-related impact sounds. *Euronoise 2006,* 30 May – 1 June, Tampere, Finland.]

L'influence de l'image du véhicule est observée en comparant les évaluations de bruits de fermeture de porte sur véhicule réel et au laboratoire. De plus, une expérimentation est réalisée au laboratoire avec des vidéos, pour évaluer l'influence de l'image du véhicule sur un grand nombre de sujets et avec des stimuli mieux contrôlés.

2.4.1 Influence de l'image du véhicule sur véhicule réel

EXPERIENCE 1bis b

Stimuli

Les 6 véhicules (V1 à V6) choisis sont ceux utilisés pour l'étude qualitative et pour le test sur l'influence du geste. Ces véhicules sont de gamme (segments B1 à M2) et de marque différentes (6 marques différentes) (Tableau 8). Le véhicule V4 présente un bruit particulièrement bien perçu pour ce niveau de gamme. Ce véhicule est d'ailleurs pénalisé par les sujets lors de l'étude qualitative.
Les portes Avant Droite (AV) et Arrière Droite (AR) des 6 véhicules sont évaluées sur véhicule (insitu_1 à insitu_12). L'ensemble de ces bruits de fermeture de porte est par ailleurs mesuré dans la salle d'expérimentation, à vitesse de fermeture Vclient (labo_s1 à labo_s12) (Tableau 9).

Laboratoire	Véhicule réel	
labo_s1	Insitu_s1	V2_AV
labo_s2	Insitu_s2	V2_AR
labo_s3	Insitu_s3	V1_AV
labo_s4	Insitu_s4	V1_AR
labo_s5	Insitu_s5	V5_AV
labo_s6	Insitu_s6	V5_AR
labo_s7	Insitu_s7	V4_AV
labo_s8	Insitu_s8	V4_AR
labo_s9	Insitu_s9	V3_AV
labo_s10	Insitu_s10	V3_AR
labo_s11	Insitu_s11	V6_AV
labo_s12	Insitu_s12	V6_AR

Tableau 9 Stimuli pour évaluer l'influence de l'image du véhicule

Sujets

30 personnes, dont 18 hommes et 12 femmes, ont participé à cette expérimentation. 8 ont moins de 35 ans, 16 ont entre 35 et 50 ans, 6 ont plus de 50 ans. 15 personnes possèdent un véhicule du segment B (9 hommes et 6 femmes) et 15 personnes, un véhicule du segment M. Les sujets sont indemnisés pour leur participation.

Protocole

L'ensemble des sujets doit évaluer en monadique « la qualité du véhicule que renvoie le bruit de fermeture de porte » sur une échelle continue allant de « très mauvaise qualité » (noté 0) à « très bonne qualité » (noté 10) les 2 séries de bruits réels et mesurés :

- les bruits entendus In Situ, face au véhicule, l'expérimentateur manœuvre (pour ne pas subir une éventuelle influence de la manœuvre, et pour que le geste soit le plus reproductible possible),
- les bruits entendus au laboratoire, par écoute des bruits mesurés.

Pour chaque série, les bruits sont présentés selon un plan de présentation de type carré latin.
Les interfaces sont réalisées sous Fizz papier pour la partie In situ, et sous Labview pour la partie laboratoire.
Les sujets commencent par la partie In Situ, puis réalise la partie laboratoire un autre jour, parmi un ensemble de tests sur les bruits de fermeture de porte (EXPERIENCE 1bis). Ainsi, ils ne peuvent reconnaître au laboratoire les bruits évalués In Situ.

Les sujets évaluent également la qualité des 6 véhicules, sur une échelle à 5 niveaux, allant de ''très mauvaise'' (noté 0) à ''très bonne'' (noté 10). Ils notent dans un questionnaire l'image a priori des véhicules proposés. Les sujets connaissent nécessairement ces véhicules, puisqu'ils ont déjà participé à l'étude qualitative quand ils remplissent le questionnaire (*EXPERIENCE1*). Enfin, les sujets indiquent s'ils ont une bonne image des 6 marques des 6 véhicules sur une échelle à 5 niveaux, allant de « non » à « oui ».

Résultats *(cf annexe INSITU_LABORATOIRE)*

- Evaluations au laboratoire et sur véhicule réel
Les sujets sont consensuels pour les 2 séries d'évaluations (Classification Ascendante Hiérarchique et comparaison des Duncan par classes éventuelles). Les bruits de fermeture de porte ne sont pas évalués de la même manière au laboratoire ou à partir du véhicule réel. On observe un effet d'interaction son/situation (Labo/In Situ) ($F(11,666)=10.53$, $p<.0001$). Les stimuli s7 et s8 par exemple, sont plutôt mal perçus quand ils sont évalués sur le véhicule réel (V4), tandis qu'ils sont bien notés au laboratoire (Figure 26).

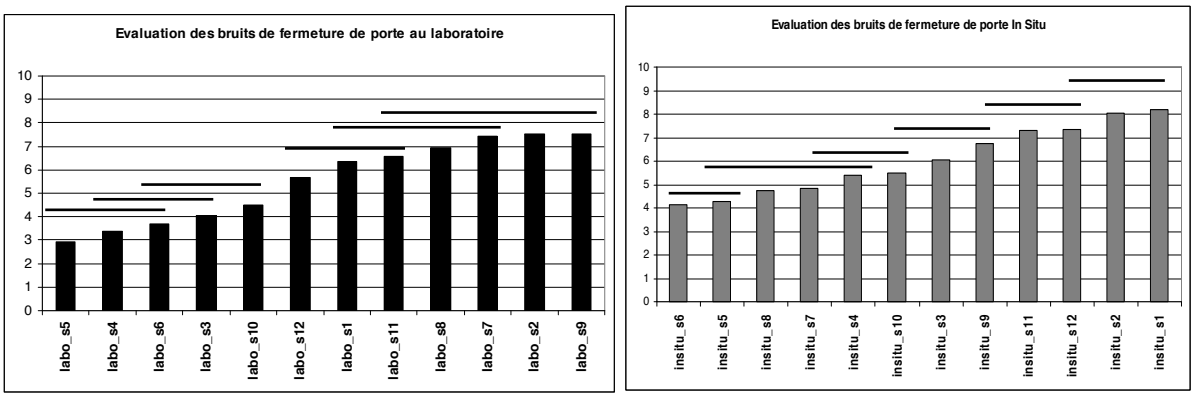


Figure 26 Evaluations de la qualité au Laboratoire, à gauche, et In situ (sans manœuvre), à droite
(0 : très mauvaise qualité) / 10 : très bonne qualité)
Les barres horizontales regroupent les stimuli qui ne sont pas discriminés, par test de Duncan.

- Image a priori du véhicule
La qualité a priori des véhicules, ou l'image des véhicules, est ici associée à la gamme des véhicules proposés : les véhicules de petite taille (V4) ont une moins bonne image que les véhicules de grande taille (V3, V2) (Figure 27).

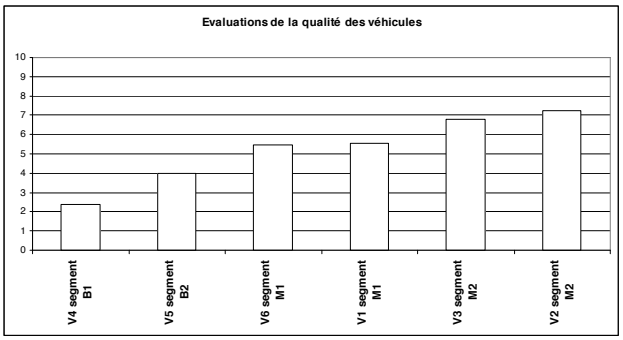


Figure 27 Evaluations de la qualité du véhicule que renvoient des véhicules (image a priori) (0 : très mauvaise qualité) / 10 : très bonne qualité).

- Influence de l'image a priori du véhicule

L'image du véhicule a une influence positive sur l'évaluation de la qualité que renvoie le bruit de fermeture de porte. Le bruit de la porte avant du véhicule V4 (s7) est évalué à 7.4 au laboratoire et décôté à 4.8 In Situ. Comme dans l'étude qualitative, le bruit de porte du véhicule V4 est pénalisé par l'image négative du véhicule. Inversement, la porte arrière véhicule V1 (s4), de plutôt bonne image, n'est évaluée qu'à 3.4 au laboratoire mais à 5.4 in situ.

Les évaluations au laboratoire des bruits de fermeture de porte et de l'image des véhicules sont indépendantes. La relation entre les évaluations des bruits In Situ (*InSitu*) et les évaluations au laboratoire *(Labo)* associées aux évaluations des véhicules *(Image)* est établie par régression linéaire sur les valeurs normées (Eq 4).

$$InSitu_estimée = cLabo + dImage \quad (R2=0.79) \ (Eq\ 4)$$

La régression linéaire permet de prédire correctement le jugement des bruits de porte In Situ (Figure 28).

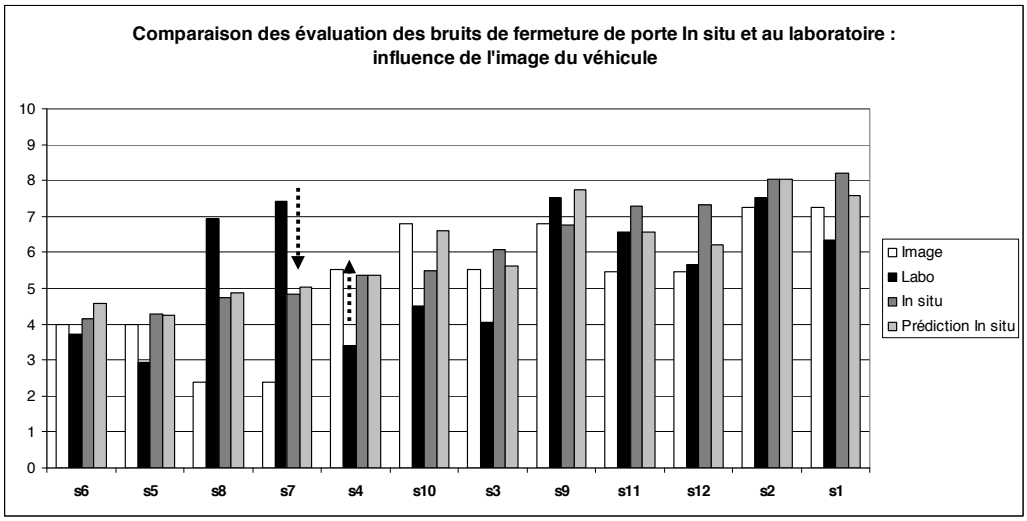


Figure 28 Influence de l'image du véhicule.
Comparaison des évaluations de l'image a priori des véhicules, de la qualité du véhicule que renvoient les bruits de fermeture des portes au Laboratoire, In Situ (sans manœuvre), et prédiction des évaluations In Situ à partir de l'image du véhicule et des évaluations des bruits au Laboratoire (Eq.) (0 : très mauvaise qualité) / 10 : très bonne qualité).
Les flèches illustrent un fort effet de l'image du véhicule sur l'évaluation du bruit de fermeture de porte : meilleure évaluation pour les véhicules qui ont une meilleure image, et vice versa.

Conclusion
Dans cette étude, l'image du véhicule influence largement l'évaluation de la qualité que renvoie le bruit de fermeture de porte, avec une meilleure évaluation pour les véhicules qui ont une meilleure image, et vice versa. L'image du véhicule s'exprime ici principalement par la gamme, nous observons donc un effet de la gamme, plus que de la marque.
Par ailleurs, le modèle n'est construit qu'à partir de 6 véhicules. Seuls 2 bruits (s7 et s8) sont très bien perçus par rapport au véhicule (V4), et 1 seul bruit est mal perçu par rapport au véhicule (V1). La régression obtenue est principalement influencée par ces associations. Pour améliorer la généralité du modèle, une expérimentation avec des vidéos est proposée. Elle permet d'étudier les effets d'image avec un plus grand nombre de sujets, sur un plus grand nombre de véhicules, et de contrôler les associations bruits - véhicules, par des montages vidéo. En particulier, on peut chercher les effets d'image du véhicule à iso segment en associant un même bruit à des véhicules de même segment mais de marque différente.

2.4.2 Influence de l'image du véhicule sur vidéos

L'influence de l'image du véhicule est observée en comparant l'évaluation de la qualité que revoient des bruits de fermeture de porte associés ou non à des véhicules, par l'intermédiaire de vidéos. On cherche en particulier à préciser l'influence de l'image de marque.

EXPERIENCE 3b

Stimuli
- Véhicules
On choisit 9 véhicules de gammes et marques différentes, dont 4 sont communs à l'expérience précédente (Tableau 10).

Segment/Marque	Marque1	Marque2	Marque3	Marque4	Marque5
B1	V9 (ex V4)				
B2				V6	V3
M1		V8 (ex V6)	V1		V4
M2			V2 (ex V3)	V7	V5 (ex V2)

Tableau 10 Véhicules choisis pour évaluer l'influence de l'image du véhicule sur vidéos

Les véhicules sont photographiés sous l'angle ¾ avant, et filmés alors qu'un expérimentateur ferme une porte arrière, avec un geste naturel, sur un parking extérieur. L'expérimentateur porte une blouse blanche, il n'est pas sensé être pris pour un client, pour ne pas perturber les sujets dans leurs futures évaluations.

- Sons
9 bruits de fermeture de porte (S1 à S9) mesurés en Chambre Semi Anéchoïque, à Vmax, sont sélectionnés. Ils renvoient a priori à des niveaux de qualité très différents. 8 des 9 sons font partie du corpus sonore de l'étude de l'influence de la vitesse de fermeture (*EXPERIENCE 3a*), les évaluations alors obtenues sont indiquées Tableau 11.

Code EXP 3b	Code EXP 3a	Qualité EXP 3a
S6	P1	1,6
S2	P2	2,6
S3	P4	3,4
S4	P5	4,3
S7	P9	5,8
S5	P10	6,3
S9	P11	6,6
S1	P12	7,1
S8		

qualité +

Tableau 11 Bruits de fermeture de porte choisis pour tester l'influence de l'image du véhicule sur vidéo

- Vidéos

Les vidéos sont montées avec le logiciel Première pour associer les véhicules et les sons de notre choix (précisé ci-après). On ajoute aux vidéos un bruit blanc auquel on applique un filtre passe bas pour simuler un bruit extérieur.

2 séries de 9 vidéos sont proposées à 2 groupes de sujets, auxquels on ne peut présenter qu'une association son/image puisqu'ils doivent croire au réalisme des vidéos. Les associations sons/véhicules sont réalisées en fonction des niveaux en qualité des bruits (évalués antérieurement), su segment et de l'image de marque des véhicules.

On associe à 6 bruits de fermeture de porte deux véhicules de même segment mais de marques différentes. On créé ainsi 12 vidéos pour observer l'effet de l'image du véhicule à iso segment. De plus, on ajoute 3 associations son/véhicule communes aux 2 séries. Elles servent de points de contrôle dans le but de cumuler les évaluations des 2 séries évaluées par des sujets différents. Pour 2 de ces associations, les images des véhicules (a priori liées au segment) sont très différentes du niveau de qualité du bruit (Bruit >> Image : S8_V9 ; Bruit << Image : S6_V8) ; la dernière association est constituée d'un son moyen et d'un véhicule moyen (S7_V7). Nous remarquons que l'association S8_V9 correspond au véhicule V4 du test précédent, pour lequel l'évaluation du bruit de fermeture de porte est largement pénalisée par l'image du véhicule.

Les 2 séries de vidéos sont précisées dans le Tableau 12.

Marque	Marque1	Marque4	Marque5	Marque2	Marque3	Marque5	Marque3	Marque4	Marque5
Segment	B1	B2	B2	M1	M1	M1	M2	M2	M2
son/véhicule	V9	V6	V3	V8	V1	V4	V2	V7	V5
S6				S6_V8					
S2					S2_V1	S2_V4			
S3		S3_V6	S3_V3						
S4							S4_V2		S4_V5
S7								S7_V7	
S5					S5_V1	S5_V4			
S9		S9_V6	S9_V3						
S1							S1_V2		S1_V5
S8	S8_V9								

qualité +

Tableau 12 Stimuli pour évaluer l'influence de l'image du véhicule sur vidéo :
2 séries de vidéos dont on précise les associations sons/véhicules.
vidéos série1, vidéos serie2, vidéos communes aux 2 séries.

Sujets

120 personnes, dont 72 hommes et 48 femmes, sont recrutées. 48 ont moins de 35 ans, 46 ont entre 35 et 50 ans, 26 ont plus de 50 ans. Ils possèdent un véhicule neuf acheté dans les 4 dernières années. 60 possèdent un véhicule de segment B, et 60 de segment M. 60 possèdent un véhicule des marques Peugeot ou Citroën. Les sujets sont indemnisés pour leur participation. Les 120 sujets sont répartis en 2 groupes homogènes pour évaluer les 2 séries de vidéos.

Protocole

Les sujets évaluent en monadique « la qualité du véhicule que renvoie le bruit de fermeture de porte » sur une échelle continue allant de « très mauvaise qualité » (noté 0) à « très bonne qualité » (noté 10) :

- les bruits entendus à partir des vidéos (la série1 pour la moitié des sujets ; la série2 pour l'autre), les sujets ne sont bien sûr pas informés que les vidéos sont truquées. Les vidéos sont présentés avec une photo avant des véhicules, et la référence des véhicules (Modèle et Marque). Ils sont ainsi bien informés du type de véhicule filmé. L'interface est présentée Figure 29.
- les bruits entendus seuls.

Pour chaque série, les bruits sont présentés selon un plan de présentation de type carré latin.
Les interfaces sont réalisées sous Visual Basic pour la partie Vidéos (Figure 29), et sous Labview pour la partie Sons seuls.
Les évaluations des vidéos et des sons seuls sont dispersées au sein d'une expérimentation d'1h15 (EXPERIENCE 3), si bien que les sujets ne font pas le rapprochement entre les bruits des vidéos et les bruits seuls.

Les sujets évaluent également la qualité a priori des 9 véhicules, sur une échelle continue allant de ''très mauvaise qualité'' (noté 0) à ''très bonne qualité'' (noté 10) (Figure 29). Enfin, les sujets indiquent s'ils ont une bonne image des 6 marques des 6 véhicules sur une échelle à 5 niveaux, allant de « non » à « oui ».

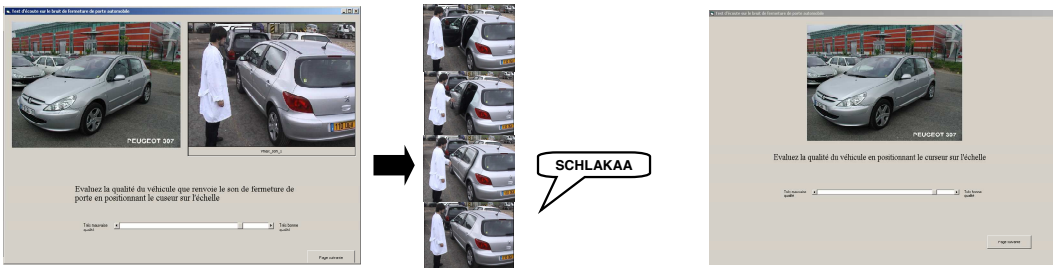


Figure 29 Interfaces: évaluations des bruits de fermeture de porte à partir des vidéos à gauche ; évaluation de la qualité des véhicules à droite

Résultats *(cf annexe INSITU_LABORATOIRE)*

Les sujets sont consensuels pour les différentes évaluations (Classification Ascendante Hiérarchique et comparaison des Duncan par classes éventuelles). Les évaluations des bruits seuls et des véhicules sont d'abord présentées. Ensuite, les évaluations à partir des bruits seuls et à partir des vidéos sont comparées pour observer l'influence de l'image du véhicule.

- Evaluations des sons

Les 9 bruits de fermeture sont discriminés en 7 (!!) groupes (Duncan) (Figure 30). Les sujets discriminent presque chaque stimulus ! Ils sont donc bien représentatifs de différents niveaux en qualité. Les évaluations des 8 stimuli communs au test sur la vitesse de fermeture (*EXPERIENCE 3a*) sont identiques à celles obtenues dans ce dernier test.

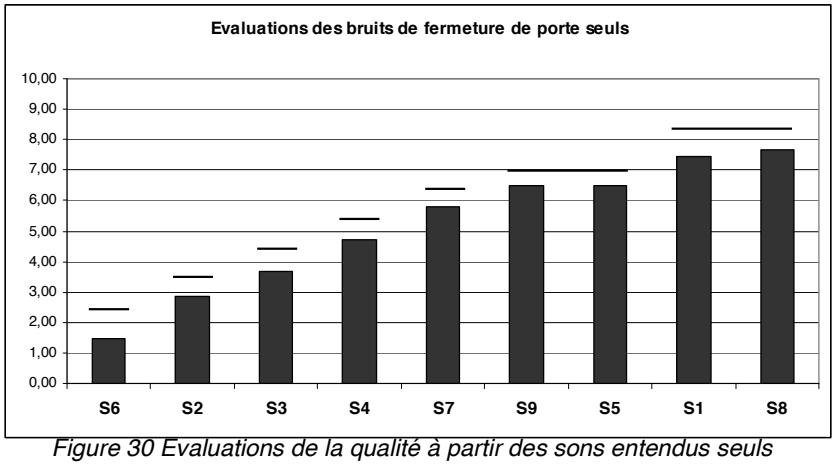


Figure 30 Evaluations de la qualité à partir des sons entendus seuls
(0 : très mauvaise qualité) / 10 : très bonne qualité)
Les barres horizontales regroupent les stimuli qui ne sont pas discriminés, par test de Duncan.

- Evaluations de l'image a priori des véhicules

Les 9 véhicules sont discriminés en 4 groupes (Duncan) (Figure 31). Les évaluations des véhicules communs au test In situ sur l'image du véhicule (EXPERIENCE 1bis b) sont similaires à celles obtenues dans ce dernier test.

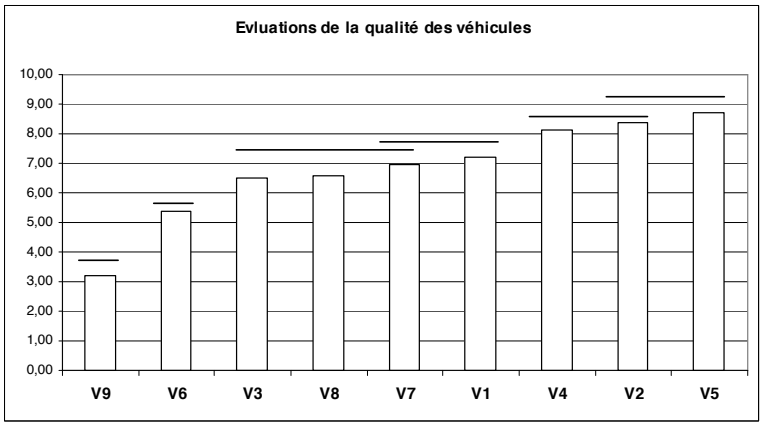


Figure 31 Evaluations de la qualité des véhicules
(0 : très mauvaise qualité) / 10 : très bonne qualité)
Les barres horizontales regroupent les stimuli qui ne sont pas différentiés, par test de Duncan.

L'image du véhicule est évaluée à partir du segment du véhicule (*Segment*), mais aussi à partir de l'image de marque (*Marque*). Les évaluations de l'image de marque et les segments (noté de 1 pour B1 à 4 pour M2) sont indépendants si on ne tient pas compte du véhicule V9. La régression linéaire entre les évaluations normées de l'image du véhicule (*Image*), et l'image de marque (*Marque*) associées au segment (*Segment*) permet de quantifier la part de l'image de marque dans l'évaluation de l'image a priori du véhicule (Eq 5).

Image_estimée = eSegment + fMarque (R2=0.96) (Éq 5)

De plus, même si les sujets sont globalement consensuels, certains sujets accordent moins d'importance à la marque. La classification ascendante hiérarchique suggère de séparer les 120 sujets en 2 classes de 53 et 67 sujets. La classe1 (53 sujets) accorde moins d'importance à l'image de marque pour évaluer l'image d'un véhicule que la classe2 (67 sujets). Les classes de sujets sont illustrées par analyse en composantes principales. Les véhicules et les réponses des sujets sont projetés sur un plan à deux dimensions définies par les deux premières composantes principales, qui expliquent 73% de la variance totale (Figure 32).

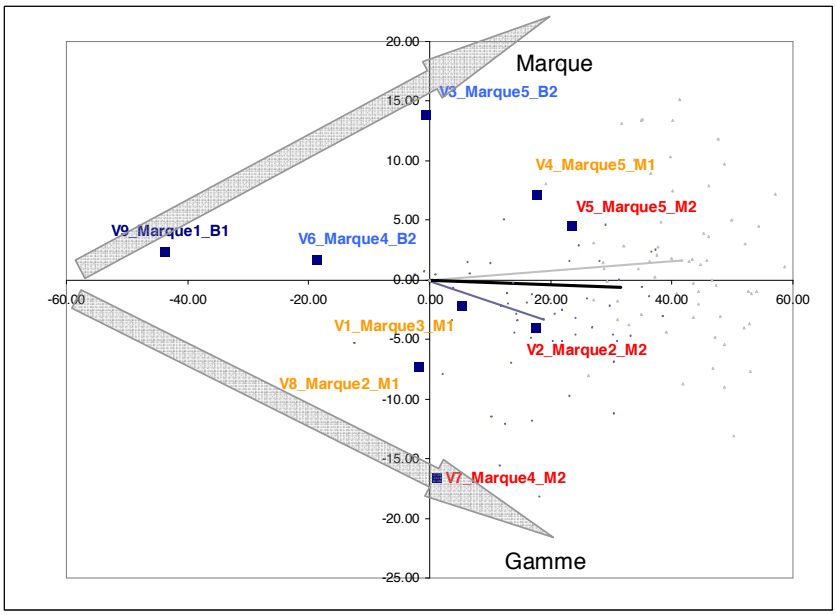


Figure 32 Analyse en Composantes Principales des évaluations de la qualité a priori des véhicules : projection des véhicules et des sujets sur les CP1 e CP2 :
segment B1, segment B2, segment M1, segment M2
Les flèches épaisses illustrent le classement des véhicules en fonction de la marque, et du la gamme.
Les traits fins désignent les évaluations moyennes de l'ensemble des sujets, des sujets de la classe1 (sujets moins sensibles à la marque), et des sujets de la classe2 (sujets plus sensibles à la marque).

- Influence de l'image du véhicule

Les évaluations des bruits à partir des vidéos sont comparées à celles des bruits seuls, pour les 2 séries de vidéos (Figure 33). Même si les évaluations sont très proches (r=0.98 pour la série1 et r=0.95 pour la série2), un faible effet d'interaction son/situation (Son seul vs vidéo) est observé pour les 2 séries (série1 : $F(8,969)=4.312$, $p<.0001$; série2 : $F(8,1003)=8.466$, $p<.0001$). Les évaluations significativement différentes dans les conditions ''son seul'' et ''vidéo'' sont identifiées par test de Duncan.

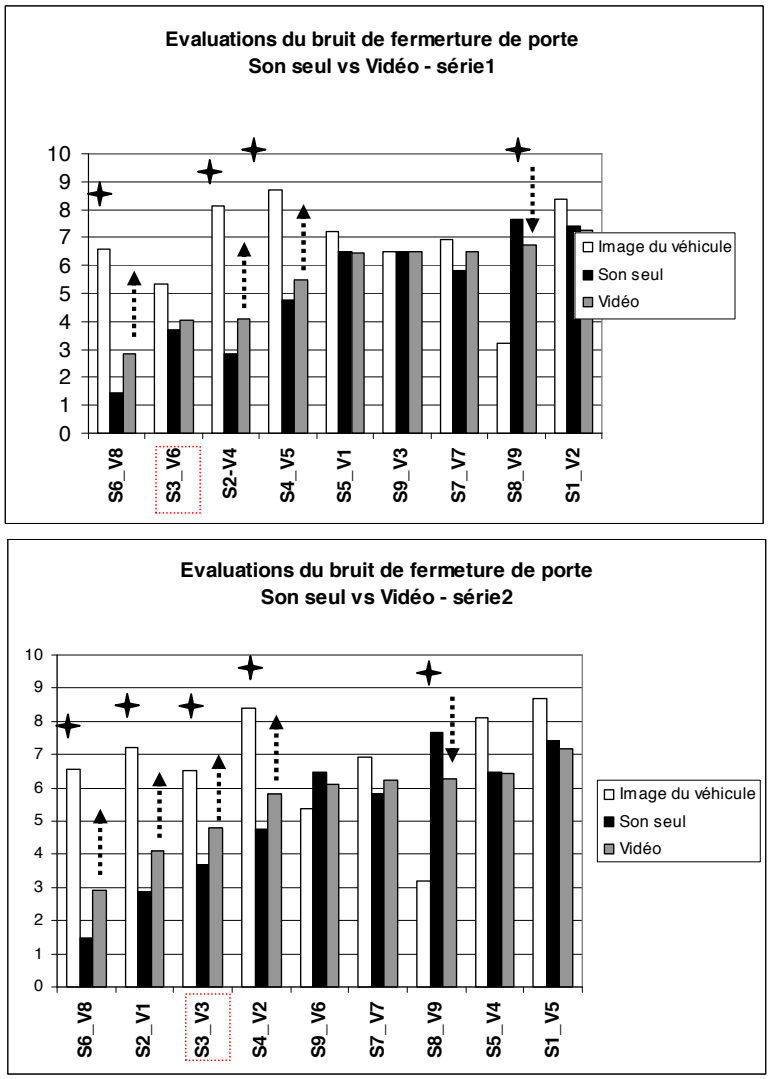


Figure 33 Influence de l'image du véhicule sur vidéo
Pour chaque série de vidéos (série1 en haut / série2 en bas), on compare les évaluations de l'image a priori des véhicules, de la qualité du véhicule à partir des sons seuls, et à partir des vidéos (0 : très mauvaise qualité) / 10 : très bonne qualité).
Les croix signalent les évaluations significativement différentiées.
Les flèches illustrent un faible effet de l'image du véhicule sur l'évaluation du bruit de fermeture de porte : meilleure évaluation pour les véhicules qui ont une meilleure image, et vice versa.

Une bonne image de qualité véhicule (associée au segment et à la marque) améliore l'évaluation d'un bruit de fermeture de porte médiocre (ex : S8_V9), au contraire une mauvaise image de qualité véhicule dégrade l'évaluation d'un bruit de fermeture de porte (ex : S6_V1). L'influence spécifique de l'image de marque est relevée. Les associations du son s3 aux véhicules V6 (S3_V6) et V3 (S3_V3), de même segment mais de marques différentes, sont évaluées différemment : l'image du véhicule V3 influence l'évaluation du bruit S3, tandis que l'image du véhicule V6, moins bonne que celle de V3, n'a aucun effet. L'effet de l'image véhicule à iso segment est ici démontrée.

- Influence de l'image du véhicule sur véhicule réel vs sur vidéos

Comme dans l'étude précédente In Situ, l'image du véhicule influence positivement l'évaluation de la qualité. Mais l'effet de l'image du véhicule est d'une ampleur moindre que celui observé sur véhicule réel. Nous comparons cet effet sur une association son-véhicule commune aux 2 tests : In situ,

l'influence du véhicule V4 dégrade l'évaluation du bruit de 2.6/10 ; tandis qu'avec la vidéo (S8_V9), l'évaluation du bruit n'est dégradée que de 1/10.

L'effet de l'image du véhicule avec les vidéos est par ailleurs quantifié par régression linéaire entre les évaluations normées des bruits à partir des vidéos (*Vidéo*) et les évaluations des bruits à partir des sons seuls *(Son)* associées aux évaluations des véhicules *(Image)* (Eq 6). Les évaluations des associations communes aux 2 séries de vidéos évaluées par 2 groupes de sujets sont similaires. L'ensemble des vidéos est alors utilisé pour établir le modèle linéaire.

Vidéo_estimée = gSon + hImage (eq.) (R2=0.97) (Éq 6)

L'évaluation du bruit de fermeture de porte attribuée à l'image a priori du véhicule est nettement moins importante que celle établie dans le test sur véhicule réel.

L'effet positif de l'image du véhicule est observé avec les vidéos, mais il est bien plus faible que celui observé sur véhicule réel. L'effet segment est bien plus influent à la vue réelle du véhicule que par l'intermédiaire de vidéos, dans lesquelles l'angle de vue du véhicule est figé. De plus, les sujets se concentrent plus sur le bruit face aux vidéos et photos des véhicules que face au véhicule réel, situation dans laquelle l'immersion en contexte est totale, et les véhicules à échelle réelle. Ces résultats illustrent un problème écologique : introduire le facteur environnemental d'image a priori du véhicule au laboratoire n'équivaut pas la situation réelle. Mais l'expérience des vidéos permet pourtant de préciser les résultats obtenus In Situ par un plus grand contrôle des stimuli. En particulier, elle permet de montrer l'influence de l'image de marque.

Conclusion

Par l'intermédiaire de vidéos, l'image du véhicule, construit sur le segment et de l'image de marque, influence légèrement positivement l'évaluation de la qualité que renvoie le bruit de fermeture de porte. L'influence observée sur véhicule réel est bien supérieure. L'introduction du facteur image au laboratoire n'est donc pas représentative du facteur réel.

Conclusion

Nous cherchons dans cette partie à préciser l'influence des facteurs environnementaux sur l'évaluation du bruit.

Nous spécifions d'abord, d'après les usages observés en situation réelle, un protocole de mesure des bruits de fermeture de porte utile pour les expérimentations en laboratoire : mesure des portes en Chambre Semi Anéchoïque, à l'extérieur du véhicule, vitres fermées, à vitesses de fermeture contrôlées.

Nous réalisons ensuite une série d'expérimentations qui vise à évaluer l'influence des facteurs environnementaux, relevés en situation réelle, sur l'évaluation de la qualité que renvoie le bruit de fermeture de porte :
- le bruit de fermeture des portes avant est plus important que celui des portes arrière pour l'évaluation globale ; le bruit d'ouverture n'a aucune influence ;
- le geste ressenti n'influence pas l'évaluation du bruit de fermeture de porte. En revanche l'énergie de fermeture est importante, puisque l'augmentation de la vitesse de fermeture dégrade le bruit résultant. Certains sujets sont plus sensibles à la vitesse de fermeture pour évaluer la qualité résultante ;
- l'image du véhicule, dépendante du segment et de la marque, influence positivement l'évaluation de la qualité que renvoie le bruit de fermeture de porte.

La Figure 34 illustre le ressenti décrit en situation réelle et l'influence des facteurs environnementaux.

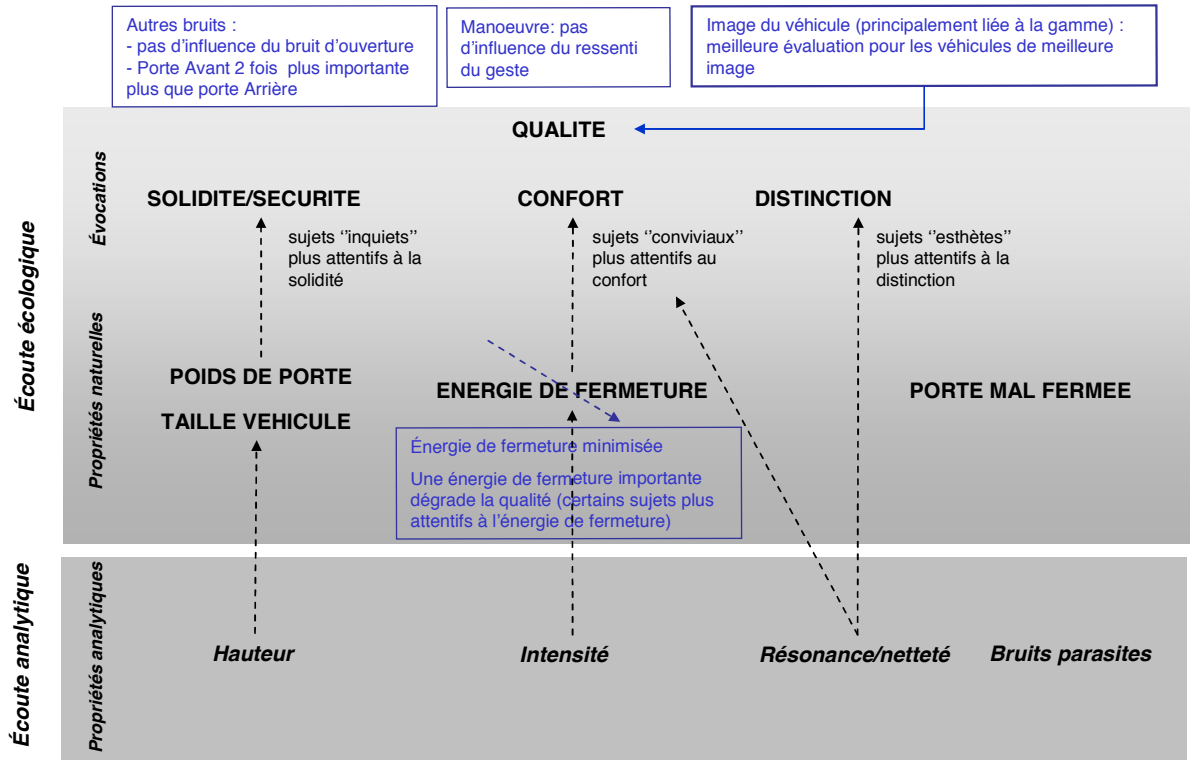


Figure 34 Evocations, propriétés naturelles et analytiques caractéristiques du ressenti – Influence des facteurs environnementaux

L'ensemble des résultats sur la perception en situation réelle est acquis à partir d'un ensemble d'expérimentations, des plus écologiques et moins contrôlées (étude qualitative, évaluations In Situ) aux mieux contrôlées et moins écologiques (ex : influence de l'image du véhicule étudié à partir de vidéos). En l'occurrence, la situation de laboratoire avec des vidéos ne reproduit pas l'influence de l'image du véhicule observé en situation réelle. Mais l'expérience des vidéos permet de préciser les résultats obtenus In Situ par l'étude d'un plus grand nombre de stimuli, préparés selon un plan d'expérience. Ces deux expériences illustrent les problèmes de validité écologique rencontrés au laboratoire.

Nous pouvons à présent caractériser finement les bruits d'impact par des propriétés perceptives évaluées au laboratoire. Comme nous avons décrit le ressenti en situation réelle et observé l'influence des facteurs environnementaux, les résultats obtenus au laboratoire sont interprétables du point de vue écologique.

Chapitre V. Propriétés perceptives des bruits de fermeture de porte

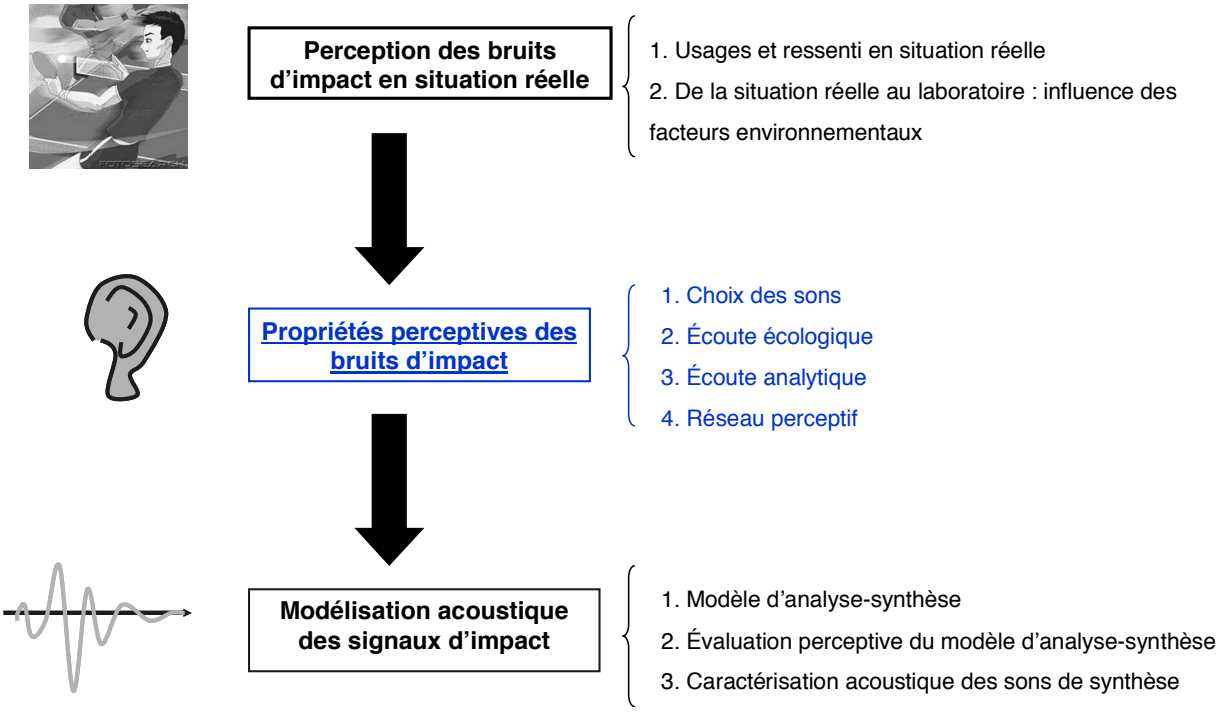


Figure 35 Démarche pour l'étude des bruits de fermeture de porte

Après s'être interrogé sur la perception des bruits de fermeture de porte en situation réelle, nous proposons des études au laboratoire où la perception est focalisée sur le son. Nous suivons la démarche rappelée Figure 35. Un ensemble représentatif de bruits de fermeture de porte est choisi pour être décrit par un ensemble de propriétés perceptives induites par écoutes écologique et analytique **(1)**. L'écoute écologique induit les propriétés naturelles et les évocations **(2)**. Elles sont naturellement perçues par l'auditeur et renvoient à l'évènement associé au son. L'expertise de l'auditeur lui permet d'accéder à des propriétés plus ou moins précises sur les sources impliquées. L'écoute analytique induit les propriétés analytiques qui décrivent les bruits de fermeture de porte, pour eux-mêmes, sans faire référence à l'évènement **(3)**. Les propriétés analytiques, naturelles, et les évocations participent toutes à la caractérisation perceptive des bruits d'impact. D'une part, les propriétés analytiques, qui décrivent le signal acoustique, constituent un intermédiaire privilégié pour modéliser les propriétés naturelles des bruits de fermeture de porte. D'autre part, les évocations dépendent des propriétés naturelles, caractéristiques de l'évènement perçu. Ainsi, les différentes propriétés perceptives sont placées au sein d'un réseau perceptif qui propose une caractérisation perceptive des bruits de fermeture de porte **(4)**.

1. Choix des sons

Le choix du corpus de bruits de fermeture de porte est primordial. Il doit représenter au mieux l'ensemble des bruits de fermeture de porte. Ainsi, la caractérisation perceptive effectuée sur ce corpus en sera d'autant plus généralisable.

L'étude des bruits en situation réelle nous a amenés à choisir les configurations d'enregistrement. Les bruits de fermeture de porte sont mesurés à l'extérieur du véhicule, en Chambre Semi Anéchoïque (CSA) avec les vitres fermées. De plus, pour caractériser un ensemble représentatif de bruits de fermeture de porte, différentes vitesses de fermeture sont considérées et l'ensemble des portes d'un véhicule est mesuré.

Les 26 bruits de fermeture de porte choisis pour cette étude correspondent aux sons d'étude sur l'influence de la vitesse de fermeture (Chapitre IV. 2.3.2). Le choix de ces bruits avaient été établis à partir d'études antérieures (rapports internes) pour être représentatifs des bruits de fermeture de porte. Ils sont considérés indépendamment de la vitesse de fermeture et renommés s1 à s26.

2. Ecoute écologique

L'écoute écologique est une écoute des évènements du monde. Elle informe sur l'action et les sources à l'origine du bruit. En fonction de l'expertise de l'auditeur, des propriétés plus ou moins précises sur les sources sont perçues. Le sujet naïf écoute l'évènement global, tandis que l'expert des ouvrants automobile écoute les composants organiques (la serrure ou les joints). Nous dissocions alors l'écoute écologique ''naïve'' **(section 2.1)** de l'écoute écologique ''experte'' **(section 2.2)**, pour finalement présenter une caractérisation par écoute écologique des bruits de fermeture de porte **(section 2.3)**.

2.1 Ecoute ''naïve''

2.1.1 Identification des propriétés naturelles et évocations

L'approche qualitative a proposé une description du ressenti du bruit de fermeture de porte en situation réelle. On en déduit les propriétés naturelles et évocations pertinentes.

Les bruits écoutés en situation réelle évoquent des impressions de *solidité*, de sécurité, de confort, de distinction, et plus généralement de *qualité*, tant que la porte est *bien fermée*. En plus de ces évocations, les bruits renvoient aux propriétés naturelles qui caractérisent l'évènement :

- le *poids de la porte* et à la *taille du véhicule*
- *l'énergie de fermeture*.

Sans chercher à caractériser l'ensemble des évocations, nous nous concentrons sur les évocations de ''*qualité*'' et de ''*solidité*''. De plus, les propriétés naturelles ''*poids de la porte*'', ''*taille du véhicule*'', ''*énergie de fermeture*'', et ''*porte bien fermée*'' sont identifiées.

2.1.2 Evaluation des propriétés naturelles et évocations

Trois expérimentations sont mises en place pour évaluer l'ensemble des évocations et propriétés naturelles.

<u>Expérience 1 : Qualité</u>

EXPERIENCE 1 bis c

Stimuli

Le corpus d'étude comprend les 26 bruits de fermeture de porte sélectionnés (s1 à s26), auxquels sont ajoutés 4 bruits, non pris en compte dans notre étude (s27 à s30).

Sujets

80 sujets sont recrutés dont 60% hommes et 40% femmes. 25% ont moins de 35 ans, 50% ont entre 35 et 50 ans, 25% ont plus de 50 ans. Ils possèdent tous des véhicules achetés dans les 4 dernières

années. La moitié possède un véhicule du groupe PSA Peugeot Citroën et l'autre moitié un véhicule des autres marques. La moitié possède un véhicule de segment B et l'autre un véhicule segment M. Les sujets sont indemnisés pour leur participation.

Protocole

Les 80 sujets, après avoir écouté 3 exemples représentatifs des stimuli, évaluent la qualité du véhicule que renvoient les bruits de fermeture de porte sur une échelle continue allant de « très mauvaise qualité » à « très bonne qualité ».

Les bruits sont présentés dans un ordre aléatoire de type carré latin.

Les interfaces sont réalisées sous Labview.

Résultats *(cf PROPRIETES_NATURELLES_EVOCATIONS)*

Les bruits de fermeture de portes sont continûment répartis sur toute l'échelle de qualité (de 1.2 à 7.5) (Figure 36).

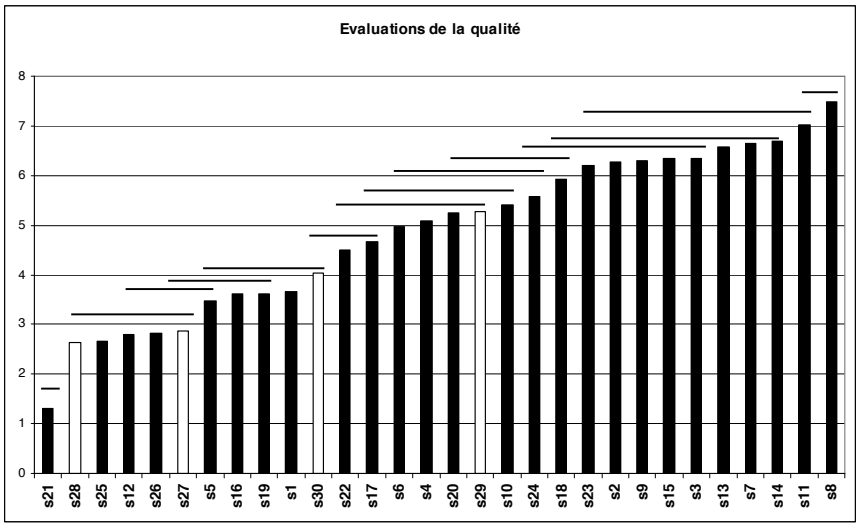


Figure 36 Evaluations de la qualité
(0 : très mauvaise qualité) / 10 : très bonne qualité ;
les barres horizontales regroupent les stimuli qui ne sont pas discriminés, par test de Duncan 5%).
Les barres blanches correspondent aux sons s27 à s30 non considérés par la suite.

L'évaluation obtenue est proche des résultats du test sur l'influence de la vitesse de fermeture R^2=0,83*** (significatif à $p<0.01$). Pour affiner la comparaison, deux classes de sujets peuvent à nouveau être proposées par Classification Ascendante Hiérarchique, à partir du dendrogramme présenté Figure 37.

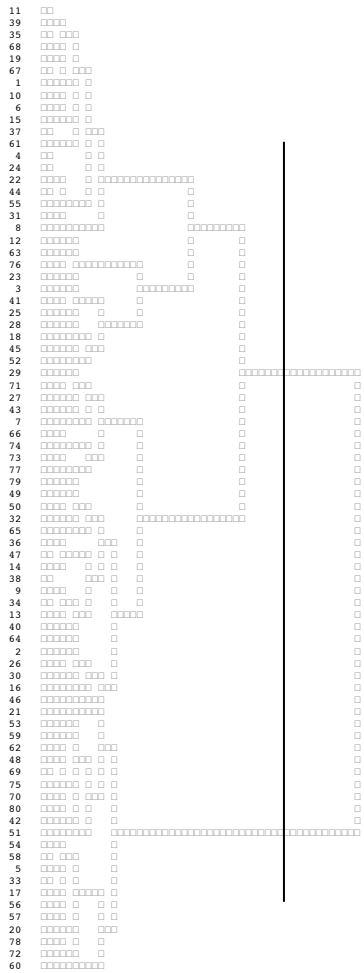


Figure 37 Dendrogramme obtenu par Classification Ascendante Hiérarchique.
2 classes de sujets sont proposées.

Les évaluations réalisées par les 2 classes de sujets proposées sont comparées Figure 38.

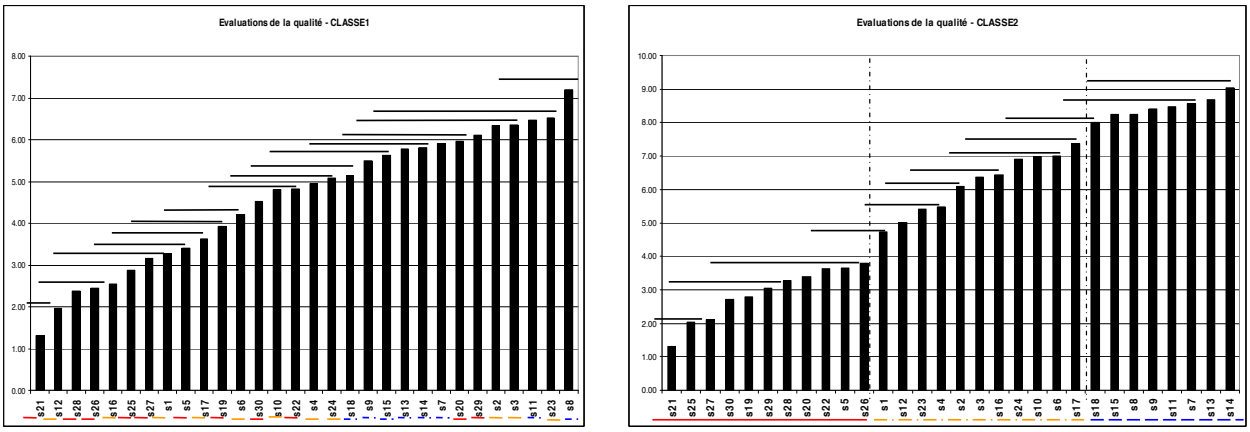


Figure 38 Evaluation de la qualité pour la classe1 (à gauche) et pour la classe2 (à droite).
(0 : pas du tout solide - très légère / 10 : très solide - très lourde ; les barres horizontales regroupent les stimuli qui ne sont pas significativement discriminés, par test de Duncan 5%). Le classement des sons par la classe2, plus discriminante, est divisé en 3 groupes de sons illustrés par les traits colorées (— — —)
Ceux-ci sont reportés sur le classement de la classe1 pour comparaison.
Les sons s20 et s29 jugés de bonne qualité par la classe1 sont mal perçus par la classe2. Les autres sons sont classés en 2 groupes de façon homogène par les 2 classes de sujets.

Les classes de sujets sont illustrées par analyse en composantes principales. Les bruits et les réponses des sujets sont projetés sur un plan à deux dimensions définies par les deux premières composantes principales, qui expliquent 59% de la variance totale (Figure 39). Même si nous observons comme dans le test sur l'influence de l'énergie de fermeture que certains sujets (classe2) rejettent les bruits de fermeture de porte à vitesse de fermeture élevée, ces tendances restent mineures par rapport au jugement global, les sujets sont dans l'ensemble suffisamment consensuels pour que l'on conserve une moyenne commune dans la suite de l'étude.

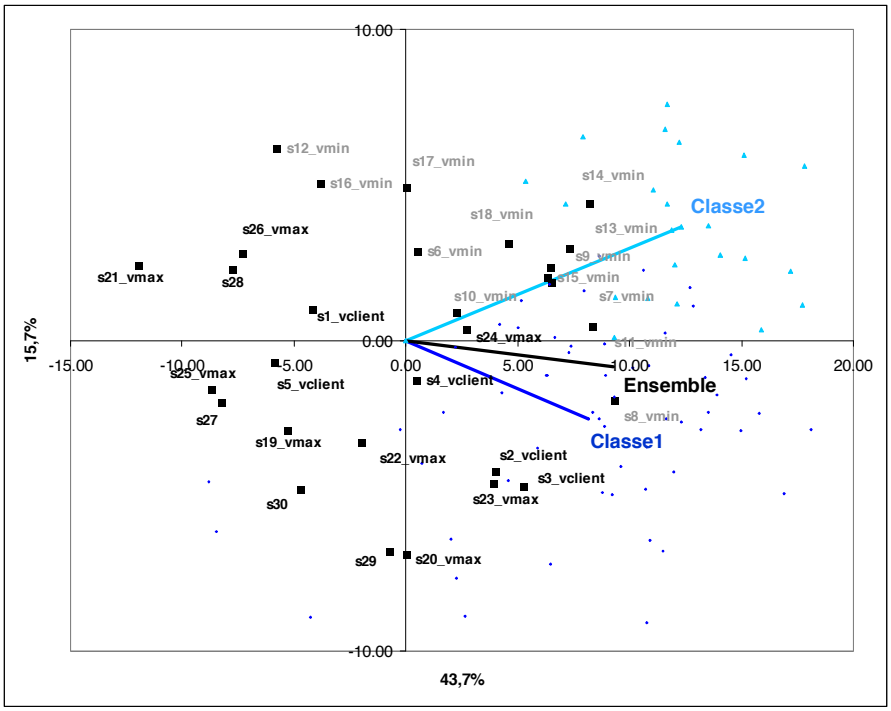


Figure 39 Analyse en Composantes Principales des évaluations de la qualité : projection des bruits de fermeture de portes fermées à Vmin, Vclient, Vmax et de sujets sur les CP1 et CP2.
Les traits désignent les directions moyennes des évaluations de l'ensemble des sujets, des sujets de la classe1 (sujets moins sensibles à la vitesse de fermeture), et des sujets de la classe2 (sujets plus sensibles à la vitesse de fermeture)

<u>Expérience 2 : Solidité, Poids de la porte, Taille du véhicule, Bien fermée</u>

EXPERIENCE 1 bis d

Stimuli

Idem Expérience 1

Sujets

Idem Expérience 1

Protocole

Les 80 sujets, après avoir écouté 3 exemples représentatifs des stimuli, évaluent pour chaque bruit :

- le poids de la porte, sur une échelle continue allant de « très légère » à « très lourde »,
- la réussite de la fermeture, sur une échelle catégorielle à 4 modalités,
- la solidité, sur une échelle continue allant de « pas du tout solide » à « très solide »,
- la taille du véhicule, sur une échelle catégorielle à 3 modalités : ''petite''/''moyenne''/''grande''.

Les bruits sont présentés dans un ordre aléatoire de type carré latin.
Les interfaces sont générées sous Fizz (Figure 40).

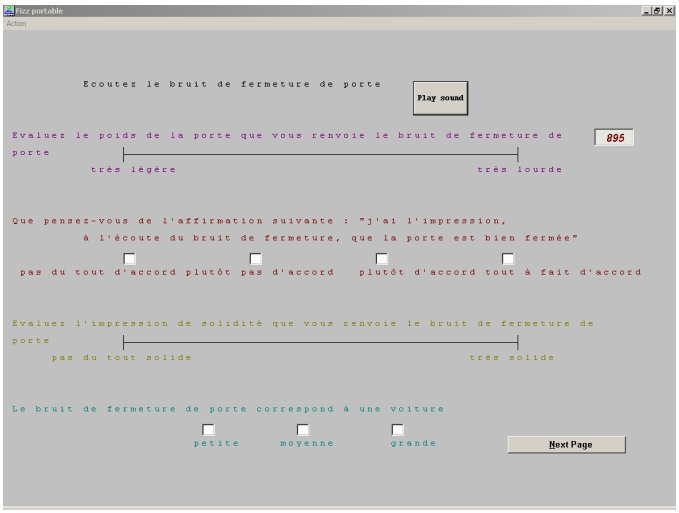


Figure 40 Interface de test pour l'évaluation de propriétés naturelles : poids de la porte*,* porte bien fermée*,* solidité*,* taille du véhicule*.*

Résultats *(cf PROPRIETES_NATURELLES_EVOCATIONS)*

Les sujets sont consensuels pour évaluer les propriétés continues *solidité* et *poids de la porte*, (Classification Ascendante Hiérarchique et comparaison des Duncan par classes éventuelles). Les bruits de fermeture de porte sont bien répartis sur les échelles d'évaluation (Figure 41).

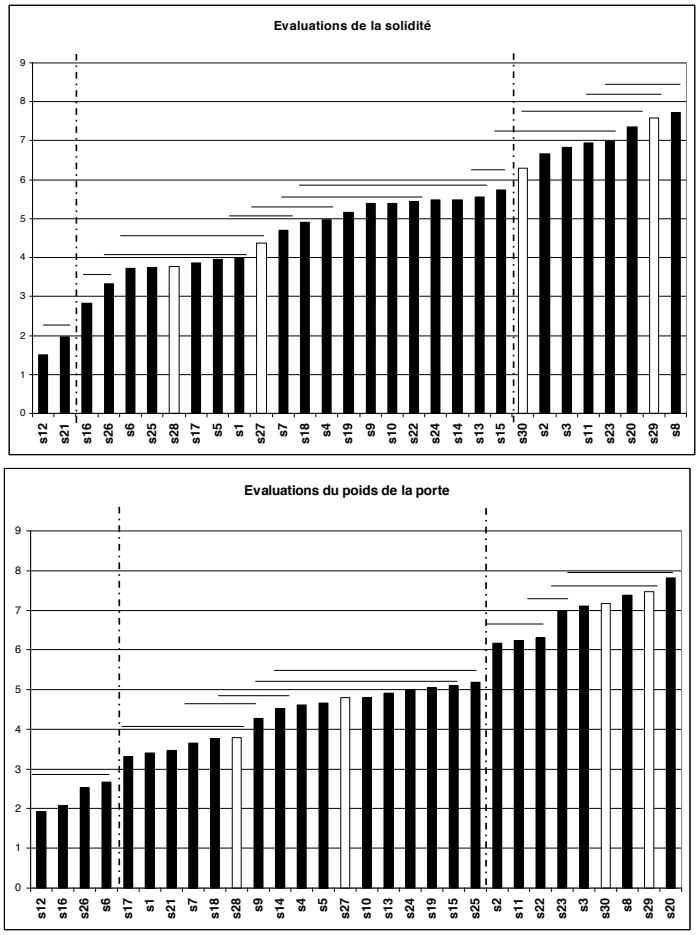


Figure 41 Evaluations de la solidité (en haut) et du poids de la porte (en bas)
(0 : pas du tout solide - très légère / 10 : très solide - très lourde ; les barres horizontales regroupent les stimuli qui ne sont pas significativement discriminés, par test de Duncan 5%).
3 groupes de bruits principaux sont nettement séparés (barres verticales).
Les barres blanches correspondent aux sons s27 à s30 non considérés par la suite.

