

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE
Faculté de génie
Département de génie mécanique

ÉTUDE ET OPTIMISATION DE LA
QUALITÉ SONORE D'UN VÉHICULE
RÉCRÉATIF MOTORISÉ

Mémoire de maîtrise
Spécialité : génie mécanique

Abdelghani BENGHANEM

Jury : Alain BERRY (directeur)
Philippe-Aubert GAUTHIER
Nouredine ATALLA
Max RICHER

RÉSUMÉ

La qualité sonore (QS) est un facteur important dans la conception et pour la perception des produits, notamment dans le cas des véhicules. Il est donc fondamental d'étudier la qualité sonore des véhicules récréatifs motorisés. L'objectif est d'étudier le bruit généré par un véhicule récréatif motorisé (VRM) et de rendre ce dernier plus agréable pour le conducteur afin de rajouter plus de plaisir à l'expérience de conduite. Le projet est basé sur trois volets importants. Le premier volet consiste à identifier les paramètres physiques des différents composants acoustiques d'un véhicule récréatif motorisé, de conduire des tests d'écoute et d'en faire une étude statistique. Pour ce faire, plusieurs bases de données ont été déjà établies par des enregistrements binauraux correspondants à la position du pilote. Le deuxième volet consiste à définir une méthode de prédiction des résultats de tests d'écoute de préférence par des indicateurs psychoacoustiques dits objectifs, issus des signaux mesurés pour les tests d'écoute de préférence. L'originalité de cette partie est l'utilisation des méthodes statistiques de régression linéaire multiple pour la conception du modèle perceptif, et notamment l'algorithme *Lasso* qui permet la création de modèles de prédiction de qualité sonore parcimonieux. Le troisième volet consiste à concevoir un dispositif de modification et d'amélioration du son moteur, par filtrage numérique des signaux binauraux, puis étudier son effet à partir de la reproduction de sons simulés et mesurés.

Mots-clés : Qualité sonore, test d'écoute, technique d'enregistrement binaural, caractéristiques de sons (sonie, sonie globale, acuité), psychoacoustique, analyse statistique de test d'écoute (analyse de la variance, regroupement), modèles de régression simple et multiple.

REMERCIEMENTS

Ce mémoire est le résultat d'un travail de recherche de plusieurs mois. Il a été possible grâce au concours de plusieurs personnes à qui je voudrais témoigner toute ma reconnaissance.

Mes remerciements vont tout d'abord au professeur Alain Berry, mon directeur de maîtrise. Merci de m'avoir fait confiance pour faire cette maîtrise, de m'avoir suivi durant ces deux années et de m'avoir financé pour l'élaboration de ce travail. Merci pour tes précieux enseignements, pour ta disponibilité et pour ta générosité.

Merci au professeur Philippe-Aubert Gauthier de m'avoir fourni les outils nécessaires à la réussite de mes études et recherches. Merci pour tes judicieux conseils, pour tes corrections, pour ton suivi tout au long de mon programme et pour ton support inestimable.

Merci à toute l'équipe du laboratoire GAUS (Groupe d'Acoustique de l'Université de Sherbrooke) et du CTA (Centre de Technologies Avancées), plus spécifiquement le groupe du projet dSkibel. Merci à Olivier Robin et Remy Oddo pour leur support technique.

Merci à tous les enseignants et étudiants qui m'ont côtoyé durant ces deux années de maîtrise.

Merci à mon père Mustapha et ma mère Nadia qui m'encouragent toujours de faire des études supérieures! Merci à mes soeurs Amel, Houda, Nadjiba, Loubna et Jihan pour leur soutien et à mon frère Adel pour avoir continué de veiller sur la famille en mon absence.

Merci à tous mes amis : Boussad, Halim, Massinissa, Matti, Mourad, Nabil, Nacer et tous ceux et celles que je ne cite pas ici.

Enfin, merci à mes colocs et potes : Benjamin et Steve de la maison 1473 à Sherbrooke, pour votre soutien et pour les moments de folie inoubliables!!

TABLE DES MATIÈRES

1	INTRODUCTION	1
1.1	Introduction	1
1.1.1	Contexte	1
1.1.2	Problématique	1
1.1.3	Méthode	2
1.1.4	Positionnement de la maîtrise dans un projet global sur l'acoustique d'un véhicule récréatif motorisé	3
1.2	État de l'art	4
1.2.1	Définition de la qualité sonore	5
1.2.2	Méthodes expérimentales pour la réalisation de tests d'écoute et de tests perceptifs	6
1.2.3	Analyse statistique des tests d'écoutes	9
1.2.4	Prédiction de qualité sonore	13
1.2.5	Plan d'expérience (DOE)	20
1.3	Revue des technologies existantes pour design sonore	22
1.4	Revue des travaux passés dans le cadre de dSkibel	23
1.5	Problématique et objectifs	24
1.5.1	Question de recherche	24
1.5.2	Objectif global	24
1.5.3	Objectifs spécifiques	24
1.5.4	Hypothèses ou approches proposées	25
1.6	Méthodologie	25
1.7	Conclusion	26
2	ÉTUDES PRÉLIMINAIRES DE LA QUALITÉ SONORE : PRÉDIC- TION ET IDENTIFICATION DES FACTEURS DOMINANTS	27
2.1	Introduction	27
2.2	Tests d'écoute basés sur des enregistrements sur véhicule récréatif motorisé en accélération	28
2.2.1	Liste du matériel	28
2.2.2	Plan d'expérience	28
2.2.3	Modifications virtuelles	29
2.2.4	Égalisation du gain de la réponse en fréquence du casque d'écoute	29
2.2.5	Égalisation en sonie globale	30
2.2.6	Durée de l'échantillon	30
2.2.7	Nombre d'échantillons	31
2.2.8	Test par comparaison de paires (Test AB)	31
2.3	Analyse statistique des résultats de tests d'écoute	32
2.3.1	Regroupement des participants	32
2.4	Modèle prédictif de qualité sonore	33
2.5	Résultats de prédiction des valeurs de mérite	36

2.6	Conclusion	38
3	ÉTUDE DE LA QUALITÉ SONORE D'UN NOUVEAU VÉHICULE	39
3.1	Introduction	39
3.2	Mesures acoustiques sur le nouveau VRM	39
3.2.1	Campagne de mesures	40
3.3	Prédiction préliminaire de la qualité sonore du nouveau véhicule récréatif motorisé (B)	41
3.4	Évaluation de la qualité sonore de modifications virtuelles du son d'accélération du VRM (B)	42
3.4.1	Préparation des échantillons sonores pour la prédiction	42
3.4.2	Prédiction de la qualité sonore du VRM (B) (pour les 16 variantes de l'échantillon)	43
3.5	Conclusion	46
4	PRÉDICTION ET OPTIMISATION DE LA QUALITÉ SONORE	47
4.1	Introduction	47
4.2	Préparation et réalisation de tests d'écoutes	48
4.2.1	Liste du matériel	48
4.2.2	Plan d'expérience	48
4.2.3	Sélection du plan d'expérience	50
4.2.4	Modifications virtuelles	51
4.2.5	Égalisation en sonie	52
4.2.6	Validation de la reproduction du son	52
4.2.7	Réalisation des tests d'écoute	54
4.3	Résultats des tests d'écoutes	58
4.3.1	Le rejet particulier de participants	58
4.3.2	Répétabilité des participants	58
4.3.3	Diagramme en boîte du compte total	59
4.3.4	Analyse de variance à un degré de liberté	60
4.3.5	Valeurs de mérite pour tous les participants	61
4.3.6	Regroupement des participants par grappes	63
4.3.7	Valeurs de mérite par grappe	65
4.4	Modèles de prédiction de qualité sonore	68
4.5	Résultats de prédiction de qualité sonore	71
4.5.1	Recommandations techniques	76
4.6	Conclusion	77
5	PROTOTYPE VIRTUEL DE MODIFICATION OPTIMALE DU SON	79
5.1	Introduction	79
5.2	Stratégie proposée pour le design sonore	80
5.2.1	Diagramme bloc du son d'un véhicule récréatif motorisé perçu par le pilote	80
5.2.2	Stratégie proposée pour le design de la qualité sonore	80
5.3	Mise en équation du problème	81

5.4	Les équations de propagation et de prédiction énergétique	83
5.4.1	Exemple de source monopolaire	84
5.4.2	Puissance acoustique	85
5.4.3	Caractérisation et modélisation de la source	86
5.5	Simulations du prototype d'amélioration de la qualité sonore : théorie . . .	90
5.5.1	Dispositif d'amélioration de la qualité sonore	90
5.5.2	Le bloc Simulink	91
5.5.3	Le bloc phaseur	91
5.5.4	Filtre optimal de Wiener	93
5.5.5	Le système acoustique	94
5.5.6	Le haut-parleur	95
5.5.7	Le système acoustique combiné	97
5.6	Simulations du prototype d'amélioration de la qualité sonore : validation pour des signaux fictifs	97
5.6.1	Signaux d'entrée du dispositif (signaux fictifs)	98
5.6.2	Amplitudes des harmoniques du signal de synthèse	98
5.6.3	Signal de commande du haut-parleur	100
5.6.4	Reconstruction par le système acoustique combiné	100
5.7	Simulations du prototype d'amélioration de la qualité sonore : validation pour des signaux mesurés	103
5.7.1	Signaux d'entrée du dispositif (signaux mesurés)	104
5.7.2	Le signal phaseur	104
5.7.3	Amplitudes des harmoniques du signal de synthèse	104
5.7.4	La table de correspondance	106
5.7.5	Le filtre optimal de Wiener	106
5.7.6	Signal de commande du haut-parleur	106
5.7.7	Reconstruction par le système acoustique	107
5.8	Limites du dispositif et recommandations	111
5.9	Conclusion	112
6	CONCLUSION ET PERSPECTIVES	113
A	Spécifications du haut-parleur	115
B	Réponses à l'impulsion de propagation acoustique et du système acous- tique combiné	117
C	Signal d'entrée du dispositif	119
	LISTE DES RÉFÉRENCES	122

LISTE DES FIGURES

1.1	Exemple de représentation graphique du diagramme en boîte.	11
1.2	Design composite central circonscrit pour deux facteurs.	21
2.1	Exemple d'égalisation en sonie globale de « Run 16 » en prenant « Run 1 » comme référence	31
2.2	Regroupement par grappes pour tous les participants.	33
2.3	Valeurs de mérite et valeurs de mérite prédites en fonction du DOE.	37
3.1	Spectrogramme de l'enregistrement original du VRM (B)	43
3.2	Valeurs de mérite prédites en fonction du DOE pour le nouveau véhicule.	45
4.1	Différence entre un plan d'expérience à deux niveaux (gauche) et un plan d'expérience à 5 niveaux	50
4.2	Exemple d'égalisation en sonie globale, égalisation du son « Essai 12 » (« Run1 ») en utilisant « Essai 1 » (« Run1 ») comme référence	53
4.3	Montage du mannequin, du casque d'écoute et des microphones binauraux.	54
4.4	Spectres originaux et reproduits des échantillons égalisés en sonie globale et égalisé pour le casque d'écoute ((a) Essai 1 à (f) Essai 6).	55
4.5	[Spectres originaux et reproduits des échantillons égalisés en sonie globale et égalisé pour le casque d'écoute ((a) Essai 7 à (f) Essai 12)	56
4.6	Interface graphique utilisée pour les tests d'écoute par comparaison de paires avec choix forcé.	57
4.7	Répétabilité de chaque participant et répétabilité moyenne	58
4.8	Diagramme en boîte des échantillons sonores pour le compte total des par- ticipants.	59
4.9	Valeurs de mérite v_i des 12 échantillons sonores à partir des réponses de tous les participants	61
4.10	Représentation surfacique des valeurs de mérites à partir des réponses de tous les participants dans l'espace à deux dimensions des deux facteurs du DOE.	62
4.11	Regroupement des participants.	63
4.12	Diagramme en boîte des échantillons sonores pour le compte total des par- ticipants de la grappe 1.	65
4.13	Diagramme en boîte des échantillons sonores pour le compte total des par- ticipants de la grappe 2.	65
4.14	Valeurs de mérite v_i pour la grappe 1	66
4.15	Représentation surfacique des valeurs de mérite à partir des réponses de la grappe 1 dans l'espace à deux dimensions des deux facteurs du DOE.	67
4.16	Valeurs de mérite v_i pour la grappe 2	68
4.17	Représentation surfacique des valeurs de mérite à partir des réponses de la grappe 2 dans l'espace à deux dimensions des deux facteurs du DOE.	69

4.18	Valeurs de mérite et valeurs de mérite prédites à partir du modèle QS basé sur les réponses de tous les participants.	72
4.19	Valeurs de mérite et valeurs de mérite prédites à partir du modèle QS basé sur les réponses des participants de la grappe 1.	72
4.20	Valeurs de mérite et valeurs de mérite prédites à partir du modèle QS basé sur les réponses des participants de la grappe 2.	73
4.21	Surface de valeurs de mérite prédites à partir du modèle QS basé sur les réponses de tous les participants	74
4.22	Surface de valeurs de mérite prédites à partir du modèle QS basé sur les réponses des participants de la première grappe	75
4.23	Surface de valeurs de mérite prédites à partir du modèle QS basé sur les réponses des participants de la deuxième grappe	76
4.24	Valeurs des gains optimaux pour chaque grappe et pour tous les participants et zones de gains pratiques.	77
5.1	Diagramme en blocs de N sources acoustiques.	81
5.2	Diagramme en bloc du système de modification du son au pilote représentant une source m ajoutée à la figure 5.1.	82
5.3	Circuit électrique d'un haut-parleur à bobine.	87
5.4	Diagramme bloc du dispositif d'amélioration de la qualité sonore.	91
5.5	Traitement du signal dans le bloc Simulink.	92
5.6	Diagramme bloc du phaseur dans Simulink.	93
5.7	Présentation du système acoustique.	94
5.8	FRF du système acoustique et FRF du système acoustique inverse, canal gauche.	95
5.9	Impédances théoriques du haut-parleur à partir des spécifications du fabricant : (a) Impédance mécanique (Éq. (5.29)). (b) Impédance électrique (Éq. (5.31)).	96
5.10	Fonction de transfert vitesse/tension et réponse à l'impulsion du haut-parleur	96
5.11	FRF du système combiné et FRF du système combiné inverse, canal gauche.	97
5.12	Courbe RPM pour le cas de signaux fictifs.	98
5.13	Amplitudes moyennes des harmoniques pour le cas de signaux fictifs.	99
5.14	Signal de contrôle $U(t)$ du haut-parleur pour le cas de signaux fictifs.	100
5.15	Reconstruction du signal de synthèse à l'extérieur du casque pour le cas de signaux fictifs	101
5.16	Reconstruction du signal désiré et comparaison au signal désiré pour le cas de signaux fictifs.	102
5.17	Estimation de la densité spectrale de puissance de Welch du signal amélioré, du signal désiré et du signal de référence pour le cas de signaux fictifs.	103
5.18	Courbe RPM du moteur et portion du phaseur pour le cas de signaux mesurés.	105
5.19	Amplitudes moyennes des harmoniques étudiées du signal de différence au casque du pilote.	105
5.20	Le graphe de la table de correspondance (LUT) pour le cas de signaux mesurés.	106

5.21	Fonction de transfert et réponse à l'impulsion du filtre de Wiener pour le cas de signaux mesurés.	107
5.22	Signal de contrôle $U(t)$ du haut-parleur pour le cas de signaux mesurés. . .	107
5.23	Reconstruction du signal de différence pour le cas de signaux mesurés. . . .	108
5.24	Reconstruction du signal désiré et comparaison au signal désiré pour le cas de signaux mesurés.	109
5.25	Estimation de la densité spectrale de puissance de Welch du signal amélioré, du signal désiré et du signal de référence pour le cas de signaux mesurés. .	110
A.1	Spécifications du haut-parleur « PLS-65F25AL04-04 »	116
B.1	Réponse à l'impulsion du système acoustique et système acoustique inverse, canal gauche	117
B.2	Réponse à l'impulsion du système combiné et réponse à l'impulsion du système combiné inverse, canal gauche.	118
C.1	Entrée du dispositif pour le cas de signaux fictifs, basé sur les (Gauche/Droite)	120
C.2	Signaux d'entrée du dispositif pour le cas de signaux mesurés (Gauche/Droite)	121

LISTE DES TABLEAUX

1.1	Outils de qualité sonore développés pour le projet dSkibel.	4
2.1	Modèle 1 : modèle de prédiction de QS basé sur l'association des participants cohérents des grappes du G1 et du G2 en utilisant tous les métriques et facteurs comme prédicteurs potentiels (191 métriques et facteurs).	34
2.2	Modèle 2 : modèle de prédiction de QS basé sur l'association des participants cohérents des grappes du G1 et du G2 en utilisant seulement les 141 métriques et facteurs comme prédicteurs potentiels.	36
3.1	Valeur de mérite du son du VRM (B) comparée à la valeur de mérite du son du VRM (A).	41
3.2	Liste des sons et des niveaux pour chaque facteur.	44
4.1	Scénarios pour DOE à un facteur et dix niveaux.	49
4.2	Scénarios pour DOE à deux facteurs et cinq niveaux par facteur.	49
4.3	Plan d'expérience. Valeurs de gains de chaque facteur pour chaque essai et chaque son résultant.	51
4.4	Resultats d'ANOVA1 pour le compte de tous les participants.	60
4.5	Résultats d'ANOVA1 pour le compte de la grappe 1.	64
4.6	Résultats d'ANOVA1 pour le compte de la grappe 2.	64
4.7	Modèle de QS basé sur tous les participants.	70
4.8	Modèle de QS basé sur la grappe 1.	70
4.9	Modèle de QS basé sur la grappe 2.	71
5.1	Tableau de description des termes utilisés dans la modélisation.	88

LEXIQUE

Termes techniques (ou en anglais)	Définitions ou traductions
<i>Clustering</i>	Regroupement par grappes
<i>Stepwise regression</i>	Régression par étapes
<i>Ridge regression</i>	Régression d'arête
<i>Linear mapping</i>	Cartographie linéaire
<i>Template</i>	Modèle de conception
« MIRtoolbox »	Librairie de fonctions MIR
<i>Idle</i>	Tourne au ralenti
« Rumble »	Vrombissement de basse fréquence
« HiFreq »	Harmoniques hautes du moteur
« LoFreq »	Harmoniques basses du moteur
« Traction »	Groupe de composants de roulement
<i>Box plot</i>	Diagramme en boîte
<i>Count</i>	Compte total
« spectral brightness »	Brillance du son
« spectral_brightness_Std »	Écart type de la brillance du son
« spectral_brightness_Slope »	Pente de la brillance du son
« ThirdOctave »	Tiers d'octaves
« specific loudness per Bark scale »	Sonie spécifique sur l'échelle de Bark
« third-octave-band spectrum »	Spectre en bande par tiers d'octave
« Estimate »	Valeur correspondante du coefficient estimé
« Intercept »	Ordonnée à l'origine
« tonal_chromagram_centroid_PeriodEntropy »	Périodicité de la variation stochastique de la tonalité
<i>Notch</i>	Filtre de gain négatif (en dB) infini
<i>Peak</i>	Filtre résonant de gain positif ou négatif (en dB) et de gain ajustable
IIR	<i>Infinite impulse response filter</i> : filtre à réponse impulsionnelle infinie
mpe-hc	<i>media player classic home cinema</i>
NaN	<i>Not a Number</i> : pas un nombre

LISTE DES ACRONYMES

Acronymes	Définitions
QS	Qualité Sonore
GAUS	Groupe d'Acoustique de l'Université de Sherbrooke
CRSNG	Conseil de Recherches en Sciences Naturelles et en Génie
BRP	<i>Bombardier Recreational Products</i> : Bombardier Produits Récréatifs
UdeS	Université de Sherbrooke
CTA	Centre de Technologies Avancées
TPA	<i>Transfer Path Analysis</i> : analyse des voies de transfert
ANOVA1	<i>ANalysis Of VAriance, 1 degree of freedom</i> : analyse de variance à un degré de liberté
Valeur-p	Valeur de probabilité
SS	<i>Sums of Square of Error</i> : somme des carrés de l'erreur
SE	L'erreur standard pour l'estimation
t-statistique	Le test de Student
<i>Lasso</i>	<i>Least Absolute Shrinkage and Selection Operator</i>
MIR	<i>Music Information Retrieval</i>
B&K TM	Brüel & Kjær
PDF	<i>Probability Density Function</i> : fonction de densité de probabilité
DOE	<i>Design Of Experiment</i> : plan de l'expérience
CCCD	<i>Circumscribed Central Composite Design</i> : design composite central circonscrit
RPM	<i>Revolutions Per Minute</i> : révolutions par minute
PDA	<i>Personal Digital Assistant</i> : assistant numérique personnel
SPL	<i>Sound Pressure Level</i> : niveau de pression acoustique
mfcc	<i>Mel Frequency Cepstral Coefficient</i> : métrique qui offre une description de la forme spectrale du son (librairie MIR).
periodFreq	La fréquence (en Hertz) de la périodicité maximale détectée dans le cadre par évolution de cadre des valeurs, évaluées au cours du calcul de l'ordre d'autocorrélation (librairie MIR).
periodAmp	L'amplitude normalisée de la périodicité principale, à savoir de telle sorte que l'autocorrélation à décalage nul est identiquement 1.0 (librairie MIR).
periodEntropy	L'entropie Shannon de la fonction d'autocorrélation des métriques d'un échantillon sonore complet. L'entropie Shannon est la quantité d'informations contenues ou livrées d'une source d'information ; plus haut la quantité d'informations, plus haut l'incertitude de ce que les informations sont (librairie MIR).

ASD	<i>Active Sound Design</i> : design sonore actif
HEV	<i>Hybrid Electric Vehicle</i> : véhicules électriques et hybrides
FRF	Fonction de Réponse en Fréquence
LUT	<i>Look-Up Table</i> : table de correspondance
RMS	<i>Root Mean Square</i> : moyenne quadratique
DSP	Densité spectrale de puissance

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

1.1 Introduction

1.1.1 Contexte

L'acoustique est la science du son et du bruit. Dans la majorité des travaux menés, à l'ère industrielle, l'acoustique se fonde sur des mesures physiques de pression acoustique pour réduire le niveau sonore exprimé en décibels, ce qui est attendu généralement par les acheteurs de véhicules. Pourtant, l'acoustique inclut non seulement les aspects physiques du son, mais aussi les aspects perceptifs. Qu'en est-il alors de l'expérience auditive et subjective du client ou de l'utilisateur ? L'objectif derrière une telle question est d'intervenir en amont, dans les phases de conception, pour prendre en compte le ressenti des clients dans le cadre de la psychoacoustique. À présent, la psychoacoustique et la qualité sonore sont deux branches de l'acoustique relativement jeunes qui replacent l'utilisateur et l'auditeur au centre des études acoustiques.

Dans ce contexte général, depuis plusieurs années, les industriels s'intéressent davantage à l'étude de la perception sonore de leurs produits. Pour les véhicules récréatifs, la qualité du son produit devient un facteur important dans la conception des produits puisqu'elle donne une première impression sur la puissance et la solidité du produit. Pour améliorer l'impression de qualité sonore d'un véhicule récréatif motorisé, il est nécessaire de développer une approche spécifique. La qualité sonore du produit est définie comme un descripteur de l'adéquation du son attaché au produit. Ceci est évalué sur la base de la totalité des caractéristiques perçues du son, en référence à l'ensemble des caractéristiques de produit désirables qui sont apparentes dans la situation cognitive et émotionnelle de l'utilisateur [1, 6, 19, 20, 29, 45].

1.1.2 Problématique

Le problème de recherche est de comprendre le jugement subjectif des pilotes sur la perception du son d'un véhicule récréatif motorisé. Comment rendre ce dernier plus agréable et séduisant pour le conducteur afin d'ajouter un caractère sportif et plus d'amusement ?

Les objectifs de cette maîtrise sont : 1) de comprendre les notions générales déployées dans le processus d'étude de qualité sonore des produits, 2) de fournir les méthodes propres à l'étude qui permettront l'apprentissage des divers outils développés durant le projet ainsi que leur application pour évaluer des enregistrements sonores sur un véhicule récréatif motorisé. Un autre objectif de cette étude, suite à l'évaluation de la qualité sonore, est la conception d'un dispositif de modification virtuelle de son qui sera testé numériquement afin de proposer une correction et une amélioration de cette qualité.

1.1.3 Méthode

Dans le contexte du projet dSkibel [2] qui allie le GAUS (Groupe d'Acoustique de l'Université de Sherbrooke) et le CTA (Centre de Technologies Avancées), la partie qualité sonore (QS) repose sur deux volets importants : une partie expérimentale qui permet 1) d'identifier les paramètres physiques de la qualité sonore, 2) l'étude acoustique des différents composants acoustiques d'un véhicule récréatif motorisé, 3) la conduite de tests d'écoute sur des auditeurs ainsi qu'une étude statistique des tests d'écoute. La deuxième partie est de nature théorique et prédictive : elle consiste 1) en la définition d'une méthode de prédiction des résultats de tests d'écoute la plus adéquate, et ce par la construction d'un modèle prédictif de qualité sonore basé sur des indicateurs psychoacoustiques issus des résultats de tests d'écoute, 2) en la conception et le développement d'un dispositif de modification virtuelle pour l'amélioration de la qualité sonore du véhicule récréatif motorisé à partir des résultats de tests d'écoute. Ces volets sont décrits dans les paragraphes qui suivent.

Dans le cadre de cette maîtrise, un test d'écoute est conduit sur un ensemble d'auditeurs qui évaluent une série d'échantillons de sons ou de bruits de véhicule mesurés en situation réelle et de bruits restitués au casque en laboratoire. Les participants évaluent une série d'échantillons selon leurs préférences ou l'acceptabilité du son selon des critères de qualité prédéfinis par les opérateurs. Cette méthode permet donc de quantifier les préférences liées aux attributs audibles du véhicule [5, 15, 17].

Les évaluations en utilisant les scores attribués aux échantillons testés sont un moyen rapide et facile de regarder les résultats. Par contre, il ne sont pas appropriées pour la corrélation avec des métriques objectives. En conséquence, la quantification des jugements perceptifs de la qualité sonore se fait par le biais des « valeurs de mérite » [9, 15, 17, 19, 22, 28, 30, 31, 36, 37].

À la suite des résultats de tests d'écoute, l'objectif est généralement la dérivation d'un modèle prédictif de qualité sonore du véhicule récréatif motorisé en fonction de métriques

ou facteurs donnés afin de réduire la nécessité d'effectuer des tests d'écoute pour chaque étude (ce qui prend beaucoup de temps). Ce modèle prédictif empirique doit être en mesure de prédire les valeurs de mérite mesurées à partir du test d'écoute. De ce fait, le but est de trouver la relation qui donne la plus forte liaison entre les prédicteurs (métriques et facteurs) et la réponse (valeurs de mérite). Les méthodes récentes les plus puissantes pour en tirer des relations entre réponse subjective et caractérisation objective d'un ensemble de stimuli sont la régression linéaire, la régression linéaire multiple, la régression non linéaire et les réseaux neuronaux [16, 17, 36, 37, 41, 43, 44, 47].

La dernière partie de l'étude, consiste à : 1) concevoir un dispositif de modification du son moteur et de modifications virtuelles, par filtrage numérique des signaux binauraux pour introduire ce dispositif, 2) étudier son effet à partir de la reproduction de sons simulés et mesurés. La stratégie est de créer un son de synthèse, puis rajouter ce dernier au son d'origine du véhicule récréatif motorisé. Ainsi, le son résultant devrait approcher le son désiré (son de qualité optimale, tel qu'identifié lors de l'analyse des tests d'écoute).

1.1.4 Positionnement de la maîtrise dans un projet global sur l'acoustique d'un véhicule récréatif motorisé

Ce projet de maîtrise, ayant lieu au GAUS, dans le cadre d'une subvention de Recherche et Développement Collaboratif (CRSNG), en partenariat avec BRP (Bombardier Produits Récréatifs) et le CTA, a pour but de développer et d'intégrer certaines fonctionnalités acoustiques afin d'étudier la qualité du son d'un véhicule récréatif motorisé. Il s'inscrit dans les travaux de recherche effectués au sein de la partie QS dans le cadre du projet dSkibel. Le but général du projet dSkibel [2] porte sur la réduction du bruit d'un véhicule récréatif motorisé tout en tenant compte de la qualité sonore résultante. Le défi tient donc la réduction du bruit de passage pour le respect des législations imposées tout en ne sacrifiant pas l'expérience sonore telle que vécue par le pilote.

Au cours des travaux de recherche de la partie qualité sonore, des outils de mesures, de calculs et de simulations numériques ont été développés et répartis en quatre modules. Le projet de maîtrise se focalise principalement sur le développement et l'utilisation des modules trois et quatre décrits au tableau 1.1.

Tableau 1.1 Outils de qualité sonore développés pour le projet dSkibel.

Module	Description
3. Tests d'écoute et statistiques	Une interface et des outils informatiques pour la réalisation et l'analyse de tests d'écoute de type « comparaison par paires ».
4. Évaluation de métriques psycho-physiques et élaboration de modèles prédictifs de qualité sonore	Ensemble de fonctions calculant les métriques à partir des variantes de son, effectuant ensuite une analyse statistique pour la cartographie entre les métriques et les valeurs de mérite.

1.2 État de l'art

Dans la littérature, on trouve un nombre de plus en plus important d'études portant sur la qualité sonore des produits. Vu la variété des produits et de leurs caractéristiques acoustiques ainsi que la particularité de chaque étude, cela incite le développement de méthodes spécifiques pour chaque application, voire chaque produit. Plusieurs produits ont été étudiés sous l'angle de la qualité sonore : perceuses [17], scies sauteuses et circulaires portatives [17], aspirateurs [30], machines à laver [9], réfrigérateurs [20, 42], moteurs diésel à quatre cylindres [32], lève-vitres électriques d'automobile [35], claquement de porte de voiture [38], et ainsi de suite.

Le design sonore est souvent perçu comme étant la réduction de bruit d'un produit, puisqu'il est généralement supposé que plus le bruit est réduit, plus la qualité du son est meilleure. C'est une approche négative du son et du bruit puisque l'hypothèse derrière une telle conception est que tout bruit de véhicule est globalement désagréable. Ce qui n'est pas toujours le cas. Ainsi, l'abaissement du niveau de pression acoustique des sources dominantes pour un produit peut révéler d'autres sources sonores moins puissantes, mais peut-être moins agréables à l'oreille. Dans certains cas, l'abaissement du niveau de pression sonore global peut effectivement mener à des clients moins satisfaits, même si le produit fonctionne encore : les clients supposent qu'un faible bruit signifie une faible puissance. De plus, l'abaissement du niveau de bruit devient onéreux au-delà d'une certaine valeur [1, 20].

Ce travail s'attache à l'étude de la qualité sonore d'un véhicule récréatif motorisé. Cela n'est pas si simple, il faut au préalable comprendre les événements acoustiques du véhicule récréatif motorisé et disséquer les caractéristiques du son généré avant de passer à l'analyse et à l'évaluation de la qualité du son. En général, l'évaluation de la qualité sonore dans ce type d'application se fait d'abord à partir de tests d'écoute. Par contre, la quantité de temps et d'argent consacrée à la réalisation de ces tests d'écoute avec clients potentiels,

pousse le développement des méthodes de prédiction, dites objectives, des jugements afin de réduire les coûts et d'accélérer les phases de développement. Cette section va fournir une description de l'ensemble de techniques couramment utilisées par les chercheurs dans le domaine de la qualité sonore [30, 31, 36]. Techniques qui seront utilisées et adaptées pour examiner et optimiser la qualité sonore d'un véhicule récréatif motorisé.

1.2.1 Définition de la qualité sonore

Blauert et Jekosch définissent la qualité sonore d'un produit comme un descripteur de l'adéquation du son attaché à ce produit [6]. Ceci est évalué sur la base de la totalité des caractéristiques auditives du son, en référence à l'ensemble des caractéristiques de produit désirables qui sont apparentes dans la situation cognitive et émotionnelle de l'utilisateur [6]. Par conséquent, la qualité du son est un ensemble de caractères, de propriétés ou d'aspects qui font que le son correspond au mieux à ce qu'on attend dans un contexte situationnel donné.

Dans cette étude, la qualité sonore sera donc définie comme la réaction perceptive au son du véhicule récréatif motorisé tel qu'entendu par le pilote. Réaction perceptive qui reflète la réaction de l'auditeur sur l'acceptabilité du son du produit : plus le son est acceptable, voire désirable, plus la qualité sonore est bonne [29].

Les éléments et caractéristiques de qualité sonore

La qualité sonore est un phénomène complexe. Elle est basée sur la perception et donc sur les personnes qui en perçoivent la qualité. Il n'est pas aisé de déterminer la forme et les entités qui définissent la qualité sonore. Afin d'être en mesure de décrire la façon adéquate comment le sujet perçoit la qualité sonore d'un produit, il faut d'abord se familiariser avec deux termes : caractéristique de la qualité et élément de la qualité. Un élément de qualité est un composant dans le processus de mise en forme de la qualité, par exemple, dans la phase de conception ou de fabrication, tandis qu'une caractéristique de qualité est le résultat d'un processus de perception et de jugement [19].

Comme exemple, dans le contexte d'un véhicule récréatif motorisé, un caractère sportif est l'une des caractéristiques de qualité, alors que les éléments de qualité sont les blocs de construction (matériels ou immatériels) pour l'ingénierie de la qualité tels que le choix des matériaux et des composants du véhicule récréatif motorisé.

Les signaux sonores d'un véhicule récréatif motorisé peuvent varier avec les différentes étapes du cycle d'utilisation du véhicule, et ils peuvent être continus, stationnaires ou

irréguliers. Par conséquent, la qualité dépend des besoins et des attentes individuels en fonction de la situation spécifique [19]. Pour cette étude, l'état d'utilisation choisi est celui d'une accélération rapide, ce qui est un son plus représentatif d'une conduite sportive.

Jugement perceptif de la qualité sonore

Le jugement perceptif de la qualité sonore est défini comme le résultat de l'évaluation de la nature auditive perçue d'un son par rapport à sa nature souhaitée. Ainsi, les jugements sont effectués en référence à l'ensemble des caractéristiques souhaitées du produit qui sont évidentes pour les utilisateurs dans leur situation réelle et émotionnelle. Ces jugements auditifs seront recueillis dans le but de les utiliser par la suite pour développer des méthodes pour mesurer et prédire la qualité sonore du produit [19].

Les jugements perceptifs de la qualité sonore d'un véhicule sont basés sur la perception de l'ensemble des caractéristiques acoustiques et de facteurs non acoustiques. Diverses expériences ont montré que les facteurs contextuels ont un effet marqué sur les évaluations de la qualité sonore [45]. Par conséquent, les résultats suggèrent que la recherche et l'industrie doivent tenir compte des facteurs contextuels, il est nécessaire pour un processus de design réussi d'incorporer des caractéristiques de l'utilisateur (en termes de groupes cibles) et des stratégies de marketing (qui induisent des attentes), en plus de la définition de critères de design auditifs, tactiles et visuels [26, 45].

1.2.2 Méthodes expérimentales pour la réalisation de tests d'écoute et de tests perceptifs

La mesure du jugement de la qualité d'un son s'effectue en premier lieu à l'aide de tests d'écoute, ces derniers seront décrits ainsi que la procédure à suivre pour obtenir des mesures objectives des tests d'écoute.

Bien qu'une variété de types de test d'écoute sont possibles dans la recherche et l'industrie (tests de comparaison de paires, test de classement, jugement de catégorie, différentiel sémantique, etc.), chaque méthode a ses avantages et ses inconvénients. Il est à noter qu'aucune méthode ne fonctionne mieux pour toutes les applications. Ainsi, il est important de choisir la méthode qui convient le mieux à l'application.

Cette partie offre un aperçu des types de tests possibles, des environnements de test appropriés et des signaux de test, la sélection des participants aux tests (sujets) et des évaluations de test significatif.

Test de classement (*ranking test*)

Pour la méthode de test basé sur le classement, les participants sont appelés à classer de 1 à N un ensemble de sons (N) selon un critère et un ordre prédéfini (par exemple : gêne croissante, caractère sportif décroissant, etc.). L'inconvénient de ce genre de test est qu'il ne permet que l'obtention d'une impression préliminaire, il ne fournit aucune information à propos de la « distance » entre les sons sur une échelle de qualité sonore. Conséquemment, les résultats d'un test de classement ne sont pas adaptés aux corrélations calculées avec des mesures physiques ou métriques [15]. Toutefois, il est facile et rapide à réaliser.

Jugement de catégorie (*category judgement*)

Pour un test de jugement de catégorie, les échantillons sonores sont présentés un par un au sujet. Puis, le sujet est invité à évaluer le son présenté sur une échelle de catégorie et selon un certain critère. Le critère peut-être, par exemple la netteté du son. L'échelle fréquemment utilisée pour le jugement de bruit dans les véhicules est l'échelle de dix points (1 à 10). Pour des tests d'écoute fondés sur une échelle de catégorie, différents effets de biais peuvent se produire. Par exemple, le jugement d'un son peut être influencé par le son précédent. En outre, il est possible que l'échelle soit utilisée de façon différente par des sujets différents [15].

Différentiel sémantique (*semantic differential*)

Cette méthode a une étape préliminaire. L'expérimentateur doit d'abord rassembler un groupe de discussion et utiliser des outils statistiques pour déterminer les adjectifs qui peuvent le mieux qualifier la qualité sonore du produit étudié. De cette première collecte de termes, l'expérimentateur peut développer un test d'écoute qui utilise les termes identifiés. Par la suite, les sujets évaluent les sons présentés sur la base de plusieurs échelles bipolaires, dont les extrémités sont marquées avec un adjectif et son antonyme, tous deux issus des groupes de discussions réalisés à l'étape préliminaire. Les résultats peuvent être très précis, puisqu'ils fournissent les caractéristiques exactes nécessaires pour atteindre une bonne qualité sonore. De plus, ce type de test utilise un vocabulaire qui reflète la terminologie instinctive des participants au test, qui doivent alors être des clients types. Le jugement sur plusieurs échelles accroît la facilité de trouver des corrélations calculées avec les résultats des mesures physiques ou métriques pour, ultérieurement, prédire les résultats des tests d'écoute fondés sur le différentiel sémantique.

Le principal inconvénient est que le jugement d'un son avec un différentiel sémantique prend beaucoup plus de temps que pour les autres méthodes d'essai. Notamment de par la nécessité de conduire une étape préliminaire de collecte de termes via les groupes de

discussions. Aussi, le nombre d'échantillons sonores et des échelles de jugement ne doivent pas être trop grands, sinon le sujet peut perdre sa concentration au fil du test d'écoute. Ainsi, l'expérience montre qu'un nombre de huit à douze paires d'attributs ne doit pas être dépassé [15, 20].

Tests de comparaison de paires (*AB pairwise comparison tests*)

Les méthodes de comparaison par paires sont celles pour lesquelles des variantes de sons sont présentées par paires (A et B) et les sujets sont appelés à porter un jugement relatif par rapport à une question donnée, avec trois possibilités de réponse : $A > B$, $A = B$, $A < B$. Certains sujets ont tendance à éviter une décision précise et vont ainsi souvent choisir la réponse $A = B$, ce qui rend l'obtention de résultats utiles plus difficile. Ceci peut être évité avec le « choix forcé », variante du test [15, 22, 36] où l'option $A = B$ n'est pas disponible. Cette approche présente plusieurs avantages :

- Elle permet de forcer la construction différentielle du classement à la place du classement manuel (comme pour le *ranking test*).
- En cas de sons similaires, s'il y a suffisamment de répétitions de comparaison par paires, la sélection aura tendance à donner une probabilité de 50 % pour A et 50 % pour B, ce qui indique que la sélection fut aléatoire pour les participants et donc impossible à discriminer. De ce fait, cette paire de sons héritera, en final, d'une seule et même note de qualité sonore.
- En raison de la comparaison rapide de la paire, l'auditeur est généralement en mesure de différencier les sons facilement.
- Le test est simple et direct pour l'auditeur puisque basé sur une simple comparaison.

Procédure de test d'écoute

La bonne conduite de tests d'écoute repose sur quelques règles de base qui doivent être respectées. Avant le test d'écoute, les sujets doivent être suffisamment informés de toutes les informations et explications nécessaires sur le déroulement du test. Par contre, les informations ne devraient être données que si elles ne risquent pas d'influer les jugements des sujets. Il est important que les sujets comprennent la tâche afin de terminer le test d'une manière fiable.

Après cette séance d'information, une formation des sujets peut être effectuée. Dans cette formation d'essai, une partie ou la totalité des échantillons sonores utilisés pour le test d'écoute peut être présentée aux sujets, pour être jugée ou non. Toutefois, il est conseillé de ne pas seulement présenter les sons, mais de demander un jugement aussi. En outre, cette formation ne doit pas être trop longue afin d'éviter une perte de concentration pendant

le test d'écoute réel. Le but de cette première étape de formation, ou d'adaptation, est de présenter l'étendue des sons qui seront présentés lors du test.

Pendant le test, les sujets ne doivent pas être perturbés ou dérangés. L'opérateur devrait être disponible en personne pour les demandes (par exemple sur les problèmes techniques) lors du test. Usuellement, les jugements des sujets sont entrés directement dans l'ordinateur à l'aide d'une interface graphique. Une telle interface permet d'entrer le jugement de l'auditeur d'une part, d'autre part le contrôle de la lecture du son (jouer les sons, les répéter etc.). En outre, par l'entremise de l'interface graphique le sujet est informé des progrès et du nombre de paires à compléter. Après le test, l'opérateur doit demander, par écrit, aux sujets leur impression concernant la procédure de test, la durée, niveau de connaissance dans le domaine et leurs commentaires, etc. Dans cette entrevue, des informations pertinentes pour l'évaluation peuvent être recueillies, afin d'améliorer la procédure du test sur la base des réponses à ces questions [15, 17, 36].

1.2.3 Analyse statistique des tests d'écoutes

Les tests d'écoute sont suivis par une analyse statistique qui aide à identifier les indices de qualité du son. Tous les outils nécessaires pour cette analyse seront exposés dans cette sous-section selon leur ordre d'application.

Après avoir effectué des test d'écoute, les résultats obtenus doivent être évalués. Pour ce faire, un vaste choix de méthodes de calcul statistique est disponible. Ces calculs ont deux objectifs. D'abord, ils sont utilisés pour examiner et évaluer les données et la validité des tests d'écoute (par exemple, pour déterminer l'intervalle de confiance, ou pour déterminer si l'effet des paramètres étudiés est statistiquement significatif) et, deuxièmement, ils permettent aux données recueillies dans le test d'écoute d'être résumées et présentées sous une forme concise [15, 36].

Le rejet spécial

En cas de modification des conditions de test d'écoute pour un ou plusieurs participants pour des raisons particulières (par exemple : perte d'audition notable, demande de changement du niveau sonore, etc.), l'exclusion des résultats de ces participants permet d'éviter des résultats potentiellement biaisés.

Répétabilité des résultats des sujets

Il est important de vérifier la cohérence des réponses fournies par chaque participant. Cela permet de confirmer une répétabilité acceptable de leurs réactions pour s'assurer qu'ils ne

répondaient pas au hasard et que les sons étudiés sont faciles à distinguer. Il est reconnu qu'un faible pourcentage de répétabilité pour une partie importante des participants peut être une indication que le test n'a pas été bien conçu. Par conséquent, l'expérimentateur devrait envisager de revoir les sons sélectionnés ou le plan de l'expérience. Cependant, en cas de mauvaise répétabilité (le seuil acceptable de répétabilité étant de 0.5 (ou 50 %)), les évaluations des sujets devrait être individuellement éliminés pour analyse ultérieure.

La répétabilité peut être quantifiée et vérifiée à l'aide des méthodes standards. La mesure de la répétabilité est exprimée en pourcentage du nombre de fois où le même bruit a été choisi versus un autre pour une paire donnée par un sujet donné [37].

$$\text{Répétabilité} = \frac{\text{Nombre de sélections identiques}}{\text{Nombre total de paires identiques}} \quad (1.1)$$

Analyse de la variance

L'ANOVA1 (*ANalysis Of VAriance, 1 degree of freedom*¹) est un outil statistique utilisé comme indicateur de probabilité de signification de l'hypothèse de nullité du facteur sur les observations [34]. Dans le cas de tests perceptifs et de qualité sonore, l'hypothèse de nullité correspond au cas où les échantillons sonores présentés sont sans effet sur le choix des auditeurs.

Une valeur-p (la probabilité que l'hypothèse nulle est vraie) est obtenue à partir de la fonction de distribution cumulative (CDF, *Cumulative Distribution Function*) de la statistique F (test de Fisher). Par conséquent, plus la valeur-p est petite, moins l'hypothèse est probable. Typiquement, le seuil de la valeur-p utilisé est $\alpha = 0.05$ [36]. Sous 0.05, on dira que la valeur-p indique une forte évidence contre l'hypothèse de nullité. Au-delà de 0.05, on dira que la valeur-p indique une faible évidence contre l'hypothèse de nullité. Aux environs de 0.05, la valeur-p est marginale est devra être étudiée soigneusement.

Diagramme en boîte du compte total

La façon la plus simple pour représenter les résultats de tests d'écoute de type comparaison par paires est le compte (*count*), qui est le nombre de fois qu'un échantillon a été choisi parmi tous les autres sons de toutes les paires pour un test d'écoute donné et pour un ensemble donné de participants. Le compte est typiquement normalisé, par exemple pour 10 sons et donc 45 paires, le compte ira de 0 à 9 : 0 indique que le son n'a jamais été choisi par rapport aux 9 autres, 9 indiquant que le son a toujours été choisi par rapport aux 9 autres.

