

THÈSE

Évaluation auditive de sons rayonnés par
une plaque vibrante à l'intérieur d'une
cavité amortie : ajustement des efforts
de calcul vibro-acoustique

présentée devant
L'INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES DE LYON
pour obtenir
LE GRADE DE DOCTEUR

Ecole doctorale : MÉCANIQUE, ÉNERGÉTIQUE, GÉNIE CIVIL ET ACOUSTIQUE
Ecole Centrale de Lyon - Université Claude Bernard-Lyon I - INSA Lyon
Spécialité : ACOUSTIQUE

par
Arnaud TROLLÉ

Soutenue le 17 Juillet 2009 devant la Commission d'Examen composée de :

Antoine CHAIGNE	Rapporteur
Reinhard WEBER	Rapporteur
Sabine MEUNIER	Membre du jury
Étienne PARIZET	Membre du jury
Nacer HAMZAOUI	Directeur de Thèse
Catherine MARQUIS-FAVRE	Directrice de Thèse
Pascale NEPLE	Invitée

*Cette thèse a été préparée au Département Génie Civil et Bâtiment (URA CNRS 1652) de
L'École Nationale des Travaux Publics de l'État et au Laboratoire Vibrations Acoustique de
l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon*

“ Le moyen le plus sûr de ne pas se tromper est de miner
certitude après certitude.”

Emil Cioran

Remerciements

Tout d’abord, je remercie mes directeurs de thèse, Catherine Marquis-Favre et Nacer Hamzaoui, pour la confiance et la liberté qu’il m’ont accordés dans la réalisation de ces travaux, pour le soutien qu’ils m’ont témoigné dans les moments difficiles et qui m’a amené à bon port. Je les remercie pour tous les précieux conseils qu’ils ont pus me donner pour m’aiguiller tout au long de ce sinueux parcours.

Je remercie ensuite Gérard Guarracino et Marc Fontoynont, successivement directeurs du Laboratoire des Sciences de l’Habitat, et Jean-Louis Guyader, directeur du Laboratoire Vibrations Acoustique, pour m’avoir accueilli au sein de leurs laboratoires respectifs.

Je suis très reconnaissant à Messieurs Antoine Chaigne et Reinhard Weber pour avoir accepté de relire et juger ces travaux. Je remercie également Monsieur Étienne Parizet, Madame Sabine Meunier et Madame Pascale Neple d’avoir accepté de participer au jury d’évaluation.

Un grand merci à toutes les personnes, étudiants de l’ENTPE et de l’INSA, membres du LASH et du LVA, et extérieurs, qui ont pu prendre un peu de leur temps (voire beaucoup pour certains d’entre eux ...) pour participer aux tests d’écoute, et sans qui les résultats présentés dans ces travaux n’auraient pas lieu d’être.

Je remercie vivement toutes les personnes qui m’ont prodigué leurs conseils avisés et/ou apporté leur participation active, contribuant ainsi pleinement à l’avancement de ces travaux. Je pense notamment à Luc et François-Xavier pour les nombreuses et diverses discussions scientifiques (et leur patience ...), les mesures réalisées au Tube de Kundt et leurs relectures occasionnelles, Étienne pour ses précieux conseils sur l’utilisation des outils psychométriques, Christophe pour ses séances “Probabilities for dummies”, Joachim pour son aide à la programmation sous *Labview*, Charles et Céline pour leur aide à l’utilisation de *Sysnoise* et *IDEAS*, Fred pour son aide tout au long de l’expérimentation sur le banc d’essai plaque-cavité, Quentin et Nicolas pour leur aide à l’utilisation du vibromètre laser, Vincent pour son aide à l’utilisation de la méthode d’évaluation “mixte”, et toutes les personnes contactées par mail ou “rencontrées” sur les forums internet qui ont pris le temps de répondre à mes nombreux et divers questionnements.

Merci à tous ceux que j’ai croisés au cours de ces années de thèse pour leur camaraderie. Je pense notamment à mes “compagnons” Nes, Amélie, CôtCôt, Fafa et Samy. Je n’oublie pas

Remerciements

non plus les Anciens Tit', Wannab', Disciple, Caribou, Grenouille, Camille, Pounci la Racaille, FX, Thorynx, Blanche-Neige, Bassam et Talal.

Je remercie également mes colocataires — de bureau et d'appartement — Laurent, Jérôme, Luc et Nathalie pour m'avoir supporté (et la musique à forts décibels...) durant ces années de thèse.

Un grand merci à Samy pour avoir relu ce manuscrit avec application et dans un court laps de temps.

Enfin, je remercie ma famille et mes amis pour leur soutien et leurs encouragements ; je pense entre autres à Seb', Arnaud, Sandra, Fra, Aurel', Sophie, Titi et Ber'.