La *taille du véhicule* perçue est estimée sur une échelle catégorielle à 3 modalités. Les sujets doivent associer chaque bruit à un véhicule PETIT, MOYEN ou GRAND. Les occurrences des sujets sont analysées par des tests de Khi2 entre les modalités PETIT et MOYEN d'une part, et entre les modalités MOYEN et GRAND d'autre part. On en déduit la réponse moyenne de l'ensemble des sujets. Une modalité peut ressortir (PETIT, MOYEN ou GRAND), ou deux modalités partagées peuvent se détacher de la troisième (MOYEN/PETIT ou MOYEN/GRAND) (Figure 42).

a)

SONS	Test du Khi2	Modalité
s1	$X^2(1)=0$, p=1	Indéterminé
s2	$X^2(1)=27.94$, p=0	MOYEN
s3	$X^2(1)=10.70$, p=.001	MOYEN
s4	$X^2(1)=10.88$, p=.001	MOYEN
s5	$X^2(1)=7.45$, p=.006	MOYEN
s6	$X^2(1)=17.51$, p=.000	PETIT
s7	$X^2(1)=0.5$, p=.480	Indéterminé
s8	$X^2(1)=12.8$, p=.000	MOYEN
s9	$X^2(1)=0.37$, p=.541	Indéterminé
s10	$X^2(1)=21.06$, p=.000	MOYEN
s11	$X^2(1)=16.03$, p=.000	MOYEN
s12	$X^2(1)=31.18$, p=.000	PETIT
s13	$X^2(1)=9.29$, p=.002	MOYEN
s14	$X^2(1)=0.07$, p=.789	Indéterminé
s15	$X^2(1)=4.45$, p=.035	MOYEN
s16	$X^2(1)=19$, p=.000	PETIT
s17	$X^2(1)=0$, p=1	Indéterminé
s18	$X^2(1)=0.14$, p=.705	Indéterminé
s19	$X^2(1)=19.11$, p=.000	MOYEN
s20	$X^2(1)=20.17$, p=.000	MOYEN
s21	$X^2(1)=1.11$, p=.292	Indéterminé
s22	$X^2(1)=17.31$, p=.000	MOYEN
s23	$X^2(1)=34.11$, p=.000	MOYEN
s24	$X^2(1)=14.251$, p=.000	MOYEN
s25	$X^2(1)=11.27$, p=.001	MOYEN
s26	$X^2(1)=8.67$, p=.003	PETIT

SONS	Test du Khi2	Modalité
s1	$X^2(1)=27.52$, p=.000	MOYEN
s2	$X^2(1)=1.95$, p=.163	Indéterminé
s3	$X^2(1)=12.82$, p=.000	GRAND
s4	$X^2(1)=19.27$, p=.000	MOYEN
s5	$X^2(1)=25.79$, p=.000	MOYEN
s6	$X^2(1)=6.76$, p=.009	MOYEN
s7	$X^2(1)=20.45$, p=.000	MOYEN
s8	$X^2(1)=22.62$, p=.000	GRAND
s9	$X^2(1)=10.80$, p=.001	MOYEN
s10	$X^2(1)=19.64$, p=.000	MOYEN
s11	$X^2(1)=1.11$, p=.292	Indéterminé
s12	$X^2(1)=7.12$, p=.008	MOYEN
s13	$X^2(1)=10.25$, p=.001	MOYEN
s14	$X^2(1)=0.47$, p=.492	Indéterminé
s15	$X^2(1)=0.75$, p=.385	Indéterminé
s16	$X^2(1)=9.78$, p=.002	MOYEN
s17	$X^2(1)=22.35$, p=.000	MOYEN
s18	$X^2(1)=5.12$, p=.024	MOYEN
s19	$X^2(1)=7.12$, p=.008	MOYEN
s20	$X^2(1)=13.78$, p=.000	GRAND
s21	$X^2(1)=16.03$, p=.000	MOYEN
s22	$X^2(1)=2.45$, p=.118	Indéterminé
s23	$X^2(1)=0.32$, p=.574	Indéterminé
s24	$X^2(1)=8.14$, p=.004	MOYEN
s25	$X^2(1)=8.40$, p=.004	MOYEN
s26	$X^2(1)=20.57$, p=.000	MOYEN

SONS	Modalité
s1	MOYENPETIT
s2	MOYENGRAND
s3	GRAND
s4	MOYEN
s5	MOYEN
s6	PETIT
s7	MOYENPETIT
s8	GRAND
s9	MOYENPETIT
s10	MOYEN
s11	MOYENGRAND
s12	PETIT
s13	MOYEN
s14	**Indéterminé**
s15	MOYENGRAND
s16	PETIT
s17	MOYENPETIT
s18	MOYENPETIT
s19	MOYEN
s20	GRAND
s21	MOYENPETIT
s22	MOYEN
s23	MOYENGRAND
s24	MOYEN
s25	MOYEN
s26	PETIT

b)

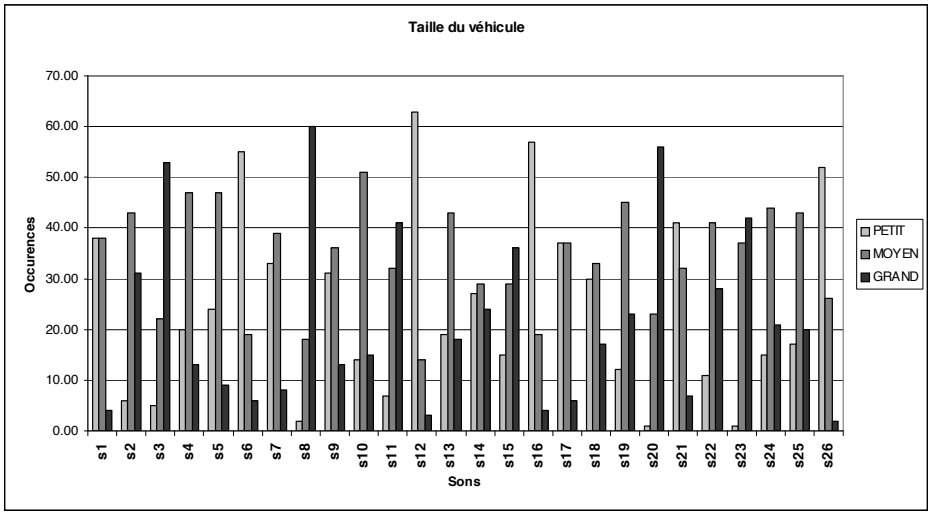


Figure 42 (a) Comparaisons des occurrences ''PETIT'' et ''MOYEN'' (à gauche), ''MOYEN'' et ''GRAND'' (à droite) pour chaque son, par test de Khi2 et modalité majoritaire en cas de significativité (p<.05)
(b) Histogramme des occurrences des modalité ''PETIT'', ''MOYEN'' et ''GRAND'' pour chaque son

Un seul son n'est associé à aucune modalité particulière (*Indéterminé*). Pour les autres sons, les sujets partagent bien un même ressenti.

La *taille du véhicule* perçue est fortement liée au *poids de porte* ressenti. La Figure 43 présente l'évaluation de la propriété poids de la porte en fonction de la propriété taille attribuée. Les bruits qui renvoient à une porte lourde sont associés à un véhicule GRAND et vice versa. Le *poids de la porte* et la *taille du véhicule* sont deux propriétés redondantes pour décrire le véhicule. Pour la suite des travaux, nous considérons uniquement la propriété continue ''poids de la porte''.

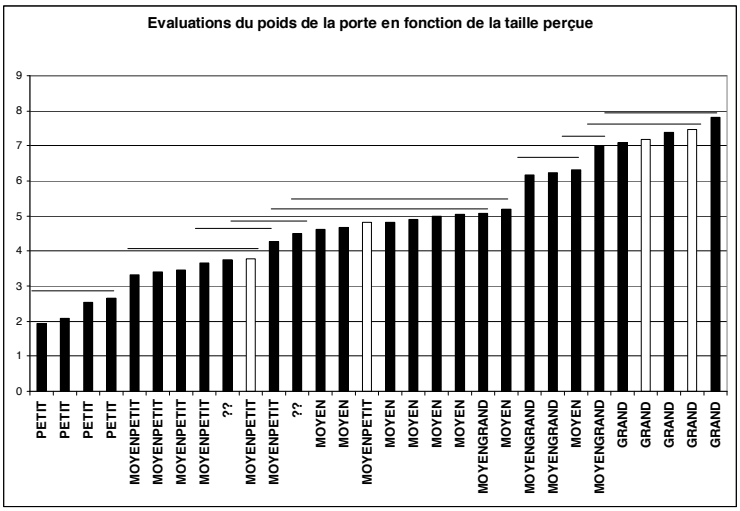


Figure 43 Evaluations du poids de la porte et de la taille du véhicule.
Les barres blanches correspondent aux sons s27 à s30 non considérés par la suite.
Les bruits qui renvoient à une porte lourde sont associés à un véhicule GRAND et vice versa.

La *réussite de la fermeture* est évaluée sur une échelle à 4 modalités. Pour les 2 premières modalités, la porte est plutôt mal fermée, et pour les deux suivantes plutôt bien fermée. Les occurrences des sujets additionnées par paires de modalités sont analysées par des tests de Khi2 (Figure 44).

a)

SONS	Test du Khi2	Modalité
s1	$X^2(1)=16.2$, p=.000	Bien fermée
s2	$X^2(1)=61.25$, p=.000	Bien fermée
s3	$X^2(1)=36.45$, p=.000	Bien fermée
s4	$X^2(1)=31.25$, p=.000	Bien fermée
s5	$X^2(1)=5$, p=.025	Bien fermée
s6	$X^2(1)=8.45$, p=.004	Bien fermée
s7	$X^2(1)=14.45$, p=.000	Bien fermée
s8	$X^2(1)=54.45$, p=.000	Bien fermée
s9	$X^2(1)=28.8$, p=.000	Bien fermée
s10	$X^2(1)=48.05$, p=.000	Bien fermée
s11	$X^2(1)=42.05$, p=.000	Bien fermée
s12	$X^2(1)=54.45$, p=.000	**Mal fermée**
s13	$X^2(1)=14.45$, p=.000	Bien fermée
s14	$X^2(1)=14.45$, p=.000	Bien fermée
s15	$X^2(1)=11.25$, p=.001	Bien fermée
s16	$X^2(1)=0.45$, p=.502	**Indéterminé**
s17	$X^2(1)=8.45$, p=.004	Bien fermée
s18	$X^2(1)=6.05$, p=.014	Bien fermée
s19	$X^2(1)=33.8$, p=.000	Bien fermée
s20	$X^2(1)=57.8$, p=.000	Bien fermée
s21	$X^2(1)=12.8$, p=.000	**Mal fermée**
s22	$X^2(1)=16.2$, p=.000	Bien fermée
s23	$X^2(1)=61.25$, p=.000	Bien fermée
s24	$X^2(1)=2.45$, p=.118	**Indéterminé**
s25	$X^2(1)=0.45$, p=.502	**Indéterminé**
s26	$X^2(1)=6.05$, p=.014	Bien fermée

b)

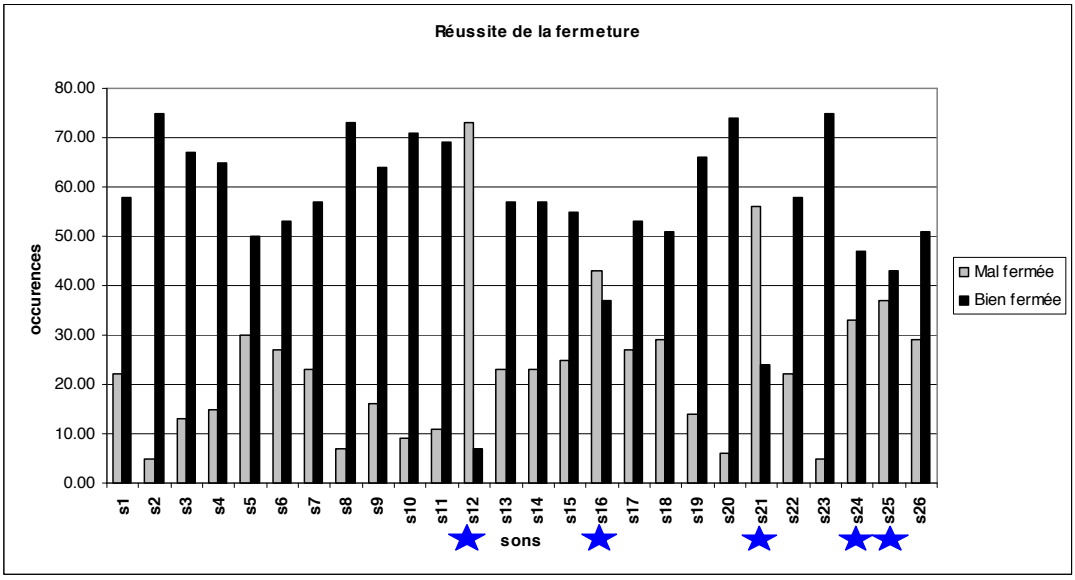


Figure 44 (a) Comparaison des occurrences "mal fermée" et "bien fermée" pour chaque son, par test de Khi2 et modalité majoritaire en cas de significativité (p<.05)
(b) Histogramme des occurrences occurrences "mal fermée" et "bien fermée" pour chaque son.
★ *Sons qui ne sont pas associés à la modalité "Bien fermée"*

Deux bruits de fermeture de porte (s12 et s21) sont perçus comme des portes mal fermées. Trois bruits (s16, s25, et s24) ne sont pas clairement positionnés sur cette propriété. Les 21 autres bruits de fermeture de porte sont perçus comme des portes bien fermées. La non réussite de la fermeture est une spécificité qui caractérise donc 5/26 bruits de fermeture de porte de notre ensemble. On remarque que 4 de ces bruits renvoient à un véhicule de mauvaise qualité (Figure 45).

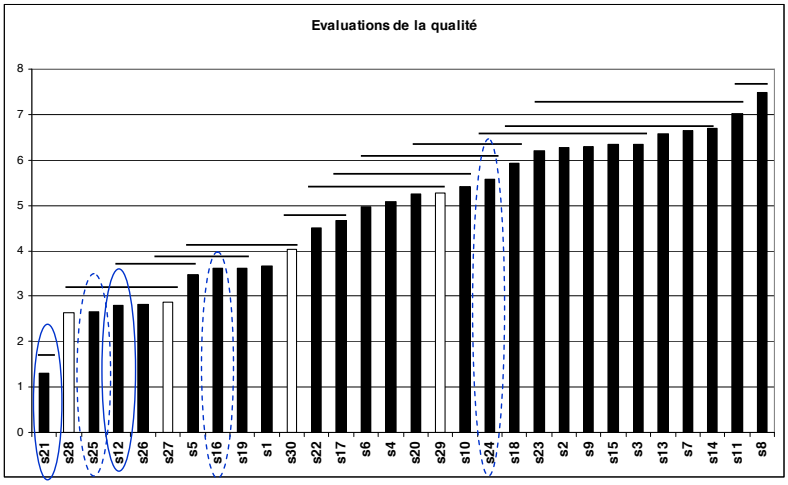


Figure 45 Evaluations de la qualité et porte mal fermée
Les barres blanches correspondent aux sons s27 à s30 non considérés par la suite.
Les bruits de fermeture de porte qui sont perçues "mal fermées" sont entourés en traits pleins, ceux pour lesquels les sujets sont indéterminés sont entourés en pointillés.
Les bruits non associés à une porte bien fermée sont plutôt de mauvaise qualité (sauf s24)

Expérience 3 : Energie de fermeture

EXPERIENCE 3c

Stimuli

Le corpus d'étude comprend uniquement les 26 bruits de fermeture de porte sélectionnés (s1 à s26).

Sujets

120 sujets, dont 72 hommes et 48 femmes, sont recrutés. 48 ont moins de 35 ans, 46 ont entre 35 et 50 ans, 26 ont plus de 50 ans. Ils possèdent un véhicule neuf acheté dans les 4 dernières années. 60 possèdent un véhicule de segment B, et 60 de segment M. 60 possèdent un véhicule des marques Peugeot ou Citroën. Les sujets sont indemnisés pour leur participation.

Protocole

Les sujets, après avoir écouté 3 exemples représentatifs, évaluent l'énergie de fermeture que renvoient les bruits de fermeture de porte sur une échelle continue allant de « doucement » à « fortement », selon la consigne : « A l'écoute du son de fermeture de porte, pensez-vous que la porte est fermée doucement ou fortement ? »
Les bruits sont présentés dans un ordre aléatoire de type carré latin.
L'interface est générée sous Labview.

Résultats *(cf annexe PROPRIETES_NATURELLES_EVOCATIONS)*

Les 120 sujets sont fortement consensuels. Les 26 bruits de fermeture de porte sont discriminés en 8 groupes principaux ! L'énergie de fermeture discrimine particulièrement bien les bruits de fermeture de

porte (Figure 46). Le fort consensus observé sur cette propriété nous autorise à associer cette évaluation à celles obtenus précédemment.

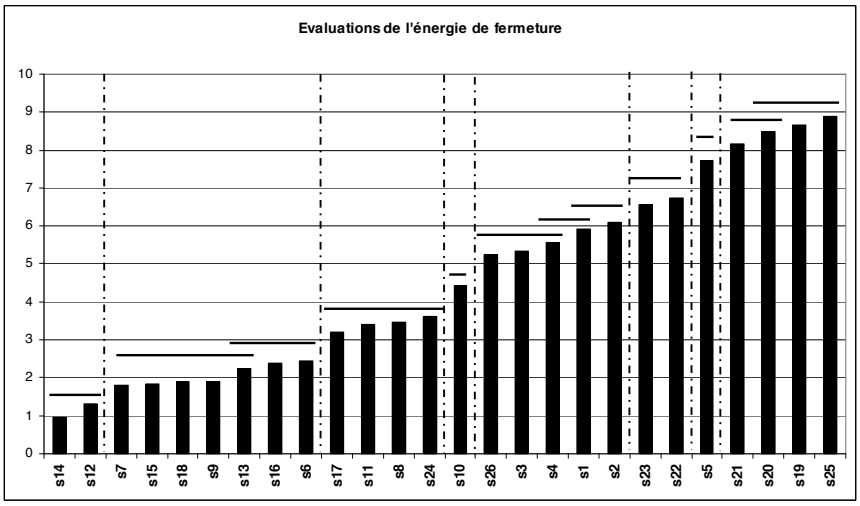


Figure 46 Evaluations de l'énergie de fermeture
(0 : doucement / 10 : fortement ; les barres horizontales regroupent les stimuli qui ne sont pas significativement discriminés, par test de Duncan 5%).
8 groupes de bruits principaux sont séparés (barres verticales).

Conclusion

Pour l'ensemble des évaluations, les sujets sont consensuels et les sons bien discriminés. On en déduit que les propriétés naturelles ''poids de porte'' (équivalent à la ''taille du véhicule''), ''énergie de fermeture'', ''porte bien fermée'', et les évocations ''qualité'' et ''solidité'' reflètent bien un sens partagé par l'ensemble des sujets interrogés.

2.2 Ecoute ''experte''

2.2.1 Sujets ''experts'' et propriétés naturelles ''expertes''

Les propriétés écologiques sont complétées par des propriétés inférées par des experts PSA des ouvrants automobiles. Ces derniers décomposent le bruit de fermeture de porte en sources organiques : la serrure, les crans de serrure, les joints, les vibrations des panneaux de porte et structure de caisse. 4 experts évaluent les 26 bruits de fermeture de porte en consensus.

2.2.2 Evaluation des propriétés naturelles ''expertes''

(cf annexe PROPRIETES_NATURELLES_EVOCATIONS)

Les bruits de fermeture de porte sont d'abord classés par les experts en 3 catégories selon la présence de la composante serrure :

- les bruits qui présentent principalement un bruit serrure (bruits ''*serrure*'' : s1 s6 s7 s12 s16 s17 s18 s26),
- les bruits qui présentent un bruit de serrure mêlé à l'impact du panneau de porte (bruits ''*serrure/fermeture*'' : s2 s4 s5 s8 s9 s10 s11 s13 s14 s15 s21 s24),
- les bruits pour lesquels le bruit de la serrure n'est pas distinctement entendu, seul l'impact du panneau de porte est perçu (bruits ''*fermeture*'' : s3 s19 s20 s22 s23 s25).

De plus des spécificités sur certains bruits de fermeture de porte sont relevées. On entend bien séparément le passage des crans de la serrure dans 2 bruits (s12, s16). Un bruit lié aux joints est entendu dans le bruit s24. Les bruits s21 et s25 contiennent des vibrations.

2.3 Caractérisation par écoute écologique

Les évocations de ''qualité'' et de ''solidité'', ainsi que les propriétés naturelles liées au véhicule (''poids de la porte''), et à la manœuvre (''énergie de fermeture''), sont résumés par Analyse en Composante Principale des données normées (Figure 47). Les deux premières composantes principales résument 98% de l'information globale. Les corrélations des propriétés avec ces 2 axes sont précisées par le cercle des corrélations. Les bruits de fermeture de porte sont projetés sur ce plan. La représentation est complétée par la propriété ''porte bien fermée'', ainsi que les propriétés ''expertes'' : Serrure/Fermeture, joint, vibrations, passage de crans.

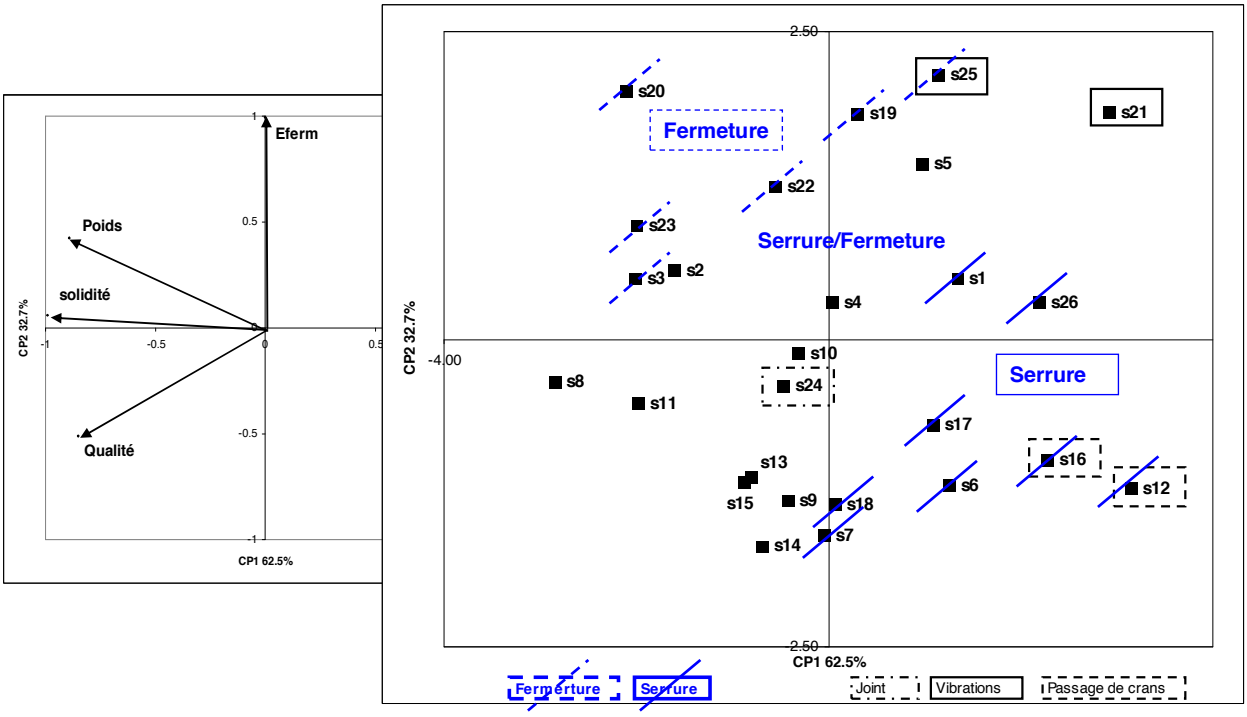


Figure 47 Analyse en Composantes Principales des propriétés naturelles et évocations continues : cercle des corrélations (à gauche) et projection des bruits (à droite).
Indication des propriétés naturelles ''expertes'' : Serrure/Fermeture ; Joint ; Vibrations ; Passage de crans

Un bruit qui renvoie à un véhicule de bonne qualité est associé à un véhicule solide et une manœuvre douce (ex : s8). Un bruit qui renvoie une impression de solidité est associé à une porte lourde (ex : s8), tant qu'il n'est pas associé à une fermeture brutale (ex : s19).
Les bruits ''serrure'' sont plutôt associés à une porte légère, à un véhicule peu solide et de qualité médiocre (ex : s16). Mais ces bruits renvoient une impression de qualité si la porte est perçue comme fermée doucement (ex : s7). Les bruits ''fermeture'' sont plutôt associés à une porte lourde, à un véhicule solide et de bonne qualité (ex : s23). Mais ces bruits renvoient une impression de mauvaise qualité si la porte est perçue comme fermée fortement (ex : s19).
Les vibrations (ex : s21) et les passages de crans (ex : s16) dégradent les bruits en qualité et solidité.
Les bruits qui n'indiquent pas que la porte est bien fermée sont ceux qui laissent entendre des sources organiques annexes : joint (ex : s24), vibrations (ex : s25), passage de crans (ex : s12).

Le corpus de 26 bruits de fermeture de porte est ainsi caractérisé par un ensemble de propriétés naturelles qui renvoient à l'évènement perçu. Les sujets naïfs perçoivent si la porte est bien fermée, si elle est lourde ou légère, si elle est fermée doucement ou fortement. De plus ils y associent des évocations de solidité et de qualité du véhicule. Les experts automobiles catégorisent les bruits en fonction de la présence de la composante serrure. Quelques bruits contiennent des sources plus rarement perçues : les crans de serrure très espacés, les joints et des vibrations de panneau de porte ou de caisse.

Les mêmes bruits sont à présent caractérisés par des propriétés analytiques.

3. Ecoute analytique

Les propriétés analytiques décrivent les sons de fermeture de porte sans faire référence à l'évènement. Elles sont caractérisées par métrologie sensorielle. L'analyse sensorielle, pour l'ensemble des études, est réalisée par l'équipe Méthodologie Innovante et Facteurs Humains du service PErception et Facteurs Humains (PEFH) de PSA Peugeot Citroën.
Après avoir expliqué la méthode du panel sensoriel **(section 3.1)**, nous présentons les évaluations obtenues pour l'ensemble de sons **(section 3.2)**. Nous concluons ensuite sur la caractérisation par écoute analytique des bruits de fermeture de porte **(section 3.3)**.

3.1 Panel sensoriel

Le panel sensoriel est utilisé comme instrument d'évaluation analytique des bruits. Nous présentons la méthode du panel sensoriel, les propriétés analytiques identifiées, puis nous vérifions que les performances du panel sont suffisantes pour conclure sur la caractérisation analytique.

3.1.1 Méthodologie

Stimuli
Le corpus d'étude comprend les 26 bruits de fermeture de porte sélectionnés (s1 à s26).

Sujets
Le panel est composé de 9 sujets externes (les juges), sélectionnés pour leurs aptitudes sensorielle et logique, et leur motivation. L'audition des juges est contrôlée. Les 9 juges sont des femmes, de 45 ans en moyenne. Ils sont rémunérés pour leur participation.

Protocole
Les séances sont organisées sur deux créneaux de 2h par semaine. En raison du matériel disponible, le panel est divisé en deux groupes de 4 et 5 personnes.
Le profil sensoriel se déroule en 4 étapes principales, réparties en 8 séances :

- une phase d'apprentissage sémantique dont l'objectif est d'établir la liste de descripteurs sensoriels caractérisant l'espace des sons,
- une phase d'apprentissage sensoriel dont l'objectif est d'améliorer l'acuité sensorielle des sujets,
- une phase d'apprentissage métrique consistant à utiliser une échelle de notation,
- une phase d'évaluations finales.

Apprentissage sémantique (2 séances)
Cette phase a pour objectif de construire une liste de descripteurs sensoriels. Les juges ont tout d'abord pour tâche de décrire leurs sensations sur la base d'écoutes individuelles. Puis, l'expérimentateur discute avec les juges la liste brute des termes utilisés par les juges. La liste est réduite en rassemblant les termes exprimant les mêmes sensations.

Apprentissage sensoriel du profil sensoriel (2 séances)
Les juges sont entraînés pour d'une part améliorer leur acuité sensorielle, et d'autre part s'assurer du consensus sur chacun des descripteurs. Pour cela, les juges réalisent des tests où les sons sont classés en catégories selon 3 niveaux d'intensité (faible, moyen et fort). Les classements individuels sont ensuite comparés et discutés pour aboutir à un consensus.

Apprentissage métrique du profil sensoriel (2 séances)
Les juges apprennent à mémoriser les sensations extrêmes et à utiliser au mieux l'échelle de notation. L'expérimentateur met en place les discussions nécessaires à l'amélioration du consensus au sein du groupe. Il met en évidence les points sensibles (descripteur non discriminant par exemple) et vérifie l'utilisation de l'échelle (exploitation des bornes, répartition des sons sur l'échelle, …).

Evaluations des profils sensoriels (2 séances)
Les sujets réalisent finalement l'évaluation des sons, descripteurs par descripteurs, et sons par sons. Les évaluations sont réalisées deux à trois fois pour vérifier la répétabilité du panel. L'ordre de présentation des échantillons sonores suit un plan de présentation de type carré latin. L'interface est gérée sous Fizz.

3.1.2 Identification des propriétés analytiques

Les descripteurs sensoriels constituent les propriétés analytiques. Elles sont définies Tableau 13. Certaines sont à valeurs continues, d'autres sont à valeurs binaires : elles sont soit présentes soit absentes. Ces propriétés sont des spécificités, elles ne sont perçues que dans certains bruits.

Descripteurs	Définition	Type
INTENSE	Qui a un niveau sonore élevé	Continu
LONG	Qui a une durée longue	Continu
BON'M	Qui présente un son « BON'M » intense	Continu
KE	Qui commence par un son « Ke » prononcé	Continu
ESPACHOC	Qui présente un fort espacement entre les deux chocs	Continu
Triangle	Qui présente une note aiguë intense en fin de son	Spécificité
Gri gri	Qui présente de fortes oscillations	Spécificité

Tableau 13 Propriétés analytiques des bruits de fermeture de porte

3.1.3 Performance du panel

(cf annexe PANEL_SENSORIEL)
Pour chaque descripteur sensoriel à valeur continue, la performance du panel se mesure à l'aide de trois critères :

- la *discriminabilité* des sons,
- la *répétabilité* des juges d'une séance à l'autre,
- le *consensus* entre les juges.

Pour tester ces trois critères, l'analyse de variance à 3 facteurs (son, juge, répétition) est réalisée (Tableau 14). Le facteur juge est placé en aléatoire afin de prendre en compte l'interaction juge * son dans l'effet son.

	Ddl	INTENSE	BON'M	ESPACHOC	LONG	KE
Son	25	36,23***	29,01***	28,84***	14,09***	20,77***
Juge	8	13,48***	16,65***	12,8***	9,84***	24,41***
Répétition	2	1,31	0,47	0,82	3,36	1,09
Interaction 1-2	200	1,3*	2,76***	3,41***	3,99***	2,97***
Interaction 1-3	50	0,91	0,98	1,2	0,85	0,95
Interaction 2-3	16	7,23***	1	3,66***	1,99*	2,92***

* significatif à 5 % ** significatif à 1 % *** significatif à 0.1%

Tableau 14 Analyse de variance à 3 facteurs (son, juge, répétition)

- L'effet Son est significatif, les sons sont *bien discriminés*
- L'effet Répétition ainsi que l'interaction Son-Répétition ne sont pas significatifs. Le panel est *répétable* dans son ensemble, même si on observe un manque de répétabilité d'un ou plusieurs juges sur certains descripteurs (interaction Juge-Répétition significative).
- L'effet juge est significatif : les juges n'utilisent pas les échelles de la même manière. L'interaction Son-Juge est également significative, on observe donc un problème de consensus.

Un suivi des performances individuelles est également réalisé. Pour chaque juge, trois critères sont vérifiés :

- le pouvoir discriminant, déterminé par analyse de variance, correct pour l'ensemble des sujets et des descripteurs,
- la répétabilité, mesurée en prenant l'écart type de l'ensemble des notes d'un juge attribuées à tous les sons pendant toutes les répétitions (Tableau 15). Le panel présente une bonne répétabilité pour les descripteurs INTENSE, BONM, ESPACHOC, et LONG, et une répétabilité moyenne pour le descripteur KE, pour lequel 4 sujets ne sont que moyennement répétables.

	INTENSE	BON'M	ESPACHOC	LONG	KE
Sujet1	1,81	2,08	0,48	1,44	2,06
Sujet2	1,35	1,37	1,64	1,51	1,77
Sujet3	1,23	1,11	1,33	1,45	1,86
Sujet4	1,50	1,22	1,97	1,39	2,13
Sujet5	1,99	1,60	1,43	1,65	2,07
Sujet6	1,69	1,80	1,07	1,56	1,66
Sujet7	1,25	1,32	0,81	1,57	1,88
Sujet8	2,06	1,80	0,96	1,72	1,53
Sujet9	X	1,66	0,91	1,64	2,06
PANEL	**1,61**	**1,55**	**1,18**	**1,55**	**1,89**

Tableau 15 Ecart type des notes attribuées à tous les sons sur l'ensemble des répétitions. Les sujets 1, 4, 5, et 9 sont moyennement répétables pour le descripteur KE (écart type>2).

- le consensus, analysé à l'aide du pourcentage d'inertie porté par le premier axe des ACP {Son, Juge} par descripteur. Il donne une estimation de la dispersion des juges sur chaque composante. Avec une inertie de plus de 70% sur le premier axe, les juges sont bien globalement consensuels sur les descripteurs ESPACHOC (80%), BONM (79%), KE (74%) et INTENSE (88%), tandis qu'ils le sont moins sur le descripteur LONG (65%).

Les performances du panel sont globalement satisfaisantes. On considère alors les évaluations moyennes pour la caractérisation analytique des bruits de fermeture de porte.

3.2 Profil sensoriel

3.2.1 Propriétés continues

Nous présentons les évaluations moyennes des propriétés continues, en précisant les sons discriminés par test de Duncan (5%) (Figure 48). *(cf annexe PANEL_SENSORIEL)*

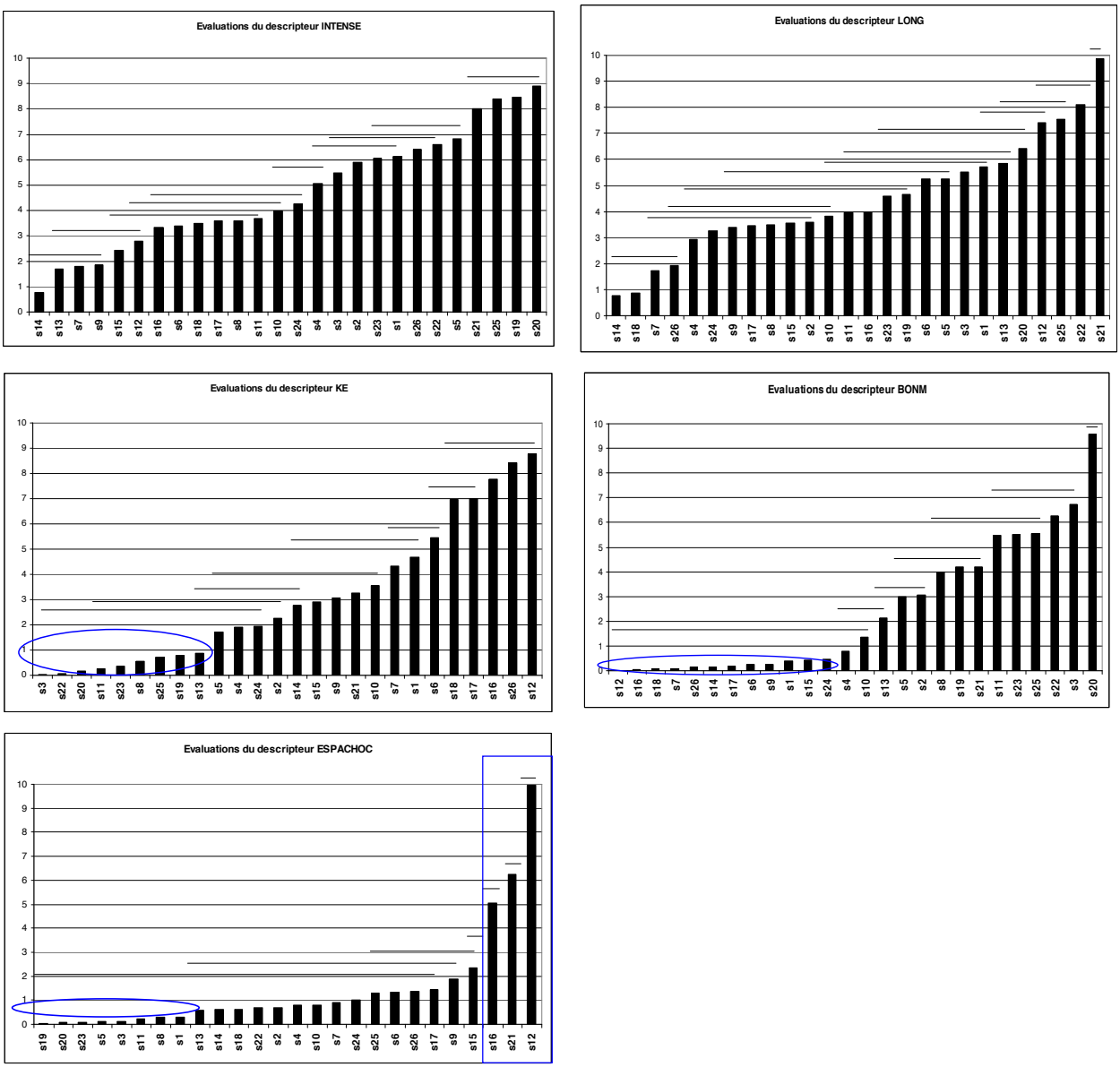


Figure 48 Evaluations des propriétés analytiques continues des bruits de fermeture des portes (0 - / 10 +)
Les barres horizontales regroupent les stimuli qui ne sont pas significativement discriminés par test de Duncan 5%.
Les propriétés INTENSE et LONG caractérisent l'ensemble des bruits de fermeture de porte, tandis que les propriétés BONM et KE et ESPACHOC sont absentes pour certains bruits de fermeture de porte. ⬭
Seulement 3 sons présentent un fort ESPACHOC. ☐

3.2.2 Spécificités

Certains bruits annexes sont identifiés : la spécificité ''Gris-gris'', qui décrit des vibrations dans le son, est signalée pour les bruits s21 et s25, la spécificité ''Triangle'', qui fait référence à une note aigue en

fin de son, est observée dans les bruits s13 et s22. Ces spécificités sont détectées à partir du nombre d'occurrences.

3.3 Caractérisation par écoute analytique

La caractérisation analytique des 26 bruits de fermeture de porte est résumée par Analyse en Composante Principale des données normées. Les trois premières Composantes Principales (CP) résument 94% de l'information globale. Les bruits de fermeture de porte sont projetés dans les plans principaux CP1/CP2 et CP1/CP3. Les spécificités sont précisées. Les corrélations des propriétés avec ces 2 axes sont présentées sur le cercle des corrélations (Figure 49).

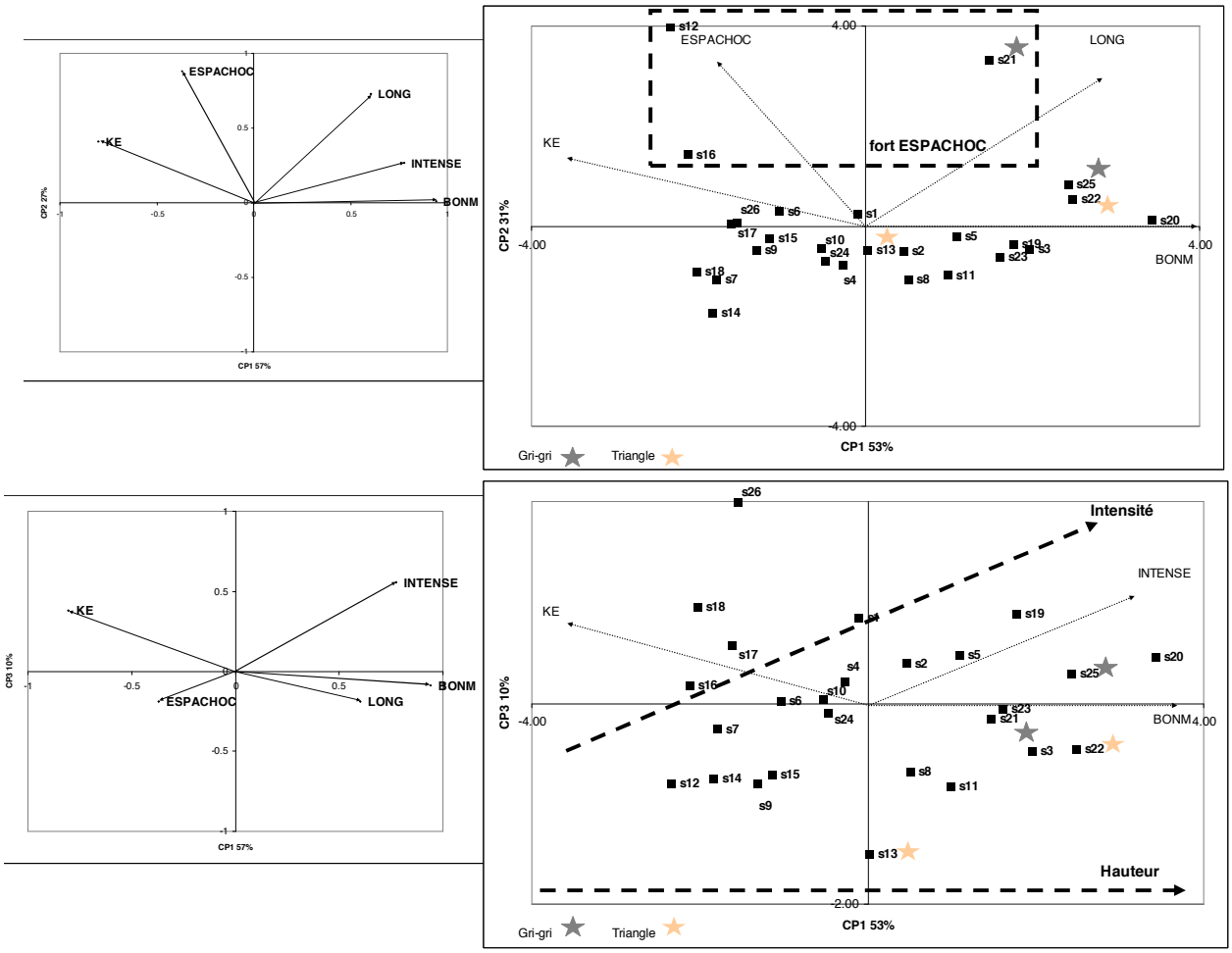


Figure 49 Analyse en Composantes Principales des propriétés analytiques continues : cercle des corrélations et projection des bruits sur les plans CP1/CP2 et CP1/CP3. Projection des spécificités Gri-gri ★ et Triangle ★

- La CP1 est corrélée à BONM et anti-corrélée à KE. Les sons à fort BONM ont un faible KE (ex : s20) et vice versa (ex : s16). Cet axe est lié à la hauteur globale du son.
- La CP2 permet de différentier les 3 sons à fort ESPACHOC (ex : s16).
- Le plan CP1/CP3 met en évidence l'intensité des sons (ex : s12 peu intense et s19 intense).
La longueur du son (LONG) ne semble caractériser que des sons qui contiennent un bruit spécifique : gri-gris ou triangle.

Les bruits de fermeture de porte se résument donc analytiquement par la hauteur, liée aux propriétés BONM et KE, l'intensité et les bruits annexes : gri-gri, triangle, fort ESPACHOC.

4. Réseau perceptif

Les évocations (qualité, solidité), les propriétés naturelles (poids de porte, énergie de fermeture, porte mal fermée, et les sources organiques) et les propriétés analytiques (INTENSE, BONM, KE, ESPACHOC, Gri-gri, Triangle) participent toutes à la caractérisation perceptive des bruits de fermeture de porte. D'une part, les évocations sont reliées aux propriétés naturelles, caractéristiques de l'évènement perçu **(section 4.1.2)**. D'autre part, les propriétés analytiques sont reliées aux propriétés naturelles **(section 4.1.2)**. Ainsi, les différentes propriétés perceptives sont placées au sein d'un réseau perceptif qui propose une description perceptive du bruit de fermeture de porte **(section 4.2)**.

4.1 Relations entre propriétés

Les relations entre propriétés perceptives sont établies par régressions linéaires. Nous utilisons la régression LASSO (Cornillon et Matzner-Lober, 2007) pour établir les modèles sur nos données fortement liées (par exemple les propriétés KE et BONM sont anticorrélées). La régression LASSO propose une solution au problème de colinéarité des variables en autorisant un biais sur l'estimation des coefficients pour réduire la variance. Elle aboutit à une plus grande stabilité des coefficients du modèle par rapport à la régression linéaire multiple. De plus elle est sélective. Les modèles sont par ailleurs établis avec un critère de validation croisée ''leave-one-out'' pour assurer leur robustesse (Cornillon et Matzner-Lober, 2007). Il s'agit de déterminer différents modèles par apprentissage sur tous les ensembles de n-1 données, et de calculer le coefficient de détermination à partir de ces prédictions (R2val). Les modélisations statistiques sont établies en coopération avec l'équipe Méthodologie Innovante et Facteurs Humains du service PErception et Facteurs Humains de PSA, pour l'ensemble des études.

4.1.1 Propriétés naturelles vs évocations

5 bruits de fermeture de porte, parmi les 26 étudiés, présentent la spécificité ''porte mal fermée''. Elle impacte probablement la ''qualité'' et la ''solidité'' perçues, mais nous ne disposons pas de données suffisantes pour conclure sur cette propriété. Aussi, nous établissons les liens entre les autres propriétés naturelles ''poids de porte'' et ''énergie de fermeture'' et les évocations à partir des 21 bruits associés à des ''portes bien fermées''. Les évocations ''qualité'' et ''solidité'' sont caractérisées par régressions LASSO à partir des propriétés naturelles ''poids de porte'' et ''énergie de fermeture'' préalablement normées (Eq 7), (Eq 8). Les régressions obtenues permettent de quantifier l'importance relative des propriétés ''poids de porte'' et ''énergie de fermeture'' dans l'évaluation des évocations qualité et solidité (Tableau 16).

Qualité_estimée = a1 + b1Poids de porte – c1Energie de fermeture, a1, b1, c1 >0, R2val = 0.88 (Éq 7)
Solidité_estimée = a2 + b2Poids de porte – c2 Energie de fermeture, a2, b2, c2 >0, R2val = 0.92 (Éq 8)

Contribution des propriétés	Poids de porte	Energie de fermeture
Qualité	P1%	P2%
Solidité	P3%	0.5P2%

Tableau 16 Contributions des propriétés Poids de porte et Energie de fermeture pour l'évaluation des évocations Qualité et Solidité

La perception d'une porte lourde et d'une manœuvre douce évoque qualité et solidité. L'énergie de fermeture perçue a une influence négative plus forte sur la qualité que sur la solidité.

4.1.2 Propriétés analytiques vs propriétés naturelles

Les liens entre les propriétés naturelles continues ''poids de porte'' et ''énergie de fermeture'', et les propriétés analytiques sont établis par régressions LASSO (Eq 9), (Eq 10) à partir des évaluations des 26 bruits de fermeture de porte.

Poids de porte_estimée = d+eBOMN-fKE, d, e, f >0, R2val = 0.81 *(Éq 9)*
Energie de fermeture_estimée= g + hINTENSITE, g, h >0, R2val = 0.93 *(Éq 10)*

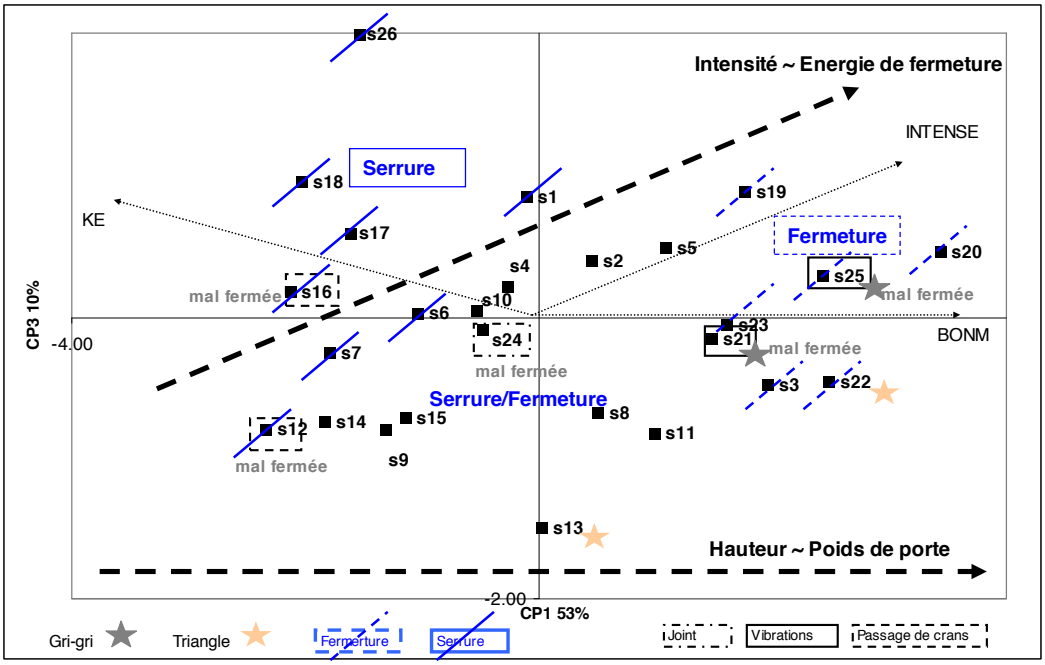
Le poids de porte ressenti est lié aux propriétés analytiques KE et BOMN, relatives à la hauteur du bruit. L'énergie de fermeture ressentie est liée au descripteur INTENSE.

Les propriétés naturelles expertes sont directement comparées aux propriétés analytiques. Les bruits s21 et s25 qui contiennent des vibrations selon les experts automobiles sont caractérisés par la présence de gri-gri en sensoriel, les bruits s12 et s16 dont on entend le passage des crans de la serrure sont les deux bruits avec le plus d'ESPACHOC. La présence de bruit de joint n'est en revanche pas caractérisée par les propriétés analytiques.
La présence de serrure est liée aux descripteurs KE, BONM et INTENSE :

- si KE > C1 : les bruits sont de type '' bruit serrure'' (on entend principalement un bruit lié à la serrure),
- si KE < C2, INTENSE > C3, BONM > C4 : les bruits sont de type ''bruit fermeture'' (on n'entend pas le bruit lié à la serrure).

La spécificité ''*mal fermée*'' est associée, pour les bruits s12 et s16, à un fort ESPACHOC (passage de crans), et pour les bruits s21 et s25 ; à la présence de Gri-gri (vibrations). Le bruit s24, qui lui aussi renvoie à une porte ''*mal fermée*'', n'est pas caractérisé par une propriété analytique, mais du point de vue organique : il est le seul à contenir un fort bruit de joint. Cependant, trop peu de bruits présentent ces spécificités pour généraliser ces observations.

Les liens établis sont illustrés par projection des propriétés naturelles dans l'espace analytique des bruits de fermeture de porte (Figure 50).



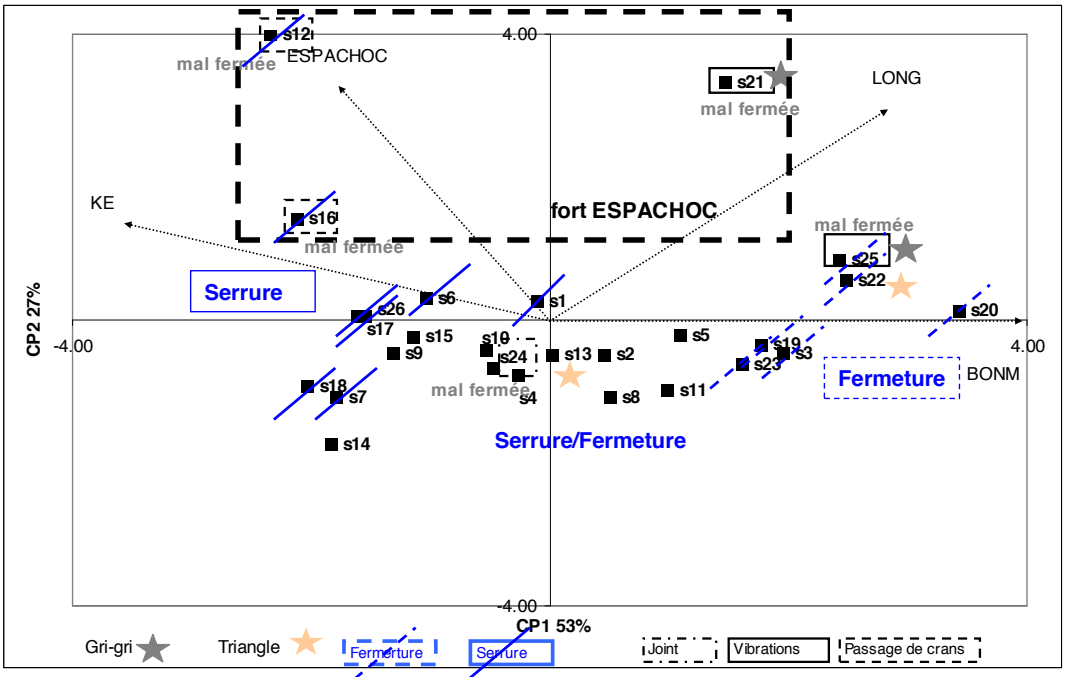


Figure 50 Analyse en Composantes Principales des propriétés analytiques continues : projection des bruits sur les plans CP1/CP2 (en haut) et CP1/CP3 (en bas). Indication des spécificités Gri-gri et Triangle.

Illustration des propriétés naturelles : la perception du poids de la porte est liée à la hauteur (ex : s20 est grave et associé à une porte lourde, s16 est aigu et associé à une porte légère), celle de l'énergie de fermeture est liée à l'intensité (ex : s19 est fort et associé à une fermeture énergique, s12 est faible et associé à une fermeture douce) ; KE est lié à perception de la serrure (ex : s16), BONM et INTENSE à la perception "fermeture" ; Gri-gri à la présence de vibrations (ex : s25) ; ESPACHOC à la présence de passage de crans (ex : s16)

4.2 Réseau perceptif

Les relations entre propriétés naturelles et évocations d'un part, et entre propriétés analytiques et évocations d'autre part, sont assemblées sous forme de réseau (Figure 51).

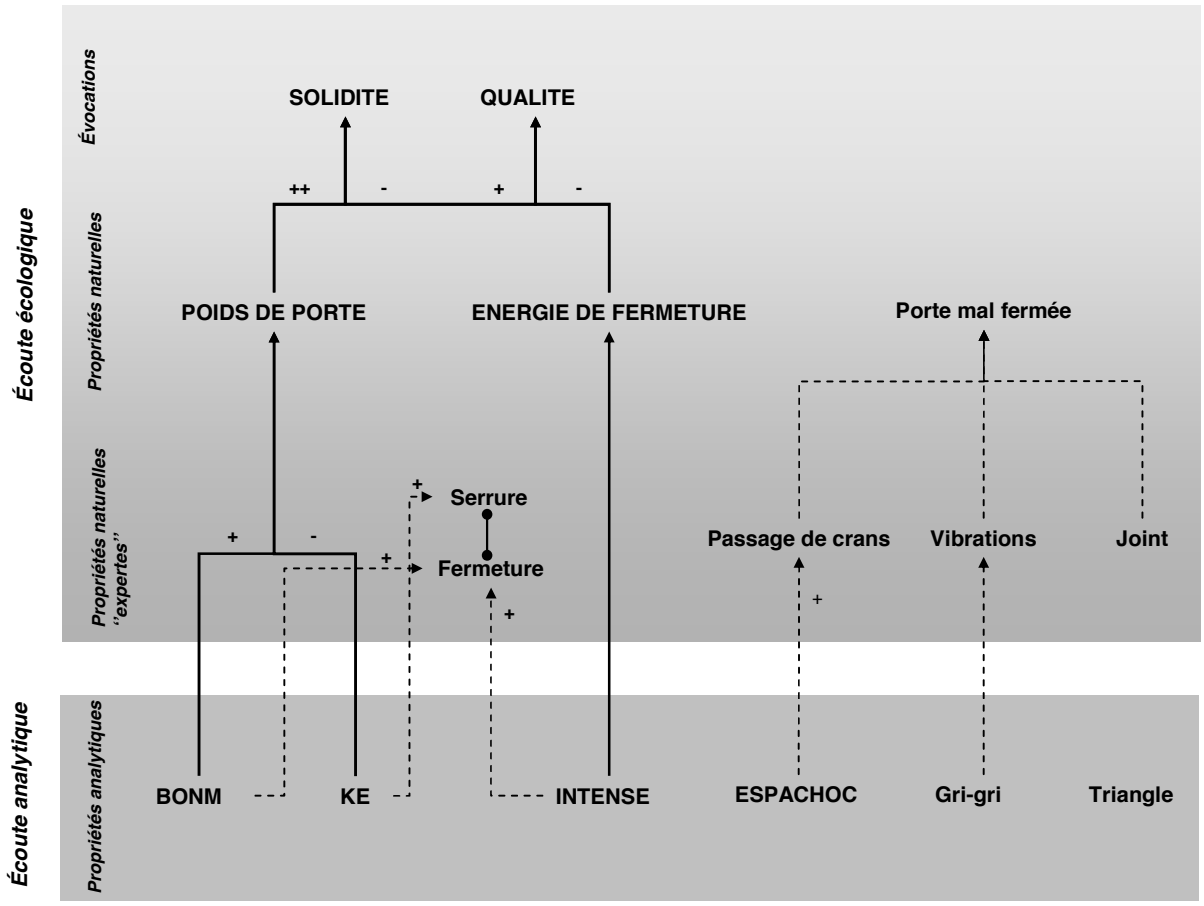


Figure 51 Relations entre propriétés

La QUALITE que renvoient les bruits de fermeture de porte dépend du POIDS DE LA PORTE et de l'ÉNERGIE DE FERMETURE ressentis. Une porte lourde associée à une manœuvre douce renvoie une impression de qualité et vice versa. L'impression de SOLIDITE dépend principalement du poids de la porte ressentie.

Une porte lourde est associée aux sons qui présentent un fort BONM et un faible KE, ils sont plus généralement graves. Une manœuvre douce est associée aux sons de faible intensité.

Les sons Serrure contiennent un fort KE, tandis que les sons Fermeture ne contiennent pas de KE, et sont de forte intensité (INTENSE), et présentent un fort BONM. Les passages de crans de serrure sont distingués pour les sons à fort ESPACHOC, et les vibrations sont analytiquement décrites par la spécificité Gri-gris.

Enfin, le bruit de fermeture de porte peut parfois laisser un doute sur la réussite de la fermeture, c'est le cas des bruits qui présentent des chocs de passage de crans de serrure espacés, décrits par un fort ESPACHOC, des vibrations (Gri-gris) ou des bruits de joint. Peu de sons présentent ces spécificités, ces observations ne permettent pas de généraliser ces relations.

Conclusion

L'étude des propriétés perceptives des bruits de fermeture de porte est réalisée sur un corpus de 26 bruits choisis pour être ''représentatif'' des différents bruits. Ces bruits de fermeture de porte sont caractérisés au laboratoire par un ensemble de propriétés par écoutes analytique et écologique. L'écoute analytique est caractérisée par des propriétés analytiques (les propriétés continues KE, BONM, INTENSE, ESPACHOC et les spécificités Gri-gri, Triangle) qui décrivent les bruits de fermeture de porte, pour eux-mêmes, sans faire référence à l'évènement. L'écoute écologique est caractérisée par les propriétés naturelles, qui font référence au véhicule (''poids de porte''), à la manœuvre (''énergie de fermeture''), à l'évènement global (''porte mal fermée''), et aux sources organiques (présence serrure, vibrations, joint, passage de crans), ainsi que des évocations (''qualité'', ''solidité'').

Nous établissons les liens entre propriétés perceptives pour proposer un réseau perceptif caractéristique du bruit de fermeture de porte. Les liens obtenus en laboratoire sont comparés aux observations établies en situation réelle. De plus, le réseau est complété par les facteurs environnementaux influents.

Evocations vs propriétés naturelles

La ''qualité'' que renvoient les bruits de fermeture de porte dépend du ''poids de la porte'' et de ''l'énergie de fermeture'' ressentis. Une porte lourde associée à une manœuvre douce renvoie une impression de qualité. Certains sujets sont plus sensibles à l'énergie de fermeture. L'impression de ''solidité'' dépend principalement du ''poids de la porte'' ressentie. Ce résultat est cohérent avec l'observation en situation réelle de sujets ''inquiets'', plus attentifs au poids de la porte qu'à l'énergie de fermeture de porte, contrairement aux sujets ''conviviaux''. Les sujets ''inquiets'' sont justement plus préoccupés par la solidité que les sujets ''conviviaux''.