¹<http://www.mathworks.com/help/stats/one-way-anova.html>

Bien que le compte soit utile comme premier indicateur de qualité, il ne peut pas être utilisé en tant que valeur de préférence pour la création d'un modèle de qualité sonore étant donné que la valeur résultante n'est pas absolue (il dépend du nombre total d'échantillons sonores). Aussi, le compte total ne permet pas de quantifier les différences entre chaque paire de son, mais uniquement la différence entre un son et tous les autres.

En pratique, le compte sera présenté sous la forme d'un diagramme en boîte (*box plot*). Dans chaque diagramme en boîte (*box plot* du *count*), l'étalement du compte est représenté pour chaque échantillon sonore. Le principe de représentation de ces diagrammes est schématiquement illustré à la figure 1.1.

La médiane est représentée par une ligne rouge verticale. Les 25^e et 75^e centiles sont présentés par la boîte bleue. Les segments rajoutés aux extrémités s'étendent aux valeurs extrêmes (maximum et minimum) et les valeurs aberrantes sont marquées comme des croix rouges. Les points sont considérés comme des valeurs aberrantes si elles sont plus grandes que $Q_3 + w(Q_3 - Q_1)$ ou plus petite que $Q_1 - w(Q_3 - Q_1)$, où Q_1 et Q_3 sont les 25^e et 75^e centiles, respectivement, et w est une valeur constante arbitraire. Dans ce mémoire, w a été fixé à 1.5, qui est une valeur commune pour identifier les valeurs aberrantes. L'intervalle de confiance des valeurs médianes est représenté comme encoches triangulaires dans la boîte bleue.

Les valeurs de mérites

Avant de tenter de trouver des caractéristiques objectives des sons (les éléments de la qualité sonore) qui convient à la corrélation de préférence avec des métriques subjectives (les caractéristiques de la qualité sonore), une meilleure évaluation subjective, mais quantifiable, de la qualité sonore doit être développée. En effet, le compte révèle seulement qu'un son particulier est préféré par rapport à tous les autres sons. Étant donné que les caractéristiques objectives sont calculées pour les sons individuels, une mesure subjective de préférence individuelle est souhaitable. Une telle mesure subjective peut être trouvée à l'aide des modèles statistiques autres que le simple compte. Les calculs nécessaires à l'obtention de la valeur de mérite sont détaillés dans la référence [13].

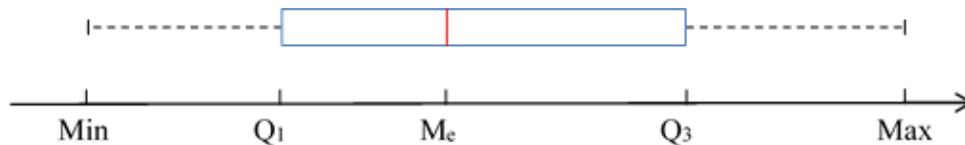


Figure 1.1 Exemple de représentation graphique du diagramme en boîte.

Ces modèles sont basés sur le principe que chaque son a une vraie valeur de mérite, situé le long d'une échelle de valeurs de mérite linéaire, à savoir, plus haut est la valeur, meilleure est la qualité sonore [17, 36, 37]. La gamme standard attendue des valeurs de mérite est entre -3 et $+3$ [36].

Regroupement par grappes (*clustering*)

Le *clustering* est une méthode statistique visant à diviser un ensemble de données en différents sous-groupes, ou grappes, homogènes d'un point de vue statistique. Pour le projet ici décrit, cette méthode est utilisée lorsque l'on veut séparer en deux (ou plus) types de préférences des auditeurs par la génération de sous-groupes de participants à partir d'un plus grand groupe. Cela est considéré comme une façon rigoureuse de contourner le manque de polarisation dans les valeurs de mérites.

L'algorithme de regroupement (*clustering*) sépare les participants en deux grappes de participants en se basant sur un modèle de mélange gaussien² [33]. Au cours de ce traitement, un algorithme sélectionne les deux sons avec le plus grand écart de compte et génère un nuage de points dans un espace à deux dimensions dont les deux coordonnées sont les comptes pour ces deux sons et les points représentent chaque participant [13].

En résumé, le fonctionnement général de l'algorithme est développé en 5 étapes :

1. Entrée de l'algorithme : introduction d'une matrice de compte (P participants, N sons).
2. Représentation des points : chaque participant est représenté comme un vecteur de compte à N dimensions.
3. Le prétraitement : l'algorithme cherche la paire de sons avec le plus grand écart du compte.
4. Classification : l'algorithme essaye d'ajuster une distribution de mélanges gaussiens aux données sur la base des deux plus grands écarts de compte. Si la classification est un succès en deux dimensions, une autre dimension est ajoutée, jusqu'à l'échec de l'algorithme de classification qui prend donc le nombre de dimensions précédent.
5. Sortie de l'algorithme : il produit les nouveaux ensembles de matrices de compte avec des grappes de participants distinctes.

²<https://www.mathworks.com/help/stats/gmdistribution-class.html>

Par exemple, dans le cas de tests d'écoute, pour le regroupement en deux grappes de participants, un algorithme sélectionne les deux sons avec le plus grand écart de compte (les sons avec les plus longues boîtes dans le diagramme en boîte du compte) et génère un nuage de points dans un espace à deux dimensions. Chaque participant est un point dont les deux coordonnées sont les comptes pour ces deux sons. L'algorithme tente alors de séparer les participants en deux sous-groupes en utilisant une distribution de mélange gaussien.

L'utilité du regroupement des participants est plus claire en considérant l'exemple qui suit. Supposons qu'un produit est testé par un bassin de clients types. Supposons que le groupe de participant est hétérogène (ce qui n'est pas connu a priori) et que deux profils de participants s'y retrouvent. Le premier préfère les sons de forts niveaux et le deuxième, les sons de faibles niveaux. Si les outils d'analyse statistique et d'élaboration de modèle prédictif de qualité sonore sont utilisés sur tout le groupe, il est possible que le premier type de préférence annule le deuxième type. En créant automatiquement des grappes de préférence on pourra éviter ce problème et, par exemple, construire des modèles de prédiction de qualité sonore pour chaque sous-groupe qui aurait, par exemple, des profils de préférences différents.

1.2.4 Prédiction de qualité sonore

Dans cette sous-section, seront présentées les approches utilisées pour les prédictions des paramètres de la qualité sonore qui peuvent remplacer les tests d'écoute. Afin de prédire les évaluations subjectives pour les sons de véhicules récréatifs motorisés (soient les valeurs de mérites obtenues d'un test d'écoute) en utilisant des paramètres psychoacoustiques ou des propriétés des signaux acoustiques, plusieurs outils disponibles peuvent être utilisés [16, 17, 36, 37, 41, 43, 44, 47]. Ces outils construisent un « modèle perceptif » basé sur des prédicteurs psychoacoustiques ou « signaux » qui permet de prédire la qualité sonore perçue à partir des enregistrements binauraux utilisés lors des tests d'écoute.

Métriques objectifs

Dans le véhicule récréatif motorisé, l'échappement, l'entrée d'air moteur, le moteur, la transmission, les roues et la suspension engendrent un ensemble de bruits, bruits qui sont perçus par le pilote. Ainsi, il y a potentiellement beaucoup de sources sonores différentes perçues par le pilote. Lors de l'accélération, il est difficile de distinguer et d'évaluer ces sons de façon distincte, car ces sons sont superposés aux oreilles du pilote. Cependant, la précision du système auditif permet au conducteur de distinguer les différentes sources sonores

et lui permet également d'évaluer subjectivement chaque son en fonction des éléments de la qualité sonore [15, 17, 25].

Les métriques les plus couramment utilisés dans l'évaluation de la qualité sonore des véhicules sont la sonie (globale et spécifique) (*loudness*), la netteté (*sharpness*), la rugosité (*roughness*) et la fluctuation de l'intensité sonore (*fluctuation strength*) [11]. Toutefois, la plupart de ces paramètres ont été développés pour quantifier les nuisances sonores et non une qualité sonore attrayante, comme le caractère sportif, la plaisance ou le facteur de plaisir.

À ce stade du projet, l'objectif est de réaliser une exploration de métriques psychoacoustiques potentiels qui seront utilisés pour prédire les valeurs de mérite obtenues des tests d'écoute. Les paragraphes qui suivent présentent les différents métriques qui pourront être utilisés pour l'établissement de modèles prédictifs de qualité sonore.

A. Facteurs

Les facteurs, utilisés lors de l'établissement d'un plan d'expérience (DOE, *Design Of Experiment*) d'un test d'écoute, constituent un certain nombre de prédicteurs potentiels qui peuvent aussi agir comme des métriques prédictives pouvant apparaître dans le modèle prédictif de qualité sonore. Ils sont établis dans le but de les utiliser comme indicateurs ou prédicteurs de qualité sonore. Par exemple, les facteurs utilisés lors de certains tests d'écoute dans le projet dSkibel étaient : le vrombissement en basses fréquences (« Rumble »), les harmoniques hautes du moteur (« HiFreq »), les harmoniques basses du moteur (« LoFreq ») et le groupe des autres composants mobiles appelés « Traction ».

B. Sonie spécifique sur l'échelle de Bark et le spectre en tiers d'octave

La sonie spécifique sur l'échelle de Barks pourrait être calculée pour tous les échantillons de sons et supposée comme métrique prédictif potentiel. Même si les sons varient dans le temps, certaines bandes spécifiques sont statiques et peuvent être significatives dans la qualité sonore. Également, les spectres en tiers d'octave pourraient être inclus comme prédicteurs potentiels. Bien qu'ils soient liés aux bandes de sonies spécifiques, ils ne sont pas exactement les mêmes (ils n'incluent pas par exemple de modélisation du masquage) et peuvent donc donner des résultats différents [11, 24].

La sonie est définie comme une mesure de perception de l'effet de l'intensité du son sur l'oreille. Elle est mesurée en comparaison à un son de référence (la tonalité de

1 kHz est une tonalité de référence très usuelle en psychoacoustique). La sonie est exprimée en sones. Un sone équivaut à un niveau de pression sonore de 40 dB à 1 kHz. De plus, la sonie peut être exprimée en sonie spécifique, ce qui se réfère à un diagramme de la sonie en fonction des bandes fréquentielles critiques avec une échelle de perception de la fréquence de 0 à 24 Barks [11].

L'unité « Bark³ » correspond à la largeur d'une bande critique. La première bande critique couvre la plage de 0 à 100 Hz, la seconde de 100 à 200 Hz, la troisième de 200 à 300 Hz et ainsi de suite jusqu'à 500 Hz où la gamme de fréquence de chaque bande critique augmente. Ainsi, la gamme de fréquences audibles à 16 kHz peut être subdivisée en 24 bandes critiques adjacentes [11].

Dans la littérature, la valeur dont nous avons besoin, soit la « Sonie spécifique », se désigne avec le symbole N' . La sonie N est alors l'intégrale de la sonie spécifique sur l'échelle de perception (tonie), son expression mathématique est :

$$N = \int_0^{24 \text{ bark}} N' dz \quad (1.2)$$

C. Métriques MIR (*Music Information Retrieval*)

La librairie MIR⁴ est un outil MatlabTM dédié à l'extraction de caractéristiques musicales ou métriques (regroupées en catégories : tonalité, timbre, rythme, structures, etc.) à partir de fichiers audionumériques [23]. Cet outil fournit aussi différentes variantes de ces métriques telles que l'écart type, la pente, la périodicité d'amplitude, la fréquence de la périodicité et l'entropie de Shannon (« PeriodEntropy », l'entropie de Shannon de la fonction d'autocorrélation de la métrique tout au long du son complet. L'entropie de Shannon est la quantité d'information contenue ou délivrée par une source d'information [23]) des métriques en fonction du temps ou de segments. Un des objectifs principaux de la conception d'un tel outil était d'étudier la relation entre les caractéristiques musicales, l'émotion de musique induite et l'activité neuronale associée. Ces caractéristiques liées à la musique et au jugement auditif des sons sont utilisées aussi comme indicateurs de classification automatique de la musique.

³Bark en mémoire de Barkhausen, un scientifique qui a introduit le « phon », une valeur décrivant le niveau de sonie pour lequel la bande critique joue un rôle important.

⁴<http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/24583-mirtoolbox>

L'outil MIR permet également l'obtention des routines pour l'analyse statistique, la segmentation et le regroupement, qui pourraient être utilisés à des fins d'analyse différentes afin d'extraire les valeurs des métriques dans le temps.

Modèle perceptif : régression linéaire multiple

Le modèle de régression linéaire multiple le plus fréquent qui est typiquement utilisé pour la création de modèles prédictifs de qualité sonore est défini sous forme matricielle (les dimensions des vecteurs et matrices sont indiquées par les indices) :

$$\{\vec{v}\}_{I \times 1} = [\vec{F}]_{I \times M} \{\vec{\beta}\}_{M \times 1} + \{\vec{e}\}_{I \times 1} \quad (1.3)$$

Où :

- $\{\vec{v}\}$ est le vecteur des valeurs de mérite obtenues par tests d'écoute avec sujet humains.
- $[\vec{F}]$ est une matrice de mesures de scalaires ou de facteurs contrôlés de plan d'expérience (facteurs, carrés des facteurs, interactions [produit des facteurs], etc.).
- $\{\vec{\beta}\}$ sont les coefficients à résoudre sous forme de vecteur.
- $\{\vec{e}\}$ est l'erreur de prédiction.
- I est le nombre d'échantillons sonores utilisés pour les tests d'écoute.
- M est le nombre de prédicteurs potentiels pouvant prédire les valeurs de mérite.

Le problème peut donc être traité comme un problème inverse classique par la méthode des moindres carrés. Cette méthode cherche β en résolvant le problème d'optimisation suivant :

$$\min_{\beta} \left(\left(\{\vec{v}\}_{I \times 1} - [\vec{F}]_{I \times M} \{\vec{\beta}\}_{M \times 1} \right)^T \left(\{\vec{v}\}_{I \times 1} - [\vec{F}]_{I \times M} \{\vec{\beta}\}_{M \times 1} \right) \right) \quad (1.4)$$

ou :

$$\min (\{\vec{e}\}^T \{\vec{e}\}) \quad (1.5)$$

Cependant, une solution directe (par pseudo-inversion ou par problème inverse régularisé) du problème des moindres carrés peut être difficile dans certains cas : des valeurs de mérite bruitées, des prédicteurs corrélés ou une quantité massive de prédicteurs potentiels (plus de prédicteurs que d'observations, c.-à-d. de valeurs de mérite dans le cas présent $M \gg I$). La façon habituelle de contourner ce problème dans de nombreuses études de

qualité sonore est de limiter, par le biais d'un choix de l'expérimentateur, de manière significative, la quantité de prédicteurs potentiels de telle sorte que $M < I$. Toutefois, cette sélection préliminaire de prédicteurs qui structure d'emblée le modèle de qualité sonore de l'équation (1.3) peut introduire un biais [17, 27]. Afin de contourner rigoureusement ce problème, il faut compter sur des algorithmes systématiques de sélection des prédicteurs et de résolution du problème des moindres carrés donné par l'équation (1.4). Plusieurs d'entre eux, plus pertinents pour le projet en cours, sont discutés dans la section suivante. Cet élément constitue, notamment, une originalité du travail de qualité sonore tel que réalisé dans le cadre de dSkibel et de cette maîtrise.

Algorithmes de régression linéaire

L'utilisation de la pseudo-inversion de $[\vec{F}]$ est le moyen le plus simple pour résoudre l'équation (1.3). Si les colonnes de la matrice $[\vec{F}]$ sont linéairement indépendantes :

$$\{\vec{\beta}\}_{M \times 1} = \left([\vec{F}]_{M \times I}^T [\vec{F}]_{I \times M} \right)^{-1} [\vec{F}]_{M \times I}^T \{\vec{v}\}_{I \times 1} \quad (1.6)$$

La pseudo-inversion présente une multitude de défauts :

- L'approche est vulnérable au bruit de mesure ou aux variations dans les matrices et vecteurs.
- Risque de sur-prédiction (*over-fitting*) : très bonne prédiction des observations, mais coefficients $\vec{\beta}$ exagérés et risquant de mal prédire les résultats de sons non inclus dans la construction du modèle.
- Nécessité d'introduire de la régularisation pour limiter ces problèmes.
- Dans le cas d'un très grand nombre de prédicteurs : tous les coefficients de la solution $\vec{\beta}$ sont non nuls, le vecteur de coefficients $\vec{\beta}$ est plein, le modèle obtenu est difficile à interpréter pour un ingénieur.

Conséquemment, pour accomplir ce genre de calculs avec fiabilité, des algorithmes plus avancés que la pseudo-inversion et des méthodes spécialement adaptées aux problèmes mentionnés ont été développées [13]. Les approches les plus pertinentes pour la partie QS sont synthétisées ci-après.

a. Régression par étapes (*stepwise regression*)

Les méthodes de régression par étapes sont des méthodes statistiques de sélection de variables qui permettent de construire de bons (mais pas nécessairement optimaux) modèles avec un sous-ensemble de prédicteurs pour lesquels les coefficients dans $\vec{\beta}$

sont non-nuls. Le but de telles approches est de produire un modèle prédictif simple, c.-à-d. parcimonieux, pour lequel seuls certains coefficients dans $\vec{\beta}$ sont non nuls.

Le principe d'application est simple, l'algorithme ajoute et supprime de manière itérative les métriques (prédicteurs) dans le modèle et évalue ensuite le succès des prédicteurs ajoutés (ou retirés) à partir de la valeur de probabilité (valeur-p) [41].

Dans le cadre de la partie QS de dSkibel, les essais antérieurs ont montré que les modèles de prédiction de la qualité sonore obtenus avec cette méthode ne sont pas aussi bons que ceux obtenus avec l'algorithme *Lasso* (discuté plus loin). Dans ce cas, la qualité des modèles était évaluée par validation croisée. Par conséquent, cette méthode est à rejeter dans le cadre de cette étude.

b. Régression d'arête (*ridge regression*)

La régression d'arête ou *Ridge* (aussi connue sous le nom de régularisation de Tikhonov) est une méthode de régularisation couramment utilisée. La première étape dans cette régression consiste à normaliser toutes les variables (prédicteurs et observations) en soustrayant leurs moyennes et en divisant par leurs écarts-types. La solution du problème des moindres-carrés ($\vec{\beta}$) est obtenue en introduisant un paramètre (paramètre de régularisation ou de pénalisation) permettant de contrôler la norme deux de la solution $\vec{\beta}$ de façon à aboutir à une unicité et à une stabilité de la solution (les coefficients $\vec{\beta}$) [12, 16]. Tous les calculs de régression d'arête sont basés sur des variables normalisées. Lorsque les coefficients de régression finaux sont affichés, ils sont ajustés de nouveau dans leur échelle d'origine en compensant pour la normalisation discutée.

Bien que cela puisse résoudre le problème de mauvais conditionnement propre aux moindres-carrés, cette solution n'effectue pas de sélection « intelligente » des prédicteurs comme pour l'algorithme *Stepwise*. Par conséquent, bien qu'étant très utilisée, cette méthode n'est pas considérée comme utile pour les études de la qualité sonore avec plus de prédicteurs que d'observations.

c. Régression *Lasso*/*Elastic-net*

Même si la régularisation *Ridge* permet d'aboutir à un problème bien posé, elle a l'inconvénient d'avoir une solution dense, à savoir que le vecteur solution $\vec{\beta}$ a très peu de coefficients nuls (voire aucun). L'utilisation d'une telle solution, notamment dans le cadre de grandes dimensions M , peut entraîner un temps de calcul important [12].

En d'autres mots, la régression *Ridge* ne peut pas produire un modèle parcimonieux, car il garde toujours tous les prédicteurs dans le modèle.

Une technique prometteuse appelée *Lasso* (*Least Absolute Shrinkage and Selection Operator*) a été proposée par Tibshirani [44]. Le *Lasso* est une méthode des moindres carrés pénalisés qui impose une pénalité L_1 (c.-à-d. la norme 1 du vecteur beta, $\|\beta\|_1 = \sum_{m=1}^M |\beta_m|$) sur les coefficients de régression [16, 47]. La régularisation *Lasso* diffère de la régularisation *Ridge* par l'utilisation de la norme L_1 de la solution β à la place de la norme L_2 de la solution β . Par conséquent, le *Lasso* est également en mesure d'identifier les prédicteurs les plus importants, de choisir parmi tous les prédicteurs redondants et de produire des erreurs de prédiction potentiellement inférieures à celles d'autres algorithmes ou approches des moindres carrés classiques. Le *Lasso* est donc un outil de sélection de variables en plus d'être un outil de prédiction, ce qui est intéressant pour l'étude de qualité sonore et pour la création de modèles de prédiction de qualité sonore avec un souci de parcimonie. L'algorithme du *Lasso* résout le nouveau problème d'optimisation suivant :

$$(\beta_0, \vec{\beta}) = \operatorname{argmin} \left\{ \frac{1}{2I} \left(\sum_{i=1}^I \left(v_i - \beta_0 - \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M \beta_{jm} f_j(M_{mi}) \right) \right)^2 + \lambda \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M |\beta_{jm}| \right\} \quad (1.7)$$

Où β_0 est l'intercepteur, β_{jm} sont les MJ coefficients pondérant les M prédicteurs traités par J fonctions linéaires et/ou non linéaires f_j , v_i les valeurs de mérites pour les I échantillons, M_{mi} la métrique m pour l'échantillon du son i , et λ le paramètre de régularisation du *Lasso*.

Une des méthodes pour sélectionner une valeur optimale pour λ est d'effectuer une validation croisée pour chaque valeur de λ . Suite à cette validation croisée, la valeur de λ qui a une erreur de prédiction croisée moyenne minimale sera typiquement retenue.

Bien que le *Lasso* ait montré un succès dans de nombreuses situations, il montre quelques limitations. Principalement, s'il y a un groupe de prédicteurs très corrélés entre eux, le *Lasso* a tendance à sélectionner uniquement un seul prédicteur dans le groupe et ce prédicteur est un prédicteur quelconque du groupe. Une variante du *Lasso*, soit l'*Elastic-net* proposé par Hui Zou et Trevor Hastie [47] a permis d'améliorer le *Lasso* et d'encourager l'effet de regroupement, où les prédicteurs fortement corrélés ont tendance à être groupés. L'*Elastic-net* pénalise la norme L_1 de la solution β ce qui correspond au *Lasso*, et également la norme L_2 de la solution β , ce

qui correspond à la régression *Ridge*. L'estimation de l'*Elastic-net* est la solution du problème suivant :

$$(\beta_0, \vec{\beta}) = \operatorname{argmin} \left\{ \frac{1}{2I} \left(\sum_{i=1}^I \left(v_i - \beta_0 - \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M \beta_{jm} f_j(M_{mi}) \right) \right)^2 + \lambda \Omega(B_{jm}) \right\} \quad (1.8)$$

Avec :

$$\Omega(B_{jm}) = \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M \left((1 - \alpha) \frac{\beta_{jm}^2}{2} + \alpha |\beta_{jm}| \right) \quad (1.9)$$

L'*Elastic-net* combine en quelque sorte le *Lasso* et l'approche *Ridge*. Il coordonne l'outil de régularisation de la norme L_1 avec la norme L_2 en utilisant un paramètre α compris entre 0 et 1 ($\alpha = 1$ donne le *Lasso*, tout autre $\alpha > 0$ représente un mélange du *Lasso* et du *Ridge*).

Pour cette étude, basée sur les études préliminaires réalisées dans le même projet [13], malgré le fait que l'*Elastic-net* soit une bonne option, le *Lasso* paraît suffisant pour la prédiction de la qualité sonore et pour la sélection des prédicteurs les plus pertinents. Son utilisation permet d'avoir assez de prédicteurs dans le modèle de prédiction.

Finalement, un des avantages considérables du *Lasso*, et de l'*Elastic-net*, tient au fait que le nombre de coefficients non nuls dans la solution $\vec{\beta}$ dépend directement de la quantité de pénalisation contrôlée par λ . En effet, en faisant croître λ , tour à tour, des coefficients du vecteur $\vec{\beta}$ deviendront nuls. Ainsi, il est possible de contrôler la parcimonie de la solution finale via λ . Par exemple, typiquement, l'utilisateur détermine le nombre maximal de coefficients non nuls pour la solution, λ est alors choisi très grand puis progressivement plus petit en activant ainsi progressivement des coefficients dans $\vec{\beta}$. Lorsque le nombre de coefficients $\vec{\beta}$ non nuls atteint la prescription de l'utilisateur, la dernière valeur de λ est alors utilisée pour la construction finale du modèle de prédiction de qualité sonore [13].

1.2.5 Plan d'expérience (DOE)

En se référant aux références [14] et [34], un « plan d'expérience » permet de minimiser le nombre d'essais dans une étude expérimentale sans toutefois sacrifier la qualité de l'expérience. Ainsi, la théorie des plans d'expériences assure les conditions pour lesquelles on obtient la meilleure précision possible avec le minimum d'essais. Dans la pratique, l'étude

d'un phénomène se ramène à déterminer la fonction qui lie la réponse y aux différentes variables x_i . La réponse étant la grandeur d'intérêt. Les variables qui peuvent modifier la réponse sont appelées « facteurs ». La valeur donnée à un facteur pour réaliser une expérience est appelée « niveau ». Dans ce mémoire, le phénomène étudié est la qualité sonore. Donc, les variables sont les facteurs qui influent sur la qualité sonore.

Pour noter l'effet de n facteurs à la fois, on applique deux niveaux (niveau bas et niveau haut) pour chaque facteur. On attribue donc la valeur -1 au niveau bas d'un facteur et la valeur $+1$ au niveau haut. Cela fait un « plan d'expérience factoriel complet » de 2^n expériences. Toutefois, ce type de plan conduit souvent à un nombre d'expériences trop important au-delà de 5 ou 6 facteurs. Pour modérer le nombre d'essais on trouve donc des plans d'expériences optimisés appelés « plans d'expériences fractionnaires ».

Pour un cas où l'en veut étudier l'effet de deux facteurs à plusieurs niveaux, on associe une réponse à chaque point du domaine d'étude. Ainsi, l'ensemble de tous les points du domaine d'étude correspond un ensemble de réponses qui se localise sur une surface appelée « surface de réponse ». Plusieurs types de plans d'expériences surfaciques existent dans la littérature. Par exemple, le plan de l'expérience de type *Circumscribed Central Composite Design* (CCCD) offre la possibilité d'étudier cinq niveaux. Un exemple schématique d'un DOE CCDD pour deux facteurs ($F1$ et $F2$) est présenté à la figure 1.2.

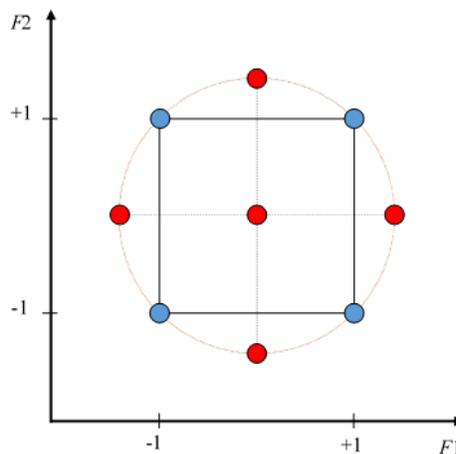


Figure 1.2 Design composite central circonscrit pour deux facteurs.

1.3 Revue des technologies existantes pour design sonore

Différentes applications de design sonore existent dans l'industrie, telles que les bruits d'avertissement des véhicules électriques et hybrides (HEV, *Hybrid Electric Vehicle*) [4, 8], le design sonore actif (ASD, *Active Sound Design*) [7] et les simulateurs de conduite et des environnements virtuels [40]. Le design sonore est courant dans le secteur automobile. En principe, cela consiste à optimiser le son émis par le produit en modifiant les sources d'excitation mécanique, en modifiant le rayonnement sonore ou en influençant les chemins de transfert (*transfer paths*). Dans ce cas, le produit lui-même est modifié mécaniquement, ce qui est une tâche fastidieuse, longue et coûteuse. Et, de surcroît, peu flexible pour d'éventuelles modifications. Contrairement à cette approche, la technique appelée design sonore actif (ASD) permet d'améliorer le son d'un produit sans pour autant changer le produit lui-même [7, 40].

Dans les voitures, ce procédé exploite le système audio du véhicule pour réduire le son original à l'intérieur de la cabine, et le modifier ou même le remplacer par des sons de moteur virtuel. Cela permet d'améliorer à la fois la qualité sonore et l'expérience de conduite. Comme exemple, l'option « R-SOUND » de la Renault Clio 4 permet de modifier le son original du moteur et de le déguiser avec un caractère de voiture de sport [3, 8].

Le design sonore est également utilisé dans les simulateurs de conduite, des environnements virtuels et pour la génération de bruits d'avertissement des HEV [4]. Plusieurs constructeurs automobiles ont développé (ou sont en train de développer) un système de génération de sons artificiels (activation automatique et/ou manuelle) pour leurs voitures électriques et hybrides. Dans les véhicules à combustion, contrairement aux véhicules électriques, il n'est pas nécessaire de synthétiser le son complet du moteur, mais d'ajouter des composants spécifiques qui améliorent la perception du son de base du moteur [7].

On distingue principalement deux approches [3]. La première, à base d'échantillons (*sample-based*), utilisée dans les jeux vidéo et les simulateurs de conduite les plus avancés ainsi que dans quelques « plugiciels » pour modification du son de l'intérieur de véhicules. Le principe est de manipuler des enregistrements existants de sons de moteur réels. Les échantillons sonores sont généralement bouclés, croisés et décalés en fonction de l'information de contrôle, tels que le régime du moteur (RPM), les données de la pédale d'accélération, la vitesse du véhicule et le couple fournis par les commandes réelles du conducteur. Cette approche est relativement simple à mettre en oeuvre et fournit des résultats très réalistes. Cependant, les principaux inconvénients sont que de bonnes simulations requièrent de

grandes banques d'échantillons sonores et que l'espace de conception sonore est fortement limité par le timbre des échantillons enregistrés [18, 39].

La deuxième approche, analyse et re-synthèse (*audio procedural*), est utilisée principalement pour le design sonore actif. Le son est généré à partir d'une description calculée du son moteur. Dans cette approche, le son est généré à partir d'une description calculée du son moteur. C'est-à-dire, le son est produit via un modèle synthétique pour les sons du moteur, ceci est basé sur la description calculée de la mécanique qui est liée directement au fonctionnement des moteurs. Cette technique, exploite la nature harmonique et stationnaire des sons moteurs et s'appuie sur leur spectrogramme pour décrire l'événement acoustique. Manipuler les harmoniques du moteur en amplitude et en fréquence est un moyen flexible d'explorer les possibilités de conception sonore dans les limites d'un espace bien défini. Cependant, la plupart des travaux effectués dans ce sens sont soit couverts par des brevets, soit peu publiés [3].

Cette deuxième approche présente plusieurs avantages [7] :

- La génération de sons est beaucoup plus flexible, car elle est détachée du processus mécanique du produit.
- Le son peut être beaucoup mieux contrôlé et facilement adapté à différentes conditions.
- Le son peut être changé pendant la durée de vie du produit.
- Le processus de développement est optimisé, car le son peut être réglé à un stade tardif lorsque tous les composants sont développés.
- En raison de coûts très bas de l'électronique, une solution active peut réduire les coûts.

Cette approche (analyse et re-synthèse) est intéressante comme application virtuelle dans le système envisagé pour l'amélioration de la qualité sonore des véhicules récréatifs motorisés. Dans ce contexte, l'approche est présentée dans le chapitre cinq.

1.4 Revue des travaux passés dans le cadre de dSkibel

Les études antérieures (présentées dans les références [13, 24]) proposent un processus d'évaluation des sons enregistrés, ce qui a permis d'aborder tout le sujet. Dans les tests d'écoute du printemps 2015, des enregistrements sonores à vitesse constante de 50 km/h sur des machines différentes ont été utilisés pour valider les outils de tests d'écoute, de post

traitement et de prédiction avec des conditions d'opérations fixe dans le temps [13]. Par la suite, durant l'automne 2015, les tests d'écoute ont permis d'étudier la qualité sonore d'une accélération (son variable dans le temps); un état d'entraînement plus significatif pour la qualité sonore associée à une conduite sportive. Le son d'accélération a été numériquement modifié comme indiqué dans le chapitre 2 (page 28) pour créer tous les sons de tests d'écoute [24].

1.5 Problématique et objectifs

1.5.1 Question de recherche

La qualité sonore est un facteur important dans la conception des produits, notamment dans le cas des véhicules. Il est donc fondamental d'étudier la qualité sonore des véhicules récréatifs motorisés puisque cette qualité impactera l'impression de qualité générale des clients et acheteurs potentiels.

Les tests d'écoute conduits dans le cadre de cette maîtrise en 2016 avaient comme objectif de parfaire les modèles de qualité construits à partir des tests d'écoute de l'automne 2015. Ainsi, ils ont permis d'optimiser les niveaux de facteurs et métriques identifiés et ce par l'étude d'un nouveau véhicule. Puis les résultats ont permis guider la conception et l'introduction d'un dispositif de modification du son moteur.

En conséquence, l'étude soulève la question de recherche suivante : Comment peut-on évaluer et optimiser la qualité sonore d'un véhicule récréatif motorisé ?

1.5.2 Objectif global

L'objectif de la partie QS du projet dSkibel est d'identifier, de quantifier et de fournir une mesure prédictive pour la qualité sonore des véhicules récréatifs motorisés. Pour atteindre ces objectifs, il est essentiel de développer des outils d'évaluation et d'optimisation de la qualité sonore d'un nouveau véhicule récréatif motorisé, qui intégrera certaines fonctionnalités acoustiques issues du projet dSkibel. Les outils ainsi développés devront permettre de mieux maîtriser et optimiser la qualité sonore des véhicules récréatifs motorisés.

1.5.3 Objectifs spécifiques

Pour mieux cerner le problème, un certain nombre d'objectifs spécifiques peuvent être identifiés, ces derniers sont ordonnés comme suit :

- Définir les critères (métriques psychoacoustiques ou facteurs mécaniques) selon lesquels doit être formée la qualité sonore.
- Développer une méthode de prédiction de résultats de tests d'écoute.
- Évaluer la qualité sonore d'un nouveau véhicule récréatif motorisé.
- Concevoir une maquette virtuelle d'un dispositif d'amélioration de la qualité sonore.

1.5.4 Hypothèses ou approches proposées

Après avoir précisé les objectifs, un choix d'hypothèses ou approches adéquates à cette étude est positionné comme suit :

- Il est supposé que la modification du son du véhicule récréatif motorisé peut influencer la perception de la qualité sonore.
- La qualité sonore perçue du véhicule récréatif motorisé peut être décrite par quelques métriques simples.
- Il est supposé que la perception de la qualité sonore avec la variation de ces quelques métriques présentera une valeur optimale.

1.6 Méthodologie

Pour répondre à la question de recherche et atteindre les objectifs déjà spécifiés, cette section propose une démarche originale de travail afin de mener à bien ce projet. Cela est organisé en huit étapes. 1) Enregistrements binauraux sur les véhicules récréatifs motorisés. 2) Réalisation de tests d'écoute avec sujets humains de type comparaison par paires (voir Sec. 2.2) sur la base de plans d'expériences (DOE) factoriels complets avec plusieurs facteurs et deux, ou plusieurs, niveaux. 3) Analyse de validité des résultats : ANOVA, regroupement, répétabilité, etc. (voir Sec. 2.3). 4) Création de modèles de prédiction parcimonieux de qualité sonore : identifier les facteurs/métriques déterminants à impacts positifs et à impact négatif (voir sous-section 1.2.4 pour les détails théoriques). 5) Identification du facteur d'impact positif le plus important pour la qualité sonore. 6) Réalisation de tests d'écoute avec DOE de type CCCD à plusieurs niveaux pour l'identification du niveau optimal. 7) Réalisation de recommandations basées sur le(s) facteur(s) à impact positif et sur le niveau optimal identifié en 6). 8) Réalisation et validation d'une maquette virtuelle d'amélioration de la qualité sonore basée sur les observations obtenues en 6) et 7).

1.7 Conclusion

Ce chapitre a présenté le contexte général du projet et le positionnement de la maîtrise dans le projet global dSkibel. Ceci fut suivi d'une revue de littérature des méthodes, outils et recommandations utilisés dans l'étude de la qualité sonore des produits. Ont aussi été présentés, la problématique et les objectifs de ce projet, puis l'approche proposée pour répondre à la question de recherche. Après, ce chapitre a présenté la méthodologie du travail adopté pour assurer l'avancement du projet.

Ce projet permettra tout d'abord de mettre à jour tous les outils développés dans la partie QS au cours du projet dSkibel d'une part, et d'autre part de faire progresser les différents outils pour faciliter leur utilisation.

Ce travail de recherche consiste à l'évaluation de la qualité du son des véhicules récréatifs motorisés via des tests d'écoute sur auditeurs au laboratoire, ensuite la conception d'un modèle de qualité sonore basé sur les paramètres psychoacoustiques identifiées à partir des résultats de tests d'écoute.

Au final, ce projet permettra de développer des outils pour la réalisation de tests d'écoute avec des échantillons sonores et pour l'analyse statistique des tests d'écoute. Il permettra aussi de développer un outil de prédiction de la qualité sonore d'un véhicule récréatif motorisé ainsi qu'une maquette virtuelle d'un dispositif d'amélioration de la qualité sonore.

CHAPITRE 2

ÉTUDES PRÉLIMINAIRES DE LA QUALITÉ SONORE : PRÉDICTION ET IDENTIFICATION DES FACTEURS DOMINANTS

2.1 Introduction

Ce chapitre présente une évaluation de la qualité sonore d'un véhicule récréatif motorisé (A) en phase d'accélération sur la base d'échantillons sonores existants. Ce véhicule (A) fut utilisé comme référence dans le projet dSkibel.

Le but premier est l'évaluation de la qualité sonore via un test d'écoute réalisé avec des modifications virtuelles du son binaural original du véhicule récréatif motorisé. Le deuxième but était la construction d'un modèle prédictif de qualité sonore sur la base de ces tests d'écoute. Ce modèle prédictif permet notamment l'identification des facteurs ou des métriques dominants qui participent à la qualité sonore perçue.

Dans ce chapitre, l'approche proposée pour l'étude de la qualité sonore du véhicule récréatif motorisé consiste, en premier lieu, en la réalisation et en la conduite de tests d'écoute sur des variantes de son du véhicule récréatif motorisé. Les résultats de ces tests d'écoute permettent l'identification des paramètres psychoacoustiques pertinents, et ce à l'aide des méthodes de régression linéaire multiple présentées dans la sous-section 1.2.4. Ensuite, un modèle de qualité sonore peut être dérivé à partir des métriques identifiées, qui servira par la suite comme une recommandation de base pour améliorer la qualité sonore des véhicules récréatifs motorisés. Une validation doit être effectuée par la prédiction des résultats de tests d'écoute en se basant sur ce modèle avant son utilisation pour la suite de l'étude.

Dans ce chapitre, seront décrits les tests d'écoute réalisés à l'automne 2015. Puis, sera expliquée l'analyse statistique des résultats de ces tests d'écoute. Après, les modèles de prédiction de qualité sonore seront présentés. Ces modèles prédictifs de QS sont conçus à partir des résultats de l'analyse statistique. Par la suite, seront exposés les résultats de prédiction de la qualité sonore des échantillons sonores du véhicule récréatif motorisé. Finalement, une conclusion du chapitre sera avancée ainsi que des suggestions afin d'améliorer la qualité sonore des véhicules récréatifs motorisés pour la suite du projet.

2.2 Tests d'écoute basés sur des enregistrements sur véhicule récréatif motorisé en accélération

Pour l'étude de qualité sonore du véhicule récréatif motorisé (A), plusieurs bases de données ont été déjà établies, par des enregistrements binauraux sur un pilote. Au cours de ces mesures, différents cycles d'opération ont été effectués tels que : *idle* (tourne au ralenti, en attente), vitesse constante de 30 km/h, de 50 km/h, 70 km/h, 90 km/h, 110 km/h, accélération lente et accélération rapide. Les enregistrements ont été effectués à une fréquence d'échantillonnage de 48 kHz avec une résolution de 16 bits.

Un son d'accélération est plus représentatif étant donné que l'étude porte sur un son inspirant le caractère sportif. Le son mesuré doit être donc représentatif de l'ensemble des bruits de la classe étudiée. Par conséquent, le son sélectionné pour la suite de cette étude est celui de l'accélération rapide sur piste.

2.2.1 Liste du matériel

La préparation et la réalisation des tests d'écoute sont réalisées avec le matériel suivant :

- Ordinateur portable avec MatlabTM (version 2015)
- Carte son externe (RME-AUDIOTM FireFace 400)
- Casque (SennheiserTM HD600)
- Mannequin Binaural (GRASTM Kemar avec de grandes et de petites oreilles)
- Microphones binauraux (B&KTM)
- Calibreur de microphone (B&KTM)
- Conditionneur CCP (GRASTM 12AL)

2.2.2 Plan d'expérience

À l'automne 2015, des tests d'écoute furent réalisés avec 16 échantillons sonores obtenus à partir de modifications virtuelles de l'enregistrement binaural selon un plan d'expérience à quatre facteurs [24]. Les facteurs étaient les suivants :

- $F1$: « Rumble » ; vrombissement en basses fréquences.
- $F2$: « HiFreq » ; les harmoniques hautes du son du moteur.
- $F3$: « LoFreq » ; les harmoniques basses du son du moteur.
- $F4$: « Traction » ; composé des harmoniques des composants de roulement.

Pour chacun des facteurs, deux niveaux furent testés. Ces niveaux sont les suivants :

- Gain positif : le gain = +6 dB pour tous les facteurs sauf le « Rumble » avec un gain = +0 dB.
- Gain négatif : le gain = -4 dB pour tous les facteurs sauf le « Rumble » avec un gain = -12 dB.

2.2.3 Modifications virtuelles

Pour la génération des 16 variantes à partir de l'enregistrement binaural original, une fonction de filtrage est développée sous MatlabTM dans le Module 3 (Tab. 1.1). La fonction de filtrage utilise une interface graphique simple et demande à l'utilisateur d'entrer un fichier audio et de sélectionner le paramètre d'affichage pour un spectrogramme. L'utilisateur est alors invité à dessiner les fréquences à filtrer (typiquement, harmoniques moteur ou harmoniques proportionnelles à la vitesse en km/h) en fonction du temps en cliquant sur les différents points sur le spectrogramme (pour exemple voir Fig. 3.1, page 43). L'utilisateur peut choisir d'utiliser l'option *snap*, option de magnétisme qui règle automatiquement les fréquences sélectionnées aux maxima les plus proches du spectrogramme dans une plage de tolérance spécifiée par l'utilisateur. L'utilisateur saisit alors les paramètres du filtre, à savoir :

- Les ordres pour lesquels le filtrage est appliqué (multiples entiers de la fréquence de base). L'utilisateur peut également choisir d'entrer d'autres multiples de la fréquence de base manuellement.
- Facteur de qualité du filtre (plus ce nombre est élevé, plus le filtre est de bande fine).
- Nombre de dB à ajouter ou à retrancher.
- Longueur des fondus lors de l'activation et de l'arrêt du filtre (empêche le clic au début du filtre de la plage temporelle de fonctionnement du filtre).
- Enfin, si le filtre est un filtre *notch* (gain infini négatif) ou *peak* (gain positif ou négatif ajustable).

2.2.4 Égalisation du gain de la réponse en fréquence du casque d'écoute

Avant la conduite de tests d'écoute, une correction fréquentielle doit être appliquée aux enregistrements binauraux réalisés afin de compenser la réponse du casque d'écoute. Cela peut être effectué à l'aide de la bibliothèque *Reproduction System* et en utilisant la fonction MatlabTM « *AB_PreProcessing.MakeEQFilter* » développée par Philippe-Aubert

Gauthier spécialement pour ce type d'application à l'occasion du projet dSkibel. Le filtre d'égalisation a été validé sur les échantillons sonores. Pour effectuer cette validation, les microphones binauraux ont été installés sur le mannequin KemarTM avec le casque binaural et les spectres des sons enregistrés au mannequin sont comparés avec les sons captés sur le pilote en condition d'opération.

2.2.5 Égalisation en sonie globale

Lors de la préparation des échantillons sonores pour un test d'écoute, les échantillons sonores doivent idéalement être ajustés en amplitude de sorte que tous les sons soient de sonie globale équivalente. Cette égalisation permet aux auditeurs de se concentrer sur d'autres aspects de la qualité sonore autres que la sonie globale. En effet, il est généralement observé que si les échantillons sonores ne sont pas égalisés en sonie globale, c'est la sonie globale qui dominera la qualité sonore perçue. Et sachant que le but de cette étude de qualité sonore est de trouver une proposition plus raffinée quant aux facteurs influençant la qualité sonore du véhicule récréatif motorisé, il n'est pas possible de se contenter de la sonie globale comme potentielle conclusion [15, 36].

Dans notre cas, les échantillons sonores sont égalisés en sonie globale par rapport à l'échantillon possédant la plus faible valeur de sonie globale à l'aide de la fonction « *AB_PreProcessing.ApplyLoudness_Equalization* ».