Table des matières

Introduction	1
I Une revue des différentes composantes du problème	5
1 Le comportement vibro-acoustique d'une plaque couplée à une cavité amortie	7
1.1 Les principales avancées dans la compréhension des phénomènes régissant le couplage vibro-acoustique	8
1.2 Les effets de la variation de paramètres physiques sur le comportement vibro-acoustique du système plaque-cavité	11
1.3 Synthèse et perspectives	15
2 La perception auditive : les sensations et leur mesure	19
2.1 Les sensations liées à la perception auditive : quelques éléments de psychoacoustique	20
2.1.1 Perception de l'intensité sonore	20
2.1.1.1 Sonie d'un son pur	20
2.1.1.2 Sonie d'un son complexe	20
2.1.2 Perception de la hauteur	21
2.1.2.1 Hauteur tonale des sons purs	21
2.1.2.2 Hauteur tonale des sons complexes	21
2.1.3 Les métriques psychoacoustiques	22
2.1.3.1 La sonie et l'acuité de sons stationnaires	22
2.1.3.2 Le centre de gravité spectral	23
2.1.3.3 La hauteur fondamentale	24
2.1.3.4 La rugosité et la force de fluctuation	24
2.2 La mesure des sensations liées à la perception auditive : quelques éléments de psychométrie	25
2.2.1 Les dispositifs d'observation	25
2.2.1.1 Le dispositif de présentation	26
2.2.1.2 Le dispositif de réponse	26

2.2.1.3	Exemples de dispositifs d'observation	27
2.2.2	Les modèles de choix probabilistes	29
2.2.2.1	Généralités sur les modèles RUM	29
2.2.2.2	La loi du jugement comparatif	30
2.2.2.3	Le modèle de Bradley-Terry	31
2.2.2.4	Construction d'une échelle de préférence	32
2.2.3	Les modèles d'échelonnement multidimensionnel	34
2.2.3.1	Modèles d'échelonnement de données de type dissimilarité	34
2.2.3.1.a	Le modèle de base	35
2.2.3.1.b	Les modèles prenant en compte les différences individuelles	35
2.2.3.2	Un exemple de modèle d'échelonnement de données de type score	37
2.3	Conclusions	38
3	La perception de sons rayonnés par des structures vibrantes	39
3.1	Influence de la variation de paramètres physiques sur la perception auditive	40
3.1.1	Cas d'une simple plaque	40
3.1.1.1	Sons non-stationnaires	40
3.1.1.2	Sons stationnaires	42
3.1.1.3	Synthèse	45
3.1.2	Cas d'une plaque couplée à une cavité	45
3.2	Ajustement des paramètres de simulation aux besoins de la synthèse sonore et de l'évaluation auditive	47
3.2.1	Cas d'une simple plaque	47
3.2.2	Cas d'une plaque couplée à une cavité	48
3.3	Conclusions	49
II	Élaboration d'un corpus de sons réels via l'expérimentation	53
4	La mise en œuvre de l'expérimentation	55
4.1	Définition du dispositif expérimental	56
4.1.1	Les caractéristiques du système plaque-cavité	56
4.1.2	Choix de la position de l'excitation mécanique	56
4.2	Élaboration des configurations structurales	59
4.2.1	Définition des paramètres structuraux variables et de leurs modalités	59
4.2.2	Usage des plans d'expériences factoriels fractionnaires	60
4.3	Campagne de mesures expérimentales	61
4.3.1	Vue d'ensemble	61

4.3.2	Protocoles de mesure	62
4.3.2.1	Mesures vibratoires	62
4.3.2.2	Mesures acoustiques	62
4.3.3	Formation des stimuli sonores pour l'évaluation auditive	63
4.3.4	Analyse des effets de la variation des paramètres structuraux sur la réponse vibro-acoustique du système plaque-cavité	65
4.3.4.1	Remarques préliminaires	65
4.3.4.1.a	Indicateurs vibro-acoustiques	65
4.3.4.1.b	Analyse modale	66
4.3.4.2	Effets de la variation des propriétés en absorption de la cavité sur la réponse vibro-acoustique du système plaque-cavité	67
4.3.4.3	Effets de la variation de l'épaisseur de la plaque sur la réponse vibro-acoustique du système plaque-cavité	70
4.3.4.4	Effets de la variation des conditions de serrage de la plaque sur la réponse vibro-acoustique du système plaque-cavité	72
4.4	Conclusions	74
5	Évaluation des effets de la dispersion de la mesure acoustique sur la perception auditive	75
5.1	Mise en œuvre du test d'écoute	77
5.1.1	Sujets	77
5.1.2	Stimuli	77
5.1.3	Protocole de test	77
5.1.3.1	Dispositif expérimental	77
5.1.3.2	Choix du stimulus de référence	79
5.2	Appréciation des effets de la dispersion de la mesure sur la perception auditive par l'analyse de variance (ANOVA)	82
5.2.1	Élaboration d'un schéma d'analyse adapté à notre cas d'étude	82
5.2.1.1	Les points importants	82
5.2.1.1.a	La prise en compte des différences inter-sujets : incursion d'un facteur sujets (S) et fusion des trois facteurs α , β , γ en un facteur unique p_s	82
5.2.1.1.b	La nature des facteurs S , p_s et D	84
5.2.1.1.c	La nature des relations entre les facteurs S , p_s et D	84
5.2.1.2	Formulation du schéma d'analyse	85
5.2.1.2.a	Analyse globale	85
5.2.1.2.b	Analyse des effets simples de la dispersion de la mesure	88
5.2.1.2.c	Interprétation des résultats des tests d'hypothèse	90
5.2.2	Résultats des analyses	91