Propriétés analytiques vs propriétés naturelles

Une porte lourde est associée aux sons graves, qui présentent un fort BONM et un faible KE. Une manœuvre douce est associée aux sons de faible intensité. Les bruits sont justement décrits analytiquement en situation réelle par la hauteur, liée au poids de la porte et à la taille du véhicule, et l'intensité, liée à l'énergie de fermeture.

De plus, les sons ''Serrure'' contiennent un fort KE, tandis que les sons ''Fermeture'' (pas de présence de la serrure) ne contiennent pas de KE, contiennent un fort BONM et sont de forte intensité. Les passages de crans de serrure sont distingués pour les sons à fort ESPACHOC, et les vibrations sont analytiquement décrites par la spécificité Gris-gris.

Réseau perceptif et facteurs environnementaux

Le réseau perceptif, qui reprend les relations entre propriétés, est complété par les facteurs environnementaux influents. La manœuvre et l'image a priori du véhicule ont une influence sur la perception des bruits de fermeture de porte :

- Le geste ressenti n'influe pas sur l'évaluation du bruit de fermeture de porte. En revanche l'énergie de fermeture est importante, puisque l'augmentation de la vitesse de fermeture dégrade le bruit résultant. L'ensemble des sujets cherche à minimiser l'énergie mise dans la fermeture, mais certains (les ''conviviaux'') y sont plus sensibles pour évaluer la qualité résultante.

- L'image du véhicule, dépendante du segment et de la marque, participe à l'évaluation de la qualité que renvoie le bruit de fermeture de porte, avec une meilleure évaluation pour les véhicules qui ont une meilleure image, quel que soit le bruit de fermeture de porte.

La perception des bruits de fermeture de porte est ainsi représentée par un réseau de propriétés perceptives et de facteurs environnementaux (Figure 52).

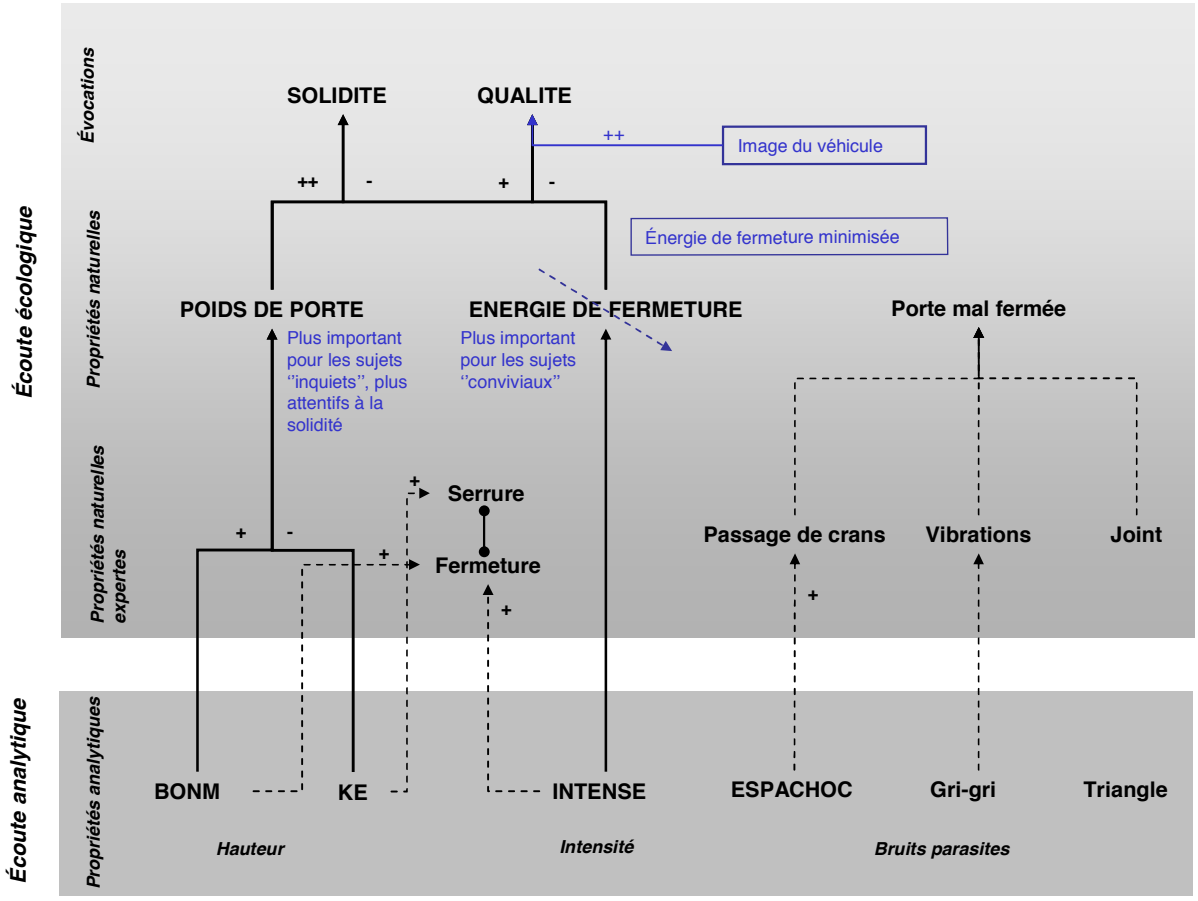


Figure 52 Réseau perceptif et facteurs environnementaux

Nous devons à présent associer aux propriétés perceptives les descripteurs acoustiques sous-jacents.

Chapitre VI. Modélisation acoustique des bruits de fermeture de porte

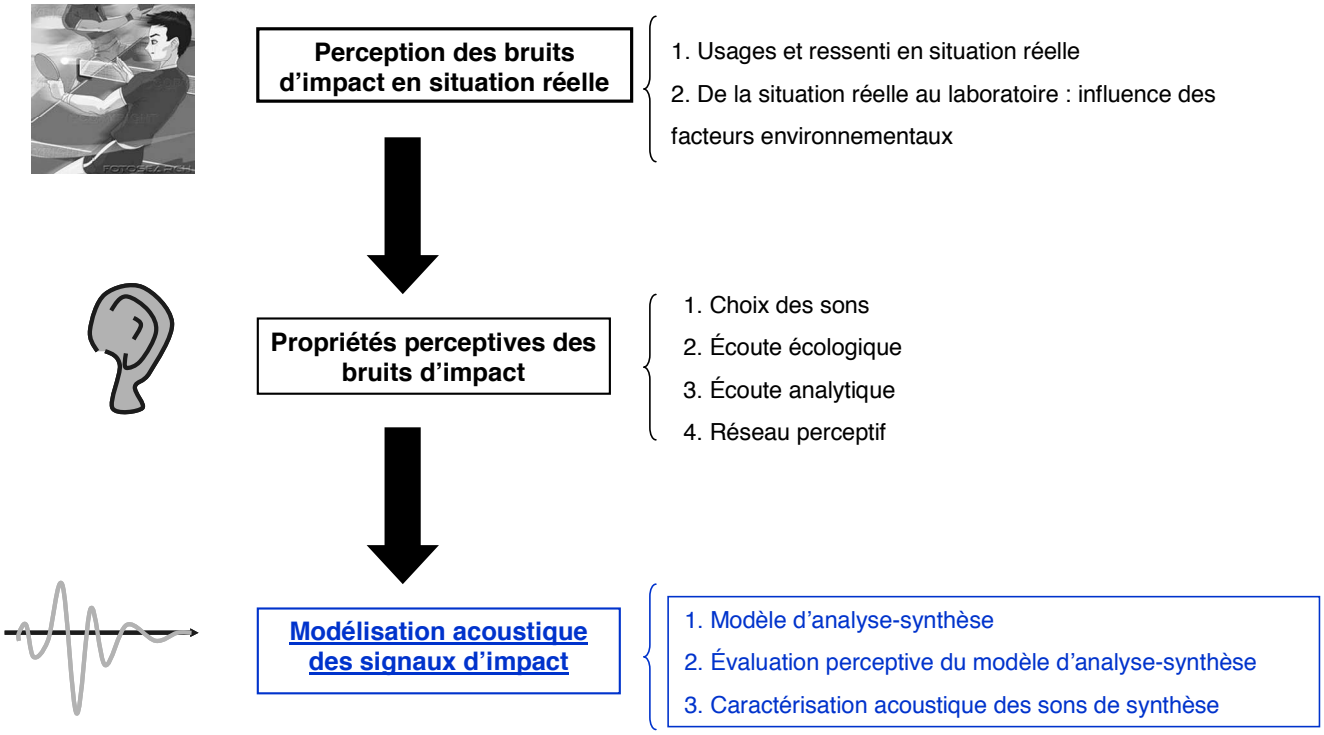


Figure 53 Démarche pour l'étude des bruits de fermeture de porte

Nous cherchons à modéliser les propriétés perceptives des bruits de fermeture de porte par des critères extraits du signal acoustique. Plus que de prédire les propriétés perceptives, nous souhaitons comprendre leurs liens avec le signal acoustique. Une démarche par analyse-synthèse est alors envisagée. L'ambition de l'analyse-synthèse n'est pas ici de reproduire précisément un son, mais d'identifier un nombre restreint de paramètres de contrôle liés aux propriétés perceptives des sons. Elle se construit sur la base d'un modèle simple, puis se nourrit de l'analyse des signaux réels et de l'écoute des sons synthétisés, en particulier de leurs propriétés analytiques, passerelles entre le signal acoustique et les propriétés naturelles. Comme précisé Figure 53, le modèle est d'abord complété par itération d'analyses et d'écoutes jusqu'à ce que les sons de synthèse soient proches des sons réels du point de vue des propriétés perceptives **(1)**. On évalue ensuite sa capacité à reproduire les propriétés perceptives, puis on sélectionne les paramètres les plus influents sur ces propriétés **(2)**. La synthèse de sons contrôlés sur ces paramètres permet alors d'observer leurs effets spécifiques sur les propriétés perceptives, et de déduire les critères acoustiques sous-jacents aux propriétés perceptives **(3)**.

Une partie des travaux de ce chapitre a donné lieu à un acte de congrès :
[Bezat, M-C., Roussarie, V. Voinier, T., Kronland-Martinet, R., Ystad, S. (2007). Car door closure sounds: characterization of perceptual properties through analysis-synthesis approach. *Proceedings of the 19th Intenational Congress on Acoustics,* 2-7 September 2007, Madrid, Spain.]

1. Modèle d'analyse-synthèse

Nous proposons dans cette partie un modèle d'analyse-synthèse construit dans le but de synthétiser des sons proches des sons réels du point de vue des propriétés perceptives, à partir d'un nombre restreint de paramètres de contrôle. Le modèle est progressivement affiné et contrôlé par notre propre écoute des propriétés perceptives.
Pour réduire la complexité du problème, notre étude se focalise sur une partie restreinte des propriétés relevées dans le chapitre précédent **(section 1.1)**. Les signaux complexes de fermeture de porte sont ensuite décomposés en signaux élémentaires composés de quelques impacts **(section 1.2)**. Un modèle de bruit d'impact simple est alors proposé **(section 1.3)**, pour finalement définir le modèle d'analyse-synthèse complet **(section 1.4)**.

1.1 Propriétés perceptives étudiées

Les bruits de fermeture de porte sont caractérisés au laboratoire par un réseau complexe de propriétés perceptives dans le chapitre précédent. On choisit de restreindre la modélisation acoustique à une partie de cet ensemble de propriétés, et on tire avantage des relations entre propriétés pour se focaliser sur les propriétés les plus ''facilement'' modélisables.

1.1.1 Restriction des propriétés perceptives

Les vibrations, les joints, le passage des crans, et la résonance aigue (Triangle) ne sont entendus que pour certains bruits de fermeture de porte. Ces spécificités sont alors perçues en plus du bruit de fermeture de porte. Pour alléger notre étude, nous choisissons de ne pas les traiter dans un premier temps. Nous abordons les propriétés caractérisant l'ensemble des bruits : les propriétés analytiques INTENSE, BONM, KE, les propriétés naturelles ''poids de la porte'', ''énergie de fermeture'', ''présence de bruit serrure'', ainsi que les évocations de qualité et de solidité.

1.1.2 Propriétés perceptives cibles

Les propriétés perceptives sont liées les unes aux autres, des propriétés bas niveau (les propriétés analytiques) aux propriétés de plus haut niveau (les évocations). Les propriétés analytiques constituent une entrée privilégiée pour la modélisation acoustique. Il est par exemple plus intuitif de chercher des paramètres acoustiques caractéristiques de l'intensité plutôt que de l'énergie de fermeture. De même la modélisation des aspects KE et BONM des sons est plus accessible que celle du poids de la porte que renvoie le bruit, ou que celle de la solidité qu'il évoque. De plus le contrôle audio du modèle de synthèse est plus efficace sur ces propriétés, pour lesquelles nous avons acquis l'expertise du panel sensoriel. Les sons de synthèse peuvent ainsi être immédiatement évalués sur la base des propriétés analytiques, au contraire des propriétés naturelles qui sont plus complexes.

Mais la synthèse de bruits de fermeture de porte ne peut se baser uniquement sur les propriétés analytiques puisqu'elle cherche à être réaliste. Si l'on entend un son fortement KE sans y percevoir un bruit de ''serrure'', on ne peut reconnaître un bruit de fermeture de porte. De même, un son

caractérisé par un fort BONM et une absence de KE doit être associé à un son de type ‘’fermeture’’ (impact panneau de porte). L’identification des sources organiques est indispensable.

Finalement, le modèle de synthèse s’appuie sur les propriétés analytiques KE, BONM, INTENSE et de la propriété naturelle experte ‘’serrure/fermeture’’ associée (Figure 54). Le modèle d’analyse-synthèse est spécifiquement construit pour reproduire ces propriétés.

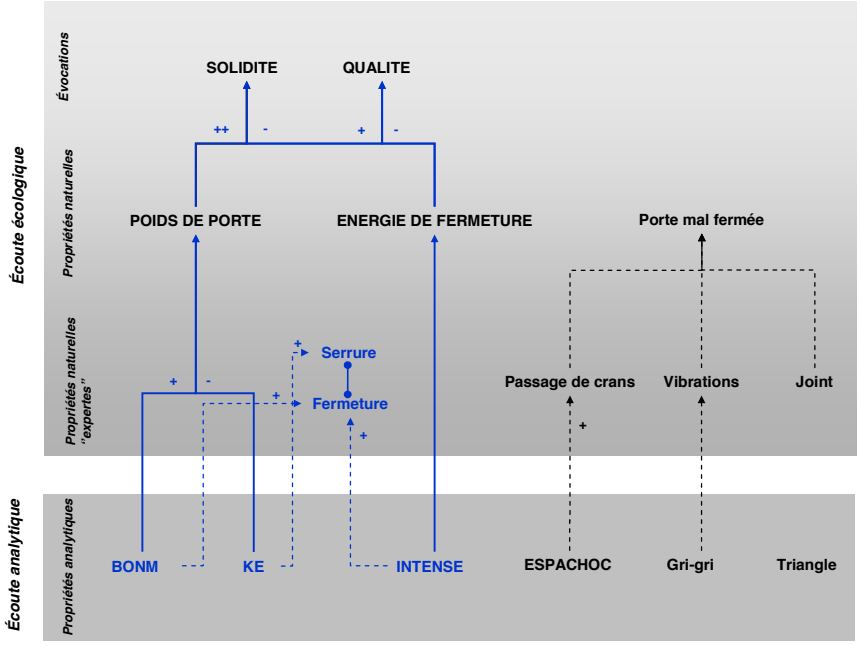


Figure 54 Réseau perceptif et propriétés perceptives cibles : les propriétés analytiques INTENSE, BONM et KE, associés à la propriété naturelle experte Serrure/Fermeture

1.2 Décomposition en bruits élémentaires

La complexité du bruit de fermeture de porte nous invite à le décomposer en bruits élémentaires préalablement à l’analyse. Le bruit de fermeture de porte est composé d’une partie ‘’serrure’’ et d’une partie ‘’fermeture’’ (bruit d’impact panneau de porte/caisse). La partie ‘’serrure’’ englobe les bruits métalliques, de type KE, et la partie fermeture caractérise le reste du bruit, du type BONM. Tous les bruits de fermeture de porte contiennent ces deux composantes sonores, même si certains sont décrits par les experts automobiles comme principalement ‘’serrure’’ (ex : s26) et d’autres comme principalement ‘’fermeture’’ (ex : s20).
Nous cherchons alors à séparer le bruit ‘’serrure’’ du bruit ‘’fermeture’’.

1.2.1 Choix de la méthode de décomposition

Les bruits élémentaires cherchés font référence à des sources organiques. Il est donc naturel de chercher à isoler ces bruits à l’aide de méthodes de séparation de sources. Mais ces méthodes s’avèrent infructueuses pour notre problème. Une méthode originale, la décomposition modale empirique, est alors testée.

Séparation de sources

Nous présentons succinctement quelques éléments physiques et signal des bruits de fermeture de porte, pour orienter notre choix de méthode de décomposition.

Le bruit ‘’serrure’’ est composé de multiples impacts liés à la serrure (impact des crans de serrure, des contacts pêne/gâche), et au contact du panneau de porte et de la caisse, par l’intermédiaire des joints (bruit ‘’fermeture’’) (Figure 55). Nous ne disposons pas de modèle physique de ces sources complexes.

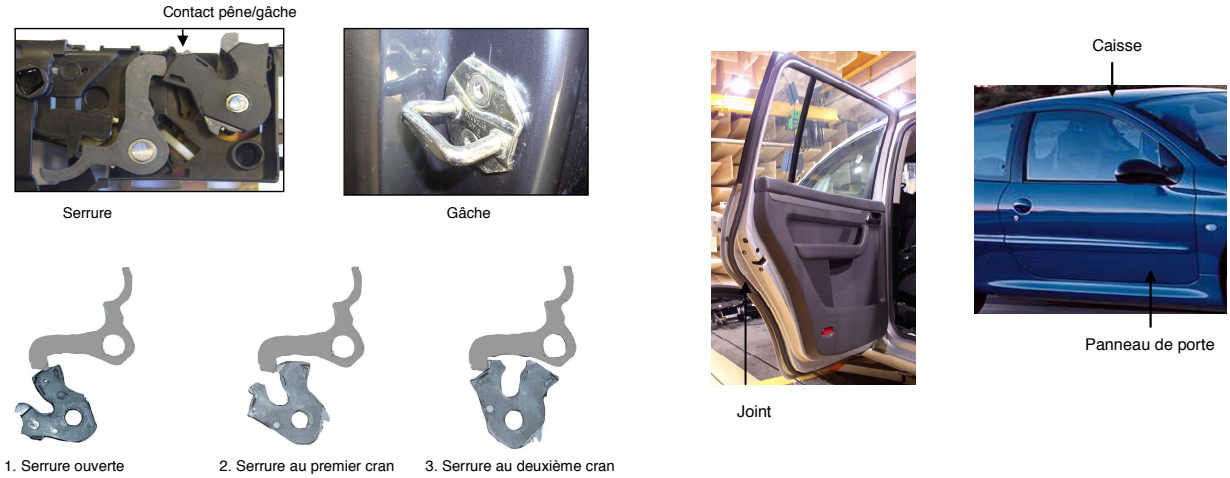


Figure 55 Serrure, gâche et passage des crans de serrure (à gauche)
Panneau de porte, caisse et joints (à droite)

Le signal de bruit de fermeture de porte est, pour l’essentiel, composé d’un ensemble de transitoires et d’une résonance basse fréquence. Les transitoires sont en partie liés aux impacts serrure et la résonance basse fréquence à l’impact du panneau de porte et de la caisse. Cependant les supports temporels et fréquentiels des bruits ‘’serrure’’ et ‘’fermeture’’ ne sont pas disjoints (Figure 56), ce qui rend leur extraction difficile par méthodes temps-fréquence. De plus, le bruit ‘’fermeture’’ est également un impact, il est donc transitoire, on ne peut donc pas chercher à extraire les transitoires pour isoler le bruit ‘’serrure’’ du bruit ‘’fermeture’’. En fait, nous ne disposons que de peu d’a priori sur le contenu signal des bruits ‘’serrure’’ et ‘’fermeture’’.

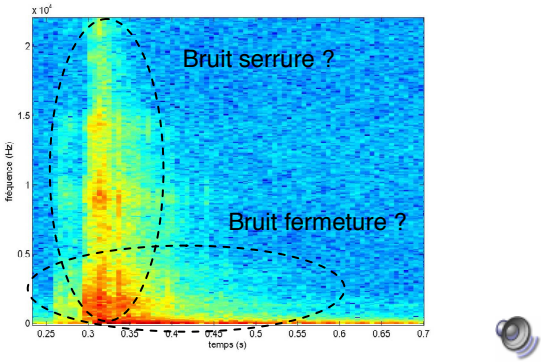


Figure 56 Représentation temps-fréquence du bruit de fermeture de porte s4 : les bruits élémentaires ‘’serrure’’ et ‘’fermeture’’ ne sont pas clairement repérés dans le plan temps-fréquence

Qu’ils soient de nature physique ou signal, nous disposons de peu d’éléments pour optimiser la décomposition en bruits élémentaires. Nous nous orientons alors vers les méthodes de séparation aveugle des sources pour lesquels toute l’information ne provient que des données elles-mêmes et non d’une connaissance a priori (Cardoso, 2004). Ces méthodes traitent des signaux multicapteurs

pour en extraire les composantes sous-jacentes (ou « sources ») en ne s'appuyant que sur la seule hypothèse d'indépendance statistique des signaux sources. Mais l'indépendance de nos sources n'est pas assurée : les impacts serrure sont entendus pour eux-mêmes mais ils participent également à l'excitation du panneau de porte. De plus, ce que l'expert automobile perçoit comme bruit ''serrure'' n'est pas stricto sensu l'onde acoustique provenant des impacts liés à la serrure. Les impacts entendus ne sont pas nécessairement tous issus des impacts de la serrure, un bruit de joint, de baguette de porte peut s'y mêler.

Empirical Mode Decomposition

Une méthode originale est proposée : la décomposition modale empirique (Huang et al., 1998). Sans a priori sur la décomposition, le processus itératif EMD explore séquentiellement un signal selon ses échelles ''naturelles''. Cette méthode, utilisée intuitivement, est justifiée a posteriori : la décomposition en bruit ''serrure'' et bruit ''fermeture'' est satisfaisante à l'écoute.

1.2.2 Méthode de décomposition : Empirical Mode Decomposition

Nous présentons la méthode et les principales caractéristiques de EMD en reprenant des éléments développés par P. Flandrin, dans le cadre de la thèse de G. Rilling, et accessibles sur le site http://perso.ens-lyon.fr/patrick.flandrin/emd.html. Ensuite, nous remarquons quelques analogies entre EMD et la perception.

Méthode EMD

La méthode EMD a été introduite par Huang et al. (1998). Cette méthode d'analyse séduit par son principe très simple même si elle n'admet pas de définition analytique. Son principe est d'identifier itérativement des modes intrinsèques au signal (IMFs), modulés à la fois en amplitude et en fréquence, en séparant localement (à l'échelle d'une oscillation) une contribution ''rapide'' d'une tendance plus ''lente''. Le signal est parfaitement reconstruit par simple addition des modes.

L'EMD repose sur un principe intuitif, présenté sur l'exemple d'un signal composé d'un signal modulé linéairement en fréquence (chirp) et d'un signal sinusoïdal. L'idée est de repérer les maxima (bleu) et minima (rouge) locaux du signal, de construire les enveloppes supérieure et inférieure par interpolation, puis d'en déduire un signal moyen (rose). Celui-ci est soustrait au signal global pour obtenir le résidu. Cette opération est réitérée sur le résidu jusqu'à obtention d'un signal de moyenne nulle (sifting process). Le premier mode est alors trouvé, il correspond à la composante linéairement modulée en fréquence. Ces opérations sont illustrées
Figure 57.

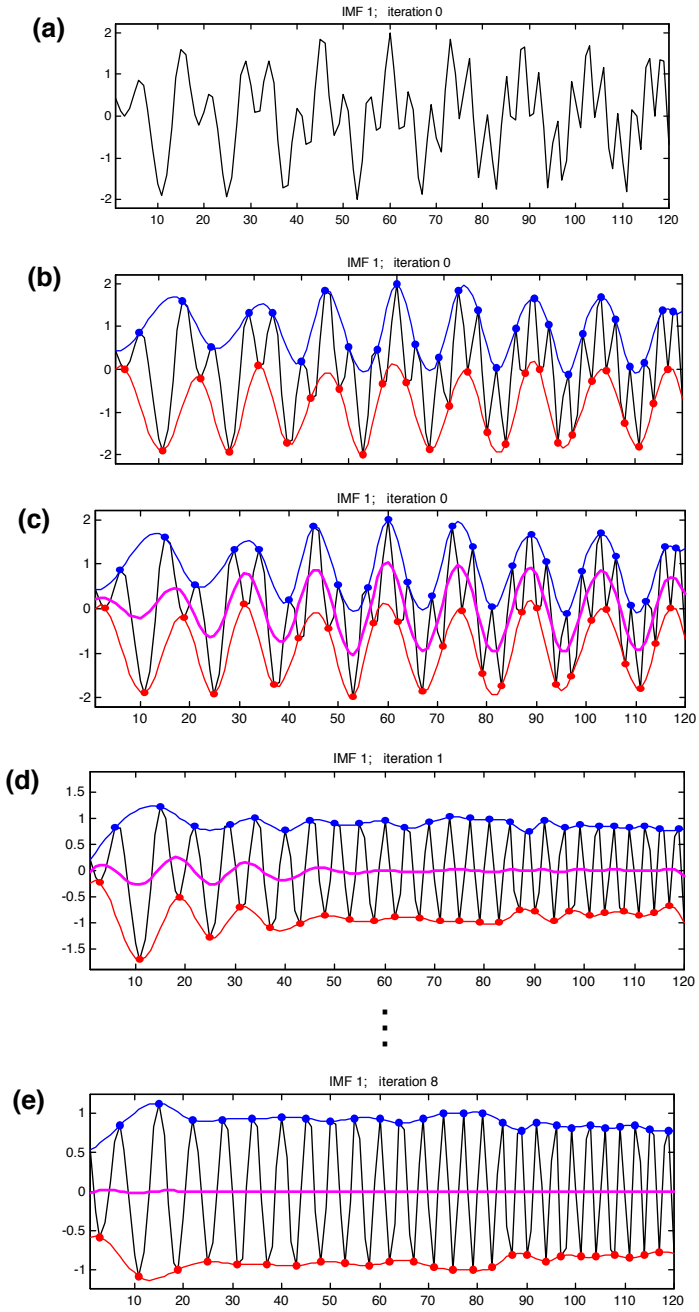


Figure 57 Signal exemple décomposé par EMD (a)
Les maxima (bleu) et minima (rouge) locaux du signal sont repérés pour construire les enveloppes supérieure (bleu) et inférieure (rouge) par interpolation (b), et l'enveloppe moyenne (rose) (c).
L'enveloppe moyenne a été soustraite, et le processus est réitéré (d).
Après plusieurs itérations (8), on obtient un signal de moyenne nulle : c'est le 1er mode EMD (e)

On recommence sur le reste du signal, et on obtient le deuxième mode (Figure 58).

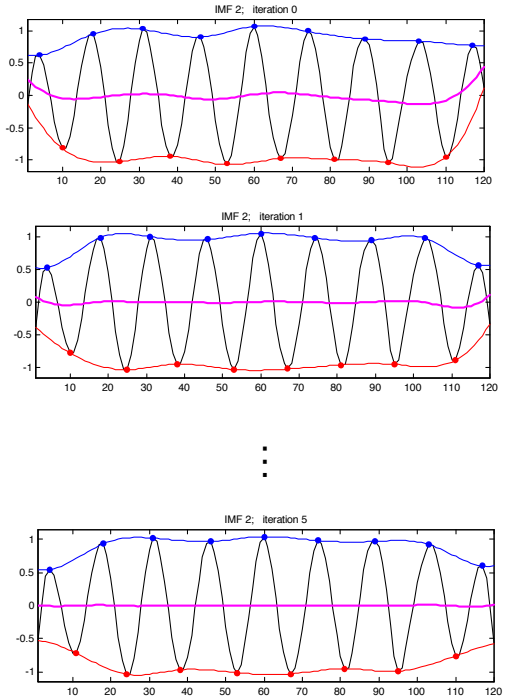


Figure 58 Obtention du 2eme mode, après 5 itérations.

Le processus est réitéré. Au fur et à mesure de la décomposition, on a de moins en moins d'extrema. La décomposition s'arrête quand il ne reste plus que 3 extrema. Tous les modes sont alors obtenus (Figure 59). Les 2 premiers modes de notre exemple correspondent au deux composantes : le signal linéairement modulé en fréquence, et le signal sinusoïdal.

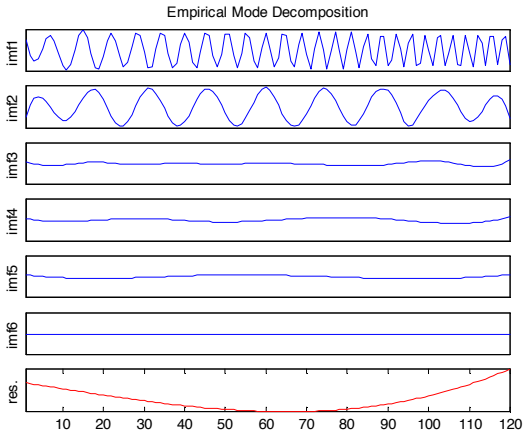


Figure 59 Modes EMD obtenus à partir de l'exemple : le premier mode correspond au signal linéairement modulé en fréquence, le deuxième au signal sinusoïdal.

Caractéristiques de l'EMD

La méthode EMD n'est définie qu'algorithmiquement. Elle est étudiée du point de vue de la théorie, de l'interprétation, de la mise en œuvre, et des applications dans le cadre de la thèse de G. Rilling, encadrée par P. Flandrin, à partir de simulations numériques sur des signaux bien contrôlées. Nous

illustrons certaines de ces caractéristiques illustrées par Flandrin et Gonçalves (2004) : la localité, l'adaptativité, et sa capacité à filtrer en temps-fréquence.

- Décomposition locale

La méthode EMD opère à l'échelle d'une oscillation (Illustration : Figure 60).

Figure 60 Le signal original (à gauche) est vu localement comme une superposition d'une oscillation lente (au milieu) et d'une oscillation rapide 'à droite). L'opération est reproduite sur l'oscillation rapide. D'après Flandrin et Gonçalves, 2004.

- Décomposition adaptative

La décomposition EMD s'adapte au signal, sans présupposer par exemple le caractère harmonique des oscillations (Illustration : Figure 61). Elle est entièrement pilotée par les données.

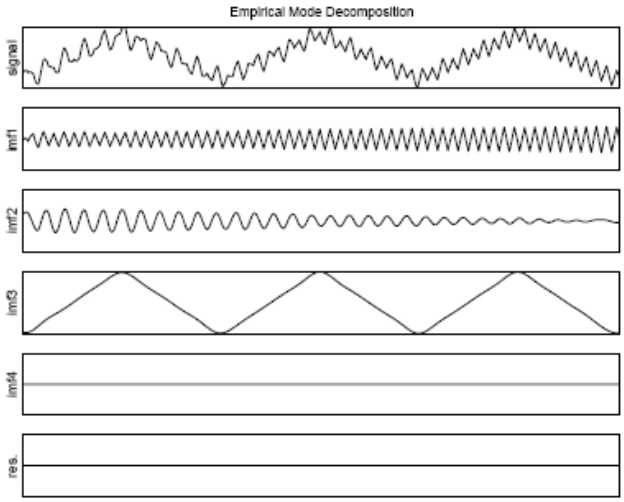


Figure 61 Illustration de la décomposition ''non-harmonique''.
Un signal (en haut) est décomposé en 3 modes principaux dont deux oscillations triangulaires modulées en amplitude (Imf1 et Imf3). D'après Flandrin et Gonçalves, 2004.

- Filtrage temps-fréquence

Au fur et à mesure de la décomposition, les modes obtenus ont de moins en moins d'extrema, pourtant EMD n'est pas une simple opération de filtrage passe haut à passe bas. La décomposition est locale, aussi EMD réalise un véritable filtrage variant dans le temps capable de séparer des composantes évolutives en recouvrement temporel et fréquentiel. Dans l'exemple de la Figure 62, les deux composantes modulées en temps et en fréquence, dans des zones temps-fréquence similaires, sont correctement repérées (Flandrin, 2004) :

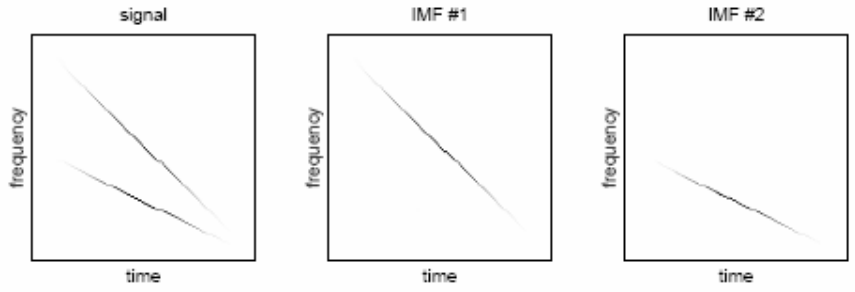


Figure 62 Illustration du filtrage variant dans le temps.
Un signal composé d'une superposition de 2 signaux modulés linéairement en fréquence avec un recouvrement en temps et en fréquence est représenté dans le plan temps-fréquence (à gauche). EMD décompose ce signal en 2 modes principaux : les 2 signaux modulés en fréquence sont séparés (au milieu et à droite). D'après Flandrin et Gonçalves, 2004.

La décomposition EMD agit sur les processus stationnaires large bande comme un banc de filtre de type ondelette, à $\Delta f / f$ constant (Figure 63).

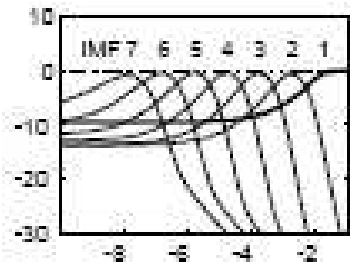


Figure 63 Densité spectrale de puissance des modes d'un bruit blanc. Le logarithme des densités spectrales de puissance estimées est tracé en fonction du logarithme des fréquences normalisées de 7 premiers modes (IMF). D'après Flandrin, Rilling et Gonçalves, 2004.

EMD et perception

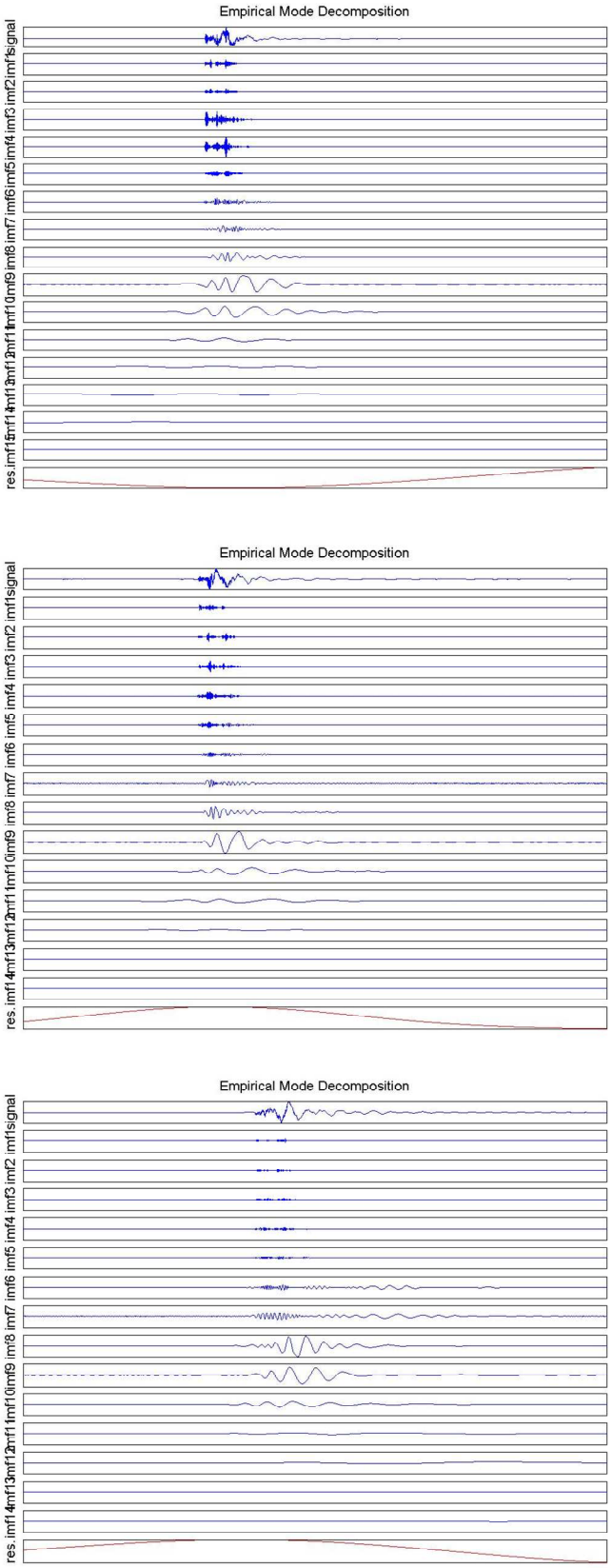
La décomposition EMD présente intuitivement des analogies avec le fonctionnement de la membrane basilaire. Moore et Glasberg (1983) ont proposé de décrire les patterns d'excitation de la membrane basilaire comme la sortie d'un banc de filtres auditifs, dont la largeur de bandes (les bandes critiques) augmente avec la fréquence centrale à $\Delta f / f$ constant. Le filtrage réalisé par EMD est bien à $\Delta f / f$ constant et présente l'avantage d'être plus ''physique'' que les modélisations actuelles du filtrage de la membrane basilaire. Par ailleurs, ce filtrage est adaptatif, comme la membrane basilaire, il s'adapte aux composantes principales du signal. Enfin il autorise des décompositions non linéaires. Cependant, la version actuelle d'EMD interpole les extrema par des splines cubiques, ce qui d'une part induit de l'information propre aux splines cubiques dans les modes obtenus, sans justification auditive, et d'autre part ne fait pas apparaître de notion de masquage temporel. De plus, une octave est nécessaire pour séparer les composantes, la membrane basilaire est plus sélective.
Sans chercher à approfondir l'analogie proposée, nous remarquons simplement que la simplicité de la méthode EMD s'accorde avec la recherche de simplicité des processus cognitifs.

1.2.3 Décomposition en bruit ''serrure'' et bruit ''fermeture''

Nous utilisons à présent la méthode EMD pour décomposer le bruit de fermeture de porte en bruit ''serrure'' et bruit ''fermeture''. La décomposition est illustrée à partir de 3 exemples : un bruit plutôt ''serrure'' (s26), un bruit plutôt ''fermeture'' (s20), et un bruit qui contient ces deux aspects

''serrure/fermeture'' (s4). Nous commençons par réaliser une décomposition EMD (Figure 64), puis nous réassocions les modes EMD en 2 signaux pour former les bruits ''serrure'' et ''fermeture''.

Décomposition EMD de bruits de fermeture de porte



Décomposition EMD de s26
(Bruit ''serrure'')

Les premiers modes (1 à 5) contiennent les variations rapides liées aux impacts serrure.
Forte présence des modes ''serrure''

Décomposition EMD de s4,
(Bruit ''serrure/fermeture'')

Présence réduite des modes 1 à 5.

Décomposition EMD de s20,
(Bruit ''fermeture'')

Faible présence de modes 1 à 5.
Des variations liées à la résonance basse fréquence dans les modes 6 et 7

Figure 64 Décomposition EMD des signaux s26, s4 et s20

Reconstruction des bruits ‘’serrure’’ et ‘’fermeture’’

Les reconstructions des bruits ‘’serrure’’ et ‘’fermeture’’ sont réalisées par recombinaisons partielles des modes 1 à 6 d’une part, et des modes 6 au dernier d’autre part (Figure 65). Pour plus d’homogénéité lors de la resynthèse, le mode 6 est laissé en recouvrement dans les bruits ‘’serrure’’ et ‘’fermeture’’.

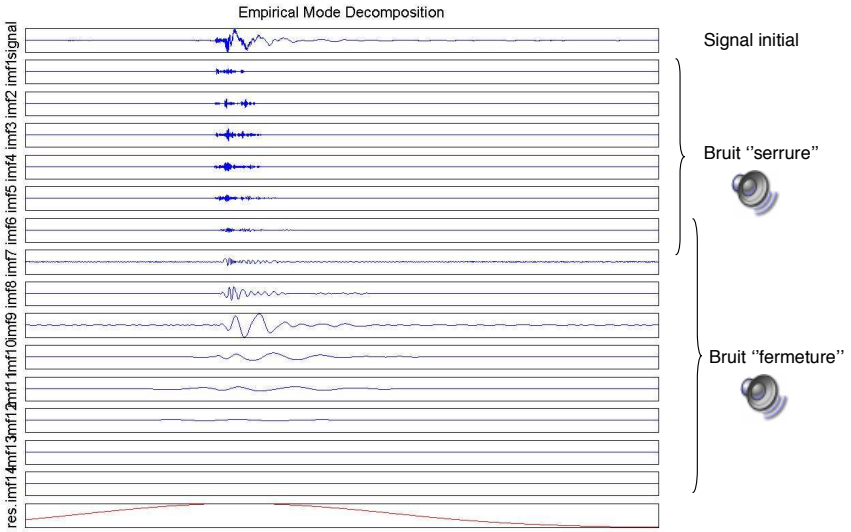


Figure 65 Reconstruction du bruit ‘’serrure’’, par addition des modes 1 à 6 ; et du bruit ‘’fermeture’’, par addition des modes 6 au dernier, du signal s4

A l’écoute, comme sur les transformées en ondelettes (Figure 66), on observe que le bruit s20 présente une partie ‘’serrure’’ bien moins importante que sa partie ‘’fermeture’’ ; au contraire le bruit s26 présente une partie ‘’serrure’’ bien plus importante que sa partie ‘’fermeture’’. Le bruit s4 présente des parties ‘’serrure’’ et ‘’fermeture’’ équilibrées.

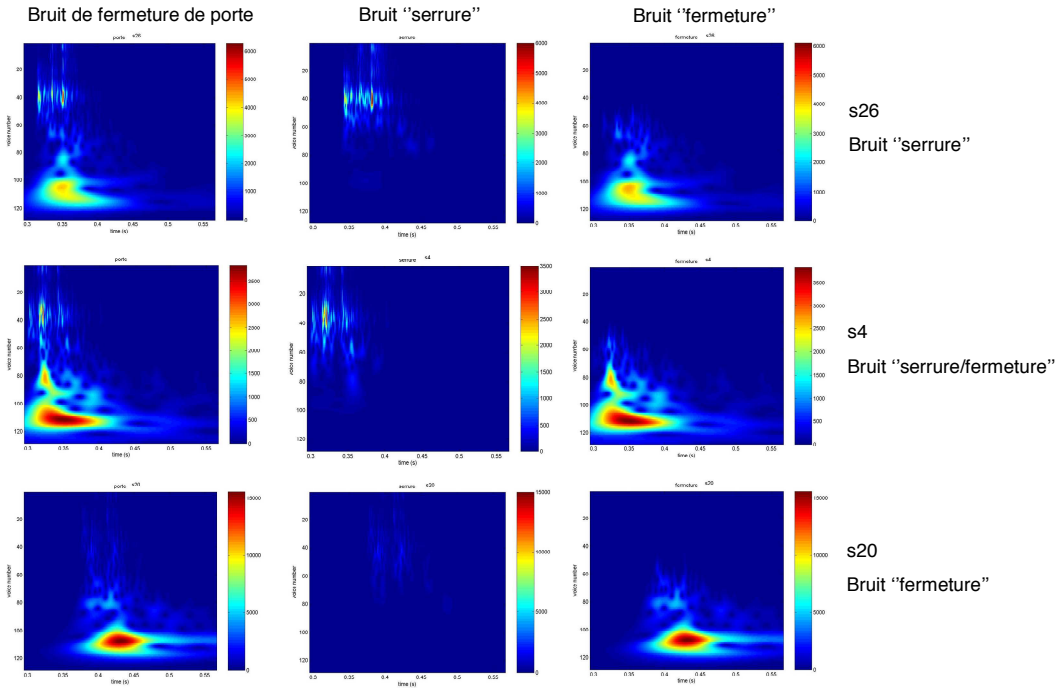


Figure 66 Transformées en ondelettes des bruits de fermeture de porte et des décompositions en bruit ''serrure'' et bruit ''fermeture'', des sons s26, s4, s20.

Les 26 bruits de fermeture de porte de notre étude sont ainsi systématiquement décomposés en bruit ''serrure'' et bruit ''fermeture''. L'écoute des signaux ''porte'', ''serrure'' et ''fermeture'' valide la pertinence de la décomposition réalisée. Par comparaison, de simples filtrages ne séparent pas les bruits ''serrure'' des bruits ''fermeture''. Il dénature soit les impacts serrure, soit la résonance basse fréquence. Quelle que soit la fréquence de coupure, les bruits ''serrure'' ne sont pas dissociés des bruits ''fermeture''. De plus, des compositions de bruits de fermeture de porte réalistes sont permises par simple addition des parties serrure et fermeture de bruits différents.

Avant de chercher à resynthétiser ces bruits élémentaires composés de plusieurs impacts, nous proposons un modèle d'analyse-synthèse de bruit d'impact simple.

1.3 Analyse-synthèse des bruits d'impacts

Nous exposons dans cette partie une version simplifiée du modèle d'impact proposé par Aramaki (2003).

1.3.1 Principe de la modélisation

Les bruits d'impact sont classiquement modélisés sous la forme d'une somme de composantes monochromatiques exponentiellement amorties. Les valeurs des paramètres associés au modèle dérivent des solutions d'équations physiques résolues pour des structures simples (Chaigne et Doutaut, 1997, Van der Doel et Pai, 1996). Pour les structures complexes, on peut chercher à reproduire perceptivement les contributions des deux grandeurs physiques importantes pour l'oreille qui sont la loi d'amortissement caractéristique de la nature du matériau, et les composantes fréquentielles plus particulièrement caractéristiques de la forme géométrique de la source (Aramaki, 2003). De plus, la répartition spectrale de l'énergie est dépendante de l'excitation. Plus l'impact produit de l'énergie, plus le nombre de mode excité est important. L'attaque du bruit, contrôlé par une enveloppe temporelle, caractérise l'interaction entre l'objet et l'excitateur.

Lorsque la densité modale est importante, les composantes individuelles ne sont plus distinguées. On considère en première approximation que l'on est dans cette situation et qu'aucune composante modale n'est distinguée pour nos impacts. Les bruits d'impact sont alors modélisés par un processus stochastique qui simule la répartition spectrale initiale et la loi d'amortissement, caractéristique de son matériau (Figure 67).

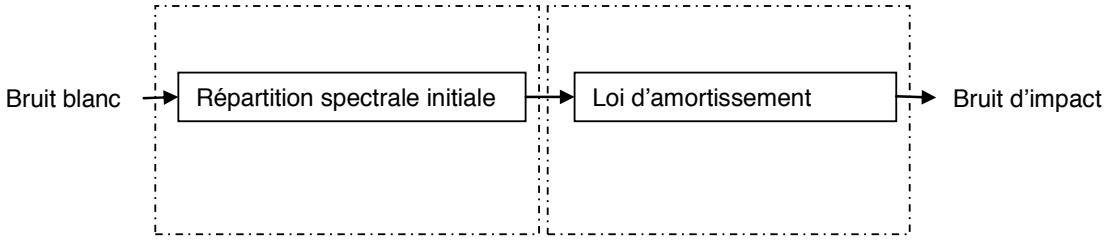


Figure 67 Principe de la modélisation du bruit d'impact

Le modèle de synthèse proposé n'est pas adapté aux bruits d'impact composés de quelques modes, il convient aux bruits d'impact ''bruités'', pour lesquels les modes sont confondus.
L'exemple d'un bruit de toqué, impact sur la planche de bord d'un véhicule (toque_s3), est choisi pour illustrer l'analyse, puis la synthèse, du bruit d'impact.

1.3.2 Méthode d'analyse

L'analyse est basée sur une représentation temps-échelle (temps-ERB), à partir de laquelle sont extraits la répartition spectrale initiale et la loi d'amortissement. Ces données sont ensuite approximées pour alléger la modélisation.

Représentation temps-ERB

Les signaux d'impact sont analysés à partir de représentations temps-échelle desquelles sont extraites les répartitions spectrales initiales et lois d'amortissement. La représentation temps-échelle proposée d'après Aramaki (2003) prend en compte le filtrage réalisé par la membrane basilaire. Celle-ci se comporte comme un banc de filtres dont la largeur de bande augmente avec la fréquence centrale. Les fréquences centrales des filtres sont réparties selon la relation proposée par Moore (1983) (Eq 11), illustrée Figure 68 :

$$ERB = 21.4\log(4.37F + 1) \quad \textit{(Éq 11)}$$

avec F la fréquence en kHz ERB le numéro de la bande ERB (Equivalent Rectangular Bandwith).

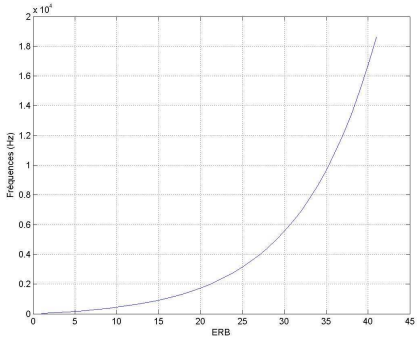


Figure 68 Relation entre échelle ERB et échelle des fréquences

Les fenêtres d'analyse choisies sont des gaussiennes, elles ont l'avantage de minimiser au mieux le principe d'incertitude de Gabor-Heisenberg. Les 41 fenêtres d'analyse sont centrées sur chaque intervalle de ERB et leur largeur de bande est définie de manière à ce que deux fenêtres successives se superposent lorsque l'amplitude maximale diminue d'un facteur $\sqrt{2}$. La Figure 69 représente les fenêtres d'analyse en fonction de la fréquence.

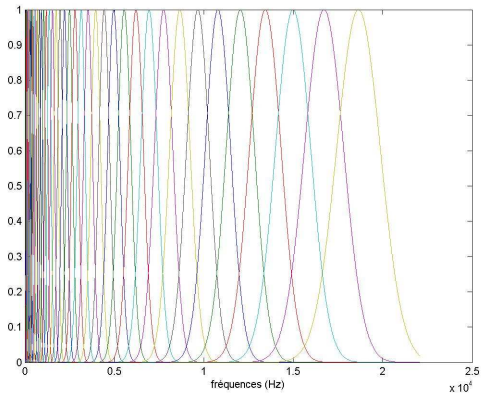


Figure 69 Fenêtres d'analyse en fonction de la fréquence

Un exemple d'une telle représentation, appelée temps-ERB, obtenue sur signal de bruit de toqué (toque_s3) est donné Figure 70.

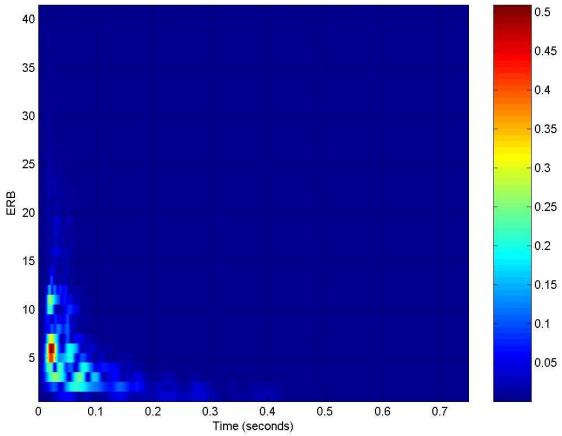


Figure 70 Représentation temps-ERB du bruit de toqué 'toque_s3'

Répartition spectrale initiale

A partir de la représentation temps-ERB, on repère le temps d'apparition de l'impact, et on calcule le niveau par sous-bandes ERBs. La répartition spectrale initiale ainsi obtenue sur le bruit 'toqué_s3' est présentée sur la Figure 71.

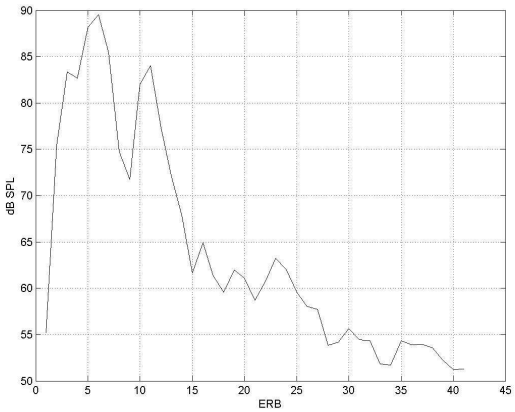


Figure 71 Niveaux par ERBs du bruit de toqué 'toque_s3' : répartition spectrale initiale

Loi d'amortissement

Le coefficient d'amortissement est calculé à partir du signal analytique. On cherche alors une approximation linéaire du logarithme du module du signal analytique dans chaque sous-bande ERB (illustré Figure 72). Le coefficient d'amortissement est directement déduit de la pente de la droite obtenue :

$$\alpha_n = \frac{20\ln(10)}{dynT_n} \quad \text{avec} \quad T_n = \frac{dyn}{p_n} \quad \text{(Éq 12)}$$

T_n est le temps nécessaire à une décroissance de dyn dB. On choisit $dyn = 30dB$, cette dynamique est acceptable pour nos sons.

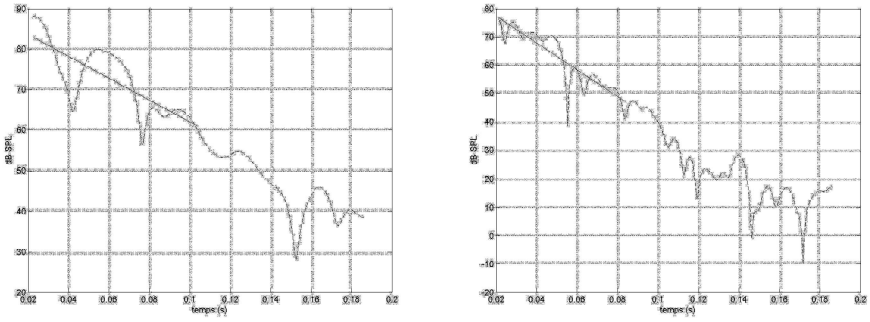


Figure 72 Approximation linéaire (trait plein) du logarithme du module du signal analytique de la bande ERB 6 (à gauche) et de la bande ERB 12 (à droite) du bruit de toqué.
Dans cet exemple, $\alpha_n = 31s^{-1}$ pour la bande 6 ; $\alpha_n = 55s^{-1}$ pour la bande 12.

La loi d'amortissement ainsi obtenue sur le bruit 'toqué_s3' est présentée Figure 73.

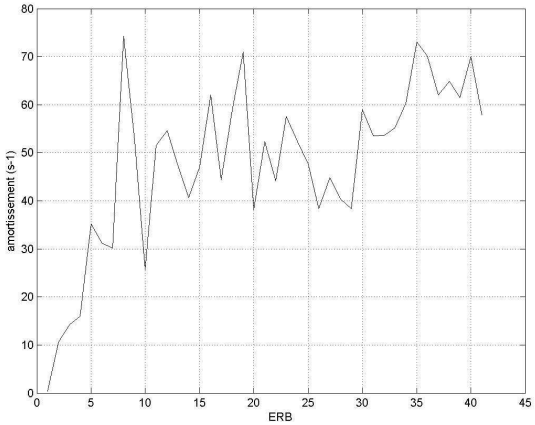


Figure 73 Amortissement par ERBs du bruit de toqué 'toqué_s3' : loi d'amortissement

Approximations

La répartition spectrale initiale et la loi d'amortissent caractérisent le bruit d'impact avec 82 paramètres. Mais ces données peuvent être approximées par des fonctions simples pour alléger la modélisation. Les approximations sont déduites de l'analyse d'un grand nombre de bruits, et des écoutes des sons resynthétisés. Elles sont proposées pour spécifiquement les impacts des bruits de fermeture de porte, dans la suite du rapport.

1.3.3 Méthode de synthèse

La synthèse du bruit d'impact est réalisée à partir de la répartition spectrale initiale et de la loi d'amortissement.

Un bruit blanc est filtré par bandes de ERB. Les 41 signaux obtenus sont contrôlés en niveau, en fonction de la répartition spectrale initiale. Ils sont ensuite modulés par une enveloppe temporelle dont l'amortissement exponentiel dépend de la loi d'amortissement. L'enveloppe temporelle a également une attaque exponentielle très rapide fixée. Le principe de la synthèse est illustré Figure 74.

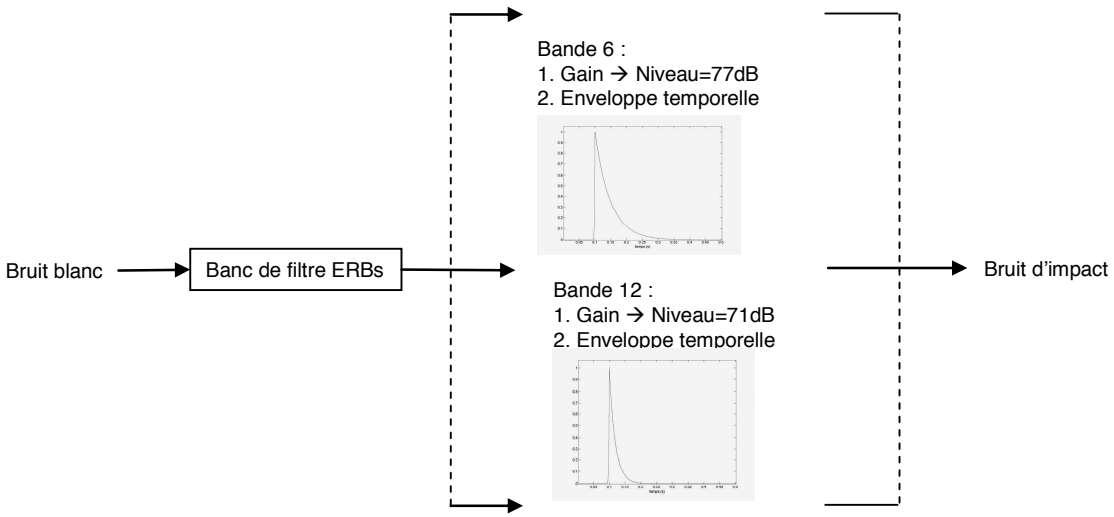


Figure 74 Principe de la synthèse : un bruit blanc est filtré par 41 bandes ERB. Un gain et une enveloppe temporelle avec un amortissement exponentiel sont appliqués pour chaque sous-bande ERB.

Le bruit de toqué 'toque_s3' est ainsi resynthétisé (toque_s3_synt). De plus, nous comparons ci-dessous les représentations temps-ERB du bruit réel et du bruit resynthétisé. Le bruit de synthèse n'est pas équivalent au son réel, même s'il présente quelques similitudes et paraît réaliste. On ne peut toutefois conclure sur l'efficacité de la synthèse à partir d'un seul son.

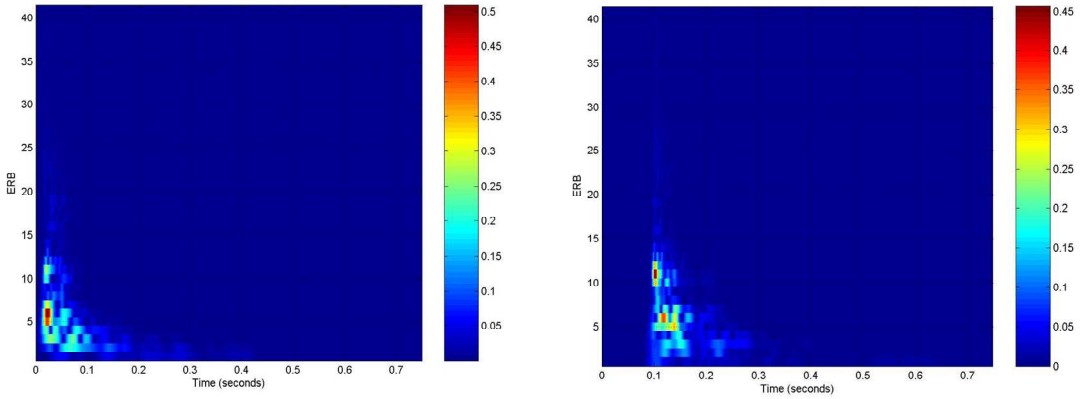


Figure 75 Représentations temps-ERB de bruit de toqué réel (à gauche) et du bruit de toqué synthétisé (à droite).