Un exemple d'égalisation en sonie globale est présenté à la figure 2.1. Dans cette figure, il est représenté la sonie spécifique N' en fonction de l'échelle de Bark. Les lignes grises représentent les sonies spécifiques (gauche et droite) pour le son de référence. Les lignes rouges correspondent aux sonies spécifiques du son dont le gain doit être ajusté. Les lignes vertes correspondent au même signal que celui des lignes rouges, mais avec un ajustement en gain uniquement qui garantit que la sonie globale (l'aire sous ces graphes) est la même pour les lignes grises (référence) et vertes (signal égalisé). Pour ce cas présenté, on note que le son à égaliser est passé d'environ 144 sonies à 86 sonies (pour le canal de gauche) via l'égalisation.

2.2.6 Durée de l'échantillon

En général, pour les sons réguliers, l'échantillon sonore doit être compris entre 3 et 5 secondes pour permettre une comparaison rapide. La durée des échantillons sonores choisie pour cette étude était de 4.5 secondes. Ce choix représente aussi un compromis pour s'assurer d'une durée totale de test avec sujets qui soit moins que 60 minutes.

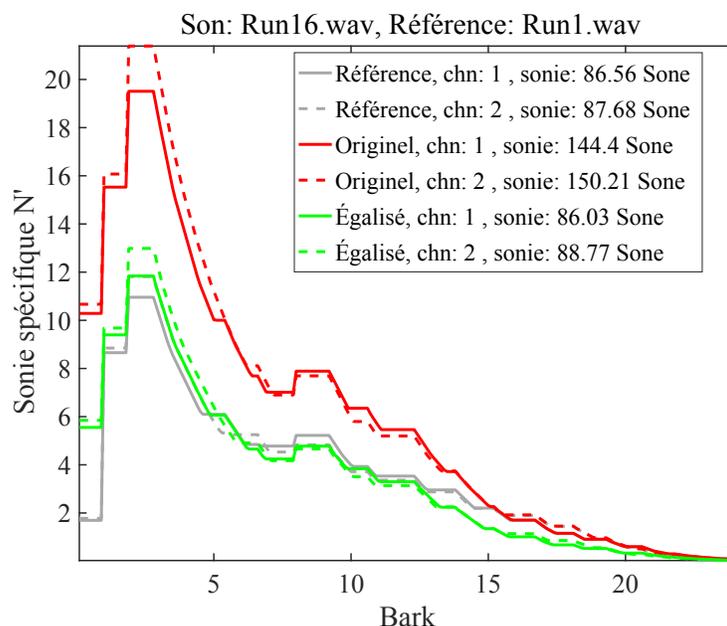


Figure 2.1 Exemple d'égalisation en sonie globale de « Run 16 » en prenant « Run 1 » comme référence. Sonie spécifique N' en fonction des fréquences sur l'échelle de Bark. En gris : le son de référence. En rouge : le son à ajuster. En vert : le son ajusté en sonie globale pour être équivalent au son en gris.

2.2.7 Nombre d'échantillons

Le nombre d'échantillons inclus dans un test est généralement choisi en fonction des contraintes de durée totale des tests d'écoute, d'un plan d'expérience, et du nombre de répétitions visées. Au total, un test d'écoute ne devrait pas durer plus de 45 ou 60 minutes pour assurer que la concentration des sujets ne faiblit pas. Typiquement, le nombre d'échantillons découlera d'un plan d'expérience formel avec un certain nombre de facteurs et de niveaux par facteur. Pour ce test d'écoute, avec quatre facteurs et deux niveaux, le design d'expérience permet d'avoir 16 échantillons différents à tester.

2.2.8 Test par comparaison de paires (Test AB)

Les études antérieures proposent l'utilisation de la méthode de comparaison par paire avec choix forcé pour les tests d'écoute. L'auditeur doit choisir $A < B$ ou $A > B$ pour chaque paire, l'option $A = B$ n'était pas disponible. Lors de ces tests d'écoute, la question posée pour chaque paire était : « Écoutez les sons (A et B) et choisir le plus le *fun* ». Au total, en adoptant un plan factoriel complet, 120 paires vont être évaluées par chacun des sujets de tests d'écoute.

2.3 Analyse statistique des résultats de tests d'écoute

Deux tests d'écoute différents furent réalisés avec deux groupes de participants G1 et G2. Ainsi, un total de 40 sujets volontaires ont participé aux tests d'écoute. Tous les sujets sont des hommes. Les participants ont été invités sur la base d'un document évalué par le comité d'éthique de l'Université de Sherbrooke. De ce fait, le formulaire d'entente approuvé par le comité d'éthique est présenté à chaque sujet avant le début du test.

Suivant ces deux campagnes de mesures, des valeurs de mérite furent obtenues pour le groupe de participants G1, pour le groupe de participants G2 et pour l'ensemble des deux groupes de participants combinés. Pour chacun de ces cas, l'algorithme de regroupement des participants (décrit à la sous-section 1.2.3 dans le chapitre 1) basé sur une mixture gaussienne fut appliqué pour obtenir des grappes (*clusters*), typiquement deux grappes, pour chaque groupe.

2.3.1 Regroupement des participants

Lors de tests préliminaires, il fut observé qu'il est possible de diviser les participants de chaque campagne en deux groupes à l'aide de l'algorithme de regroupement décrit à la sous-section 1.2.3. Typiquement, un des deux sous-groupes résultants pour chaque campagne a montré des réponses plus consistantes et moins étalées (avec, notamment une valeur-p bien plus faible que pour l'autre groupe). De plus, il fut observé que le sous-groupe cohérent de la campagne G1 et celui de la campagne G2 présentaient des tendances similaires. Conséquemment, ces deux sous-groupes cohérents issus de la campagne avec deux groupes de participants G1 et G2 furent combinés en un seul groupe. Les résultats qui suivent se basent sur ce groupe.

Le regroupement de participants en deux grappes est illustré dans la figure 2.2. Les résultats des participants sont présentés en tant que marqueurs circulaires (certains sont superposés). Les lignes de contour représentent la fonction de densité de probabilité (PDF) de la mixture gaussienne utilisée par l'algorithme de regroupement. Pour l'ensemble des participants, à savoir les participants du G1 et du G2, le regroupement a opéré selon la distribution des réponses des participants pour le son #12 et le son #1. Sur la figure 2.2, les deux grappes sont identifiées par des rectangles rouges. D'après la figure, on constate que la seconde grappe présente moins d'étalement des résultats des participants en comparant à la première grappe.

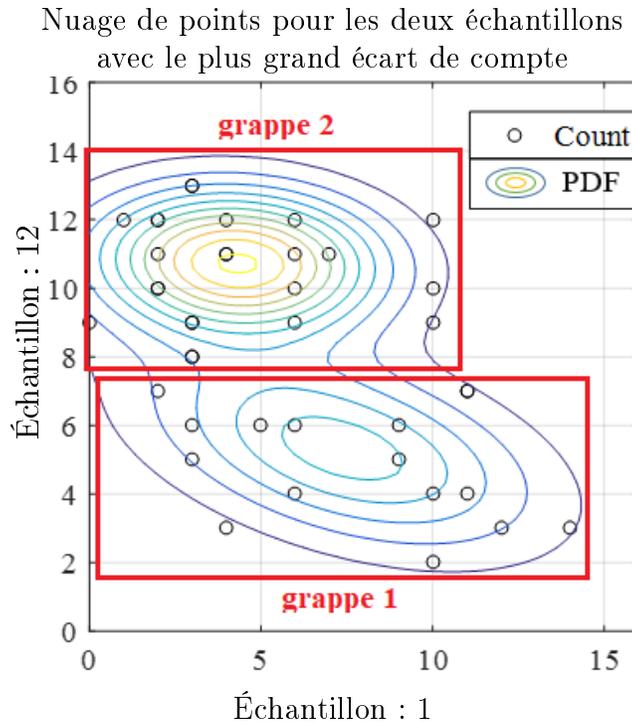


Figure 2.2 Regroupement par grappes pour tous les participants.

2.4 Modèle prédictif de qualité sonore

Le modèle de prédiction de qualité sonore est conçu à partir de prédicteurs (métriques ou facteurs) comme entrées afin de prédire les résultats de tests d'écoute, à savoir, les valeurs de mérite obtenues. Ce modèle permet donc de prédire la qualité sonore de nouveaux échantillons sonores ne figurant pas dans l'ensemble de données d'origine utilisée pour les tests d'écoute et pour la création du modèle.

Un premier modèle nommé « Modèle 1 » est calculé par régression linéaire avec toutes les métriques et facteurs considérés comme des prédicteurs potentiels pour l'algorithme *Lasso*. Au total, 191 métriques et facteurs sont utilisés. Ces métriques et facteurs sont : les quatre facteurs du plan d'expérience ($F1$, $F2$, $F3$ et $F4$) décrits à la sous-section 2.2.2, les interactions entre ces facteurs jusqu'à l'ordre 4, la sonie spécifique sur l'échelle de Bark, le spectre par bande de tiers d'octaves et les métriques de MIR (voir la sous-section. 1.2.4 du chapitre 1 pour plus de détails).

Lors de la génération du modèle prédictif de qualité sonore, l'algorithme du *Lasso* fut réalisé avec un maximum de 10 prédicteurs retenus dans le modèle final. Cependant, le *Lasso* n'a retenu que 4 prédicteurs dans le modèle final de qualité sonore.

La signification de chaque prédicteur est testée à l'aide de la « validation croisée ». Celle-ci est basée sur la prédiction automatique des données expérimentales. L'ensemble de données original est divisé en k échantillons (10 dans notre cas), puis ces données sont utilisées pour prédire un échantillon qui a été retiré de l'ensemble de données et ainsi de suite jusqu'à l'échantillon $k - 1$.

Le modèle de prédiction de qualité sonore (« Modèle 1 ») est présenté au tableau 2.1. Dans ce tableau, la première colonne correspond aux prédicteurs retenus dans le modèle prédictif de qualité sonore. L'« Intercept » est l'ordonnée à l'origine, il est seulement utile pour créer des prévisions dans la gamme appropriée. Dans le tableau 2.1, la deuxième colonne ($\tilde{\beta}_m$) est la valeur estimée du coefficient β_m pour le modèle de régression linéaire de l'équation (1.8). Seuls les coefficients non nuls, issus du modèle parcimonieux créé par le *Lasso*, sont incorporés au tableau. Un $\tilde{\beta}_m$ positif indique une métrique ou un facteur à impact positif sur la qualité sonore. Un $\tilde{\beta}_m$ négatif indique, inversement, une métrique ou un facteur à impact négatif. La colonne *SE* est l'erreur standard pour le coefficient $\tilde{\beta}_m$ (une forte *SE* indique une forte erreur sur l'estimation du coefficient, il devra donc être traité avec précaution). La colonne *t* est utilisée pour le calcul de la valeur-p du $\tilde{\beta}_m$ correspondant. La valeur *t* est une t-statistique pour le cas où le coefficient serait nul ($t = \tilde{\beta}_m/SE$). La colonne *p* donne la probabilité de l'hypothèse de nullité de l'effet du prédicteur.

Pour rappel, une faible valeur-p confirme la faible probabilité que le prédicteur n'ait pas d'effet sur les observations. Ainsi, la valeur-p donne une idée sur la significativité statistique de la métrique comme prédicteur dans le modèle empirique. Dans les modèles de QS, les prédicteurs avec des valeurs-p sous le seuil classique de 0.05 sont ceux probablement à considérer comme statistiquement significatifs.

Tableau 2.1 Modèle 1 : modèle de prédiction de QS basé sur l'association des participants cohérents des grappes du G1 et du G2 en utilisant tous les métriques et facteurs comme prédicteurs potentiels (191 métriques et facteurs).

Participants cohérents de la seconde grappe G1/G2				
Prédicteurs	$\tilde{\beta}_m$	SE	t	p
« Intercept »	1209.94905	442.477119	2.73448952	0.01942184
« SpecLoudNessBarkScaleA »	-0.0900361	0.07710914	-1.1676449	0.26763653
« SpecLoudNessBarkScaleB »	0.15424441	0.07691365	2.00542301	0.07014894
« spectral_brightness_Std »	80.9606238	28.3266355	2.85810942	0.01556921
« tonal_chromagram_centroid _PeriodEntropy »	-1252.2198	457.772271	-2.7354645	0.01938802

En analysant le tableau 2.1, l'interprétation textuelle du Modèle 1 serait que le contenu fréquentiel pour une Bark B (une des 24 Barks de sonie spécifique, ici non explicitée pour cause de confidentialité) et la variation de la brillance spectrale ont un impact positif sur les valeurs de mérite alors que le contenu fréquentiel pour une Bark A (une des 24 Barks de sonie spécifique, ici non explicitée pour cause de confidentialité) et la périodicité de la variation stochastique de la tonalité ont un effet négatif.

Sur la base d'observations préliminaires, certaines métriques furent rejetées puisque jugées trop complexes. Les métriques en question sont :

- « mfcc » : *mel frequency cepstral coefficient* ; métrique qui offre une description de la forme spectrale du son.
- « dmfcc » : *delta mel frequency cepstral coefficient* ; première dérivée de « mfcc ».
- « ddmfcc » : *delta delta mel frequency cepstral coefficient* ; seconde dérivée de « mfcc ».
- « periodFreq » : *the frequency of the main periodicity* ; la fréquence (en Hertz) de la périodicité maximale détectée dans le cadre par évolution de cadre des valeurs, évaluées au cours du calcul de l'ordre d'autocorrélation.
- « periodAmp » : *the normalized amplitude of the main periodicity* ; l'amplitude normalisée de la périodicité principale.
- « periodEntropy » : *the entropy of the periodicity curve* ; l'entropie Shannon de la fonction d'autocorrélation des métriques d'un échantillon sonore complet.

Le nouvel ensemble de prédicteurs potentiels est donc réduit à seulement 141 métriques et facteurs. Ainsi, une régression linéaire avec cet ensemble réduit de métriques et facteurs considérés comme prédicteurs potentiels est réalisée avec l'algorithme *Lasso* pour construire un modèle empirique pour la prédiction des valeurs de mérite.

Le modèle de prédiction de qualité sonore (« Modèle 2 ») est présenté au tableau 2.2. Les définitions des colonnes de ce tableau ont été données à la page précédente.

Pour ce modèle avec une valeur-p globale très faible de $5.51 \cdot 10^{-6}$, l'hypothèse de nullité de l'effet sur les observations est rejetée. Autrement dit, il est possible de confirmer que les variations des prédicteurs ont un impact sur les observations, les valeurs de mérite dans ce cas. Une interprétation textuelle du modèle présenté au tableau 2.2 serait que le contenu fréquentiel pour la Bark A à un effet négatif sur les valeurs de mérite alors que les trois autres prédicteurs retenus (contenu fréquentiel pour la Bark B, variation et pente de la brillance spectrale) ont un impact positif sur les valeurs de mérite.

Tableau 2.2 Modèle 2 : modèle de prédiction de QS basé sur l’association des participants cohérents des grappes du G1 et du G2 en utilisant seulement les 141 métriques et facteurs comme prédicteurs potentiels.

Participants cohérents de la seconde grappe G1/G2				
Prédicteurs	$\hat{\beta}_m$	SE	t	p
« Intercept »	0.86108	1.1018	0.78156	0.45097
« SpecLoudNessBarkScaleA »	-0.25086	0.062856	-3.991	0.0021187
« SpecLoudNessBarkScaleB »	0.10864	0.083631	1.299	0.22052
« spectral_brightness_Std »	42.992	36.625	1.1738	0.26525
« spectral_brightness_Slope »	1.4119	0.56014	2.5206	0.028445

Les métriques qui se distinguent par de plus faibles valeur-p sont « SpecLoudNessBarkScaleA » (sonie spécifique pour Bark A, ici non explicitée pour cause de confidentialité) et « spectral_brightness_Slope » (la pente de la brillance du son). Les recommandations peuvent donc être résumées comme suit :

- le premier, avec un coefficient négatif de -0.25 , signifie qu’il faut diminuer le contenu en fréquence correspondant à la sonie spécifique pour Bark A.
- le deuxième, avec un coefficient positif de 1.41 , indique qu’il faut favoriser la croissance dans le temps du « spectral brightness » (la brillance du son).

Les deux autres métriques « SpecLoudNessBarkScaleB » (sonie spécifique pour Bark B, ici non explicitée pour cause de confidentialité) et « spectral_brightness_Std » (l’écart type de la brillance du son) n’ont pas une valeur-p significative (c.-à-d. une valeur-p plus grande que le seuil classique de 0.05) et sont donc non fiables, néanmoins les résultats sont cohérents avec des observations précédentes réalisées dans le cadre de dSkibel :

- augmenter le contenu en fréquence correspondant à Bark B,
- augmenter la variation dans le temps de la brillance du son.

2.5 Résultats de prédiction des valeurs de mérite

Dans cette étude, le but de la construction d’un modèle prédictif de QS est d’utiliser ce dernier pour prédire la qualité sonore de nouveaux échantillons sonores, autre que ceux du DOE. Préalablement, le modèle prédictif de QS doit être validé pour des échantillons sonores avec des valeurs de mérite mesurées.

Donc, l’objectif de cette partie est d’évaluer la capacité prédictive de chacun des modèles conçus à la Sec. 2.4. Pour ce faire, une prédiction de la qualité sonore des 16 échantillons

du DOE est effectuée à partir du Modèle 1 puis du Modèle 2. Ainsi, il est important de retrouver à partir de ces modèles prédictifs les valeurs de mérites des résultats de tests d'écoute.

Les prédictions sont montrées à la figure 2.3 (page 37). Sont représentées sur la figure 2.3 : les valeurs de mérite mesurées à partir des résultats de tests d'écoute, les valeurs de mérite prédites à partir du premier modèle (indiqué dans le Tab. 2.1) et les valeurs de mérite prédites à partir du deuxième modèle (indiqué dans le Tab. 2.2).

La cartographie de rectangles noirs et blancs en bas de la figure représente le signe du gain des facteurs du DOE pour chaque échantillon :

- un rectangle NOIR désigne que le gain du facteur est positif (gain = +6 dB ref 1 pour tous les facteurs sauf le « Rumble » avec un gain = 0 dB ref 1),
- un rectangle BLANC indique que le gain sur le facteur est négatif (gain = -4 dB ref 1 pour tous les facteurs sauf le « Rumble » avec un gain = -12 dB ref 1).

On constate que la régression linéaire décrite plus haut a permis de prédire correctement le jugement subjectif des sons du DOE (VRM A) à partir des deux modèles prédictifs. Puis, la prédiction des valeurs de mérite à partir du « Modèle 2 » est satisfaisante, ceci est

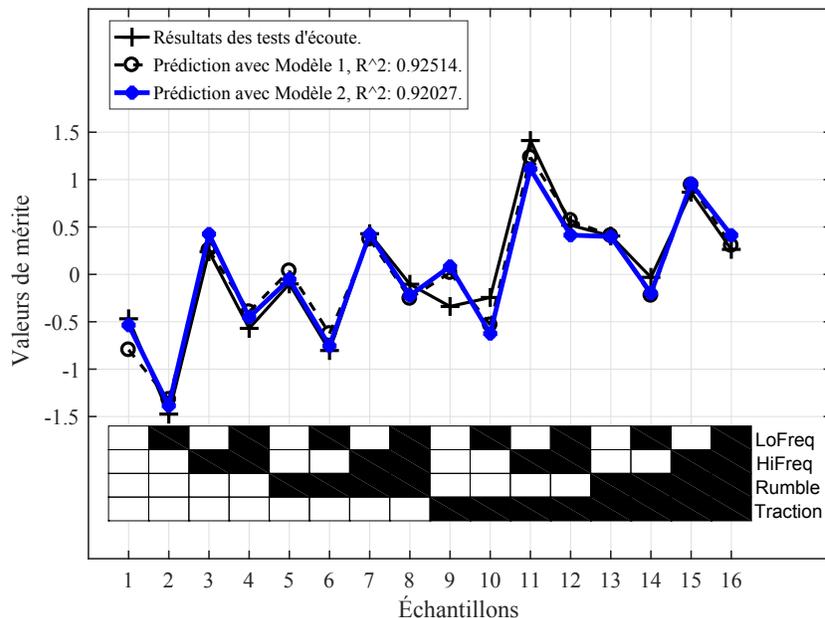


Figure 2.3 Valeurs de mérite (+) et valeurs de mérite prédites (o, ●) en fonction du DOE (grille de cases noires et blanches en bas du graphique). Les réponses du test d'écoute sont montrées par des croix. Les prédictions de ces réponses du test d'écoute sont montrées par des o pour le Modèle 1. Les prédictions de ces réponses du test d'écoute sont montrées par des ● pour le Modèle 2.

attesté par un coefficient de détermination R^2 de 0.92. Le coefficient de détermination est la corrélation entre les observations et les valeurs prédites. Finalement, le modèle prédictif de qualité sonore « Modèle 2 » permet de retrouver pratiquement la même prédiction qu'avec le « Modèle 1 ».

Ainsi, le modèle prédictif de qualité sonore « Modèle 2 » servira pour prédire les jugements de qualité sonore des échantillons de sons qui ne sont pas forcément inclus dans le plan d'expérience étudié dans ce chapitre.

2.6 Conclusion

Ce chapitre a étudié la qualité sonore d'un véhicule récréatif motorisé (A). Au début, des valeurs de mérites sont mesurées à l'aide d'un test d'écoute sur des variantes de sons de ce véhicule en phase d'accélération.

Ensuite, un modèle perceptif de l'accélération du véhicule récréatif motorisé (A) a été réalisé avec l'algorithme *Lasso*. Ce modèle fut élaboré et validé à partir des résultats de tests d'écoute. Le modèle prédictif de qualité sonore proposé permet de prédire les jugements de qualité sonore des échantillons de son étudiés qui, par exemple, n'auraient pas été utilisés en situation de tests d'écoute.

D'après les résultats exposés dans ce chapitre et à partir du modèle prédictif de qualité sonore élaboré, les suggestions de conception pour améliorer la qualité sonore globale du véhicule récréatif motorisé à l'étape d'accélération sont, par ordre décroissant d'influence :

- Diminuer le contenu en fréquence correspondant aux environs de Bark A.
- Augmenter la pente (dans le temps) de la brillance du son.
- Augmenter le contenu en fréquence correspondant aux environs de Bark B.
- Augmenter la variation dans le temps (avec l'accélération) de la brillance du son.

CHAPITRE 3

ÉTUDE DE LA QUALITÉ SONORE D'UN NOUVEAU VÉHICULE

3.1 Introduction

Ce chapitre constitue une suite des travaux de recherche effectués dans la partie QS, au cours du projet dSkibel. Dans ce chapitre, une étude de la qualité sonore pour le nouveau véhicule récréatif motorisé (B) est rapportée. Ce nouveau véhicule fut développé dans le cadre du projet dSkibel.

Ce chapitre présente d'une part, l'acquisition et l'analyse de signaux binauraux sur le nouveau véhicule récréatif motorisé (B). D'une autre part, la prédiction de valeurs de mérite de variantes du son d'accélération du nouveau VRM (B) avec des modifications virtuelles. Pour ce faire, un plan d'expérience similaire à celui utilisé pour l'évaluation de la QS du véhicule récréatif motorisé (A) (Sec. 2.2.2) sera adopté pour cette étude. Puis, à partir du modèle prédictif de QS réalisé dans le chapitre précédent (« Modèle 2 »), sera évaluée la QS des modifications virtuelles de son d'accélération du nouveau VRM.

Dans ce chapitre seront présentées les mesures acoustiques sur le nouveau véhicule récréatif motorisé en mouvement, par enregistrement binaural sur le conducteur. Puis, sera comparée une première estimation de la qualité sonore du nouveau véhicule (B) et celle du véhicule (A). Ensuite, une évaluation de qualité sonore des variations du son d'accélération du nouveau VRM sera effectuée dans la section 3.4. Finalement, sera présentée une brève conclusion qui résume les principaux résultats et constatations de ce chapitre.

3.2 Mesures acoustiques sur le nouveau VRM

Deux campagnes de mesures furent réalisées. Ces mesures concernent l'acquisition de signaux binauraux sur le nouveau véhicule récréatif motorisé (B) avec des références moteur (tours par minutes et tachymètre). Le véhicule (B) constitue l'aboutissement de l'ensemble des groupes de travail du projet dSkibel. Avec les signaux binauraux, il sera possible de prédire la qualité sonore sur la base des modèles prédictifs décrits au chapitre précédent.

Ces signaux binauraux seront aussi utiles pour la réalisation de tests d'écoute visant l'optimisation de la qualité sonore du nouveau VRM, ce qui est le sujet du chapitre 4.

3.2.1 Campagne de mesures

Cette section décrit la procédure suivie pour effectuer la prise de mesures acoustiques sur le nouveau véhicule récréatif motorisé.

Positions des microphones et capteurs

Premièrement, les positions de microphones et capteurs de référence furent définies ; les emplacements ont été choisis pour permettre l'évaluation de la majorité des sources acoustiques des composants du VRM dans le cadre plus général du projet dSkibel. Ensuite, diverses conditions de vitesses stabilisées et d'accélération (lentes et rapides) ont été déterminées pour les cycles d'opération lors des mesures sur piste.

Des microphones binauraux B&KTM furent installés sur le conducteur, à l'intérieur d'un casque du pilote, afin de mesurer le bruit perçu au cours de la conduite du VRM. Deux microphones furent placés sur le casque, ces derniers mesurent le bruit à l'extérieur du casque à la même position que les microphones binauraux (côtés gauche et droit). Les autres microphones ont été positionnés près des sources potentielles.

Cycles d'opération

Les cycles d'opération ont été effectués dans l'ordre : *idle* (tourne au ralenti, en attente) ; 30 km/h ; 50 km/h ; 70 km/h ; 90 km/h ; 110 km/h ; accélération lente ; accélération rapide. Pour les vitesses constantes, trente secondes par état furent enregistrées, sauf pour l'accélération rapide qui doit être faite en quelques secondes. Le pilote annonce verbalement l'étape suivante avant de lancer la prochaine séquence de telle sorte que ces indications verbales soient audibles dans les mesures pour post-traitement et édition.

Enregistrement

Les enregistrements ont été effectués avec un système de mesure LMSTM installé dans une valise de transport placée sur le tunnel derrière le pilote. La fréquence d'échantillonnage des acquisitions réalisées était de 51 kHz avec une résolution de 16 bits. Les données de mesure sont ensuite transformées en format audionumérique (fichiers .wav à plusieurs canaux) avec une fréquence d'échantillonnage de 48 kHz. Le système LMS permet aussi l'enregistrement de la valeur du RPM moteur et la vitesse du véhicule directement à partir du CAN (Convertisseur Analogique-Numérique).

L'utilisation du LMS en mode autonome a été expérimentée pour la première fois dans le projet et semble être un outil plus simple qui facilite l'instrumentation d'un véhicule récréatif motorisé en mouvement. Le principe est de faire fonctionner le système LMS directement avec le *Kit Recorder* de LMS, sans le raccorder à un ordinateur lors des mesures, ce dernier va donc fonctionner sur les paramètres enregistrés sur une carte mémoire. Les caractéristiques techniques de l'enregistreur LMS sont :

- Enregistrement autonome sur *compact flash*.
- Pilotage par un PDA (*Personal Digital Assistant*; assistant numérique personnel) en liaison *Bluetooth*.
- Connexion Ethernet haut débit lors de la mesure avec ordinateur connecté au LMS.
- Application logicielle simple d'utilisation pour l'acquisition, la mesure, la validation instantanée et l'édition de rapport.
- Récepteur GPS et CAN embarqué.

3.3 Prédiction préliminaire de la qualité sonore du nouveau véhicule récréatif motorisé (B)

Dans cette section on effectue une première évaluation la qualité sonore du VRM (B) sur la base de modèles de prédiction de qualité sonore. Ces modèles furent construits pour le véhicule récréatif motorisé (A). Le modèle en question fut présenté dans le Tab. 2.2 à la Sec. 2.4. Les premiers résultats de prédiction pour ce VRM (B) sont donnés au Tab. 3.1.

Tableau 3.1 Valeur de mérite du son du VRM (B) comparée à la valeur de mérite du son du VRM (A).

Échantillon sonore	Valeur de mérite
Son d'une accélération rapide (20 à 100 km/h) du VRM (B)	-0.0673
Son de référence du VRM (A), c.-à-d. sans modifications virtuelles des facteurs	-0.7103
Son donnant la plus faible valeur de mérite du VRM (A) (+1 - 1 - 1 - 1)	-1.319
Son donnant la plus haute valeur de mérite du VRM (A) (-1 + 1 - 1 + 1)	1.235

La prédiction de la qualité sonore d'une accélération rapide du VRM (B) (de 20 à 100 km/h en 5 secondes, ligne 1 du Tab. 3.1), à partir du modèle prédictif de qualité sonore précédent, attribue une valeur de mérite de -0.07 . Cette valeur de mérite est plus intéressante que celle du son de référence du VRM (A), la valeur étant -0.71 (ligne 2 du Tab. 3.1). À première vue, la qualité sonore du VRM (B) semble être légèrement meilleure que le VRM (A). En guise de comparaison, le tableau 3.1 présente également les valeurs de mérite de deux échantillons sonores du VRM (A), modifiés virtuellement (ligne 3 et ligne 4 du Tab. 3.1). Les échantillons en question sont : le son donnant la plus faible valeur de mérite du VRM (A) (-1.32) et le son donnant la plus haute valeur de mérite (1.24). Respectivement, échantillon #2 et échantillon #11 présentés à la Fig. 2.3, page 37.

3.4 Évaluation de la qualité sonore de modifications virtuelles du son d'accélération du VRM (B)

L'objectif dans cette section est la prédiction de valeurs de mérite de variantes du son d'accélération du VRM (B) (modifications virtuelles similaires à ceux évaluées pour le VRM (A)) à partir du modèle prédictif de qualité sonore « Modèle 2 », modèle présenté à la section 2.4 du chapitre 2. Il est à noter que ce modèle fut construit pour le VRM (A).

3.4.1 Préparation des échantillons sonores pour la prédiction

Un segment de son binaural mesuré pour le VRM (B) lors d'une accélération rapide de 20 à 100 km/h en 5 secondes a été choisi pour le reste de cette étude. Cet échantillon est enregistré à l'aide des microphones binauraux B&KTM aux oreilles du pilote du VRM (B) à l'intérieur d'un casque BV2S avec une fréquence d'échantillonnage de 51 kHz. Le segment de son est ensuite modifié numériquement pour avoir une fréquence d'échantillonnage de 48 kHz et une résolution de 24 bits avant d'être importé dans MatlabTM pour la préparation du test d'écoute.

Une banque d'échantillons de sons du VRM (B) similaire à celle des tests d'écoute indiquée au chapitre 2 (16 échantillons filtrés selon 4 facteurs) a été générée à partir de la fonction de filtrage Matlab créée pour le projet. Les quatre facteurs en question sont indiqués dans la Sec. 2.2 (page 28).

Le spectrogramme du son original fut modifié selon les facteurs indiqués au tableau 3.2 pour créer les échantillons sonores. Les deux niveaux (*on*, *off*, ou $+1$, -1 pour un DOE bipolaire classique à deux niveaux) pour les trois premiers facteurs sont les suivants :

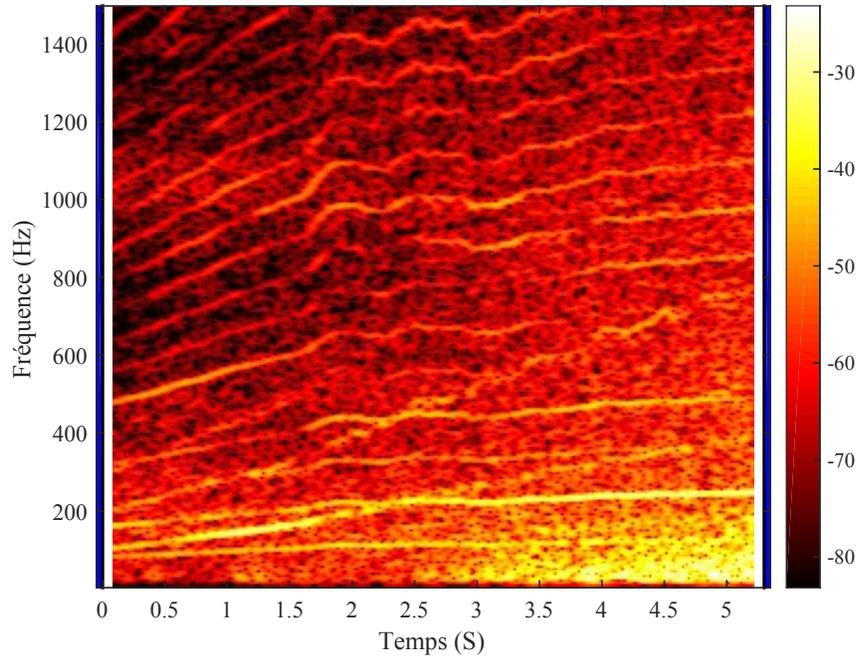


Figure 3.1 Spectrogramme de l'enregistrement original du VRM (B) (oreille gauche) (échelle de couleurs : dB ref 1).

+6 dB (*on*) et -4 dB (*off*) pour chaque harmonique. Ce qui introduit une différence de 10 dB entre *on* et *off* du statut de ces trois facteurs. Pour le vrombissement en basses fréquences, les deux niveaux sont de 0 et de -12 dB, respectivement. En effet, on peut déjà affirmer que ce paramètre ne devra pas être intensifié pour parvenir à une meilleure qualité sonore du véhicule récréatif motorisé. Le tableau 3.2 présente une liste complète des sons générés pour la prédiction de la qualité sonore du VRM (B).

Après la génération des variantes du son du VRM (B), il peut être utile d'ajuster le gain de chaque signal par rapport à un signal de référence afin que les échantillons sonores soient tous perçus comme ayant la même intensité sonore (voir Sec. 2.2.5). Ainsi, les échantillons sonores ont été égalisés en sonie globale par rapport à l'échantillon possédant la plus faible valeur de sonie global. Dans notre cas, l'égalisation en sonie globale des sons du DOE (indiqué au Tab. 3.2) est effectuée en prenant l'échantillon « Run 1 » comme référence.

3.4.2 Prédiction de la qualité sonore du VRM (B) (pour les 16 variantes de l'échantillon)

Les prédictions des valeurs de mérite à partir du modèle linéaire indiquées au tableau 2.2 (page 36) sont représentées à la figure 3.2. Ces valeurs de mérite prédites se basent donc sur les échantillons avec modifications virtuelles décrites plus haut auxquels est appliqué

Tableau 3.2 Liste des sons et des niveaux pour chaque facteur.

Son	F1	F2	F3	F4	Nom de l'échantillon
1	-1	-1	-1	-1	Run1_-1-1-1-1
2	+1	-1	-1	-1	Run2_+1-1-1-1
3	-1	+1	-1	-1	Run3_-1+1-1-1
4	+1	+1	-1	-1	Run4_+1+1-1-1
5	-1	-1	+1	-1	Run5_-1-1+1-1
6	+1	-1	+1	-1	Run6_+1-1+1-1
7	-1	+1	+1	-1	Run7_-1+1+1-1
8	+1	+1	+1	-1	Run8_+1+1+1-1
9	-1	-1	-1	+1	Run9_-1-1-1+1
10	+1	-1	-1	+1	Run10_+1-1-1+1
11	-1	+1	-1	+1	Run11_-1+1-1+1
12	+1	+1	-1	+1	Run12_+1+1-1+1
13	-1	-1	+1	+1	Run13_-1-1+1+1
14	+1	-1	+1	+1	Run14_+1-1+1+1
15	-1	+1	+1	+1	Run15_-1+1+1+1
16	+1	+1	+1	+1	Run16_+1+1+1+1

le modèle de prédiction de la QS décrit au chapitre 2. Ainsi, le modèle trouvé plutôt est utilisé pour prédire les valeurs de mérite et la QS d'échantillons qui ne furent pas utilisés pour établir le dit modèle. Dans ce cas, il est vraiment question de prédiction, voire d'extrapolation du modèle. Cette section explore cette possibilité. Les valeurs de mérites prédites pour les 16 variantes de l'échantillon sonore du nouveau véhicule récréatif motorisé sont représentées en bleu, libellés « Prédiction avec Modèle 2 des sons du VRM (B) » dans la légende. Cette figure compare : 1) les résultats et les prédictions des tests d'écoute déjà rapportés (Fig. 2.3), 2) les prédictions des valeurs de mérite du VRM (B) pour 16 modifications suivant le même DOE, 3) les valeurs de mérites pour les sons de références (sans modification virtuelle) (représentés par les traits horizontaux). La figure présente aussi le DOE sous la forme d'une grille pour laquelle une case noire indique une amplification du facteur correspondant et une case blanche indique une atténuation du facteur correspondant.

De manière globale, les évaluations de qualité sonore du VRM (B) sont cohérentes avec les valeurs de mérite observées ou prédites pour le VRM (A) et suivent la même tendance. Par exemple, l'absence du vrombissement augmente toujours la valeur de mérite et la présence accentuée des harmoniques hautes du moteur augmente systématiquement les valeurs de mérite. L'échantillon #3 (« Run3_-1+1-1-1 ») du VRM (B) s'est distingué comme celui offrant la meilleure valeur de mérite, ce dernier est l'échantillon avec tous les facteurs au niveau bas sauf pour les harmoniques hautes fréquences du moteur qui ont été augmentés.

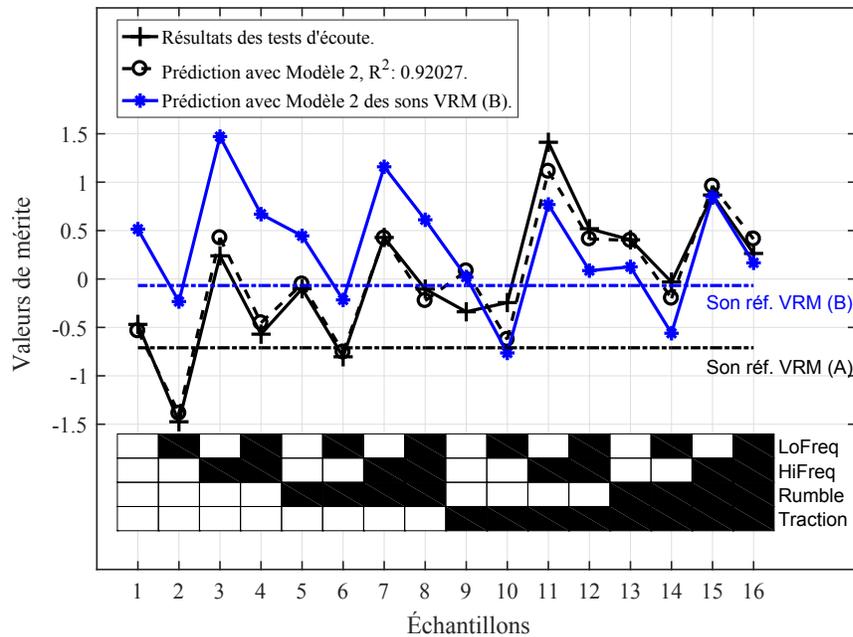


Figure 3.2 Valeurs de mérite (+) et valeurs de mérite prédites (o, •) en fonction du DOE (grille de cases noires et blanches en bas du graphique). Les réponses du test d'écoute sont montrées par des croix. Les prédictions de ces réponses du test d'écoute sont montrées par des o pour un modèle prédictif conçu pour ces données. Les prédictions des valeurs de mérites pour le nouvel échantillon du VRM ayant subi le même DOE sont montrées par des •. Finalement, les valeurs de mérite de départ des échantillons originaux avant modifications virtuelles du DOE sont montrées par des traits horizontaux en guise de références. Un rectangle NOIR désigne que le gain du facteur est positif (gain = +6 dB ref 1 pour tous les facteurs sauf le « Rumble » avec un gain = 0 dB ref 1), un rectangle BLANC indique que le gain sur le facteur est négatif (gain = -4 dB ref 1 pour tous les facteurs sauf le « Rumble » avec un gain = -12 dB ref 1).

D'après les résultats de l'étude, le son du VRM (B) est, contrairement au résultat des tests d'écoute de l'automne 2015, pénalisé par le facteur « Traction ». L'effet négatif de ce facteur peut être observé en comparant la première moitié des échantillons où le facteur « Traction » est atténué (sons 1 à 8) avec la deuxième moitié où le facteur « Traction » (son associé aux éléments tournants) est augmenté (sons 9 à 16), les valeurs de mérites du son du VRM (B) sont meilleures par rapport au son du VRM (A) dans le cas où le facteur « Traction » est baissé de 4 dB.

3.5 Conclusion

Ce chapitre a présenté : 1) les enregistrements par mesures acoustiques sur le véhicule récréatif motorisé (B) en mouvement, 2) une première évaluation la qualité sonore du VRM (B) sur la base de modèles perceptifs de qualité sonore, 3) l'évaluation de la qualité sonore de modifications virtuelles du son d'accélération du VRM (B).

Puis, la prédiction préliminaire de la qualité sonore du VRM (B), à partir du « Modèle 2 », a permis de constater que le son d'accélération du VRM (B) a une meilleure valeur de mérite par rapport au son d'accélération du véhicule récréatif motorisé de référence (A).

Enfin, la prédiction de la qualité sonore du VRM (B), à partir du modèle précédent, attribue des valeurs de mérite intéressantes et cohérentes avec les résultats obtenus des tests d'écoute de l'automne 2015 pour des sons d'accélération, mais aussi des tests d'écoute du printemps 2015 pour des sons de vitesse fixe à 50 km/h.

En résumé, la meilleure valeur de mérite du son d'accélération du VRM (B) est attribuée à l'échantillon avec tous les facteurs au niveau bas sauf pour les harmoniques hautes fréquences du moteur qui ont été augmentés. Également, il a été constaté que l'absence du vrombissement de basses fréquences augmente toujours la valeur de mérite.

CHAPITRE 4

PRÉDICTION ET OPTIMISATION DE LA QUALITÉ SONORE

4.1 Introduction

Le but des activités décrites dans ce chapitre concerne l'amélioration et l'optimisation de la qualité sonore du nouveau véhicule récréatif motorisé (B) pour lequel les mesures décrites plus haut furent réalisées. Pour atteindre ce but, trois activités furent réalisées : 1) test d'écoute avec modifications virtuelles du son du nouveau VRM selon un DOE, 2) analyse statistique des résultats de tests d'écoute, ce qui inclut la construction d'un modèle prédictif, et 3) optimisation des niveaux des facteurs du DOE pour maximiser la qualité sonore sur la base du modèle prédictif obtenu.

Pour les tests d'écoute précédents (Chap. 2), le plan d'expérience incorporait quatre facteurs et deux niveaux par facteur. Les quatre facteurs mécaniques étaient les suivants :

- $F1$: « Rumble » ; vrombissement en basses fréquences.
- $F2$: « HiFreq » ; les harmoniques hautes du son du moteur.
- $F3$: « LoFreq » ; les harmoniques basses du son du moteur.
- $F4$: « Traction » ; composé des harmoniques des composants de roulement.

Lors de cette étude, il fut démontré que les facteurs prédominants sur la perception de la qualité sonore étaient $F1$, à impact négatif, et $F2$, à impact positif. Une des limitations de l'étude précédente vient du fait que seuls deux niveaux par facteur furent étudiés. Les modèles prédictifs résultants sont donc obligatoirement linéaires par rapport à ces facteurs. Par exemple, il est impossible de déterminer le niveau optimal de gain à appliquer au facteur à impact positif $F2$ (les harmoniques hautes du moteur) à partir de tels modèles. Ce chapitre vise donc à contourner ces limitations.

L'originalité du présent chapitre consiste donc à se restreindre à ces deux facteurs dominants et à identifier les niveaux optimaux pour ces derniers afin de maximiser la qualité sonore. Le résultat et la recommandation attendus sont donc de conduire au niveau optimal des facteurs étudiés pour accroître la qualité sonore.

Dans ce chapitre, seront définis les facteurs et le plan d'expérience choisis pour l'étude, la liste du matériel utilisé ainsi que les étapes préalables pour la préparation et la réalisation des tests d'écoute. Puis, les résultats seront présentés sous forme d'analyse statistique des tests. Ensuite, seront exposés les modèles utilisés pour la prédiction des paramètres de la qualité sonore. Un modèle prédictif de qualité sonore sera alors développé pour identifier les niveaux optimaux permettant de maximiser la valeur de mérite prédite. Finalement, une conclusion résume les résultats obtenus au cours de cette étude et les recommandations importantes pour la suite du projet.

4.2 Préparation et réalisation de tests d'écoutes

4.2.1 Liste du matériel

La préparation et la réalisation des tests d'écoute ont été effectuées avec le matériel suivant :

- Ordinateur portable avec MatlabTM (version 2015).
- Carte son externe (RME-AUDIOTM FireFace 400).
- Casque d'écoute (SennheiserTM HD600).
- Mannequin Binaural (GRASTM Kemar avec de grandes et de petites oreilles).
- Microphones binauraux (B&KTM).
- Calibreur de microphone (B&KTM).
- Deux conditionneurs CCP (GRASTM 12AL).

4.2.2 Plan d'expérience

Malgré le fait que les facteurs prédominants pour croître la qualité sonore ont été identifiés, le niveau de gain optimal à appliquer reste inconnu. En d'autres termes, à partir de quel niveau de gain est-ce trop ? et à partir de quel niveau est-ce insuffisant ?

Pour répondre à cette question, l'idée est de concevoir à partir de facteurs ou métriques identifiés un modèle quadratique permettant de retrouver le maximum de la valeur de mérite puis identifier les niveaux optimaux.