5.2.2.1	Analyse globale	91
5.2.2.2	Analyse des effets simples de la dispersion de la mesure	92
5.3	Conclusions	92

III Ajustement de paramètres fréquentiels des sons en vue d’une étude de la qualité sonore du système plaque-cavité à partir de simulations vibro-acoustiques **95**

6 Établissement de tendances qualitatives originales relatives à l’influence de la variation de paramètres structuraux d’un système plaque-cavité **97**

6.1	Mise en œuvre du test d’écoute	99
6.1.1	Sujets	99
6.1.2	Stimuli	99
6.1.3	Protocole de test	99
6.1.3.1	Évaluation de la dissimilarité	99
6.1.3.2	Évaluation de la préférence	100
6.1.3.3	Dispositif expérimental	100
6.1.4	Traitement et analyse des données	101
6.1.4.1	Analyse en clusters des sujets	101
6.1.4.1.a	Calcul des dissemblances entre sujets	103
6.1.4.1.b	Construction du dendrogramme	104
6.1.4.1.c	Détermination du nombre optimal de classes	105
6.1.4.2	Analyse des données de dissimilarité	105
6.1.4.2.a	Choix du modèle E.M.D. et évaluation du niveau réel de la mesure	105
6.1.4.2.b	Détermination de la dimensionnalité de l’espace perceptif	106
6.1.4.2.c	Détermination des attributs auditifs saillants	107
6.1.4.2.d	Construction des ellipsoïdes de confiance par la méthode du Bootstrap	107
6.1.4.3	Analyse des jugements de préférence	108
6.1.4.3.a	Analyse multidimensionnelle de la préférence par MD-PREF	108
6.1.4.3.b	Analyse unidimensionnelle de la préférence par un modèle de choix probabiliste	111
6.2	Résultats relatifs à l’établissement des tendances qualitatives originales	113
6.2.1	Analyse en clusters des sujets	113
6.2.2	Établissement des tendances qualitatives originales	116
6.2.2.1	Espace perceptif de dissimilarité	116

6.2.2.2	Espace perceptif de préférence	117
6.2.2.3	Valeurs de mérite	119
6.3	Synthèse et commentaires	121
7	Ajustement de la fréquence de coupure des sons	125
7.1	Démarche méthodologique	127
7.1.1	Vue d'ensemble	127
7.1.2	Filtrage passe-bas des sons réels originaux	128
7.1.2.1	Synthèse d'un filtre passe-bas adapté	128
7.1.2.2	Calcul des sons filtrés par convolution	129
7.1.3	Appréciation de l'adéquation entre les tendances qualitatives	132
7.1.3.1	Définition de priorités dans la préservation des tendances qualitatives	132
7.1.3.2	Formulation de critères de "bonne adéquation" entre les tendances qualitatives relatives aux valeurs de mérite	133
7.2	Résultats du processus d'ajustement	133
7.2.1	Détermination d'une fréquence de coupure ajustée f_{max}^*	133
7.2.2	Confrontation étendue des tendances qualitatives originales et approximées	135
7.2.2.1	Espace perceptif de dissimilarité	135
7.2.2.2	Espace perceptif de préférence	137
7.2.2.3	Valeurs de mérite	139
7.3	Comment expliquer l'ajustement de f_{max} à 2500 Hz ?	141
7.3.1	Lien entre f_{max}^* et la conservation de caractéristiques globales des sons originaux ?	141
7.3.1.1	D'un point de vue perceptif	142
7.3.1.1.a	Avant-propos : comment influe le filtrage passe-bas sur l'évaluation de la préférence ?	142
7.3.1.1.b	Lien entre f_{max}^* et la conservation des écarts relatifs entre les sonies des stimuli ?	142
7.3.1.2	D'un point de vue physique	145
7.3.2	Lien entre f_{max}^* et des caractéristiques fréquentielles des sons originaux ?	147
7.3.2.1	D'un point de vue perceptif	147
7.3.2.2	D'un point de vue physique	149
7.3.2.2.a	Avant-propos : quelle(s) caractéristique(s) fréquentielle(s) du comportement vibro-acoustique du système ?	149
7.3.2.2.b	Lien entre f_{max}^* et la plus haute fréquence limite de champ diffus d'un sous-système ?	149
7.4	Conclusions	153