Le modèle d'analyse-synthèse de bruit d'impact présenté est maintenant appliqué à la synthèse du bruit de fermeture de porte.

1.4 Analyse-synthèse des bruits de fermeture de porte

Les 26 signaux de fermeture de porte de l'étude perceptive sont d'abord décomposés en bruits ''serrure'' et bruits ''fermeture''. Le bruit ''serrure'' est principalement composé de 3 impacts très rapidement amortis. Le bruit ''fermeture'' est composé d'un impact plus grave, avec une attaque et une partie amortie plus lente. Chaque impact est repéré, puis modélisé par un ensemble de gains et de facteurs d'amortissement par bandes de fréquence. La synthèse ''orchestrée'' de ces impacts simule le bruit de fermeture de porte.

1.4.1 Analyse des impacts du bruit de fermeture de porte

A partir de la représentation temps-échelle (temps-ERB), on repère les impacts principaux, puis on extrait la répartition spectrale initiale et la loi d'amortissement. Ces données sont ensuite approximées pour alléger la modélisation. L'analyse est illustrée sur le bruit de fermeture de porte s4.

Représentations temps-ERB

Les composantes ''serrure'' et ''fermeture'' du bruit de fermeture s4 sont d'abord analysées par représentation temps-ERB (Figure 76).

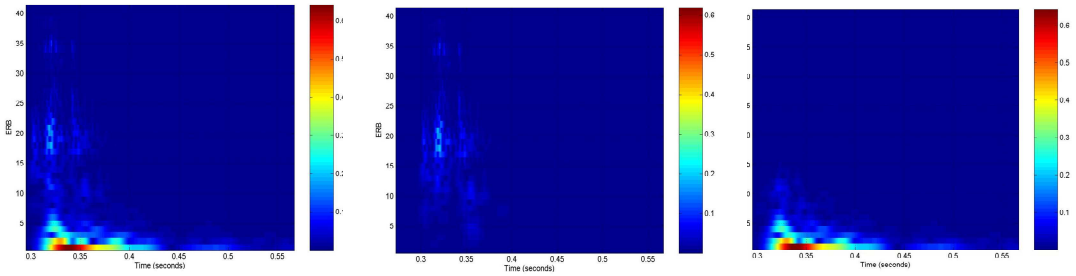


Figure 76 Représentations temps-ERB du signal de fermeture de porte s4 (à gauche) et de ses composantes serrure (au milieu) et fermeture (à droite)

Repérer les impacts

Les principaux impacts sont ensuite repérés :

- trois impacts principaux sont conservés pour le bruit ''serrure''. Ils sont repérés par les maxima de densité d'énergie haute fréquence (bande ERB > 20 ; f>1800Hz) en fonction du temps. Les maxima sélectionnés sont séparés d'au moins 13ms. Ce choix est fait à partir de la réécoute de bruits de synthèse, pour que les impacts soient perceptivement saillants et ne pâtissent pas d'effets de masquage temporel.
- L'unique impact de la partie fermeture est repéré à partir du maximum de densité d'énergie haute fréquence (bandes>3 ; f>100Hz) en fonction du temps.

Dans notre exemple, les impacts de la partie serrure sont séparés de 17.4ms et 21.7ms ; l'impact de la fermeture apparaît juste après le deuxième impact de la partie serrure (Figure 77). L'impact du bruit ''fermeture'' et le deuxième impact du bruit ''serrure'' ont peut être la même origine physique, mais ils sont traité indépendamment dans le modèle d'analyse-synthèse.

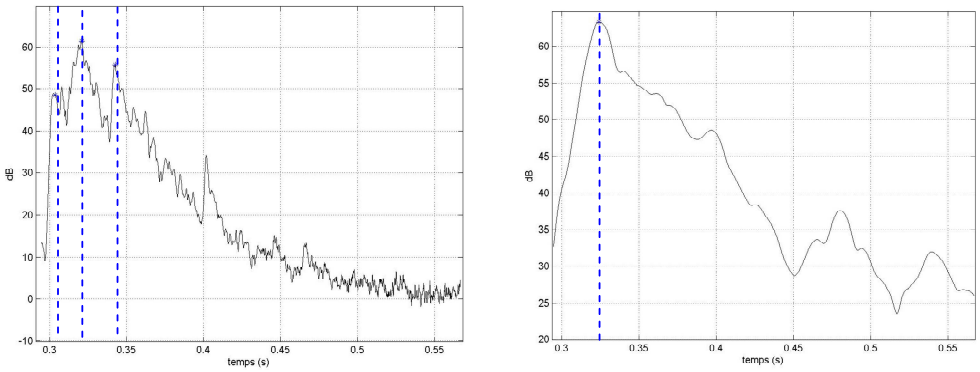


Figure 77 Les impacts des bruits ''serrure'' et ''fermeture'' sont repérés (traits pointillés) à partir des courbes de niveau HF en fonction du temps
de la partie ''serrure'' (à gauche) et de la partie fermeture (à droite).

Répartitions spectrales initiales et lois d'amortissement

On calcule les niveaux par bandes ERB des 3 impacts du bruit ''serrure'' sur une durée de 4.5ms, et de l'impact du bruit ''fermeture'', de plus basse fréquence, sur une durée de 13.6ms.

On calcule également les coefficients d'amortissements par bandes ERB du dernier impact du bruit ''serrure'', et de l'impact du bruit ''fermeture''. Les supports temporels des premiers impacts du bruit ''serrure'' n'étant pas disjoints, on ne peut facilement mesurer leur amortissement. De plus ce dernier est moins prégnant pour ces impacts, qui sont masqués par les suivants. Les amortissements de ces impacts sont modélisés par des constantes indexées par les durées inter impacts (Eq 13). On choisit un coefficient d'amortissement tel que le signal ait perdu 20dB à l'arrivée de l'impact suivant, pour que ces impacts soient distingués.

$$\alpha = \frac{\ln(10)}{d}$$ *, avec d la durée inter impact (Éq 13)*

Les répartitions spectrales initiales et les lois d'amortissements des impacts sélectionnés du bruit de fermeture de porte s4 sont illustrées Figure 78.

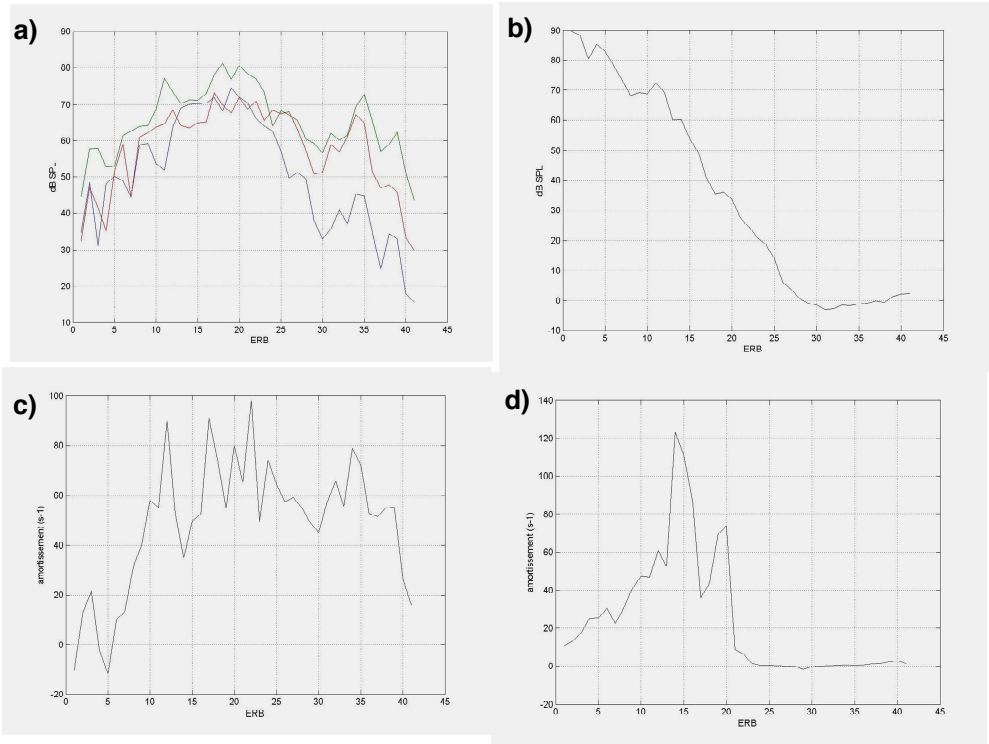


Figure 78 Répartitions spectrales (en haut) et lois d'amortissements (en bas) des impacts du bruit serrure (à gauche) et de l'impact fermeture (à droite)

(a) Niveaux par ERB des 3 impacts serrure : premier impact, deuxième impact, troisième impact

(b) Niveaux par ERB de l'impact fermeture

(c) Amortissements par ERB du 3ème impact serrure. Les amortissements n'ont de sens que pour les bandes ERB suffisamment énergétiques (bandes 12 à 25)

(d) Amortissements par ERB de l'impact fermeture. Les amortissements n'ont de sens que pour les bandes ERB suffisamment énergétiques (bandes 1 à 15)

Approximations des répartitions spectrales initiales et lois d'amortissement

Les analyses sont réalisées sur les 26 bruits de fermeture de porte. Les approximations proposées sont testées par écoute de l'ensemble des sons resynthétisés. On cherche le modèle le plus simple possible, mais suffisant pour que les sons de resynthèse soient réalistes et qu'ils conservent les propriétés perceptives visées, à savoir les propriétés analytiques BONM, KE, INTENSE et la présence serrure. Des itérations analyses – synthèses – écoutes, on déduit des fonctions d'approximations pour les impacts de porte :

- Les répartitions spectrales initiales des impacts serrure sont approximés par des paraboles.
- La répartition spectrale initiale de l'impact fermeture est approximée par une droite pour les bandes 1 à 15 (f<1000Hz), et une autre droite pour les bandes 15 à 41 (f>1000Hz), beaucoup moins énergétiques.
- La loi d'amortissement du dernier impact serrure est approximée par deux constantes : une constante pour les bandes ERB où le signal est plus énergétique et moins amorti qui correspond à la moyenne sur ces bandes ; une autre constante pour les basses et hautes fréquences, fortement amorties, qui correspond à l'amortissement maximal. Ces deux coefficients doivent rester supérieurs à certaines valeurs seuils sous peine de dégrader fortement le réalisme des sons. Leur analyse est parfois défaillante, aussi ils sont respectivement minimisés par les valeurs 65 et 100. L'approximation par une unique constante est insuffisante, le lieu de l'amortissement minimal est fortement impactant sur la hauteur de l'impact et de celle du bruit de porte synthétisé.
- La loi d'amortissement de l'impact fermeture est approximée par une exponentielle croissante, calculée à partir des bandes les plus énergétiques. Un amortissement constant est insuffisant pour cet impact : pour retranscrire à la fois la durée du son et son aspect ''matériau'', la dépendance de l'amortissement en fonction de la fréquence est indispensable, les hautes fréquences étant plus rapidement amorties que les basses fréquences. Sans cette dépendance le son sonne très ''bruité'', il n'est pas réaliste.

Les approximations des répartitions spectrales initiales et les lois d'amortissements des impacts du bruit de fermeture de porte s4 sont illustrées Figure 79.

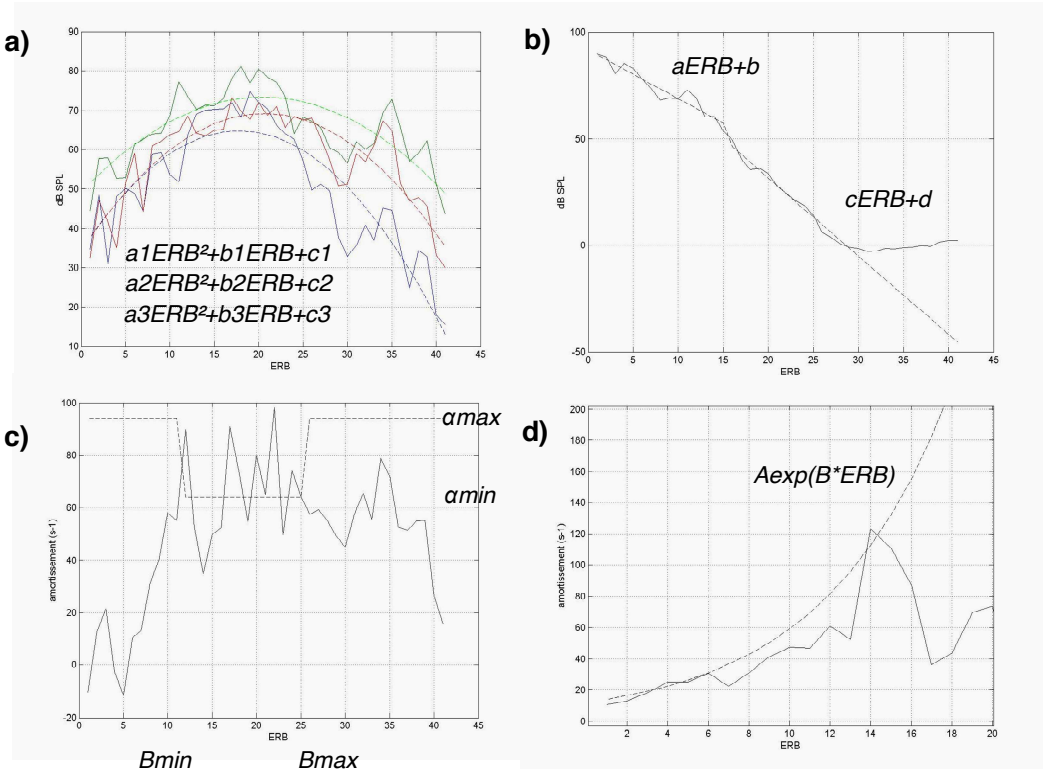


Figure 79 Répartitions spectrales (en haut) et lois d'amortissements (en bas) des impacts du bruit serrure (à gauche) et de l'impact fermeture (à droite) ; et approximations en traits pointillés

(a) Niveaux par ERB des 3 impacts serrure : premier impact, deuxième impact, troisième impact

(b) Niveaux par ERB de l'impact fermeture

(c) Amortissements par ERB du 3ème impact serrure. Les amortissements n'ont de sens que pour les bandes ERB suffisamment énergétiques (bandes 12 à 25)

(d) Amortissements par ERB de l'impact fermeture. Les amortissements n'ont de sens que pour les bandes ERB suffisamment énergétiques (bandes 1 à 15)

Le problème des très basses fréquences

La resynthèse du bruit ''fermeture'' reste problématique. Les sons de ''fermeture'' obtenus en synthèse sont généralement trop courts et trop graves. On propose de modéliser différemment les très basses fréquences (bandes 1 et 2, f<70Hz). La modélisation stochastique est remplacée par 2 modes exponentiellement amortis, extraits par la méthode de Steiglitz et McBride (1965). Chaque composante est paramétrée par 3 paramètres : amplitude, fréquence et coefficient d'amortissement. Ce sont les seuls modes considérés dans notre modèle.

La modélisation est ainsi améliorée, mais les bruits de fermeture de porte synthétisés reproduisent encore mal le contenu basse fréquence des sons réels. Même si elle mériterait une étude plus approfondie des phénomènes très basse fréquence, notre modélisation reste pour l'instant suffisante pour étudier les relations entre signal acoustique et perception.

Les modes extraits du bruit de fermeture s4 sont présentés Figure 80.

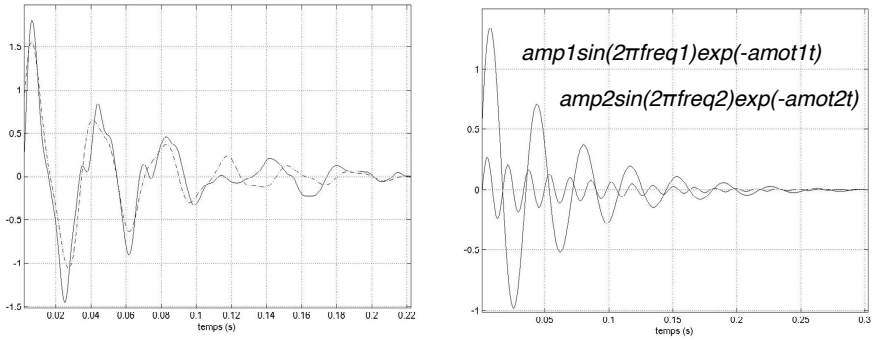


Figure 80 Signal de porte filtré basse fréquence (f<70Hz) en trait plein et modélisation par une somme de 2 sinusoïdes exponentiellement amorties en trait pointille (à gauche) ; les 2 sinusoïdes exponentiellement amorties (à droite)

Conclusion

Chaque bruit de fermeture de porte est décomposé en 4 impacts dont on repère les localisations temporelles *(3 paramètres : Tclic2-Tclic1, Tclic3-Tclic2, Tclic1-Tferm)* : 3 impacts pour la partie ''serrure'' et 1 impact pour la partie ''fermeture''.

- Les 3 impacts de la partie ''serrure'' sont caractérisés par leur répartition spectrale initiale approximées par des paraboles *(3*3 paramètres : a1, b1, c1, a2, b2, c2, a3, b3, c3)* et par la loi d'amortissement du dernier impact approximée par 2 constantes *(4 paramètres : αmin, αmax, Bmin, Bmax)*.
- L'impact de la partie ''fermeture'' est caractérisé par la répartition spectrale initiale approximée par 2 droites *(4 paramètres : a, b, c, d),* la loi d'amortissement approximée par une fonction exponentielle *(2 paramètres : A, B),* ainsi que deux modes pour les très basses fréquences *(6 paramètres : amp1, freq1, amort1, amp2, freq2, amort2)*.

Au total, *28 paramètres* sont calculés pour modéliser les bruits de fermeture porte. Les valeurs de ces paramètres pour les 26 bruits de fermeture de porte étudiés sont compilées en annexe (*PARAMETRES_ACOUSTIQUES)*.

1.4.2 Synthèse du bruit de fermeture de porte

Les 28 paramètres calculés sont ensuite utilisés pour la resynthèse. On y associe 5 paramètres pour contrôler les attaques (coefficients d'une enveloppe exponentielle croissante) : 1 coefficient par impact serrure, et 2 coefficients pour l'impact fermeture. Ces paramètres sont fixés. L'ensemble de ces paramètres contrôle la resynthèse des 26 bruits de fermeture de porte, via un script Matlab, ou une application temps-réel implémentée sur MaxMSP (SYNTHESE_s).

L'application temps-réel de l'outil de synthèse permet par de multiples écoutes de façonner efficacement le modèle de synthèse pour tendre vers le modèle cherché.

Nous présentons ci-dessous la méthode de synthèse, illustrée à partir du bruit s4, puis l'application temps-réel.

Méthode de synthèse

La synthèse du bruit de fermeture de porte est obtenue par superposition des parties serrure et fermeture de synthèse.

Le bruit de ***''serrure''*** est synthétisé par superposition ''orchestrée'' de 3 impacts (clic1, clic2, clic3). Chaque impact est synthétisé à partir d'un bruit blanc filtré par bandes ERBs. Les 41 signaux obtenus

sont contrôlés en niveau, en fonction de la répartition spectrale initiale de l'impact. Ils sont ensuite modulés par une enveloppe temporelle dont l'amortissement exponentiel dépend de la loi d'amortissement de l'impact. Il s'agit de constantes indexées sur les durées ''inter-clics'' pour les impacts clic1 et clic2, de 2 constantes pour clic3. Le lieu du maximum de l'enveloppe temporelle dépend du temps d'apparition de l'impact. L'enveloppe temporelle a également une attaque exponentielle très rapide fixée pour les 3 impacts à $\alpha = 1000s^{-1}$.
Le principe de la synthèse du bruit ''serrure'' de s4 est illustrée Figure 81.

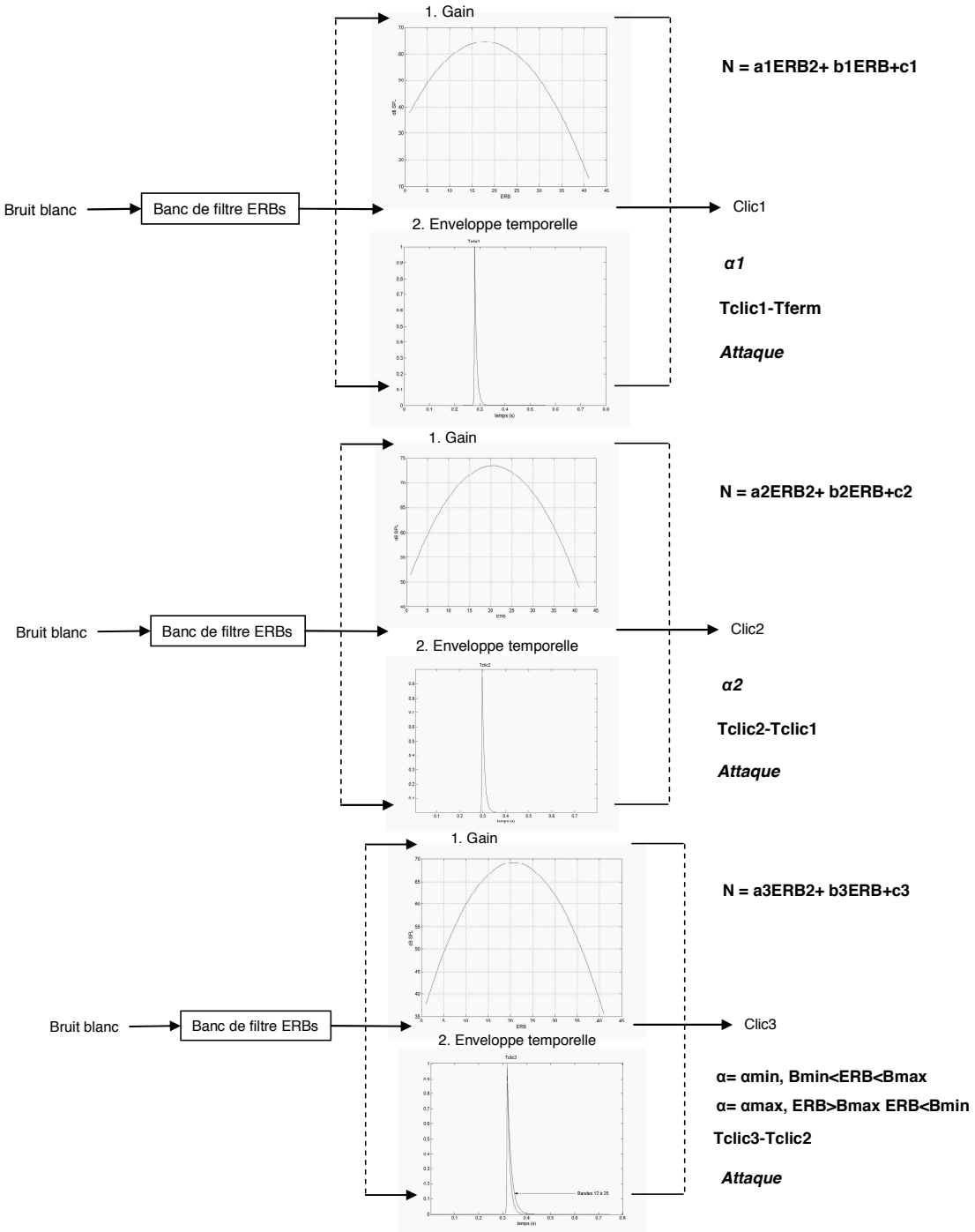


Figure 81 Méthode de synthèse de la partie ''serrure'' par addition de 3 impacts (clic1, clic2, clic3). Chaque impact est ajusté en niveaux par sous-bandes ERB en fonction de la répartition spectrale initiale (en haut), puis modulé par des enveloppes temporelles en fonction des différentes sous-bandes (en bas).
Les paramètres de contrôle sont précisés en gras à droite.

Le bruit de ***''fermeture''*** est synthétisé à partir d'un bruit blanc filtré par bandes ERBs. Les 41 signaux obtenus sont contrôlés en niveau, en fonction de la répartition spectrale initiale. Ils sont ensuite modulés par une enveloppe temporelle dont l'amortissement exponentiel dépend de la loi d'amortissement. L'enveloppe temporelle a également une attaque exponentielle rapide fixée ($\alpha = 200s^{-1}$). 2 modes sont ajoutés. Leur enveloppe temporelle a une attaque exponentielle fixée ($\alpha = 100s^{-1}$). De plus, l'arrivée de la partie ''fermeture'' est fixée, par rapport au maximum d'énergie (Tferm=0.3s).
Le principe de la synthèse du bruit ''fermeture'' de s4 est illustrée Figure 82.

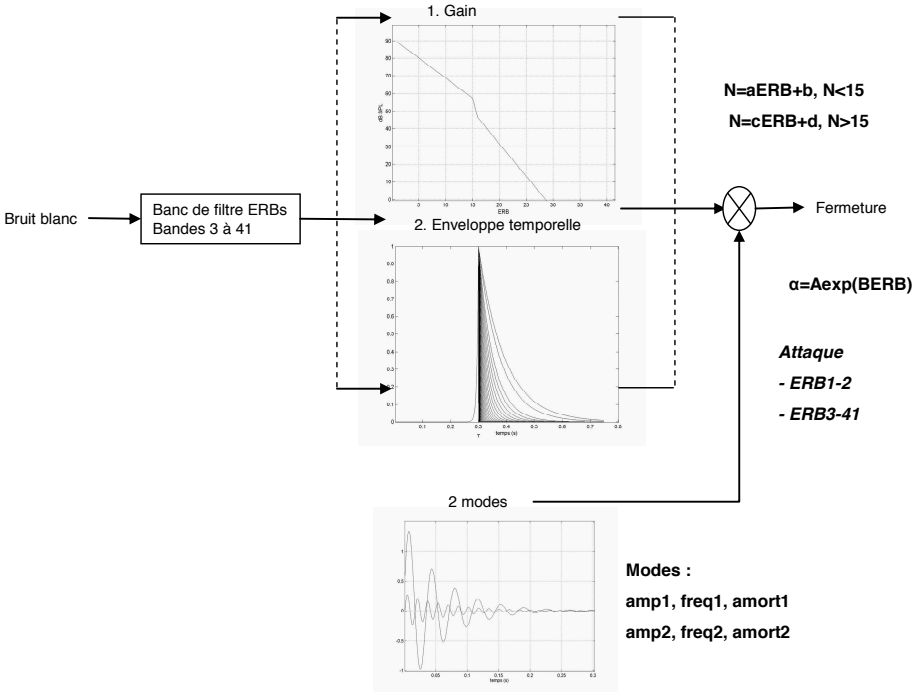


Figure 82 Méthode de synthèse de la partie ''fermeture''
Chaque impact est ajusté en niveaux par sous-bande ERB en fonction de la répartition spectrale initiale (en haut), puis modulé par des enveloppes temporelles en fonction des différentes sous-bandes (en bas). Une partie modale est ajoutée pour reproduire le contenu très basse fréquence.
Les paramètres de contrôle sont précisés en gras à droite.

La synthèse du bruit de fermeture de porte est obtenue par superposition des parties ''serrure'' et ''fermeture''. De plus, pour plus de réalisme, un léger bruit de fond est ajouté, il s'agit d'un bruit blanc filtré basse fréquence.

Le bruit de fermeture de porte s4 est ainsi resynthétisé (SYNTHESE_s4). Nous comparons ci-dessous les représentations temps-ERB du bruit réel et du bruit resynthétisé (Figure 83). Le bruit de synthèse n'est pas équivalent au son réel, même s'il présente quelques similitudes et paraît réaliste.

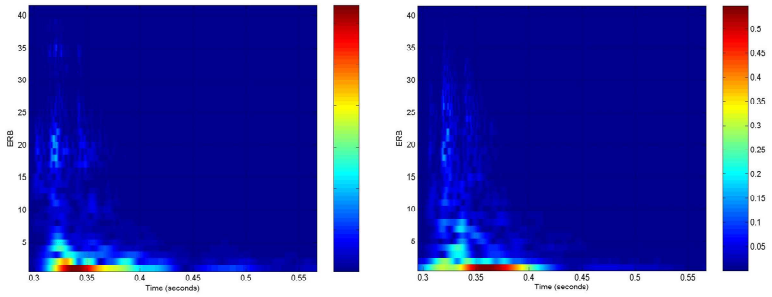


Figure 83 Représentations temps-ERB du signal de fermeture de porte s4 (à gauche) et du signal resynthétisé à partir de 28 paramètres (à droite).

Application temps-réel

L'outil de synthèse est implémenté en temps réel sur MaxMSP (réalisation : T. Voinier, cf Bezat, 2007). Il est géré par 35 paramètres de contrôle : les 28 paramètres issus de l'analyse auxquels on ajoute 2 paramètres dépendants (les coefficients d'amortissement des clic1 et clic2 sont indexés sur les temps inter impacts) et 5 paramètres fixés (les coefficients d'attaque). Son interface est présentée Figure 84.

L'ensemble de ces paramètres peut être modifié. De plus, les répartitions spectrales initiales des 4 impacts, et la loi d'amortissement de l'impact fermeture peuvent également être manipulées par sous-bandes ERBs, sans s'attacher aux fonctions d'approximation.

Les différents impacts peuvent être entendus séparément, regroupés par partie ''serrure'' ou ''fermeture'', ou joués ensemble, on entend alors le bruit de fermeture de porte de synthèse. Les 26 sons de resynthèse sont directement comparables aux 26 sons réels qui peuvent être joués via l'outil temps-réel.

L'application temps-réel est un précieux outil pour appréhender le modèle de synthèse des bruits de fermeture de porte. Elle est utile autant dans la phase de calibration du modèle de synthèse que dans les phases suivantes où l'on cherche à interpréter les effets des paramètres de contrôle sur les propriétés perceptives. Les effets des différents paramètres potentiels sont en effet directement testés par écoute.

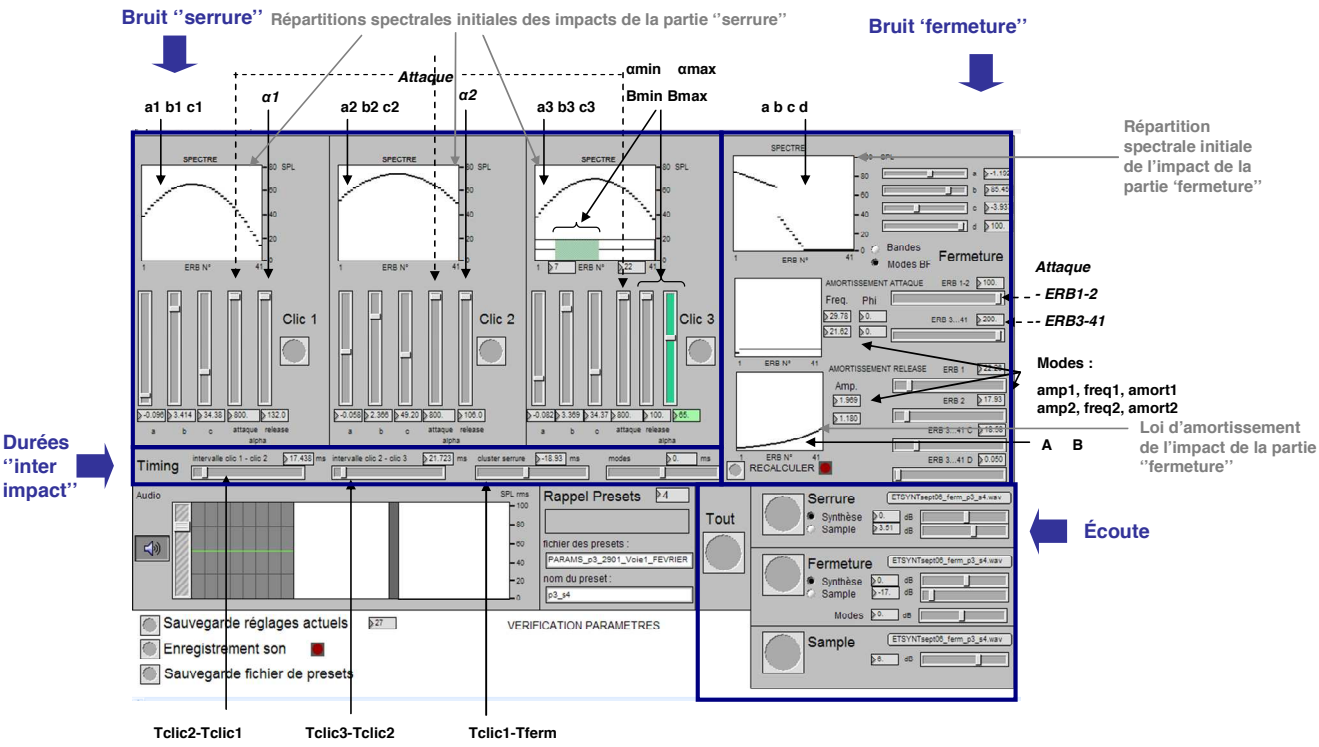


Figure 84 Interface de l'outil de synthèse temps-réel (paramètres de contrôle ; paramètres fixés*).*
Synthèse des bruits de fermeture de porte à partir de
3 impacts pour la partie ''serrure'', et 1 impact pour la partie ''fermeture'', joués dans le temps.
Chaque impact est ajusté en niveaux par sous-bande ERB en fonction de la répartition spectrale initiale, puis modulé par des enveloppes temporelles en fonction des différentes sous-bandes. Une partie modale est ajoutée pour reproduire le contenu très basse fréquence du bruit ''fermeture''.

Conclusion

Nous avons élaboré dans cette partie un modèle d'analyse-synthèse dans le but de synthétiser des sons proches des sons réels du point de vue des propriétés perceptives, à partir d'un nombre restreint de paramètres de contrôle (28). Le modèle est progressivement affiné et contrôlé par notre propre écoute des propriétés perceptives.
Après avoir précisé les propriétés perceptives ciblées, nous rappelons le principe du modèle d'analyse-synthèse.

Propriétés perceptives cibles

Pour réduire la complexité du problème, notre étude se focalise sur une partie restreinte des propriétés relevées dans le chapitre précédent. D'une part, on choisit de restreindre la modélisation acoustique à une partie de cet ensemble de propriétés. D'autre part, on tire avantage des relations entre propriétés, des propriétés bas niveau, les propriétés analytiques, aux propriétés de plus haut niveau, les évocations. Le modèle de synthèse s'appuie sur les propriétés analytiques KE, BONM, INTENSE et de la propriété naturelle experte ''serrure/fermeture'' associée (Figure 85). Le modèle d'analyse-synthèse est calibré à partir d'écoutes spécifiques de ces propriétés perceptives sur les bruits de synthèse. Ces écoutes sont réalisées d'après notre expertise acquise suite aux études de caractérisation perceptive des bruits de fermeture de porte. Elles orientent les choix de modélisation tout au long de la construction de l'outil.

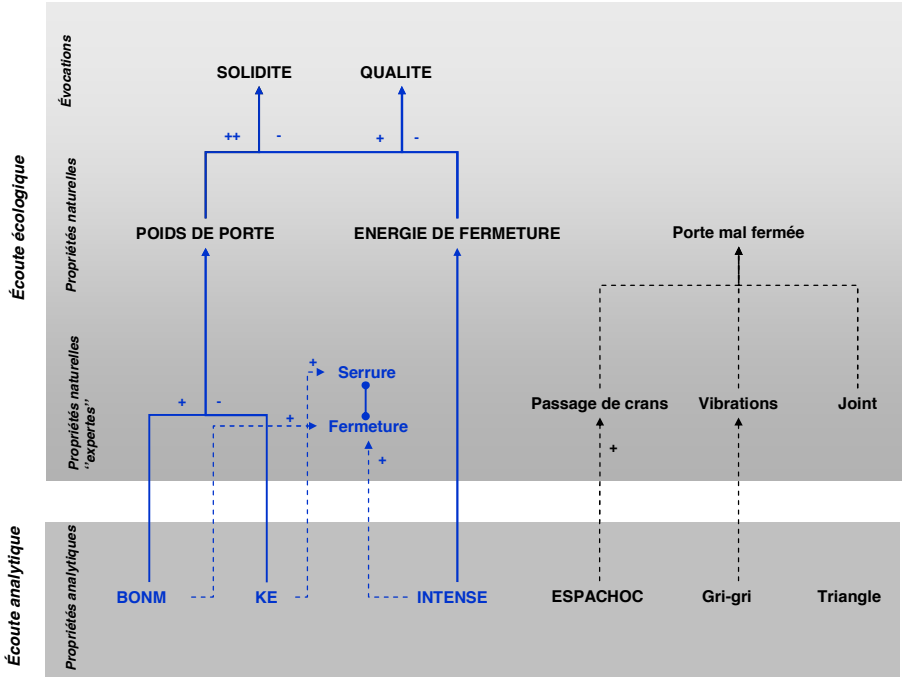


Figure 85 Réseau perceptif complet et propriétés perceptives cibles : les propriétés analytiques INTENSE, BONM et KE, associés à la propriété naturelle experte Serrure/Fermeture

Principe du modèle d'analyse-synthèse

Le bruit de fermeture de porte est d'abord décomposé en bruit ''serrure'' et bruit ''fermeture'' (bruit d'impact panneau de porte/caisse) à partir de la décomposition EMD.
Chaque bruit élémentaire est ensuite analysé à partir d'une représentation temps-échelle adaptée au système auditif : la représentation temps-ERB. Les différents impacts sont caractérisés par leur

localisation temporelle, leur répartition spectrale initiale (Niveaux par sous-bandes ERBs) et leur loi d'amortissement exponentielle (coefficients d'amortissement par sous-bandes ERBs). Les répartitions spectrales initiales et lois d'amortissement sont approximées par des fonctions simples, définies par un faible nombre de paramètres. Deux modes sont également extraits dans le contenu très basse fréquence de l'impact de la partie ''fermeture''.

Les différents impacts sont resynthétisés à partir de bruits blancs filtrés par ERB. Chaque sous-bande est contrôlée en niveau, puis modulée par une enveloppe temporelle dont on contrôle les coefficients d'attaque et d'amortissement. Deux modes sont ajoutés à l'impact fermeture. Finalement, la superposition des impacts ''serrure'' et de l'impact ''fermeture'' de synthèse, bien localisés temporellement, génère le bruit de fermeture de porte.

L'outil de synthèse est implémenté en temps réel sur MaxMSP (réalisation : T. Voinier). Il est géré par 28 paramètres indépendants (Figure 86).

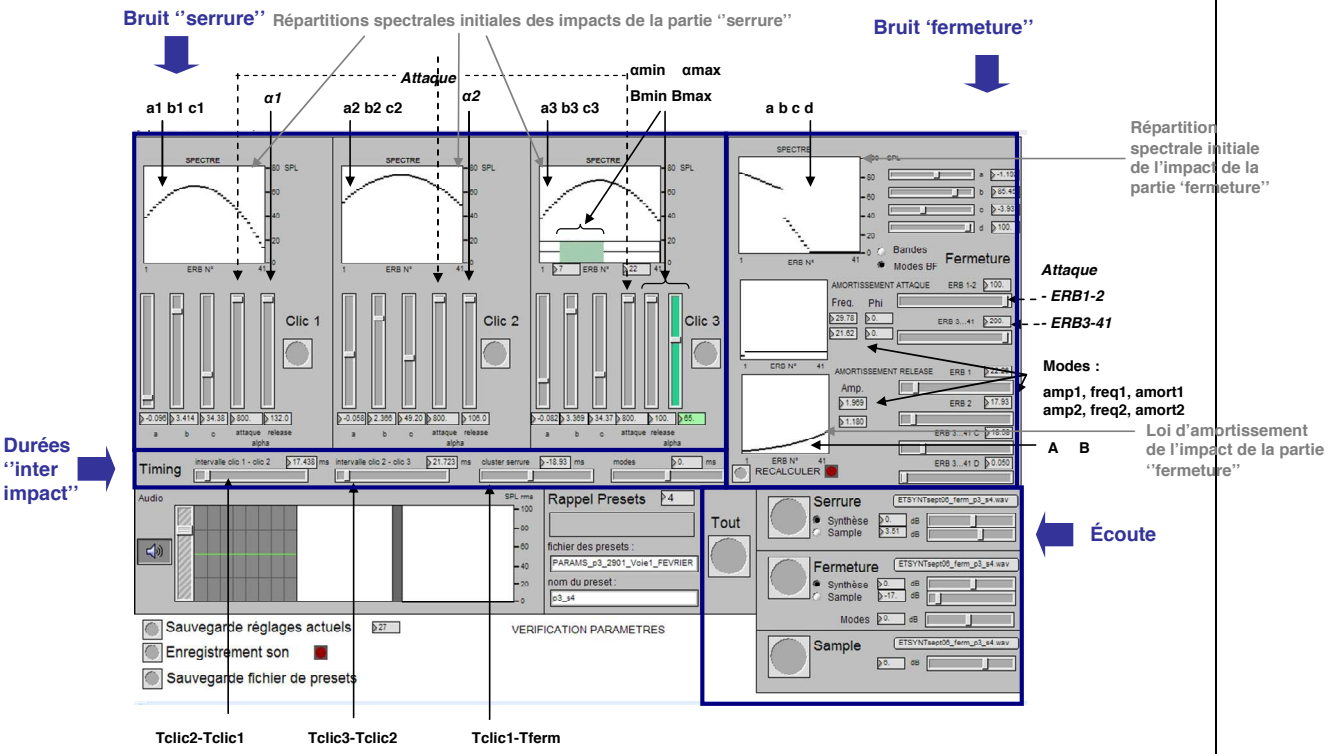


Figure 86 Interface de l'outil de synthèse temps-réel (paramètres de contrôle ; paramètres fixés*).*
Synthèse des bruits de fermeture de porte à partir de
3 impacts pour la partie ''serrure'', et 1 impact pour la partie ''fermeture'', joués dans le temps
Chaque impact est ajusté en niveaux par sous-bande ERB en fonction de la répartition spectrale initiale, puis modulé par des enveloppes temporelles propres à chaque sous-bande. Une partie modale est ajoutée pour reproduire le contenu très basse fréquence du bruit ''fermeture''.

La calibration du modèle de synthèse a été réalisée par des itérations analyse – synthèse – écoute pour tendre vers un modèle qui reproduise les propriétés perceptives cibles. Avant d'être utilisé pour étudier les liens entre critères acoustiques et propriétés perceptives, le modèle calibré d'après notre écoute doit encore être évalué perceptivement.

2. Evaluation perceptive du modèle d'analyse-synthèse

Nous avons proposé un modèle d'analyse-synthèse contrôlé par 28 paramètres. La calibration du modèle de synthèse a été réalisée par des itérations analyse – synthèse – écoute pour tendre vers un modèle qui reproduise les propriétés perceptives cibles : les propriétés analytiques KE, BONM, INTENSE et la présence de bruit serrure, en relation avec les propriétés naturelles ''poids de porte'' et ''énergie de fermeture'', elles-mêmes en relation avec les évocations ''qualité'' et ''solidité''. Nous cherchons à présent à évaluer perceptivement ce modèle : d'une part on cherche si les descripteurs acoustiques issus des paramètres de contrôle du modèle suffisent à prédire les propriétés perceptives **(section 2.1)**, d'autre part, on évalue la ressemblance perceptive entre sons réels et sons de resynthèse **(section 2.2)**. Enfin une version simplifiée du modèle est proposée pour restreindre les paramètres de contrôle à un ensemble de 10 paramètres principaux **(section 2.3)**.

2.1 Prédiction des propriétés perceptives

Nous avons évalué 26 bruits de fermeture de porte sur les propriétés analytiques KE, BONM, INTENSE, sur les propriétés naturelles ''poids de porte'' et ''énergie de fermeture'', ainsi que sur les évocations de ''qualité'' et de ''solidité'' au Chapitre V. Ces mêmes sons ont par ailleurs été caractérisés par les 28 paramètres de contrôle du modèle d'analyse-synthèse dans la partie précédente. Nous cherchons à présent à prédire les propriétés perceptives à partir de descripteurs acoustiques issus des paramètres de contrôle. *(cf annexe PARAMETRES_ACOUSTIQUES)*

2.1.1 Descripteurs acoustiques

Paramètres de contrôle

Chaque bruit de fermeture de porte est décomposé en 4 impacts dont on repère les localisations temporelles *(3 paramètres : Tclic2-Tclic1, Tclic3-Tclic2, Tclic1-Tferm)* : 3 impacts pour la partie ''serrure'' et 1 impact pour la partie ''fermeture''.

- Les 3 impacts de la partie ''serrure'' sont caractérisés par leur répartition spectrale initiale approximée par des paraboles *(3*3 paramètres : a1, b1, c1, a2, b2, c2, a3, b3, c3)* et par la loi d'amortissement du dernier impact approximée par 2 constantes *(4 paramètres : αmin, αmax, Bmin, Bmax)*.
- L'impact de la partie ''fermeture'' est caractérisé par la répartition spectrale initiale approximée par 2 droites *(4 paramètres : a, b, c, d),* la loi d'amortissement approximée par une fonction exponentielle *(2 paramètres : A, B),* ainsi que deux modes pour les très basses fréquences *(6 paramètres : amp1, freq1, amort1, amp2, freq2, amort2)*.

Au total, *28 paramètres* sont calculés pour modéliser les bruits de fermeture porte.

Descripteurs acoustiques

Nous proposons 30 descripteurs acoustiques issus des paramètres de contrôle pour prédire les propriétés perceptives (Tableau 17). 15 d'entre eux sont directement des paramètres de contrôle ; 13 autres sont calculés :

- à partir des coefficients des paraboles représentant les répartitions spectrales initiales des impacts du bruit ''serrure'', on calcule le niveau (*N*), l'étalement spectral (*Etal*) et la sous-bande du maximum d'énergie (*Bmax*),
- à partir des coefficients définissant la répartition spectrale initiale de l'impact ''fermeture'', on calcule le niveau (*N*) et le centre de gravité spectral (*cgs*),
- à partir des bandes ERB délimitant la zone fréquentielle amortie plus lentement du dernier impact du bruit ''serrure'', on calcule la bande moyenne (*Bandmoy*), et la largeur de bande (*Bandlarg*).

Les descripteurs acoustiques calculés sur les 26 bruits de fermeture de porte étudiés sont rassemblés en annexe *PARAMETRES_ACOUSTIQUES*.

Descripteurs acoustiques	Définition	Paramètres de contrôles associés
N1	Niveau initial du 1er impact du bruit ''serrure''	a1 b1 c1
Bmax1	Sous bande ERB du maximum d'énergie du 1er impact du bruit ''serrure''	a1 b1
Etal1	Etalement spectral de la répartition spectrale initiale du 1er impact du bruit ''serrure''	a1 b1
N2	Niveau initial du 2ème impact du bruit ''serrure''	a2 b2 c2
Bmax2	Sous bande ERB du maximum d'énergie du 2ème impact du bruit ''serrure''	a2 b2
Etal2	Etalement spectral de la répartition spectrale initiale du 2ème impact du bruit ''serrure''	a2 b2
N3	Niveau initial de l'impact du 3ème impact du bruit ''serrure''	a3 b3 c3
Bmax3	Sous bande ERB du maximum d'énergie du 3ème impact du bruit ''serrure''	a3 b3
Etal3	Etalement spectral de la répartition spectrale initiale du 3ème impact du bruit ''serrure''	a3 b3
Bandmoy	Sous bande ERB moyenne à amortissement minimal du 3ème impact du bruit ''serrure''	Bmin Bmax
Bandlarg	Nombre de sous-bandes ERB à amortissement minimal du 3ème impact du bruit ''serrure''	Bmin Bmax
Nferm	Niveau initial de l'impact du bruit ''fermeture''	a b c d
CGSferm	Centre de gravité spectral initial de l'impact du bruit ''fermeture''	a b c d
a b c d	Coefficients des 2 droites qui approximent la répartition spectrale initiale de l'impact du bruit ''fermeture''	a b c d
A B	Coefficient de la fonction d'approximation de la loi d'amortissement de l'impact du bruit ''fermeture'' α=Aexp(B*ERB)	A B
Amin αmax	Amortissements du dernier impact du bruit ''serrure	αmin αmax
freq1 amp1 amort1 freq2 amp2 amort2	Fréquence, amplitude et coéfficient d'amortissement des 2 modes de l'impact du bruit ''fermeture''	freq1 amp1 amort1 freq2 amp2 amort2
Tclic3-Tclic2 Tclic2-Tclic1 Tclic1-Tferm	Durées ''inter impacts''	Tclic3-Tclic2 Tclic2-Tclic1 Tclic1-Tferm

Tableau 17 Descripteurs acoustiques calculés à partir des paramètres de contrôle et descripteurs acoustiques directement paramètres de contrôle

2.1.2 Prédiction des propriétés perceptives

On cherche à prédire un sous-ensemble de propriétés perceptives évaluées au Chapitre V à partir de combinaisons linéaires de nos descripteurs acoustiques : les propriétés analytiques KE, BONM, INTENSE, les propriétés naturelles ''poids de porte'' et ''énergie de fermeture'', ainsi que les évocations de ''qualité'' et de ''solidité''. Les descripteurs sont sélectionnés à l'aide de régressions pas à pas et les relations linéaires sont établies par régressions Ridge avec un critère de validation croisée leave-one-out (Cornillon et Matzner-Lober, 2007). La régression Ridge propose une solution au problème de colinéarités des descripteurs acoustiques en autorisant un biais sur l'estimation des coefficients pour réduire la variance. La validation croisée contrôle la robustesse des modèles face à

de nouveaux stimuli. Il s'agit de déterminer différents modèles par apprentissage sur tous les ensembles de n-1 données, et de calculer le coefficient de détermination à parti de ces prédictions (R2val).

''Modèles'' de prédiction

Les relations entre propriétés perceptives et descripteurs acoustiques sont établis sur l'ensemble des 26 sons étudiés, excepté les sons s12 et s21 : le bruit s21 présente de fortes vibrations, et s12 des passages de crans fortement espacés. Ces spécificités sont écartées de notre étude. Les relations obtenues et les coefficients de déterminations associés (R2val) sont compilés Tableau 18.

Propriété estimée	Paramètres des modèles de prédiction	R2val
INTENSE	*+Nferm* *+CGSferm*	0.84
BONM	-(*N3-Nferm*) *+N1*	0.72
KE	+(*Nclic-Nferm*) -(*Tclic3-Tferm*) -(*Tclic3-Tclic2*)	0.78
Poids de porte	-(*N3-Nferm*) *-Bandmoy* *+Pente*	0.83
Energie de fermeture	*+Nferm* *+CGSferm*	0.87
Qualité	*-Nclic* *+N1*	0.75
Solidité	-(*N3-Nferm*) *-N2* *+Pente*	0.62

Tableau 18 ''Modèles'' de prédiction des propriétés perceptives et R2val associé (coefficient de détermination obtenu par validation croisée).

Les propriétés perceptives sont estimées à partir des descripteurs acoustiques :

- *N1*, *N2*, *N3* (les niveaux des 3 impacts du bruit ''serrure''), *Nclic* (moyenne de N1, N2 et N3),
- *Bandmoy* (Sous bande ERB moyenne à amortissement minimal du 3ème impact du bruit ''serrure'')
- *Nferm*, *CGSferm* (le niveau initial et le centre de gravité spectral initial de l'impact du bruit ''fermeture''), - Pente (a : pente de la première droite d'approximation de la répartition spectrale initiale de l'impact du bruit ''fermeture''),
- *Tclic3-Tferm*, *Tclic3-Tclic2* (durées inter impacts)

La qualité des estimations obtenues est illustrée en comparant les données prédites aux données estimées (Figure 87 et Figure 88).

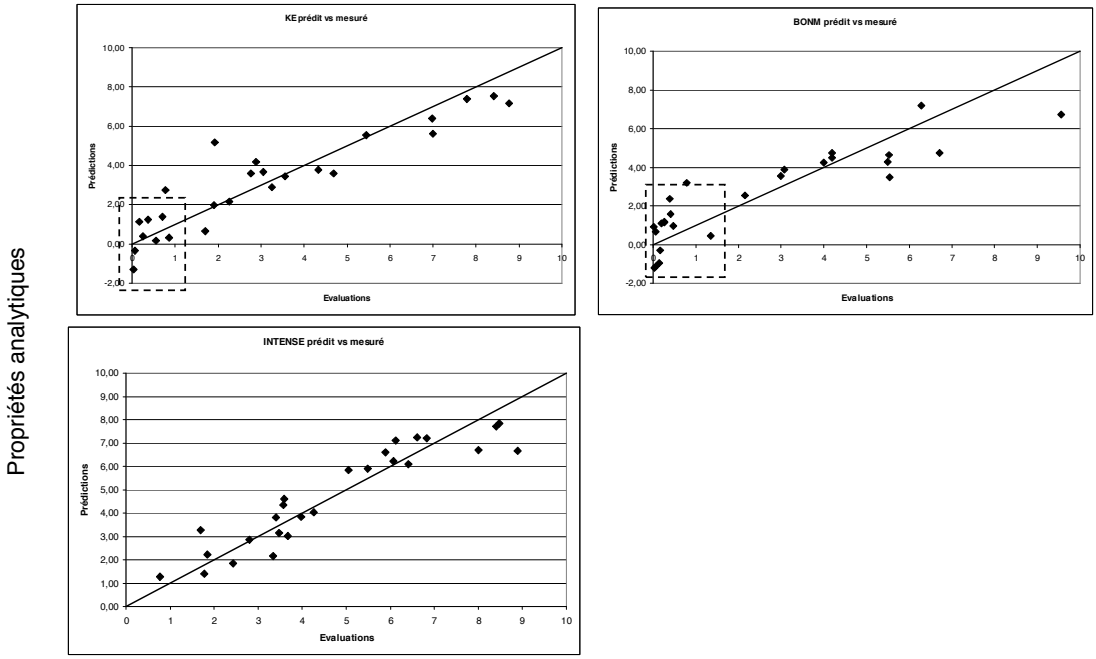


Figure 87 Propriétés analytiques prédites vs mesurées.
Les propriétés analytiques sont correctement estimées : l'intensité est bien prédite, et les sons à absence de BONM/KE sont détectés.

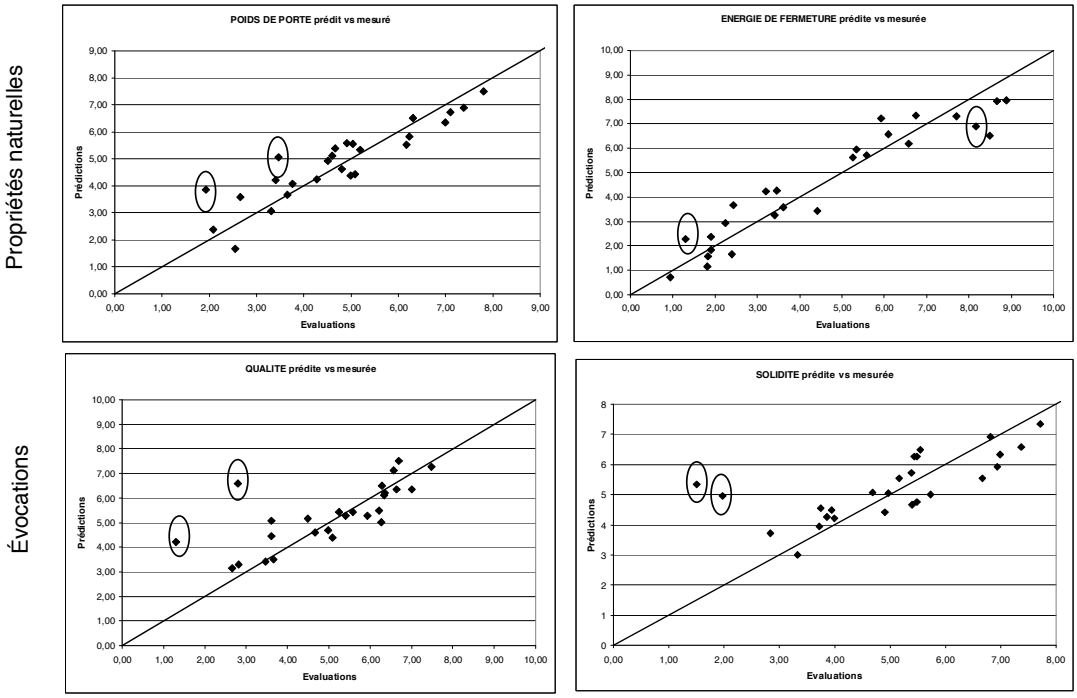


Figure 88 Propriétés naturelles et évocations prédites vs mesurées.
Les bruits s12 et s21, à fortes spécificités et non pris en compte dans les modèles, sont signalés par des cercles ; ils sont généralement mal estimés. Les autres sons sont bien estimés sur les propriétés naturelles, et relativement bien sur la qualité. La solidité est moins bien prédite.

Conclusion

Les descripteurs acoustiques sélectionnés (Figure 89) estiment correctement les propriétés perceptives des 26 bruits de fermeture de porte. L'information acoustique contenue dans le modèle d'analyse-synthèse est donc suffisante pour étudier les relations entre perception et signal acoustique.

- Les propriétés liées INTENSE et ''énergie de fermeture'' sont toutes les deux estimées par le niveau initial et le centre de gravité spectral initial de l'impact de la partie ''fermeture''. Plus la

porte est fermée fortement, plus la partie ‘’fermeture’’ prend de l’importance relativement à la partie ‘’serrure’’.

- La propriété KE est estimée à partir de l’émergence de la partie ‘’serrure’’ par rapport à la partie ‘’fermeture’’ et des durées inter impacts : plus les impacts sont éloignés dans le temps, en particulier le dernier impact de la partie ‘’serrure’’ et l’impact de la partie ‘’fermeture’’, plus le son est évalué en KE.
- La propriété BONM est d’autant plus importante que le niveau du dernier impact de la partie ‘’serrure’’ est faible et que le premier impact est fort. On entend ainsi un unique impact associé à la résonance basse fréquence.
- La propriété ‘’poids de porte’’ est estimée à partir du niveau du dernier impact de la partie ‘’serrure’’ relativement à celui de la partie ‘’fermeture’’. Comme pour la propriété BONM, il doit être faible pour que la porte paraisse lourde. Elle est également dépendante des fréquences associées au coefficient d’amortissement minimum du dernier impact ‘’serrure’’ : plus elles sont basses, plus la porte parait lourde. Enfin, elle est liée à la pente de répartition spectrale initiale de la partie ‘’fermeture’’. Plus la pente est faible, plus la partie ‘’fermeture’’ contient des hautes fréquences, et la porte paraît lourde. Ce résultat peu intuitif s’explique par le fait que les bruits de porte à forte énergie de fermeture, qui ont une pente plus faible, contiennent généralement plus de BONM que les bruits à faible énergie de fermeture ; ils sont alors associés à des sons de portes lourdes.
- L’évocation de ‘’solidité’’ est associée au niveau du dernier impact de la partie ‘’serrure’’ relativement à celui de la partie ‘’fermeture’’, comme pour les propriétés BONM et ‘’poids de porte’’, et à la pente de répartition spectrale initiale de la partie ‘’fermeture’’, de même que la propriété ‘’poids de porte’’. Elle est de plus dépendante du niveau du 2ème impact serrure : plus ce dernier est faible, plus le son évoque une impression de solidité.
- Enfin l’évocation de ‘’qualité’’ est négativement liée au niveau moyen des impacts de la partie ‘’serrure’’, et positivement au niveau du premier impact de la partie ‘’serrure’’. Plus ce dernier est élevé, plus le son est associé à une bonne qualité.