Le plan de l'expérience factoriel complet offre une variété de scénarios réalisables de test d'écoute par paires avec une limite maximale de 180 paires, ce qui, basé sur des expériences passées avec des échantillons de 4 secondes, correspond à une durée totale d'environ 60 minutes pour les tests d'écoute. Les paragraphes qui suivent présentent les scénarios et

plans d'expérience qui furent envisagés avant la sélection finale d'un seul plan d'expérience. Le but était de concevoir un DOE qui permettrait d'obtenir les niveaux optimaux de facteurs à ajuster pour accroître la qualité sonore tout en permettant la réalisation d'un test d'écoute de moins de 60 minutes.

Pour un seul facteur à étudier, la limite de niveaux envisageables pour un test d'écoute de durée raisonnable (moins de 60 minutes) est de 10 niveaux (45 paires et une possibilité de 4 répétitions pour l'ensemble des paires). Dans ce cas, deux scénarios sont concevables en ce qui a trait au choix du facteur à faire varier. Le premier est une approche par système mécanique (orienté système), ici, le moteur. Le deuxième par une approche par signal/psychoacoustique (orienté signal). Le tableau 4.1 présente les scénarios proposés pour l'étude d'un seul facteur à dix niveaux.

Pour ne pas se limiter à l'étude d'un seul facteur seulement, les deux scénarios suivants proposent une possibilité d'étude de deux facteurs à plusieurs niveaux. Ainsi, le plan d'expérience CCCD offre la possibilité d'étudier jusqu'à cinq niveaux (pour un exemple schématique, voir la section 1.2.5 (page 20)) pour un test d'écoute limité à 45 minutes environ (120 paires). Les deux scénarios possibles dans ce cas sont présentés dans le Tab. 4.2.

Tableau 4.1 Scénarios pour DOE à un facteur et dix niveaux.

Scénarios	Facteurs	Niveaux
Scénario 1 : orienté système	1 Facteur : facteur le plus important ; harmoniques hautes moteur (« HiFreq »)	10 niveaux, ex : -6 dB à +10 dB ou autre
Scénario 2 : orienté signal	1 Facteur : facteur positif important ; Bark B augmenté (« SpecLoudNessBarkScaleB »)	10 niveaux, ex : -6 dB à +10 dB ou autre

Tableau 4.2 Scénarios pour DOE à deux facteurs et cinq niveaux par facteur.

Scénarios	Facteurs	Niveaux
Scénario 3 : orienté système	Facteur 1 : Facteur à impact négatif dominant ; le vrombissement basse fréquence « Rumble »	5 niveaux : DOE CCCD = 12 sons [-17 dB, -14 dB, -7 dB, 0 dB, +3 dB]
	Facteur 2 : Facteur à impact positif dominant ; harmoniques haute moteur « HiFreq »	5 niveaux : DOE CCCD = 12 sons [-3 dB, 0 dB, +7 dB, +14 dB, +17 dB]
Scénario 4 : orienté signal	Facteur 1 : « SpecLoudNessBarkScale A » diminué	5 niveaux : DOE CCCD = 12 sons [-17 dB, -14 dB, -7 dB, 0 dB, +3 dB]
	Facteur 2 : « SpecLoudNessBarkScale B » augmenté	5 niveaux : DOE CCCD = 12 sons [-3 dB, 0 dB, +7 dB, +14 dB, +17 dB]

Afin de répondre à l'objectif premier, il a été décidé de considérer deux des facteurs mécaniques ayant un impact dominant sur la qualité sonore, qui sont :

- $F1$, facteur à impact négatif dominant : vrombissement en basses fréquences.
- $F2$, facteur à impact positif dominant : harmoniques hautes du son du moteur.

Comme illustré à la figure 4.1, la réalisation de ce plan d'expérience avec deux facteurs ($F1$, $F2$) à plusieurs niveaux permettra de dresser une surface (un modèle analytique) des valeurs de mérites en fonction des gains appliqués.

Contrairement au cas d'un DOE à deux niveaux et d'un modèle de prédiction linéaire, cette approche permet de trouver les niveaux optimaux des facteurs. Ainsi, à partir de cette surface de réponse analytique, il est possible d'identifier la valeur optimale de gain pour chaque facteur.

4.2.3 Sélection du plan d'expérience

Sur la base d'une distribution satisfaisante de l'information à travers la région de l'expérience et afin d'explorer le plus grand domaine dans l'étude des niveaux des facteurs, un DOE CCCD a été choisi comme plan d'expérience. Cette configuration requiert 5 niveaux pour chaque facteur. Comme le montre le Tab. 4.3 (page 51), un CCCD sous la forme de 4 (2^2) plans d'expérience factoriels complets a été utilisé. Pour ce plan d'expérience, les deux facteurs ($F1$, $F2$) et les valeurs de gains à 5 niveaux ont été combinés.

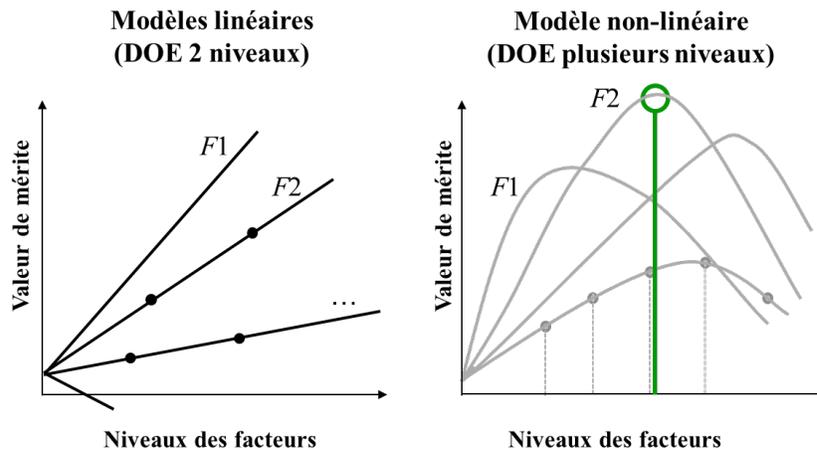


Figure 4.1 Différence entre un plan d'expérience à deux niveaux (gauche) et un plan d'expérience à 5 niveaux. Avec plusieurs niveaux, il est possible d'identifier le niveau optimal de valeur de mérite et des facteurs associés.

La sélection des niveaux variables a été basée sur les résultats obtenus lors des études précédentes (voir Chap. 3). L'arrangement du CCCD, tel que montré au tableau 4.3, plutôt qu'un plan d'expérience à deux niveaux par facteur permet le développement des équations empiriques appropriées (deuxième ordre de plusieurs équations de régression polynomiale) :

$$v_i = \beta_0 + \beta_1 F1 + \beta_2 F2 + \beta_{11} F1^2 + \beta_{22} F2^2 + \beta_{12} F1F2 \quad (4.1)$$

Où v_i est la valeur à modéliser (dans notre cas, la valeur de mérite de qualité sonore), β_i sont les coefficients du modèle de prédiction empirique à trouver et F_i sont les facteurs du plan d'expérience.

4.2.4 Modifications virtuelles

Pour cette étude, le CCCD est appliqué sous forme de 12 modifications virtuelles d'un enregistrement binaural original. Les modifications virtuelles des échantillons sonores est effectuée à l'aide d'une fonction MatlabTM construite pour l'occasion. Cette fonction permet l'amplification ou l'atténuation sélective de composantes fréquentielles qui varient dans le temps. Les modifications virtuelles furent réalisées selon le DOE CCCD du Tab. 4.3.

Le son de départ est le son d'une accélération rapide du VRM (B) dSkibel, de 20 km/h à 100 km/h en 5 secondes, mesuré aux oreilles du conducteur (mesures binaurales de l'hiver 2016). La fréquence d'échantillonnage des acquisitions réalisées était de 51 kHz avec une

Tableau 4.3 Plan d'expérience. Valeurs de gains de chaque facteur pour chaque essai et chaque son résultant.

Espace de design		Plan d'expérience (CCCD)			
Max $F1$ (dB ref 1) :	0	Essai	Bloc	F1 (dB ref 1)	F2 (dB ref 1)
Min $F1$ (dB ref 1) :	-14	1	1	-14	0
Max $F2$ (dB ref 1) :	14	2	1	0	0
Min $F2$ (dB ref 1) :	0	3	1	-14	14
		4	1	0	14
		5	1	-7	7
		6	1	-7	7
		7	2	-17	7
		8	2	3	7
		9	2	-7	-3
		10	2	-7	17
		11	2	-7	7
		12	2	-7	7

résolution de 16 bits. Les données de mesure sont ensuite transformées en format audio-numérique (fichiers .wav à deux canaux) avec une fréquence d'échantillonnage de 48 kHz). Ce segment de son d'accélération a été choisi puisqu'il est représentatif de l'ensemble des bruits de la classe étudiée d'une part et, d'autre part, pour conserver un son de nature proche de ceux utilisés pour les études précédentes.

4.2.5 Égalisation en sonie

L'égalisation en sonie est effectuée pour éviter que les différences d'intensité sonore perçue détournent l'attention des auditeurs des caractéristiques acoustiques plus subtiles que le niveau perçu [15, 36]. Pour rappel, la sonie globale correspond à la surface sous la courbe de la sonie spécifique sur l'échelle de Bark [11].

Lors de la préparation du test d'écoute, les échantillons sonores sont égalisés en sonie globale par rapport à l'échantillon possédant la plus faible valeur de sonie globale. Dans ce cas, le son le moins fort est « Essai 1 » qui est conçu avec un gain de -14 dB pour le facteur $F1$ et sans modification pour le facteur $F2$ par rapport au son de référence (voir Tab. 4.3).

Un exemple de résultat d'égalisation en sonie globale de l'échantillon sonore « Essai 12 » est présenté à la figure 4.2. Cette figure présente les sonies spécifiques. Il est rappelé que la sonie globale est l'aire sous la courbe de la sonie spécifique. Le titre désigne le son à égaliser et le nom de la référence. La sonie spécifique de la référence sélectionnée apparaît en gris. La sonie globale de la référence utilisée pour l'égalisation de sonie est représentée dans la légende en Sone. La sonie spécifique d'origine du son qui doit être réglé à la sonie globale de la référence est affichée en rouge. La sonie globale du son à régler est également représentée dans la légende en Sone. La sonie spécifique finale du son égalisé en sonie globale est représentée en vert et sa sonie globale est indiquée dans la légende en Sone.

Pour ce cas présenté, on note que le son à égaliser est passer d'environ 122 sonies à 107 sonies (pour le canal de gauche) via l'égalisation.

4.2.6 Validation de la reproduction du son

La validation de la reproduction permet de vérifier si les spectres (oreilles gauche et droite) des sons égalisés à l'aide des filtres d'égalisation de la chaîne de reproduction (canaux gauche et droit de la carte de son RME Fireface et du casque Sennheiser HD600) correspondent à ceux des sons qui seront présentés à l'auditeur.

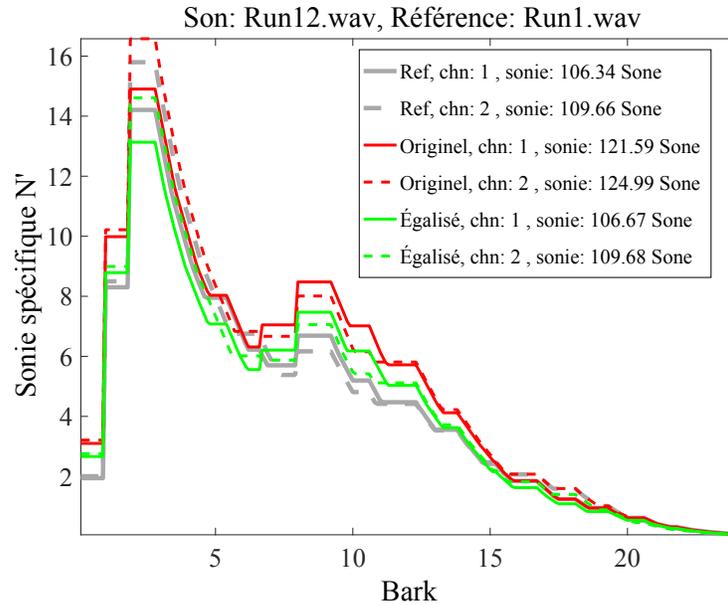


Figure 4.2 Exemple d'égalisation en sonie globale, égalisation du son « Essai 12 » (« Run1 ») en utilisant « Essai 1 » (« Run1 ») comme référence. Sonie spécifique N' en fonction des fréquences sur l'échelle de Bark. En gris : le son de référence. En rouge : le son à ajuster. En vert : le son ajusté en sonie globale pour être équivalent au son en gris.

Pour ce faire, les microphones binauraux, les mêmes que ceux utilisés pour la mesure sur piste, ont été installés sur le mannequin Kemar avec le casque binaural, comme l'illustre la figure 4.3. Les écouteurs ont joué les 12 échantillons sonores du plan d'expérience (qui étaient de sonie corrigée et égalisés en fréquence) tandis que le microphone binaural a simultanément enregistré le son reproduit.

Les figures 4.4 et 4.5 illustrent la comparaison entre les spectres qui doivent être reproduits et ceux reproduits puis mesurés. Il est possible d'y voir que les spectres reproduits et mesurés sont proches des spectres cibles. La différence observée en dessous de 50 Hz est due au filtre passe-haut à cette fréquence de coupure. En effet, pour éviter d'endommager les écouteurs, et puisque ceux-ci ne peuvent que difficilement reproduire les fréquences sous 60 Hz, un filtre passe-haut à 50 Hz est appliqué à tous les échantillons sonores. Au-delà de 5 kHz, le spectre reproduit diffère légèrement du spectre du son initial puisque la variabilité des réponses en fréquence par individu et par modèle d'oreilles pour le Kemar, est plus grande. En effet, pour éviter une égalisation trop individualisée (ce qui pourrait dégrader la qualité de la reproduction pour certains individus) l'égalisation au-dessus de 5 kHz est plus grossière. Finalement, le contenu fréquentiel étant minime au-delà de 10 kHz, les comparaisons ne sont pas pertinentes au-delà de cette fréquence.



Figure 4.3 Montage du mannequin, du casque d'écoute et des microphones binauraux pour la validation de la reproduction d'échantillons utilisés lors de tests d'écoute.

4.2.7 Réalisation des tests d'écoute

Un groupe de 22 sujets volontaires ont participé aux tests d'écoute. Tous les sujets sont des hommes, la majorité n'a pas participé aux tests précédents. Les participants ont été invités sur la base d'un document évalué par le comité d'éthique de l'Université de Sherbrooke. De ce fait, le formulaire d'entente approuvé par le comité d'éthique est présenté à chaque sujet avant le début du test.

Au début, une mesure d'audiogramme a été menée afin d'identifier des défauts d'auditions chez l'auditeur. Aucun participant n'a été identifié comme ayant une audition problématique. De ce fait, tous les candidats furent retenus.

Par la suite, avant chaque test d'écoute, un test d'apprentissage est accompli afin d'initier l'auditeur à l'utilisation de l'interface et à la gamme des sons qu'il entendra lors du test d'écoute complet. Dans ce court test, 10 paires de sons ont été sélectionnées à partir du même plan d'expérience factoriel complet avec seulement 5 échantillons parmi les 12 sons du plan d'expérience.

Les tests d'écoute sont basés sur la méthode de comparaison par paires AB, avec choix forcé (l'option $A = B$ n'est pas disponible) [9, 15, 17, 36].

La question posée pour chaque paire était la même que pour les tests précédents : « Écoutez les sons (A et B) et choisir le plus le *fun* ». Une fois le test terminé, les commentaires informels et écrits du sujet ont été recueillis sur un formulaire imprimé. Dans ce test, 66

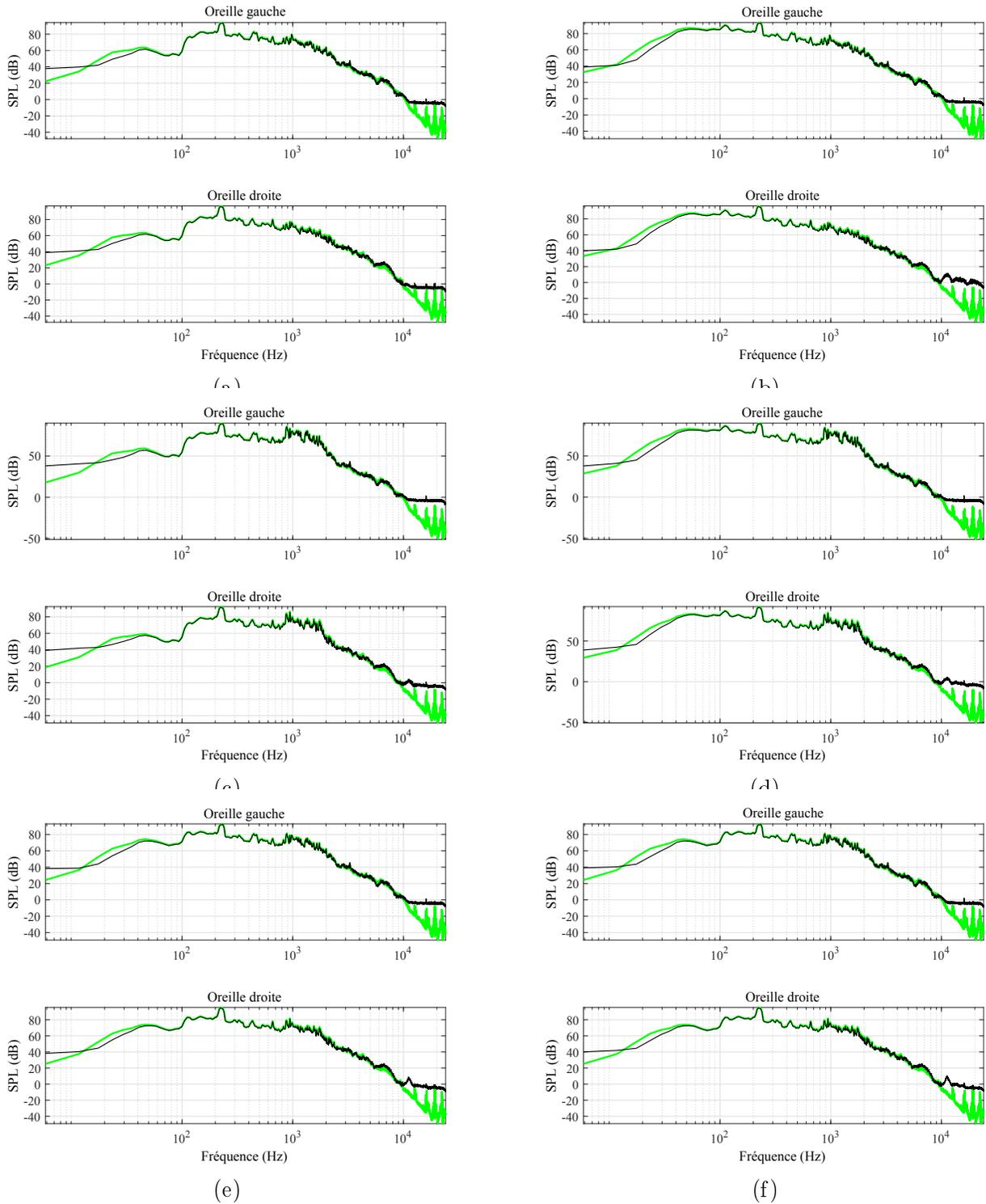


Figure 4.4 Spectres originaux et reproduits des échantillons égalisés en sonie globale et égalisé pour le casque d'écoute ((a) Essai 1 à (f) Essai 6). En haut : oreille gauche. En bas : oreille droite. Vert : Original. Noir : Reproduit.

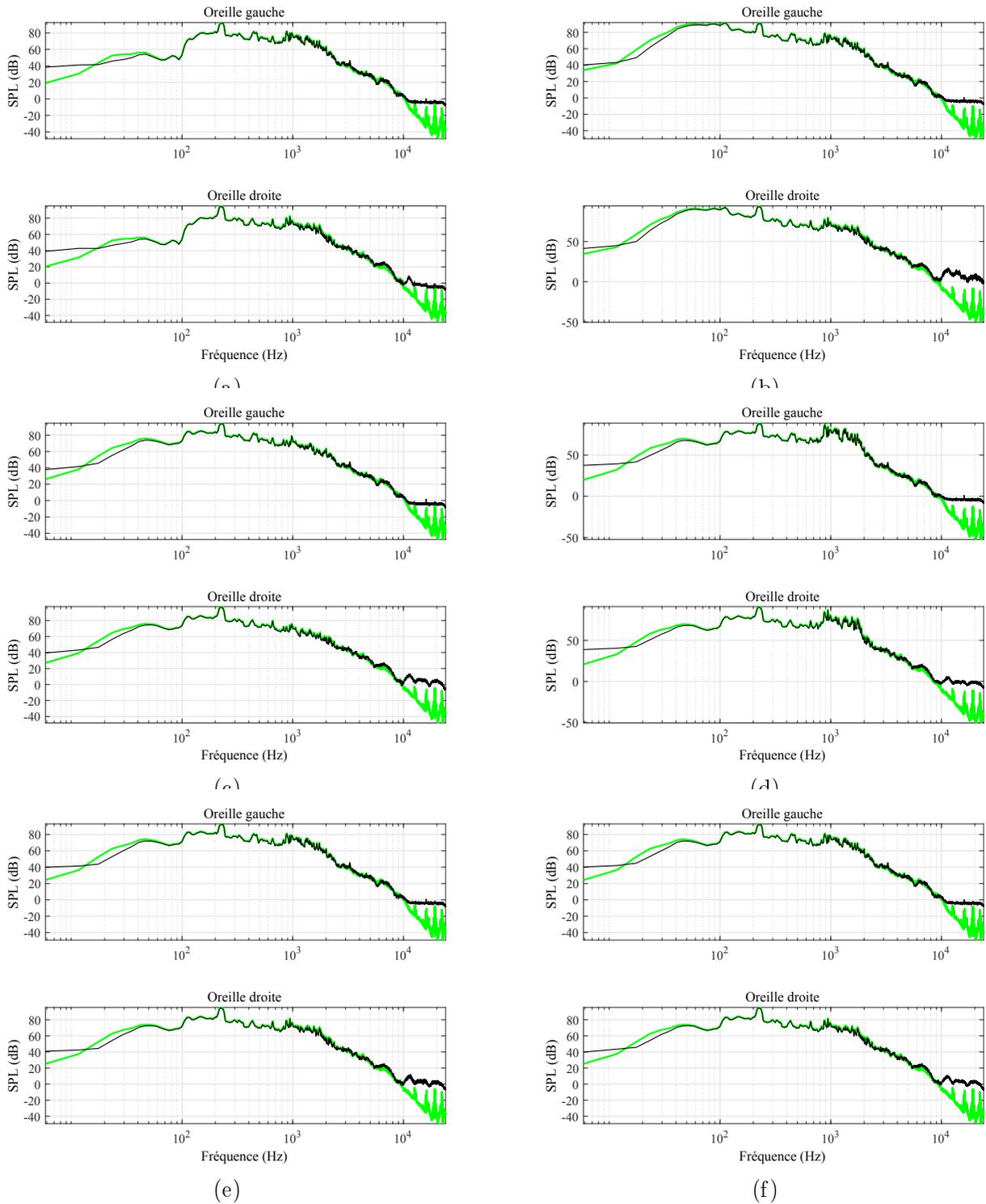


Figure 4.5 Spectres originaux et reproduits des échantillons égalisés en sonie globale et égalisé pour le casque d'écoute ((a) Essai 7 à (f) Essai 12). En haut : oreille gauche. En bas : oreille droite. Vert : Original. Noir : Reproduit.

paires ont été générées selon le plan de l'expérience factoriel complet décrit à la sous-section 4.2.3. Chaque sujet a effectué le test 2 fois avec une pause entre les deux parties. Les 66 paires ont été présentées aléatoirement lors de chaque partie, ce qui fait un total de 132 paires pour deux répétitions de chaque paire. La durée globale du test était de 45 minutes environ.

Lors du test, l'utilisateur est devant deux écrans, celui de gauche présente l'interface graphique et l'écran de droite montre une vidéo en plein écran correspondant à la vue du pilote pendant l'enregistrement sur VRM. L'interface graphique (Fig. 4.6, page 57) permet au sujet de déclencher la lecture du son A et du son B une seule fois chacun. Une fois que les deux sons ont été présentés, le sujet peut alors choisir « A plus que B » ou « B plus que A » par rapport à la question.

Les tests ont été effectués dans la salle d'écoute de la *Wave Field Synthesis* du GAUS avec des murs sombres et les rideaux acoustiques. La moquette sombre et la lumière ambiante douce ont contribué à plonger les sujets dans le test d'écoute. L'environnement était calme dans la salle. Aucune source de distraction n'a été remarquée durant les tests.

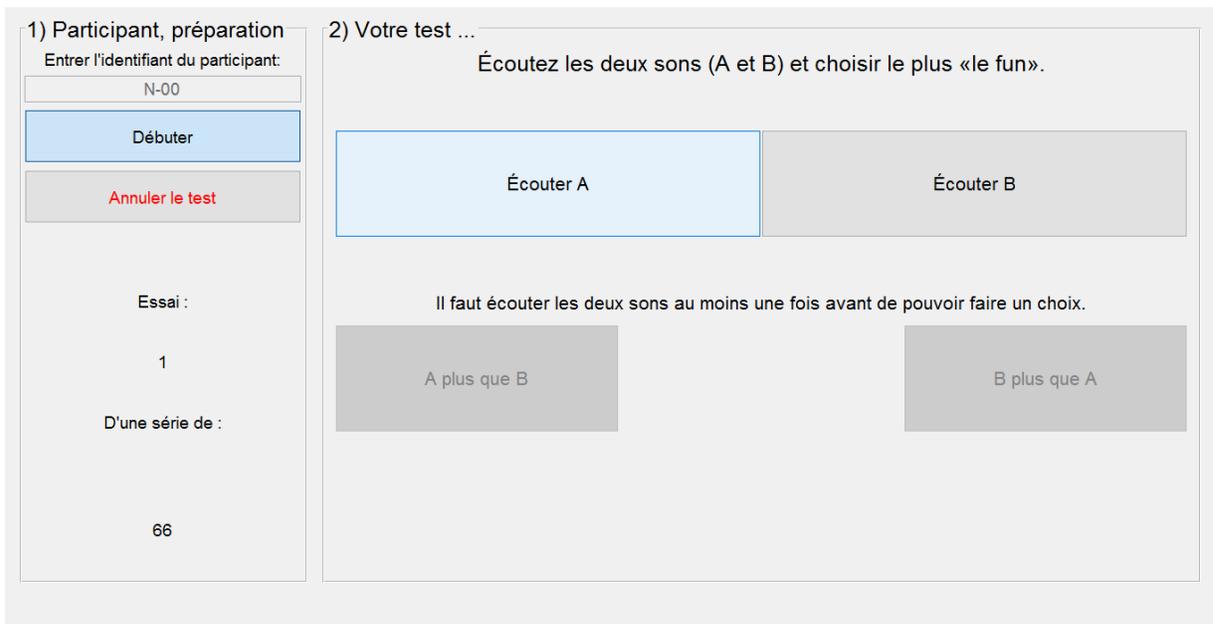


Figure 4.6 Interface graphique utilisée pour les tests d'écoute par comparaison de paires avec choix forcé.

4.3 Résultats des tests d'écoute

4.3.1 Le rejet particulier de participants

En raison de changement des conditions du test d'écoute pour un des participants, qui a jugé le volume trop fort et gênant pour la durée du test, il a été décidé que les résultats de ce sujet seraient exclus pour la suite de l'étude afin d'éviter l'effet de résultats potentiellement biaisés. Le nombre total de participants retenus pour l'analyse statistique est donc $P = 21$ participants au lieu de $P = 22$.

4.3.2 Répétabilité des participants

Avant tout traitement de résultats, une vérification de la cohérence des réponses fournies pour chacun des sujets doit être effectuée. Cela s'interprète par la mesure de répétabilité de chaque participant. Répétabilité exprimée en pourcentage [37] et déjà définie à l'Éq. (1.1). Pour ce test, le calcul de la répétabilité est basé sur les 66 paires du DOE, répétées lors des deux parties du test. La figure 4.7 montre la répétabilité pour chacun des 21 participants.

Tous les participants aux tests d'écoute ont une répétabilité supérieure à 50 % (le seuil acceptable de répétabilité), cela signifie que toutes les évaluations de ces participants sont

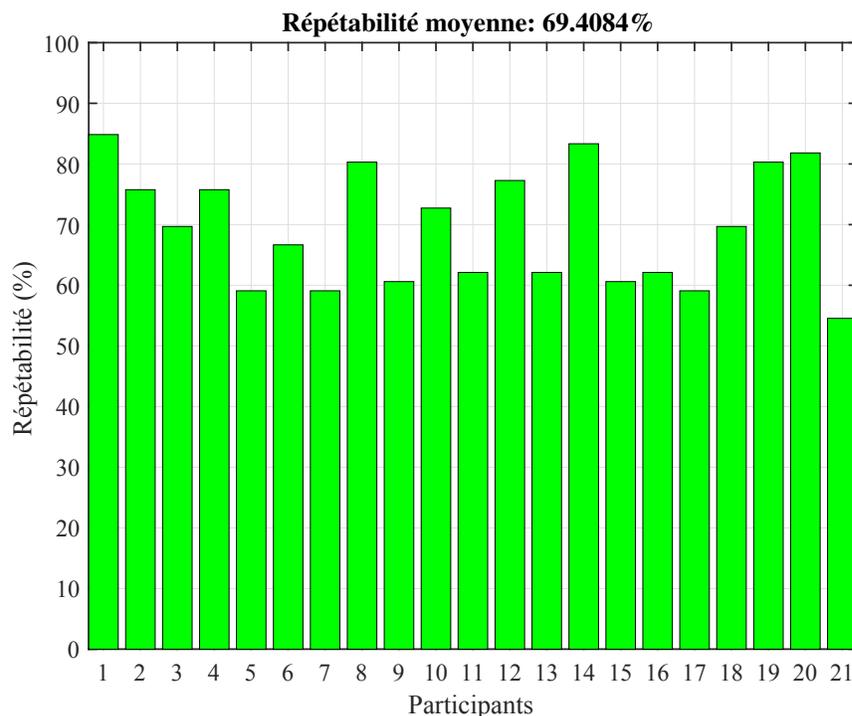


Figure 4.7 Répétabilité de chaque participant et répétabilité moyenne (69.4 %).

retenues pour l'analyse ultérieure. D'autre part, la répétabilité moyenne des sujets de 69.4 % est un indice que le plan d'expérience est relativement bien conçu et que les sons étaient potentiellement distinguables. Le seuil idéal étant de 70 %, celui de 69.4 % est jugé correct mais pas idéal.

4.3.3 Diagramme en boîte du compte total

Le premier résultat de tests d'écoute est représenté sous forme de diagramme en boîte (*Box plot*) du compte total (*count*), pour chaque son. Pour rappel, le compte total pour un son est le nombre de fois qu'un échantillon a été choisi pour tous les participants dans le test de comparaison AB par rapport à l'ensemble de tous les autres échantillons sonores. Dans ce test de 132 paires avec 12 échantillons sonores, le compte est de 0 à 11. Il est à noter que le compte total est normalisé par le nombre de répétitions de chaque paire et par le nombre de participants (voir la sous-section. 1.2.3 du Chapitre 1).

Pour les 21 participants, le diagramme en boîte est montré à la figure 4.8. Sur cette figure et les figures de diagramme en boîte suivantes :

1. Les abscisses font référence au premier chiffre dans les lignes qui décrivent les échantillons sonores, décrits à droite du diagramme.
2. Les numéros de « Run » (« Run1 » jusqu'à « Run12 ») correspondent aux numéros indiqués à la colonne « Essai » du tableau 4.3.
3. Dans la description de chaque échantillon est indiqué les gains appliqués pour F1 et F2, respectivement, séparés par un tiret.

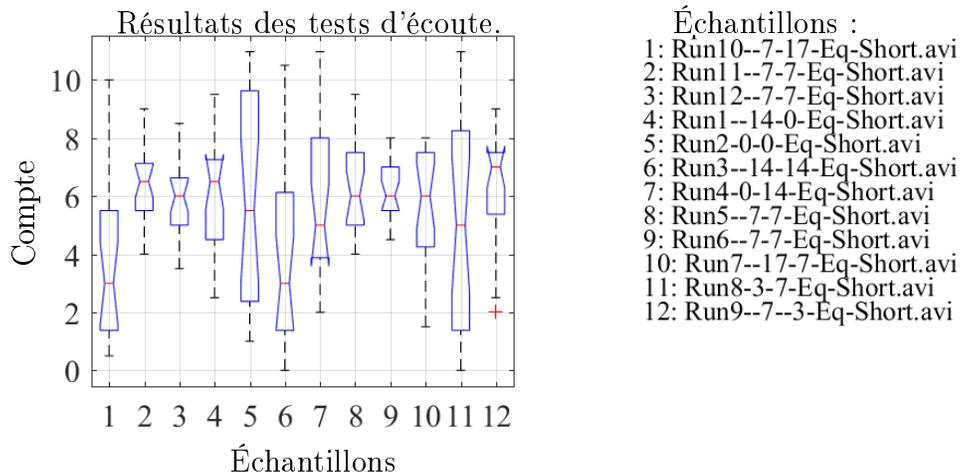


Figure 4.8 Diagramme en boîte des échantillons sonores pour le compte total des participants.

Le diagramme en boîte permet de présenter une tendance visuelle des préférences par échantillon, il indique seulement le nombre de fois que chaque son a été préféré aux autres. De manière générale, plus la boîte est petite, plus il y a d'observations proches de la médiane.

Le diagramme en boîte pour tous les participants (Fig. 4.8) présente quelques petites encoches de pliages (échantillons #4, #7 et #12) ainsi qu'une seule valeur aberrante (échantillon #12).

4.3.4 Analyse de variance à un degré de liberté

La table d'ANOVA1, indique la probabilité de signification de l'hypothèse de nullité du facteur sur les observations [34]). Pour le cas étudié ici, l'hypothèse de nullité serait que « les échantillons sonores présentés n'ont pas d'effet sur la réponse des participants ».

Conséquemment, si une ANOVA1 donne une faible probabilité de signification de l'hypothèse de nullité, il est possible de considérer le test comme valide. Les termes indiqués dans la table d'ANOVA1 (Tab. 4.4) sont définis comme suit :

- « Source » : est le nom de la source de variabilité, le facteur étudié par exemple.
- SS (*Sums of squares*) : est la somme des carrés des écarts due a chaque source.
- DF (*degree of freedom*) : est le degré de liberté pour chaque source de variabilité (pour 12 échantillons différents présentés, le DF est $11 = 12 - 1$).
- MS (*mean square*) : est l'erreur quadratique moyenne (SS/DF) pour chaque source de variabilité.
- F : est la statistique F qui est le rapport de MS (MS dans la ligne « *Groups* » divisée par MS dans la ligne « *Error* ») ($F = MS_{Groups}/MS_{Error}$).
- p : est la probabilité que l'hypothèse nulle soit vraie (appelée aussi valeur-p).

Pour le test ici décrit, la table d'ANOVA1 est donnée au tableau 4.4.

Pour des études typiques avec sujets humains, le seuil de rejet de l'hypothèse de nullité est souvent basé sur $p < 0.05$ [36]. La valeur-p pour le test d'écoute ici décrit est plus petite

Tableau 4.4 Resultats d'ANOVA1 pour le compte de tous les participants.

Table de ANOVA1					
Source	SS	DF	MS	F	p
Groups	208.69	11	18.9719	3.27	0.0003
Error	1391.31	240	5.7971		
total	1600	251			

(0.0003) que ce seuil typique. Conséquemment, cette valeur-p indique une forte évidence contre l'hypothèse de nullité. Ceci affirme que les échantillons sonores du plan d'expérience CCCD ont un effet significatif sur la réponse des participants. Le test est donc considéré comme valide sur la base de valeur-p pour tous les auditeurs.

4.3.5 Valeurs de mérite pour tous les participants

La valeur de mérite v_i d'un son i est une mesure de la préférence individuelle sur une échelle absolue. Elle est développée puisque le compte (défini à la sous-section 4.3.3) ne convient pas à l'étape subséquente de corrélation des préférences avec des métriques prédictive (métriques psychoacoustiques ou autres). Les valeurs de mérites sont calculées à partir des modèles statistiques tels que décrits par Otto et Horvat [17, 36, 37] (voir Chap. 3).

Les valeurs de mérite, calculées à partir des réponses de tous les participants du test, sont montrées sur la figure 4.9. Les abscisses correspondent aux numéros d'échantillons sonores comme indiqué dans la Sec. 4.3.3. L'erreur moyenne de prédiction des différences de valeurs de mérite ($v_i - v_j$) est aussi ajoutée aux valeurs de mérite sous forme de moustaches. Le meilleur son qui s'est distingué est le son #2 et les pires sont les sons #6 et #11.

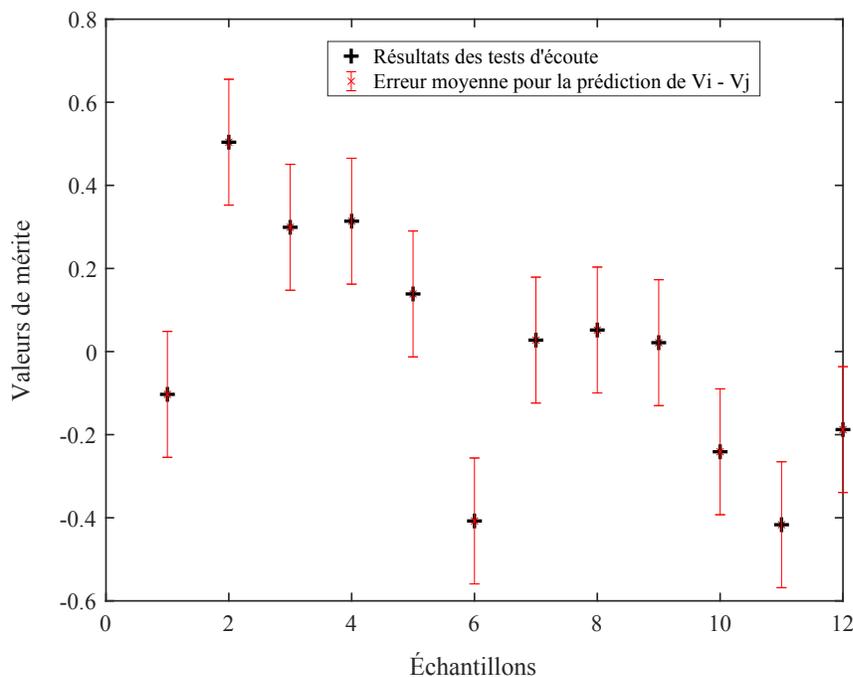


Figure 4.9 Valeurs de mérite v_i des 12 échantillons sonore à partir des réponses de tous les participants. Les moustaches autour des valeurs de mérite sont l'erreur moyenne de prédiction des différences de valeurs de mérite ($v_i - v_j$).

Pour identifier les niveaux de gains optimaux, pour chaque facteur, qui maximiseront la valeur de mérite, la représentation des valeurs de mérite obtenues dans l'espace à deux dimensions des facteurs du CCD est plus significative. La figure 4.10 montre les valeurs de mérites obtenues à partir des réponses de tous les participants. Les résultats sont affichés dans un espace trois dimensions, selon la surface du plan d'expérience.

Dans la figure 4.10, sont montrées les tiges qui représentent les valeurs de mérites v_i et la surface reliant ces derniers. Il est à noter que le point central de la surface est la valeur moyenne des quatre répétitions du point central du CCD (voir Tab. 4.3). Cette surface permet de présenter une première allure de la surface recherchée.

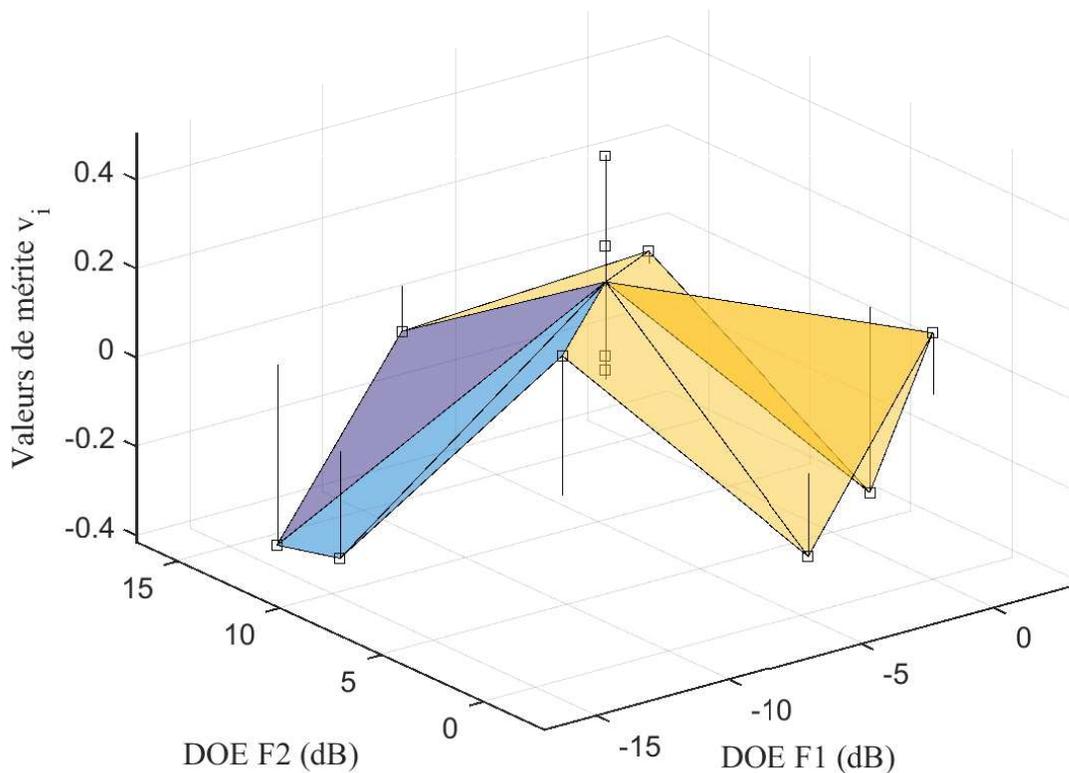


Figure 4.10 Représentation surfacique des valeurs de mérites dans l'espace à deux dimensions des deux facteurs du DOE (le point central est la moyenne des quatre répétitions du point central). Tiges verticales : Valeurs de mérite v_i de tous les échantillons à partir des réponses de tous les participants.

4.3.6 Regroupement des participants par grappes

Comme il a été observé dans la section précédente, la gamme des valeurs de mérite pour tous les participants est serrée (entre -0.4 et $+0.5$). Ce qui est loin de la gamme attendue des valeurs de mérite qui, idéalement, se situe plutôt entre -3 et $+3$. Ceci peut notamment s'expliquer par le fait qu'il n'est pas garanti que tous les participants disposent d'une seule et même définition, ou perception, de ce qu'est la qualité sonore d'un son du VRM en relation avec la question posée lors du test d'écoute. Pour contourner ce manque de polarisation dans les valeurs de mérite, il est judicieux de créer des sous-groupes, ou grappes, de participants et de réaliser l'analyse statistique sur chacun des sous-groupes afin d'éviter toute annulation en raison de l'existence potentielle de contradiction entre les sous-groupes. Par la suite, les différentes analyses statistiques peuvent être appliquées pour chaque sous-groupe séparément (voir Sec. 1.2.3 (page 12)).

La figure 4.11 montre le regroupement des participants en deux grappes pour ce test d'écoute. Les résultats des participants sont représentés par des marqueurs circulaires. Les lignes de contour représentent la fonction de densité de probabilité (PDF) du mélange gaussien utilisé par l'algorithme de regroupement. Pour ce test, le regroupement a opéré selon la distribution des réponses des participants pour le son #11 et le son #5.

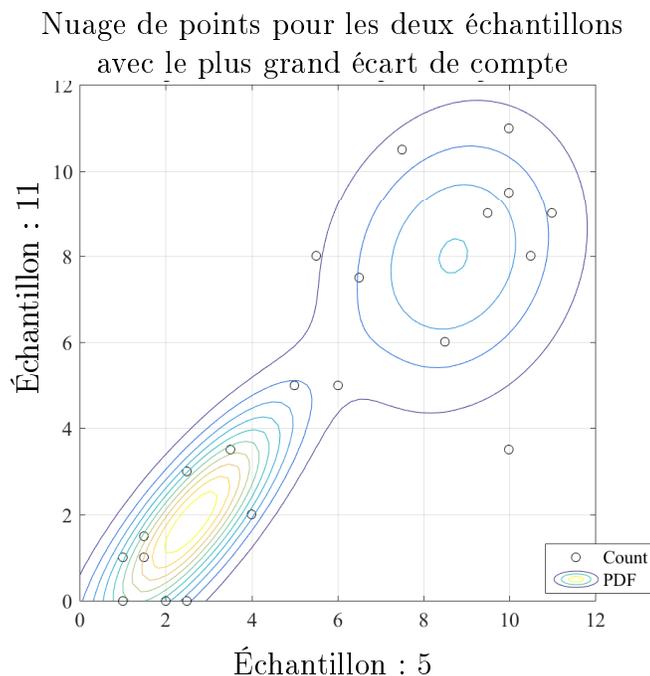


Figure 4.11 Regroupement des participants.