8	Ajustement du pas fréquentiel des sons	155
8.1	Démarche méthodologique	156
8.1.1	Vue d'ensemble	156
8.1.2	Procédé de formation des stimuli filtrés modifiés	158
8.2	Définition d'un panel de valeurs de Δf à tester	161
8.2.1	Méthode du stimulus constant pour la détermination du Point d'Égalité Subjective (P.E.S.)	161
8.2.1.1	Principe de la méthode	161
8.2.1.2	Sujets	162
8.2.1.3	Stimuli	162
8.2.1.4	Dispositif expérimental	162
8.2.2	Résultats des expériences de discrimination	162
8.2.3	Définition du panel	164
8.3	Appréciation des approximations dues à l'usage des différents pas fréquentsiels via l'évaluation auditive d'un corpus partiel de stimuli "représentatifs"	164
8.3.1	Mise en œuvre du test d'écoute	164
8.3.1.1	Sujets	164
8.3.1.2	Stimuli	164
8.3.1.3	Protocole de test, traitement et analyse de données	165
8.3.2	Résultats du test d'écoute	165
8.3.2.1	Confrontation des tendances qualitatives relatives aux valeurs de mérite	165
8.3.2.1.a	Classements de préférence	166
8.3.2.1.b	Qualités d'ajustement du modèle de préférence	167
8.3.2.2	Synthèse	167
8.4	Appréciation des approximations dues à l'usage d'un pas fréquentiel $\Delta f_p = 4 \text{ Hz}$ via l'évaluation auditive du corpus complet de stimuli	168
8.4.1	Mise en œuvre du test d'écoute	168
8.4.1.1	Sujets	168
8.4.1.2	Stimuli	168
8.4.1.3	Protocole de test, traitement et analyse des données	168
8.4.2	Résultats du test d'écoute	168
8.4.2.1	Espace perceptif de dissimilarité	169
8.4.2.2	Espace perceptif de préférence	170
8.4.2.3	Valeurs de mérite	172
8.5	Conclusions	173

Conclusion générale	177
Bibliographie	181
Références personnelles	191

Table des figures

1.1	Configuration classique d'une plaque bafflée homogène couplée à une cavité parallélépipédique.	8
2.1	Schéma illustratif d'un espace de représentation fourni par MDPREF. Soit le cas d'un espace 2D dans lequel sont représentés trois stimuli A, B et C et trois sujets 1, 2 et 3. Dans cet exemple, les projections respectives des points A, B et C sur les vecteurs 1, 2 et 3 reproduisent les scores de préférence donnés par les 3 sujets aux 3 stimuli.	38
3.1	Les différentes échelles possibles de traitement de la problématique d'ajustement d'un paramètre de simulation aux contraintes perceptives (les échelles sont matérialisées par les contours tracés à main levée).	51
3.1	Les différentes échelles possibles de traitement de la problématique d'ajustement d'un paramètre de simulation aux contraintes perceptives (les échelles sont matérialisées par les contours tracés à main levée). (<i>suite et fin</i>)	52
4.1	Le système plaque-cavité expérimental. S : position de l'excitation mécanique, M_1 et M_2 : position des microphones.	56
4.2	Vue d'ensemble sur le banc de mesure.	57
4.3	Influence de la position de la force ponctuelle (x_{excit}, y_{excit}) sur le nombre de modes de plaque excités sur le domaine $[0, 2000]$ Hz et la puissance acoustique rayonnée par la plaque (étude réalisée sous le logiciel ADNR © Mecanum Inc.). o : position choisie de la force ponctuelle.	58
4.4	Spectres de puissance acoustique rayonnée calculés sous ADNR © Mecanum Inc. pour 3 positions représentatives de l'excitation mécanique. — : position excentrée $(x_{excit}, y_{excit}) = (0.05, 0.05)$, - - : position choisie $(x_{excit}, y_{excit}) = (0.10, 0.075)$, — - : position quasi-centrale $(x_{excit}, y_{excit}) = (0.25, 0.20)$	59

4.5	Spectres de niveau de pression mesurés au point M_2 pour les modalités extrémales des propriétés en absorption de la cavité (et pour une épaisseur de plaque de 3 mm de fortes conditions de serrage de la plaque). — : pas de couche de matériau absorbant (stimulus I_1), — - : une couche de mousse réticulée (stimulus K_1).	69
4.6	Spectres de niveau de vitesse quadratique moyenne de la plaque mesurés pour les valeurs extrémales d'épaisseur de la plaque (et pour de fortes conditions de serrage de la plaque). — : épaisseur 1.5 mm (configuration C), — - : épaisseur 3 mm (configuration I).	70
4.7	Spectres de niveau de pression mesurés au point M_2 pour les valeurs extrémales d'épaisseur de la plaque (et pour de fortes conditions de serrage de la plaque et de fortes propriétés en absorption de la cavité). — : épaisseur 1.5 mm (stimulus C_1), — - : épaisseur 3 mm (stimulus K_1).	71
4.8	Spectres de niveau de vitesse quadratique moyenne de la plaque mesurés pour les modalités extrémales des conditions de serrage de la plaque, pour une épaisseur de plaque égale à 2 mm. — : $C = 20$ N.m (configuration D), — - : $C = 80$ N.m (configuration F).	72
4.9	Spectres de niveau de pression mesurés au point M_2 pour de moyennes et fortes conditions de serrage de la plaque, pour une épaisseur de plaque égale à 3 mm. — : $C = 50$ N.m (stimulus H_1), — - : $C = 80$ N.m (stimulus K_1).	73
5.1	Instructions données aux auditeurs au début du test.	78
5.2	Interface de présentation et de réponse "mixte" développée par Koehl [Koe05].	79
5.3	Espace perceptif de dissimilarité 2D dressé pour les stimuli A_1 à K_1 . - - : alternatives possibles pour le choix du stimulus de référence.	80
5.4	Distances entre chaque stimulus de référence pressenti et les autres stimuli, recalculées à partir des coordonnées dans l'espace perceptif de dissimilarité.	81
5.5	Scores de dissimilarité moyens, dans leur intervalle de confiance à 95%, obtenus par les stimuli A_1 à I_1 et A_2 à I_2	83
5.6	Schéma des inter-relations entre les 3 facteurs S , p_s et D , tiré de la référence [Dag06].	85
6.1	Interface de présentation et de réponse développée par Faure [Fau03].	100
6.2	Instructions données au début de chaque session de test.	101
6.3	Exemple de diagramme des valeurs propres exprimées en fonction du numéro du facteur principal associé.	109
6.4	Résultats de la Classification Ascendante Hiérarchique appliquée sur la matrice de dissemblances \mathbf{D}_2	114
6.5	Résultats de la Classification Ascendante Hiérarchique appliquée sur la matrice de dissemblances \mathbf{D}_3	114