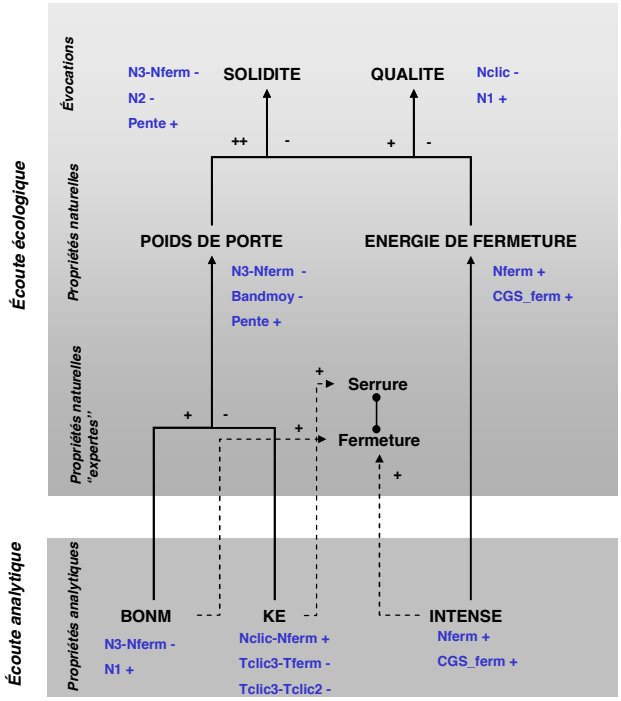


Figure 89 Propriétés perceptives et descripteurs acoustiques associés

2.1.3 Les limites des modèles de prédiction

L'information acoustique contenue dans le modèle d'analyse-synthèse est suffisante pour estimer correctement les propriétés perceptives des 26 bruits de fermeture de porte. Mais on ne peut pas conclure que les relations établies suffisent à caractériser en général les propriétés perceptives des bruits de fermeture de porte. Par exemple, les sons étudiés qui ont un fort BONM et qui évoquent la qualité, ont un fort niveau de premier impact de la partie ''serrure''. Pourtant, il n'est pas assuré qu'augmenter ce niveau soit systématiquement bénéfique à la propriété BONM et à la qualité. Un bruit de type ''serrure'' ne peut être avantagé en qualité en augmentant le niveau du 1er impact serrure (ex sonore : 3 modalités pour le paramètres N1 à partir du son s18). De même, la pente de répartition spectrale de la fermeture est associée à un bruit de porte lourde, pourtant, augmenter cette pente ne mène pas à coup sûr à un bruit de fermeture de porte plus lourde (ex sonore : 3 modalités pour le paramètre Pente à partir du son s19). L'influence des paramètres n'est pas systématique pour l'ensemble de sons, mais dépend de l'environnement acoustique de chaque son.

Les relations s'appuient sur des liens statistiques établis sur un ensemble de 26 bruits, avec un critère de validation croisée, mais elles ne sont pourtant pas généralisables. Même si le nombre de sons étudié est raisonnable et les sons choisis pour représenter le monde des bruits de fermeture de porte, les relations observées peuvent être bruitées par des relations propres à l'espace d'étude. La caractérisation acoustique demande à être approfondie en étudiant les effets spécifiques de différents paramètres acoustiques sur les propriétés perceptives. Des analyses perceptives doivent pour cela être réalisées sur des sons de synthèse contrôlés sur les paramètres acoustiques. Mais avant d'étudier l'espace des sons de synthèse, on procède à l'évaluation perceptive des sons resynthétisés par notre modèle d'analyse-synthèse et à la simplification du modèle.

2.2 Comparaison perceptive : sons réels vs sons de resynthèse

Le modèle d'analyse-synthèse est testé en comparant les sons 26 réels étudiés à leur version de synthèse. Les distances perceptives entre les sons réels et les sons resynthétisés sont d'abord évaluées par l'intermédiaire des propriétés perceptives. Ensuite, un test de dissemblances est réalisé pour évaluer les distances perceptives globales.

2.2.1 Distances par propriété perceptive

Après avoir présenté les tests perceptifs mis en place pour évaluer les propriétés perceptives des sons de synthèse, nous comparons ces évaluations à celles des sons réels, relevées au Chapitre V.

Propriétés perceptives des sons de synthèse

Les propriétés perceptives des sons de synthèse sont évaluées par une méthode identique à celle utilisée pour les sons réels (cf chapitre V). Les propriétés analytiques sont relevées par analyse sensorielle ; les propriétés naturelles et évocations par évaluation directe avec des sujets naïfs.

Stimuli

Le corpus d'étude comprend les 26 bruits de fermeture de porte resynthétisés dans la partie précédente (1) (SYNTHESE_s1 à SYNTHESE_s26). Les valeurs des paramètres de contrôle sont disponibles en annexe *PARAMETRES_ACOUSTIQUES.*

Propriétés analytiques

Le panel sensoriel évalue les bruits de fermeture de porte de synthèse sur les descripteurs KE, BONM et INTENSE, avec deux répétitions, par rapport à des références externes :

- les sons réels minima (s14) et maxima (s20) pour la propriété INTENSE,
- les maxima pour les propriétés BONM (s20) et KE (s26, on ne choisit pas s12 à cause de sa forte spécificité de passages de crans). Ces dernières propriétés n'ont pas besoin de référence minimale, puisqu'il s'agit alors de l'absence de ces propriétés.

Les évaluations sont ajustées a posteriori à l'échelle des sons réels.

Les performances du panel en discriminabilité, consensualité et répétabilité sont vérifiées *(cf annexe PANEL_SENSORIEL).*

Propriétés naturelles et évocations

Deux expérimentations sont mises en place pour évaluer l'ensemble des évocations et propriétés naturelles.

Sujets

60 sujets sont recrutés dont 60% hommes et 40% femmes. 25% ont moins de 35 ans, 50% ont entre 35 et 50 ans, 25% ont plus de 50 ans. Ils possèdent tous des véhicules achetés dans les 4 dernières années. La moitié possède un véhicule du groupe PSA Peugeot Citroën et l'autre moitié un véhicule des autres marques. La moitié possède un véhicule de segment B et l'autre un véhicule segment M-H. Les sujets sont indemnisés pour leur participation.

<u>Expérience 1 : Qualité :</u> *EXPERIENCE 4 a*

Protocole

Les 60 sujets, après avoir observé 3 exemples représentatifs des stimuli, évaluent la qualité du véhicule que renvoient les bruits de fermeture de porte sur une échelle continue allant de « très mauvaise qualité » à « très bonne qualité ».

Les bruits sont présentés dans un ordre aléatoire de type carré latin.

L'interface est générée sous Easy-I, logiciel développé en interne.

<u>Expérience 2 : Energie de fermeture, Poids de la porte :</u> *EXPERIENCE 4 b*

Protocole

Les 60 sujets, après avoir écouté 3 exemples représentatifs des stimuli, évaluent pour chaque bruit :

- le poids de la porte, sur une échelle continue allant de « très légère » à « très lourde »
- l'énergie de fermeture, sur une échelle continue allant de « doucement » à « fortement »
- la réussite de la fermeture, sur une échelle catégorielle à 4 modalités, (non traité ici)

Les bruits sont présentés dans un ordre aléatoire de type carré latin.

L'interface est générée sous Easy-I, logiciel développé en interne (Figure 90).

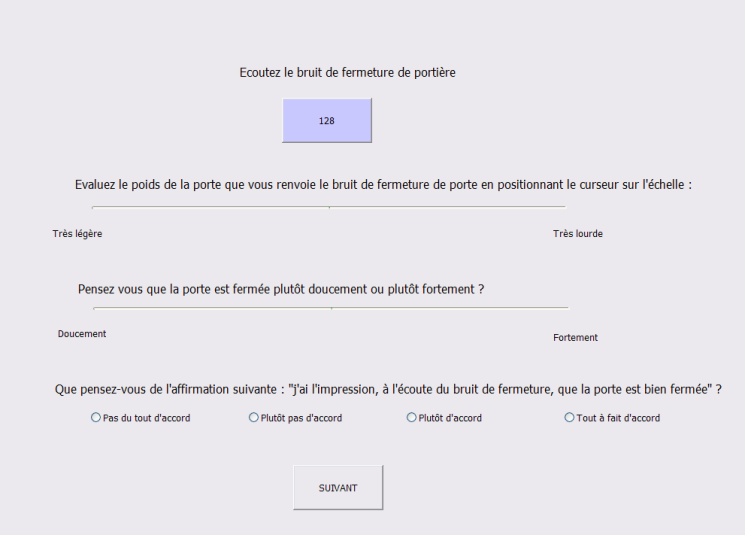


Figure 90 Interface de test pour l'évaluation de propriétés naturelles : poids de la porte, énergie de fermeture, porte bien fermée.

Résultats (cf annexes PANEL_SENSORIEL ; PROPRIETES_NATURELLES_EVOCATIONS)
Aucun sujet n'a été surpris par les bruits de synthèse. De plus, les bruits bien discriminés et les sujets sont consensuels pour les propriétés évaluées (Classification Ascendante Hiérarchique et Ducan).

Propriétés perceptives : sons de synthèse vs sons réels
Les évaluations moyennes des sons de synthèse sont comparées à celles des sons réels (Chapitre V). Nous présentons les évaluations des sons de synthèse en fonction des évaluations des sons réels correspondants, ainsi que les coefficients de corrélation et les racines des moyennes des erreurs au carré (RMSE) (Figure 91).

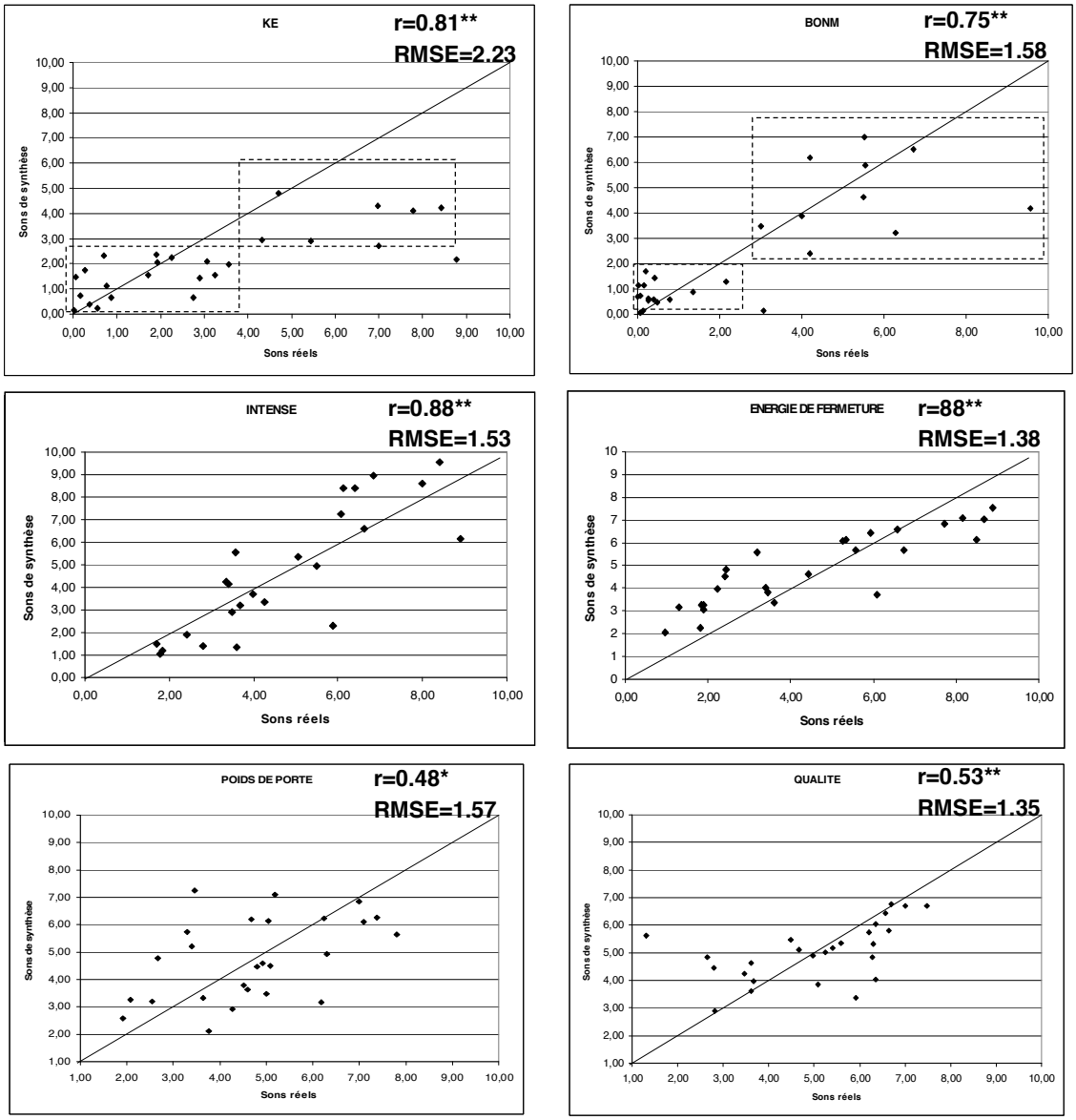


Figure 91 Evaluations des propriétés perceptives sons de synthèse vs sons réels, coefficients de corrélations (r>.388 significatif à 5% r>.496** significatif à 1%) et racine des moyennes des erreurs au carré.*
2 niveaux correspondant à une absence ou présence sont retrouvés en synthèse pour KE et BONM, même si les évaluations en KE sont globalement sous-estimées.
Les propriétés INTENSE et ''énergie de fermeture'' sont bien conservées par le modèle de synthèse.
Les propriétés ''qualité'' et ''poids de porte'' sont mal reproduites en synthèse.

Conclusion

Le modèle d'analyse-synthèse, calibré sur les propriétés analytiques, conserve la propriété INTENSE, mais ne permet de retrouver que deux groupes de sons sur les descripteurs KE et BONM.

La propriété naturelle ''énergie de fermeture'', liée à la propriété INTENSE, est bien conservée en synthèse. En revanche, l'évocation de ''qualité'', et surtout la propriété ''poids de porte'', ne sont pas retrouvées. Cette observation s'explique en partie par les spécificités que l'on n'a pas prises en compte dans notre modèle de synthèse, par exemple les ''vibrations''. Mais même si on ne considère pas les sons qui présentent ces spécificités, la reproduction de cette évocation n'est pas satisfaisante.

2.2.2 Distances perceptives globales

Pour évaluer les distances perceptives globales, nous réalisons un test de dissemblances.

EXPERIENCE 4 c

Stimuli

Nous choisissons 6 bruits de fermeture de porte parmi l'ensemble des 26 bruits étudiés. Ces bruits sont sélectionnés d'après la caractérisation perceptive (Chapitre V), pour être représentatifs de l'espace des 26 bruits (Figure 92).

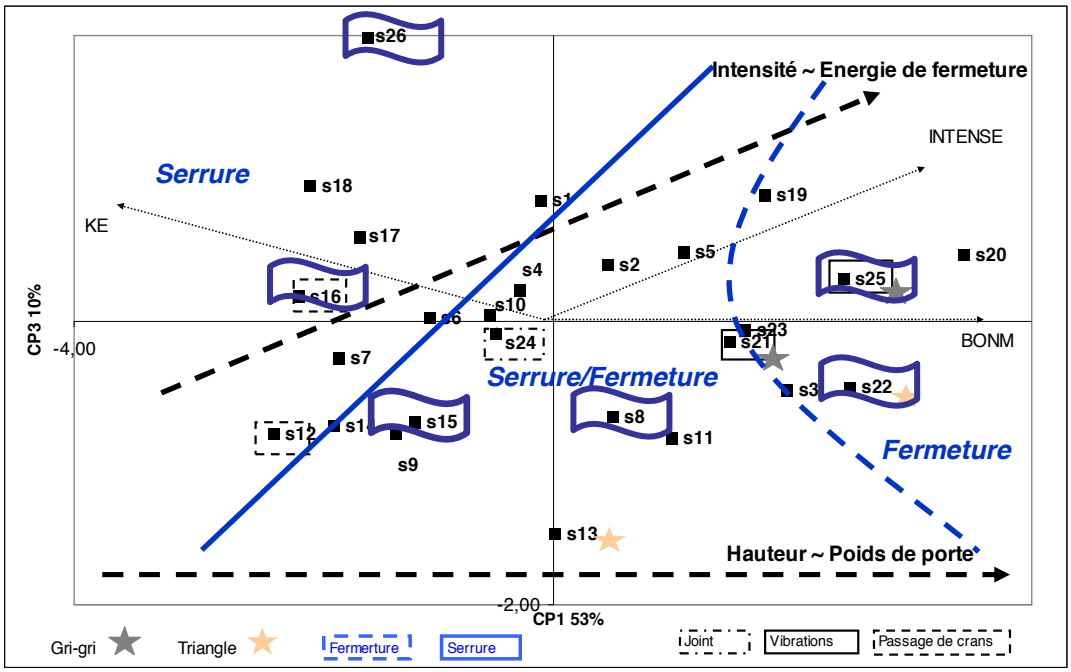


Figure 92 Analyse en Composantes Principales des propriétés analytiques continues : projection des bruits sur les plans CP1/CP2. Illustration des spécificités Gri-gri et Triangle et Projection des propriétés naturelles Bruits sélectionnés pour notre étude :

- s16 et s18, de type "serrure", à fort KE ;
- s22 et s25, de type "fermeture", à fort BONM ;
- s15 et s8, de type "serrure/fermeture".
Les bruits s26 et s25 sont forts et les bruits s16 et s18 faibles.

Aux 6 bruits de fermeture réels choisis, on ajoute les homologues de synthèse, pour former un groupe de 12 bruits.

Sujets

Idem EXPERIENCE 4a

Protocole

Les 60 sujets, après avoir écouté 4 exemples représentatifs des stimuli, évaluent la ressemblance entre paires de bruits de fermeture de porte sur une échelle continue allant de « identiques» à « très différents ».

Les paires différentes sont proposées aux sujets, dans un ordre aléatoire.

L'interface est implémentée sous Easy-I.

Résultats *(cf annexe PROPRIETES_NATURELLES_EVOCATIONS)*
Les scores sont analysés par Classification Ascendante Hiérarchique. Le dendrogramme qui traduit les distances moyennes entre les sons est présenté Figure 93.

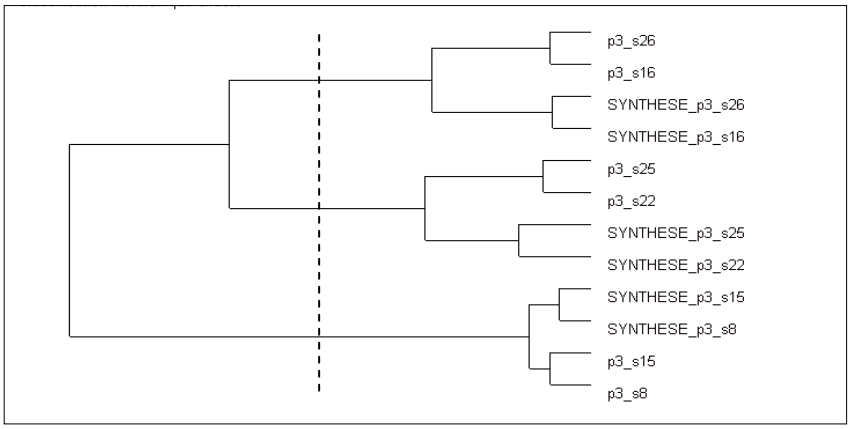


Figure 93 Dendrogramme du test de dissemblances.
Pour les sons réels comme pour les sons de synthèse, on observe les regroupements de :
s26 et s16 : de type ''serrure'' ; s25 et s22 de type ''fermeture'' ; s15 et s8 de type ''serrure/fermeture''.
De plus, le groupe des sons réels de type ''serrure'' est proche du groupe des sons de synthèse de type ''serrure'. De même pour les sons de type ''fermeture'' et de type ''serrure/fermeture''. (Barre verticale)

Même si les sons de synthèse ne reproduisent pas les sons réels, les catégories principales de bruits de fermeture de porte sont retranscrites.

Conclusion
Le modèle d'analyse-synthèse conserve la propriété INTENSE, mais ne permet que de retrouver 2 groupes de sons sur les descripteurs KE et BONM. Cela suffit toutefois à retrouver les sons de type ''serrure'' (à fort KE) et de type ''fermeture'' (absence de KE et fort BONM).
La propriété naturelle ''énergie de fermeture'', lié à la propriété INTENSE, est bien conservée en synthèse. En revanche, l'évocation de ''qualité'', et surtout la propriété ''poids de porte'', ne sont pas retranscrites.

2.3 Proposition d'un modèle de synthèse simplifié

Le modèle d'analyse-synthèse est contrôlé par 28 paramètres acoustiques. Ce nombre restreint de paramètres doit encore être réduit pour permettre leur étude systématique. Les paramètres les plus influents sont sélectionnés dans cette partie pour proposer une version simplifiée du modèle, contrôlée par 10 paramètres, que l'on évalue ensuite perceptivement.

2.3.1 Paramètres de contrôle principaux

Nous sélectionnons les descripteurs acoustiques principaux, puis précisons les paramètres de contrôle associés.

Sélection des descripteurs acoustiques
Le choix des descripteurs principaux est basé d'une part sur des écoutes des 26 bruits de resynthèse, et d'autre part sur les liens statistiques entre les variables.

Les 30 descripteurs acoustiques proposés précédemment sont facilement testés avec le modèle d'analyse-synthèse grâce à son application temps-réel. L'écoute de sons synthétisés à partir de variations systématiques de ces paramètres, sur des plages de valeurs propres aux bruits de fermeture de porte, révèle que certains paramètres sont indispensables, tandis que d'autres sont peu influents.

- Partie ''fermeture''

Les 2 modes de très basse fréquence sont peu influents (*amp1, freq1, amort1, amp2, freq2, amort2*).
La droite d'approximation de la répartition spectrale initiale de l'impact fermeture pour les hautes fréquences (f>1000Hz) n'est pas influente vu que les niveaux à ces fréquences sont très faibles (*c, d*).
Le centre de gravité spectrale du spectre initial de l'impact fermeture est donc lié à la pente de la droite d'approximation de la répartition spectrale initiale de l'impact fermeture pour les basses fréquences (f<1000Hz) (*Pente*).

- Partie ''serrure''

Même si une répartition spectrale des impacts ''serrure'' plate génère un impact ''bruité'', l'étalement spectral des impacts de la partie ''serrure'' est secondaire pour reconstruire le son global (*Etal1, Etal2, Etal3)*. De plus, les 2 premiers impacts de la partie ''serrure'' sont perceptivement moins important que le dernier impact dans le son global. Un seul paramètre, le niveau, est suffisant pour les caractériser, le lieu de minimum d'amortissement minimum a peu d'influence sur le son global (*Bmax1, Bmax2*). Enfin, les coefficients d'amortissement du dernier impact de la partie ''serrure'' sont tous très élevés, si bien que leurs variations ne sont pas perçues (αmin, αmax). La région fréquentielle d'amortissement minimal du dernier impact de la partie ''serrure'' (*Bandmoy, Bandlarg*) peut influencer le timbre de cet impact, mais elle n'est pas déterminante dans le son global.
L'ensemble des remarques précédentes traduit l'effet des interactions entre les impacts de nos sons complexes : si tous les paramètres sont bien influents pour définir chaque impact particulier, certains sont négligeables quand les impacts sont écoutés ensemble.

De plus, un fort lien statistique est établi entre les paramètres A et B qui caractérisent la fonction exponentielle des lois d'amortissement de l'impact de la partie ''fermeture''. Le paramètre B est alors indexé sur A (Figure 94).

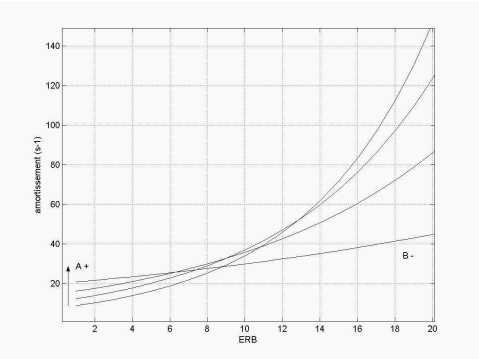


*Figure 94 Exemples de loi d'amortissement de l'impact de la partie ''fermeture'', caractérisées par une fonction exponentielle α=A*exp(B*ERB). A et B sont liés par la fonction : B=-0,00855*A +0,2147.*

Finalement, 10 descripteurs acoustiques sont sélectionnés pour la caractérisation acoustique des sons de synthèse (Tableau 19).

Descripteurs acoustiques	Définition	Paramètres de contrôles associés
N1	Niveau initial du 1er impact du bruit ''serrure''	a1 b1 c1
Bmax1	Sous bande ERB du maximum d'énergie du 1er impact du bruit ''serrure''	a1 b1
Etal1	Etalement spectral de la répartition spectrale initiale du 1er impact du bruit ''serrure''	a1 b1
N2	Niveau initial du 2eme impact du bruit ''serrure''	a2 b2 c2
Bmax2	Sous bande ERB du maximum d'énergie du 2eme impact du bruit ''serrure''	a2 b2
Etal2	Etalement spectral de la répartition spectrale initiale du 2eme impact du bruit ''serrure''	a2 b2
N3	Niveau initial de l'impact du 3eme impact du bruit ''serrure''	a3 b3 c3
Bmax3	Sous bande ERB du maximum d'énergie du 3eme impact du bruit ''serrure''	a3 b3
Etal3	Etalement spectral de la répartition spectrale initiale du 3eme impact du bruit ''serrure''	a3 b3
Bandmoy	Sous bande ERB moyenne à amortissement minimal du 3eme impact du bruit ''serrure''	Bmin Bmax
Bandlarg	Nombre de sous-bandes ERB à amortissement minimal du 3eme impact du bruit ''serrure''	Bmin Bmax
Nferm	Niveau initial de l'impact du bruit ''fermeture''	a b c d
CGSferm	Centre de gravité spectral initial de l'impact du bruit ''fermeture''	a b c d
a (Pente) b c d	Coefficients des 2 droites qui approximent la répartition spectrale initiale de l'impact du bruit ''fermeture''	a b c d
A B	Coefficient de la fonction d'approximation de la loi d'amortissement de l'impact du bruit ''fermeture'' α=Aexp(B*ERB)	A B
αmin αmax	Amortissements du dernier impact du bruit ''serrure	αmin αmax
freq1 amp1 amort1 freq2 amp2 amort2	Fréquence, amplitude et coéfficient d'amortissement des 2 modes de l'impact du bruit ''fermeture''	freq1 amp1 amort1 freq2 amp2 amort2
Tclic3-Tclic2 **Tclic2-Tclic1** **Tclic1-Tferm**	Durées ''inter impacts''	Tclic3-Tclic2 Tclic2-Tclic1 Tclic1-Tferm

Tableau 19 Descripteurs acoustiques sélectionnés :
*- les niveaux des impacts de la partie ''serrure'' (*N1, N2, N3*), de l'impact de la partie ''fermeture'' (*Nferm*),*
*- la répartition spectral du dernier impact de la partie ''serrure'' (*Bmax3*) et de l'impact de la partie ''fermeture'' (*Pente*),*
*- la loi d'amortissement de la partie ''fermeture'' (*A*),*
*- les durées ''inter impacts'' (*Tclic3-Tclic2, Tclic2-Tclic1, Tclic1-Tferm*)*

Modèle de synthèse simplifié

Les 10 descripteurs acoustiques sélectionnés sont indexés sur 10 paramètres de contrôle (Tableau 20). Ils sont contrôlés de façon indépendante.

Descripteurs acoustiques	Définition	Paramètres de contrôles associés
N1	Niveau initial du 1er impact du bruit ''serrure''	a1 b1 **c1**
N2	Niveau initial du 2eme impact du bruit ''serrure''	a2 b2 **c2**
N3	Niveau initial de l'impact du 3eme impact du bruit ''serrure''	a3 b3 **c3**
Bmax3	Sous bande ERB du maximum d'énergie du 3eme impact du bruit ''serrure''	a3 **b3 → c3**
Nferm	Niveau initial de l'impact du bruit ''fermeture''	a **b** c d
a (Pente)	Coefficients des 2 droites qui approximent la répartition spectrale initiale de l'impact du bruit ''fermeture''	**a → b**
A	Coefficient de la fonction d'approximation de la loi d'amortissement de l'impact du bruit ''fermeture'' α=Aexp(B*ERB)	**A → B**
Tclic3-Tclic2 Tclic2-Tclic1 Tclic1-Tferm	Durées ''inter impacts''	**Tclic3-Tclic2** **Tclic2-Tclic1** **Tclic1-Tferm**

Tableau 20 Descripteurs acoustiques sélectionnées et paramètres de contrôle indexés

Les 26 bruits étudiés sont resynthétisés à partir du modèle d'analyse-synthèse, contrôlé par les 10 paramètres sélectionnés (SYNTHESE_10P_s). Les autres paramètres de contrôle sont ajustés aux valeurs moyennes obtenues sur notre ensemble de bruits *(cf annexe PARAMETRES_ACOUSTIQUES)*.

2.3.2 Evaluation perceptive du modèle simplifié

Les propriétés perceptives des 26 sons de resynthèse du modèle simplifié sont évaluées par les mêmes expérimentations que celles utilisées pour les sons de synthèse du modèle complet (2.2.1). Les propriétés analytiques sont relevées par analyse sensorielle ; les propriétés naturelles et évocations par évaluation directe avec 60 nouveaux sujets naïfs *(EXPERIENCE 5a et 5b, cf annexe PROPRIETES_NATURELLES_EVOCATIONS)*.
De même que pour les sons de synthèse du modèle complet, les performances du panel sensoriel sont correctes *(cf annexe PANEL_SENSORIEL)*. On observe toutefois un problème de consensualité sur la propriété KE, pour laquelle les panélistes ont plus de difficultés à discriminer les sons.
Aucun sujet naïf n'a été surpris par les bruits de synthèse. De plus, les bruits sont bien discriminés et les sujets consensuels pour les propriétés évaluées (Classification Ascendante Hiérarchique et Duncan).

Les évaluations moyennes des sons de synthèse du modèle réduit sont comparées à celles des sons réels (Chapitre V) (Figure 95).

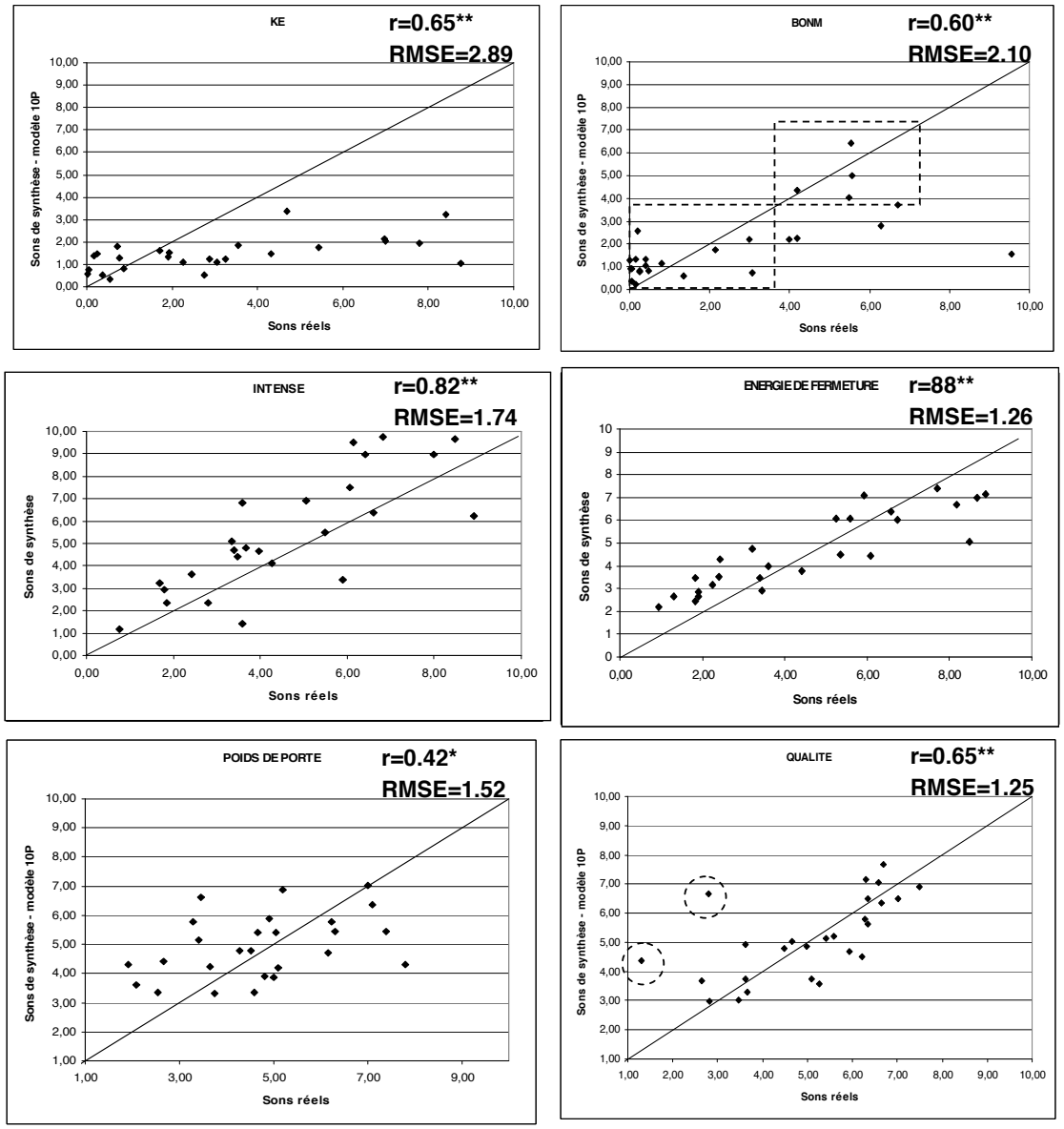


Figure 95 Evaluations des propriétés perceptives sons de synthèse du modèle simplifié vs sons réels, coefficients de corrélations (r>.388 significatif à 5% r>.496** significatif à 1%) et racine des moyennes des erreurs au carré.*
2 niveaux correspondant à une absence ou présence de BONM sont grossièrement détectés en synthèse, même si cette propriété est moins bien reproduite qu'avec le modèle de synthèse complet ; la propriété KE est mal reproduite avec la synthèse simplifiée. Cette propriété a posé des difficultés au panel lors de l'évaluation.
Les propriétés INTENSE et ''énergie de fermeture'' sont conservées par le modèle de synthèse.
*Les propriétés ''qualité'' et ''poids de porte'' sont assez mal reproduites en synthèse. L'évocation de ''qualité'' est relativement conservée si on ne prend pas en compte les sons s12 et s21 à fortes spécificités (r=0.83**).*

Le modèle d'analyse-synthèse simplifié est construit à partir de 10 paramètres de contrôle. Sa capacité à reproduire les propriétés perceptives est uniquement détériorée par rapport au modèle complet sur la propriété analytique KE, plus difficile à appréhender en signal et en sensoriel. Il reste capable de synthétiser des sons réalistes que l'on peut caractériser sur les propriétés perceptives des bruits de fermeture de porte. Nous choisissons d'étudier systématiquement ces paramètres qui constituent nos hypothèses pour la caractérisation acoustique des bruits de fermeture de porte.

Conclusion

Nous évaluons le modèle d'analyse-synthèse de bruits de fermeture de porte construit dans le but de synthétiser des sons proches des sons réels du point de vue des propriétés perceptives : les propriétés analytiques KE, BONM, INTENSE et la présence de bruit serrure, en relation avec les propriétés naturelles ''poids de porte'' et ''énergie de fermeture'', elles-mêmes en relation avec les évocations ''qualité'' et ''solidité''. D'une part on cherche si les descripteurs acoustiques issus des paramètres de contrôle du modèle suffisent à prédire les propriétés perceptives, d'autre part, on évalue la ressemblance perceptive entre sons réels et sons de resynthèse. Enfin une version simplifiée du modèle est proposée pour restreindre les paramètres de contrôle à un ensemble de 10 paramètres principaux

Prédiction des propriétés perceptives

Les descripteurs acoustiques du modèle de synthèse estiment correctement les propriétés perceptives des 26 bruits de fermeture de porte. L'information acoustique contenue dans le modèle d'analyse-synthèse est donc suffisante pour étudier les relations entre perception et signal acoustique. Les relations établies s'appuient sur des liens statistiques établis sur un ensemble de 26 bruits, avec un critère de validation croisée. Mais ces relations semblent bruitées par les relations statistiques non pertinentes internes à l'espace d'étude et ne sont pas généralisables. La caractérisation acoustique doit encore être approfondie en étudiant les effets spécifiques de différents paramètres acoustiques sur les propriétés perceptives.

Conservation des propriétés perceptives

Le modèle d'analyse-synthèse est testé en comparant les sons 26 réels étudiés à leur version de synthèse. Il est conservatif sur la propriété INTENSE, mais ne permet de retrouver seulement 2 groupes de sons sur les descripteurs KE et BONM. Cela suffit toutefois à retrouver les sons de type ''serrure'' (à fort KE) et de type ''fermeture'' (absence de KE et fort BONM).
La propriété naturelle ''énergie de fermeture'', lié à la propriété INTENSE, est bien conservée en synthèse. En revanche, l'évocation de ''qualité'', et surtout la propriété ''poids de porte'', ne sont pas retranscrites.

Modèle de synthèse simplifié

Les paramètres les plus influents sont sélectionnés pour proposer une version simplifiée du modèle, contrôlée par 10 paramètres (Figure 96). Le choix des descripteurs principaux est basé sur des écoutes des 26 bruits de resynthèse, et sur les liens statistiques entre les variables. Le modèle de synthèse simplifié est évalué perceptivement, et comparé au modèle complet : il est uniquement détériorée sur la propriété analytique KE.

Nous choisissons d'approfondir la caractérisation acoustique dans l'espace des sons de synthèse contrôlé par ces 10 paramètres a priori pertinents pour expliquer les propriétés perceptives (Figure 96). Même si l'espace d'étude est éloigné de l'espace des sons réels, sa dimension restreinte permet d'y étudier précisément les effets des paramètres acoustiques sur les propriétés perceptives, à partir de sons de synthèse contrôlés.

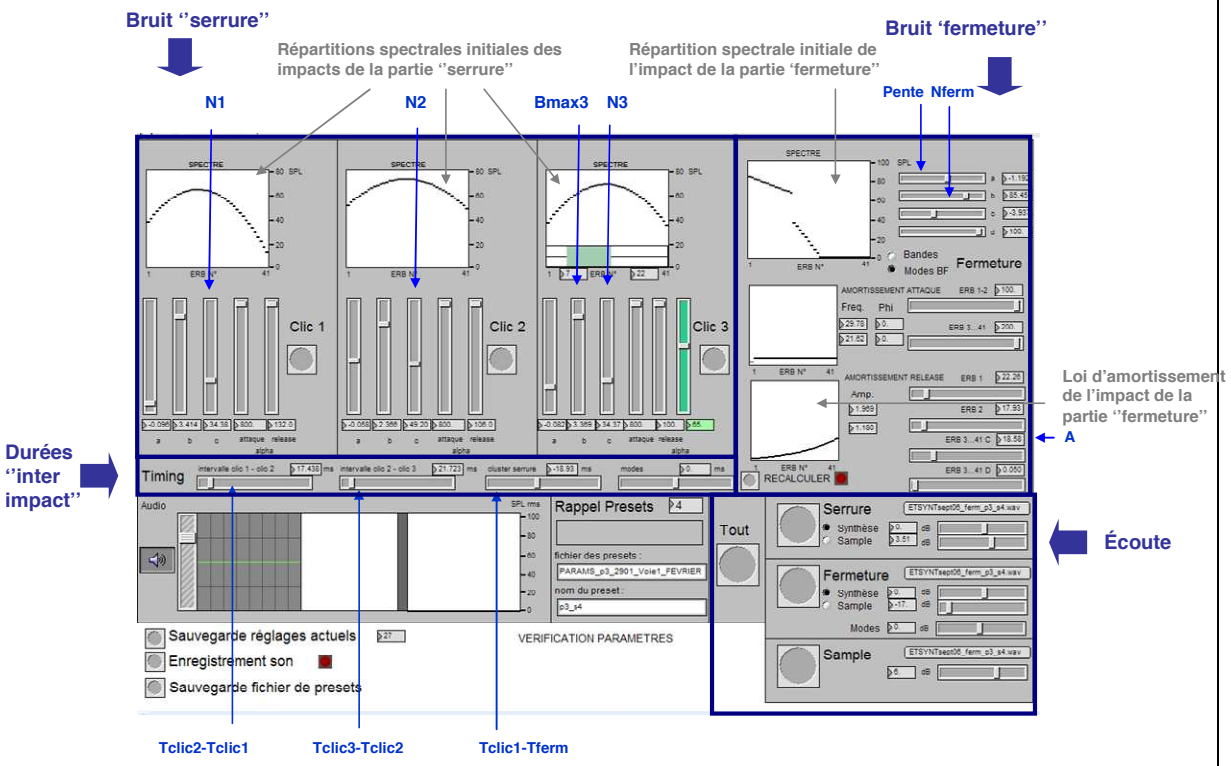


Figure 96 Interface de l'outil de synthèse temps-réel – descripteurs acoustiques principaux
- les niveaux des impacts de la partie ''serrure'' (N1, N2, N3*), de l'impact de la partie ''fermeture''* (Nferm*),*
- la répartition spectral du dernier impact de la partie ''serrure'' (Bmax3*) et de l'impact de la partie ''fermeture''* (Pente*),*
- la loi d'amortissement de la partie ''fermeture'' (A*),*
- les durées ''inter impacts'' (Tclic3-Tclic2, Tclic2-Tclic1, Tclic1-Tferm*)*
Les descripteurs acoustiques sont indépendants.

3. Caractérisation acoustique des sons de synthèse

Le modèle de synthèse simplifié des bruits de fermeture de porte permet de synthétiser des bruits à partir de 10 paramètres acoustiques a priori pertinents pour caractériser les propriétés perceptives. Nous cherchons dans cette partie à établir les relations entre ces paramètres acoustiques et les propriétés perceptives.
Après avoir précisé l'espace de synthèse étudié **(section 3.1)**, on évalue les propriétés perceptives de sons de synthèse répartis dans cet espace suivant différents plans d'expérience qui mènent à différentes informations. A partir d'un plan d'expérience D-optimal, on cherche d'abord à prédire les propriétés analytiques **(section 3.2)**. On observe ensuite l'influence de modifications fines de chaque paramètre acoustique pour pointer d'éventuels non linéarités et effets de seuils **(section 3.3)**. Finalement, les relations complexes entre paramètres acoustiques et propriétés perceptives sont organisées à partir d'arbres de paramètres.

3.1 Espace des sons de synthèse

L'espace des sons de synthèse est constitué de sons synthétisés par le modèle simplifié présenté précédemment (2.3). Il est contrôlé par 10 descripteurs acoustiques indépendants, indexés sur les paramètres de contrôle du modèle (Figure 96) :

- les niveaux des impacts de la partie ''serrure'' (*N1, N2, N3*), de l'impact de la partie ''fermeture'' (*Nferm*),
- la répartition spectrale du dernier impact de la partie ''serrure'' (*Bmax3*) et de l'impact de la partie ''fermeture'' (*Pente*),
- la loi d'amortissement de la partie ''fermeture'' (*A*),
- les durées ''inter impacts'' (*Tclic3-Tclic2, Tclic2-Tclic1, Tclic1-Tferm*)

L'espace des sons de synthèse est borné par les valeurs minimales et maximales des paramètres acoustiques observées sur les 26 sons réels étudiés (Tableau 21).

	N1 (dB)	N2 (dB)	N3 (dB)	Bmax3 (ERB)	Nferm (dB)	Pente (dB/ERB)	A (s-1)	Tclic1/2 (s)	Tclic2/3 (s)	Tserr/ferm (s)
Min *réel*	51,7	53,6	55,6	1	62,7	-3,3	7,6	13	13	-72
Max *réel*	73,6	73	73	23	82,9	0	40,1	34	33	4

Tableau 21 Valeurs minimales et maximales des 10 descripteurs acoustiques observés sur les 26 sons réels étudiés

3.2 Prédiction des propriétés analytiques

Pour établir des modèles de prédictions des propriétés analytiques, on évalue en sensoriel des sons synthétisés par modification des 10 paramètres acoustiques principaux selon un plan d'expérience à préciser. Le plan d'expérience qui contient toutes les combinaisons entre paramètres, variant sur 3 modalités, propose un ensemble de 3^{10} sons, ce qui n'est pas réalisable expérimentalement. Nous devons alors proposer un plan incomplet pour limiter le nombre de sons tout en préservant un maximum d'information. On cherche en particulier un plan d'expérience capable d'estimer les effets

principaux et les interactions d'ordre 2. Le plan optimal est cherché à partir de la matrice d'information X'X (X étant la matrice des paramètres acoustiques). Le critère le plus courant est le critère de D-optimalité. Il maximise le déterminant de la matrice d'information X'X, et réduit ainsi la variance des estimateurs des coefficients de la régression (Dagnelie, 2003).

3.2.1 Plan d'expérience

Le plan d'expérience D-optimal est construit sur un sous-ensemble de l'espace de synthèse.

Bornes de l'espace étudié

Les bornes de certains paramètres sont restreintes vu que certaines combinaisons de valeurs extrêmes de paramètres induisent des sons tout à fait irréalistes. L'expérience de l'écoute de sons de synthèse nous amène à identifier certaines combinaisons irréalistes :

- la valeur minimale de la sous-bande de maximum d'énergie de la répartition spectrale du dernier impact de la partie ''serrure'' (*Bmax3*) est atteinte lorsque l'énergie de cet impact est faible (*N3*), il est alors peu audible dans le son global,
- la valeur maximale du coefficient de la loi d'amortissement de l'impact de la partie ''fermeture'' (*A*) est atteinte lorsque cet impact est de faible énergie (*Nferm*), la partie ''fermeture'' est alors peu présente dans le son global,
- la valeur maximale de la pente de la répartition spectrale de l'impact de la partie fermeture (*Pente*) est atteinte lorsque cet impact est de faible énergie (*Nferm*), et la valeur minimale est atteinte lorsque le coefficient de la loi d'amortissement de cet impact (*A*) est faible,
- la valeur minimale de la durée séparant la partie ''serrure'' de la partie ''fermeture'' (*Tclic1/Tferm*) est atteinte lorsque les durées inter impacts dans la partie ''serrure'' sont longues, et la valeur maximale les durée inter impacts dans la partie ''serrure'' sont courtes, pour ne pas que la partie ''fermeture'' arrive bien avant, ou bien après la partie ''serrure''.

Nous proposons alors de restreindre les bornes de ces paramètres (Tableau 22).

	N1 (dB)	N2 (dB)	N3 (dB)	Bmax3 (ERB)	Nferm (dB)	Pente (dB/ERB)	A (s-1)	Tclic1/2 (s)	Tclic2/3 (s)	Tclic1/ferm (s)
Min *réel*	51,7	53,6	55,6	1	62,7	-3,3	7,6	13	13	-72
Max *réel*	73,6	73	73	23	82,9	0	40,1	34	33	4
Min *Dopt*	51,7	53,6	55,6	**11**	62,7	**-2,25**	7,6	13	13	**-50**
Max *Dopt*	73,6	73	73	23	82,9	**-0,56**	**24**	33	33	**-10**

Tableau 22 Bornes de l'espace réel et borne de l'espace du plan d'expérience.
Les bornes restreintes sont en gras.

Plan d'expérience

67 combinaisons des paramètres acoustiques sont réparties selon un plan D-optimal pour établir les modèles (corpus d'apprentissage). Les paramètres sont répartis sur 4 modalités, la plupart des paramètres étant fixées aux valeurs extrêmes. 13 combinaisons intermédiaires sont ajoutées pour valider la robustesse des modèles (corpus de validation). Au total, 80 sons de synthèse sont créés (plan_Dopt_10P_s). Les valeurs des paramètres acoustiques sont rassemblées en annexe *PARAMETRES_ACOUSTIQUES*. Nous présentons en exemple les valeurs des paramètres N1 et N2 (Figure 97).

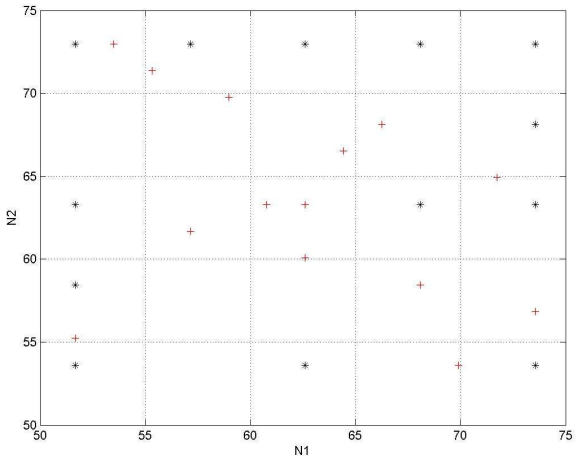


*Figure 97 Projection des 80 sons de synthèse sur 2 paramètres acoustiques (N1 et N2). Les points d'apprentissage se situent plutôt aux frontières de l'espace exploré (* : s1 à s67), et les points de validation sont répartis dans l'espace exploré (+ : s68 à s80). Les points de validation permettent de contrôler la robustesse des modèles établis.*

Même si la restriction des plages de valeurs explorées améliore le réalisme des sons de synthèse, la plupart des 80 sons de synthèse restent surprenants. Leurs paramètres acoustiques sont presque tous fixés aux valeurs limites. Cette répartition, optimale pour la modélisation, mène à des sons limites, voir tout à fait irréalistes. Il est donc impensable de songer à évaluer des propriétés naturelles et les évocations sur de tels sons. En revanche, on peut les caractériser sur les propriétés analytiques.

3.2.2 Evaluation des propriétés analytiques

De même que pour les sons réels étudiés au Chapitre V, les propriétés analytiques des sons de synthèse sont évaluées par analyse sensorielle, réalisée par l'équipe Méthodologie Innovante et Facteurs Humains du service PErception et Facteurs Humains de PSA.

Stimuli

L'étude est réalisée sur les 80 sons de synthèse définis selon le plan d'expérience (plan_Dopt_10P_s).

Panel sensoriel

Le panel sensoriel évalue les bruits de fermeture de porte de synthèse sur les propriétés KE, BONM et INTENSE, avec deux répétitions, par rapport à des références externes choisis parmi les sons de resynthèse étudiés dans la partie précédente :

- les sons réels minima (SYNTHESE_s14) et maxima (SYNTHESE_s19) pour la propriété INTENSE,
- les maxima pour les propriétés BONM (SYNTHESE_s23) et KE (SYNTHESE_s1). Ces dernières propriétés n'ont pas besoin de référence minimale, puisqu'il s'agit alors de l'absence de ces propriétés.

De plus, la propriété HAUTEUR est également évaluée. Cette propriété avait été proposée pour caractériser les sons réels sans succès : le panel sensoriel n'obtenait pas de performances correctes pour caractériser les sons réels sur cette propriété globale. La restriction sensorielle de l'espace de synthèse facilite l'évaluation sensorielle, si bien que les sons de synthèse sont bien caractérisés sur la

propriété HAUTEUR. Elle est également évaluée par rapport à des références externes de l'espace de resynthèse des sons d'étude (borne inférieure : SYNTHESE_s3 ; borne supérieure : SYNTHESE_s26). Cette propriété traduit en global les propriétés KE et BONM, liées aux parties ''serrure'' et ''fermeture'' du bruit de fermeture de porte (cf Chapitre V).

Les performances du panel en discriminabilité, consensualité et répétabilité sont vérifiées sauf pour la propiété KE qui présente un problème mineur de consensualité *(cf annexe PANEL_SENSORIEL)*. Vu la complexité de l'espace étudié, ces performances restent satisfaisantes.

3.2.3 Prédiction des propriétés analytiques

On cherche à prédire les propriétés analytiques à partir de combinaisons linéaires des 10 descripteurs acoustiques. Les descripteurs les plus pertinents sont sélectionnés à l'aide de régressions pas à pas (Cornillon et Matzner-Lober, 2007). Les relations linéaires sont ensuite établies par régressions Ridge (Cornillon et Matzner-Lober, 2007), la modélisation quadratique n'apportant pas d'information supplémentaire. Les modèles sont établis sur les 67 sons d'apprentissage, et validés sur les 13 autres sons de validation (R2val) (Tableau 23).

Propriété estimée	Paramètres des modèles de prédiction	R2val
INTENSE	*+Nferm +Nserr*	0.70
BONM	*-Nclic -Bmax3 +Nferm -A*	0.76
KE	*+(Nclic-Nferm) +Bmax3 +N3 +Tclic1/2 +Tclic2/3 -Tclic1/ferm*	0.73
HAUTEUR	*+(Nclic-Nferm) +Bmax3 +A +Tclic1/2*	0.77

Tableau 23 ''Modèles'' de prédiction des propriétés analytiques et R2val associé (coefficient de détermination obtenu sur le corpus de validation).

- La propriété INTENSE est caractérisée par les niveaux des parties ''serrure'' (*Nserr +*) et de ''fermeture'' (*Nferm +*).
- La propriété BONM est liée à un faible niveau de la partie ''serrure'' (*Nclic -*), un contenu basse fréquence du dernier impact de la partie ''serrure'' (*Bmax3 -*), un fort niveau de la partie ''fermeture'' (*Nferm +*), et un amortissement lent pour les basses fréquence de l'impact ''fermeture'' (*A -*)
- La propriété KE est caractérisée par le niveau global de la partie ''serrure'' par rapport à la partie ''fermeture'' (*Nclic-Nferm +*), ainsi que par l'émergence du dernier impact de la partie serrure : plus il a un niveau élevé (*N3 +*), et plus il contient de hautes fréquences (*Bmax3 +*), plus le son résultant a un fort niveau de KE. Enfin, la propriété KE est positivement liée aux durées inter impacts.
- La propriété HAUTEUR est positivement liée à KE et négativement à BONM. Elle est caractérisée par le niveau de la partie ''serrure'' par rapport à la partie ''fermeture'' (*Nclic-Nferm +*), le contenu fréquentiel du dernier impact serrure (*Bmax3 +*), l'amortissement de la fermeture *(A +)*, et la durée entre les 2 premiers impacts serrure (*Tclic1/2 +*).

Les modèles de prédiction sont testés sur les 26 bruits de fermeture de porte réels étudiés (Figure 98).

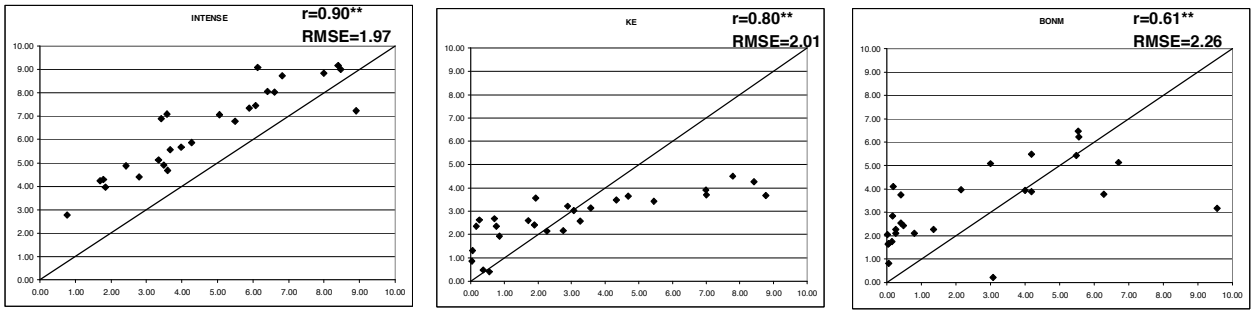


Figure 98 Propriétés analytiques prédites vs mesurées (pour les 26 sons réels étudiés)
coefficients de corrélations (r>.388 significatif à 5% r>.496** significatif à 1%) et racine des moyennes des erreurs au carré.*
*La propriété INTENSE est globalement surestimée, mais le classement des sons est bien retrouvé (r=0.90**) ; deux groupes de sons (absence/présence de BONM) sont retrouvés pour la propriété BONM ; la propriété KE est globalement sous estimée.*

Les modèles établis sur le plan d'expérience équilibré ne prédisent pas aussi bien les propriétés analytiques des 26 sons réels que les modèles ajustés sur ces mêmes sons (2.1), puisqu'ils sont établis sur un tout autre corpus d'apprentissage. Mais nous observons ici leur robustesse : **i**ls sont capables d'estimer correctement d'autres sons que ceux du corpus d'apprentissage, qui plus est, des sons réels.

Conclusion

Les paramètres associés à chaque propriété analytique (Figure 99), sont cohérents avec notre écoute. La propriété INTENSE est liée aux niveaux des partie ''serrure'' et ''fermeture''. La propriété BONM est assurée par une partie ''serrure'' peu présente (le niveau de la partie ''serrure'' est faible et le contenu fréquentiel du dernier impact ''serrure'' de basse fréquence), et par une partie fermeture présente (avec un fort niveau et un amortissement lent des basses fréquences). La propriété KE, liée à l'émergence métallique de la partie ''serrure'', s'exprime quand le niveau de la partie ''serrure'' est élevé par rapport à celui de la ''fermeture'', quand le dernier impact est bien présent avec un fort niveau et un contenu plutôt haute fréquence, et quand les durées inter impacts sont élevées. La propriété HAUTEUR reprend les critères qui caractérisent les propriétés BONM et KE.

La capacité des modèles proposés à estimer un corpus de sons réels montre la pertinence de la synthèse. Bien que les sons de synthèse soient une version épurée du monde des sons réels, elle permet d'accéder à des relations valides pour les sons réels. De plus, les relations obtenues semblent plus pertinentes que celles établies par analyses statistiques sur les sons réels (**2.1**). La synthèse permet de paver l'espace d'analyse de façon équilibrée, si bien que les relations obtenues ne sont pas bruitées par des relations propres à l'espace d'étude.

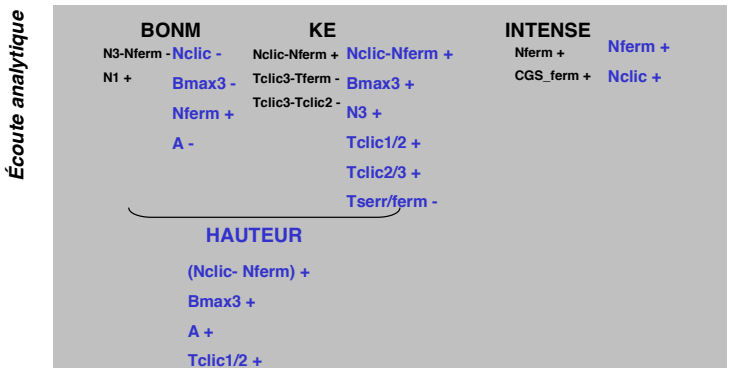


*Figure 99 Propriétés analytiques et descripteurs acoustiques obtenus par modélisation des sons de synthèse (Dopt) (**en noir**, les descripteurs obtenus par modélisation des sons réels)*

Les liens linéaires entre paramètres acoustiques et propriétés analytiques sont établis. Mais la perception des multiples impacts, plus ou moins proches dans le temps, plus ou moins basse fréquence, plus ou moins amortis, est asservie aux effets psychoacoustiques complexes de type masquage temps-fréquence. De plus, les sons (réalistes) renvoient à la perception de sources (''serrure'', ''fermeture''), par nature catégorielle. Il en résulte que les effets des paramètres acoustiques sont probablement associés à des non linéarités et à des effets de seuils, et que les paramètres acoustiques sont probablement dépendants les uns des autres. Nous devons compléter la modélisation acoustique en observant les effets de seuil par paramètres, puis en considérant la façon dont les paramètres s'organisent pour caractériser chaque propriété perceptive.

3.3 Effets de seuil

Pour observer les effets de seuil, nous proposons d'observer plus finement l'influence des paramètres acoustiques sur les propriétés analytiques. On évalue en sensoriel un ensemble de sons synthétisés à partir de fines variations de chaque paramètre acoustique. Les interactions entre paramètres ne sont pas considérées dans cette partie.

3.3.1 Plan d'expérience

On construit des séries de sons de synthèse à partir de modifications de chaque descripteur acoustique. Chaque descripteur acoustique est modifié à partir du ''son central'' pour lequel les 10 descripteurs acoustiques sont ajustées aux valeurs moyennes observées sur les 26 réels étudiés. Le descripteur *Nclic* (niveau moyen des impacts de la partie ''serrure'' *N1, N2, N3*) fortement influent est ajouté aux 10 descripteurs étudiés.

Bornes de l'espace étudié

Les plages de variations étudiées sont juste plus larges que celles observées sur les 26 sons réels du corpus d'étude, sauf pour 2 paramètres :

- la valeur minimale de la sous-bande de maximum d'énergie de la répartition spectrale du dernier impact de la partie ''serrure'' (*Bmax3*) est atteinte lorsque l'énergie de cet impact est faible (*N3*)
- la valeur maximale du coefficient de la loi d'amortissement de l'impact de la partie ''fermeture'' (*A*) est atteinte lorsque cet impact est de faible énergie (*Nferm*).

Les bornes sont restreintes pour ces paramètres (Tableau).

Plan d'expérience

*Chaque série de sons de synthèse est construite en modifiant pas à pas constant un descripteur acoustique autour de la valeur du son ''central'', sur les plages de valeurs définies ci-dessus, les autres paramètres étant fixés aux valeurs du son '' central''. Par ailleurs, une seule série est proposée pour étudier les paramètres de durée inter impacts de la partie ''serrure'' (*Tclics1/2 et Tclics2/3*), elle est construite par combinaisons de 3 valeurs de durée inter impacts. 10 séries de sons de synthèse sont donc créées (SERIE*i_sj *) (*

Tableau 24). Les valeurs des paramètres modifiés sont précisées Figure 100. Les valeurs des descripteurs acoustiques et paramètres de contrôle associés sont rassemblées en annexe *PARAMETRES_ACOUSTIQUES*.