Le regroupement a permis de séparer les participants en deux grappes avec presque le même nombre de participants dans chaque grappe (10 dans une et 11 dans la deuxième). Puis, l'ANOVA1 pour les deux grappes a été effectuée (voir les tableaux 4.5 et 4.6). À partir de ces résultats, on peut constater que les deux groupes ont une cohérence intra-grappe plus forte que le groupe qui inclut l'ensemble des participants. Ceci est statistiquement appuyé par les valeurs-p des deux grappes qui sont beaucoup plus petites que la valeur-p observée pour tous les participants ($p = 2.95 \cdot 10^{-20}$ pour la grappe 1 et $p = 4.99 \cdot 10^{-10}$ pour la grappe 2).

La figure 4.12 et la figure 4.13 montrent les diagrammes par boîte de la grappe 1 et la grappe 2, respectivement. On peut remarquer dans les deux cas que l'étendue des intervalles est réduite. Il en est de même pour les encoches qui représentent l'intervalle de confiance des médianes. Cela s'explique par le fait que dans les grappes, les réponses des participants sont plus cohérentes. Ainsi, les observations sont généralement plus proches de la médiane. C'est ce qui est recherché dans ce type d'étude. De plus, ce résultat issu de l'algorithme de regroupement démontre à nouveau l'existence de profils de préférences qui doivent être, dans un premier temps, identifiés.

D'après les résultats montrés sous la forme de diagrammes en boîte aux figures 4.12 et 4.13, deux tendances peuvent être clairement observées :

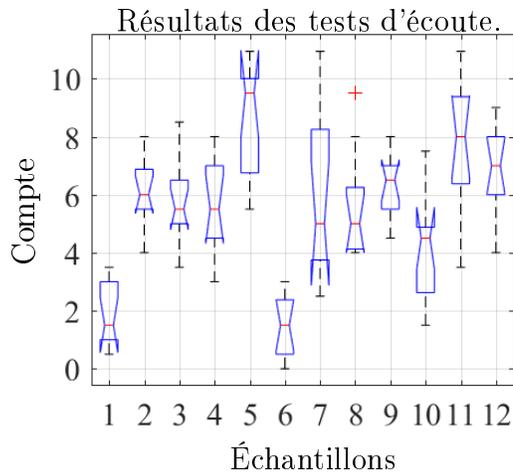
- Pour la grappe 1, les participants ont plus tendance à ne pas apprécier les sons avec les harmoniques hautes moteur trop augmentées (par exemple les sons #1 (14 dB) et #6 (17 dB)) et à apprécier les sons avec le vrombissement des basses fréquences non modifié voire augmenté (sons #5 (0 dB) et #11 (3 dB)).

Tableau 4.5 Résultats d'ANOVA1 pour le compte de la grappe 1.

Table de ANOVA1 de la grappe 1					
Source	SS	DF	MS	F	p
Groups	557.955	11	50.7231	17.54	$2.9459 \cdot 10^{-20}$
Error	347.045	120	2.892		
total	905	131			

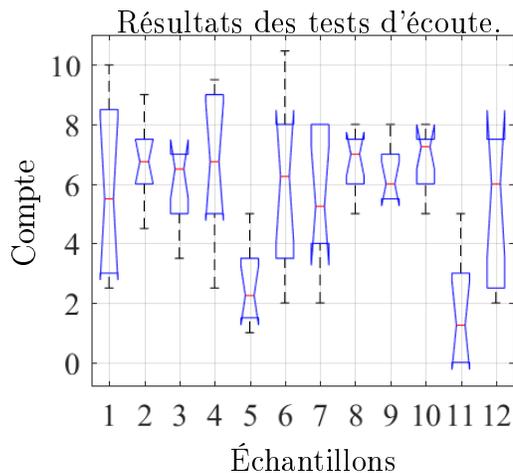
Tableau 4.6 Résultats d'ANOVA1 pour le compte de la grappe 2.

Table de ANOVA1 de la grappe 2					
Source	SS	DF	MS	F	p
Groups	311.65	11	28.3318	7.98	$4.9878 \cdot 10^{-10}$
Error	383.35	108	3.5495		
total	695	119			



- Échantillons :
- 1: Run10--7-17-Eq-Short.avi
 - 2: Run11--7-7-Eq-Short.avi
 - 3: Run12--7-7-Eq-Short.avi
 - 4: Run1--14-0-Eq-Short.avi
 - 5: Run2-0-0-Eq-Short.avi
 - 6: Run3--14-14-Eq-Short.avi
 - 7: Run4-0-14-Eq-Short.avi
 - 8: Run5--7-7-Eq-Short.avi
 - 9: Run6--7-7-Eq-Short.avi
 - 10: Run7--17-7-Eq-Short.avi
 - 11: Run8-3-7-Eq-Short.avi
 - 12: Run9--7--3-Eq-Short.avi

Figure 4.12 Diagramme en boîte des échantillons sonores pour le compte total des participants de la grappe 1.



- Échantillons :
- 1: Run10--7-17-Eq-Short.avi
 - 2: Run11--7-7-Eq-Short.avi
 - 3: Run12--7-7-Eq-Short.avi
 - 4: Run1--14-0-Eq-Short.avi
 - 5: Run2-0-0-Eq-Short.avi
 - 6: Run3--14-14-Eq-Short.avi
 - 7: Run4-0-14-Eq-Short.avi
 - 8: Run5--7-7-Eq-Short.avi
 - 9: Run6--7-7-Eq-Short.avi
 - 10: Run7--17-7-Eq-Short.avi
 - 11: Run8-3-7-Eq-Short.avi
 - 12: Run9--7--3-Eq-Short.avi

Figure 4.13 Diagramme en boîte des échantillons sonores pour le compte total des participants de la grappe 2.

- Pour la grappe 2, les participants ont plus tendance à ne pas aimer les sons avec le vrombissement des basses fréquences non modifié ou augmenté (sons #5 (0 dB) et #11 (3 dB)). Par contre, il est moins évident de distinguer les sons appréciés à partir du diagramme en boîte de cette grappe (voir la figure 4.13).

4.3.7 Valeurs de mérite par grappe

Suite au regroupement par grappes, les valeurs de mérites ont été à nouveau calculées pour chacune des deux grappes et les résultats sont affichés par la suite dans l'espace du CCCD.

Les figures 4.14 et 4.16 montrent les valeurs de mérites des échantillons sonores du test d'écoute de la grappe 1 et la grappe 2, respectivement. L'erreur moyenne de la prédiction des écarts des valeurs de mérite $v_i - v_j$ est aussi affichée.

Les figures 4.15 et 4.17 présentent les valeurs de mérites calculées pour la grappe 1 et la grappe 2, respectivement, affichées dans un espace à trois dimensions. Sur les figures 4.15 et 4.17 les valeurs de mérites v_i sont montrées avec des tiges verticales. La surface relie les points du CCD entre eux (le point central est la valeur moyenne des quatre répétitions) pour construire, par interpolation linéaire dans ce cas, une surface de valeurs de mérite de chaque grappe.

D'emblée, on note que ce regroupement en deux sous-groupes a produit une plus grande étendue des valeurs de mérite par rapport à ce qui a été remarqué pour tous les participants ensemble.

Pour la grappe 1, l'étendu des valeurs de mérite calculées est maintenant de $-1.19 < v_i < 1.04$. Le son ayant la plus grande valeur de mérite est le son #5 ($F1$ à 0 dB et $F2$ à 0 dB). Ceci revient à dire que pour cette grappe de participants, le son original, sans modification virtuelle, soit le son du VRM (B), est le son préféré par égard à la question posée. Pour toutes modifications virtuelles à partir de ce point, une tendance à la baisse

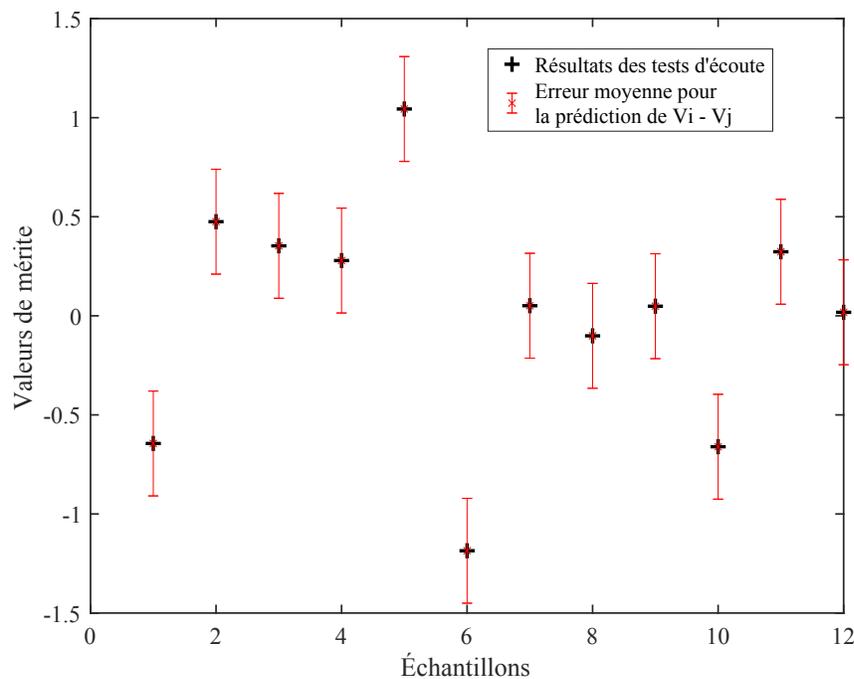


Figure 4.14 Valeurs de mérite v_i pour la grappe 1. Les moustaches autour des valeurs de mérite sont l'erreur moyenne de prédiction des différences de valeurs de mérite ($v_i - v_j$).

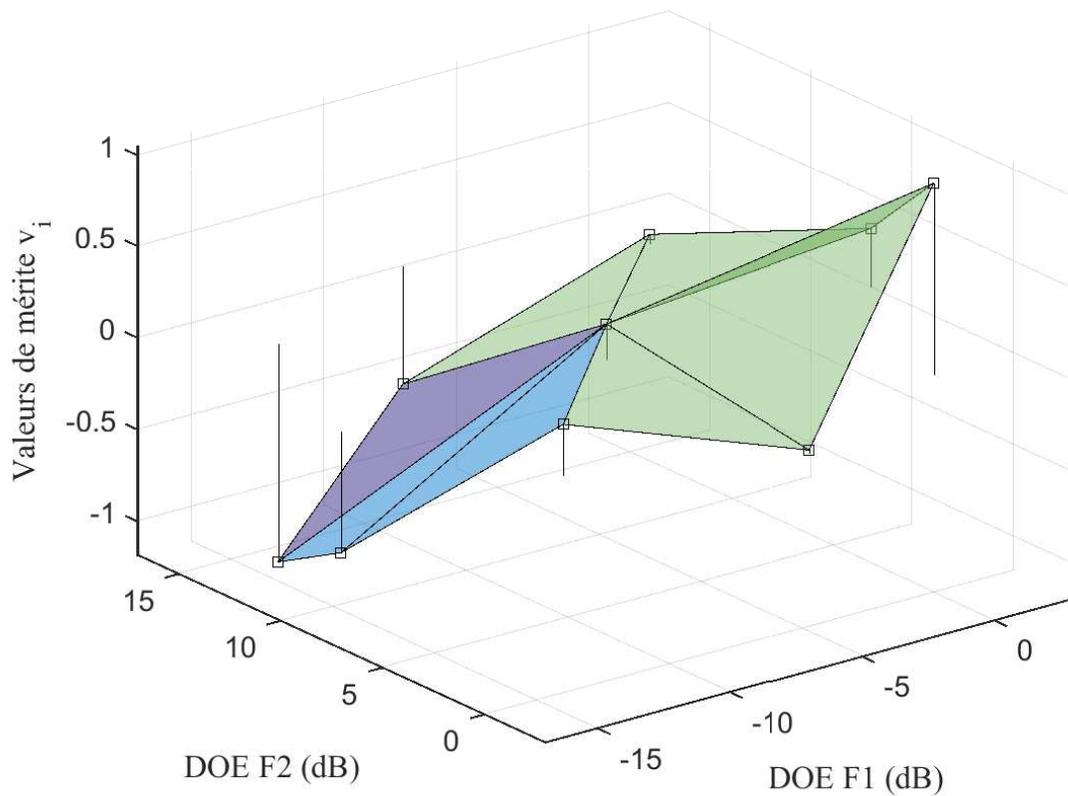


Figure 4.15 Représentation surfacique des valeurs de mérites dans l'espace à deux dimensions des deux facteurs du DOE (le point central est la moyenne des quatre répétitions du point central). Tiges verticales : Valeurs de mérite v_i de tous les échantillons à partir des réponses de la grappe 1.

est observée sur la surface à partir de cet échantillon qui est situé à l'extrémité du CCCD (voir Fig. 4.15). La conclusion qui peut être posée dans ce cas est que les participants de cette grappe ont plus apprécié le son original du VRM (B) que les autres sons du plan d'expérience avec modifications virtuelles. Ainsi, les résultats pour cette grappe nous guident vers deux conclusions. D'abord, 10 participants sur 21 considèrent que le son de référence (sans modification virtuelle) est le plus intéressant. Ceci valide au passage, du point de vue de la qualité sonore, le travail effectué par les autres groupes de travail pour dSkibel. Puis, cette grappe n'a peut-être tout simplement pas aimé les sons modifiés électroniquement.

Pour la grappe 2, l'étendue des valeurs de mérite calculées est aussi accrue et passe à $-1.96 < v_i < 0.70$. Le son qui s'est distingué avec la meilleure valeur de mérite est cette fois le #2 (avec un gain de -7 dB sur $F1$ et $+7$ dB sur $F2$), donc atténuation

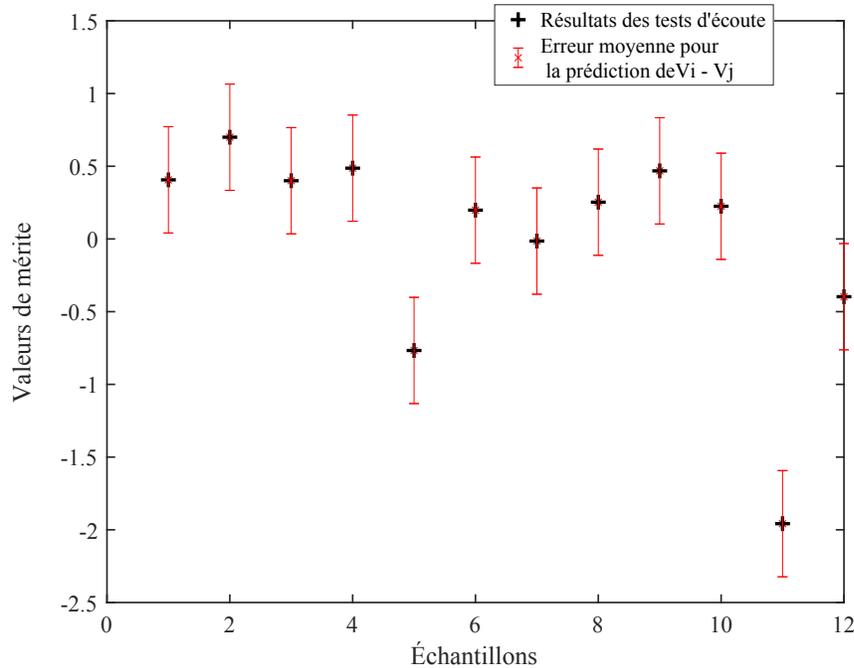


Figure 4.16 Valeurs de mérite v_i pour la grappe 2. Les moustaches autour des valeurs de mérite sont l'erreur moyenne de prédiction des différences de valeurs de mérite ($v_i - v_j$).

de 7 dB sur le vrombissement et accroissement de 7 dB sur les harmoniques hautes du moteur. L'échantillon le moins apprécié est le #11 (avec un gain de +3 dB sur $F1$ et +7 dB sur $F2$). On note que ce résultat est cohérent avec les tendances observées pour les tests précédents. C'est-à-dire que le vrombissement basse fréquence à un impact négatif et que les harmoniques moteur hautes ont un impact positif. Par contre, cette fois, il devient possible de quantifier les niveaux d'atténuation et d'amplification optimaux. Gains optimaux au-delà desquels la qualité sonore perçue peut diminuer. Pour cette grappe de participants, la surface (voir figure 4.17) obtenue à une tendance de maximum vers le centre du CCCD.

4.4 Modèles de prédiction de qualité sonore

Les modèles de qualité sonore qui suivent sont conçus à partir de prédicteurs comme entrées pour prédire les résultats du test d'écoute.

Puisque le but est de trouver les gains optimaux pour ces facteurs, il n'est pas utile d'inclure des métriques physiques ou psychoacoustiques dans l'élaboration de ces nouveaux modèle. Ainsi, à la différence des modèles de prédiction de QS édifiés plus tôt, ces modèles n'incluent que les facteurs du DOE, leurs valeurs au carré, et leurs produits croisés ($F1F2$) en guise

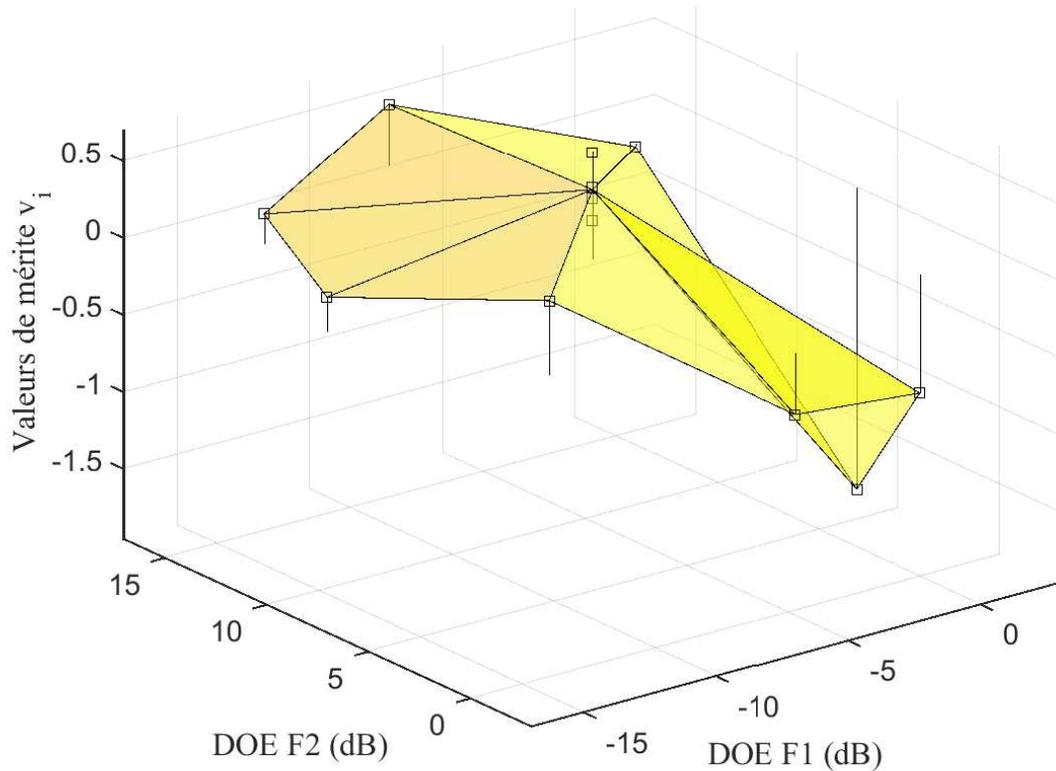


Figure 4.17 Représentation surfacique des valeurs de mérites dans l'espace à deux dimensions des deux facteurs du DOE (le point central est la moyenne des quatre répétitions du point central). Tiges verticales : Valeurs de mérite v_i de tous les échantillons à partir des réponses de la grappe 2.

de prédicteurs potentiels. Le modèle de régression linéaire produit est écrit sous la forme :

$$\tilde{v}_i = \beta_0 + \beta_1 F1 + \beta_2 F2 + \beta_{11} F1^2 + \beta_{22} F2^2 + \beta_{12} F1 F2 \quad (4.2)$$

Avec \tilde{v}_i , la valeur de mérite prédite du son i . La constante β_0 correspond à l'ordonnée à l'origine. β_1 est le coefficient estimé pour le facteur $F1$. β_2 est le coefficient estimé pour le facteur $F2$. β_{11} est le coefficient estimé sur le carré du facteur $F1$. β_{22} est le coefficient estimé sur le carré du facteur $F2$. β_{12} est le coefficient estimé sur le facteur $F1$ multiplié au facteur $F2$.

Ce modèle de l'équation (4.2) est non-linéaire par rapport aux prédicteurs ($F1$, $F2$), alors que jusqu'à présent, seuls des modèles linéaires avaient été utilisés pour l'étude de la qualité sonore du VRM. Les termes quadratiques permettent de déterminer et de localiser le maximum de v_i .

L'algorithme du *Lasso* [16, 44, 47] est utilisé pour le calcul de la régression linéaire sans validation croisée et avec les cinq prédicteurs mentionnés inclus dans le modèle. Il est à noter que l'utilisation de ces termes permet d'obtenir des modèles quadratiques sur les deux facteurs considérés. Ces modèles sont ensuite utilisés pour trouver les maximums de gains désirables sur chaque facteur pour chaque sous-groupe.

Dans les tableaux 4.7, 4.8 et 4.9, le nom du groupe de participants utilisé pour la construction du modèle est écrit à la première ligne. La première colonne est la colonne des facteurs prédicteurs utilisés par l'algorithme Lasso avec « Intercept » l'ordonnée à l'origine. La deuxième colonne est l'estimation de la valeur du coefficient β_{ij} dans le modèle de la qualité sonore. *SE* (*Squared Error*) est l'erreur quadratique pour ce coefficient. *t* est la valeur du test statistique qui est utilisé pour calculer la valeur-p. *p* est valeur-p associée à la paire de coefficients et de facteurs correspondante.

Les prédictions de résultats du test pour chaque groupe (tous les participants, grappe 1 uniquement, grappe 2 uniquement) sont montrées sur les figures 4.18, 4.19 et 4.20. Dans chaque figure, les valeurs de mérite issues du test d'écoute et les valeurs de mérite prédites à partir du modèle correspondant au groupe (indiqué dans les tableaux 4.7, 4.8 et 4.9) sont représentées. Les valeurs des coefficients correspondant à chaque modèle sont données aux tableaux 4.7, 4.8 et 4.9.

Tableau 4.7 Modèle de QS basé sur tous les participants.

Tous les participants				
Prédicteur	Estimation	SE	t	p
Intercept	-0.1708	0.2095	-0.8154	0.4459
<i>F1</i>	-0.0815	0.0377	-2.1643	0.0736
<i>F2</i>	0.0434	0.0377	1.1521	0.2931
<i>F1</i> ²	-0.0043	0.0021	-2.0204	0.0898
<i>F2</i> ²	-0.0024	0.0021	-1.1529	0.2928
<i>F1F2</i>	0.0031	0.0027	1.147	0.2951

Tableau 4.8 Modèle de QS basé sur la grappe 1.

Grappe 1				
Prédicteur	Estimation	SE	t	p
Intercept	0.6294	0.2721	2.3129	0.06
<i>F1</i>	0.0118	0.0489	0.2406	0.8179
<i>F2</i>	0.0086	0.0489	0.1749	0.8669
<i>F1</i> ²	-0.0023	0.0027	-0.8217	0.4427
<i>F2</i> ²	-0.0037	0.0027	-1.348	0.2263
<i>F1F2</i>	0.0024	0.0035	0.6824	0.5204

Tableau 4.9 Modèle de QS basé sur la grappe 2.

Grappe 2				
Prédicteur	Estimation	SE	t	p
Intercept	-1.2495	0.28517	-4.3817	0.0046595
<i>F1</i>	-0.27662	0.05125	-5.3974	0.0016679
<i>F2</i>	0.10208	0.05125	1.9918	0.093481
<i>F1</i> ²	-0.011314	0.0028803	-3.9281	0.0077293
<i>F2</i> ²	-0.0026012	0.0028803	-0.9031	0.40128
<i>F1F2</i>	0.0053116	0.0036956	1.4373	0.20068

La prédiction des valeurs de mérite à partir des modèles basés sur les grappes (Figs. 4.19 et 4.20) est meilleure que celle obtenue sur le groupe complet (Fig. 4.18). Ceci est attesté par un R^2 (le coefficient de détermination) de 0.82 et 0.87 pour la grappe 1 et la grappe 2, respectivement, comparée à un R^2 de 0.53 dans le cas d'un modèle basé sur les réponses de tous les participants.

Ceci suggère que les grappes correspondent en fait à des profils de préférence qui ne sont pas nécessairement cohérents et qui ont pu s'annuler dans l'ensemble du groupe. Ceci peut se vérifier, par exemple, en comparant la valeur de mérite du son #2 pour chaque grappe. Bien noté pour la grappe 1, c'est un des pires sons selon les participants de la grappe 2. La section suivante propose une interprétation plus fouillée de ces modèles de prédiction de la qualité sonore.

4.5 Résultats de prédiction de qualité sonore

Dans cette section, les modèles établis dans la section précédente sont utilisés pour la prédiction de la qualité sonore sous la forme d'une surface pour une grille de gains *F1* et *F2* avec une résolution de 0.5 dB. Les résultats des prédictions permettent par la suite de localiser les maximas des surfaces retrouvées pour chaque groupe de participants.

Dans les figures 4.21, 4.22 et 4.23, la surface est créée à partir des résultats de prédiction des valeurs de mérite via le modèle QS basé sur le groupe considéré. Les cercles constituent les valeurs de mérites mesurées du test d'écoute pour le groupe correspondant. Ainsi, dans le cas d'un modèle de QS qui serait capable d'effectuer une prédiction parfaite des résultats des tests d'écoute, la couleur des marqueurs serait égale à la couleur de la surface aux points du CCCD correspondant. De façon générale, plus la couleur de la surface approche, localement, la couleur des marqueurs circulaires, plus le modèle effectue une prédiction qui s'approche des résultats du test d'écoute. À partir de la surface qui va au-delà, par

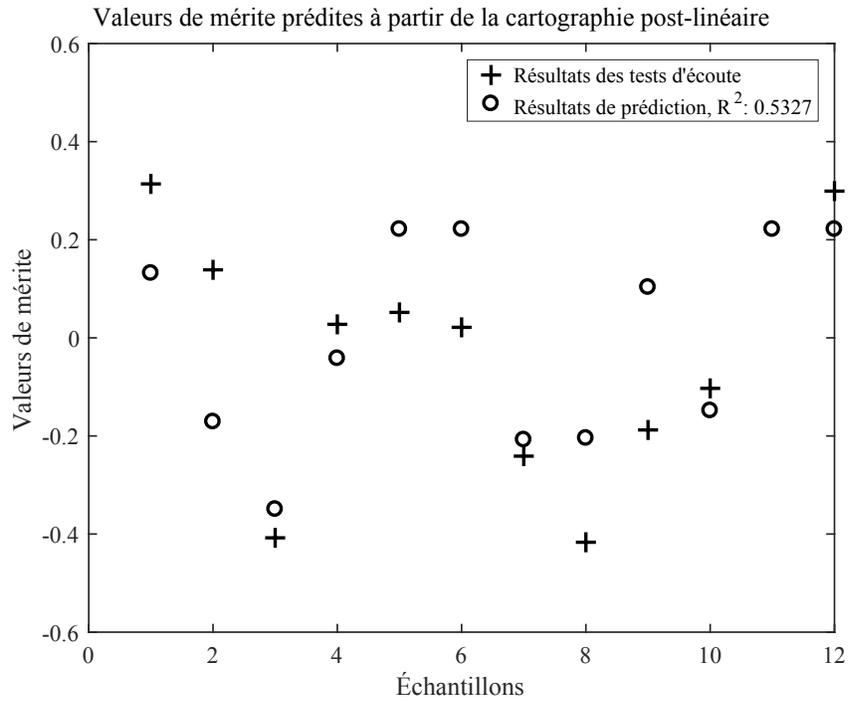


Figure 4.18 Valeurs de mérite et valeurs de mérite prédites à partir du modèle QS basé sur les réponses de tous les participants.

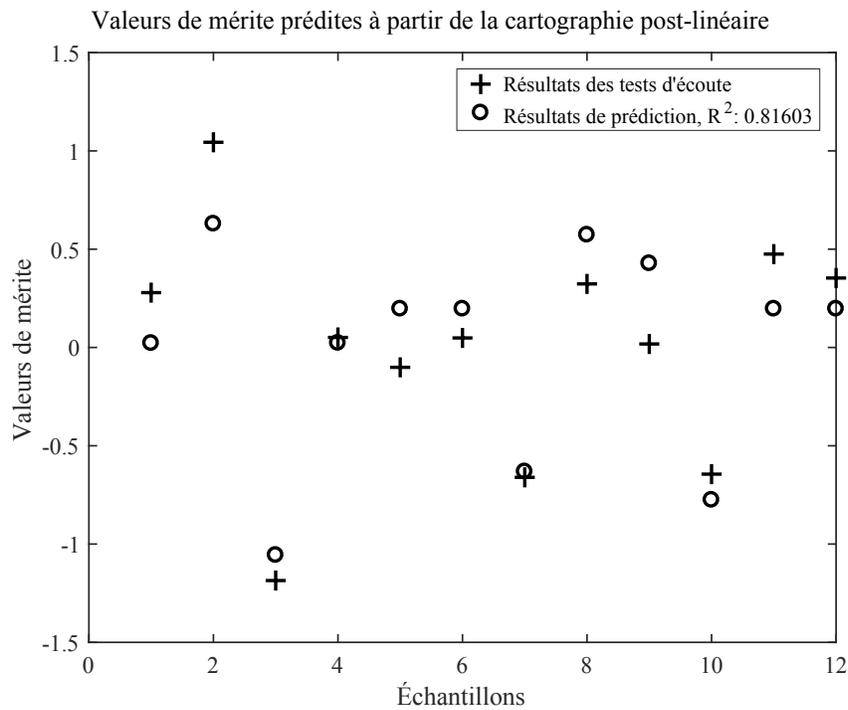


Figure 4.19 Valeurs de mérite et valeurs de mérite prédites à partir du modèle QS basé sur les réponses des participants de la grappe 1.

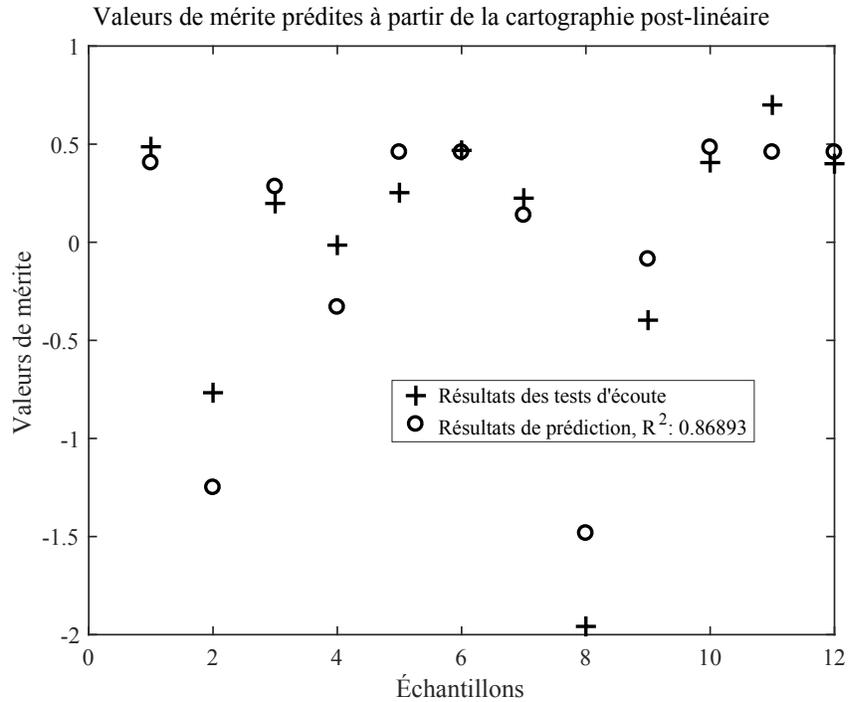


Figure 4.20 Valeurs de mérite et valeurs de mérite prédites à partir du modèle QS basé sur les réponses des participants de la grappe 2.

interpolation, des points d'évaluation du CCCD, la valeur maximale de la valeur de mérite prédite pour chaque cas de figure est notée avec un marqueur en croix.

La figure 4.21 illustre l'évaluation de la qualité sonore dans l'espace du plan d'expérience avec une résolution de 0.5 dB. Les valeurs de mérites sont prédites à partir du modèle QS obtenu pour tous les participants et donné au Tab. 4.7. La valeur de mérite maximale observée dans ce cas correspond à un gain de -8 dB pour le facteur $F1$ (vrombissement en basses fréquences) et un gain de $+4$ dB sur le facteur $F2$ (harmoniques hautes).

Par contre, il faut rappeler que cette prédiction a un faible R^2 qui est de 0.53 et ne permet probablement pas de conclure à de bons résultats pour l'ensemble des participants. Par contre, ce résultat, du moins sa tendance, est en accord avec toutes les observations précédentes recueillies lors des précédents tests d'écoute. La faible valeur du coefficient de détermination R^2 , est aussi illustrée par une grande différence de couleurs de la surface et celles des cercles qui correspondent aux valeurs de mérite obtenues à partir du test.

La figure 4.22 illustre aussi l'évaluation de la qualité sonore par le biais de valeurs de mérite prédites dans l'espace du plan d'expérience avec une résolution de 0.5 dB. Les valeurs de mérites sont prédites à partir du modèle QS basé sur la première grappe de participants, modèle de prédiction de QS dont les coefficients sont donnés au tableau 4.8. La valeur

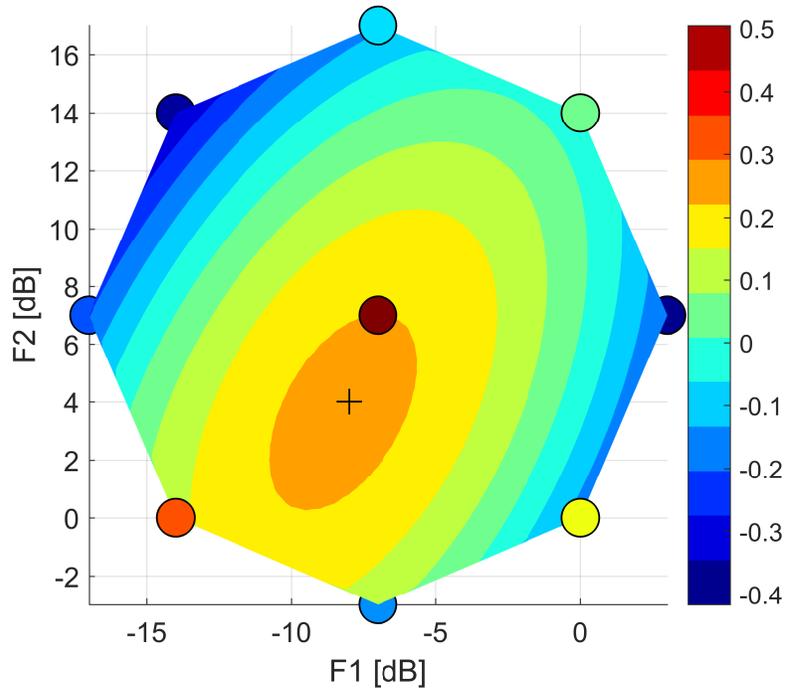


Figure 4.21 Surface de valeurs de mérite prédites (en couleur) à partir du modèle QS basé sur les réponses de tous les participants. Les valeurs de mérite obtenues pour le test d'écoute sont indiquées par des marqueurs de couleur. Le son original correspond à $F1 = 0$ et $F2 = 0$. La position de la valeur de mérite optimale prédite est marquée par une croix et correspond à $F1 = -8$ dB et $F2 = 4$ dB. $R^2 = 0.53$.

de mérite prédite maximale observée dans ce cas correspond à un gain de +1 dB sur le facteur $F1$ (vrombissement basses fréquences) et un gain de +2.5 dB sur le facteur $F2$ (sur chacune des harmoniques hautes du moteur).

Malgré le fait que le modèle basé sur cette première grappe produit une bonne prédiction de valeurs de mérite avec un R^2 haut (0.82), ces résultats sont à prendre avec précaution. En effet, lors de tests précédents, l'augmentation du vrombissement basses fréquences n'était jamais considérée comme un facteur à impact positif. Par contre, il est possible d'interpréter, par exemple, ce point maximal non pas comme une augmentation de 1 et 2.5 dB sur les deux facteurs, mais plutôt comme un contraste de 1.5 dB entre ces deux facteurs. Aussi, en raison de l'erreur qui peut être considérée dans la prédiction, le résultat semble cohérent avec ce qui a été déjà observé à la sous-section 4.3.7, à savoir, la tendance de ce sous-groupe à préférer le son original par rapport à tous les autres sons.

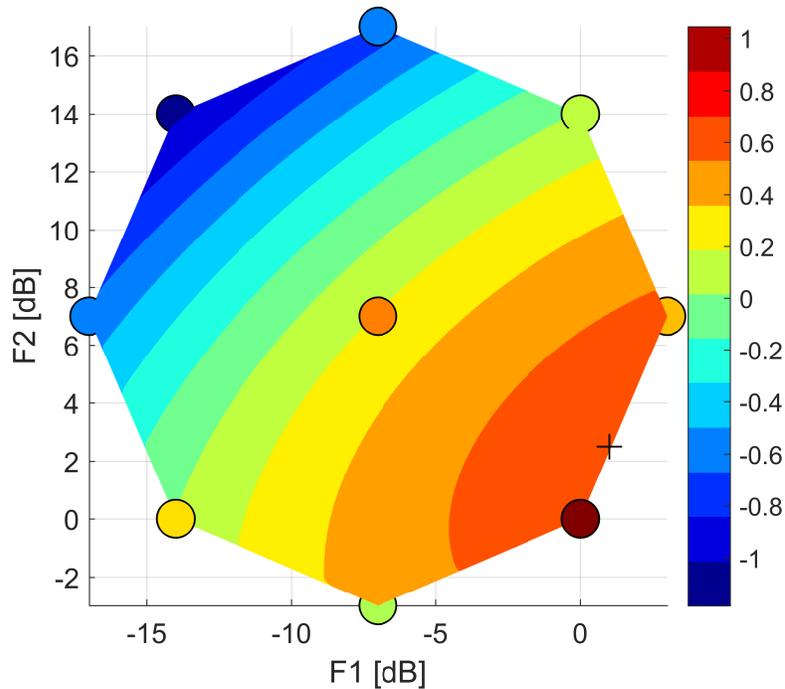


Figure 4.22 Surface de valeurs de mérite prédites (en couleur) à partir du modèle QS basé sur les réponses des participants de la première grappe. Les valeurs de mérite obtenues pour ce test d'écoute sont indiquées par des marqueurs de couleur. Le son original correspond à $F1 = 0$ et $F2 = 0$. La position de la valeur de mérite optimale prédite est marquée par une croix et correspond à $F1 = 1$ dB et $F2 = 2.5$ dB. $R^2 = 0.82$.

La figure 4.23 illustre la prédiction de la qualité sonore dans l'espace du plan d'expérience avec une résolution de 0.5 dB. Les valeurs de mérites sont prédites à partir du modèle QS basé sur les participants de la seconde grappe. Modèle de QS dont les coefficients sont donnés au Tab. 4.9. La valeur de mérite maximale prédite dans ce cas correspond à un gain de -10 dB sur le facteur $F1$ (vrombissement basses fréquences) et un gain de $+9.5$ dB sur le facteur $F2$ (sur chacune des harmoniques hautes du moteur).

L'évaluation de la QS à partir du modèle basé sur la seconde grappe produit une bonne prédiction des valeurs de mérite avec un R^2 de 0.87. Contrairement au résultat obtenu pour la première grappe, il semble que le son optimal en termes de QS en rapport avec la question ne soit pas un des points du plan d'expérience. En effet, pour ce groupe, il faut accroître la présence des harmoniques supérieures du moteur et atténuer le vrombissement basse fréquence. Ce qui est cohérent avec l'ensemble des autres observations rapportés dans ce mémoire.

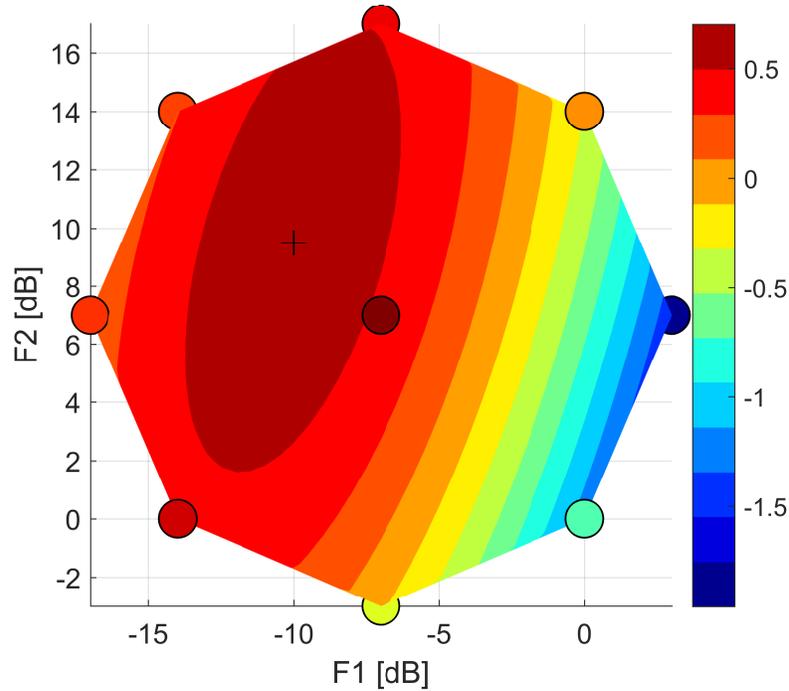


Figure 4.23 Surface de valeurs de mérite prédites (en couleur) à partir du modèle QS basé sur les réponses des participants de la deuxième grappe. Les valeurs de mérite obtenues pour ce test d'écoute sont indiquées par des marqueurs de couleur. Le son original correspond à $F1 = 0$ et $F2 = 0$. La position de la valeur de mérite optimale prédite est marquée par une croix et correspond à $F1 = -10$ dB et $F2 = 9.5$ dB. $R^2 = 0.87$.

4.5.1 Recommandations techniques

En résumé, pour chaque grappe de participants, une gamme de gains sur les facteurs pourra être appliquée pour améliorer la valeur de mérite du son à un certain seuil. Cette gamme peut être affichée par une surface de la combinaison des deux gains.

La tendance des gains optimaux sur $F1$ et $F2$ est résumée dans la figure 4.24. Pour chaque grappe et pour tous les participants, est indiquée la position, dans l'espace du plan d'expérience, de la valeur de mérite maximale prédite en se basant sur le modèle QS correspondant. L'espace du plan d'expérience est affiché en octogone (bleu) à la même figure.

Aussi, à la figure 4.24, sont affichées les gammes de gains qui peuvent être appliqués pour accroître la valeur de mérite du son à 80 % et 90 % de la valeur de mérite maximale prédite (les zones affichées autour de la position des gains optimaux).

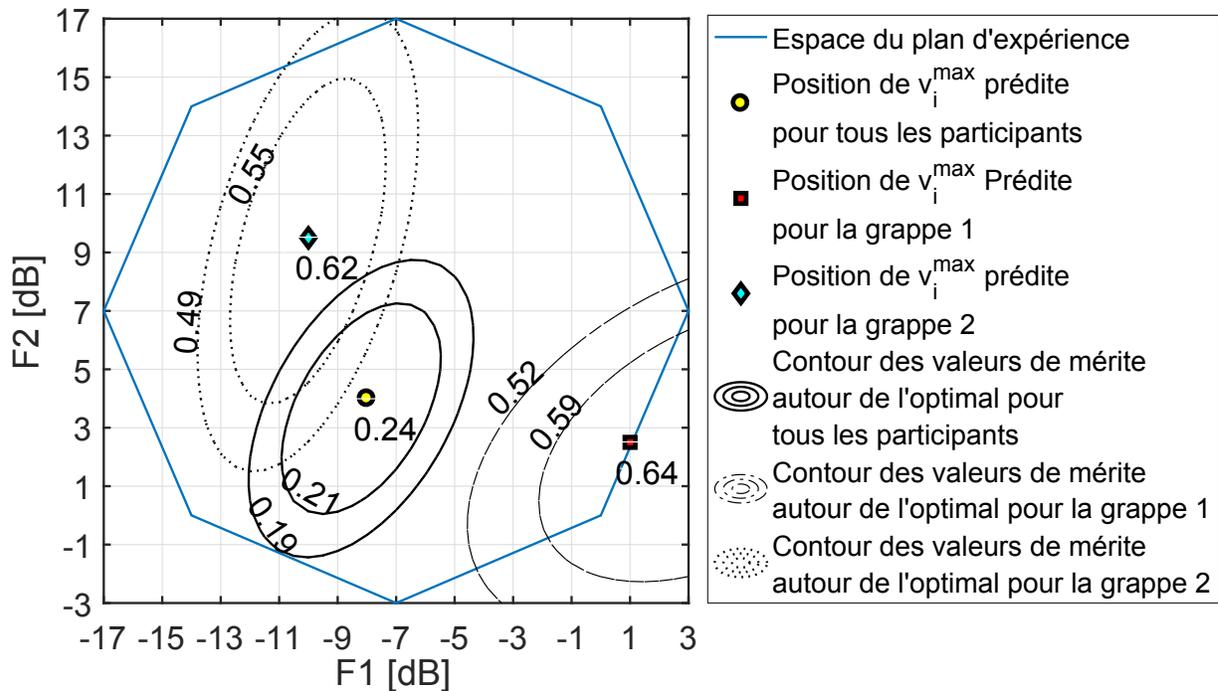


Figure 4.24 Valeurs des gains optimaux pour chaque grappe et pour tous les participants (carré rouge, losange bleu est cercle jaune respectivement). Les zones de gains pratiques pour chaque grappe et pour tous les participants (en tirets points pour la grappe 1, en points pour la grappe 2 et en ligne continue pour tous les participants). L'octogone en bleu est l'espace du plan d'expérience.