6.6	Bilan des différences inter-individuelles à partir de l'espace perceptif de préférence 5D (plan factoriel 1-2) dressé via MDPREF sur la base des réponses de tous les sujets. \circ : extrémités des vecteurs sujets, \bullet : extrémité du vecteur sujet "moyen".	115
6.7	Espace perceptif de dissimilarité 2D des stimuli, dans leur ellipse de confiance à 95%. Les combinaisons des modalités des paramètres structuraux associées aux stimuli sont rappelées dans le tableau de droite, reproduction du tableau 4.2.	116
6.8	Plan factoriel 1-2 de l'espace perceptif de préférence. \square : stimuli, \circ : extrémités des vecteurs sujets, \bullet : extrémité du vecteur sujet "moyen", \rightarrow : vecteurs métriques.	118
6.9	Valeurs de mérite des stimuli. En gris : préférence mesurée, I : intervalle de confiance à 95%, En rouge : modèle de préférence.	120
6.10	Schéma récapitulatif des différentes opérations de traitement des réponses au test d'écoute.	123
7.1	Vue d'ensemble sur la démarche méthodologique adoptée. Cadre en traits pleins : établissement des tendances qualitatives originales (réalisé au chapitre 6). Cadre en traits pointillés : boucle itérative du processus d'ajustement.	127
7.2	Paramètres requis pour la synthèse de filtres FIR passe-bas par l'intermédiaire de l'algorithme de Parks-McClellan sous Matlab © Mathworks.	129
7.3	Fonction de transfert H_{pb} du filtre FIR passe-bas synthétisé pour $f_{max} = 2500$ Hz.	130
7.4	Réponse impulsionnelle $h_{pb}(t)$ du filtre FIR passe-bas synthétisé pour $f_{max} = 2500$ Hz. A droite, zoom sur l'intervalle de temps $[0.2350, 0.2374]$ s.	131
7.5	Filtrage passe-bas à 2500 Hz de la voie gauche du stimulus A_1	132
7.6	Espace perceptif de dissimilarité 2D des stimuli, dans leur ellipse de confiance à 95%. En traits pleins : configuration approximée obtenue pour un filtrage passe-bas à f_{max}^* , en traits pointillés : configuration originale. La numérotation des dimensions est celle correspondant à la configuration originale.	136
7.7	Plan factoriel 1-2 de l'espace perceptif de préférence. \square : stimuli filtrés passe-bas à f_{max}^* , \circ : extrémités des vecteurs sujets approximés, \bullet : extrémité du vecteur sujet "moyen" approximé, \rightarrow : vecteurs métriques approximés, \star : stimuli originaux, \triangle : extrémités des vecteurs sujets délimitant le faisceau original de vecteurs sujets, \blacktriangle : extrémité du vecteur sujet "moyen" original, $--\rightarrow$: vecteurs métriques originaux.	138
7.8	Comparaison des valeurs de mérite mesurées obtenues par les stimuli originaux et filtrés passe-bas à f_{max}^* . En gris : valeurs de mérite mesurées approximées, en rouge : valeurs de mérite mesurées originales, I : intervalle de confiance à 95%.	140