	SERIE7	SERIE10	SERIE5	SERIE1	SERIE2	SERIE11	SERIE3	SERIE8	SERIE6		SERIE9
	Nserr (dB)	Nferm (dB)	N1 (dB)	N2 (dB)	N3 (dB)	Bmax3 (ERB)	Pente (dB/ERB)	A (s-1)	Tclic1/2 (s)	Tclic2/3 (s)	Tserr/ferm (s)
Min *réel*	53.7	62,7	51,7	53,6	55,6	1	-3,3	7,6	13	13	-72
Max *réel*	71	82,9	73,6	73	73	23	0	40,1	34	33	4
Min*Série*	51.3	59	47.9	50.9	50.6	**9**	-3.78	4.77	Combinaisons des durées : 13, 23 et 33		-73.2
Max *Série*	74.3	86	77	76.7	73.9	25	0.14	**26.6**			8
Pas *Série*	*2.87*	*3.37*	*3.64*	*3.23*	*2.91*	*2*	*0.56*	*2.73*			*9.79*

Tableau 24 Bornes de l'espace réel et bornes de l'espace du plan d'expérience. Les bornes restreintes sont indiquées en gras. Les pas des modifications de chaque descripteur acoustique associé à chaque série de sons de synthèse sont ajoutés en italique.

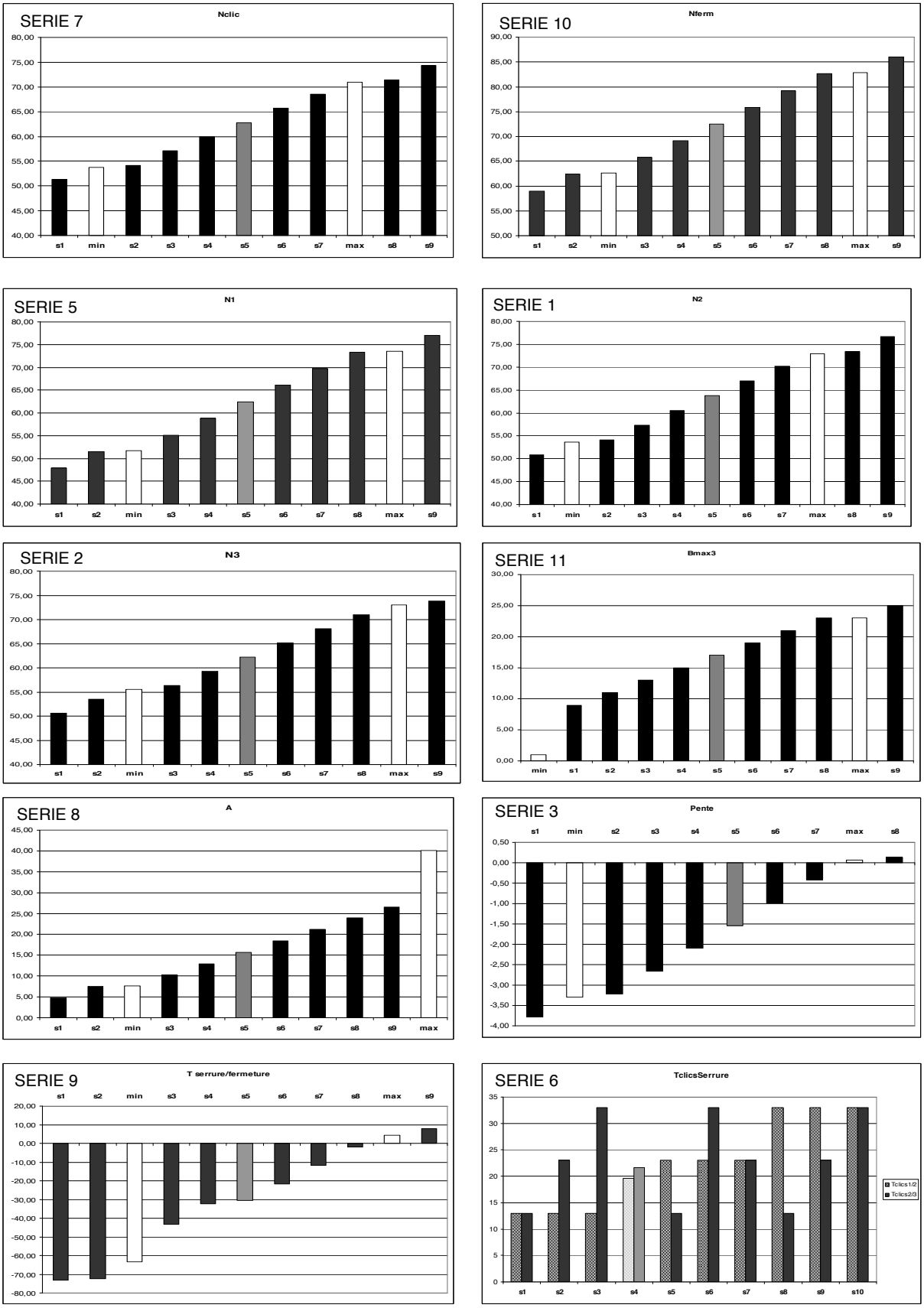


Figure 100 Séries de modifications de descripteurs acoustiques (en noir) autour de la valeur moyenne (en gris). Sons s1 à s9 : augmentation à pas constant d'un descripteur acoustique.
Pour chaque série, les minima et maxima observés sur les sons réels sont indiqués en blanc (sauf pour la série TclicsSerrure).

3.3.2 Evaluation des propriétés analytiques

Comme pour les sons réels étudiés au Chapitre V, les propriétés analytiques des sons de synthèse sont évaluées par analyse sensorielle.

Stimuli

L'étude est réalisée sur les 10 séries de sons de synthèse synthèse définis selon le plan d'expérience (SERIE*i*_s*j*). Chaque série de sons fait l'objet d'une analyse sensorielle indépendante.

Panel sensoriel

Le panel sensoriel évalue chaque série de bruits de fermeture de porte de synthèse sur les propriétés KE, BONM, INTENSE, et HAUTEUR avec deux répétitions, par rapport à des références externes choisis parmi les sons de resynthèse étudiés dans la partie précédente (3.2).:

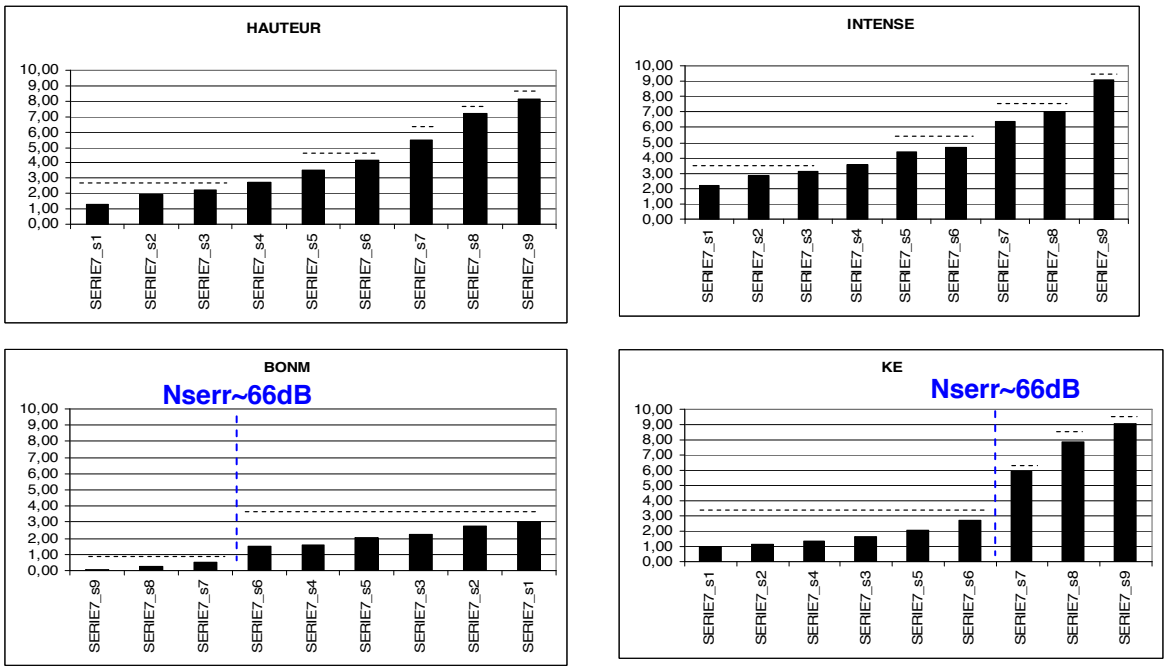
- les sons réels minima et maxima pour les propriétés INTENSE (SYNTHESE_s14 - SYNTHESE_s19) et HAUTEUR (SYNTHESE_s3 - SYNTHESE_s26)
- les maxima pour les propriétés BONM (SYNTHESE_s23) et KE (SYNTHESE_s1). Ces dernières propriétés n'ont pas besoin de référence minimale, puisqu'il s'agit alors de l'absence de ces propriétés.

Les performances du panel en discriminabilité, en consensualité et répétabilité pour chaque série sont analysées *(cf annexe PANEL_SENSORIEL)*. La discriminabilité des sons n'est pas observée pour toutes les séries sur l'ensemble des propriétés analytiques puisque certains paramètres acoustiques ne sont pas influents sur certaines propriétés. Cette non discriminabilité n'est alors pas vue comme une déficience du panel mais comme un résultat sur les paramètres acoustiques. La non discriminabilité des sons entraîne alors éventuellement une non consensualité et une non répétabilité qui ne mettent pas en défaut les résultats.

3.3.3 Effets par descripteur acoustique

Pour chaque paramètre acoustique, nous présentons et commentons les propriétés analytiques impactées, en précisant les sons qui ont été bien discriminés (d'après test de Duncan) (Figure 101 à Figure 107). L'effet des paramètres acoustiques est en particulier comparé aux modèles de prédiction obtenus en **3.2**. Nous rappelons que les sons sont numérotés de 1 à 9 dans le sens d'une augmentation des descripteurs acoustiques.

Nclic



Nferm

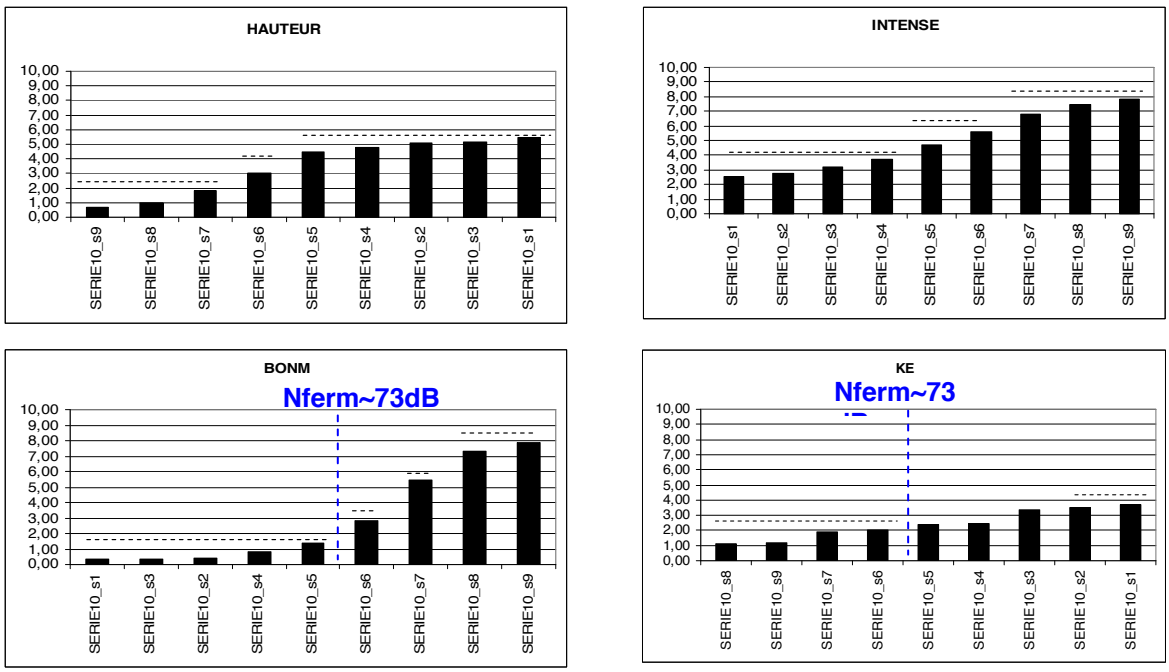


Figure 101 Influence des descripteurs Nclic *et* Nferm *sur les propriétés analytiques.*
*Le niveau initial de la partie "serrure" (*Nclic*) est positivement lié aux propriétés KE, INTENSE et HAUTEUR, et négativement liée à la propriété BONM.*
*Le niveau initial de la partie "fermeture" (*Nferm*) est positivement lié aux propriétés BONM et INTENSE, et négativement liée aux propriétés KE et HAUTEUR.*

Dans les modèles de prédiction établis en 3.2.3, les descripteurs acoustiques *Nclic* et *Nferm* influencent les propriétés analytiques BONM, KE, INTENSE et HAUTEUR (Tableau 23). Une influence similaire (respect de la positivité ou négativité de l'influence) est à nouveau observée. De plus, les résultats présents révèlent des effets de seuil : *Nserr* impacte KE pour des valeurs supérieures à un seuil (~66dB), et *Nferm* impacte BONM pour des valeurs supérieures à un seuil (~73dB). Les sons pour lesquels Nserr (resp. Nferm) est supérieur à ces seuils ne contiennent pas de BONM (resp. KE).

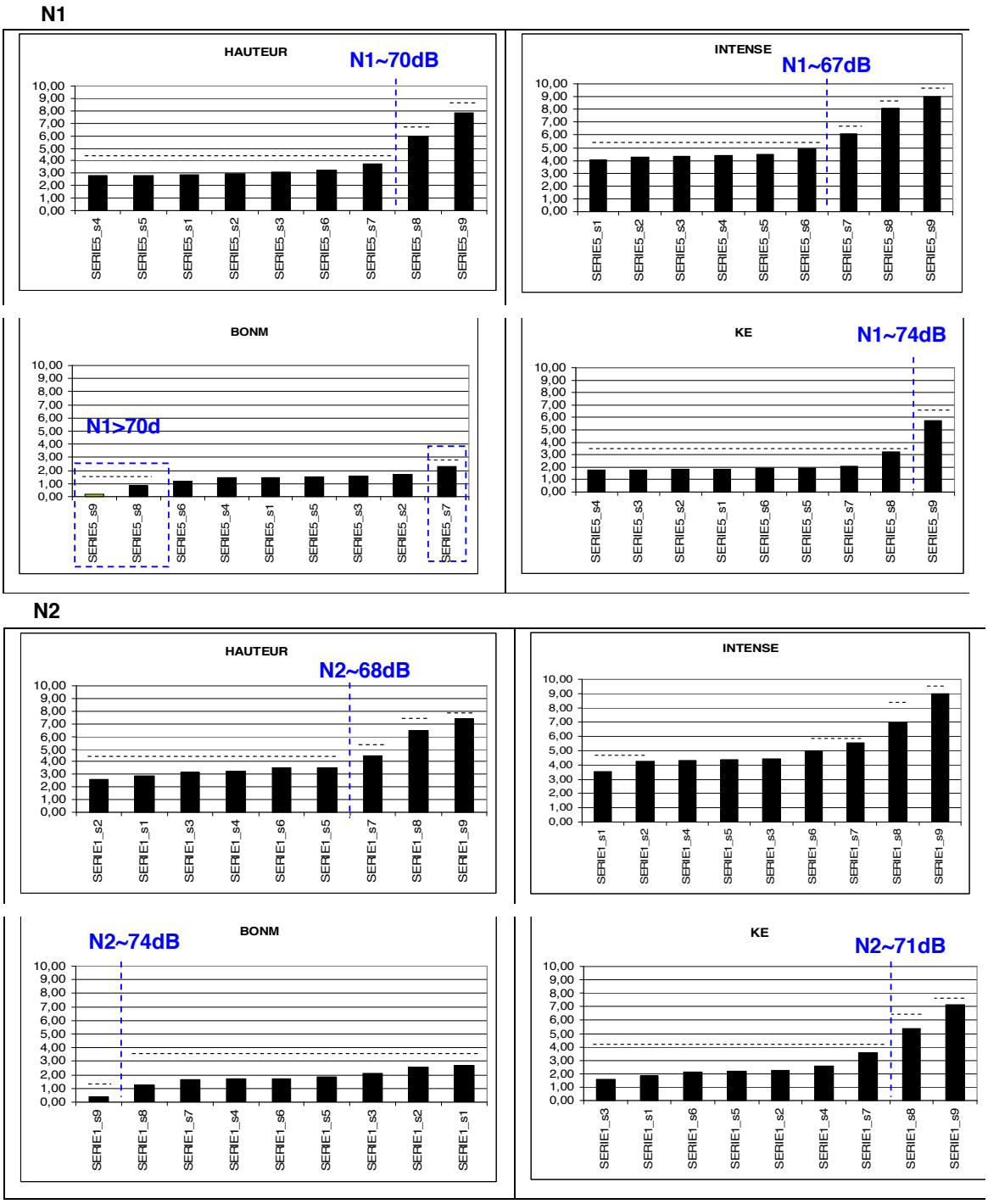


Figure 102 Influence des descripteurs N1 *et* N2 *sur les propriétés analytiques.*
Les niveaux des deux premiers impacts de la partie "serrure" (N1, N2*) sont positivement liés aux propriétés KE, INTENSE et HAUTEUR, et négativement liée à la propriété BONM.*

A travers *Nclic*, les descripteurs *N1* et *N2* interviennent dans les modèles de prédiction des propriétés analytiques établis en 3.2.3 (Tableau 23). Leur influence est à nouveau observée. Elle est complétée par l'observation d'effets de seuils :

- *N2* impacte KE et HAUTEUR pour des valeurs supérieures à certains seuils (~71dB, ~68dB). Les sons pour lesquels *N2* est supérieur un seuil (~74dB) ne contiennent pas de BONM.
- *N1* impacte KE, HAUTEUR et INTENSE pour des valeurs supérieures à certains seuils (~74dB, 70dB, 67dB). De plus, un léger effet non monotone est relevé pour le descripteur *N1* : on observe plus de BONM pour un son à fort *N1* (s7) et moins de BONM pour les sons à plus fort *N1* (s8 et s9).

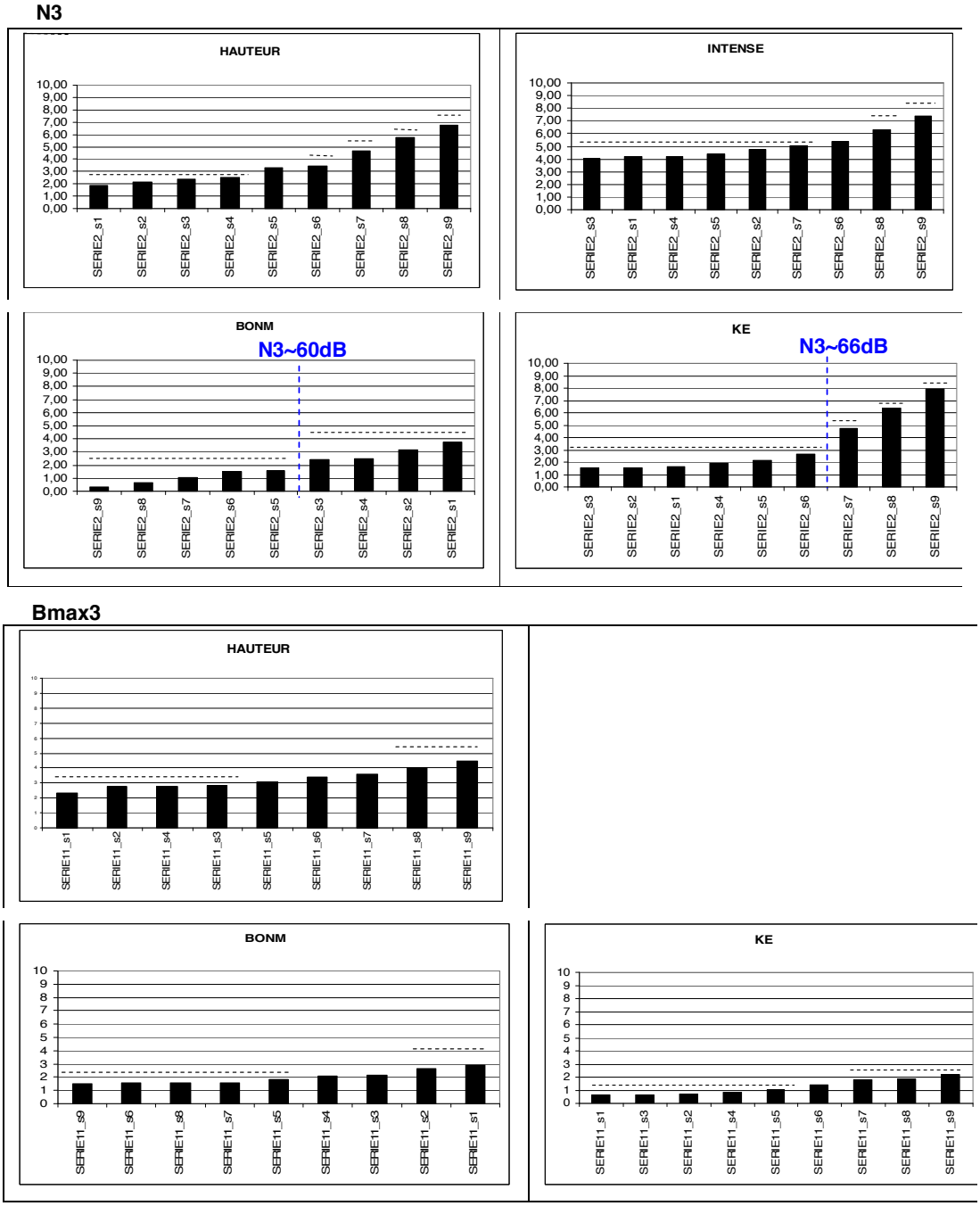


Figure 103 Influence des descripteurs N3 *et* Bmax3 *sur les propriétés analytiques.*
Le niveau du dernier impact de la partie "serrure" (N3*) est positivement lié aux propriétés KE, INTENSE et HAUTEUR, et négativement liée à la propriété BONM.*
Le contenu fréquentiel du dernier impact de la partie "serrure" (Bmax3*) est positivement liée aux propriétés HAUTEUR et KE, et négativement lié à la propriété BONM.*

De même que *N1* et *N2*, le descripteur *N3* intervient dans les modèles de prédiction (Tableau 23) par l'intermédiaire de *Nclic*. L'influence positive de *N3* sur HAUTEUR, INTENSE et KE, et l'influence négative sur BONM sont à nouveau observées. De plus, *N3* impacte KE pour des valeurs supérieures à un seuil (~60dB). Les sons pour lesquels *N3* est supérieur un seuil (~66dB) ne contiennent pas de BONM. Nous observons également, tout comme les modèles linéaires précédents (Tableau 23), l'influence du descripteur *Bmax3* sur HAUTEUR, KE et BONM, les modifications de Bmax3 n'entraînant pas de modification de INTENSE ($F(8,72)=0.94$, $p>0.05$).

A

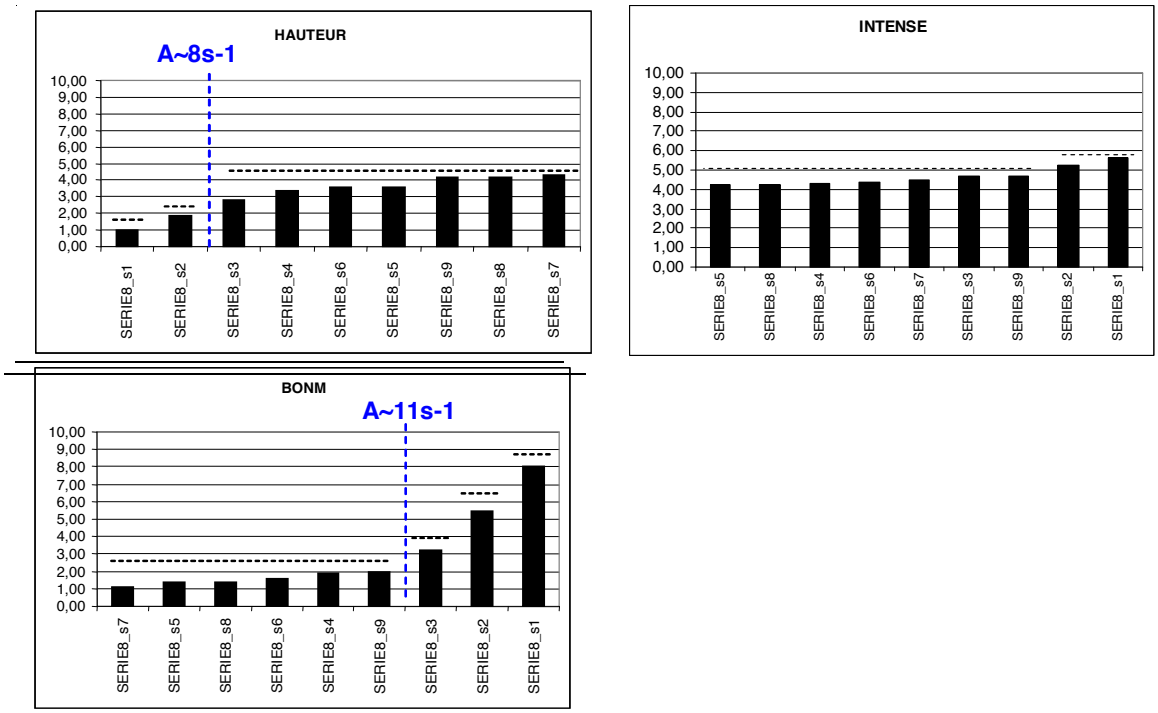


Figure 104 Influence du descripteur A *sur les propriétés analytiques.*
Le paramètre d'amortissement de la partie "fermeture" influence positivement la propriété HAUTEUR, et négativement la propriété BONM.

Le descripteur *A* a une influence positive sur HAUTEUR et négative sur BONM, comme constaté dans les modèles de prédiction établis précédemment (Tableau 23). De plus, *A* impacte HAUTEUR pour des valeurs supérieures à un seuil (~8s-1), et BONM pour des valeurs inférieures à un seuil (~11s-1). Les sons varient légèrement sur INTENSE (effet non mis en évidence des les précédents modèles de prédiction), et ne sont pas discriminés sur KE ($F(8,64)=0.41$, $p>0.05$).

Pente (SERIE3)

Pente

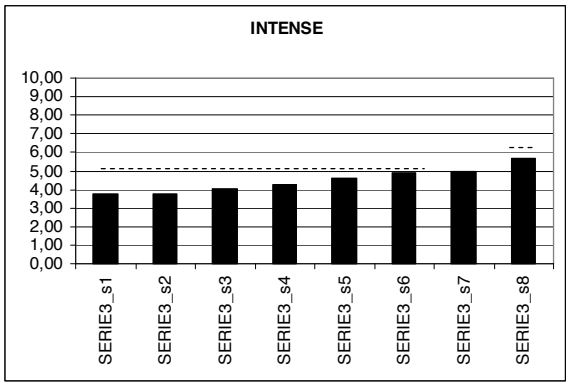


Figure 105 Influence du descripteur Pente *sur les propriétés analytiques.*
La répartition initiale spectrale de l'impact "fermeture" n'influence que légèrement la propriété INTENSE.

L'effet du descripteur *Pente* est mineure sur INTENSE et non significatif sur HAUTEUR ($F(7,49)=0.95$, $p>0.05$), BONM ($F(7,49)=1.11$, $p>0.05$), et KE ($F(7,49)=0.56$, $p>0.05$). Il n'avait en l'occurrence pas été relevé par les modèles de prédiction établis en 3.2.3 (Tableau 23).

Tserr/ferm

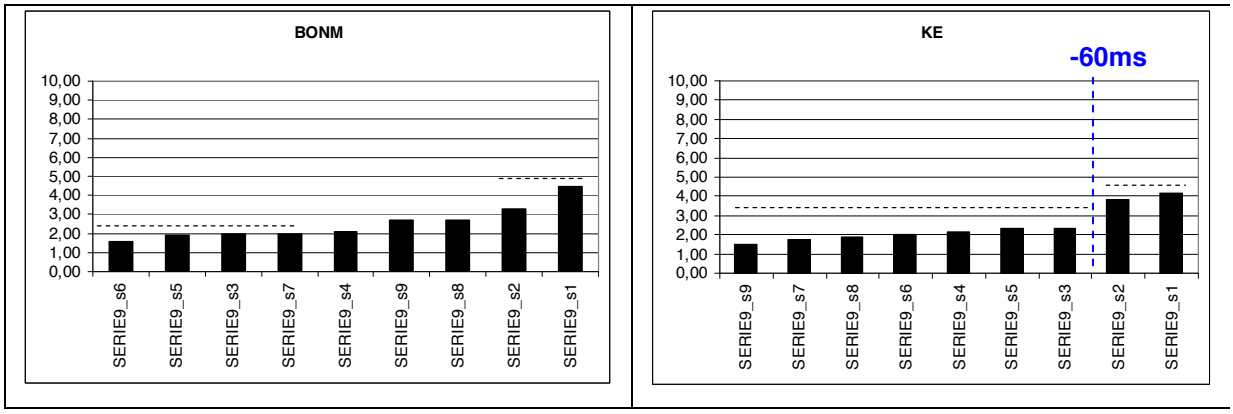


Figure 106 Influence du descripteur Tserr/ferm *sur les propriétés analytiques.*
La durée entre le premier impact de la partie "serrure" et l'impact de la partie "fermeture" est positivement liée à la propriété KE, et négativement à la propriété BONM.

L'effet de ce descripteur sur KE avait été mis en évidence par les modèles de prédiction (Tableau 23), contrairement à l'effet sur BONM. La propriété BONM est légèrement plus importante que le descripteur *Tserr/ferm* a des valeurs inférieures à un seuil (~-60ms). Ce descripteur n'est par ailleurs pas discriminant sur HAUTEUR ($F(8,64)=1.82$, $p>0.05$) et INTENSE ($F(8,64)=1.25$, $p>0.05$).

Tclics1/2 Tclics2/3

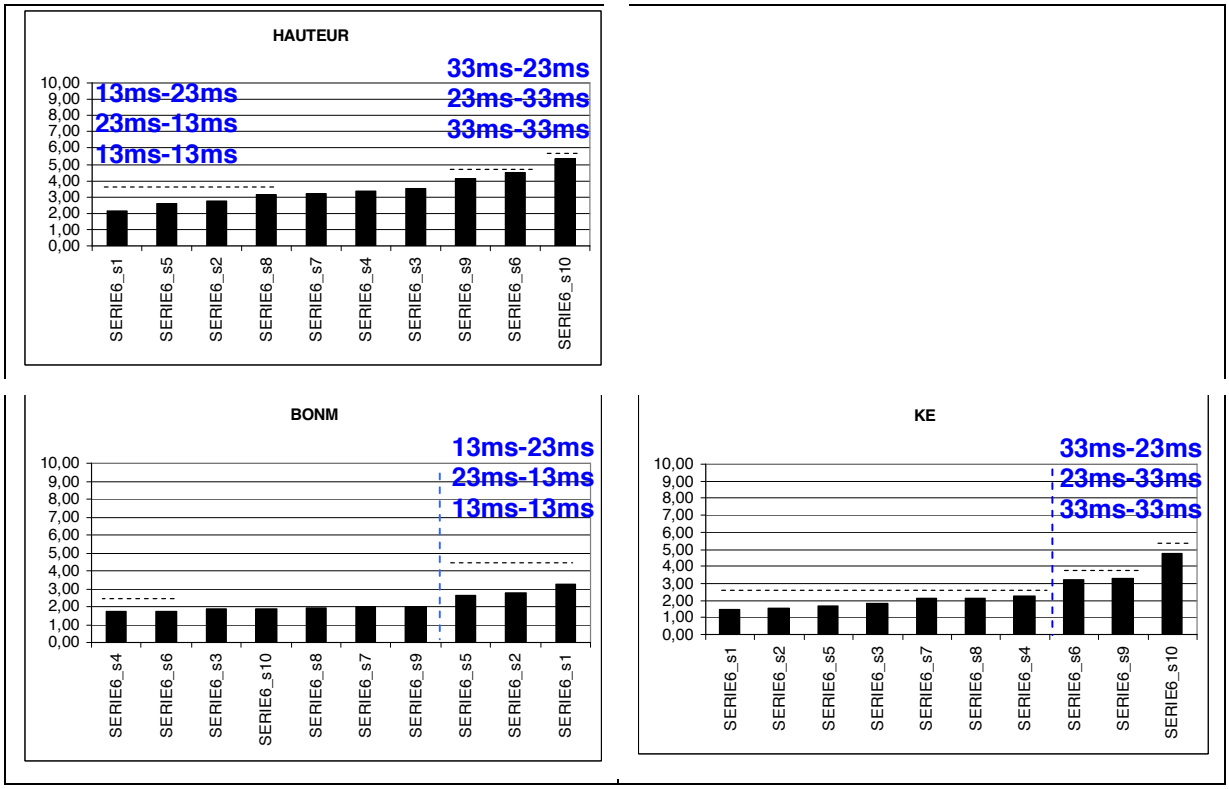


Figure 107 Influence des descripteurs Tclic1/2 et Tclic2/3 *sur les propriétés analytiques.*
La durée entre les impacts de la partie "serrure" est positivement lié aux propriétés KE et HAUTEUR, et négativement à la propriété BONM.

Les effets sur KE et HAUTEUR sont mis en évidence par les précédents modèles de prédiction (Tableau 23). On observe en plus un léger effet sur BONM. Enfin, aucune influence n'est observée sur INTENSE ; les sons ne sont pas discriminés ($F(9,81)=1.29$, $p>0.05$).

Conclusion

Nous avons observé les effets principaux de descripteurs acoustiques à partir d'un son particulier, le son '' central'' pour lequel tous les descripteurs sont ajustés aux valeurs moyennes obtenues sur les sons réels. Nous retrouvons les effets positifs ou négatifs des descripteurs acoustiques sur les propriétés analytiques, mis en évidence dans les modèles de prédiction établis dans la section précédente (3.2.3). De plus, nous mettons en évidence des seuils au-delà desquels les effets sont effectifs, et en deçà desquels les effets ne sont plus observés (ou inversement). Ces seuils pourraient dépendre d'effets psychoacoustiques de masquage temps-fréquence dans nos sons complexes où plusieurs impacts interagissent. Mais chaque modification proposée est entendue, les sons associés sont parfois même évalués différemment sur d'autres propriétés. Nous remarquons ci-dessous que les seuils semblent associés à l'écoute catégorielle des sources ''serrure'' et ''fermeture'', fortement liée aux propriétés analytiques KE et BONM.

Les niveaux des parties ''serrure'' (*Nclic*) et ''fermeture'' (*Nferm*) participent à l'équilibrage serrure/fermeture :

- à partir d'un certain seuil, le niveau de la partie ''serrure'' influence la propriété KE tandis que la propriété BONM est absente, les sons sont de type ''serrure'' ; en dessous de ce seuil, la propriété KE est absente, les sons sont alors de type ''fermeture''.
- à partir d'un certain seuil, le niveau de la partie ''fermeture'' influence la propriété BONM, tandis que la propriété KE est absente, les sons sont de type ''fermeture'' ; en dessous de ce seuil, la propriété BONM est absente, les sons sont alors de type ''serrure''.

Les niveaux des impacts de la partie ''serrure'' (*N1, N2, N3*) participent également au ressenti de présence de ''serrure''. Au-delà de certains seuils, ils influencent positivement la propriété KE et sont associés à la ''serrure''. Nous remarquons que ce seuil est plus bas pour le dernier impact de la partie ''serrure'', et plus élevé pour le premier. Ce dernier peut également être associé à la partie ''fermeture'' quand il est élevé (BONM +). Mais pour un niveau encore supérieur, il est entendu comme un impact métallique associé à la ''serrure'' (BONM -). Quant au dernier impact de la partie ''serrure'', il joue un rôle prépondérant. Il est le plus influent sur la propriété HAUTEUR : en plus d'être plus facilement émergent que les autres impacts ''serrure'', son contenu fréquentiel (*Bmax3*) peut aussi colorer la partie ''fermeture''.

La partie ''fermeture'' est caractérisée par le paramètre d'amortissement (*A*) qui influence la propriété BONM au-delà d'un certain seuil, et diminue la hauteur en deçà d'un seuil moins élevé. En revanche, la pente de répartition spectrale (*Pente*) est peu influente.

Enfin les durées inter impacts participent également à l'équilibre serrure/fermeture (*Tclic1/2, Tclic2/3, Tserr/ferm*) : quand les impacts ''serrure'' sont très espacés, les sons sont mieux évalués sur la propriété KE, ils sont perçus comme plus ''serrure''. Inversement, quand ils sont très rapprochés, les sons sont modifiés sur la propriété BONM, ils sons perçus comme plus ''fermeture''. La durée séparant les impacts ''serrure'' de l'impact ''fermeture'' peut également contribuer à faire émerger la partie ''serrure''. Quand elle est très courte, on ne perçoit qu'un seul choc, le bruit est alors moins ''serrure''.

Nous observons des seuils qui délimitent les zones d'influence des descripteurs acoustiques. Mais les effets de seuil observés sont propres au son particulier étudié. Nous souhaitons préciser ces effets en considérant l'environnement acoustique. Nous proposons de tenir compte des interactions entre descripteurs acoustiques et d'organiser les descripteurs acoustiques en fonction de leurs zones d'influence sur les propriétés perceptives.

3.4 Organisation des critères acoustiques

Nous cherchons à préciser l'influence des descripteurs acoustiques sur les propriétés perceptives en tenant compte des effets de seuil et des interactions locales. On évalue alors les propriétés perceptives d'un ensemble de sons synthétisés par modifications de paramètres acoustiques choisies pour répartir ''le mieux possible'' les sons dans le domaine acoustique. Le plan D-otpimal qui se concentre sur les bords du domaine acoustique n'est pas adapté cette problématique. Pour répartir au mieux les points du plan d'expérience tout en réduisant le nombre de combinaisons, il faut minimiser la distance maximale d'un point quelconque du domaine au point le plus proche du plan d'expérience, et maximiser la distance minimale entre 2 points du plan d'expérience. Le plan d'expérience de type hypercube latin propose une telle solution (Dagnelie, 2003).
Ce type de plan propose plus de sons que le plan D-optimal, pour le même nombre de paramètres. Pour obtenir un nombre de sons raisonnables pour l'expérimentation, la présente étude est restreinte à 7 descripteurs acoustiques. Nous choisissons de fixer les durées inter impacts (*Tclic1/2*, *Tclic2/3* et *Tserr/ferm*).

3.4.1 Plan d'expérience

Bornes de l'espace étudié
Les 7 paramètres acoustiques choisis sont bornés par les mêmes valeurs que celles choisie pour le plan Dopt (**3.2.1**). Les bornes sont rappelées Tableau 25.

	N1 (dB)	N2 (dB)	N3 (dB)	Bmax3 (ERB)	Nferm (dB)	Pente (sB/ERB)	A (s-1)
Min *réel*	51,7	53,6	55,6	1	62,7	-3,3	7,6
Max *réel*	73,6	73	73	23	82,9	0	40,1
Min *LHC*	51,7	53,6	55,6	**11**	62,7	**-2,25**	7,6
Max *LHC*	73,6	73	73	23	82,9	**-0,56**	**24**

Tableau 25 Bornes de l'espace réel et borne de l'espace du plan d'expérience.
Les bornes restreintes sont en gras.

Plan d'expérience
82 combinaisons des paramètres acoustiques sont réparties selon un plan LHC. Les paramètres sont répartis sur 47 modalités. Les combinaisons sont réparties dans l'espace de synthèse, au contraire des combinaisons du plan Dopt qui couvraient principalement les bords de l'espace (**3.2.1**). 82 sons de synthèse sont ainsi crées (plan_LHC_7P_s). Les valeurs des paramètres acoustiques de 82 sons de synthèse sont rassemblées en annexe *PARAMETRES_ACOUSTIQUES*. Nous présentons en exemple les valeurs des paramètres N1 et N2 (Figure 108).

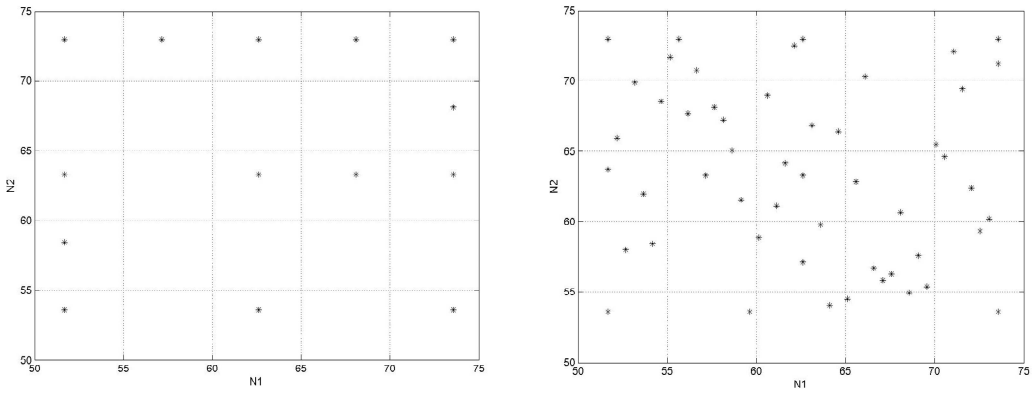


Figure 108 Projection des 82 sons de synthèse du plan LHC (à droite) sur 2 paramètres acoustiques (N1 et N2). Comparaison avec la projection des 67 sons d'apprentissage du plan Dopt (à gauche).
Le plan LHC permet de paver le domaine expérimental, tandis que le plan Dopt se concentre sur les bords du domaine expérimental.

Les 82 sons de synthèse construits sur le plan d'expérience, pour la plupart au sein du domaine expérimental et non sur ces bords, sont presque tous réalistes. Ils peuvent être évalués non seulement sur les propriétés analytiques par le panel sensoriel, mais aussi sur les propriétés naturelles et les évocations par des sujets naïfs.

3.4.2 Evaluation des propriétés perceptives

Les propriétés perceptives des sons de synthèse sont évaluées par une méthode identique à celle utilisée pour les sons réels (cf chapitre V). Les propriétés analytiques sont relevées par analyse sensorielle ; les propriétés naturelles et évocations par évaluation directe avec des sujets naïfs.

Stimuli

Le corpus d'étude comprend les 82 sons de synthèse (plan_LHC_7P_s). Les sons sont répartis en deux groupes d'étude pour l'expérimentation avec les sujets naïfs. Ces deux groupes sont évalués par 2 groupes de sujets différents pour limiter la durée d'expérimentation. 5 sons très différents (s1, s5, s41, s61, s76) sont communs aux deux groupes de sons. Ils servent à vérifier que les évaluations des deux groupes de sujets sont cumulables. Le groupe 1 contient les sons s1 à s41, et les sons s61 et s76 ; le groupe 2 contient les sons s42 à s82, et les sons s1, s5 et s41.

Propriétés analytiques

Le panel sensoriel évalue les 82 sons de synthèse sur les propriétés KE, BONM, INTENSE, et HAUTEUR avec deux répétitions, par rapport à des références externes choisis parmi les sons de resynthèse étudiés dans la partie précédente (3.2) :

- les sons réels minima et maxima pour les propriétés INTENSE (SYNTHESE_s14 - SYNTHESE_s19) et HAUTEUR (SYNTHESE_s3 - SYNTHESE_s26)
- les maxima pour les propriétés BONM (SYNTHESE_s23) et KE (SYNTHESE_s1). Ces dernières propriétés n'ont pas besoin de référence minimale, puisqu'il s'agit alors de l'absence de ces propriétés.

Les performances du panel en discriminabilité, consensualité et répétabilité sont vérifiées sauf pour la propriété KE qui présente à nouveau un problème de consensualité *(cf annexe PANEL_SENSORIEL)*.

Cette propriété est la plus difficile à évaluer. Vu la complexité de l'espace étudié, ces performances restent satisfaisantes.

Propriétés naturelles et évocations

Deux expérimentations sont mises en place pour évaluer l'ensemble des évocations et propriétés naturelles. Ces deux expérimentations sont reproduites avec 2 groupes de sujets homogènes. Chaque groupe de sujets évalue les corpus de 43 et 44 sons.

Expérience 1 : Qualité

EXPERIENCE 4 d / EXPERIENCE 5 c

Sujets

Deux groupes de 60 sujets sont recrutés dont 60% hommes et 40% femmes. 25% ont moins de 35 ans, 50% ont entre 35 et 50 ans, 25% ont plus de 50 ans. Ils possèdent tous des véhicules achetés dans les 4 dernières années. La moitié possède un véhicule du groupe PSA Peugeot Citroën et l'autre moitié un véhicule des autres marques. La moitié possède un véhicule de segment B et l'autre un véhicule segment M-H. Les sujets sont indemnisés pour leur participation.

Protocole

Les 60 sujets, après avoir observé 3 exemples représentatifs des stimuli, évaluent la qualité du véhicule que renvoient les bruits de fermeture de porte sur une échelle continue allant de « très mauvaise qualité » à « très bonne qualité ».

Les bruits sont présentés dans un ordre aléatoire de type carré latin.

L'interface est générée sous Easy-I, logiciel développé en interne.

Expérience 2 : Solidité, Poids de la porte, Taille du véhicule, Bien fermée

EXPERIENCE 4 e / EXPERIENCE 5 d

Sujets

Idem *EXPERIENCE 4d / EXPERIENCE 5a*

Protocole

Les 60 sujets, après avoir écouté 3 exemples représentatifs des stimuli, évaluent pour chaque bruit :

- le poids de la porte, sur une échelle continue allant de « très légère » à « très lourde »
- l'énergie de fermeture sur une échelle continue allant de « doucement » à «fortement »
- la réussite de la fermeture, sur une échelle catégorielle à 4 modalités, (non étudié dans la suite)

Les bruits sont présentés dans un ordre aléatoire de type carré latin.

L'interface est générée sous Easy-I, logiciel développé en interne (Figure 109).

Figure 109 Interface de test pour l'évaluation de propriétés naturelles : poids de la porte, énergie de fermeture, porte bien fermée.

Résultats (cf annexe PROPRIETES_NATURELLES_EVOCATIONS)

Aucun sujet n'a été surpris par les sons de synthèse. De plus, les sons bien répartis sur les échelles d'évaluation et les sujets sont consensuels pour les propriétés évaluées (Classification Ascendante Hiérarchique). La comparaison des évaluations des 5 sons communs aux 2 groupes de sujets confirme la possibilité de cumuler les évaluations de l'ensemble des sons : l'écart des évaluations obtenues est inférieur à 0.5 point sur 10.

Conclusion

Les 82 sons de synthèse répartis dans un espace à 7 paramètres acoustiques sont ainsi évalués sur les propriétés analytiques INTENSE, HAUTEUR, BONM, KE, sur les propriétés naturelles ''poids de porte'' et ''énergie de fermeture'', ainsi que sur l'évocation de ''qualité''. La capacité des sujets naïfs à évaluer les propriétés naturelles et évocations nous conforte dans notre hypothèse de réalisme des sons de synthèse : s'ils sont capables d'évaluer le poids de la porte, et d'affirmer que la porte est bien fermée, c'est qu'ils perçoivent des bruits de fermeture de porte en général réalistes.

3.4.3 Arbres de paramètres acoustiques par propriété perceptive

Nous cherchons à présent les relations entre les paramètres acoustiques et les propriétés perceptives en précisant les dépendances entre paramètres acoustiques. Le partitionnement réalisé par l'arbre de régression paraît adapté aux modélisations cherchées puisqu'il hiérarchise les critères en fonction de leurs valeurs. L'étude des bruits de fermeture de porte par arbres de régression a été initiée lors d'une collaboration avec le laboratoire Heudiasyc, de l'UTC Compiègne (Masson, 2005). La méthode de l'arbre de régression est succinctement présentée avant de présenter les modélisations obtenues pour chaque propriété perceptive.

Principe de la méthode

L'arbre de régressions est une méthode non linéaire, basée sur le principe de partitionnement binaire récursif (Breiman, 1998). Cette méthode cherche à déterminer par segmentation récursive dans l'espace des paramètres acoustiques des régions contenant des sons dont la valeur à prédire (propriété perceptive) est homogène. La valeur attribuée à chaque région est la moyenne des valeurs associées aux sons regroupés, et une évaluation de l'erreur associée est donnée par la variance. On choisit donc à chaque étape un paramètre acoustique et un seuil pour diviser les sons en deux

groupes de manière à ce que la somme des variances de la valeur à prédire (propriété perceptive) dans chacun des deux groupes obtenus soit la plus faible possible. Ce processus de partitionnement est appliqué à chaque nouvelle branche. L'algorithme s'arrête quand la taille des groupes est inférieure à un seuil fixé (à 10). A chaque étape de spécialisation de l'arbre, la variance intra-groupe diminue. L'arbre complet mène à un sur-ajustement : sa performance prédictive sur les sons d'apprentissage est excellente, mais son pouvoir de généralisation très faible. Il convient alors de ne conserver que les sous-arbres contenant un nombre restreint de nœud. Le choix du degré de spécialisation de l'arbre peut être fait avec des techniques de validation croisée.

L'arbre présente l'avantage de sélectionner les paramètres les plus informatifs, tout en tenant compte des interactions locales. Il permet en plus une interprétation aisée des liens entre paramètres acoustiques et propriété perceptive (Exemple Figure 110).

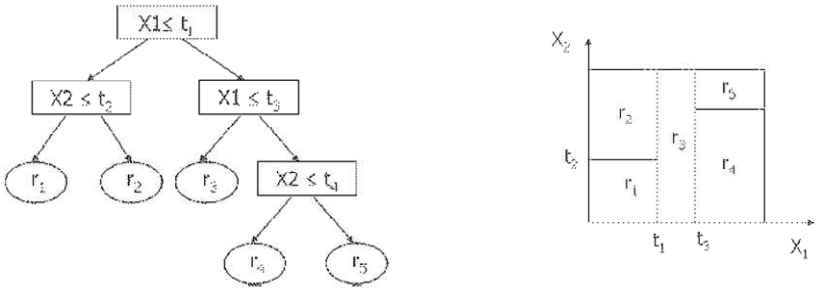


Figure 110 Exemple d'arbre de régression.
La propriété r est caractérisé par les paramètres X1 et X2 : r=r1 si X1<t1, et si X2<t2 ; r=r2 si X1<t1 et X2>t2 ; r=r3 si X1>t1 et X1<t3 ; r=r4 si X1>t3 et X2<t4, etc. D'après Masson (2005).

Arbres complets par propriété perceptive

Chaque propriété perceptive est caractérisée à partir de combinaisons linéaires des 7 descripteurs acoustiques étudiés. Nous présentons les arbres complets obtenus par propriété perceptive (Figure 111 à Figure 116). Un exemple sonore (numéro son) est associé à chaque nœud final. L'arbre complet est construit pas à pas, à partir du nœud supérieur jusqu'aux nœuds inférieurs. A chaque étape, une nouvelle subdivision des sons d'un nœud en 2 sous-groupes (2 nœuds) de sons est proposée : elle correspond au meilleur partitionnement possible pour réduire la variance des groupes formés par le sous-arbre courant. Les critères supérieurs sont les plus efficaces pour répartir les sons en groupes évalués de façon similaire. Ils sont donc les meilleurs candidats pour caractériser les propriétés perceptives. En revanche, les critères inférieurs sont identifiés par sur-ajustement des paramètres acoustiques aux évaluations perceptives, ils ne sont pas nécessairement pertinents. Pour chaque arbre, nous commentons une version élaguée (les 3 à 5 premiers nœuds). Le niveau d'élagage est arbitraire, il n'est pas optimisé par des procédures statistiques d'élagage, notre but n'étant pas d'obtenir un modèle (qui aurait nécessité un choix statistique par validation croisée) mais d'interpréter l'organisation des critères acoustiques et leur lien avec les propriétés perceptives.

KE

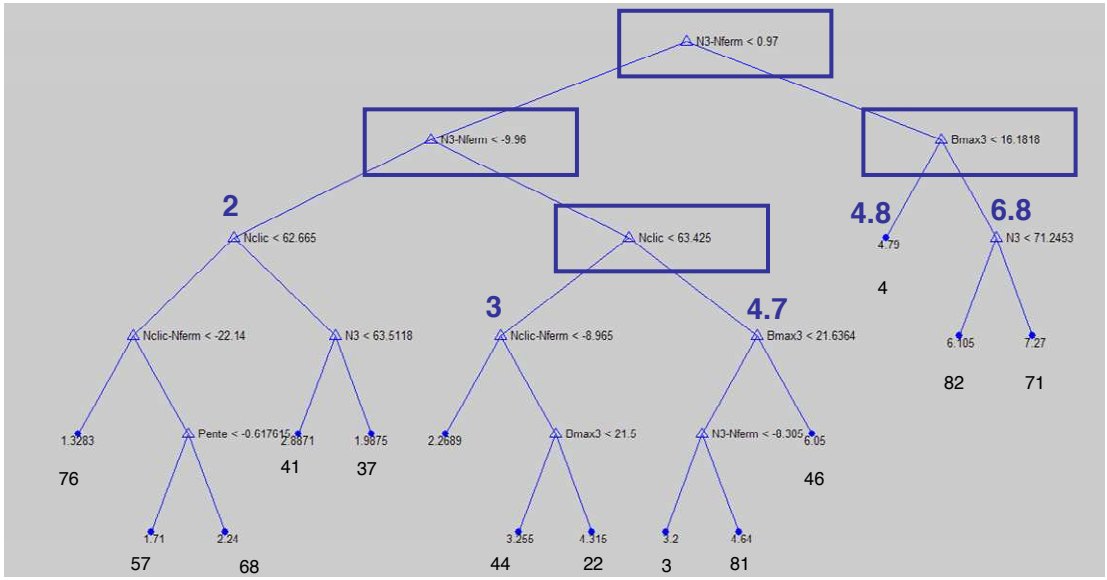


Figure 111 Arbre de régression pour la propriété KE.
Le niveau du dernier impact ''serrure'' par rapport à la partie ''fermeture'' (N3-NFerm) *sépare les sons de synthèse en 3 groupes :*

- *les sons à (*N3-Nferm*) faible présentent une absence de KE (2),*
- *les sons à (*N3-Nferm*) moyen sont moyennement évalués en KE (3) (4.7),*
- *les sons à (*N3-Nferm*) élevé sont bien évalués en KE (4.8) (6.8).*

Les deux derniers groupes sont caractérisés par 2 autres descripteurs : le niveau de la partie ''serrure'' (Nclic*) pour les sons à (*N3-Nferm*) moyen, et le contenu fréquentiel du dernier impact ''serrure''* (Bmax3*) pour les sons à fort (*N3-Nferm*).*

Le modèle de prédiction de la propriété KE établi en 3.2.3 (Tableau 23) identifie, outre les paramètres de durées inter-impacts non étudiés ici, les niveaux des partie ''serrure'' et ''fermeture'', le niveau du dernier impact *N3*, ainsi que le contenu fréquentiel du dernier impact ''serrure'' (*Bmax3*). L'influence de ces paramètres sur la propriété KE est également identifiée par le sous-arbre proposé. On observe à nouveau le rôle particulier du dernier impact ''serrure''. De plus leurs interactions locales sont précisées : le contenu fréquentiel du dernier impact ''serrure'' n'est influent que si le niveau de cet impact est suffisant.

BONM

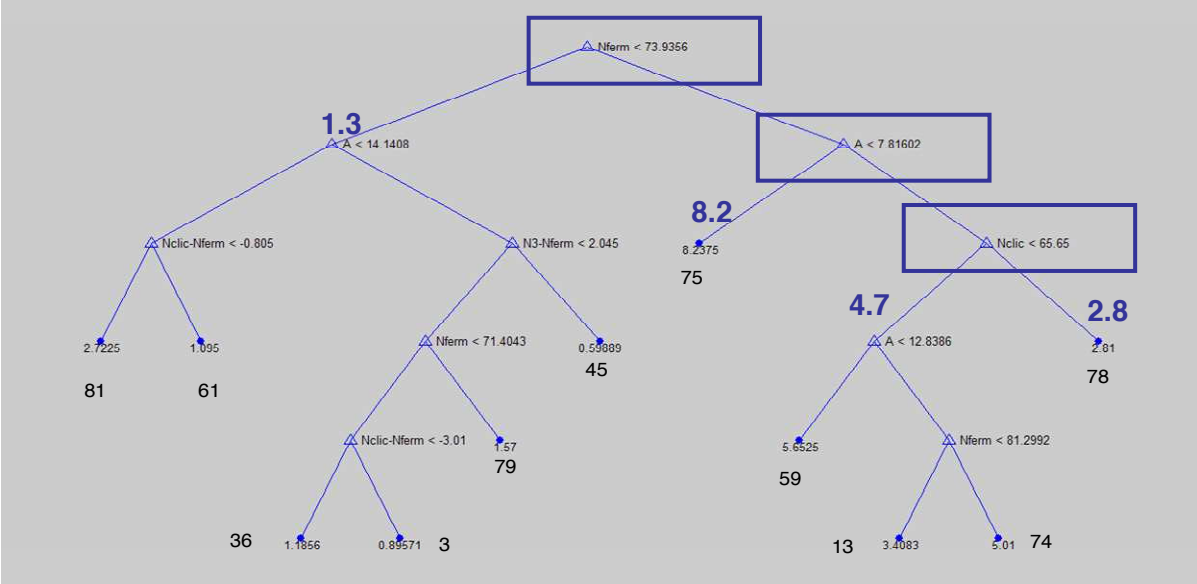


Figure 112 Arbre de régression pour la propriété BONM.
*Le niveau de la partie ''fermeture'' (*Nferm*) sépare les sons qui présentent une absence de BONM (1.3) des sons qui contiennent la propriété BONM.*
Les sons à Nferm *élevé, qui contiennent la propriété BONM, sont très fortement évalués en BONM quand le paramètre d'amortissement de la partie ''fermeture'' est très faible (A<7.8, or A>7.6). Le niveau de la partie ''serrure'' caractérise les autres sons.*

Nous relevons l'influence des paramètres de niveau des parties ''serrure'' et ''fermeture'', et l'amortissement de la partie ''fermeture'' sur la propriété BONM. Ces résultats sont cohérents avec les modèles de prédiction établis en 3.2.3 (Tableau 23) même s'il manque le contenu fréquentiel du dernier impact ''serrure'' (Bmax3) pour que la correspondance entre les 2 études soit parfaitement respectée. Nous observons également l'interdépendance de certains descripteurs : le niveau de la partie ''serrure'' équilibre les sons sur la propriété BONM si le niveau de la partie ''fermeture'' n'est pas trop faible (les sons ne contiennent alors pas de BONM), et si l'amortissement n'est pas très faible (les sons sont alors toujours très fortement évalués en BONM).