4.6 Conclusion

Ce chapitre a présenté : 1) une introduction à l'étude de QS réalisée, 2) la méthode de préparation et de réalisation de tests d'écoute avec sujets humains, 3) les résultats de l'analyse statistique des tests d'écoute, 4) les modèles de prédiction de qualité sonore et 5) les résultats de prédiction de la qualité sonore avec la recherche du son optimisant ce modèle.

En premier lieu, l'analyse statistique de tests d'écoute a permis de considérer la validité du test sur la base de la valeur-p pour tous les participants, ainsi que pour la première et seconde grappes. Aussi, cette analyse a fourni les valeurs de mérite des échantillons sonores du plan d'expérience pour tous les participants et les deux grappes. Ces premiers résultats ont donc permis d'extraire une tendance des effets des facteurs sur la qualité sonore. Deux tendances distinctes peuvent être observées, la première grappe de participants n'a pas apprécié les modifications proposées dans le plan d'expérience. En effet, ce groupe a attribué au son original une valeur de mérite plus élevée que celles de toutes les modifications virtuelles. Au contraire, la deuxième grappe de participants a tendance

à apprécier les sons avec le vrombissement basses fréquences diminué et les harmoniques hautes fréquences moteur augmentées sans pour autant rejoindre les extrêmes de l'espace du plan d'expérience. Il y aurait donc, pour cette grappe de participant, bel et bien des valeurs optimales de gain à ne pas dépasser pour chacun des facteurs.

Ensuite, un modèle de prédiction de la qualité sonore basé sur une équation quadratique fonction des deux facteurs du plan d'expérience fut réalisée pour chaque grappe de participants. Par la suite, à partir de ces modèles prédictifs, les valeurs de mérite ont été calculées pour une grille de gains plus dense couvrant l'espace du plan d'expérience, interpolant ainsi la surface entre les points de mesures du DOE CCCD. Ces résultats de prédiction ont permis de produire la surface de prédiction des valeurs de mérite en fonction des deux facteurs.

En dernière analyse, les gains optimaux qui correspondent aux valeurs de mérite maximales prédites furent identifiés :

1. Tous les participants : un gain de -8 dB pour le vrombissement basses fréquences, un gain de $+4$ dB pour chacune des harmoniques moteur hautes.
2. Première grappe de participants : un gain de $+1$ dB pour le vrombissement basses fréquences, un gain de $+2.5$ dB pour chacune des harmoniques moteur hautes.
3. Deuxième grappe de participants : un gain de -10 dB pour le vrombissement basses fréquences, un gain de $+9.5$ dB pour chacune des harmoniques moteur hautes.

Le résultat issu de la deuxième grappe semble le plus pertinent pour l'étude vu la polarité des valeurs de mérite prédites comparé au résultat de prédiction basé sur tous les participants. Aussi, il a été perçu que les participants de la première grappe n'ont pas apprécié l'apport de modifications virtuelles au son original. Ainsi, 50 % des participants furent satisfaits du son du VRM (B) et 50 % auraient désiré des modifications. Cette observation souligne encore une fois l'importance de ne pas considérer qu'un seul et unique profil de préférence existe au sein d'une population testée.

Finalement, selon les résultats exposés dans ce chapitre, les suggestions pour améliorer la qualité sonore du nouveau véhicule récréatif motorisé à l'étape d'accélération est d'atténuer le vrombissement des basses fréquences de 10 dB et d'augmenter les harmoniques hautes moteur de 9.5 dB. Toutefois, une gamme de gains combinée pour les deux facteurs pourrait aussi être appliquée pour garantir une solution technique réaliste tout en accroissant la qualité sonore perçue.

CHAPITRE 5

PROTOTYPE VIRTUEL DE MODIFICATION OPTIMALE DU SON

5.1 Introduction

L'optimisation de la qualité sonore d'un véhicule récréatif motorisé comprend plusieurs étapes. La première, présentée aux chapitres 2 et 3, consistait à identifier les facteurs mécaniques ayant le plus d'impact sur la qualité sonore du véhicule. La seconde, présentée au chapitre 4, a permis d'évaluer des niveaux de gains optimaux sur ces facteurs afin d'approcher la meilleure valeur de mérite réalisable. L'étape de travail subséquente, sujet du présent chapitre, est alors d'introduire et de dresser une méthode pour l'application concrète de ces recommandations dans le projet, à savoir une solution technique qui assure l'amélioration de la QS. Une première solution était d'introduire un dissipatif d'améliorations de la QS du véhicule récréatif. Ce système passif, implémenté et testé sur piste, n'était finalement pas concluant d'où l'idée de se retourner vers un système actif d'amélioration de QS. Ce chapitre porte donc sur le développement et l'optimisation d'un dispositif virtuel qui permet d'améliorer la qualité sonore tel que recommandé dans le chapitre précédent.

Dans cette étude, la solution proposée est un dispositif numérique d'optimisation sonore. Le principe consiste à rajouter une source complémentaire sur le VRM qui doit donc apporter la contribution nécessaire pour l'amélioration de sa qualité sonore, une approche similaire au contrôle actif de bruit. Ainsi, la tâche consiste premièrement à dimensionner cette source, puis identifier le signal électrique adéquat pour alimenter cette dernière, et ce par synthèse numérique.

Dans ce chapitre seront présentées tout d'abord les technologies existantes pour la modification de la qualité sonore des véhicules. Puis, seront exposés le diagramme en bloc du VRM et la stratégie proposée pour le design de qualité sonore. Cette partie vise une démarche originale pour l'étude de l'amélioration à apporter et expose le système virtuel adopté pour la reproduction numérique des harmoniques moteur à partir des révolutions par minutes (RPM) du véhicule. Par la suite, seront avancées la mise en équation du problème et les équations de prédiction énergétique. Enfin, seront développées les étapes

de conception, simulation, validation numérique et une application pour un cas concret. Finalement, une brève conclusion récapitule les outils et résultats qui découlent de cette étude et introduit des ouvertures potentielles pour études ultérieures.

5.2 Stratégie proposée pour le design sonore

5.2.1 Diagramme bloc du son d'un véhicule récréatif motorisé perçu par le pilote

Tel qu'expliqué auparavant, le son perçu par le pilote du VRM est engendré par une multitude de sources de bruits. Il est donc utile de rappeler que le son global perçu est constitué de la somme des bruits émis par les différentes sources et parcourant les chemins de transfert jusqu'aux oreilles du conducteur. Ainsi, chacune des sources de bruit participe à la qualité sonore du véhicule. Pour la suite de l'étude, on considère les signaux (gauche et droite) à l'extérieur du casque plutôt que les signaux binauraux, aux oreilles du pilote, pour ne pas considérer l'effet sur la QS du casque utilisé lors des enregistrements sur piste.

Afin de schématiser cela, un diagramme en blocs des sources acoustiques est représenté dans la figure 5.1. La source i représente une des sources de bruit du VRM, le signal acoustique monophonique mesuré à la source est représenté par x_i , les blocs $H_{i,L}$ et $H_{i,R}$ représentent les fonctions de transfert à partir de la source i jusqu'à l'extérieur du casque du conducteur (canal gauche et droite), les signaux binauraux enregistrés à l'extérieur du casque sont représentés par b_L et b_R , pour le canal de gauche et de droite respectivement.

5.2.2 Stratégie proposée pour le design de la qualité sonore

L'idée est d'ajouter une source complémentaire (Source m) au VRM. De la sorte, la source doit apporter la contribution nécessaire pour optimiser ou améliorer la qualité sonore perçue par le pilote. En pratique, le rôle de la source en question sera assuré par un haut-parleur dont les caractéristiques sont à déterminer selon l'exigence du dispositif acoustique à installer. L'objectif revient à identifier le signal électrique (**voltage**) approprié à la correction proposée pour alimenter ce haut-parleur.

Dans le cas présent, la contribution à appliquer est calculée à l'extérieur du casque, au niveau des oreilles du pilote. Cet apport, appelé **signal de différence**, est calculé par la différence (dans le temps) du **son désiré** (modifié virtuellement) et le **son original** du véhicule récréatif motorisé. Cette contribution est commandée principalement par les

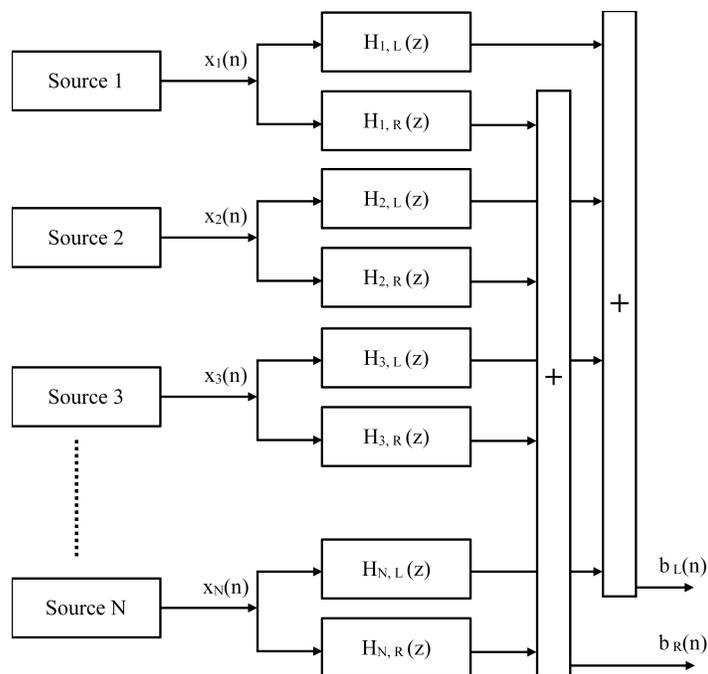


Figure 5.1 Diagramme en blocs de N sources acoustiques.

gains optimaux appliqués aux facteurs mécaniques identifiés précédemment (résultats de test d'écoute à deux niveaux et cinq facteurs du chapitre 4).

L'approche proposée est symbolisée par un diagramme en blocs à la figure 5.2. Dans ce diagramme les flèches doubles indiquent un signal à deux canaux, la variable n représente le temps discrétisé (domaine temporel) et la variable complexe z indique qu'on travaille dans le domaine fréquentiel (transformée en z). Dans la figure 5.2 on note : $x_m[n]$ le signal (voltage) du dispositif, $\mathbf{H}(z)$ la fonction de transfert à partir de la source jusqu'à l'extérieur du casque (gauche et droite), $\mathbf{g}[n]$ le signal acoustique du dispositif à l'extérieur du casque (gauche et droite), $\mathbf{b}[n]$ le signal sonore original du VRM à l'extérieur du casque (gauche et droite), $\mathbf{y}[n]$ le signal sonore amélioré du VRM à l'extérieur du casque (gauche et droite), $\mathbf{d}[n]$ le signal sonore désiré à l'extérieur du casque (gauche et droite) et $\mathbf{e}[n]$ le signal acoustique de différence ou signal d'erreur (gauche et droite).

5.3 Mise en équation du problème

Cette section traite le développement mathématique pour l'identification du système d'équations représenté par le diagramme bloc indiqué dans la figure 5.2.

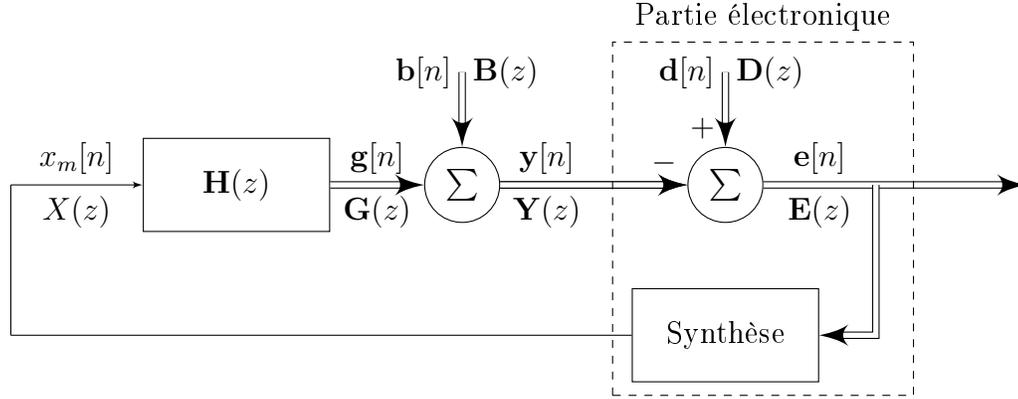


Figure 5.2 Diagramme en bloc du système de modification du son au pilote représentant une source m ajoutée à la figure 5.1.

Dans le cas d'une seule source et d'un signal de sortie multicanal, un signal binaural dans l'étude présente (gauche, L et droite, R), le signal d'erreur est introduit tel que

$$\mathbf{e}[n] = \mathbf{d}[n] - \mathbf{y}[n] \quad (5.1)$$

Avec \mathbf{d} le signal binaural désiré ($\mathbf{d}(n) = [d_L(n) \ d_R(n)]^T$), \mathbf{y} le signal binaural optimisé du VRM ($\mathbf{y}(n) = [y_L(n) \ y_R(n)]^T$). Ce qui donne $\mathbf{e}(n) = [d_L(n) - y_L(n) \ d_R(n) - y_R(n)]^T$.

En développant \mathbf{y} dans l'équation (5.1), l'expression en transformée- z de l'erreur devient

$$\mathbf{E}(z) = \mathbf{D}(z) - \mathbf{H}(z)X(z) - \mathbf{B}(z) \quad (5.2)$$

où \mathbf{H} est de dimension $[1 \times 2]$.

Par la suite, en posant $\mathbf{A}(z) = \mathbf{D}(z) - \mathbf{B}(z)$, l'erreur peut s'écrire

$$\mathbf{E}(z) = \mathbf{A}(z) - \mathbf{H}(z)X(z) \quad (5.3)$$

Si $\mathbf{H}(z)$ est inversible la solution est simple, elle est calculée directement par la minimisation de l'erreur $\mathbf{E}(z) = \mathbf{A}(z) - \mathbf{H}(z)X(z) = 0$. Ce qui donne

$$X(z) = \mathbf{H}^+(z)\mathbf{A}(z) \quad (5.4)$$

Avec \mathbf{H}^+ la pseudo inverse de la matrice \mathbf{H} .

Si \mathbf{H} n'est pas inversible, par exemple dans le cas où cette même matrice n'est pas carrée, le problème se ramène donc à déterminer une fonction coût qui minimise l'erreur quadratique. À présent, cette erreur quadratique est exprimée en termes de la fonction $J = \mathbf{E}^H \mathbf{E}$, avec

$\mathbf{E} = \mathbf{A} - \mathbf{H}X$ et \mathbf{E}^H la transposée Hermitienne de \mathbf{E} . Dès lors, la fonction coût s'écrit

$$J = (\mathbf{A} - \mathbf{H}X)^H(\mathbf{A} - \mathbf{H}X) \quad (5.5)$$

Ce qui peut s'écrire sous la forme Hermitienne quadratique

$$J = \mathbf{A}^H \mathbf{A} - 2X^H \mathbf{H}^H \mathbf{A} + X^H \mathbf{H}^H \mathbf{H} X \quad (5.6)$$

Le but est alors la minimisation de cette fonction coût, ce qui est développé de la manière suivante

$$\frac{\partial J}{\partial X} = 0 \quad (5.7)$$

$$\frac{\partial J}{\partial X} = -\mathbf{H}^H \mathbf{A} + \mathbf{H}^H \mathbf{H} X = 0 \quad (5.8)$$

$$\mathbf{H}^H \mathbf{A} = \mathbf{H}^H \mathbf{H} X \quad (5.9)$$

Par conséquent, la solution analytique optimale de ce système est donnée par

$$X = (\mathbf{H}^H \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^H \mathbf{A} \quad (5.10)$$

Et le filtre, $(\mathbf{H}^H \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^H$ est en fait la pseudo-inverse.

5.4 Les équations de propagation et de prédiction énergétique

L'objectif de cette section est le dimensionnement d'un haut-parleur pour réaliser le prototype, en connaissant la distance entre la source et le récepteur (pilote). Pour ce faire, il faut d'abord établir la fonction de transfert de la source en champ libre jusqu'au récepteur puis évaluer la puissance acoustique requise pour cette source. Une source monopolaire sera adoptée dans l'identification théorique de la fonction de transfert d'un système acoustique simple. Cela permet par la suite de décrire l'efficacité de la source. Ensuite, le débit volumique et la vitesse de vibration de la source sont évalués. Souvent, cette vibration est transmise par une certaine surface ou membrane.

Il est à noter que pour des petits haut-parleurs, certaines des hypothèses qui suivent ne sont pas entièrement valides pour les basses ou hautes fréquences. Mais, le cas d'étude présent vise les moyennes fréquences. Conséquemment, il n'est pas nécessaire de considérer les

effets de directivité de la source. De plus, la présence d'un baffle assurera l'absence de court-circuit acoustique entre l'avant et l'arrière de la membrane du haut-parleur.

5.4.1 Exemple de source monopolaire

L'expression générale d'une onde sphérique excitée par une source ponctuelle de débit volumique $Q(t)$ est donnée par l'équation (5.11) [46]. Dans cette équation, $p(r, t)$ représente la pression sonore propagée à partir de $r = 0$ vers un r plus grand.

$$p(r, t) = \frac{\rho_0}{4\pi r} \dot{Q} \left(t - \frac{r}{c} \right) \quad (5.11)$$

Avec la dérivée temporelle de Q notée $\dot{Q} \left(t - \frac{r}{c} \right)$ et la vitesse de propagation du son c . Pour une excitation harmonique, le débit volumique s'écrit

$$Q(t) = \hat{Q} e^{j\omega t} \quad (5.12)$$

Avec

$$\hat{Q} = \int_S v \, dS \quad (5.13)$$

où v est la vitesse de la source et S sa surface.

L'équation de la pression sonore peut donc s'écrire

$$p(r, \omega) = \frac{j\omega\rho_0}{4\pi r} \hat{Q} e^{j(\omega t - kr)} \quad (5.14)$$

Avec $k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi f}{c}$.

La fonction de transfert (FRF, Fonction de Réponse en Fréquence) à une distance r de la source monopolaire (sans obstacles) est donc définie à partir de l'équation (5.14) comme

$$H_M(\omega, r) = \frac{j\omega\rho_0}{4\pi r} e^{-jkr} \quad (5.15)$$

Puis, le débit calculé à partir du signal de pression acoustique désiré en r est donné par

$$Q(\omega) = p(r, \omega) H_M^{-1}(\omega, r) \quad (5.16)$$

5.4.2 Puissance acoustique

La puissance sonore totale rayonnée par la source peut être calculée en intégrant l'intensité sonore sur une surface de mesure environnante. Dans le cas d'une onde sphérique sans directivité, l'intégration est réduite à la multiplication par la surface d'observation de $4\pi r^2$. Ainsi, pour une source simple tel que donnée par l'équation (5.14), la puissance acoustique en Watts est donnée par

$$W = \frac{\rho_0 \hat{Q}^2}{8\pi c} \omega^2 \quad (5.17)$$

Niveau de puissance acoustique

Le niveau de puissance acoustique L_W est défini comme le rapport logarithmique de la puissance acoustique au seuil d'audition. Il est exprimé en décibels référence $W_0 = 10^{-12}$ Watts, [dB ref 1 pW].

$$L_W = 10 \log \left(\frac{W}{W_0} \right) \quad (5.18)$$

La dépendance de l'intensité du son et du niveau de pression sonore avec la distance de propagation est une loi importante de la propagation du son [46]. De ce fait, le niveau de puissance peut être calculé autrement. Les relations entre niveau de pression et niveau de puissance en fonction de la distance pour deux types de sources sont présentées :

1) Monopole

$$L_W = L_p + 20 \log r + 11 \quad (5.19)$$

Avec r la distance entre la source et le récepteur, L_p le niveau de pression sonore. La valeur 11 dB est calculée pour le cas d'une température ambiante de 20°C, un vitesse de propagation de l'onde sonore dans l'air d'environ 343 m.s⁻¹ et la masse volumique de l'air de 1.204 kg.m⁻³. Pour rappel, le niveau de pression sonore d'une source acoustique (SPL) est donné par

$$L_p = 10 \log \left(\frac{p_{rms}^2}{p_0^2} \right) = 20 \log \left(\frac{p_{rms}}{p_0} \right) \quad (5.20)$$

Où, pour un cas de source harmonique de période T

$$p_{rms}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt \quad (5.21)$$

Le niveau de pression est exprimé en décibels référence $p_0 = 20 \cdot 10^{-6}$ Pa, [dB ref 20 μ Pa].

2) Source directionnelle

$$L_W = L_p + 20 \log r + 11 + L_D \quad (5.22)$$

Avec L_D le facteur de la directivité de la source [46]. Il est donné par

$$L_D = 10 \log \iint_S |\Gamma(\vartheta, \varphi)|^2 dS \quad (5.23)$$

Où, $\Gamma(\vartheta, \varphi)$ est la fonction du faisceau acoustique, ϑ et φ sont les angles polaires et azimutaux.

5.4.3 Caractérisation et modélisation de la source

Le but de cette section est de développer les notions et systèmes d'équations essentiels qui seront utilisés pour le choix d'un haut-parleur le plus adapté pour le dispositif d'amélioration de qualité sonore. Avant tout, le haut-parleur doit être capable de fournir le niveau de pression désiré dans la gamme de fréquence du travail pour l'amélioration de la qualité sonore.

En principe, le choix de ce dernier est gouverné par trois conditions suivantes : 1) la sensibilité, 2) la puissance électrique appliquée et 3) la plage de fréquence reproduite (où son efficacité est maximale). Dans le cas présent, les fréquences à reproduire sont souvent comprises entre 400 à 2000 Hz. Ainsi, un simple haut-parleur électrodynamique de type *woofer* pourra couvrir cette gamme de fréquences. Donc, il reste seulement à évaluer la sensibilité minimale en fonction de la puissance électrique.

Après le choix du haut-parleur garantissant cette sensibilité, une modélisation du haut-parleur sera effectuée. Cela permettra de l'intégrer au dispositif virtuel d'amélioration, simulé dans Matlab-Simulink et présenté dans une section subséquente.

Choix du haut-parleur

Pour tout transducteur électroacoustique, la sensibilité est estimée à partir de l'efficacité (ou rendement) du haut-parleur. L'efficacité est le ratio de la puissance acoustique rayonnée de la source W (puissance utile, calculée en Watts, Éq. (5.17)) et de W_e la puissance électrique (puissance fournie par l'amplificateur, en Watts). Puis, ce ratio est converti en sensibilité [dB /1W à 1 m].

1. Efficacité acoustique du haut-parleur (*efficiency*) [21]

$$\eta = \frac{W}{W_e} \quad (5.24)$$

2. La sensibilité du haut-parleur (*sensitivity*) [21]

$$\text{Sensibilité} = 112 + 10 \log(\eta) \quad (5.25)$$

Modélisation d'un haut-parleur électrodynamique

Dans cette sous-section, il sera rappelé brièvement le modèle physique d'un haut-parleur électrodynamique. En se référant à [21], on rappellera les notions d'impédance électrique, d'impédance mécanique, de fonction de transfert du haut-parleur et les théories de conversion acoustique-mécanique-électrique.

Le haut-parleur est supposé monté sur un écran plan infini. Le circuit électrique d'un haut-parleur à bobine est présenté dans la figure 5.3. Les termes utilisés dans cette modélisation sont définis dans le tableau 5.1.

L'équation du circuit électrique s'écrit

$$U = Ri + L \frac{di}{dt} + Blv \quad (5.26)$$

L'équation mécanique du mouvement de la membrane, supposé rigide et se comportant donc comme un système masse-ressort à un degré de liberté, est donnée par

$$Bli = m \frac{d^2x}{dt^2} + R_f \frac{dx}{dt} + k_m x \quad (5.27)$$

où x est le déplacement de la membrane.

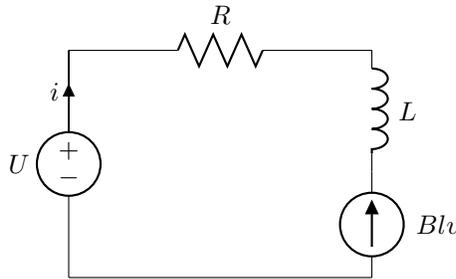


Figure 5.3 Circuit électrique d'un haut-parleur à bobine.

Tableau 5.1 Tableau de description des termes utilisés dans la modélisation.

Terme	Description	Unité
U	La tension de sortie de l'amplificateur	(V)
i	Le courant électrique	(A)
R	Résistance de la bobine mobile	(Ω)
L	Inductance de la bobine mobile	(H)
B	Induction dans l'entrefer	(teslas)
l	Longueur totale du fil de la bobine	(m)
v	Vitesse de la membrane (ou du cône)	(m.s ⁻¹)
m, M_{ms}	La masse mobile en mouvement du haut-parleur (la masse de la membrane + la bobine mobile + la réactance de rayonnement de l'air de chaque côté de la membrane)	(kg)
R_f	Coefficient de pertes dû au rayonnement et frottement divers	
k_m	Raideur de la suspension du cône	(N.m ⁻¹)
ω	Pulsation du cône	(rad.s ⁻¹)
S_d	Surface du cône (la surface effective de la membrane du haut-parleur)	(m ²)
F_o	Fréquence de résonance principale du cône	(Hz)
C_{ms}	Souplesse de la suspension	(N.m ⁻¹)
Q_{ms}	Surtension mécanique	
R_{ms}	Facteur des frottements visqueux du transducteur	(N.s.m ⁻¹)

En régime harmonique, les équations des impédances électrique et mécanique peuvent s'écrire sous la forme complexe. Plus de détails sont indiqués dans la référence [21]. L'impédance électrique Z_e est donnée par :

$$Z_e = R + jL\omega \quad (5.28)$$

Et Z_m , l'impédance mécanique est donnée par :

$$Z_m = R_f + j \left(M_{ms} \omega - \frac{k_m}{\omega} \right) \quad (5.29)$$

Avec R_f le coefficient de pertes dû au rayonnement et frottement divers. Ce coefficient est caractérisé par la résistance mécanique des pertes R_{ms} , par frottements internes dans les suspensions. L'impédance électrique **libre** (impédance que l'on mesure aux bornes électriques du haut-parleur quand la membrane est libre) du système peut donc s'écrire

$$Z_e^* = Z_e + \frac{(Bl)^2}{Z_m} \quad (5.30)$$

Ce qui donne

$$Z_e^* = R + jL\omega + \frac{(Bl)^2}{Z_m} \quad (5.31)$$

Dans le cas de la conversion électrique mécanique, la quantité d'intérêt est le rapport entre la vitesse de la membrane et la tension électrique appliquée

$$H_{HP} = \frac{v}{U} = \frac{Bl}{Z_e^* Z_m} \quad (5.32)$$

Ce rapport représente la fonction de transfert donnant la réponse en vitesse en fonction de la tension appliquée. D'où, la fonction de transfert (FRF) du haut-parleur

$$H_{HP}(\omega) = \frac{Bl}{Z_e^* Z_m} \quad (5.33)$$

Inversement, pour la conversion acoustique-mécanique-électrique, soit la tension du haut-parleur (voltage) nécessaire pour produire un déplacement de membrane v

$$U = \frac{v}{H_{HP}(\omega)} \quad (5.34)$$

En multipliant par S_d , la surface effective de la membrane du haut-parleur.

$$U = \frac{v S_d}{H_{HP}(\omega) S_d} \quad (5.35)$$

La tension nécessaire pour produire le débit Q devient

$$U = \frac{Q(\omega)}{H_{HP}(\omega) S_d} \quad (5.36)$$

D'où il devient possible de déduire la commande en voltage pour produire un signal de débit $Q(\omega)$. Cette commande est donnée par :

$$U(\omega) = \frac{Q(\omega) H_{HP}^{-1}}{S_d} \quad (5.37)$$

Les valeurs nécessaires aux calculs sont lues dans la table de spécifications du haut-parleur : $R, L, F_o, M_{ms}, C_{ms}, Q_{ms}, Bl, S_d$. En exemple, les paramètres du haut-parleur choisi pour cette étude sont présentés dans l'annexe A.

Les autres valeurs (k_m , R_{ms}) sont calculées comme suit :

$$k_m = 10^6 / C_{ms} \quad (5.38)$$

$$R_{ms} = 2\pi F_o M_{ms} / Q_{ms} \quad (5.39)$$

5.5 Simulations du prototype d'amélioration de la qualité sonore : théorie

Dans cette partie seront présentées les étapes intermédiaires pour la modélisation du dispositif d'amélioration de qualité sonore.

5.5.1 Dispositif d'amélioration de la qualité sonore

Le dispositif proposé dans cette étude est schématisé par un diagramme en bloc. Ce dernier est composé principalement de quatre blocs et de trois signaux d'entrée. Cela est montré dans la figure 5.4. Les signaux $\mathbf{d}(t)$ et $\mathbf{b}(t)$ représentent respectivement le signal acoustique désiré selon l'optimisation de la qualité sonore, et le signal acoustique original du VRM à l'extérieur du casque du pilote. Ainsi, le signal acoustique d'erreur $\mathbf{e}(t)$ (ou de différence) est calculé directement par la différence des deux signaux acoustiques temporels. La troisième entrée $\text{rpm}(t)$, constitue le signal du RPM moteur en tr/min.

Le bloc « Simulink » constitue la partie principale du dispositif. Il permet de générer le signal de synthèse $x(t)$. Le bloc W_{opt} est le filtre optimal de Wiener (discuté à la Sec. 5.5.4). Le système acoustique (fonction de transfert entre débit volumique et pression sonore à l'extérieur du casque) et le haut-parleur sont combinés dans un seul bloc pour constituer le système du chemin de transfert complet $\mathbf{H} = H_{HP}\mathbf{H}_M$. Ainsi, le système combiné inverse noté $(\mathbf{H}_M H_{HP})^+$ constitue la pseudo-inverse du système acoustique combiné $(H_{HP}\mathbf{H}_M)$.

Dans la figure 5.4, $x(t)$ représente le signal acoustique d'erreur synthétisé dans Simulink, $\hat{e}(t)$ le signal acoustique de synthèse estimé par le filtre optimal de Wiener, $U(t)$ le signal de contrôle du haut-parleur, $\mathbf{e}_{rec}(t)$ le signal de synthèse reconstruit à l'extérieur du casque et $\mathbf{d}_{rec}(t)$ le signal sonore amélioré, reconstruit à l'extérieur du casque. Les objectifs des différents blocs et les étapes intermédiaires seront développés dans les sections suivantes.

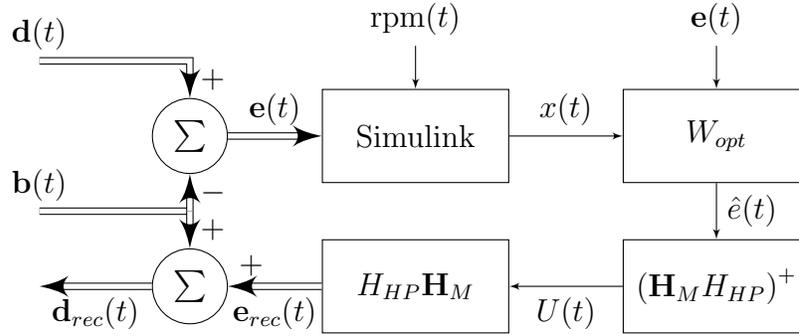


Figure 5.4 Diagramme bloc du dispositif d'amélioration de la qualité sonore.

5.5.2 Le bloc Simulink

Une étape préalable, appelée *Order Track*, permet d'identifier les amplitudes moyennes (dans le temps) pour chacune des harmoniques du signal d'erreur $e(t)$ (ce sont les ordres moteur qui font l'objet d'une modification virtuelle pour optimiser la qualité sonore). Puis, à partir de ces amplitudes et du signal RPM moteur, le bloc Simulink permet de générer un signal de synthèse $x(t)$ basé sur les harmoniques étudiées (« HiFreq »).

Le schéma fonctionnel détaillé de Simulink est montré dans la figure 5.5. Il est constitué d'un premier bloc qui convertit le RPM en phaseur (*Phasor*) et d'une table de correspondance (LUT, *Look-Up Table*). Le bloc phaseur modélisé dans Simulink est détaillé dans la sous-section 5.5.3.

La table LUT fournit les valeurs de la fonction forme d'onde du signal d'erreur de synthèse $x(t)$. Dans cette étude, la forme d'onde est obtenue par sommation de cinq sinus correspondant aux harmoniques hautes du moteur :

$$x(t) = A(1) \sin(h1\phi) + A(2) \sin(h2\phi) + A(3) \sin(h3\phi) + A(4) \sin(h4\phi) + A(5) \sin(h5\phi) \quad (5.40)$$

où A est le vecteur des amplitudes moyennes pour chacun des ordres du signal d'erreur $e(t)$, obtenues par *Order Track*, $h1, h2, h3, h4, h5$ sont les numéros d'harmoniques étudiées (« HiFreq ») et $\phi(t)$ le phaseur $[0 \ 2\pi]$ généré à partir du RPM moteur.

5.5.3 Le bloc phaseur

Soit $z(t)$ un signal analytique dont l'expression complexe est

$$z(t) = a(t) e^{i\phi(t)} \quad (5.41)$$

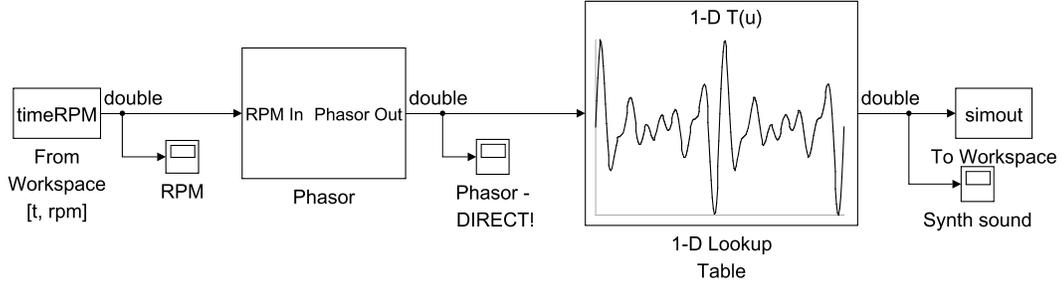


Figure 5.5 Traitement du signal dans le bloc Simulink.

La fréquence angulaire instantanée est la dérivée de la phase

$$\omega(t) = \frac{d}{dt}\phi(t) \quad (5.42)$$

Sachant que pour la pulsation est $\omega = 2\pi f$, la fréquence instantanée correspondante ($f = \omega/2\pi$) s'écrit

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt}\phi(t) = \frac{\omega(t)}{2\pi} \quad (5.43)$$

L'opération inverse, appelée déroulement de phase, est donnée comme

$$\phi(t) = \int_{-\infty}^t \omega(\tau) d\tau = 2\pi \int_{-\infty}^t f(\tau) d\tau \quad (5.44)$$

$$\phi(t) = \phi(0) + \int_0^t \omega(\tau) d\tau \quad (5.45)$$

Pour une représentation en temps discret, la fonction de phase s'écrit et se calcule de façon récursive avec $\phi[n] = \phi[n-1] + \omega[n]$. D'où la représentation analytique du phaseur qui est donnée par

$$\phi(nT) = \phi((n-1)T) + 2\pi T f(nT) \quad (5.46)$$

Avec T la période temporelle d'échantillonnage et l'échantillon n , $f(nT)$ la fréquence instantanée obtenue en convertissant le régime (RPM) du moteur en Hz.

Le diagramme en bloc du phaseur, modélisé dans Simulink, est présenté dans la figure 5.6. Ce bloc est conçu pour une entrée RPM temporelle (« RPM In »), qui est convertie en phase puis en phase cumulée. Cette phase cumulée est par la suite modulée par 2π pour établir le signal temporel phaseur qui constitue la sortie du bloc (« Phasor Out »).

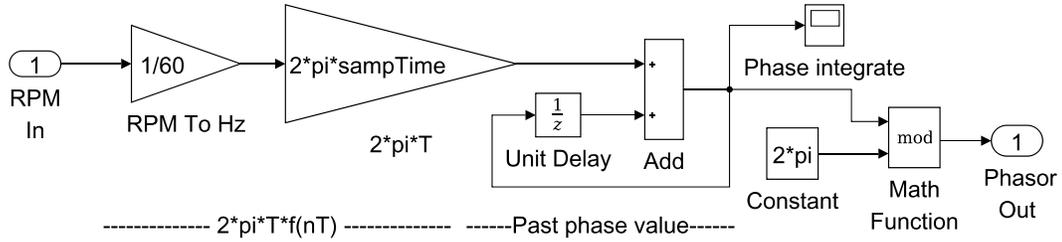


Figure 5.6 Diagramme bloc du phaseur dans Simulink.

5.5.4 Filtre optimal de Wiener

Le signal de sortie de Simulink $x(t)$ garde une amplitude constante et possède un déphasage par rapport au signal désiré. Ce déphasage va empêcher d'atteindre l'amplitude maximale du signal acoustique d'erreur reconstruit (e_{rec}) et peut dégrader la qualité du son recherché par un jeu d'interférence constructive et destructive. Aussi, il peut annuler une onde dans le cas d'addition d'un signal en opposition de phase. Donc, il est nécessaire d'introduire un système permettant d'approcher la solution optimale.

Dans cette section, le problème à résoudre est alors de concevoir un filtre qui estime au mieux l'information e à partir du signal de sortie de simulation x . De ce fait, l'objectif est de trouver le filtre optimal de Wiener W_{opt} qui va minimiser l'écart quadratique entre le signal restauré (estimé) \hat{e} et le signal d'erreur désiré e .

Dans le cas où il n'y ait pas de contrainte de causalité sur l'estimateur, en se référant à la référence [10], l'expression du filtre optimal de Wiener est donnée dans le domaine fréquentiel par

$$W_{opt}(e^{j\omega T}) = \frac{S_{xe}(e^{j\omega T})}{S_{xx}(e^{j\omega T})} \quad (5.47)$$

où $S_{xx}(e^{j\omega T})$ est la densité spectrale de puissance du signal d'entrée $x(n)$ et $S_{xe}(e^{j\omega T})$ est la densité spectrale de puissance entre la sortie désirée $e(n)$ et l'entrée $x(n)$.

En pratique, ces densités spectrales de puissances sont calculées par la fonction « *CPSD* » de MatlabTM. En conséquence, le filtre optimal de Wiener dépend de la matrice d'intercorrélation entre $e(n)$ et $x(n)$ et de l'inverse de la matrice d'autocorrélation du signal simulé $x(n)$.

Dans cette étude, pour obtenir un filtre optimal de Wiener stable, il faut éviter la division par $S_{xx} \simeq 0$, qui risque de se produire en dehors des fréquences harmoniques moteur visées

par le système. D'où l'utilisation de la fonction Sigmoidé en guise de porte

$$\text{Sigmoidé} = \frac{1}{1 + e^{-a(S_{xx}-c)}} \quad (5.48)$$

avec a le coefficient de courbure et c le seuil minimum de S_{xx} .

Le filtre optimal de Wiener s'écrit donc

$$W_{opt}(e^{j\omega T}) = \frac{1}{1 + e^{-a(S_{xx}(e^{j\omega T})-c)}} \frac{S_{xe}(e^{j\omega T})}{S_{xx}(e^{j\omega T})} \quad (5.49)$$

avec la fonction Sigmoidé qui agit comme une porte et qui ne laisse passer que les fréquences pour lesquelles il y a du contenu dans S_{xx} .

5.5.5 Le système acoustique

Tel qu'indiqué dans la sous-section 5.4.1, la source acoustique adoptée dans cette étude est une source monopolaire. Pour les simulations qui viennent, la distance entre la source et l'oreille gauche du conducteur est supposée de 60 cm et la distance entre les oreilles d'environ 15 cm. La figure 5.7 présente une esquisse de la position de la source par rapport à la tête du conducteur.

À présent, en se référant à l'équation (5.15) et à partir de ces dimensions, la fonction de réponse en fréquence du système acoustique et sa réponse à l'impulsion peuvent être modélisées. Dans la partie (a) de la figure 5.8 est montré le gain de la fonction de transfert

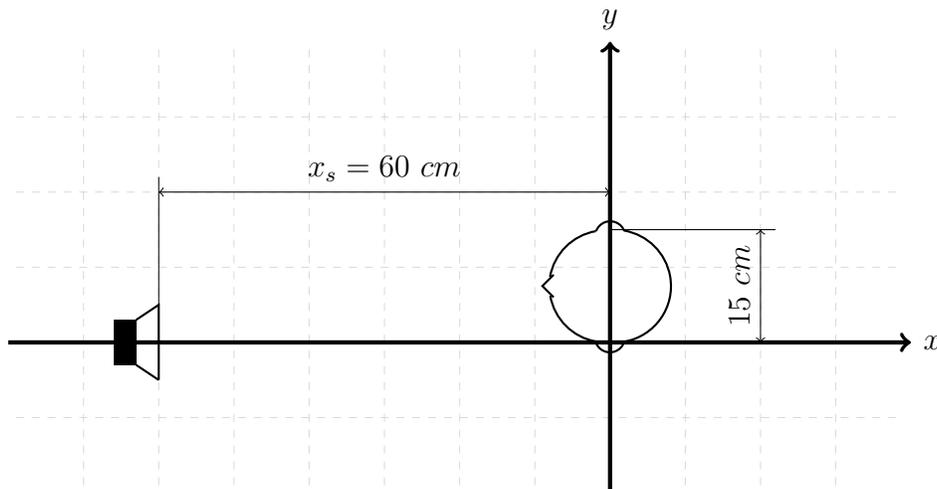


Figure 5.7 Présentation du système acoustique à partir d'une source monopolaire.

du monopole jusqu'à l'extérieur de l'oreille gauche du conducteur. L'inverse du système acoustique, c.-à-d. de l'oreille gauche jusqu'à la source, permettant le calcul du débit volumique de la source nécessaire à l'amélioration de la qualité sonore (Éq. (5.16)) est montré dans la partie (b) de la figure 5.8. Il faut noter que l'inverse est filtré par un filtre passe-bande (de 30 à 20 kHz) pour éviter un gain trop grand, voire infini, vers $\omega \rightarrow 0$.

5.5.6 Le haut-parleur

Dans cette étude, le haut-parleur va assurer la reproduction du signal à ajouter pour améliorer la qualité sonore du VRM. Il doit fournir une puissance acoustique W de 0.0081 watts pour le cas d'une accélération rapide, cette valeur est calculée à partir de l'équation (5.17) et pour le L_W du signal de différence $\mathbf{e}(t)$. Pour une puissance électrique fournie W_e de 25 watts (ce qui correspond à une puissance typique de circuit d'amplification abordable), la sensibilité doit être d'au moins 77.1 dB/watt/m.

Comme premier exemple, un haut-parleur avec une gamme de fréquences de 100 Hz à 20 kHz, une impédance nominale de 4 Ohm et une puissance électrique d'entrée de 25 watts est choisi. Ayant une valeur de sensibilité de 82.9 dB/watt/m, ce haut-parleur satisfait à la condition de sensibilité. Les caractéristiques du haut-parleur sont indiquées dans l'annexe A.

La connaissance de l'impédance mécanique et l'impédance électrique est nécessaire pour le calcul de la fonction de transfert du haut-parleur (H_{HP}) selon l'Éq. (5.33). La figure 5.9 montre l'impédance électrique (Éq. (5.31)) et mécanique (Éq. (5.29)) du haut-parleur.

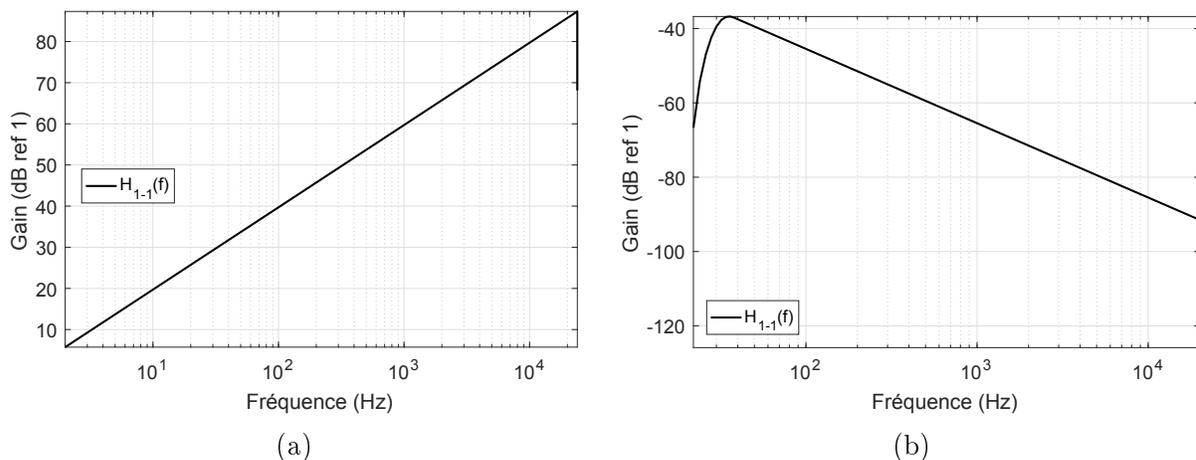


Figure 5.8 FRF du système acoustique et FRF du système inverse, canal gauche : (a) $\mathbf{H}_M(f)$. (b) $\mathbf{H}_M^+(f)$.