7.9	Comparaison des valeurs de mérite prédites obtenues par les stimuli originaux et filtrés passe-bas à f_{max}^* . En gris : valeurs de mérite prédites approximées, en rouge : valeurs de mérite prédites originales.	141
7.10	Courbes d'évolution de la valeur centrée-réduite z_N de la sonie en fonction de la fréquence de coupure f_{cp} du pattern de sonie, pour les différents stimuli. En bleu : configurations structurales du groupe de tête ; en noir : configurations structurales du groupe intermédiaire ; en rouge : configurations structurales du groupe de queue. Dans le tableau au-dessous du graphique, reproduction du tableau 6.1, est rappelée la composition de ces trois groupes de configurations structurales, dressés à partir du classement de préférence original des stimuli selon leur valeur de mérite.	143
7.11	Courbes d'évolution des niveaux de pression acoustique globaux L_{p1G} et L_{p2G} en fonction de la fréquence de coupure f_{cp} des spectres de niveau de pression acoustique $L_{p1}(f)$ et $L_{p2}(f)$. — : L_{p1G} , - - : L_{p2G}	146
7.12	Diagrammes <i>Frequency Tracks</i> calculés pour différents stimuli originaux.	148
7.13	Facteur de perte par amortissement moyen d'un mode de cavité situé dans les différentes bandes (de fréquences centrales f_{cent}) [Ryu02].	151
7.14	Courbes d'évolution de s_m^c et Δf_{-3dB}^c en fonction de la bande de fréquences. -○- : s_m^c , -□- : Δf_{-3dB}^c	151
8.1	Vue d'ensemble sur la démarche méthodologique adoptée.	156
8.2	Mise en parallèle des étapes sous-jacentes à (a) la synthèse d'un bruit rose artificiel à partir de spectres d'amplitude de la pression acoustique calculés sous simulations aux deux points de réception M_1 et M_2 jusqu'à une fréquence maximale f_{max}^* et avec un pas fréquentiel Δf , et à (b) la formation d'un stimulus filtré modifié.*De l'anglais <i>Symmetric addition of complex conjugates</i> [HGS ⁺ 99].	160
8.3	Expériences de discrimination : interface de présentation et de réponse, développée par Faure [Fau03].	163
8.4	Valeurs de P.E.S. pour les différents stimuli.	163
8.5	Confrontation des valeurs de mérite mesurées des stimuli filtrés modifiés aux valeurs de mérite mesurées des stimuli originaux, pour les différentes valeurs Δf_i ($i = 1$ à 4) du pas fréquentiel. En gris : valeurs de mérite mesurées des stimuli filtrés modifiés, en rouge : valeurs de mérite mesurées des stimuli originaux, I : intervalle de confiance à 95%.	166
8.6	Espace perceptif de dissimilarité 2D des stimuli, dans leur ellipse de confiance à 95%. En traits pleins : configuration approximée obtenue pour les stimuli filtrés modifiés, en traits pointillés : configuration originale.	169

8.7 Plan factoriel 1-2 de l'espace perceptif de préférence. □ : stimuli filtrés modifiés, ○ : extrémités des vecteurs sujets approximatés, ● : extrémité du vecteur sujet "moyen" approximaté, → : vecteurs métriques approximatés, ☆ : stimuli originaux, △ : extrémités des vecteurs sujets délimitant le faisceau de vecteurs sujets originaux, ▲ : extrémité du vecteur sujet "moyen" original, --→ : vecteurs métriques originaux. 171

8.8 Confrontation des valeurs de mérite mesurées des stimuli filtrés modifiés aux valeurs de mérite mesurées des stimuli originaux. En gris : valeurs de mérite mesurées des stimuli filtrés modifiés, en rouge : valeurs de mérite mesurées des stimuli originaux, I : intervalle de confiance à 95%. 172

8.9 Confrontation des valeurs de mérite prédites des stimuli filtrés modifiés aux valeurs de mérite prédites des stimuli originaux. En gris : valeurs de mérite prédites des stimuli filtrés modifiés, en rouge : valeurs de mérite prédites des stimuli originaux. 173

Liste des tableaux

1.1	Récapitulatif des paramètres physiques importants et des effets associés.	17
4.1	Définition des modalités des paramètres structuraux	60
4.2	Plan d'expériences.	61
4.3	Récapitulatif des différentes mesures réalisées.	62
4.4	Désignation des stimuli associés aux configurations.	64
5.1	Tableau de données pour l'analyse globale.	86
5.2	Tableaux de données pour l'analyse des effets simples de la dispersion de la mesure.	89
5.3	Tableau résumé. ddl : nombre de degrés de liberté, SCE : somme des carrés des écarts, CM : carrés moyens, F : statistique-test, p : seuil de signification observé, ω^2 : indicateur de la grandeur de l'effet expérimental.	91
5.4	Résultats de la procédure ANOVA réalisée isolément pour chaque configuration structurale.	92
6.1	Groupes de configurations structurales érigés à partir du classement de préférence.	120
7.1	Comparaison entre le classement de préférence original et les classements de préférence approximatifs établis pour les différentes valeurs de f_{max} testées : 5000 Hz, 2500 Hz et 1500 Hz.	134
7.2	Comparaison de la qualité d'ajustement (exprimée en termes de proportion de variance expliquée, i.e. r^2) du modèle de préférence original et des modèles de préférence approximatifs construits pour les différentes valeurs de f_{max} testées.	135
7.3	Valeurs de f_{lim}^p pour la plaque d'épaisseur 3 mm.	153
8.1	Qualité d'ajustement (exprimée en termes de proportion de variance expliquée, i.e. r^2) des modèles de préférence basés sur la sonie de Zwicker, construits pour les différentes valeurs Δf_i étudiées.	167

Introduction

Contexte et problématiques générales

Dans divers secteurs industriels (automobile, électro-ménager, etc.), un nombre croissant de manufacturiers visent à améliorer la qualité sonore de leur produit, et planifient dans leur cahier des charges une étude qualitative des sons émis par leur produit dès le stade de sa conception. Au sens large, la qualité sonore d'un produit est un descripteur de l'adéquation du son qu'il émet avec diverses exigences pré-établies [BJ97] (fonctions qu'il doit remplir, attentes de l'utilisateur, image de la marque, ...). Au stade de la conception, la problématique consiste généralement à déterminer un design structural du produit qui permette d'améliorer sa qualité sonore. Dans une approche psychoacoustique de la perception auditive¹, les investigations recourent typiquement à des évaluations auditives basées sur des méthodes psychométriques pour mesurer la qualité sonore de plusieurs modèles du produit différant structurellement. Dans cette approche, la qualité sonore est définie comme un attribut global, quantitativement relié à des paramètres acoustiques ou psychoacoustiques dûment sélectionnés. L'adoption d'une telle démarche s'est montrée efficace pour améliorer le confort acoustique d'un produit (e.g. [Wid97]).