HAUTEUR

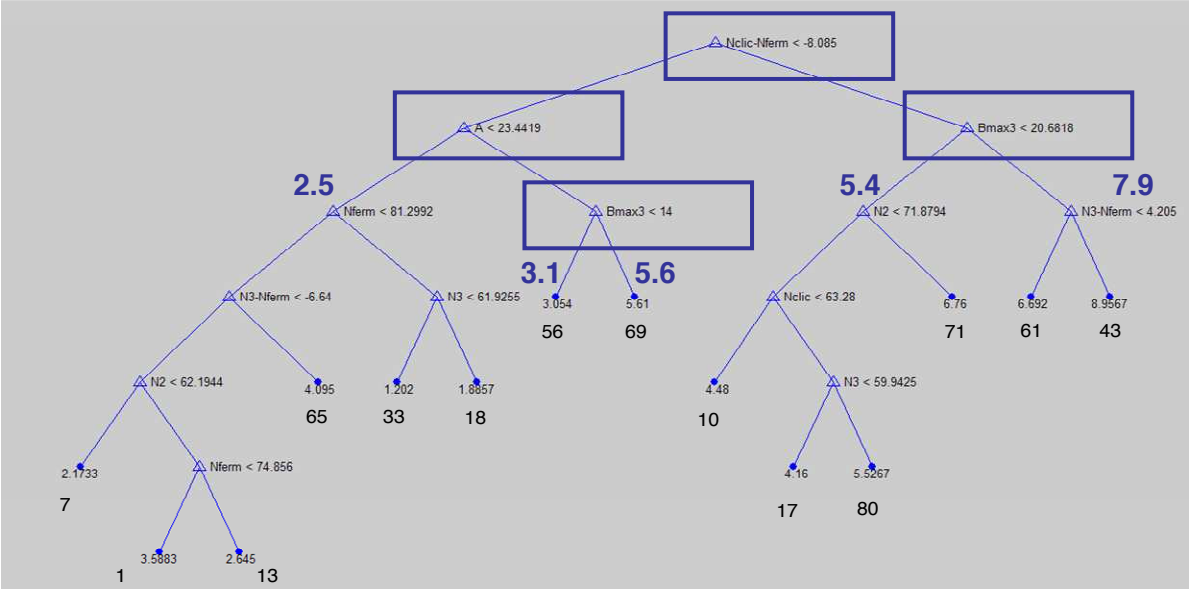


Figure 113 Arbre de régression pour la propriété HAUTEUR.
*Le niveau de la partie ''serrure'' par rapport à la partie ''fermeture'' (*Nclic-Nferm*) sépare les sons en 2 groupes en fonction de leur HAUTEUR :*

- *Les sons à (*Nclic-Nferm*) faible sont moins bien notés sur la HAUTEUR. De plus ils sont encore caractérisés par le paramètre d'amortissement de la partie ''fermeture'' (*A*) : les sons pour lesquels l'amortissement de la partie ''fermeture''* A *est extrême (A>23.4, or A<24) peuvent être relativement aigus si le contenu fréquentiel du dernier impact ''serrure'' est élevé.*
- *Les sons à (*Nclic-Nferm*) élevé, mieux notés sur la HAUTEUR, sont caractérises par le contenu fréquentiel du dernier impact ''serrure''.*

Le modèle de prédiction de la propriété HAUTEUR établi en 3.2.3 (Tableau 23) sélectionne, outre les paramètres de durées inter-impacts non étudiés ici, les niveaux des partie ''serrure'' (*Nclic*) et ''fermeture'' (*Nferm*), le contenu fréquentiel du dernier impact ''serrure'' (*Bmax3*) et l'amortissement de la partie ''fermeture'' (*A*). Ces paramètres sont à nouveau identifiés par le sous-arbre établi. Leur interdépendance est ici relevée : le contenu fréquentiel du dernier impact ''serrure'' caractérise les sons plutôt ''serrure'', dont le niveau relatif de la partie ''serrure'' par rapport à la partie ''fermeture'' est élevé. On observe un effet propre au bord du domaine acoustique étudié : un amortissement de la partie ''fermeture'' (*A**) très élevé associé à un contenu haute fréquence du dernier impact ''serrure'' (*Bmax3*) augmente l'évaluation en HAUTEUR.
Nous remarquons que plusieurs combinaisons de paramètres mènent à la même évaluation de la propriété HAUTEUR (5.6) et (5.4).

INTENSE

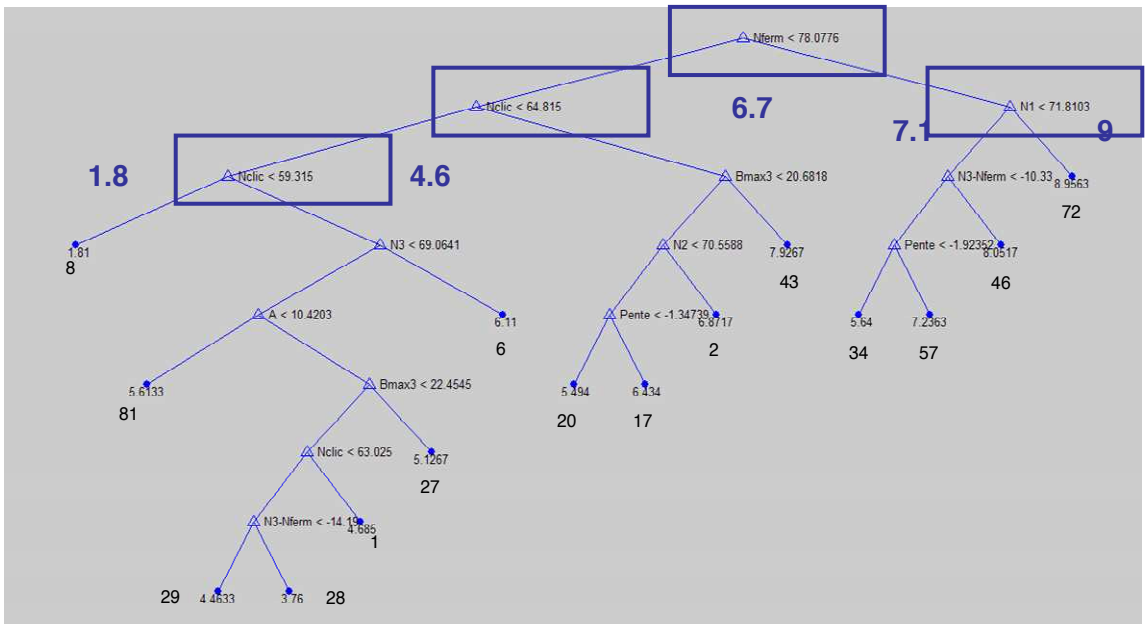


Figure 114 Arbre de régression pour la propriété INTENSE.
*Les niveaux des parties ''fermeture'' (*Nferm*) et ''serrure'' (*Nclic*) caractérisent la propriété INTENSE.*
De plus, pour un fort niveau de ''fermeture'' associé à un niveau très élevé niveau du premier impact de la partie ''serrure'' (N1>71 or N1<73.6), les sons sont extrêmement INTENSE (9).

Tout comme le modèle de prédiction établi en 3.2.3 (Tableau 23), les paramètres des niveaux des parties ''serrure'' et ''fermeture'' sont relevés pour caractériser la propriété INTENSE. De plus, on observe un effet au bord du domaine acoustique étudié : un niveau extrême du premier impact ''serrure'' influence l'intensité.

POIDS DE PORTE

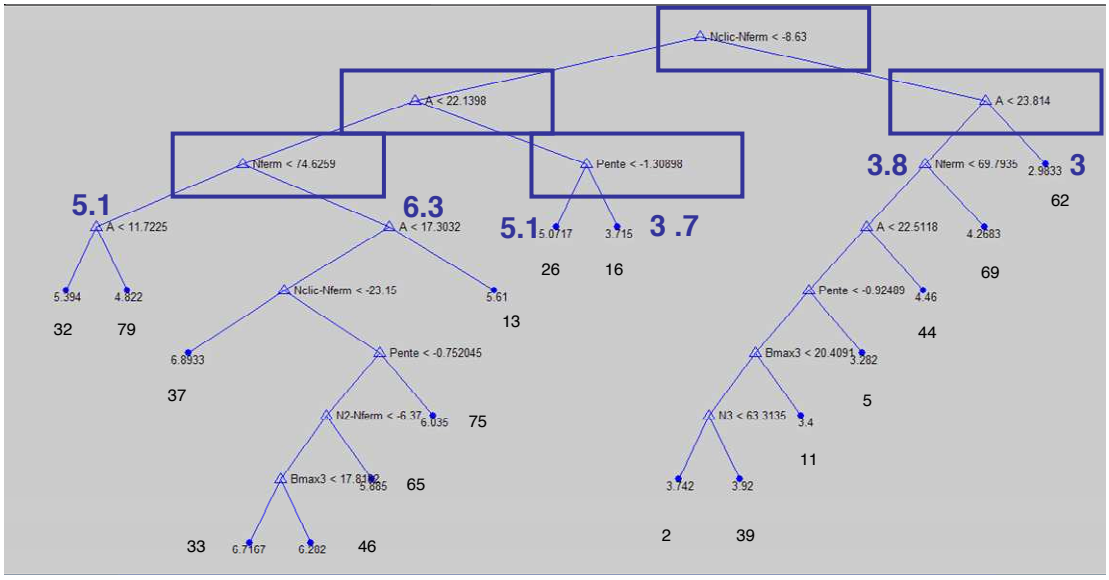


Figure 115 Arbre de régression pour la propriété ‘’poids de porte’’.

*Le niveau de la partie ‘’serrure’’ par rapport à la partie ‘’fermeture’’ (*Nclic-Nferm*) sépare les sons en 2 groupes en fonction de la propriété ‘’poids de porte’’ :*

- *Les sons à (*Nclic-Nferm*) faible sont bien notés sur ‘’poids de porte’’. Ils sont caractérisés par le niveau de la partie ‘’fermeture’’ (*Nferm*). De plus, les sons pour lesquels l’amortissement de la partie ‘’fermeture’’* A *est extrême (A>22.1, or A<24) peuvent être relativement moins bien noté en ‘’poids de porte’’ si la pente de répartition spectrale de l’impact ‘’fermeture’’ est élevé.*
- *Les sons à (*Nclic-Nferm*) élevés sont moins bien notés en ‘’poids de porte’’. Si l’amortissement de la partie ‘’fermeture’’* A *est extrême (A>23.8, or A<24), ils le sont encore moins.*

De même que pour la HAUTEUR, la propriété ‘’poids de porte’’ est principalement caractérisée par le niveau relatif de la partie ‘’serrure’’ par rapport à la partie ‘’fermeture’’. De plus, l’amortissement trop rapide de la partie ‘’fermeture’’ peut en limiter l’appréciation.

ENERGIE DE FERMETURE

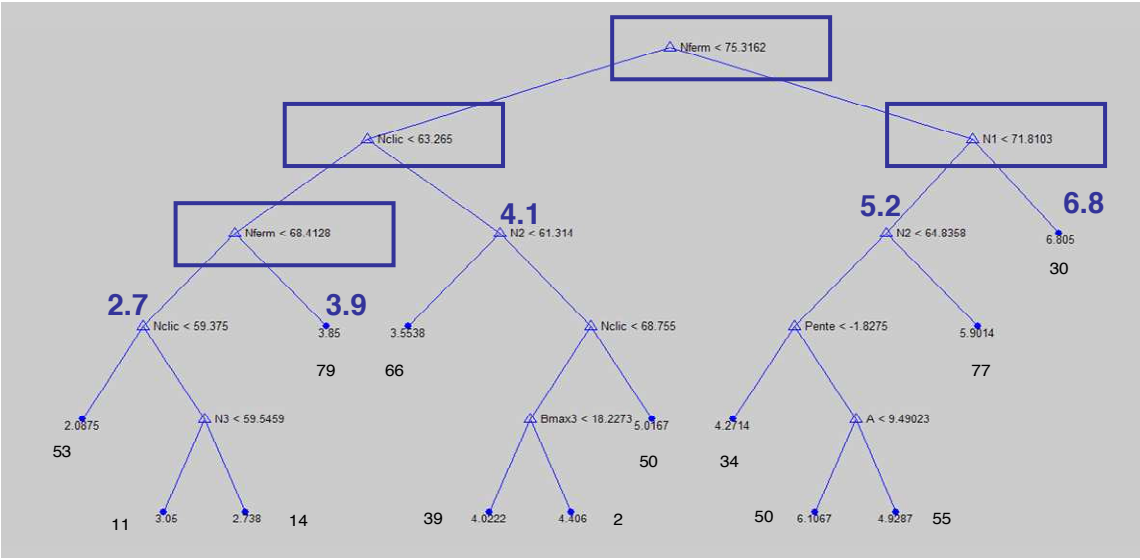


Figure 116 Arbre de régression pour la propriété ‘’énergie de fermeture’’.

*Les niveaux des parties ‘’fermeture’’ (*Nferm*) et ‘’serrure’’ (*Nclic*) caractérisent la propriété ‘’énergie de fermeture’’. De plus, pour un fort niveau de ‘’fermeture’’ associé à un niveau très élevé du premier impact de la partie ‘’serrure’’ (N1>71,8 or N1<73.6), les sons sont extrêmement INTENSE (6.8).*

Ces observations sont similaires à celles de la propriété INTENSE.

QUALITE
(Confidentiel)

Conclusion
Nous observons les relations entre 7 descripteurs acoustiques et les propriétés perceptives. Les descripteurs sélectionnés pour chaque propriété analytique sont en accord avec les modèles de prédiction (Tableau 23). Ceux sélectionnés pour les propriétés naturelles sont cohérents avec les relations connues entre propriétés naturelles et propriétés analytiques : la caractérisation de la propriété ''poids de porte'' est proche de celle obtenue pour la propriété HAUTEUR ; la propriété ''énergie de fermeture'' est modélisée de la même façon que la propriété INTENSE.

De plus les descripteurs acoustiques sont organisés sous forme d'arbres, leur influence dépendant des valeurs d'autres descripteurs. Les principaux résultats sont résumés Figure 117. L'organisation des descripteurs permet d'identifier les descripteurs acoustiques les plus pertinents pour chaque son. Par exemple, la qualité peut être dégradée pour différentes causes : le niveau du premier impact ''serrure'' est trop élevé, ou bien celui du dernier impact, ou encore celui de la partie ''fermeture''. De même, la répartition spectrale du dernier impact ''serrure'' n'est influente sur la propriété KE que si le niveau du dernier impact ''serrure'' est suffisamment élevé. De plus, certaines strates des arbres organisent des phénomènes propres aux limites de l'espace de synthèse, les effets de bords. Par exemple, le niveau du premier impact ''serrure'' influe sur la propriété INTENSE quand il est presque à son maximum. La caractérisation réalisée permet ainsi de préciser les contours de l'espace de synthèse et de généraliser les effets de seuils observés à partir du son ''central''.

L'organisation des descripteurs acoustiques semble en partie expliquée par la présence des différents impacts dans le son global. Elle dépend de l'équilibre des sources en jeu dans le bruit global. Par exemple, le contenu fréquentiel du dernier impact de la partie ''serrure'' n'est influent que si son niveau est suffisant, auquel cas le son est de type ''serrure''. De même l'amortissement de la partie ''fermeture'' n'est influent sur la propriété BONM uniquement quand le niveau de la partie ''fermeture'' est suffisamment élevé.

Les résultats obtenus sont toutefois dépendants du plan d'expérience, de l'élagage arbitraire des arbres, et des descripteurs choisis. Sans prétendre modéliser les propriétés perceptives, ils permettent de mieux comprendre les relations complexes entre les combinaisons de paramètres acoustiques et les propriétés perceptives.

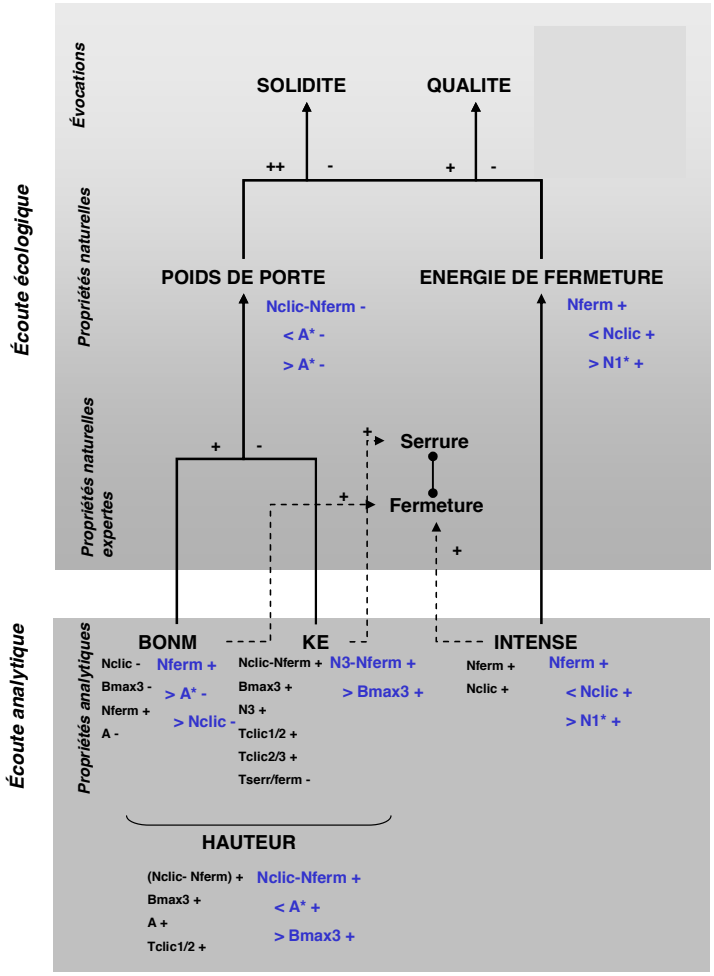


Figure 117 Propriétés perceptives et descripteurs acoustiques hiérarchisés obtenus par arbre de régression – comparaison avec les descripteurs acoustiques obtenus par les modèles de prédiction.

*- La propriété KE, associée à la présence "serrure", est principalement caractérisée par le niveau du dernier impact "serrure" par rapport à la partie "fermeture" (*N3-Nferm*). Le contenu fréquentiel de cet impact (*Bmax3*) est également influent quand son niveau est très élevé. Le niveau des autres impacts de la partie "serrure", par l'intermédiaire du niveau global de la partie "serrure", caractérise également la propriété KE des sons dont le niveau du dernier impact est moyen. Le dernier impact de la partie "serrure" reste prépondérant pour la propriété KE.*
*- La propriété BONM, associée à la "fermeture", est absente quand l'énergie de la partie "fermeture" (*Nferm*) est faible. Dans la cas contraire, le niveau de la partie "serrure" (*Nclic*) pondère l'évaluation de la propriété BONM tant que l'amortissement de la partie "fermeture" (*A**) n'est pas extrêmement faible (les sons sont alors toujours très fortement évalués en BONM).*
*- La propriété HAUTEUR est principalement caractérisée par le rapport des niveaux "serrure" et "fermeture" (*Nserr-Nferm*). Le contenu fréquentiel du dernier impact "serrure" caractérise la HAUTEUR des sons plutôt "serrure", dont le niveau relatif de la partie "serrure" par rapport à la partie "fermeture" est élevé. De plus un amortissement de la partie "fermeture" (*A**) extrêmement élevé associé à un contenu haute fréquence du dernier impact "serrure" (*Bmax3*) augmente l'évaluation en HAUTEUR.*
*- La propriété INTENSE est caractérisée par les niveaux des parties "fermeture" (*Nferm*) et "serrure" (*Nclic*). De plus, pour un fort niveau de "fermeture" associé à un niveau extrêmement élevé niveau du premier impact de la partie "serrure" (*N1**), les sons sont extrêmement bien notés sur la propriété INTENSE*
- Les caractérisations des propriétés naturelles "poids de porte" et "énergie de fermeture" sont proches de celles obtenues pour les propriétés HAUTEUR et INTENSE.

Conclusion

A partir d'un modèle de synthèse simplifié des bruits de fermeture de porte, contrôlé par 10 paramètres (Figure 118), nous étudions les relations entre ces paramètres acoustiques et les propriétés perceptives (les propriétés analytiques KE, BONM, liée la présence de bruit serrure, INTENSE et HAUTEUR ; les propriétés naturelles ''poids de porte'' et ''énergie de fermeture'' ; l'évocation ''qualité''). Même si l'espace d'étude est éloigné de l'espace des sons réels, sa dimension restreinte permet d'y étudier précisément les effets des paramètres acoustiques sur les propriétés perceptives, à partir de sons de synthèse contrôlés.

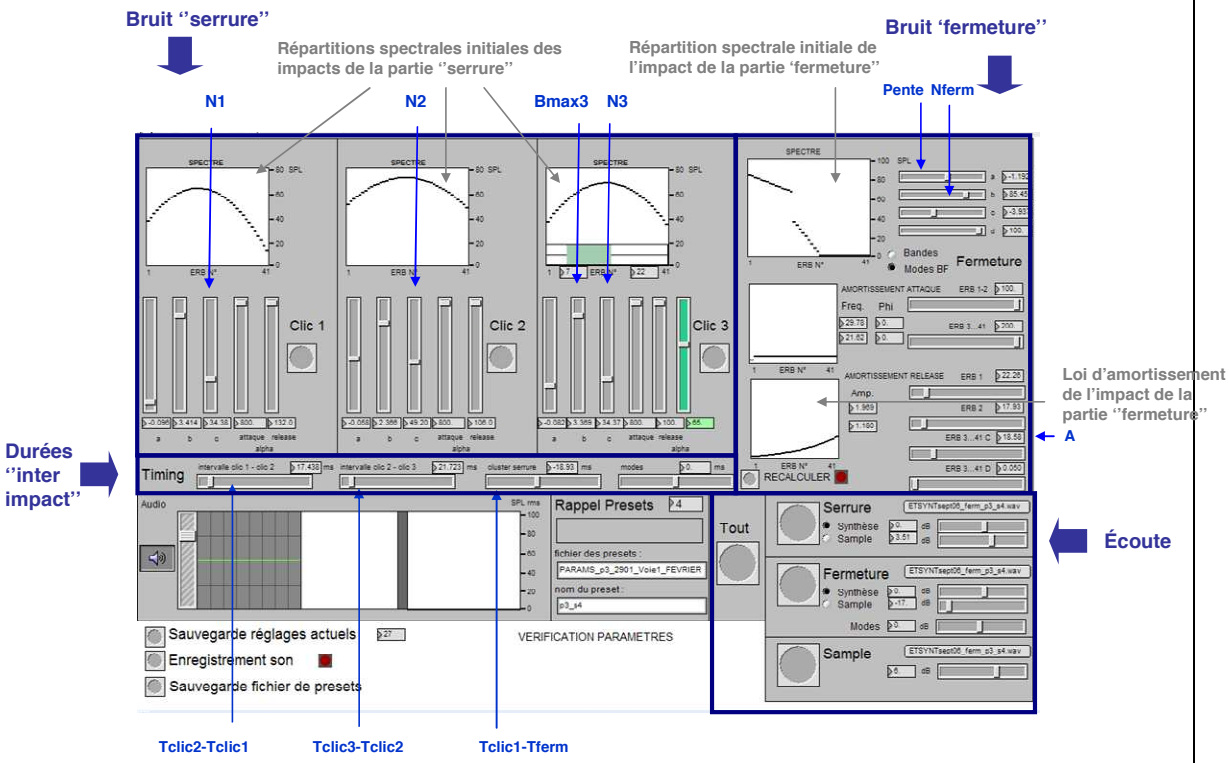


Figure 118 Interface de l'outil de synthèse temps-réel – descripteurs acoustiques principaux
*- les niveaux des impacts de la partie ''serrure'' (*N1, N2, N3*), de l'impact de la partie ''fermeture'' (*Nferm*),*
*- la répartition spectral du dernier impact de la partie ''serrure'' (*Bmax3*) et de l'impact de la partie ''fermeture'' (*Pente*),*
*- la loi d'amortissement de la partie ''fermeture'' (*A*),*
*- les durées ''inter impacts'' (*Tclic3-Tclic2, Tclic2-Tclic1, Tclic1-Tferm*)*

Nous avons obtenu différentes informations sur les relations entre propriétés perceptives et descripteurs acoustiques, à partir de sons de synthèse répartis dans l'espace de synthèse suivant différents plans d'expérience. On a d'abord cherché à prédire les propriétés analytiques. On a ensuite observé l'influence de modifications fines de chaque paramètre acoustique pour mettre en évidence les non linéarités et effets de seuils. Finalement, on a organisé les relations entre les paramètres acoustiques (hors durées inter impacts) et les propriétés perceptives sous forme d'arbres de paramètres interdépendants.

Prédiction

Les modèles établis sur des sons de synthèse sont capables d'estimer les propriétés analytiques du corpus des sons réels. La propriété INTENSE est liée aux niveaux des partie ''serrure'' (*Nclic*) et ''fermeture'' (*Nferm*). La propriété BONM est assurée par une partie ''serrure'' peu présente (le niveau de la partie ''serrure'' est faible (*Nclic*) et le contenu fréquentiel du dernier impact ''serrure'' (*Bmax3*) de basse fréquence), et par une partie ''fermeture'' présente (avec un fort niveau (*Nferm*) et un amortissement lent des basses fréquences (*A*)). La propriété KE, liée à l'émergence métallique de la partie ''serrure'', s'exprime quand le niveau de la partie ''serrure'' est élevé par rapport à celui de la ''fermeture'' (*N3-Nferm*), quand le dernier impact a un fort niveau (*N3*) et un contenu plutôt haute fréquence (*Bmax3*), et quand les durées inter impacts sont élevées (*Tclic1/2, Tclic2/3, Tserr/ferm*). La propriété HAUTEUR est liée aux critères qui caractérisent les propriétés BONM et KE.

Effets de seuil

A partir d'un son particulier, le son ''central'' pour lequel tous les descripteurs sont ajustés aux valeurs moyennes obtenues sur les sons réels, nous complétons les modèles de prédiction en mettant en évidence des seuils au-delà desquels les effets sont effectifs, et en deçà desquels les effets ne sont plus observés (ou inversement). Ces seuils semblent associés à l'écoute catégorielle des sources ''serrure'' et ''fermeture''.

Organisation des critères acoustiques

Nous étudions finalement les relations entre 7 descripteurs acoustiques et les propriétés perceptives par arbres de régression (l'espace d'étude est restreint en se passant des durées inter impacts). L'influence des descripteurs est dépendante de l'environnement acoustique du son. Les descripteurs acoustiques caractéristiques des propriétés perceptives sont organisés sous forme d'arbres qui traduisent leur influence en fonction des valeurs d'autres descripteurs, et leurs éventuels effets de seuils. L'organisation des descripteurs est principalement liée à l'équilibre des sources ''serrure''/''fermeture. Les principaux résultats sont résumés Figure 117.

Conclusion

Les descripteurs acoustiques proposés permettent de prédire de façon robuste les propriétés analytiques de notre ensemble de sons réels. De plus, afin de mieux comprendre les relations complexes entre ces descripteurs et les propriétés perceptives, les propriétés perceptives sont caractérisées par des arbres de paramètres interdépendants. L'organisation des paramètres permet d'accéder aux critères acoustiques les plus influents d'un bruit particulier en fonction de sa caractérisation acoustique.

C. VERS UNE APPROCHE GENERALE DU BRUIT D'IMPACT

L'étude des bruits de fermeture de porte a permis de proposer une méthodologie et un outil d'analyse synthèse générique pour l'étude des bruits d'impact. Nous souhaitons à présent illustrer ces résultats sur un autre bruit d'impact automobile : le bruit de toqué **(Chapitre VIII)**. Il s'agit du bruit émis lorsqu'un client tapote les éléments intérieurs de l'habitacle automobile, comme la planche de bord ou les panneaux de porte. Ces bruits sont spécifiquement écoutés lors de la découverte d'un véhicule, pour tester la qualité des matériaux de l'habitacle. Ils évoquent à l'auditeur des impressions de robustesse, de sécurité et solidité.

Chapitre VII. Etude d'un impact simple : le bruit de toqué

Nous proposons dans cette partie des résultats sur les propriétés perceptives des bruits de toqué **(1)**, ainsi que sur leur modélisation acoustique **(2)** (Figure 119). La démarche complète n'a pas pu être entièrement reprise pour cette étude. En particulier, leur étude en situation réelle n'a pas été réalisée. Sans conclure sur la perception des bruits de toqué, ces résultats nous permettent d'ouvrir la discussion sur notre approche générale du bruit d'impact. Nous souhaitons en particulier discuter la pertinence de l'analyse par écoute analytique, la généralité du modèle d'analyse-synthèse, et de la caractérisation acoustique sous forme d'arbres de critères interdépendants.

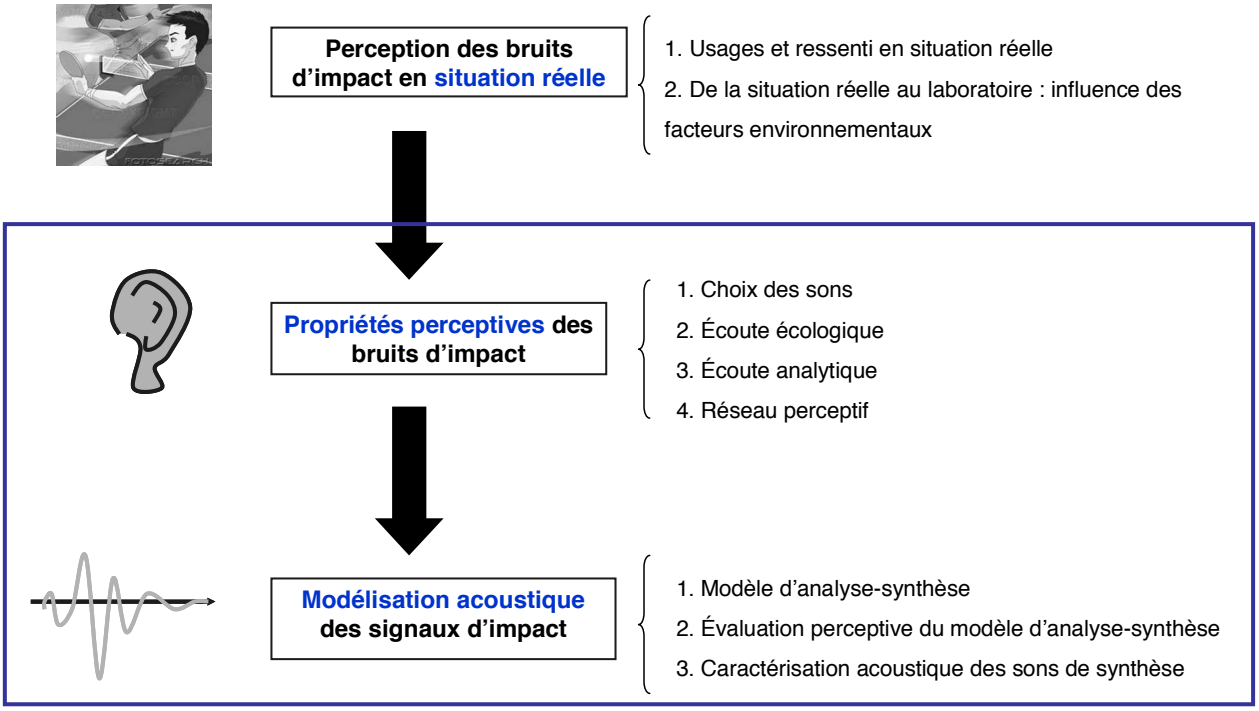


Figure 119 Démarche générale pour l'étude de la perception des bruits d'impact. Application à l'étude du bruit de toqué (encadré).

1. Propriétés perceptives du bruit de toqué

La caractérisation perceptive d'un ensemble de bruits de toqué **(section 1.1)** est réalisée à partir d'expérimentations visant à évaluer les propriétés perceptives inférées par écoutes écologique **(section 1.2)**, puis analytique **(section 1.3)**. Les relations entre les propriétés perceptives principales sont ensuite établies **(section 1.4)**.

1.1 Choix des sons

Nous disposons d'un ensemble de 31 bruits de toqué émis par impact d'un marteau en différents points de la planche de bord et du panneau de porte avant droit de 6 véhicules (Tableau 26). La Figure 120 illustre une configuration de mesure sur la planche de bord.

Figure 120 Mesure du bruit de toqué

toque_s1	Véhicule1	Planche de bord
toque_s2	Véhicule1	Planche de bord
toque_s3	Véhicule1	Planche de bord
toque_s4	Véhicule1	Panneau de porte
toque_s5	Véhicule2	Planche de bord
toque_s6	Véhicule2	Planche de bord
toque_s7	Véhicule2	Planche de bord
toque_s8	Véhicule2	Planche de bord
toque_s9	Véhicule2	Panneau de porte
toque_s10	Véhicule2	Panneau de porte (Porte Arrière)
toque_s11	Véhicule3	Planche de bord
toque_s12	Véhicule3	Planche de bord
toque_s13	Véhicule3	Panneau de porte
toque_s14	Véhicule3	Panneau de porte
toque_s15	Véhicule4	Planche de bord
toque_s16	Véhicule4	Planche de bord
toque_s17	Véhicule4	Planche de bord
toque_s18	Véhicule4	Planche de bord
toque_s19	Véhicule4	Panneau de porte
toque_s20	Véhicule5	Planche de bord
toque_s21	Véhicule5	Planche de bord
toque_s22	Véhicule5	Planche de bord
toque_s23	Véhicule5	Panneau de porte
toque_s24	Véhicule5	Panneau de porte
toque_s25	Véhicule6	Planche de bord
toque_s26	Véhicule6	Planche de bord
toque_s27	Véhicule6	Planche de bord
toque_s28	Véhicule6	Planche de bord
toque_s29	Véhicule6	Panneau de porte
toque_s30	Véhicule6	Panneau de porte
toque_s31	Véhicule6	Panneau de porte

Tableau 26 Bruits de toqué mesurés

1.2 Ecoute écologique

L'écoute écologique est une écoute des évènements du monde. Elle informe sur l'action et les sources à l'origine du bruit. Le bruit de fermeture de porte a été caractérisé par un ensemble de propriétés naturelles et évocations qui décrivent la source sonore de façon globale ou organique. Nous nous contentons pour le bruit de toqué d'évaluer la propriété principale perçue par un client dans un contexte d'achat, à savoir l'impression de qualité.

1.2.1 Evaluation de la qualité du matériau

Nous réalisons une expérimentation pour évaluer la qualité du matériau que renvoient les bruits de toqué.

EXPERIENCE 6 a

Stimuli

Le corpus d'étude comprend les 31 bruits de toqué.

Sujets

70 sujets sont recrutés dont 60% hommes et 40% femmes. 25% ont moins de 35 ans, 50% ont entre 35 et 50 ans, 25% ont plus de 50 ans. Ils possèdent tous des véhicules achetés dans les 4 dernières années. La moitié possède un véhicule du groupe PSA Peugeot Citroën et l'autre moitié un véhicule des autres marques. La moitié possède un véhicule de segment B et l'autre un véhicule segment M-H. Les sujets sont indemnisés pour leur participation.

Protocole

Les 70 sujets, après avoir écoutés 3 exemples représentatifs des stimuli, évaluent la qualité du matériau que renvoient les 31 bruits de toqué (toque_s1 à toque_s31) sur une échelle continue allant de « très mauvaise qualité » à « très bonne qualité ». Les bruits sont présentés dans un ordre aléatoire de type carré latin.

Résultats *(cf annexe PROPRIETES_NATURELLES_EVOCATIONS)*

Les évaluations moyennes des bruits sont présentées Figure 121, les stimuli sont évalués sur les échelles allant de 0 (très mauvaise qualité) à 10 (très bonne qualité). Les barres horizontales signalent les groupes de stimuli non discriminés (Duncan).

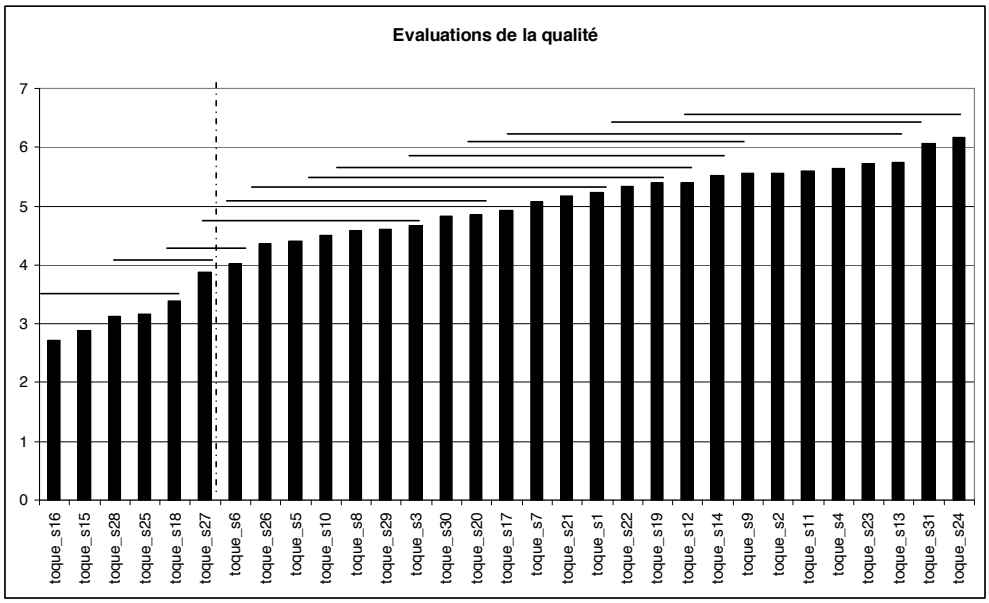


Figure 121 Evaluations de la qualité du matériau que renvoient les bruits de toqué (0 : très mauvaise qualité) / 10 : très bonne qualité ; les barres horizontales regroupent les stimuli qui ne sont pas significativement différentiés par test de Duncan 5%).
6 bruits de toqué sont jugés de moins bonne qualité. Les autres bruits de toqué, évalués entre 4/10 et 6/10 sont mal discriminés par l'ensemble des sujets.

L'analyse par Classification Ascendante Hiérarchique propose une partition des sujets en 3 classes de 27, 27 et 16 sujets. Les classes de sujets sont illustrées par l'analyse en composantes principales. Les bruits de toqué et les réponses des sujets sont projetés sur un plan à deux dimensions définies par les deux premières composantes principales, qui expliquent 59% de la variance totale (Figure 122).

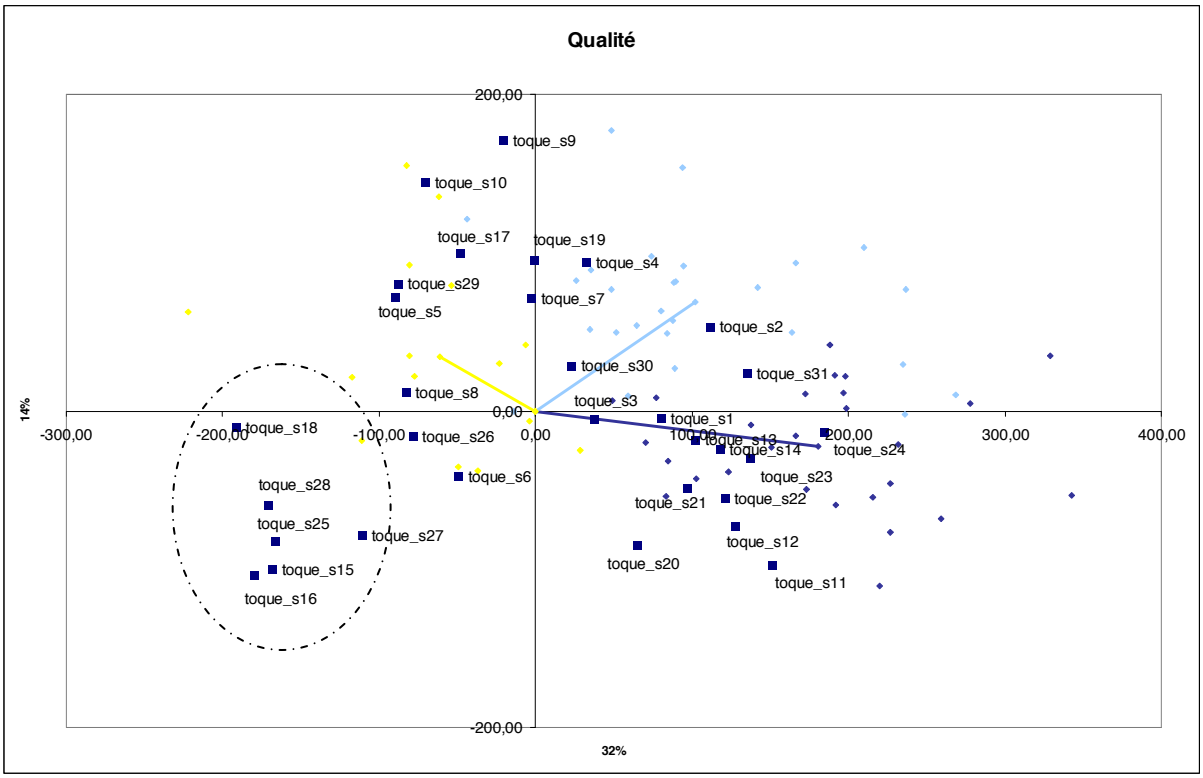


Figure 122 Analyse en Composantes Principales des évaluations de la qualité du matériau que renvoient des bruits de toqué : projection des bruits de toqué et des sujets sur les CP1 e CP2. Les flèches désignent les directions moyennes des évaluations des 27 sujets de la classe1, des 27 sujets de la classe2, et des 16 sujets de la classe3. On identifie les 6 sons rejetés par l'ensemble de sujets (cercle). Les autres sons sont jugés différemment par les 3 classes de sujets.

1.3 Ecoute analytique

Les propriétés analytiques des bruits de toqué sont caractérisées par métrologie sensorielle.

1.3.1 Méthodologie

Stimuli

L'analyse sensorielle est réalisée sur 20 bruits de toqué, choisis parmi les 31 bruits évalués en qualité. Les 20 sons sont sélectionnés après écoutes pour représenter en sensoriel l'ensemble des sons de toqué étudiés.

Sujets

Le panel est composé de 9 sujets externes (les juges), sélectionnés pour leurs aptitudes sensorielle et logique, et leur motivation. L'audition des juges est contrôlée. Les 9 juges sont des femmes, de 45 ans en moyenne. Ils sont rémunérés pour leur participation.

Protocole

Les 4 étapes principales du profil sensoriel sont réalisées sur 8 séances de 2 heures :

- une phase d'apprentissage sémantique dont l'objectif est d'établir la liste des descripteurs caractérisant l'espace Produit,
- une phase d'apprentissage sensoriel dont l'objectif est d'améliorer l'acuité sensorielle des sujets (discriminabilité),

- une phase d'apprentissage métrique consistant à utiliser une échelle de notation,
- une phase d'évaluations finales.

1.3.2 Identification des propriétés analytiques

Les bruits de toqués sont caractérisés par 7 propriétés analytiques (descripteurs sensoriels) à valeurs continues (Tableau 27).

Propriétés analytiques	Définition
Hauteur	Qui est haut en tonalité
Détonant	Qui présente un niveau de détonation important
Proximité	Impression que l'on se trouve loin du bruit
Attaquant	Evaluation de l'attaque du son
Intensité	Qui a un niveau sonore élevé
Longueur de toc	Qui a une durée longue
Résonant	Qui présente un niveau de résonnance importante

Tableau 27 Propriétés analytiques des bruits de toqué

1.3.3 Performance du panel

Pour chaque propriété, on évalue les performances du panel en discriminabilité, consensualité et répétabilité. Un défaut de consensualité est observé pour les descripteurs Longueur de toc et Résonant et un défaut de répétabilité pour le descripteur Longueur de toc. Pour les autres propriétés, les performances sont vérifiées *(cf annexe PANEL_SENSORIEL*).

1.3.4 Profil sensoriel

Nous présentons les évaluations moyennes des propriétés pour lesquelles les performances du panel sont vérifiées, en précisant les sons discriminés par test de Duncan (Figure 123) *(cf annexe PANEL_SENSORIEL*).

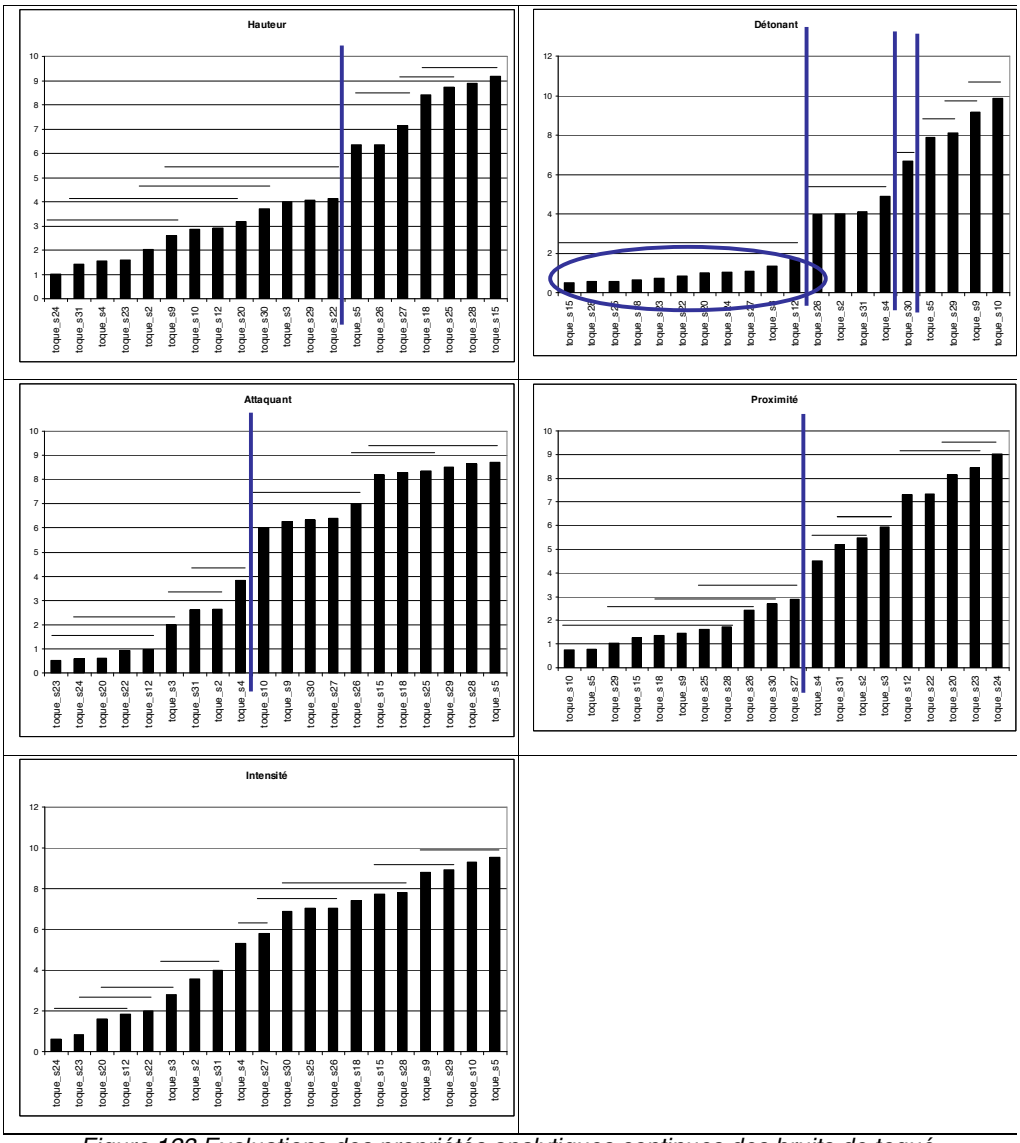


Figure 123 Evaluations des propriétés analytiques continues des bruits de toqué (0 - / 10 + ; les barres horizontales regroupent les stimuli qui ne sont pas significativement différentiés,par test de Duncan 5%).

Les propriétés Hauteur, Attaquant et Proximité discriminent les sons en deux groupes principaux. La propriété Détonant discrimine les sons en 4 groupes principaux. Pour un nombre important de sons, cette propriété est absente. La propriété Intense est plus continue.

1.3.5 Caractérisation par écoute analytique

La caractérisation analytique des 20 bruits de toqué est résumée par Analyse en Composante Principale des données normées. Les deux premières composantes principales (CP) résument 98% de l'information globale. Les bruits de fermeture de porte sont projetés les composantes principales CP1/CP2. Les corrélations des propriétés avec ces 2 axes sont présentées sur le cercle des corrélations (Figure 124).

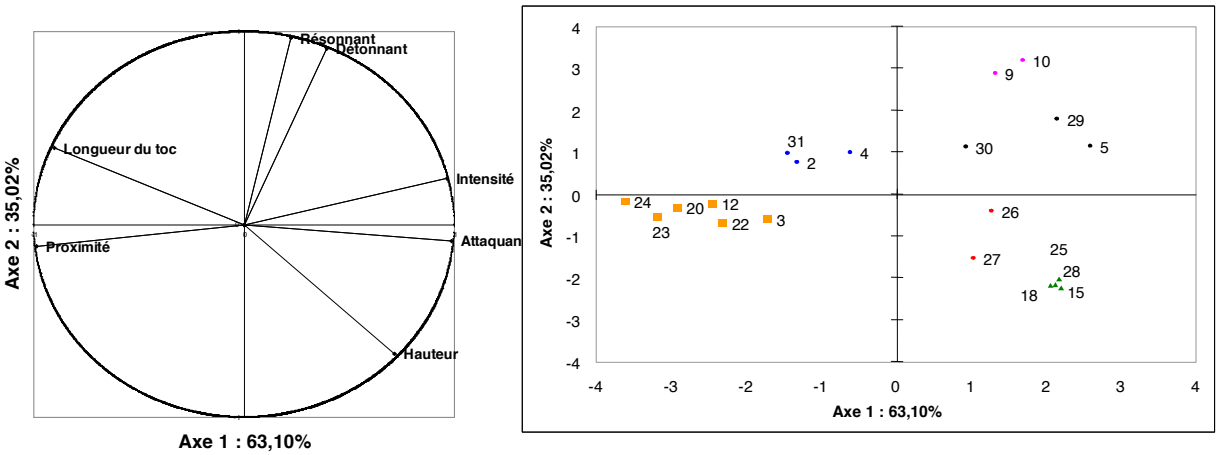


Figure 124 Analyse en Composantes Principales des propriétés analytiques : cercle des corrélations et projection des bruits sur le plan CP1/CP2.
- La CP1 est corrélée à Attaquent et Intensité et anti-corrélée à Proximité.
- La CP2 est corrélée à Détonant.
Les sons mal perçus 15, 25, 28, et 18 sont les plus aigus Les sons 10 et 9 sont les plus détonants, et les sons 23 et 24 sont les moins forts et moins attaquants.

1.4 Relations entre propriétés

A partir des évaluations de 20 bruits de toqué sur les propriétés analytiques et la qualité, nous observons les relations entre ces propriétés.

Les relations entre propriétés analytiques et la Qualité sont simplement évaluées à partir des coefficients de corrélations. Pour considérer les différentes classes de sujets, nous intégrons également les 2 composantes principales qui résument les évaluations en qualité (Tableau 28).

Coefficients de corrélation	Hauteur	Proximité	Intensité	Attaquant	Détonant
Qualité	**-0,96**	0,67	-0,58	-0,76	0,25
Qualité CP1	-0,88	0,87	-0,82	**-0,92**	-0,06
Qualité CP2	-0,47	-0,35	0,45	0,16	**0,90**

Tableau 28 Coefficients de corrélations entre les propriétés analytiques, la Qualité et les composantes principales caractérisant les jugements Qualité.
Les corrélations les plus importantes sont indiquées en gras :
- la qualité moyenne est anticorrélée à la Hauteur,
- la CP1 est anticorrélée à Attaquant,
- la CP2 est corrélée à Détonant.

Les liens établis sont illustrés en projetant les propriétés analytiques dans l'espace de qualité des bruits de toqué (Figure 125).

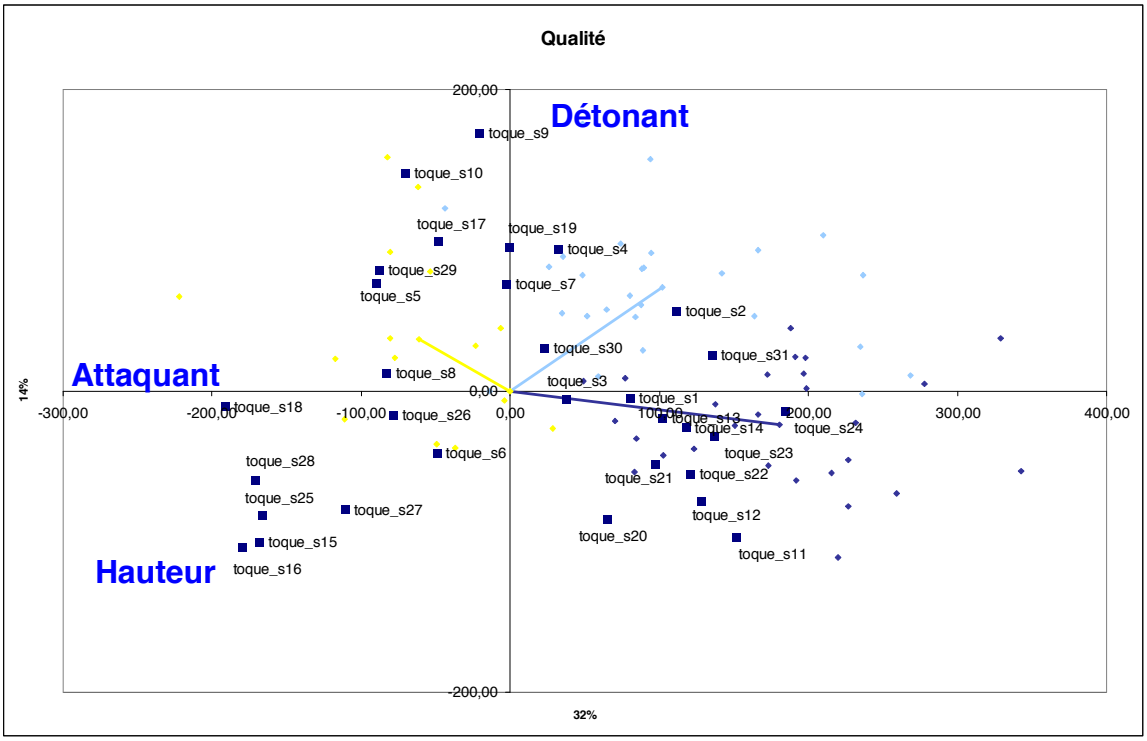


Figure 125 Analyse en Composantes Principales des évaluations de la qualité du matériau que renvoient des bruits de toqué : projection des bruits de toqué et des sujets sur les CP1 e CP2. Les flèches désignent les directions moyennes des évaluations des 27 sujets de la classe1, des 27 sujets de la classe2, et des 16 sujets de la classe3.

- la qualité moyenne est anticorrélée à la Hauteur,
- la CP1 est anticorrélée à Attaquant,
- la CP2 est corrélée à Détonant.

Conclusion

Trois propriétés analytiques principales (Hauteur, Attaquant et Détonant) caractérisent les jugements en Qualité. Les bruits associés à une bonne qualité sont plutôt graves. De plus, certains auditeurs sont plus sensibles aux sons Détonants (classe 3) alors que d'autres associent l'impression de qualité aux sons peu Attaquant (classe 1). Les propriétés analytiques permettent ainsi de traduire les différents jugements en qualité. Ces propriétés doivent à présent être modélisées par des critères acoustiques.

2. Modélisation acoustique du bruit de toqué

La qualité du matériau que renvoient les bruits de toqué est liée aux propriétés analytiques Attaquant, Détonant et Hauteur. Nous cherchons à présent à caractériser ces propriétés analytiques par des critères acoustiques. La caractérisation acoustique des bruits de toqué, comme celle des bruits de fermeture de porte, est basée sur des analyses perceptives de sons de synthèse contrôlés.
Les sons de toqué sont d'abord synthétisés à partir de l'outil d'analyse-synthèse des bruits de fermeture de porte dans une version adaptée **(section 2.1)**. Le modèle d'analyse-synthèse du bruit de toqué est ensuite évalué perceptivement **(section 2.2)**. Enfin, nous proposons un ensemble de critères acoustiques interdépendants pour caractériser chaque propriété perceptive **(section 2.3)**.

2.1 Modèle d'analyse-synthèse

2.1.1 Adaptation du modèle d'analyse-synthèse de bruit de fermeture de porte

Le modèle d'analyse-synthèse de bruits de fermeture de porte est construit autour de 3 impacts plutôt haute fréquence et rapidement amortis (partie ''serrure'') et sur un impact de plus basse fréquence et amorti plus lentement (partie ''fermeture''). Le modèle d'analyse-synthèse des bruits de toqué est directement déduit de ce dernier en ne considérant plus que 2 impacts simultanés : le dernier impact ''serrure'' pour modéliser la partie haute fréquence et amorti rapidement, appelé ici ''clic'' et de l'impact ''fermeture'', pour la partie basse fréquence et amortie lentement, appelé ''bam''. Ces deux impacts sont simultanés, ils ne forment bien qu'un seul impact. Par ailleurs, l'attaque de la partie fermeture est plus rapide que celle du bruit de fermeture de porte ($\alpha = 1000 s^{-1}$), et les 2 modes très basse fréquence ne sont pas ajoutés.

2.1.2 Analyse des bruits de toqué

L'analyse des bruits de toqué est identique à celle des bruits de fermeture de porte. Les signaux sont d'abord décomposés par EMD, puis les modes EMD recombinés en 2 signaux (''serrure''/''clic'' et ''fermeture''/''bam''). Les niveaux et coefficients d'amortissement tirées de l'analyse temps-ERB sont ensuite calculés et approximés. Les analyses des 31 bruits de toqué sont compilées en annexe *PARAMETRES_ACOUSTIQUES*.
La décomposition EMD et l'analyse du bruit de toqué en 2 impacts (dernier impact ''serrure''/''clic'' et impact fermeture/''bam'') n'est pas indispensable dans ce cas d'impact simple. Elle est cependant conservée par souci d'homogénéité avec l'étude sur les bruits de fermeture de porte. De plus elle présente l'avantage de modéliser l'impact en une partie haute fréquence amortie très rapidement, et une partie plus basse fréquence, amortie plus lentement et dont la dépendance fréquentielle de l'amortissement est primordiale.

2.1.3 Synthèse des bruits de toqué

Comme pour le modèle de synthèse simplifié des bruits de fermeture de porte, le bruit de toqué est contrôlé par 5 descripteurs acoustiques indexés sur les paramètres de contrôle : le niveau et la bande

de fréquence d'énergie maximale de l'impact ''clic'' (*N3* et *Bmax3*), la pente spectrale et le niveau initial de la partie ''bam'' (*Pente* et *Nferm*), et le coefficient d'amortissement *A* (Figure 126). Les autres paramètres de contrôle sont ajustés à la moyenne des paramètres des 31 sons de toqué étudiés. Les valeurs des descripteurs acoustiques et paramètres de contrôle des 31 bruits de toqués de synthèse sont rassemblés dans l'annexe *PARAMETRES_ACOUSTIQUES*. (SYNTHESE_5P_toque_s).

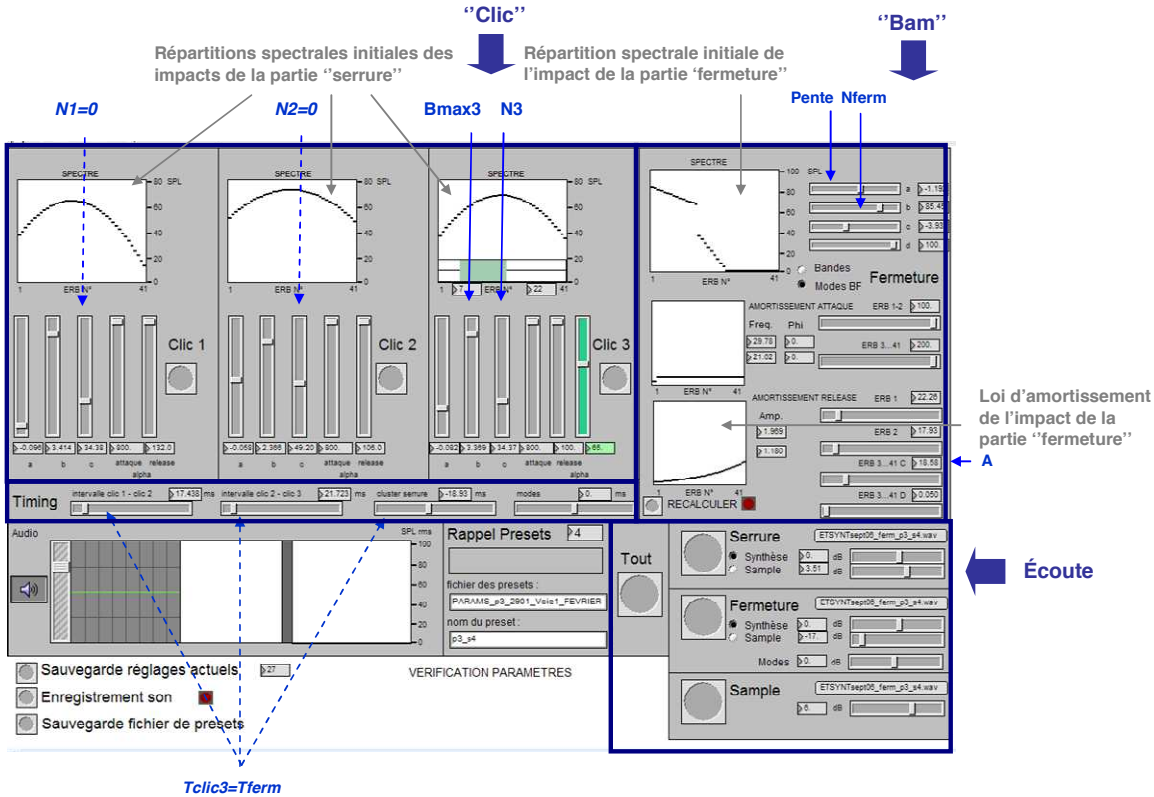


Figure 126 Interface de l'outil de synthèse temps-réel – descripteurs acoustiques principaux
*- le niveau de la partie ''clic'' (*N3*) et de l'impact de la partie ''bam'' (*Nferm*),*
*- la répartition spectral du dernier impact de la partie ''clic'' (*Bmax3*) et de l'impact de la partie ''bam'' (*Pente*),*
*- la loi d'amortissement de la partie ''bam'' (*A*).*

2.2 Evaluation perceptive du modèle d'analyse-synthèse

Le modèle d'analyse-synthèse est testé en comparant les sons réels à leur version de synthèse. Les distances perceptives entre les sons réels et les sons resynthétisés sont évaluées par l'intermédiaire de l'évocation de ''qualité''. Les sons de synthèse ne sont pas évalués sur les propriétés analytiques. L'évaluation perceptive du modèle d'analyse synthèse n'est donc pas complète.