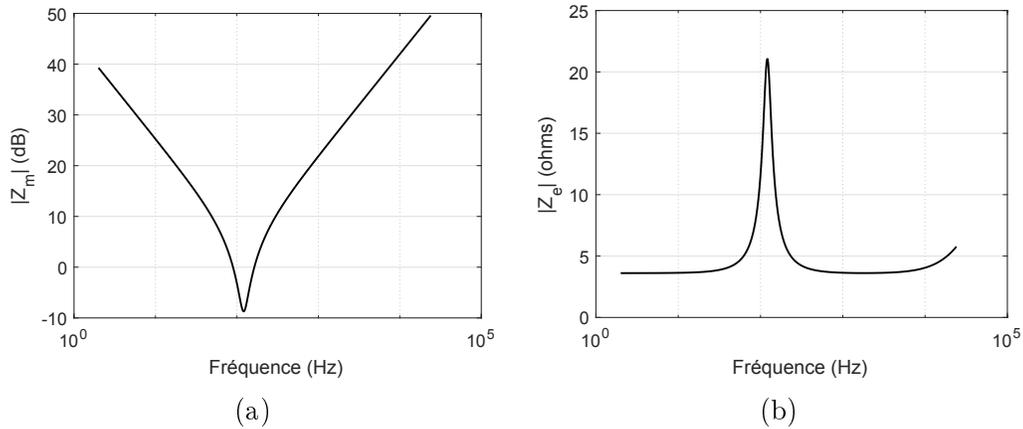


Figure 5.9 Impédances théoriques du haut-parleur à partir des spécifications du fabricant : (a) Impédance mécanique (Éq. (5.29)). (b) Impédance électrique (Éq. (5.31)).

Le pic d'impédance (à 120.6 Hz) correspond à la résonance mécanique du haut-parleur. Dans la courbe de l'impédance électrique, on observe un minimum de 3.7 Ohms au courant continu, un maximum de 21 Ohms à la fréquence de résonance du haut-parleur et une remontée dans les aigus.

Pour prédire la réponse du haut-parleur, les définitions précédentes (Éq. (5.32), (5.33)) permettent de calculer la fonction de transfert $H_{HP} = v/U$ à partir des impédances. La figure 5.10 illustre la fonction de transfert et la réponse à l'impulsion du haut-parleur (en $\text{m.s}^{-1}/\text{V}$, voltage vers vitesse).

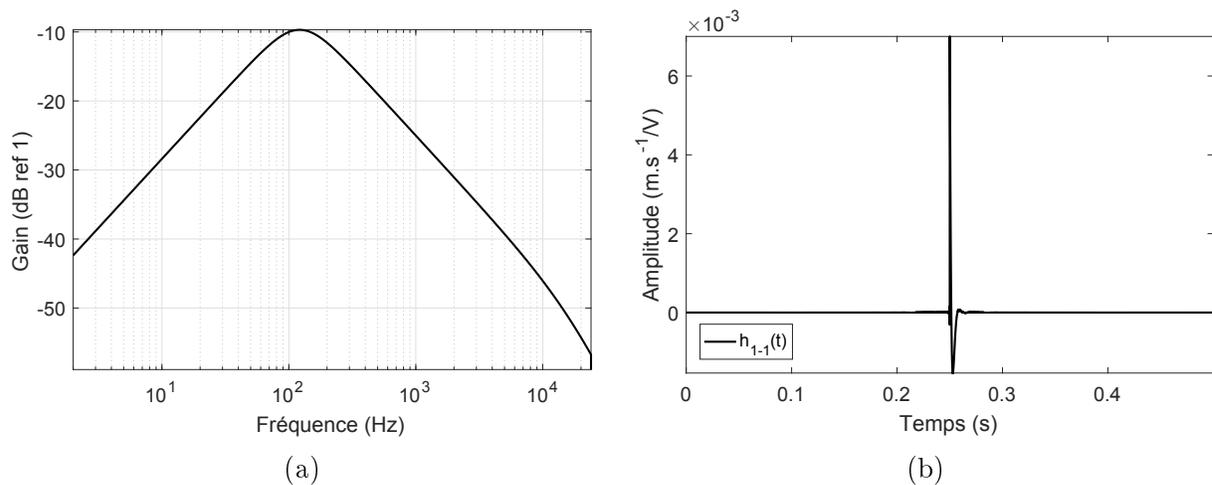


Figure 5.10 Fonction de transfert vitesse/tension (Éq. (5.32)) et réponse à l'impulsion du haut-parleur : (a) Fonction de transfert. (b) Réponse à l'impulsion.

Sur la courbe de la fonction de transfert, on observe une pente de 6 dB/Octave jusqu'à un maximum de -10 dB à la fréquence de résonance du haut-parleur puis une pente de -6 dB/Octave jusqu'à la fréquence de coupure de 20 kHz. La fonction de transfert du haut-parleur se comporte comme un passe-bande avec une fréquence de coupure acoustique dans les hautes fréquences.

5.5.7 Le système acoustique combiné

Les fonctions de transfert du système acoustique combiné $H_{HP}\mathbf{H}_M$ et de l'inverse du système combiné $(\mathbf{H}_M H_{HP})^+$ sont montrées à la figure 5.11, partie (a) et (b) respectivement. On rappelle que ces FRF sont filtrées par un filtre passe-haut à 30 Hz et par un filtre passe-bas à 20 kHz. Cela permettra d'éviter un gain trop grand, vers $\omega \rightarrow 0$.

5.6 Simulations du prototype d'amélioration de la qualité sonore : validation pour des signaux fictifs

L'objectif de cette section est de valider les étapes intermédiaires développées dans le dispositif d'amélioration de qualité sonore mis en place. La validation sera réalisée sur un signal sonore binaural généré à partir d'une courbe RPM fictive.

En suivant l'ordre exposé dans le diagramme en bloc du dispositif (Fig. 5.4) seront présentés : 1) les signaux d'entrée du dispositif ($\mathbf{d}(t)$, $\mathbf{b}(t)$ et $\text{rpm}(t)$), 2) les amplitudes des

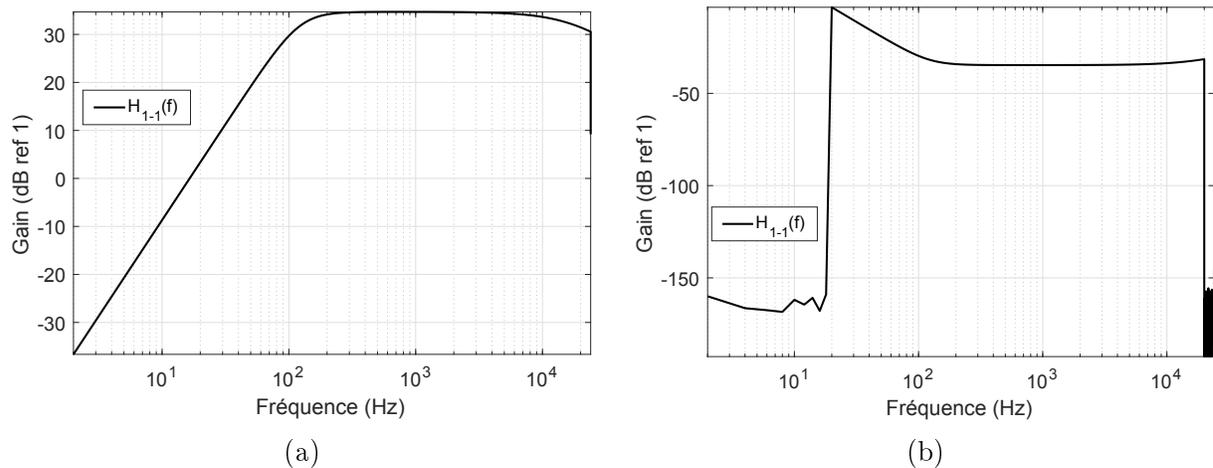


Figure 5.11 FRF du système combiné et FRF du système combiné inverse, canal gauche : (a) FRF du système combiné $H_{HP}\mathbf{H}_M$. (b) FRF du système combiné inverse $(\mathbf{H}_M H_{HP})^+$.

harmoniques du signal de synthèse $x(t)$, 3) le signal de contrôle du haut-parleur $U(t)$ et 4) le signal de sortie du dispositif $\mathbf{e}_{rec}(t)$ ainsi que le signal sonore amélioré $\mathbf{d}_{rec}(t)$.

5.6.1 Signaux d'entrée du dispositif (signaux fictifs)

Dans ce cas, un signal RPM fictif correspondant à une accélération rapide de 5 secondes est généré dans MatlabTM. Ce signal sera donc utilisé comme l'entrée $\text{rpm}(t)$ du dispositif. Également, il sera utilisé pour la génération du signal fictif, de pression acoustique de référence $\mathbf{b}(t)$. La figure 5.12 montre la courbe du RPM en fonction du temps, utilisée dans ce cas de validation. On note que cette courbe RPM allant de 3000 à 6000 tr/min environ, couvre toute la plage de fréquence des harmoniques moteur étudiées. Cette bande de fréquence est comprise entre approximativement 400 et 2000 Hz.

Le signal binaural de référence $\mathbf{b}(t)$ est alors généré à partir de la phase cumulative basée sur ce RPM fictif. Il est composé des harmoniques hautes du moteur (harmoniques modifiées lors des tests d'écoute) avec des amplitudes différentes et sans déphasage entre les harmoniques. Ensuite, le signal désiré $\mathbf{d}(t)$ est créé en multipliant par deux l'amplitude du signal de référence $\mathbf{b}(t)$. Le signal désiré et de référence sont ainsi supposés pour illustrer l'aptitude du dispositif à accroître ces harmoniques au niveau souhaité. Le signal fictif de référence $\mathbf{b}(t)$ et le signal désiré $\mathbf{d}(t)$ ainsi que le signal de différence entre les deux $\mathbf{e}(t)$ sont illustrés dans l'annexe C, figure C.1.

5.6.2 Amplitudes des harmoniques du signal de synthèse

Comme indiqué à la sous-section 5.5.2, la première étape du dispositif consiste à estimer les amplitudes moyennes dans le temps (ici, sur la durée du signal, c-à-d 5s) des harmoniques

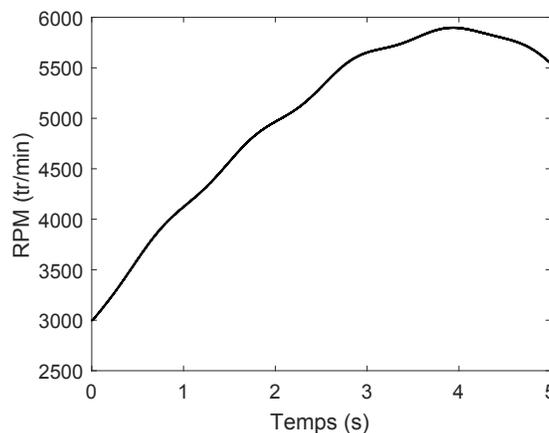


Figure 5.12 Courbe RPM pour le cas de signaux fictifs.

du signal de synthèse $x(t)$. Ces amplitudes sont calculées à partir du signal de différence $e(t)$. Les amplitudes moyennes des harmoniques sont obtenues par *Order Track*, à l'aide des fonctions « *rpmordermap* », « *orderspectrum* » et « *findpeaks* » de MatlabTM.

La figure 5.13 illustre les amplitudes moyennes RMS (*Root Mean Square*) des harmoniques étudiées pour les deux canaux du signal de différence $e(t)$: (a) gauche, (b) droite et dans (c) il est représenté la moyenne des amplitudes entre les deux canaux.

Dans ce cas de validation, l'amplitude du signal de référence $b(t)$ est la moitié de celle du signal désiré $d(t)$. De ce fait, les amplitudes moyennes identifiées devraient correspondre aussi aux amplitudes des harmoniques du signal de référence. Cela est bien vérifié pour ce cas fictif et permet de valider l'étape d'identification des amplitudes du signal de synthèse.

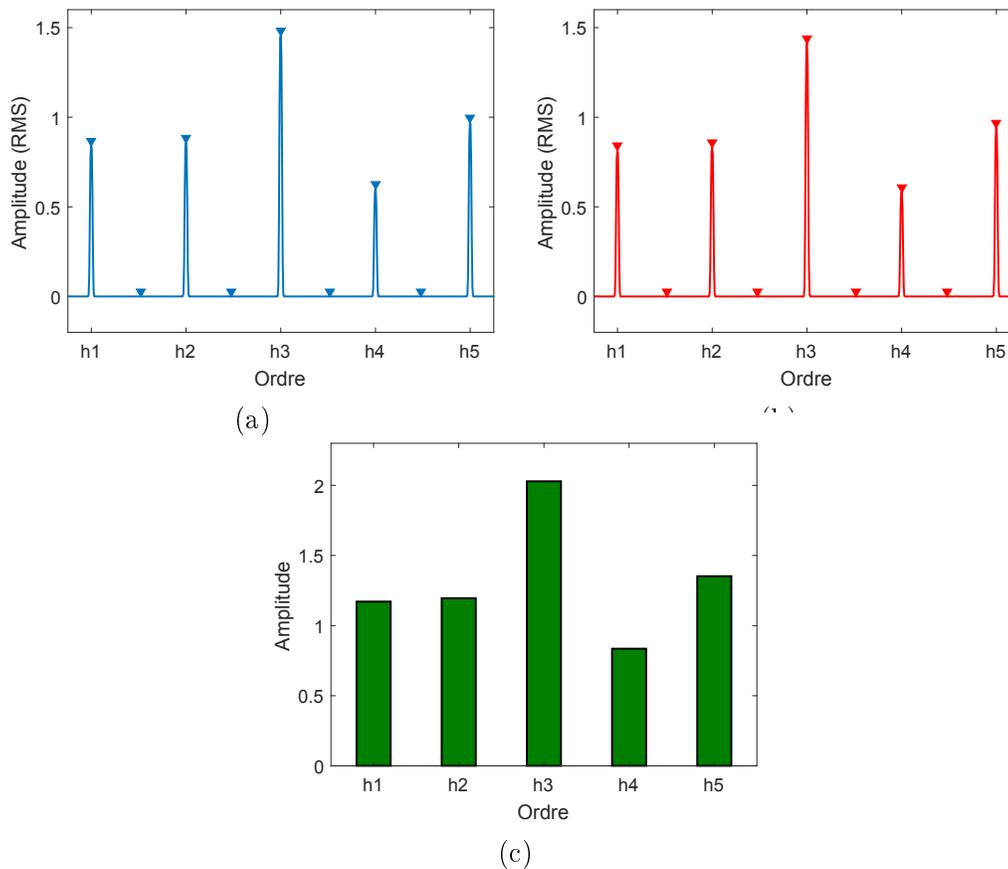


Figure 5.13 Amplitudes moyennes des harmoniques du signal $e(t)$, pour le cas de signaux fictifs : (a) Canal gauche. (b) Canal droit. (c) Moyenne de gauche et droite.

5.6.3 Signal de commande du haut-parleur

Après identification des amplitudes du signal de synthèse, le bloc Simulink construit le signal $x(t)$ basé sur les harmoniques hautes du moteur tel qu'expliqué dans la Sec. 5.5.2. Ensuite, afin de corriger la phase de ce signal un filtre optimal de Wiener (Sec. 5.5.4) est appliqué. Le signal de sortie du filtre optimal constitue ainsi le signal d'erreur restauré $\hat{e}(t)$. Puis, ce signal restauré est filtré par la réponse à l'impulsion du système combiné inverse $(\mathbf{H}_M H_{HP})^+$ (partie (b) de la Fig. B.2). Le produit est donc le signal commande du haut-parleur $U(t)$. Cela revient à combiner les équations (5.16) et (5.37). Le signal de contrôle du haut-parleur pour ce cas de validation est montré dans la figure 5.14.

5.6.4 Reconstruction par le système acoustique combiné

L'objectif dans cette sous-section est de reconstruire le signal acoustique de synthèse à l'extérieur du casque à partir du signal de contrôle du haut-parleur. Pour ce faire, le signal de contrôle $U(t)$ est filtré par le système combiné $H_{HP} \mathbf{H}_M$, haut-parleur et propagation acoustique, afin d'obtenir le signal de synthèse reconstruit à l'extérieur du casque $\mathbf{e}_{rec}(t)$. La figure 5.15 illustre le signal de synthèse reconstruit $\mathbf{e}_{rec}(t)$ et le signal de différence initial $\mathbf{e}(t)$ à l'extérieur du casque pour le canal gauche et droit, respectivement.

Sur la figure 5.15, le signal de synthèse reconstruit à l'extérieur du casque concorde bien avec le signal temporel de différence. En zoomant (graphique de droite), on constate que le dispositif offre une très bonne reconstruction en amplitude et en phase du signal acoustique de synthèse à l'extérieur du casque. On observe aussi une légère diminution d'amplitude. Cela est dû principalement au filtrage par le filtre optimal de Wiener réalisé avec une

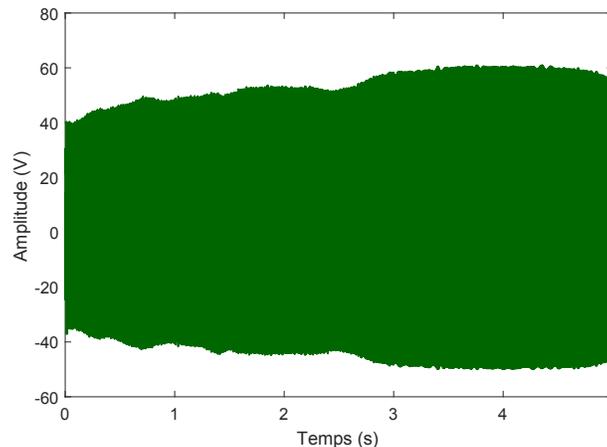


Figure 5.14 Signal de contrôle $U(t)$ du haut-parleur pour le cas de signaux fictifs.

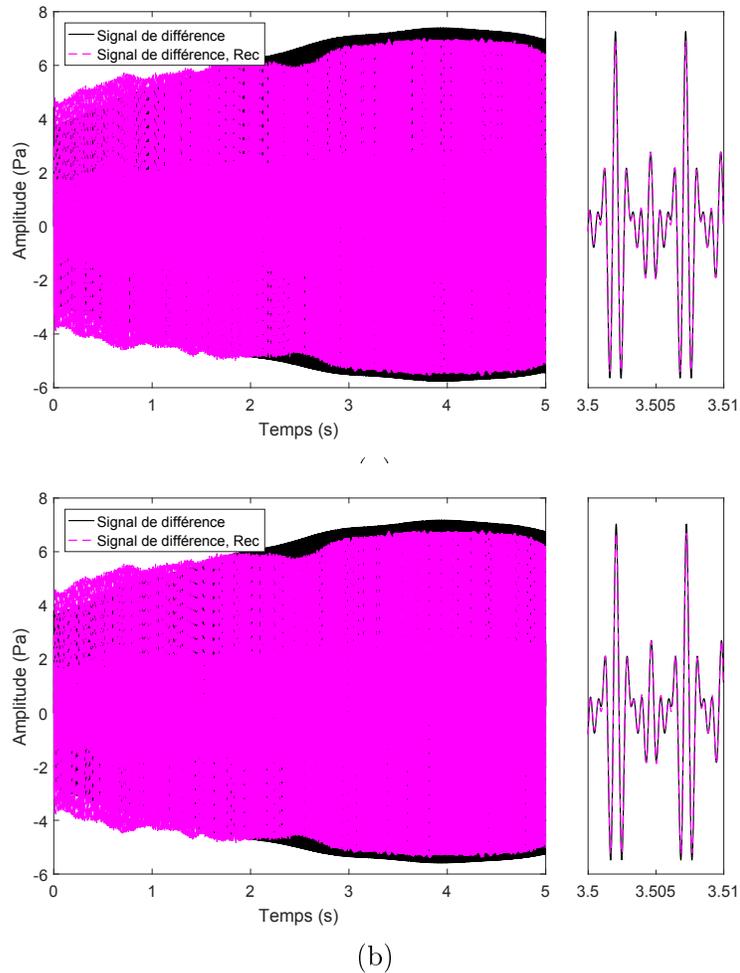


Figure 5.15 Reconstruction du signal de synthèse $\mathbf{e}_{rec}(t)$ et comparaison avec le signal cible $\mathbf{e}(t)$ à l'extérieur du casque pour le cas de signaux fictifs : (a) Canal gauche. (b) Canal droit. Les graphiques de droite donnent des zooms selon l'axe du temps.

fenêtre glissante, vu que l'amplitude du signal change dans le temps. Il est dû également au compromis établi en considérant la moyenne des amplitudes de gauche et de droite lors de la génération du signal de synthèse $x(t)$. Et aussi parce que la synthèse ne reconstruit que les harmoniques hautes du signal cible $\mathbf{e}(t)$. Toutefois, ces résultats montrent que ce dispositif permet de reconstruire convenablement l'amélioration recherchée.

À la fin, le signal d'erreur reconstruit $\mathbf{e}_{rec}(t)$ est ajouté au signal de référence $\mathbf{b}(t)$ pour constituer le signal acoustique optimisé $\mathbf{d}_{rec}(t)$. La figure 5.16 montre le signal acoustique optimisé et désiré pour les canaux gauche et droit, respectivement.

Dans la figure 5.16, le signal acoustique amélioré $\mathbf{d}_{rec}(t)$ est comparé au signal acoustique désiré $\mathbf{d}(t)$ à l'extérieur du casque. On constate que le signal désiré est bien reconstruit

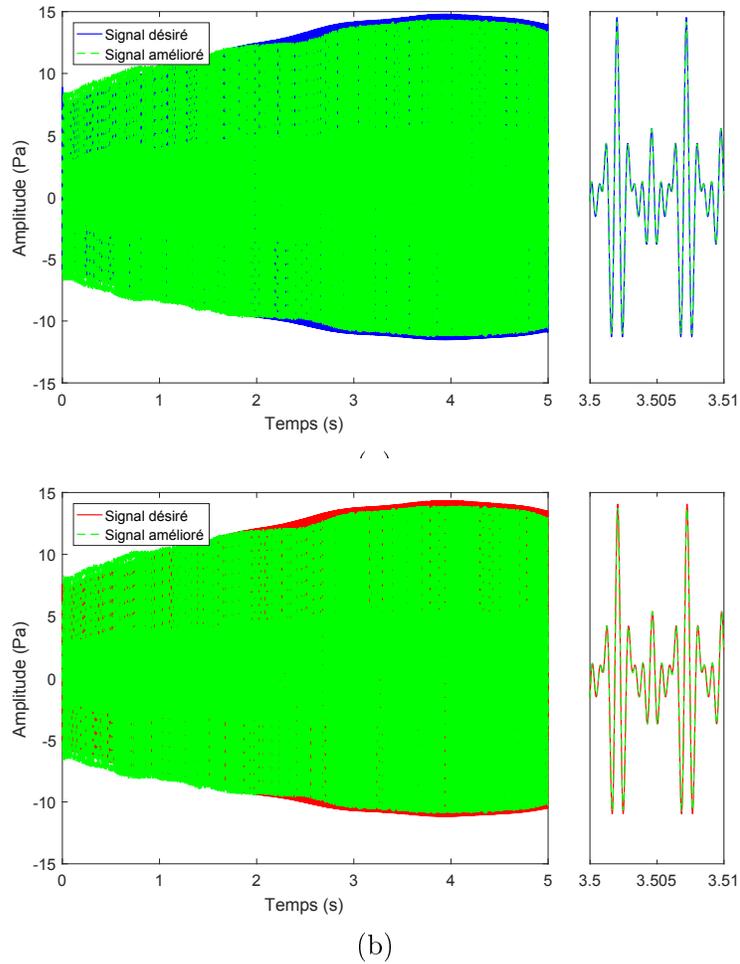


Figure 5.16 Reconstruction du signal optimisé $\mathbf{d}_{rec}(t)$ et comparaison au signal désiré $\mathbf{d}(t)$ pour le cas de signaux fictifs : (a) Canal gauche. (b) Canal droit. Les graphiques de droite donnent des zooms selon l'axe du temps.

en amplitude et en phase dans le domaine temporel pour les deux canaux. La petite différence d'amplitude observée est due également à la diminution d'amplitude indiquée dans le résultat précédent.

Pour mieux exprimer le gain apporté par le dispositif et saisir les caractéristiques fréquentielles du signal amélioré, on réalise une analyse spectrale par estimation de la densité spectrale de puissance (DSP) de ces signaux et du signal de référence. La figure 5.17 représente l'estimation de la densité spectrale de puissance de Welch du signal amélioré $\mathbf{d}_{rec}(t)$, du signal désiré $\mathbf{d}(t)$ et du signal de référence $\mathbf{b}(t)$ pour le canal gauche et droite.

Les résultats, obtenus par estimation de Welch, montrent une excellente superposition de la courbe DSP du signal sonore amélioré et la courbe DSP du signal désiré. En comparant la courbe DSP du signal sonore amélioré à la DSP du signal de référence, on observe une nette

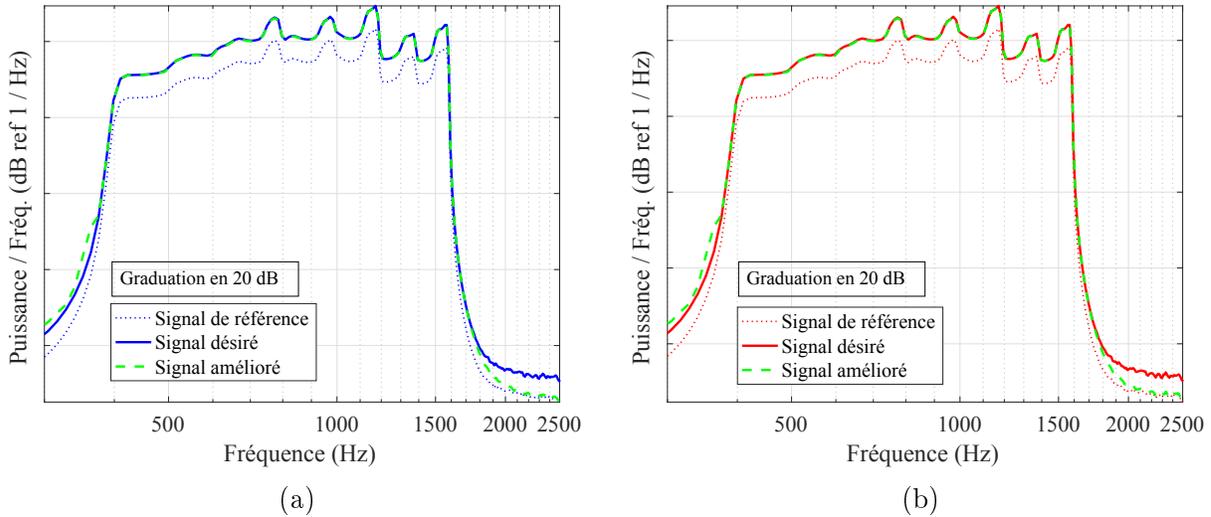


Figure 5.17 Estimation de la densité spectrale de puissance de Welch du signal amélioré $\mathbf{d}_{rec}(t)$, du signal désiré $\mathbf{d}(t)$ et du signal de référence $\mathbf{b}(t)$ pour le cas de signaux fictifs : (a) Canal gauche. (b) Canal droit.

augmentation de niveau de puissance. Cela constitue le niveau de gain de l'amélioration apportée par le dispositif virtuel, qui est une augmentation de 6 dB puisque les amplitudes sont multipliées par deux. En effet, le dispositif reconstruit bien les cinq harmoniques dans le domaine fréquentiel avec une très bonne estimation du gain.

Ce dispositif d'amélioration de qualité sonore permettra par la suite de simuler l'amélioration qui sera appliquée pour des sons mesurés sur véhicule récréatif motorisé.

5.7 Simulations du prototype d'amélioration de la qualité sonore : validation pour des signaux mesurés

Dans cette section, le but est d'utiliser le dispositif virtuel d'amélioration de qualité sonore pour un cas concret. La simulation suivante est donc réalisée pour étudier et évaluer la capacité du dispositif à améliorer des signaux sonores mesurés sur le VRM (B).

Pour ce cas d'application sur des signaux mesurés, seront présentés dans les sous-sections suivantes : 1) les signaux d'entrée du dispositif ($\mathbf{d}(t)$, $\mathbf{b}(t)$ et $\text{rpm}(t)$), 2) le signal phaseur $\phi(t)$, 3) les amplitudes du signal de synthèse $x(t)$, 4) la table de correspondance, 5) le filtre optimal de Wiener W_{opt} , 6) le signal de contrôle du haut-parleur $U(t)$ et 7) le signal de synthèse reconstruit au casque $\mathbf{e}_{rec}(t)$ ainsi que le signal sonore amélioré $\mathbf{d}_{rec}(t)$ puis leurs densités spectrales de puissance.

5.7.1 Signaux d'entrée du dispositif (signaux mesurés)

Comme il l'a été évoqué dans la sous-section 5.5.1, le dispositif d'amélioration de QS compte trois entrées. Pour rappel, les trois signaux en question sont : le signal de référence $\mathbf{b}(t)$, le signal désiré $\mathbf{d}(t)$ et la courbe $\text{rpm}(t)$ du moteur. Cette sous-section décrit donc les signaux d'entrée utilisés dans la présente simulation basée sur des signaux mesurés.

Le signal de référence est le signal acoustique binaural original mesuré à l'extérieur du casque du conducteur de nouveau véhicule récréatif motorisé dSkibel (B) à l'étape de l'accélération (de 20 à 100 km/h en 5 s). Le signal binaural désiré correspond au signal de référence modifié virtuellement. Tel que recommandé dans le chapitre 4, pour améliorer la qualité sonore le signal original est modifié en appliquant un gain de +9.5 dB sur chacune des harmoniques hautes du moteur. La figure C.2, présentée dans l'annexe C, montre le signal temporel de référence $\mathbf{b}(t)$, le signal désiré $\mathbf{d}(t)$ et la différence entre les deux $\mathbf{e}(t)$. La courbe RPM moteur correspondante à l'échantillon sonore mesuré est montrée en (a) à la figure 5.18.

5.7.2 Le signal phaseur

La courbe RPM présentée à la figure 5.18 servira alors comme entrée du bloc phaseur, indiqué dans la sous-section 5.5.3, pour générer un signal phaseur temporel. Une portion du signal phaseur généré à partir de cette courbe RPM est présentée en (b) dans la figure 5.18. Cette portion montre l'évolution de la fréquence instantanée du fondamental moteur pendant l'intervalle de temps.

5.7.3 Amplitudes des harmoniques du signal de synthèse

Cette sous-section présente les amplitudes des harmoniques du signal de synthèse $x(t)$ dans le cas de signaux mesurés. Ces amplitudes correspondent à la moyenne entre les amplitudes du canal gauche et les amplitudes du canal de droite du signal de différence $\mathbf{e}(t)$. Les amplitudes, moyennées dans le temps, des harmoniques hautes du moteur pour chacun des canaux du signal de différence sont obtenues par *Order Track* dans MatlabTM. La figure 5.19 illustre les amplitudes moyennes RMS des harmoniques étudiées pour les deux canaux du signal de différence $\mathbf{e}(t)$: (a) gauche, (b) droite et dans (c) il est représenté la moyenne des amplitudes entre les deux canaux. Il doit être noté qu'il existe une différence significative entre les deux oreilles, conséquence du mouvement de la tête du pilote par rapport au véhicule récréatif motorisé.

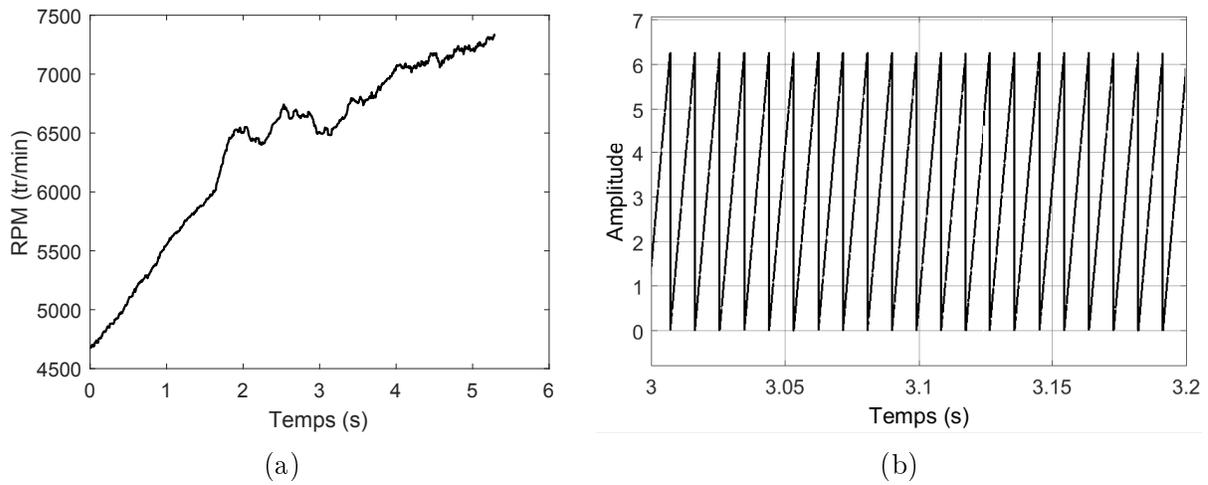


Figure 5.18 Courbe RPM du moteur et portion du phaseur pour le cas de signaux mesurés : (a) Courbe RPM. (b) Portion du phaseur.

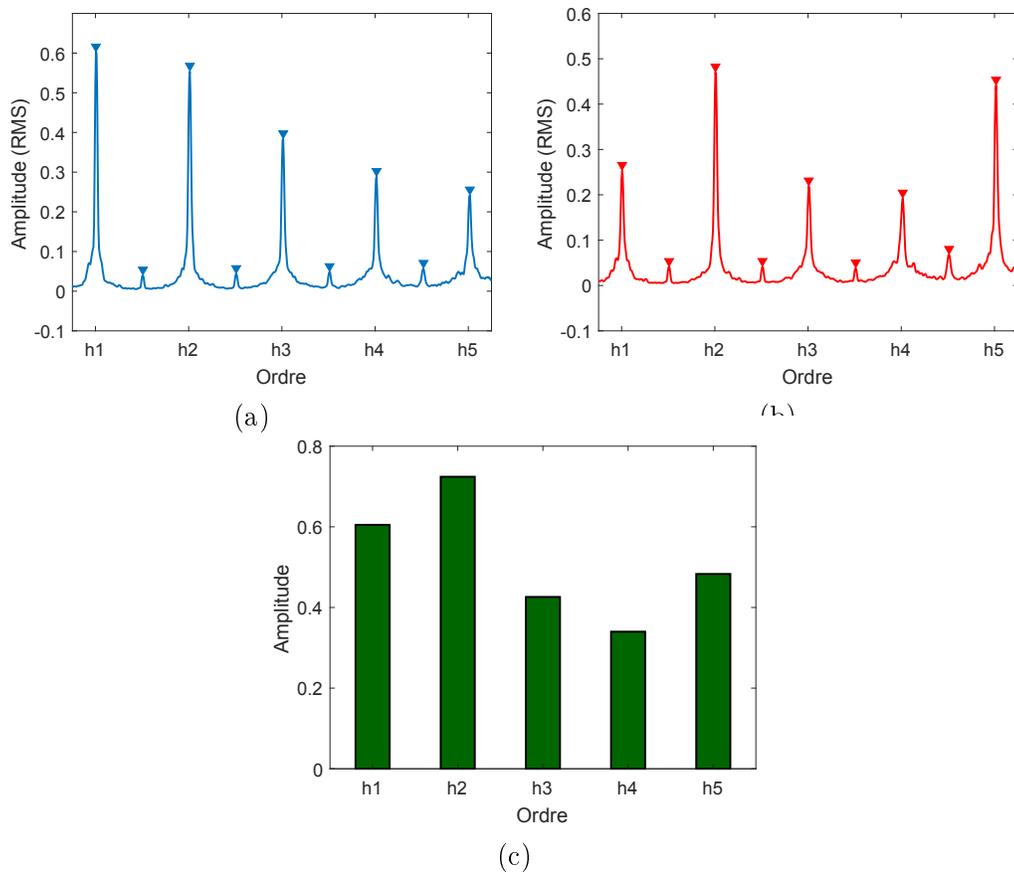


Figure 5.19 Amplitudes moyennes des harmoniques étudiées du signal de différence $e(t)$ au casque du pilote pour le cas de signaux mesurés : (a) Canal gauche. (b) Canal droit. (c) Moyenne de gauche et droite.

5.7.4 La table de correspondance

À partir des amplitudes retrouvées dans la sous-section précédente, l'Éq. (5.40) permet de produire la table de correspondance pour générer la forme d'onde $x(t)$ composée de cinq harmoniques pour ce cas de signaux mesurés. Cette table LUT détermine donc la forme d'onde sur laquelle est basé le signal d'erreur simulé $x(t)$. Le graphe représentant la table LUT pour le cas de signaux mesurés est montré sur la figure 5.20. L'axe des abscisses représente les indices de phase (0 à 2π numérisé sur 256 points) et l'axe des ordonnées l'amplitude correspondante à chaque indice de phase. Ainsi, pour chaque instant t , la table LUT permettra de lire l'amplitude du signal $x(t)$ correspondant à la phase $\phi(t)$.

5.7.5 Le filtre optimal de Wiener

Tel qu'indiqué dans la sous-section 5.5.4, le filtre optimal de Wiener permet de construire une estimation $\hat{e}(n)$ du signal de différence $e(n)$ et ce à partir du signal simulé $x(n)$. Pour le cas présent, le canal gauche du signal de différence est choisi comme le signal de référence du filtre de Wiener. La fonction de transfert et la réponse à l'impulsion du filtre optimal de Wiener, établis pour le cas de signaux mesurés, sont montrées dans la figure 5.21.

5.7.6 Signal de commande du haut-parleur

Après construction du signal restauré \hat{e} , le résultat est filtré par la réponse à l'impulsion du système combiné inverse $(\mathbf{H}_M H_{HP})^+$ (partie (b) de la Fig. B.2) pour obtenir le signal de contrôle du haut-parleur $U(t)$ (en Volts). La figure 5.22 présente le signal temporel de contrôle du haut-parleur pour le cas de signaux mesurés.

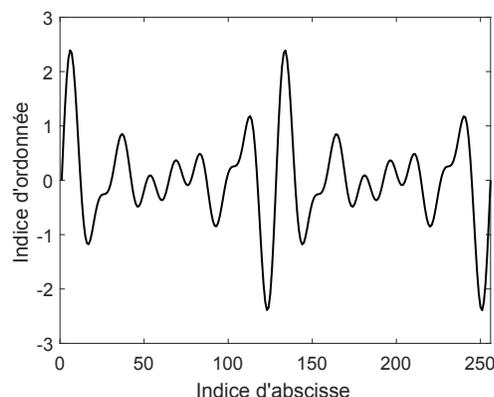


Figure 5.20 Le graphe de la table de correspondance (LUT) pour le cas de signaux mesurés.

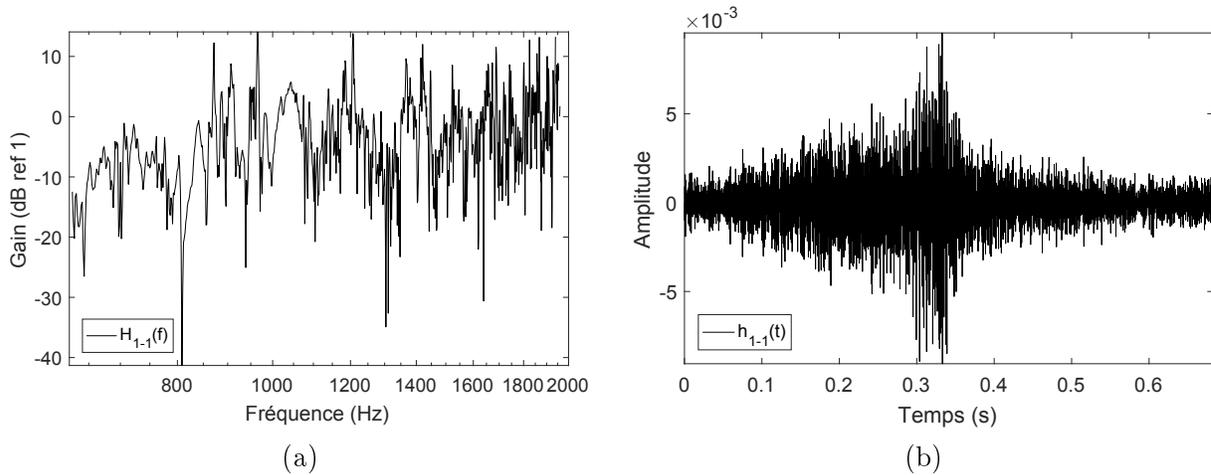


Figure 5.21 Fonction de transfert et réponse à l'impulsion du filtre de Wiener pour le cas de signaux mesurés : (a) Fonction de transfert. (b) Réponse à l'impulsion.

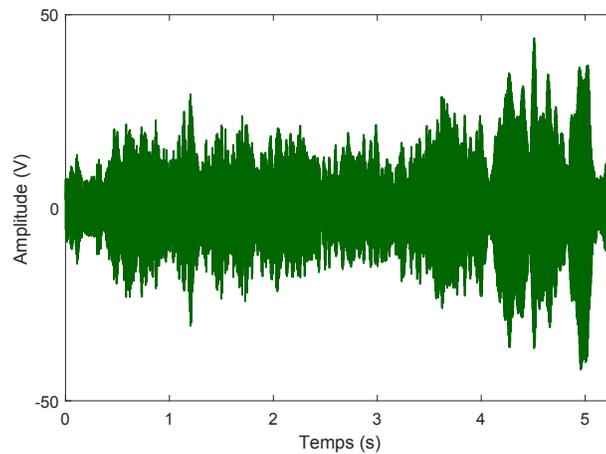


Figure 5.22 Signal de contrôle $U(t)$ du haut-parleur pour le cas de signaux mesurés.

5.7.7 Reconstruction par le système acoustique

Dans cette sous-section le but est d'évaluer la reconstruction, à l'extérieur du casque, du signal de contrôle du haut-parleur. Comme pour le cas de validation pour des signaux fictifs (Sec. 5.6), le signal de contrôle $U(t)$ est filtré par la réponse à l'impulsion du système combiné $H_{HP} \mathbf{H}_M$, à savoir le haut-parleur et propagation acoustique. Le résultat de reconstruction du signal de contrôle via le système combiné est présenté dans la figure 5.23. Pour les deux canaux, le signal de différence reconstruit à l'extérieur du casque $\mathbf{e}_{rec}(t)$ est représenté en violet et le signal de différence (cible) $\mathbf{e}(t)$ représenté en noir.

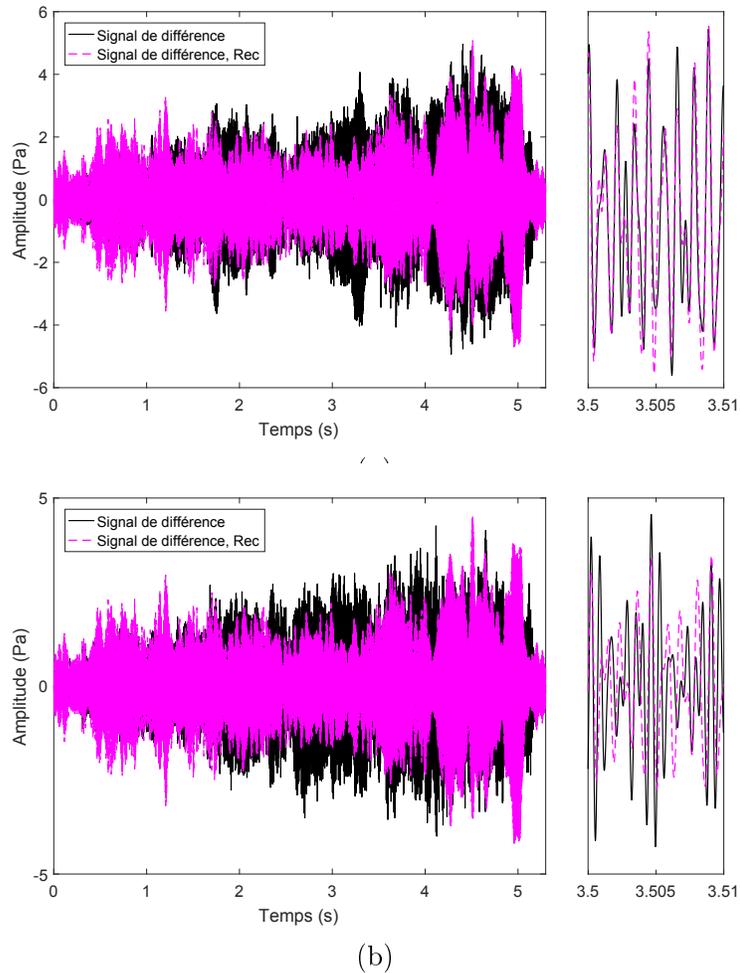


Figure 5.23 Reconstruction du signal de synthèse $\mathbf{e}_{rec}(t)$ et comparaison avec le signal cible $\mathbf{e}(t)$ à l'extérieur du casque pour le cas de signaux mesurés : (a) Canal gauche. (b) Canal droit. Les graphiques de droite présentent un zoom selon l'axe du temps.