En se calquant sur cette démarche, des travaux académiques se sont intéressés à évaluer l'influence de la variation de paramètres physiques de divers systèmes vibro-acoustiques simples sur la perception des sons qu'ils génèrent. Au rang des systèmes étudiés, figurent notamment la barre, la plaque simplement bafflée, et la plaque couplée à une cavité parallélépipédique. Leur comportement vibro-acoustique étant bien connu et maîtrisé, les auteurs ont pu — en couplant vibro-acoustique et psychoacoustique — examiner précisément les relations entre des paramètres physiques des systèmes et les attributs auditifs des sons générés. De nombreux paramètres physiques ont été étudiés, parmi lesquels des paramètres structuraux et des paramètres d'excitation. La plupart des travaux ont typiquement investigué l'influence des attributs auditifs sur la qualité perçue des sons générés, appréhendée en termes de préférence ou d'agrément. Leurs résultats se sont avérés particulièrement utiles afin de dresser des recommandations à même d'améliorer la qualité sonore des systèmes vibro-acoustiques dès l'étape

¹On pourra se référer à [LSWM07] pour un état de l'art sur les différentes approches de la perception auditive.

de leur conception, alors que ces systèmes constituent les éléments de base des structures que l'on retrouve dans les domaines des transports et du bâtiment.

Par ailleurs, à l'étape de la conception, la priorité est fréquemment donnée — pour des raisons de flexibilité et de coût — aux simulations vibro-acoustiques pour mener l'étude paramétrique sur le système physique. Aussi, une nouvelle problématique se pose lorsque l'on souhaite conduire une étude de qualité sonore à partir de sons synthétisés : comment définir les paramètres de simulation en conséquence ? Les exigences peuvent varier suivant l'approche de la qualité sonore qui est adoptée, avec toutefois une contrainte pratique invariante : le caractère raisonnable des efforts de calcul vibro-acoustique engendrés (ressources informatiques et temps de calcul). Notamment, dans une approche écologique, la définition des paramètres de simulation doit être opérée de telle sorte que le réalisme des sons synthétisés et le caractère raisonnable des efforts de calcul vibro-acoustique soient assurés. Dans une autre approche, on peut procéder à une définition des paramètres de simulation avec comme principale préoccupation — et c'est bien là le minimum requis — d'établir à partir de l'évaluation de sons synthétisés des recommandations relatives au design structural du système fidèles à celles qui seraient établies à partir de l'évaluation de sons réels.

Cadre et objectifs de ces travaux

En continuité avec de précédentes études académiques couplant vibro-acoustique et psychoacoustique, ces travaux traitent de l'influence de la variation de paramètres structuraux sur la perception de sons rayonnés par une plaque vibrante à l'intérieur d'une cavité amortie. En se basant sur un tel système physique, l'objectif à terme consiste à établir des tendances de recommandation pouvant être adaptées à différentes structures vibrantes de notre environnement composées d'éléments couplés à des espaces clos. Nous verrons dans l'état de l'art que l'attention ne s'est portée que récemment sur le système plaque-cavité ; les travaux académiques concernant le système plaque-cavité sont encore relativement peu nombreux. Ainsi, ce travail vise à apporter une contribution supplémentaire à l'amélioration de la qualité sonore d'un tel système vibro-acoustique. Notamment, il est question d'évaluer les effets de la variation simultanée de trois paramètres structuraux — les propriétés en absorption de la cavité, l'épaisseur et les conditions de serrage de la plaque — sur la perception auditive des sons rayonnés à l'intérieur de la cavité.

En outre, pour le cas d'étude d'une plaque vibrante couplée à une cavité amortie, ces travaux se concentrent plus particulièrement sur la problématique d'ajustement des efforts de calcul vibro-acoustique vis-à-vis d'une étude de qualité sonore recourant à l'utilisation de sons synthétisés.