2.2.1 Conservation de la qualité du matériau

Après avoir présenté le test perceptif réalisé pour évaluer la ''qualité'' des sons de synthèse, nous comparons ces évaluations à celles des sons réels, relevées dans la partie précédente.

EXPERIENCE 6 b

Stimuli

Un groupe de 31 bruits de toqué est proposé. Il est entre autre constitué de 11 sons réels (choisis parmi les 31 sons réels étudiés : s2, s3, s6, s14, s18, s19, s21, s23, s24, s25, s31) et des 11 sons de resynthèse associés (SYNTHESE_5P_toque_s).

Sujets
Idem *EXPERIENCE 6 a* **(1.2.1)**

Protocole
Idem *EXPERIENCE 6 a* **(1.2.1)**

Résultats *(cf annexe PROPRIETES_NATURELLES_EVOCATIONS)*
Aucun sujet n'a été surpris par les bruits de synthèse. Les sujets ont indifféremment évalués les bruits de toqué réels et de resynthèse.

Sons réels vs sons de resynthèse
Les évaluations en qualité des sons de resynthèse sont comparées à celles des sons réels (obtenues avec les mêmes sujets dans le même groupe de sons en **1.2.1**) (Figure 127).

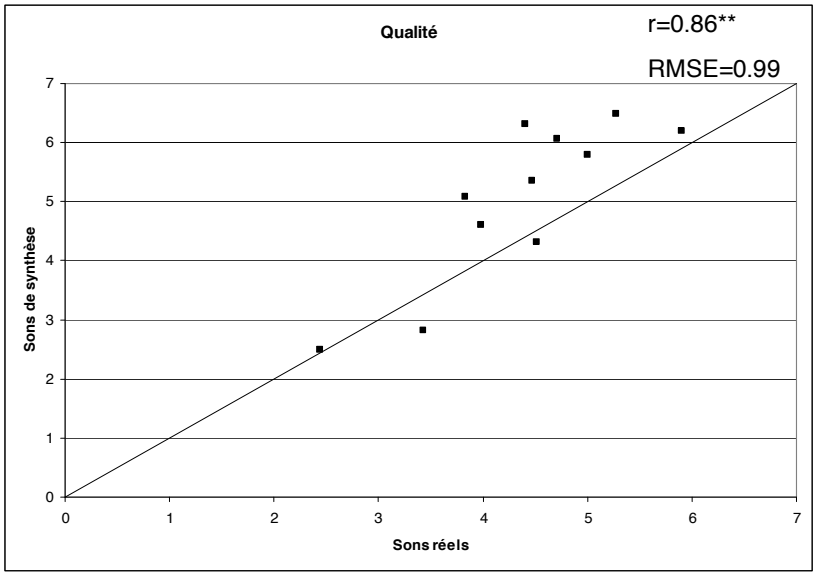


Figure 127 Evaluations de l'évocation de ''qualité'' sons de synthèse vs sons réels
*coefficients de corrélations (** significatif à 1%) et racine des moyennes des erreurs au carré.*
Les deux sons associés à une mauvaise qualité sont conservés par la synthèse.

Même si une étude sur un nombre plus important de sons serait nécessaire pour conclure, cette étude indique que la qualité est approximativement conservée en synthèse et nous conforte sur le réalisme des sons de synthèse.

2.3 Caractérisation acoustique des sons de synthèse

Nous cherchons maintenant à établir les relations entre les paramètres acoustiques et les propriétés analytiques sous forme d'arbres de paramètres interdépendants. On évalue les propriétés analytiques d'un ensemble de sons synthétisés par modification des 5 descripteurs acoustiques selon un plan d'expérience de type hypercube carré latin (LHC).

2.3.1 Plan d'expérience

Bornes de l'espace étudié

L'espace acoustique visé est borné par les valeurs minimales et maximales extraites de l'analyse des 31 sons réels. Mais certaines combinaisons de paramètres induisent des sons non réalistes. Les bornes sont dans ce cas restreintes à certaines valeurs déduites d'écoutes des sons de synthèse (Tableau 29). De plus l'analyse des 31 sons réels montre que le niveau de la partie ''bam'' par rapport à la partie ''clic'' (*Nferm-N3*) est toujours supérieur à une certaine valeur (-2dB). Nous imposons cette condition au plan d'expérience. Les sons de synthèse sont alors réalistes.

	N3	Bmax3	Nferm	Pente	A
Min *réel*	59,8	4	69,9	-2,59	2,34
Max *réel*	85,5	23	92	1,26	30
Min *LHC*	59,8	4	69,9	-2,59	**5**
Max *LHC*	85,5	**18**	**87**	**-0,5**	**30**

Tableau 29 Bornes de l'espace réel et borne de l'espace du plan d'expérience.
Les bornes restreintes sont en gras.

Plan d'expérience

52 combinaisons des 5 paramètres acoustiques sont réparties selon un plan LHC pour synthétiser 52 sons de toqué (plan_LHC_5P_toque_s . Les valeurs des paramètres acoustiques des 52 sons de synthèse sont rassemblées en annexe *PARAMETRES_ACOUSTIQUES*.

2.3.2 Evaluation des propriétés analytiques principales

Les propriétés analytiques principales des sons de synthèse sont évaluées par analyse sensorielle.

Stimuli

L'étude est réalisée sur les 52 sons de synthèse définis selon le plan d'expérience (plan_LHC_5P_toque_s).

Panel sensoriel

Le panel sensoriel évalue les bruits de fermeture de porte de synthèse sur les propriétés Attaquant, Détonant et Hauteur, avec deux répétitions, par rapport à des références externes choisis en amont par les panélistes :

- les sons plan_LHC_5P_toque_s5 (référence min) et plan_LHC_5P_toque_s18 (référence max) pour Hauteur,
- les sons plan_LHC_5P_toque_s10 (référence min) et plan_LHC_5P_toque_21 (référence max) pour Détonant,
- les sons plan_LHC_5P_toque_s10 (référence min) et plan_LHC_5P_toque_s18 (référence max) pour Attaquant.

Les performances du panel en discriminabilité, consensualité et répétabilité sont bien vérifiées *(cf annexe PANEL_SENSORIEL)*.

2.3.3 Arbres de paramètres acoustiques par propriété analytique

Nous cherchons à présent les relations entre les paramètres acoustiques et les propriétés analytiques par arbres de régression (cf Chapitre VI 3.4.3).

Arbres complets par propriété perceptive

Chaque propriété perceptive est caractérisée à partir de combinaisons linéaires des 5 descripteurs acoustiques étudiés. Nous présentons les arbres complets obtenus pour chaque propriété analytique. Un exemple sonore (numéro son est associé à chaque nœud final. Nous commentons une version élaguée de chaque arbre (Figure 128 à Figure 130).

Hauteur

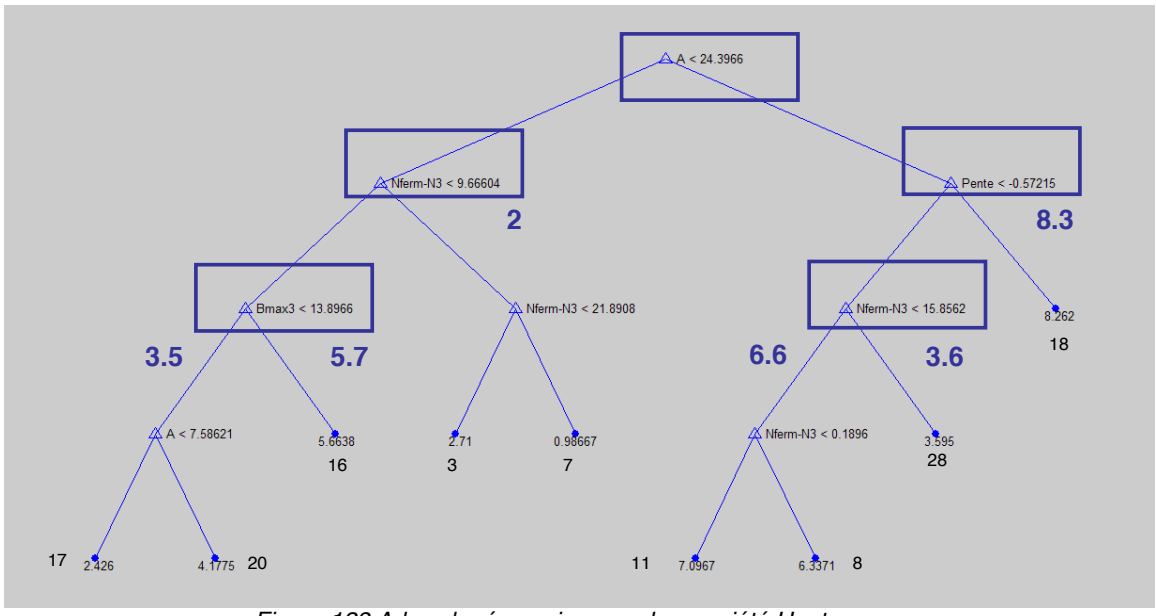


Figure 128 Arbre de régression pour la propriété Hauteur.

Le paramètre d'amortissement de la partie "bam" sépare les sons en 2 niveaux de Hauteur : s'il est inférieur à un seuil, les sons sont plutôt grave, s'il est supérieur à ce seuil, les sons sont plutôt aigu. Chaque groupe de sons est précisé par d'autres descripteurs :

*- les sons plutôt graves sont caractérisés par le niveau de la partie "bam" par rapport à la partie "clic" (*Nferm-N3*), et si le niveau de la partie "clic" est suffisamment élevé, par son contenu fréquentiel (*Bmax3*),*

*- les sons plutôt aigus sont caractérisés par le niveau de la partie "bam" par rapport à la partie "clic" (*Nferm-N3*). De plus si la pente de répartition spectrale de la partie "bam" (*Pente**) est extrêmement élevée, les sons sont très aigus.*

La hauteur est principalement caractérisée par l'amortissement de la partie ''bam'', et par le niveau relatif des parties ''bam'' et ''clic''. De plus, une pente de répartition spectrale de la partie ''bam'' (*Pente**) extrêmement élevée induit un son aigu.

Détonant

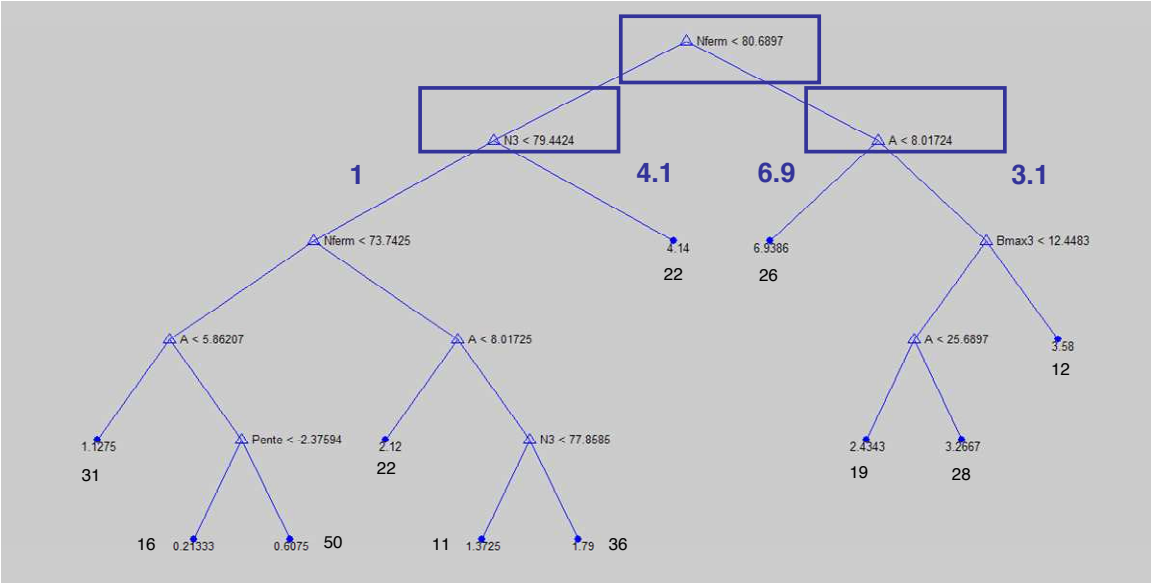


Figure 129 Arbre de régression pour la propriété Détonant.
Le niveau de la partie ''bam'' sépare les sons en 2 groupes : les sons à Nferm *faible sont caractérisés par le niveau de la partie ''clic'', tandis que les sons à* Nferm *élevé sont caractérisés par l'amortissement de la partie ''bam''.*

Le son est détonant quand son niveau de ''bam'' est élevé, et son amortissement lent ; il ne l'est pas pour de faibles niveaux des parties ''bam'' et ''clic''. Par ailleurs, l'influence de l'amortissement de la partie ''bam'' et du niveau de ''clic'' dépend de la valeur du niveau de ''bam''. Nous remarquons qu'un son à fort niveau de ''bam'' peut être moins détonant qu'un son à faible niveau de ''bam'' s'il est associé à un fort amortissement.

Attaquant

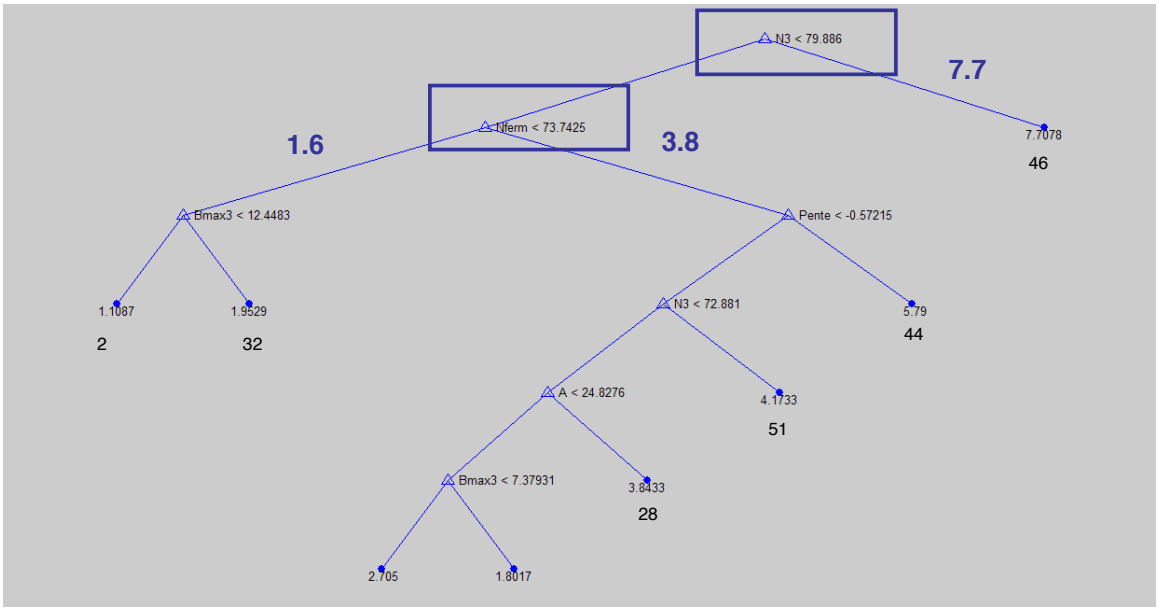


Figure 130 Arbre de régression pour la propriété Attaquant.
Le niveau de la partie ''clic'' identifie les sons fortement attaquant (7.7).
Le niveau de la partie ''bam'' précise les sons peu attaquant.

Le bruit est attaquant si le niveau de ''clic'' est supérieur à un seuil, dans la cas contraire, il est nuancé par un autre le niveau de ''bam''.

Conclusion

Nous observons les relations entre 5 descripteurs acoustiques et les propriétés analytiques des bruits de toqué.

Le son est d'autant plus grave que l'amortissement de la partie ''bam'' est lent, et que les rapports des niveaux des parties ''clic'' et ''bam'' (correspondant au niveau relatif des parties de haute et basse fréquence) sont faibles. De plus, un effet de bord est relevé : lorsque la pente de répartition spectrale de la partie ''bam'' (*Pente*) est extrêmement élevée (et que son niveau est suffisant), le son est très aigu.

Le son est détonant quand son niveau de ''bam'' est élevé, et son amortissement lent ; il ne l'est pas pour de faibles niveaux des parties ''bam'' et ''clic''. Mais un son à fort niveau de ''bam'' peut être moins détonant qu'un son à faible niveau de ''bam'' s'il est associé à un fort amortissement.

Enfin, le son est attaquant quand son niveau de ''clic'' est très élevé. Nous observons ici un seuil à partir duquel la partie ''clic'' est bien présente dans le son globale, ce qui accentue l'attaque du son.

Les relations entre critères acoustiques et propriétés analytiques révèlent l'importance des effets de seuils et de l'organisation des critères, pour ces impacts simples.

Conclusion

L'étude du bruit de toqué n'est abordée qu'au laboratoire. Nous devrions la compléter par l'étude de la situation réelle pour obtenir des conclusions produits, applicables. Elle permet toutefois d'illustrer une partie de notre démarche d'étude des bruits d'impact.

L'étude du bruit de toqué met en évidence les propriétés descriptives de ce bruit d'impact, utilisées comme intermédiaire entre l'évocation de qualité et les critères acoustiques. Trois propriétés analytiques principales (Hauteur, Attaquant et Détonant) caractérisent les jugements en qualité. Les bruits associés à une bonne qualité sont généralement graves. Néanmoins les jugements sont nuancés en fonction des sujets : certains sujets sont plus sensibles aux sons ''Détonants'' alors que d'autres associent l'impression de qualité aux sons peu ''Attaquant''. Les propriétés analytiques identifiées permettent ainsi de décrire le son d'impact et de nuancer les différentes façons de juger les bruits de toqué en qualité. Cet exemple montre qu'il est difficile de chercher à modéliser directement la qualité par le signal acoustique, et par là appuie la pertinence de la décomposition en propriétés analytiques.

Le bruit de toqué est modélisé à partir de l'outil d'analyse-synthèse des bruits de fermeture de porte, dont on ne conserve que le dernier impact ''serrure'' (''clic'') et la partie ''fermeture'' (''bam''), joués simultanément. Le modèle est contrôlé par 5 paramètres : le niveau et la répartition spectrale de la partie ''clic'', le niveau, la répartition spectrale et la loi d'amortissement de la partie ''bam''. Le modèle s'adapte bien aux bruits de toqués, impact ''bruités'', pour lesquels les modes sont confondus. Nous aurions en revanche du mal à synthétiser un bruit modal avec notre modèle, comme le bruit d'une balle de ping-pong.

Les relations entre propriétés analytiques et critères acoustiques sont établies par arbres de régression. La hauteur est par exemple caractérisée par la loi d'amortissement et le niveau de ''clic'' par rapport au niveau de ''bam'' traduisant l'équilibre fréquentiel. Par ailleurs, nous observons l'interdépendance des paramètres acoustiques pour caractériser la propriété Détonant (l'influence de l'amortissement de la partie ''bam'' et du niveau de ''clic'' dépend de la valeur du niveau de ''bam'') et un effet de seuil marqué pour la propriété Attaquant (un bruit de toqué est attaquant si le niveau de ''clic'' est supérieur à un seuil, dans le cas contraire, il est nuancé par un autre descripteur). L'organisation des paramètres sous forme d'arbre est donc une voie d'étude pertinente également dans le cas de l'impact simple où une seule source s'exprime.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Le problème industriel des bruits de fermeture de porte consiste à traduire les attentes des automobilistes en spécifications sur les composants mécaniques de la porte. Le client en concession qui manœuvre la porte et perçoit à travers le bruit de fermeture que la porte est fermée, infère également des évocations complexes sur la qualité ou la solidité du véhicule auxquelles l'industriel est particulièrement attentif. La traduction de ces évocations complexes en règles techniques n'est pas immédiate. La caractérisation du ressenti par des critères extraits du signal sonore est une première étape qui, complétée par la caractérisation des sources organiques et des transferts acoustiques, peut aboutir aux spécifications techniques cherchées. Notre travail de thèse s'est attaché à étudier cette première étape qui pose des questions fondamentales sur la perception des bruits d'impact : il s'agit de comprendre ce que l'on perçoit du bruit d'impact entendu après une action humaine dans un environnement, et d'extraire du signal acoustique les critères sous-jacents.

Nous avons choisi d'aborder l'étude du bruit d'impact en considérant la complexité de sa perception en situation réelle. Nous l'avons ensuite complétée par des études au laboratoire, où la perception est focalisée sur le son, pour le décomposer en propriétés perceptives. Enfin, nous avons proposé un modèle d'analyse-synthèse pour étudier les relations entre les critères acoustiques et les propriétés perceptives. De la situation réelle au laboratoire, du son réel au son de synthèse, les transitions entre chaque étape ont dues être attentivement étudiées pour s'assurer que les critères acoustiques obtenus in fine soient réellement pertinents et en particulier utiles à l'industriel.

Notre démarche a été appliquée au cas du bruit de fermeture de porte, puis partiellement discutée à travers une étude sur le bruit de toqué. Nous exposons les résultats méthodologiques sur la perception du bruit d'impact, puis l'application au bruit de fermeture de porte. Nous proposons ensuite des perspectives à nos travaux.

1. Perception du bruit d'impact

Perception des bruits d'impact en situation réelle

L'approche qualitative permet d'observer les usages et le ressenti en situation écologique. Les composantes perceptives qui structurent l'évènement sonore y sont décrites. Par exemple, le bruit de fermeture de porte est associé à des informations sur le véhicule et la manœuvre, du type ''la porte est bien fermée, la manœuvre est douce, le véhicule est de grande taille et la porte est lourde''. Il renvoie également à des évocations de qualité, de solidité et de confort. Ce type d'approche, associé à des expérimentations au laboratoire, permet de préciser l'influence des facteurs environnementaux, comme les autres modalités, l'image de la source, les attentes. Dans le cas automobile, nous retenons une forte influence de l'image du véhicule, portée par la marque et le segment. Nos études ont également relevé les problèmes de validité écologique rencontrés au laboratoire. Nous observons

que l'image du véhicule n'influence que faiblement l'évaluation du bruit quand elle est étudiée au laboratoire, à partir de vidéos. L'introduction de ce facteur environnemental au laboratoire ne permet donc pas de reproduire les effets observés en situation réelle.

Propriétés perceptives des bruits d'impact

L'étude en situation réelle est complétée par l'étude du son écouté seul, en laboratoire, qui permet de décomposer chirurgicalement le bruit en fines composantes perceptives. Nous relevons la pertinence de la double caractérisation des bruits : par écoute écologique et par écoute analytique.

L'écoute écologique renvoie à l'évènement associé au son, et sa caractérisation par un ensemble de propriétés naturelles permet de préciser les évocations associées. Dans le cas des bruits de fermeture de porte, l'évocation de qualité est principalement reliée à la perception d'une porte lourde et d'une manœuvre douce. Le son doit également confirmer que la porte est bien fermée. De plus, l'écoute écologique dépend de l'auditeur. L'expert automobile identifie les sources organiques du bruit de fermeture de porte, contrairement au client qui écoute le son de porte dans sa globalité, en réponse à son action. La caractérisation réalisée par l'expert est pertinente puisque l'on cherche in fine à relier le ressenti aux sources organiques.

L'écoute analytique décrit le signal sonore, sans faire référence à l'évènement. La méthode de l'analyse sensorielle est apparue pertinente pour cette caractérisation des bruits. Le bruit de fermeture de porte est principalement décrit par l'intensité, et par les onomatopées BONM et KE. Ces propriétés analytiques sont reliées aux propriétés perçues par écoute écologique comme le poids de la porte et l'énergie de fermeture, ainsi que les sources organiques. Même si l'écoute analytique est artificielle et ne participe pas au processus perceptif, elle est proposée comme une étape vers l'analyse signal. Les propriétés analytiques sont plus facilement analysées en signal, puisque, tout comme les paramètres acoustiques, elles sont descriptives du signal sonore. De plus, deux sons analytiquement différents peuvent être associés à une même propriété écologique. Les propriétés analytiques constituent donc une étape pertinente entre perception écologique et signal acoustique.

Modélisation acoustique des signaux d'impact

L'approche par analyse-synthèse est proposée pour explorer les relations entre les propriétés perceptives et le signal acoustique. Sans chercher à reproduire précisément chaque son, le modèle d'analyse-synthèse vise à synthétiser des sons réalistes, proches des sons réels du point de vue des propriétés perceptives, à partir d'un nombre réduit de paramètres. Le modèle des bruits de fermeture de porte s'appuie sur la décomposition du son en impacts principaux, chaque impact étant modélisé par un ensemble de gains et de coefficients d'amortissement par bandes de fréquence. Il est calibré par l'écoute spécifique des propriétés analytiques et des sources organiques. L'intérêt de la double description analytique/écologique est à nouveau relevé : nous cherchons bien à contrôler les sons de synthèse sur les propriétés analytiques, intermédiaires avec les propriétés de plus haut niveau, mais nous souhaitons également que les sons soient réalistes. Non seulement le bruit de synthèse doit avoir la valeur ciblée sur la propriété KE, mais on doit reconnaître un son de serrure.

Un tel modèle, associé à son application temps-réel, constitue un outil d'exploration efficace pour sélectionner les paramètres acoustiques principaux. De plus, l'évaluation perceptive de sons de synthèse contrôlés à partir de plans d'expérience permet d'étudier les relations complexes entre ces paramètres acoustiques et les propriétés perceptives. On construit ainsi des modèles de prédiction robustes, difficiles à obtenir à partir d'un ensemble fini de sons réels qui contient inévitablement des relations statistiques internes non pertinentes. Par ailleurs, une approche par arbres de régression propose de modéliser les propriétés perceptives par des arbres de paramètres acoustiques qui

traduisent leur interdépendance et signalent les effets de seuil délimitant leurs zones d'influence. L'organisation de ces paramètres permet d'accéder aux critères les plus influents propres à chaque son.

2. Perception du bruit de fermeture de porte

L'application industrielle de nos travaux de thèse porte principalement sur les attentes clients et sur leur traduction en spécifications techniques pour les bruits de fermeture de porte. Nous proposons un ensemble de critères acoustiques caractéristiques du ressenti attendu par les clients.

Attentes clients

L'étude en situation réelle montre que les clients sont attentifs à l'indication de fermeture, et apprécient les bruits qui renvoient à un véhicule de segment supérieur avec une porte lourde, et à une manœuvre douce. Ces bruits évoquent alors des impressions de qualité, de solidité et de confort. Nous avons également observé l'influence positive de l'image du véhicule sur l'évaluation du bruit.

Caractérisation perceptive

Les attentes clients sont traduites en propriétés analytiques qui décrivent le signal sonore sans référence à l'évènement sonore (l'intensité, les onomatopées KE et BONM) et en propriétés liées aux sources organiques (présence serrure, spécificités). Les bruits attendus par les clients sont alors décrit comme des bruits sans défauts (ex : vibrations), graves (fort BONM et faible KE), et peu intense, avec une faible présence ''serrure''.

Critères acoustiques

Les propriétés perceptives des plus bas niveaux (analytiques) aux plus haut niveau (évocations) (hors spécificités) sont caractérisées par des critères acoustiques, tels que les niveaux, fréquences et amortissements des impacts liées aux chocs ''serrure'', et au panneau de porte (''fermeture''). Pour expliquer chaque propriété perceptive, les critères acoustiques sont organisés sous forme d'arbres qui traduisent leur interdépendance. L'organisation des paramètres permet d'accéder aux critères acoustiques les plus influents d'un bruit particulier en fonction de son environnement acoustique.

Vers des solutions techniques

Les critères acoustiques sont à rapprocher des résultats sur la caractérisation des composantes organiques et des transferts acoustiques, obtenus par des études en interne PSA. Ainsi nos critères acoustiques pourront être traduits en cahier des charges organique. Le potentiel des critères à être traduits en cahier des charges organique est par ailleurs observé à partir de sons de portes modifiées techniquement (**ANNEXE confidentielle**). Les modifications organiques sur la composante serrure induisent des évolutions cohérentes sur les critères de niveaux des impacts ''serrure''.

3. Perspectives

Nous avons proposé une démarche et un outil d'analyse-synthèse pour les bruits d'impact. En plus du bruit de fermeture de porte, nous avons partiellement étudié le bruit de toqué. Nous pouvons a priori appliquer ces résultats méthodologiques à d'autres bruits d'impact dans les limites de notre modèle d'analyse-synthèse. Par ailleurs, nous pensons que ces travaux pourraient être poursuivis du point de vue fondamental vers une exploration du système auditif.

Analyse-synthèse des bruits d'impact

Le modèle d'analyse-synthèse est basé sur un ensemble de gains et d'amortissements par bandes de fréquence, associé à une partie modale restreinte constituée de 2 modes. Il peut a priori reproduire n'importe quel type d'impacts ''bruités'', pour lesquels les modes sont confondus. Nous l'avons par exemple adapté au bruit de toqué. Toutefois, la restitution du comportement des très basses fréquences n'est pas bien retranscrite par notre modèle de synthèse. Le modèle devrait être raffiné avant de poursuivre l'exploration des bruits d'impact. Nous pouvons imaginer lui associer une partie modale plus conséquente ou exploiter les techniques de synthèse granulaire.

Aux portes du système auditif

Le bruit de fermeture de porte est composé, sur une durée de quelques centaines de millisecondes, d'un ensemble d'impacts successifs associé à une résonance de basse fréquence où de complexes effets psychoacoustiques entrent en jeu. Les relations entre les paramètres acoustiques et les propriétés perceptives de ces bruits ont été étudiées par l'intermédiaire d'un outil d'analyse synthèse capable de synthétiser des sons réalistes et proches des sons réels du point de vue des propriétés analytiques. Nous pourrions poursuivre l'analyse en cherchant à comprendre les relations inter impacts, au regard des phénomènes psychoacoustique induits par le système auditif. Les effets de seuil et l'interdépendance des paramètres pourrait être expliqués par des phénomènes de masquage temps-fréquence ; la décomposition en bruit ''serrure'' et bruit ''fermeture'' par des phénomènes de groupement auditif. A partir de stimuli contrôlés par l'outil d'analyse synthèse, nous pourrions étudier spécifiquement les relations entre les impacts. Ces travaux permettraient ainsi d'aborder l'étude du système auditif pour des sons d'impact de notre environnement à partir de connaissances sur leur perception haut niveau.

ANNEXE I. SONS et ANNEXES TECHNIQUES (CD joint)

Les annexes techniques et les sons sont rassemblés dans le CD joint au manuscrit.

Dans le dossier SONS, nous proposons l'ensemble des sons auxquels nous faisons référence dans le manuscrit (signalés par 🔊). Les sons sont classés dans des dossiers se référant aux chapitres du manuscrit.

→ **Partie A**

→ **Chapitre I** : *4 exemples de bruits de fermeture de porte*

→ **Partie B**

→ **Chapitre IV**

→ **Energie de fermeture** : *les sons de Porte j associé à un type de vitesse de fermeture* (Vmin, Vclient, Vmax), (ex : Pj_Vmax)

→ **Image in situ** : *les sons enregistrés dans la salle d'expérimentation* (labo_s)

→ **Image vidéo**

→ **Photos** : *les photos des 9 véhicules*

→ **Serie 1** : *les vidéos pour le premier groupe de sujets*

→ **Serie 2** : *les vidéos pour le second groupe de sujets*

→ **Vmax1** et appli1.1 : *interface de test vidéos*

Les bruits de fermeture de porte (S1 à S9)

→ **Ouverture-fermeture** : *les sons de fermeture* (claq_s), *d'ouverture* (des_), *et d'ouverture – fermeture* (des_claq_s)

→ **Portes Avant-Arrière** : *les sons de portes Avant* (AV_), *et de portes Arrière* (AR_)

→ **Chapitre V** : *les sons de fermeture de porte d'étude s1 à s26*

→ **Chapitre VI**

→ **Analyse-synthèse**

Les sons de fermeture de porte d'étude s1 à s26, les parties ''serrure'' (serrure_s)*, et ''fermeture''* (fermeture_s) *associées*

Son de resynthèse de s4 (SYNTHESE_s4)

Son de toqué (toque_s3) *et sa resynthèse* (toques3_syntall)

→ **PatchSynt** : *l'interface temps-réel de l'outil de synthèse*

→ **Sons réels – sons de synthèse** : *les sons d'étude* s1 *à* s26*, leur resynthèse* (SYNTHESE_S), *et leur resynthèse avec le modèle simplifié* (SYNTHESE_10P_s)

Des exemples de sons modifiés sur un paramètre (MODIF_)

→ **Sons de synthèse**

→ **plan_Dopt_10P** : *les sons de synthèse du plan d'expérience de la section 3.2.1*

→ **plan_LHC_7P** : *les sons de synthèse du plan d'expérience de la section 3.4.1*

→ **SERIES** : *les sons de synthèse du plan d'expérience de la section 3.3.1*

→ **Partie C**

→ **Chapitre VII**

Les sons de toqué (toque_s)

Les sons de resynthèse (SYNTHESE_5P_toque_s)

Les sons de synthèse du plan d'expérience (2.3.1) (plan_LHC_5P_toque_s)

→ **ANNEXE SOLUTIONS TECHNIQUES** : *les bruits de fermeture de porte modifiées techniquement et leur resynthèse par le modèle simplifié.*

Dans le dossier ANNEXES TECHNIQUES, nous proposons les fichiers :

- ***Brief etude qualitative.doc***
  Le brief de l'étude qualitative mentionnée au chapitre IV. 1.

- ***INSITU_LABORATOIRE.xls***
  L'ensemble des résultats des tests perceptifs du chapitre IV.2.
  Les différents tests sont classés par feuille.
  - **portes AV-AR** (Chapitre IV 2.2.1) : Moyennes et Duncan des stimuli portes AV, portes AR et portes AV-AR ; données brutes (évaluations de l'ensemble des sujets pour chaque stimulus)
  - **ouverture** (Chapitre IV 2.2.2) : Moyennes et Duncan des stimuli ouverture, fermeture et ouverture/fermeture ; Duncan ; données brutes (évaluations de l'ensemble des sujets pour chaque stimulus)
  - **geste** (Chapitre IV 2.3.1) : Moyennes et Duncan des stimuli AVEC MANŒUVRE et SANS MANŒUVRE ; données brutes (évaluations de l'ensemble des sujets pour chaque stimulus)
  - **énergie de fermeture** (Chapitre IV 2.3.2) : Moyennes et Duncan des 26 stimuli (bruits de portes fermées à différentes vitesses de fermeture) ; coordonnées des projections des sons sur les 2 premiers axes de l'ACP ; données brutes (évaluations de l'ensemble des sujets pour chaque stimulus) et répartition en 2 classes suggérées par CAH.
  - **image In Situ** (Chapitre IV 2.4.1) : Moyennes et Duncan des stimuli LABO et IN SITU ; données brutes (évaluations de l'ensemble des sujets pour chaque stimulus)
  - **image Vidéos** (Chapitre IV 2.4.2) : Moyennes et Duncan des stimuli Véhicules, sons et vidéos (2 séries) ; coordonnées des projections des évaluations véhicules sur les 2 premiers axes de l'ACP ; données brutes (évaluations de l'ensemble des sujets pour chaque stimulus) et, pour l'évaluation des véhicules, répartition en 2 classes de sujets suggérées par CAH.

- ***PROPRIETES_NATURELLES_EVOCATIONS.xls***
  L'ensemble des résultats des tests perceptifs avec sujets naïfs des chapitres V à VII.
  Les différents tests sont classés par feuille.
  - **Chap V. Propriétés perceptives** : Moyennes et Duncan des propriétés Qualité, Solidité, Poids de porte, Energie de fermeture ; tests de Khi2 pour les propriétés Bien fermée et

Taille ; modalités des propriétés naturelles expertes ; coordonnées des projections des sons sur la propriété Qualité sur les 2 premiers axes de l'ACP et coordonnées des projections des sons sur les propriétés Qualité, Solidité, Poids de porte, Energie de fermeture ; données brutes (évaluations de l'ensemble des sujets pour chaque stimulus et chaque propriété) et, pour l'évaluation de la propriété Qualité, répartition en 2 classes de sujets suggérées par CAH.

- **Chap VI 2.2 resynthèse** : Moyennes et Duncan des propriétés Qualité, Poids de porte, Energie de fermeture ; données brutes (évaluations de l'ensemble des sujets pour chaque stimulus et chaque propriété).
- **Chap VI 2.3 synthèse simplifiée** : Moyennes et Duncan des propriétés Qualité, Poids de porte, Energie de fermeture ; données brutes (évaluations de l'ensemble des sujets pour chaque stimulus et chaque propriété).
- **Chap VI 3.4 plan LHC 7P** : Moyennes et Duncan des propriétés Qualité, Poids de porte, Energie de fermeture ; données brutes (évaluations de l'ensemble des sujets pour chaque stimulus et chaque propriété).
- **Chap VII 1. toqué réel** : Moyennes et Duncan de la propriété Qualité ; données brutes (évaluations de l'ensemble des sujets pour chaque stimulus).
- **Chap VII 2. toqué réel-synthèse** : Moyennes et Duncan de la propriété Qualité ; données brutes (évaluations de l'ensemble des sujets pour chaque stimulus).

- ***PANEL_SENSORIEL.xls***

  L'ensemble des résultats des 17 tests de panel sensoriel des chapitres V à VII, répertoriés par feuille.

  L'analyse des performances panel en discriminabilité, répétabilité, et consensus est décrite au chapitre V. 3.1.3. Le même type d'analyse est réalisé pour les 16 autres tests de panel, les résultats statistiques sont uniquement commentés dans cette annexe.

  Chaque feuille contient les analyses statistiques des performances du panel sensoriel (ANOVA, écart-type de l'ensemble des notes attribuées à tous les sons sur l'ensemble des répétitions, et ACP (sons, juges)) commentées ; les moyennes et Duncan de l'ensemble des descripteurs acoustiques.

- ***PARAMETRES_ACOUSTIQUES.xls***

  L'ensemble des analyses acoustiques des chapitres IV à VII, ainsi que celles de l'annexe Solutions techniques.

  Chaque feuille contient les valeurs des descripteurs acoustiques et des paramètres de contrôle du modèle d'analyse-synthèse.

  Les sons associés sont disponibles en écoute dans le dossier SONS.

- ***euronoise2006_MCB.pdf***
- ***ICA2007_MCB.pdf***

  Nos publications.

Bibliographie

Abe, K., Ozawa, K., Suzuki, Y., Sone, T., (2006). Comparison of the effects of verbal versus visual information about sound sources on the perception of environmental sounds. *Acta Acustica unisted with Acoustica, 92*, 51-60.

Agresti, A. (1996). *An introduction to categorical data analysis*. Wiley, New-York.

Amari, M., Parizet, E., Roussarie, V. (2007).Multimodal approach of vibro-acoustic comfort in vehicles : Influence of visual context. *Proceedings of the 19th Intenational Congress on Acoustics,* 2-7 September 2007, Madrid, Spain.

Anderson, W. H. (1985). *Cognitive psychology an its implications*. New York, W. H. Freeman.

Aramaki, M. (2003). Analyse synthèse de sons impulsifs : approches physique et perceptive. *Thèse de doctorat en acoustique, Université de la méditerranée Aix-Marseille II.*

Arakami, M., Kronland-Martinet, R. (2006). Analysis-synthesis of impact sound textures by real-time dynamic filtering. *IEEE Transactions on Speech and Audio Processing, 14*(2), 695-703..

Aramaki, M., Baillères, H., Brancheriau, L., Kronland-Martinet, R., Ystad, S. (2007). Sound quality assessment of wood for xylophone bars. *Journal of Acoustical Society of America, 121*(4), 2407-2420.

Aramaki, M., Besson, M., Kronland-Martinet, R., Ystad, Solvi. Timbre perception of sounds from impacted materials : a neuro-acoustic approach. *Journal of Acoustical Society of America,* soumis.

Bailblé, C., (2004). L'imagerie auditive à l'épreuve de la création. *Journées du Design sonore,* Paris 2004.

Baker, R., J., Rosen, S., Darling, A. M. (1998). An efficient characterisation of human auditory filtering across level and frequency that is also physiologically reasonable. In *Psychophysical and Physiological Advances in Hearing: Proceedings of 11th International Symposium on Hearing, edited by A. Palmer, A. Rees, Q. Summerfield, and R. Meddis (Whurr, London)*, 81-88.

Ballas, J. A. (1993). Common factors in the identification of an assortment of brief everyday sounds. *Journal of experimental psychology : human perception and performance, 19*(2), 250-267.

Bezat, M-C, Roussarie, V. (2003). Qualification acoustique du typage sonore. Application au typage sport'', *rapport de stage de MASTER II ATIAM, 2003*.

Bezat, M-C., Roussarie, V., Kronland-Martinet, R., Ystad, S., McAdams, S. (2006). Perceptual analysis of action-related impact sounds. *Euronoise 2006,* 30 May – 1 June, Tampere, Finland.

Bezat, M-C., Roussarie, V. Voinier, T., Kronland-Martinet, R., Ystad, S. (2007). Car door closure sounds: characterization of perceptual properties through analysis-synthesis approach. *Proceedings of the 19th Intenational Congress on Acoustics,* 2-7 September 2007, Madrid, Spain.

Björk, E. A. (1983). The perceived quality of natural sounds. *Research Notes. ACUSTICA, 57*, 185-188.

Blauert, J., Jekosch, U. (1997). Sound quality evaluation – A multilayered problem. *ACUSTICA united with acta acustica, 83*, 747-753.

Boullet, I. (2005). *Sonie des sons impulsionnels : perception, mesures, modèles.* Thèse de doctorat en acoustique, Université de la méditerranée Aix-Marseille II.

Boullet, I., Gagneux, F., Rabau, G., Meunier, S., Boussard, P. (2006). Un estimateur de sonie d'impulsion : élaboration et validation. *8ème congrès d'Acoustique,* Tours, 24-27 avril 2006, 881-884.

Breiman, L. (1998). *Classification and regression trees*. Chapman & Hall, Boca Raton, 1998.

Brown, J., C., Houix, O., McAdams, S. (2001). Feature dependence in the automatic identification of musical woodwind instruments. *Journal of Acoustical Society of America, 109*(3), 1064-1072.

Caclin, A., McAdams, S., Smith, B., Winsberg, S. (2005). Acoustic correlates of timbre space dimensions: a confirmatory study using synthetic tones. *Journal of Acoustical Society of America, 118*(1), 471-482.

Cardoso, J-F. (2004). La cocktail party et autres problèmes compliqués, *Matapli, Bulletin de liaison de la Société de Mathématiques Appliquées & Industrielles* 2004

Carney, L. H., McDuffy, M. J., Shekhter, I. (1999). Frequency glides in the impulse responses of auditory-nerve fibers. *Journal of Acoustical Society of America, 105*(4), 2384-2391.

Carello, C., Anderson, K. L., Kunkler-Peck, A. J. (1998). Perception of object length by sound. *Psychological Science, 9*(3), 211-214.

Cavaco, S., Lewicki, M. S. (2207). Statistical modeling of instrinsic structures in impacts sounds. *Journal of Acoustical Society of America, 121*(6), 3558-3568.

Chaigne, A., Doutaut, V. (1997). Numerical simulations of xylophones. I. Time-domain modeling of the vibrating bars. *Journal of the Acoustical Society of America, 101*(1), 539-557.

Champagne, A. J., Amman, S. A. (1995). Vehicle closure sound quality. *SAE Transaction 1995,* 1109-1114.

Champagne, A. J., Amman, S. A. (1997). Measures to quantify the sharpness of vehicle closure sounds. *SAE Transaction 1997,* 321-324.

Cornillon, P-A., Matzner-Lober, E. (2007). *Régression Théorie et applications*. Springer-Verlag France, Paris. Collection Statistique et probabilités appliquées.

Dagnelie, P. (2003). *Principes d'expérimentation. Planification des expériences et analyse de leurs résultats.* Presses agronomiques de Gembloux ISBN 2-87016-069-0.

De Cheveigné, A. *Structure du système auditif périphérique.* Cours de Master Recherche en sciences cognitives (2006).

Edeline, J-M. *Le système thalamo-cortical : anatomie, propriétés neuronales et plasticité fonctionnelle.* Cours de Master Recherche en sciences cognitives (2006).

Ellermeier, W., Legarth, S. V. (2006). Visual biais in subjective assesments of automotive sounds. *Euronoise 2006,* 30 May – 1 June, Tampere, Finland.

Fastl, H. (1997). The psychoacoustics of sound-quality evaluation. *Acta Acustica united with Acustica, 83,* 754-764.

Flandrin, http://perso.ens-lyon.fr/patrick.flandrin/emd.html

Flandrin, P. Rilling G., Gonçavels, P. (2004). Empirical Mode Decomposition as a Filter Bank. *IEEE signal processing letters*, *11*(2), 112-114.

Flandrin, P., Goncalves, P. (2004). Empirical Mode Decompositions as a Data-Driven Wavelet-Like Expansions. *Int. J. of Wavelets, Multires. and Info. Proc., 2*(4), 477-496.

Freed, D. J. (1990). Auditory correlates of perceived mallet hardness for a set of recorded percussive sound events. *Journal of Acoustical Society of America, 87*(1), 331-322.

Fridrich, R. J. (1999). Percentile frequency method for evaluating impulsive sounds. *SAE, Noise and Vibration Conference and Exposition 1999.*

Fridrich, R. J. (2002). Percentile frequency method and Zwicker Loudness. I*nternoise 2002,* Dearborn, Michigan.

Gaver, W. W. (1993). What in the world do we Hear ? An ecological approach to auditory event perception. *Ecological Psychology, 5*(1), 1-29.

Gaver, W. W. (1993). How do we Hear in the world? Explorations in Ecologocal Acoustics. *Ecological Psychology, 5*(4), 285-313.

Gibson, J. J. The ecological approach to visual perception. *Boston : Houghton Mifflin, 1979.*

Giordano, B. L., Petrini, K. (2003). Hardness recognition in synthetic sounds. *Proceedings of the Stockholm Music Acoustics Conference,* Stockholm, 2003.

Giordano, B. L. (2005). *Sound source perception in impacts sounds.* Thèse de doctorat, 2005.

Giordano, L. B., McAdams, S. (2006). Material identification of real impact sounds: Effects of size variation in steel, glass, wood, and plexiglass plates. *Journal of Acoustical Society of America, 119*(2), 1171-1181.

Glasberg, B. R., Moore, C. J. (2000). Frequency selectivity as a function of level and frequency measured with uniformely exciting notched noise. *Journal of Acoustical Society of America, 108*(5), 2318-2328.

Glasberg, B. R., Moore, B. C. J. (2002). A model of Loudness applicable to time-varying sounds. *J. Audio Engineering Society, 50*(5)*,* 331-342.

Grey, J. M. (1997). Multidimensional perceptual scaling of musical timbres. *Journal of Acoustical Society of America, 61*(5)*,* 1270-1277*.*

Guastavino, C., Katz, B., Polack, J-D., Levitin, D. J., Dubois, D. (2005). Ecological validity of soundscape reproduction. *Acta Acustica united with Acustica, 91,* 333-341

Guillemain. P., Kronland-martinet , R. (1996). Characterization of acoustic signals through continuous linear time-frquency representations. Proceedings of the *IEEE, Special issue on wavelets, 84*(4), 561-585.

Guski, R. (1997). Psychological methods for evaluating sound quality and assessing acoustic information. *Acta acustica*, *83*, 765-774.

Gygi, B., Kidd, G. R., Watson, S. (2004). Spectral-temporal factors in the identification of environmental sounds. *Journal of Acoustical Society of America, 115*(3), 1252-1265.

Hamilton, D. (1999). Sound quality of impulsive noises: an applied study of automotive door closing sounds. *SAE, Noise and vibration conference and exposition,* 1999.

Herrera, P., Peeters, G., Dubnov, S. (2003). Automatic classification of musical instrument sounds. *Journal of New Musical Research, 31*(1), Mars, 2003*.*

Houix, O., McAdams, S., Caussé, R. (1999). Auditory categorization of sound sources. In *Studies in Perception and Action, edited by M. A. Grealy and J. A. Thomson (Lawrence Erlbaum Associates, Mahwah, NJ),* Vol. V, 47-51.

Huang, N. E., Shen, Z., Long, S.R., Wu, M.L., Shih, H.H., Zheng, Q., Yen, N.C., Tung, C.C., Liu, H. H. (1998). *The empirical mode decomposition and Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis*, Proc. Roy. Soc. London A, 454, 903–995.

Irino, I., Patterson, R. D. (1997). A time-domain, level-dependent auditory filter: the gammachirp. *Journal of Acoustical Society of America, 101*(1), 412-419.

Irino, I., Patterson, R. D. (2001). A compressive gammachirp auditory filter for both physiological and psychological data. *Journal of Acoustical Society of America, 109*(5), 2008-2022.

Irino, I., Patterson, R. D. (2006). Dynamic, compressive gammachirp auditory filterbank for perceptual signal processing. *ICASSP*, 2006.

Jaillet, F. (2005). *Représentation et traitements temps-fréquence des signaux audionumériques pour des applications de design sonore,* Thèse de doctorat.

Johansson, A-C., Hammer, P., Nilsson E. (2004). Prediction of subjective response from objective measurements applied to walking sound. *Acta Acustica united with Acustica, 90*, 161-170.

Klatzky, R. L., Pai, D. K., Krotkov, E. P. (2000). Perception of material from contact sounds. *Presence: Teleoperators and Virtual Environment, 9*(4), 399-410.

Kohler, E., Keysers, C., Umilta, M. A., Fogassi, L., Gallese, V., Rizzolatti, G. (2002). Hearing sounds, understanding actions: Action representation in mirror neurons. *Science, Vol. 297*, 846-848.

Kronland-martinet, R., Guillemain, P., Ystad, S. (1997). Modelling of natural sounds by time-frequency and wavelet representations. *Organised sounds, 2*(3), 179-191.

Kuwano, S., Fastl, H., Namba, S., Nakamura, S., Uchida, H. (2002). Subjective evaluation of car door sound. *Sound Quality Symposium 2002,* Dearborn, Michigan.

Lageat, T., (2004). Sensory marketing : Designing pleasurable products. *Journal of Dongha University*, *21*(3), 26-30.

Lakatos, S., McAdams, S., Caussé, R. (1997). The representation of auditory source characteristics : simple geometric form. *Perception and Psychophysics, 59*, 1180-1190.

Lemaitre, G., Susini, P., Winsberg, S., McAdams, S. (2007). The Sound Quality of Car Horns : A Psychoacoustical Study of Timbre. *Acta Acustica United With Acustica, 93*, 457-468.

Li, X., Logan, J. R., Pastore, R. E. (1991). Perception of acoustic source characteristics: walking sounds. *Journal of Acoustical Society of America, 90*(6), 3036-3049.

Liberman A. M., Mattlingly I. (1985). The motor theory of speech perception revisited. *Cognition*, *21*, 1-36.

Liénard, J. S. Variabilité et multicatégorisation. In *Invariants et variabilité dans les sciences cognitives.* Presses de la maison des sciences de l'homme, Paris, 2002.

Lindsay P. H., Norman D. P. (1977). *Human information processing: An introduction to psychology*, New-York, Academic Press, 2nd ed.

Lufti, R. A., Oh, E. L. (1997). Auditory discrimination of material changes in a struck-clamped bar. *Journal of Acoustical Society of America*, *102*(6), 3647-3656.

Lufti, R. A., Oh, E., Storm, E., Alaexander J. M. (2005). Classification and identification of recorded and synthesized impact sounds by practiced listeners, musicians, and nonmusicians. *Journal of Acoustical Society of America*, *118*(1), 393-404.

Malen, D. E., Hancock, M. (1995). Engineering for the customer : combining preference and physical system models. Part II – application. *Journal of Engineering Design, 6*(4)*,* 329-341.

Malen, D. E., Scott, R. A. (1993). Imporiving automotive door-closign sound for customer preference. *Noise Control Engineering Journal*, *41*(1), 261-271

Masson, M., Denoeux, T. (2005). *Modélisation de la qualité perçue*. Laboratoire Heudiasyc - UTC Compiègne. Rapport interne.

McAdams, S. (1994). La reconnaissance de sources et d'évènements sonores. In *Penser les sons. Psychologie cognitive de l'audition,* Chapitre VI, PUF.

McAdams, S., Chaigne, A., Roussarie, V. (2004). Psychomechanics of simulated sound sources. *Journal of Acoustical Society of America, 115*(3), 1306-1320.

Merhabian, A., Russel, J. A. (1974). *An approach to environmental psychology.* Cambridge, MA; MIT Press.

Mickaels, C.F., Carello, C. (1981). *Direct perception.* Englewood Cliffs, New-Jersey : Prentice-Hall.

Moore, B. C. J. (2003). *An introduction to the psychology of hearing.* Academic Press, 2003.

Moore, B. C. J., Glasberg, B. R. (1983). Suggested formulae for calculating auditory-filter bandwiths and excitation patterns. *Journal of Acoustical Society of America, 74*(3)*,* 750-753.

Osgood, C. E. (1952). The nature and measurement of meaning. *Psychological Bulletin*, *49*, 197-237.

Parizet, E. Koehl, V. (2006). Categorisation: A useful tool for applied perceptive studies. *Euronoise 2006,* 30 May – 1 June, Tampere, Finland.

Parizet, E., Guyader, E. Nosulenko, V. (2007). Analysis of car door closing sound quality. *Applied Acoustics,* In press.

Parizet, E., Langlois, S., Richard, F. (2007). Dissimilarity ratings of in-car sounds: comparison between in-situ and laboratory experiments. *Proceedings of the 19th Intenational Congress on Acoustics,* 2-7 September 2007, Madrid, Spain.

Patterson, R. D., Holdsworth, J., Nimmo-Smitch, I., Rice, P. (1987). SVOS Final Report: *The auditory filterbank*. APU Report 2341.

Patterson, R. D., Allerhand, M., Giguère, C. (1995). Time-domain modelling of peripherical auditory processing: A modular architecture and a software platform. *Journal of Acoustical Society of America, 98*(4)*,* 1890-1894*.*

Patterson, R. D., Unoki, M., Irino, T. (2003). Extending the domain of center frequencies for the compressive gammachirp auditory filter. *Journal of Acoustical Society of America, 114*(3), 1529-1542.

Peeters, G. (2003). Automatic classification of large musical instrument databases using hierarchical classifiers with inertia ratio maximization. *Audio Engineering Society*, 115th convention, New-York, NY, USA, October 10-13, 2003.

Petiot, J-F., Caussé, R. (2007). Qualité sonore de violoncelles – Etude perceptive et analyse signal. *Journées fondatrices Perception Sonore,* 18-19 janvier 2007, INSA Lyon.

Petniunas, A., Otto, N. C., Amman, S., Simpson, R. (1999). Door system desgin for improved closure sound quality. *SAE, Noise and vibration conference and exposition,* 1999.

Pizzamiglio, L., Aprile, T., Spinoti, G., Pitzalis, S., Bates, E., D'Amico, S., Di Russo, F. (2005). Separate neural systems for processing action- or non-action-related sounds. *NeuroImage, 24*, 852-861.

Poirson, E. (2005). *Prise en compte de l'utilisateur en conception produit. Application aux instruments de musique de type cuivre.* Thèse de doctorat en mécanique.

Repp, B. H. (1987). The Sound of two hands clapping: an exploratory study. *Journal of Acoustical Society of America, 81*(4)*,* 1100-1109.

Rizzolatti, G., Fogassi, L., & Gallese, V. (2001). Neurophysiological mechanisms underlying the understanding and imitation of action. *Nature Review Neuroscience, 2*, 661-670.

Roebel, A. (2003). A new approach to transient processing in phase vocoder. *Proceedings of the 6th International Conference on Digital Audio Effects (DAFx-03),* London, UK, September 8-11, 2003.

Rosen, S., Baker, R. J. (1994). Characterizing auditory filter nonlinearity. *Hearing Research, 73*, 231-243.

Roussarie, Vincent. (1999). Analyse perceptive de structures vibrantes simulées par modèle physique. *Thèse de doctorat en acoustique, Université du Maine, 1999.*

Roussarie, V, Richard, F., Bezat, M-C. (2004). Perceptive qualification of engine sound character. Validation of auditory attributes using analysis synthesis method. *CFA/DAGA'04,* Strasbourg, 22-25/03/2004.

Roussarie, V., Bezat, M-C. How do we hear door closure sounds ? *à soumettre*.

Rosch E. (1978). Principles of categorization. In Eleanor Rosch et Barbara B. Lloyd, éditeurs, *Cognition and Categorization*, chapitre 2, pages 27-48. Lawrence Erlbaum Associates, 1978.

Rilling, G, Décomposition Modale Empirique, these en cours.

Scholl, D., Amman, S. (1999). A new wavelet technique for transient sound visualization and application to automotive door closing events. *SAE, Noise and Vibration Conference and Exposition 1999.*

Scholl, D., Yang, B. (2003). Wavelet-based visualization, separation, and synthesis tools for sound quality of impulsive noises. *SAE, Noise and Vibration Conference and Exposition 2003.*

Sellerbeck, P., Stanley, R., Young, S. (2004). Binaural Transfert Path Analysis and simulation for door opening/closure sound improvement. *Internoise 2004.*

Sköld, A., Västfjäll, D., Kleiner, M. (2005). Perceived sound character and objective properties of powertrain noise in car compartments. *Acta Acustica united with Acustica, 91*, 349-355

Smith, J. O., van Duyne, S. A. (1995). Commuted piano synthesis. *Proceedings of the International Computer Music Conference*, Banff, Canada, 319-326.

Stautner, J. P. (1983). *Analysis and synthesis of music using the auditory transform.* M.S. Thesis, Dept. of Electrical Engineering and Computer Science, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA.

Steiglitz, K., McBride, L.E. (1965). A technique for the identification of linear systems, *IEEE Trans. Automatic Control,* AC-10, 461-464.

Susini, P., McAdams, S., Winsberg, S., Perry, I., Vieillard, S., Rodet, X. (2004). Characterizing the sound quality of air-conditioning noise. *Applied Acoustics*.

Traube, C., Depalle, P. (2004). Timbral analogies between vowels and plucked strings tones. *Proceedings of the International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing* (ICASSP04), Montreal, Quebec, Canada, 17-21 May 2004.

Traube, C., D'Alessandro, N. (2005). Synthèse de l'imitation vocale et representation graphique des gestes phonétiques sous-jacents à la description du timbre de la guitare classique. *Proceedings of the Conference on Interdisciplinarity Musicology*, Montréal Canada (CIM05)

Tucker, S., Brown, G. J. (2002). Investigating the perception of the size, shape and material of damped and free vibrating plates. *Technical Report* CS-02-10.

Västfjjäll, D. (2004). Contextual influences on sound quality evaluation. *Acta Acustica united with Acustica, 90,* 1029-1036

Van den Doel, K., Pai, D. K. (1996). The sounds of physical shapes. *Presence, 7*(4)*,* 382-395.

Västfjäll , D., Gulbol, M-A., Kleiner, M., Gärling, T. (2002). Affective evaluation of and reactions to exterior and interior vehicle auditory quality. *Journal of Sound and Vibration, 255*(3), 501-518.

Västfjäll, D. (2002). Emotion in Sound Design. *Journées du Design sonore,* Paris, 2002.

Viollion, S., Lavandier, C., Drake, C. (2002). Influence visual setting on sound ratings in an urban environement. *Applied acoustics*, *63*, 293-511.

Warren & Verbrugge, (1984). Auditory perception of breaking and bouncing events: a case study in ecological acoustics. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance, 10*(5)*,* 704-712.

Wildes, R., Richards, W. (1988). Recovering material properties from sound. In W. Richards (Ed.), *Natural computation* (p. 356-363). Cambridge, MA : MIT Press.

Zwicker, E., Fastl, H. (1990). *Psycho-acoustics. Facts and models*. 2nd ed. (Springer Verlag, New-York)