Au vu de la partie (a) de la figure 5.23, le signal reconstruit approche précisément la phase du signal cible et se rapproche bien de son amplitude. La différence d'amplitude observée est due surtout au fait que le signal de différence mesuré (en noir) contient des composantes fréquentielles autres que celles visées dans cette étude. Donc, ces dernières ne sont pas régénérées dans le signal de synthèse. Pour la partie (b) de la figure 5.23, le rapprochement est moins évident. Cela est dû au fait que le signal à gauche est utilisé comme référence du filtre. Toutefois, de manière globale, la simulation montre que le dispositif reconstruit suffisamment bien le signal d'erreur désiré.

L'étape finale, consiste donc à évaluer le signal sonore amélioré $\mathbf{d}_{rec}(t)$ en le confrontant au signal sonore désiré $\mathbf{d}(t)$. Ainsi, le signal d'erreur reconstruit à l'extérieur du casque

$\mathbf{e}_{rec}(t)$ est ajouté au signal de référence $\mathbf{b}(t)$, mesuré sur VRM, pour constituer le signal acoustique amélioré $\mathbf{d}_{rec}(t)$.

La figure 5.24 montre le signal acoustique amélioré $\mathbf{d}_{rec}(t)$ et le signal désiré $\mathbf{d}(t)$. Le signal acoustique désiré est représenté en bleu et en rouge pour le canal gauche et droit, respectivement, et le signal amélioré est représenté en vert. En observant la figure 5.24, le signal acoustique amélioré approche bien le signal désiré dans le domaine temporel, pour les deux canaux.

Afin d'assurer que le dispositif apporte bien un gain sur les harmoniques étudiées, ce qui est difficile à distinguer dans les signaux temporels, on propose d'examiner les caractéristiques fréquentielles du signal sonore résultant. Alors, on effectue une analyse spectrale par estimation de la densité spectrale de puissance (DSP) du signal amélioré $\mathbf{d}_{rec}(t)$, du

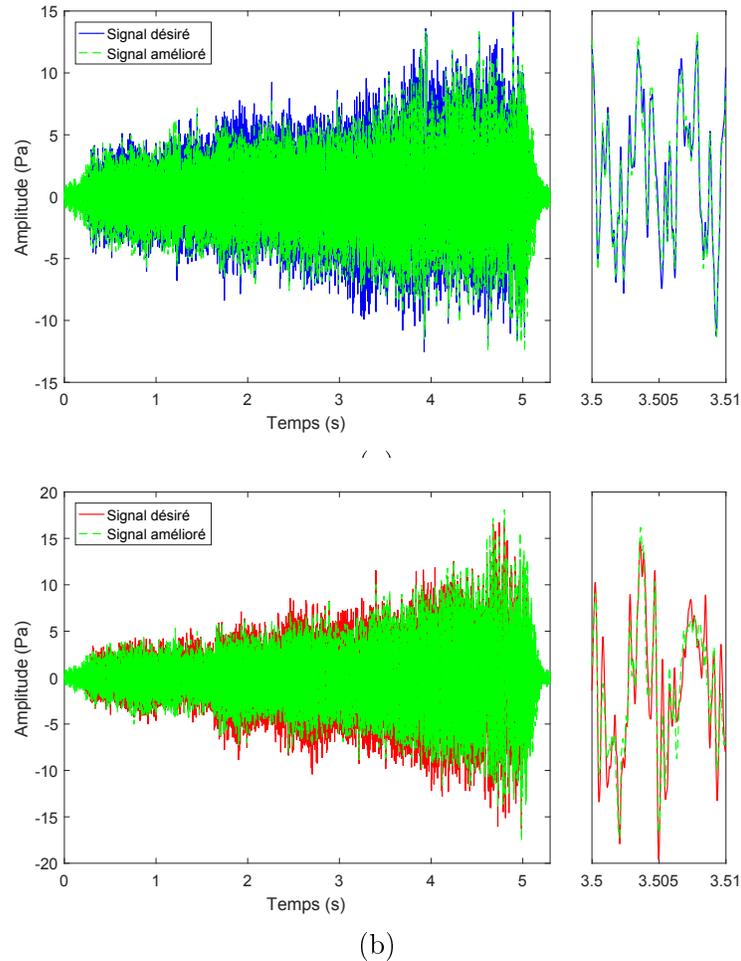


Figure 5.24 Reconstruction du signal optimisé $\mathbf{d}_{rec}(t)$ et comparaison au signal désiré $\mathbf{d}(t)$ pour le cas de signaux mesurés : (a) Canal gauche. (b) Canal droit. Les graphiques de droite présentent un zoom selon l'axe du temps.

signal désiré $\mathbf{d}(t)$ et du signal de référence $\mathbf{b}(t)$. La figure 5.25 présente, pour le canal gauche et droit, les densités spectrales de puissance estimées par la méthode de Welch du signal amélioré $\mathbf{d}_{rec}(t)$, du signal désiré $\mathbf{d}(t)$ et du signal de référence $\mathbf{b}(t)$.

La figure 5.25 permet de voir, dans le domaine fréquentiel, le niveau de gain (en dB ref 1 /Hz) du nouveau signal par rapport au signal de référence. D'après cette figure, la courbe DSP du signal sonore amélioré se rapproche de la courbe DSP du signal désiré, notamment pour le canal de gauche. Rappelons que le signal à gauche est celui qui a été choisi comme signal de référence du filtre de Wiener (sous-section 5.7.5).

Pour le canal de droite, dans la partie (b) de la figure 5.25, on peut observer vers les fréquences 980 Hz et 1410 Hz un gain supérieur à ce qui est désiré. Cela est essentiellement dû au compromis sur les amplitudes moyennes, à savoir la moyenne entre les amplitudes de gauche et ceux de droite. En conséquence, ce compromis se traduit par une baisse de gain dans le canal de gauche.

Ces résultats confirment que le dispositif virtuel d'amélioration de qualité sonore reconstruit bien les cinq harmoniques dans le domaine fréquentiel avec une bonne estimation du gain et permet donc d'augmenter la qualité sonore du signal original du VRM.

Finalement, malgré ces résultats montrés et évalués sous forme de figure, il n'est pas judicieux d'uniquement conclure sur cette base. Une écoute informelle permet de confirmer

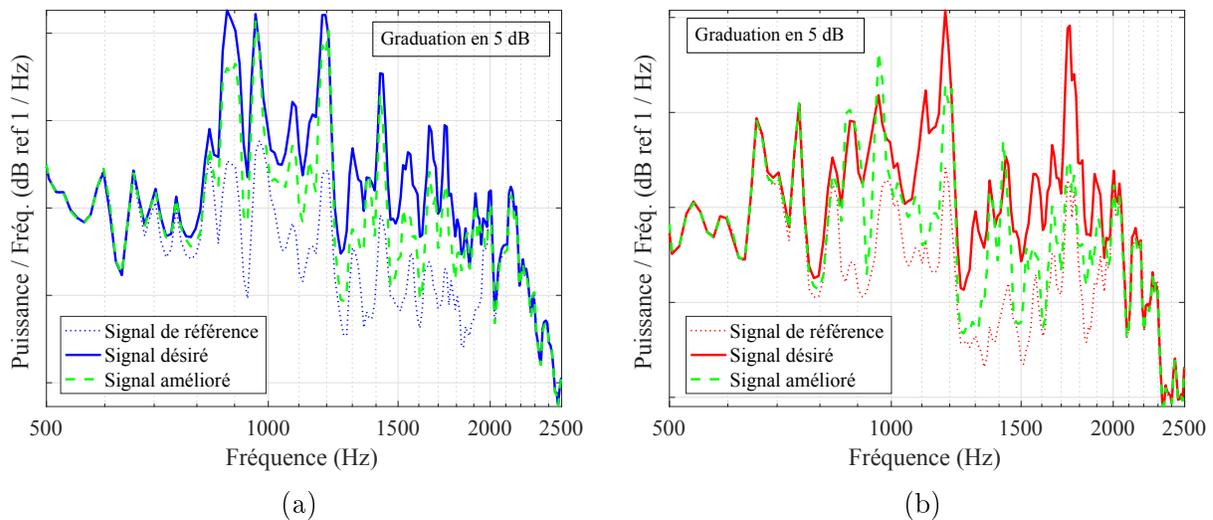


Figure 5.25 Estimation de la densité spectrale de puissance de Welch du signal amélioré $\mathbf{d}_{rec}(t)$, du signal désiré $\mathbf{d}(t)$ et du signal de référence $\mathbf{b}(t)$ pour le cas de signaux mesurés : (a) Canal gauche. (b) Canal droit.

ou d'infirmer les observations physiques décrites plus tôt. En effet, à l'écoute informelle¹, on peut distinguer une légère différence entre le son amélioré et le désiré, ce qui reste raisonnable dans ce cas. Par contre, on constate une nette amélioration en comparaison avec le son original du VRM, ce qui est expliqué par le travail du dispositif d'amélioration de la qualité sonore afin d'augmenter les cinq harmoniques hautes du moteur de 9.5 dB.

Conséquemment, cette validation permet de conclure que : 1) la méthode proposée d'amplification des harmoniques est prometteuse, 2) la méthode ne permet pas d'atteindre les valeurs exactes de gain souhaitées (+9.5 dB), 3) mais elle permet d'accroître sensiblement la qualité sonore perçue (sur la base d'une écoute informelle).

5.8 Limites du dispositif et recommandations

Malgré les résultats intéressants montrés dans ce chapitre, le prototype virtuel proposé semble avoir quelques insuffisances. Ainsi, l'objectif de cette section est de citer les limites notées lors de cette étude et de proposer quelques améliorations pour progresser dans le perfectionnement de ce prototype.

Le déphasage du signal de synthèse généré par le dispositif constitue le problème majeur. En effet, la génération du phaseur à partir du RPM moteur engendre un certain déphasage inconnu entre le signal de synthèse et le signal désiré. Dans le cas montré dans les simulations, le filtre optimal de Wiener a permis de corriger ce déphasage. Toutefois, le filtre optimal de Wiener est propre au régime d'accélération. Par exemple, le filtre généré pour notre cas réaliste (signaux mesurés) ne peut être appliqué pour une autre condition de fonctionnement avec autant de succès.

Pour remédier à cette limitation, la solution idéale serait de générer le signal phaseur à partir d'un tachomètre moteur (1 impulsion/tour) pour assurer la synchronisation de phase. Une autre solution est de réaliser un ensemble de filtres à fréquences variables pour capter la fréquence de chacune des harmoniques moteur concernées et appliquer directement ces filtres sur le signal du tachomètre. C'est une approche de synthèse dite soustractive (c.-à-d. par filtrage d'une forme d'onde riche en harmoniques).

Au final, une étude de faisabilité industrielle va certainement faire progresser le concept d'intégration d'un tel dispositif directement dans le véhicule récréatif motorisé ou dans un casque actif du VRM.

¹Par le Pr. Alain Berry, Pr. Philippe-Aubert Gauthier et moi même.

5.9 Conclusion

Le but principal de ce chapitre était de développer et d'évaluer un prototype virtuel de modification optimale du son d'un véhicule récréatif motorisé. Ainsi, pour l'aboutissement de cette étude, ce chapitre a présenté : 1) une introduction sur la méthode virtuelle d'amélioration et une revue des technologies existantes pour le design sonore, 2) le diagramme en bloc du système de modification sonore et la proposition de stratégie pour le design de la qualité sonore, 3) la mise en équation de la méthode et des équations de prédiction énergétique et 4) les étapes de conception, puis les résultats de simulation, une validation et une application pour un cas réaliste.

Dans un premier temps, l'étude a mené une modélisation du prototype virtuel par des systèmes acoustiques appropriés. Puis, à partir de la série d'équations définies en amont, l'étude a permis de conduire au signal de synthèse et au choix de la source adéquate au prototype.

Dans un deuxième temps, une simulation de ce prototype virtuel a été réalisée. D'abord, le dispositif virtuel a été expérimenté pour un cas fictif, cela a permis d'effectuer une première phase de validation de la méthode. Par la suite, la méthode a été appliquée pour un cas réaliste. Les résultats obtenus lors des simulations ont démontré que le prototype d'amélioration de qualité sonore reconstruit bien les harmoniques moteur avec une bonne estimation d'amplitude. Celui-ci a permis donc d'accroître la qualité sonore du signal original du nouveau véhicule récréatif motorisé.

CHAPITRE 6

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Ce mémoire a étudié et évalué la qualité sonore des véhicules récréatifs motorisés, puis a proposé un dispositif virtuel de modification optimal du son. La problématique est de comprendre le jugement subjectif des pilotes sur la perception du son d'un véhicule récréatif motorisé et rendre ce dernier plus agréable pour le conducteur afin d'ajouter un caractère sportif et plus d'amusement. Les objectifs étaient donc : 1) de comprendre les notions générales déployées dans le processus d'étude de qualité sonore des produits, 2) de fournir des méthodes propres à l'étude puis les appliquer pour évaluer la qualité des enregistrements sonores, 3) de concevoir un dispositif de modification virtuelle de son afin de proposer une amélioration de cette qualité.

La méthode était de conduire de tests d'écoutes et d'élaborer à partir des résultats de ces tests un modèle perceptif de l'accélération d'un véhicule récréatif motorisé. Le défi est de dériver un modèle prédictif parcimonieux, à savoir le besoin d'une sélection de prédicteurs parmi des données de grandes dimensions. L'algorithme de régression linéaire *Lasso/Elastic-net* est le plus approprié. Il est capable de limiter efficacement le nombre de métriques dans le modèle de prédiction.

Les suggestions de conception pour améliorer la qualité sonore globale du véhicule récréatif motorisé à l'étape d'accélération, donnée dans le modèle sonore réalisé avec l'algorithme de *Lasso*, sont de : 1) diminuer le contenu en fréquence correspondant aux environs d'une Bark A, 2) augmenter la pente (dans le temps) de la brillance du son, 3) augmenter le contenu en fréquence correspondant aux environs d'une Bark B, 4) augmenter la variation dans le temps de la brillance du son.

Également, il découle de nos travaux que les facteurs mécaniques prédominants pour améliorer la qualité sonore des véhicules récréatifs motorisés sont le vrombissement de basses fréquences à impact négatif et les harmoniques hautes fréquences du son du moteur à impact positif. Ainsi, une gamme de gains combinée pour les deux facteurs pourrait être appliquée pour accroître la qualité sonore perçue à l'étape d'accélération.

Finalement, le prototype d'amélioration de qualité sonore développé durant le projet reconstruit bien les harmoniques moteur et permet d'accroître efficacement la qualité sonore du signal original du véhicule récréatif.

Il est à noter que, malgré son application numérique réussie, le dispositif d'amélioration de qualité sonore doit être validé subjectivement. Cela passera par la réalisation du prototype et son implémentation sur le véhicule afin d'étudier l'impact sur la qualité sonore d'un tel dispositif de modification du son. Ainsi, les résultats obtenus lors des simulations doivent être validés par une écoute formelle (test d'écoute avec jury) pour confirmer l'apport en qualité sonore assuré par le dispositif.

ANNEXE A

Spécifications du haut-parleur

Cette annexe présente les caractéristiques du haut-parleur « PLS-65F25AL04-04 »¹, haut-parleur choisi pour la reproduction sonore dans le dispositif d'amélioration de qualité sonore indiqué au chapitre 5. C'est ces paramètres qui sont utilisés pour modéliser le haut-parleur dans la sous-section 5.5.6.

La figure A.1 présente une courte description du haut-parleur, les dimensions géométriques de ce haut-parleur, les spécifications et paramètres physiques et à la fin sa réponse en fréquence et son impédance électrique.

¹<https://www.parts-express.com/pedocs/specs/264-1183--tympahny-pls-65f25a104-spec-sheet.pdf>

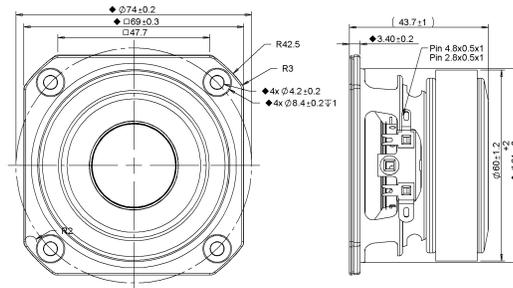
Full Range

This 2.5 inch 4 ohm member of the PLS family sets a high standard for compact full range drivers intended for applications such as television soundbars and compact music systems. Design features in this family include a stiff steel basket with venting under the spider to aid cooling of the motor, a ferrite magnet motor with copper cap to lower coil inductance, providing low distortion at low frequencies and extended high frequency response. A black anodized aluminium cone is employed, along with a black anodized aluminium dust cap coupled directly to the voice coil. Additionally, the cones come equipped with special-designed large roll rubber surrounds, which allow for a dynamic linear response at high excursion.



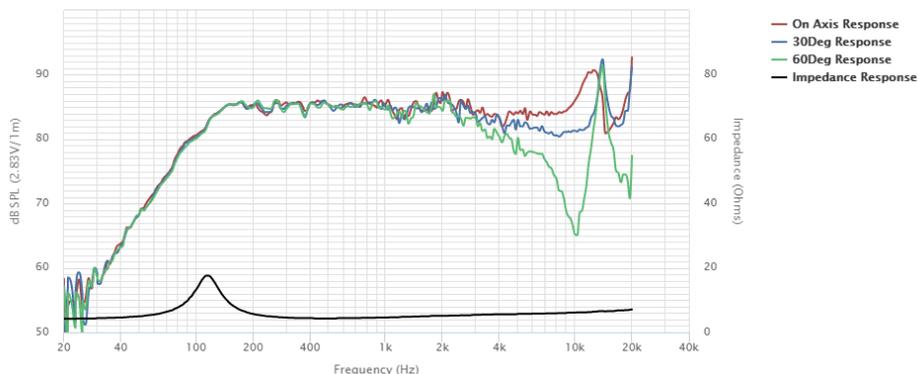
PLS-65F25AL04-04

MECHANICAL 2D DRAWING



SPECIFICATIONS								
DC Resistance	Revc	Ω	3.61	$\pm 5.0\%$	Moving Mass	Mms	g	2
Minimum Impedance	Zmin	Ω	4.33	$\pm 7.5\%$	Suspension Compliance	Cms	um/N	864
Voice Coil Inductance	Le	mH	0.03	-	Effective Cone Diameter	D	cm	5.2
Resonant Frequency	fs	Hz	120.6	15%	Effective Piston Area	Sd	cm ²	21.2
Mechanical Q Factor	Qms	-	4.14	-	Equivalent Volume	Vas	L	0.55
Electrical Q Factor	Qes	-	0.82	-	Motor Force Factor	BL	T+m	2.53
Total Q Factor	Qts	-	0.69	-	Motor Efficiency Factor	β	(T+m ²)/Q	1.8
Ratio	fs/Qts	-	176.05	-	Voice Coil Former Material	VCfm	-	ASV
Half Space Sensitivity	dB@2.83V/1m	dB	85.59	± 1.01	Voice Coil Inner Diameter	VCd	mm	25.73
Sensitivity	1W/1m	dB	82.9	± 1.01	Gap Height	Gh	mm	3
Rated Noise Power (IEC 268-5 18.1)	P	W	25	-	Maximum Linear Excursion	Xmax	mm	1.7
Test Spectrum Bandwidth		12 dB/Oct	100Hz-20KHz	-	Ferrofluid Type	FF	-	-
Energy Bandwidth Product	EBP	(1/Qes) * fs		-	Transducer Size			2.5 in
				-	Transducer Mass		Kg	0.34

FREQUENCY & IMPEDANCE RESPONSE



Highcharts.com

Figure A.1 Spécifications du haut-parleur « PLS-65F25AL04-04 »

ANNEXE B

Réponses à l'impulsion de propagation acoustique et du système acoustique combiné

Cette annexe présente les réponses à l'impulsion de : 1) la propagation acoustique défini à la sous-section 5.5.5 (la FRF est indiquée à la figure 5.8) et 2) du système acoustique combiné défini à la sous-section 5.5.7 (la FRF est indiquée dans la figure 5.11).

La partie (a) de la figure B.1 montre la réponse à l'impulsion du système acoustique \mathbf{H}_M (en $\text{Pa}/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$, débit vers pression acoustique). La partie (b) de la figure B.1 montre la réponse à l'impulsion du système acoustique inverse \mathbf{H}_M^+ (en $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}/\text{Pa}$, pression acoustique vers débit).

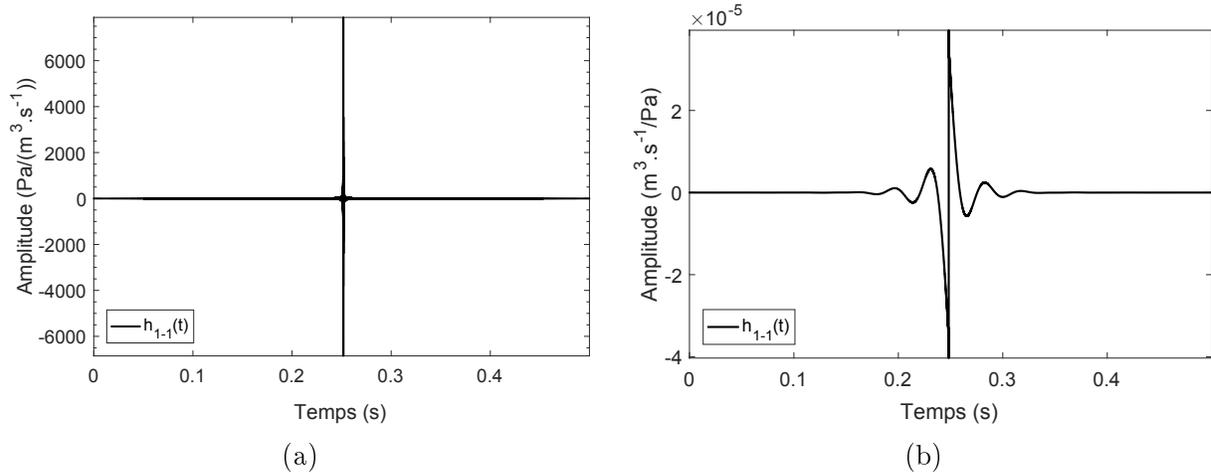


Figure B.1 Réponse à l'impulsion du système acoustique et système acoustique inverse, canal gauche : (a) Système acoustique \mathbf{H}_M . (b) Système acoustique inverse \mathbf{H}_M^+ .

La partie (a) de la figure B.2 montre la réponse à l'impulsion du système acoustique combiné $H_{HP}\mathbf{H}_M$ (en Pa/V , voltage vers pression acoustique). La partie (b) de la figure B.2 montre la réponse à l'impulsion de l'inverse du système combiné $(\mathbf{H}_M H_{HP})^+$ (en V/Pa , pression acoustique vers voltage).

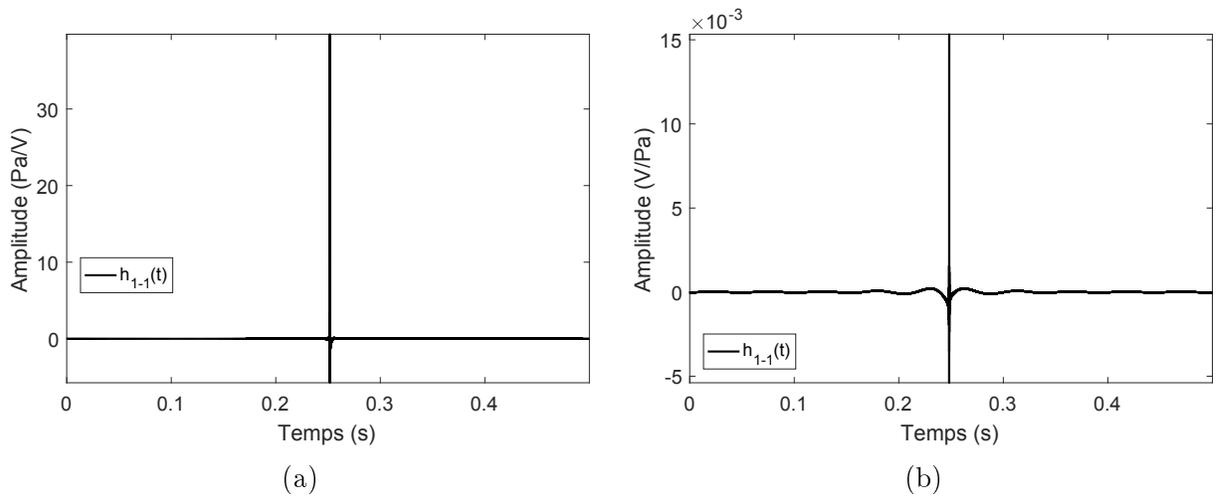


Figure B.2 Réponse à l'impulsion du système combiné et réponse à l'impulsion du système combiné inverse, canal gauche : (a) Réponse à l'impulsion du système combiné $H_{HP}\mathbf{H}_M$. (b) Réponse à l'impulsion du système combiné inverse $(\mathbf{H}_M H_{HP})^+$.

ANNEXE C

Signal d'entrée du dispositif

Cette annexe présente les signaux acoustiques d'entrée du dispositif d'amélioration de qualité sonore pour : 1) le cas de validation pour des signaux fictifs, qui est indiqué à la sous-section 5.6.1 et 2) le cas de validation pour des signaux mesurés, indiqués à la sous-section 5.7.1.

La figure C.1 montre les signaux acoustiques d'entrée du dispositif pour le cas de signaux fictifs (Gauche/Droite). Pour rappel, les signaux fictifs sont basés sur les harmoniques hautes du moteur (« HiFreq »). Les parties (a) et (b) de la figure C.1 présentent le signal acoustique de référence $\mathbf{b}(t)$, pour le canal gauche et droit respectivement. Les parties (c) et (d) représente le signal acoustique désiré $\mathbf{d}(t)$, pour le canal gauche et droit respectivement. Les parties (e) et (f) représentent le signal acoustique de différence $\mathbf{e}(t)$, pour le canal gauche et droit respectivement.

Dans la figure C.1, le signal désiré $\mathbf{d}(t)$ représente le double du signal de référence $\mathbf{b}(t)$ ce qui fait que le signal de différence $\mathbf{e}(t)$ doit être équivalent au signal de référence $\mathbf{d}(t)$.

La figure C.2 montre les signaux acoustiques d'entrée du dispositif pour le cas de signaux mesurés (Gauche/Droite). Les parties (a) et (b) de la figure C.2 présentent le signal acoustique de référence $\mathbf{b}(t)$, pour le canal gauche et droit respectivement. Les parties (c) et (d) représentent le signal acoustique désiré $\mathbf{d}(t)$, pour le canal gauche et droit respectivement. Les parties (e) et (f) représentent le signal acoustique de différence $\mathbf{e}(t)$, pour le canal gauche et droit respectivement.

Dans ce cas, pour des signaux mesurés, le signal de référence $\mathbf{b}(t)$ représente le signal original du véhicule récréatif motorisé (B), enregistré aux oreilles du pilote, tandis que le signal désiré $\mathbf{d}(t)$ représente le signal modifié virtuellement en augmentant de 9.5 dB les cinq harmoniques hautes du son moteur. Ainsi, le signal de différence $\mathbf{e}(t)$ doit correspondre aux harmoniques hautes du moteur avec une amplitude de 9.5 dB.

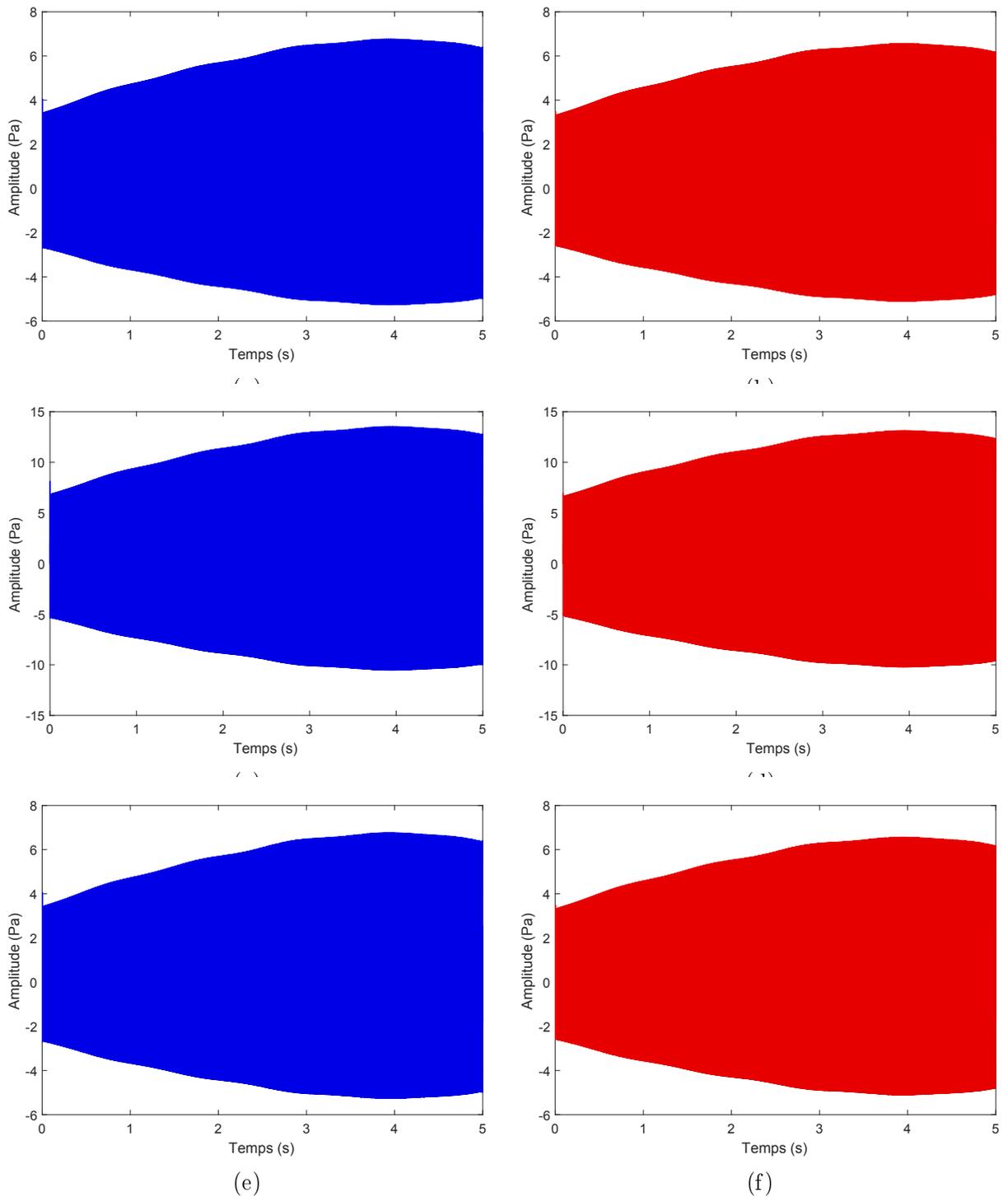


Figure C.1 Entrée du dispositif pour le cas de signaux fictifs, signaux basés sur les harmoniques hautes du moteur (Gauche)/(Droite) : (a)/(b) Signal de référence $\mathbf{b}(t)$. (c)/(d) Signal désiré $\mathbf{d}(t)$. (e)/(f) Signal de différence $\mathbf{e}(t)$.

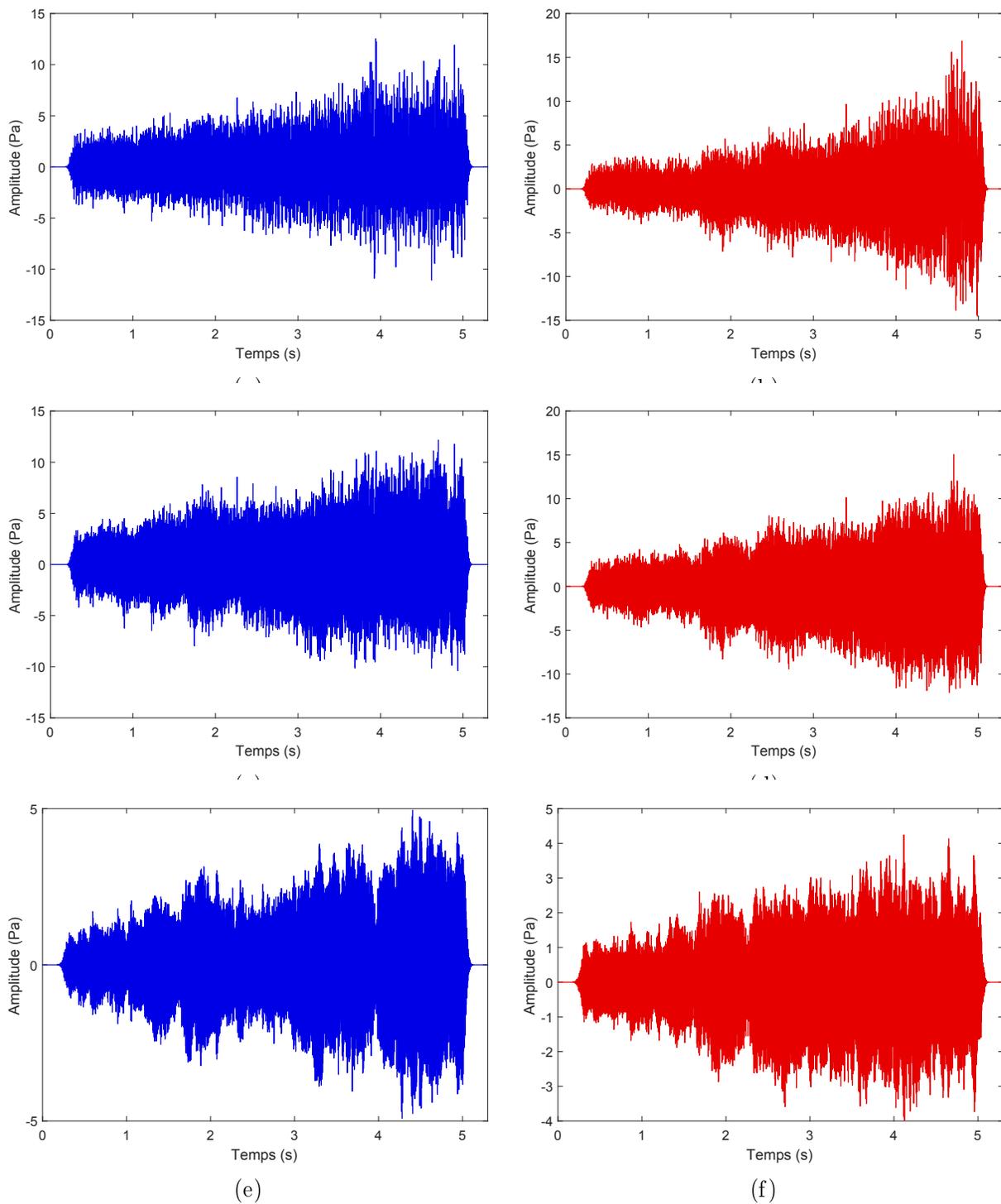


Figure C.2 Signaux d'entrée du dispositif pour le cas de signaux mesurés (Gauche)/(Droite) : (a)/(b) Signal de référence $\mathbf{b}(t)$. (c)/(d) Signal désiré $\mathbf{d}(t)$. (e)/(f) Signal de différence $\mathbf{e}(t)$.

LISTE DES RÉFÉRENCES

- [1] Acoustics Research Centre. School of Computing, Science & Engineering. University of Salford, M. (mai 2017). Sound quality - making products sound better. <http://www.salford.ac.uk/computing-science-engineering/research/acoustics/psychoacoustics/sound-quality-making-products-sound-better>.
- [2] Atalla, N., Berry, A., Panneton, R. et Desrochers, A. (2013). *dskibel : Modélisation et mesure du comportement acoustique de sources complexes : application à la discrétion acoustique d'une motoneige. Collaborative Research and Development Grants/Subventions de recherche et développement coopérative, NSERC/CRSNG.*
- [3] Baldan, S., Lachambre, H., Monache, S. D. et Boussard, P. (2015). Physically informed car engine sound synthesis for virtual and augmented environments. *2015 IEEE 2nd VR Work. Sonic Interact. Virtual Environ. SIVE 2015 - Proc.*, p. 11–26.
- [4] Belschner, T. et Bodden, M. (2014). Comprehensive Automotive Active Sound Design part 2 : Operational Sounds and Brand Sound. *INTER-NOISE 2014*, p. 1–4.
- [5] Bergeron, F. (2009). *Développement d'un critère synthèse de confort acoustique relatif au bruit de roulement dans une voiture particulière.* Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke, Sherbrooke (Québec), Canada, 33 p.
- [6] Blauert, J. et Jekosch, U. (1997). Sound quality evaluation - a multi layered problem. *Acta Acoustica*, volume 83, p. 747–753.
- [7] Bodden, M. et Belschner, T. (2014). Comprehensive Automotive Active Sound Design part 1 : electric and combustion vehicles. *INTER-NOISE 2014*, p. 1–6.
- [8] Bodden, M. et Belschner, T. (2016). Principles of Active Sound Design for electric vehicles. *INTER-NOISE*, p. 1693–1697.
- [9] Bowen, D. L. et Carow, J. P. (2001). Use of consumer listening panels to enhance sound quality. *Appliance Engineer*, p. 1–7.
- [10] Elliott, S. (2001). *Signal Processing for Active Control.* Signal Processing and its Applications, Academic Press, 544 p.
- [11] Fastl, H. E. Z. (2007). *Psychoacoustics : Facts and Models, volume 22*, 3^e édition. Berlin and Heidelberg : Springer, 462 p.
- [12] Gaussier, r. et Yvon, F. (2011). *Modèles statistiques pour l'accès à l'information textuelle.* Hermès/Lavoisier, 482 p.
- [13] Gauthier, P.-A., Scullion, W. et Berry, A. (2017). Sound quality prediction based on systematic metric selection and shrinkage : Comparison of stepwise, lasso, and elastic-net algorithms and clustering preprocessing. *Journal of Sound and Vibration*, volume 400, p. 134–153.

- [14] Goupy, J. et Creighton, L. (2006). *Introduction aux plans d'expériences*, 3^e édition. Dunod, 324 p.
- [15] Head, A. (2011). *Conducting Listening Tests. Application Note* (Rapport technique). HEAD acoustics, 17 p.
- [16] Hoerl, A. E. et Kennard, R. W. (1970). Ridge Regression : Biased Estimation for Nonorthogonal Problems. *Technometrics*, volume 12, numéro 1, p. 55–67.
- [17] Horvat, M., Domitrovi, H. et Jambrošić, K. (2012). Sound quality evaluation of hand-held power tools. *Acta Acustica united with Acustica*, volume 98, numéro 3, p. 487–504.
- [18] Jagla, J., Maillard, J. et Martin, N. (2012). Sample-based engine noise synthesis using an enhanced pitch-synchronous overlap-and-add method. *Journal of the Acoustical Society of America, Acoustical Society of America*, volume 132, numéro 5, p. 3098–3108.
- [19] Jekosch, U. (2004). Basic concepts and terms of quality, reconsidered in the context of product-sound. *Acta Acustica united with Acustica*, volume 90, p. 999–1006.
- [20] Jeon, J. Y., You, J. et Chang, H. Y. (2007). Sound radiation and sound quality characteristics of refrigerator noise in real living environments. *Applied Acoustics*, volume 68, p. 1118–1134.
- [21] Jouhaneau, J. et Rossi, M. (2000). *Notions élémentaires d'acoustique, électroacoustique : les microphones et les hauts-parleurs*, 2^e édition. Acoustique appliquée, Londres ; Paris ; New-York : Tec & doc, 634 p.
- [22] Kendall, M. G. (1955). Further contributions to the theory of paired comparisons. *Biometrics*, volume 11, numéro 1, p. 43–62.
- [23] Lartillot, O. (2014). *MIR toolbox 1.6.1. User's Manual*.
- [24] Leblanc, L., Gauthier, P.-A. et Berry, A. (2015). *dSkibel : Sound Quality (WP6). Fall of 2015 complete report* (Rapport technique). GAUS (Groupe d'Acoustique de l'Université de Sherbrooke, 78 p.
- [25] Lee, S.-K. (2008). Objective evaluation of interior sound quality in passenger cars during acceleration. *Journal of Sound and Vibration*, volume 310, p. 149–168.
- [26] Lemaitre, G., Susini, P., Winsberg, S., McAdams, S. et Letinturier, B. (2007). The sound quality of car horns : A psychoacoustical study of timbre. *Acta Acustica united with Acustica*, volume 93, p. 457–468.
- [27] Lemaitre, G., Susini, P., Winsberg, S., McAdams, S. et Letinturier, B. (2009). The Sound Quality of Car Horns : Designing New Representative Sounds. *Acta Acustica united with Acustica*, volume 95, p. 356–372.
- [28] Lyon et Richard, H. (2000). *Designing for Product Sound Quality*. CRC Press, 224 p.

- [29] Lyon, R. (2005). *Sound Quality Engineering, Consumer Products* (Rapport technique 42). RH Lyon Division, 8000 p.
- [30] Lyon, R. H. (2003). Product sound quality : From perception to design. *Sound and Vibration*, p. 18–22.
- [31] Lyon, R. H., Otto, N., Amman, S., Eaton, C. et Lake, S. (2003). An introduction to sound quality. *Sound and Vibration*, p. 6.
- [32] Mao, J., Hao, Z.-y., Jing, G.-x., Zheng, X. et Liu, C. (2013). Sound quality improvement for a four-cylinder diesel engine by the block structure optimization. *Applied Acoustics*, volume 74, p. 150–159.
- [33] McLachlan, G. J. et Peel, D. (2000). *Finite mixture models*. Wiley series in probability and statistics. Applied probability and statistics section, New York ; Toronto : Wiley, 419 p.
- [34] Montgomery, D. C. (2012). *Design and analysis of experiments*, 8^e édition. John Wiley & Sons, Inc., 724 p.
- [35] Nykänen, A. et Sirkka, A. (2009). Specification of component sound quality applied to automobile power windows. *Applied Acoustics*, volume 70, p. 813–820.
- [36] Otto, N., Amman, S., Eaton, C. et Lake, S. (2001). Guidelines for jury evaluations of automotive sounds. *Sound and Vibration*, p. 1–14.
- [37] Otto, N. C. et Wakefield, G. H. (1993). A subjective evaluation and analysis of automotive starter sounds. *Noise Control Engineering Journal*, volume 41, numéro 3, p. 377–382.
- [38] Parizet, E., Guyader, E. et Nosulenko, V. (2008). Analysis of car door closing sound quality. *Applied Acoustics*, volume 69, p. 12–22.
- [39] Park, D. C., Jo, E., Kim, J., Altena, K., Allman-ward, M. et Hwang, M. J. (2016). Virtual NVH development using Full Vehicle NVH Simulator. *INTER-NOISE*, p. 7429–7437.
- [40] Park, D. C., Jo, E. S., Hong, S. et Csakan, M. (2015). Development of Personalized Engine Sound System using Active Sound Design Technology. *SAE International Journal of Passenger Cars - Mechanical Systems*, volume 8, numéro 3, p. 862–867.
- [41] Rawlings, J. O., Pantula, S. G. et Dickey, D. a. (1998). *Applied Regression Analysis : A Research Tool*, 2^e édition. New York : Springer, 660 p.
- [42] Sato, S.-i., You, J. et Jeon, J. Y. (2007). Sound quality characteristics of refrigerator noise in real living environments with relation to psychoacoustical and autocorrelation function parameters. *Acoustical Society of America*, volume 122, numéro 1, p. 314–325.
- [43] Tan, G.-P., Wang, D.-F. et Li, Q. (2011). Vehicle Interior Sound Quality Prediction Based on Back Propagation Neural Network. *Procedia Environmental Sciences*, volume 11, p. 471–477.

- [44] Tibshirani, R. (1996). Regression Shrinkage and Selection via the Lasso. *Journal of the Royal Statistical Society*, volume 58, numéro 1, p. 267–288.
- [45] Västfjäll, D. (2004). Contextual influences on sound quality evaluation. *Acta Acustica united with Acustica*, volume 90, p. 1029–1036.
- [46] Vorländer, M. (2008). *Auralization. Fundamentals of Acoustics, Modelling, Simulation, Algorithms, and Acoustic Virtual Reality (RWTHedition)*, 1^{re} édition. Springer Berlin Heidelberg, 335 p.
- [47] Zou, H. et Hastie, T. (2005). Regularization and Variable Selection via the Elastic Net. *Journal of the Royal Statistical Society*, volume 67, numéro 2, p. 301–320.