Pour traiter cette problématique, nous proposons d'opérer une définition de paramètres de simulation qui permette d'établir, à partir de l'évaluation auditive de sons synthétisés, des

tendances qualitatives similaires à celles qui seraient établies à partir d'une évaluation auditive de sons réels. Nous considérons une source mécanique stationnaire avec un spectre large bande de type bruit rose ; ce spectre se rapproche de celui de sources de bruit environnementales. Dans le cas d'excitations stationnaires, la réponse vibro-acoustique d'un système est communément calculée dans le domaine fréquentiel ; à cet effet, l'usage de méthodes numériques d'éléments finis (FEM) ou d'éléments de frontière (BEM) est courant. Dans le cadre d'utilisation de méthodes de calcul fréquentiel, les efforts de calcul vibro-acoustique apparaissent comme intimement liés aux valeurs prises par deux paramètres de calcul importants : tout d'abord la fréquence maximale de calcul, puis le pas fréquentiel de calcul. Ce lien — bien connu des vibro-acousticiens — a été mis en relief au travers d'une étude menée en préalable aux présents travaux (Cf. annexe A) ; cette étude traitait de la modélisation du comportement vibro-acoustique d'un système plaque-cavité et visait à l'optimisation et la comparaison d'outils de calcul vibro-acoustique. D'un point de vue perceptif, la définition de la fréquence maximale détermine l'étendue du contenu fréquentiel des sons synthétisés ; la définition du pas fréquentiel influe sur leur enveloppe spectrale. Une définition hasardeuse de ces paramètres est donc susceptible d'entraîner à terme des divergences entre les tendances qualitatives dressées à partir de l'évaluation auditive respectivement de sons synthétisés et de sons réels.

Notre objectif est donc de déterminer des valeurs appropriées pour ces deux paramètres qui permettent — outre une réduction importante des efforts de calcul vibro-acoustique — d'éviter l'écueil mentionné ci-dessus. Dans le cadre de l'approche proposée, une première étape consiste à établir des tendances qualitatives de référence, dressées à partir de l'évaluation auditive de sons réels. Pour former le corpus de sons réels, une expérimentation sur un banc d'essai plaque-cavité est menée ; dans la pratique, les sons réels correspondent au son rayonné par la plaque vibrante à l'intérieur de la cavité, enregistré dans différentes configurations structurales du système expérimental. L'évaluation auditive, fondée sur la méthode de comparaison par paires, demande à prononcer des jugements de dissimilarité et de préférence. Il sera ainsi possible d'extraire des informations sur la manière dont les variations structurales influencent la perception auditive et sur les configurations structurales préférées par les auditeurs.

Puis, pour procéder à l'ajustement des deux paramètres fréquents étudiés, on se propose de travailler à partir des sons réels, plutôt qu'à partir de sons synthétisés, et ce afin de s'affranchir d'autres approximations telles que celles liées à la modélisation du système. Pour chaque paramètre fréquentiel, un procédé est proposé pour modifier les sons réels de façon à retranscrire l'effet lié à sa définition lors de simulations vibro-acoustiques. De ce fait, il sera possible *a priori* d'apprécier les approximations engendrées sur les tendances qualitatives dues uniquement à la définition de ces paramètres lors de simulations.

Organisation du document

Le présent document est organisé en trois parties.

La première partie, composée de trois chapitres, propose une revue bibliographique des différentes composantes du problème. Le premier chapitre est consacré à un état de l'art des différents travaux relatifs au comportement vibro-acoustique d'une plaque couplée à une cavité amortie ; il est notamment question de décrire les phénomènes qui régissent le couplage vibro-acoustique entre la plaque et la cavité. Le second chapitre introduit des éléments quant aux sensations liées à la perception auditive et à leur mesure. Le dernier chapitre — qui dresse un pont entre les deux premiers chapitres — présente un état de l'art des différents travaux académiques relatifs à la perception de sons rayonnés par des structures vibrantes.

La seconde partie, composée de deux chapitres, concerne l'élaboration du corpus de sons réels via l'expérimentation sur le banc de mesure plaque-cavité. Le premier chapitre détaille la phase de mise en œuvre de l'expérimentation. Le second chapitre propose une évaluation des effets de la dispersion de la mesure acoustique sur la perception auditive.

La troisième partie, composée de trois chapitres, est consacrée à l'ajustement des paramètres fréquentiels en vue d'une étude de la qualité sonore du système plaque-cavité à partir de simulations vibro-acoustiques. Le premier chapitre présente l'établissement — à partir de l'évaluation auditive des sons réels — des tendances qualitatives originales relatives à l'influence de la variation des paramètres structuraux du système plaque-cavité étudié. Les second et dernier chapitres détaillent l'ajustement des deux paramètres fréquentiels étudiés, respectivement la fréquence maximale de calcul et le pas fréquentiel de calcul.

Le lecteur pourra trouver dans le document joint les annexes auxquelles il est fait référence dans le présent document. Les annexes (et tous leurs éléments constitutifs) sont référencées par une lettre majuscule.

Première partie

Une revue des différentes composantes
du problème

Chapitre 1

Le comportement vibro-acoustique d'une plaque couplée à une cavité amortie

Dans l'étude d'une structure couplée à un espace clos, la configuration souvent abordée est une plaque bafflée homogène couplée à une cavité parallélépipédique (Cf. figure 1.1); la cavité peut comporter éventuellement des matériaux absorbants apposés sur ses parois rigides (i.e. cavité "amortie"). La problématique consiste en général à évaluer les effets de la cavité sur i) les vibrations de la plaque, ii) la transmission du son à travers la plaque.

Dans ce qui suit, nous exposerons différentes approches adoptées pour étudier le comportement vibro-acoustique d'un tel système. Certaines études se concentrent sur la compréhension des phénomènes régissant le couplage entre la plaque et la cavité (Cf. section 1.1). D'autres plus récentes, complémentaires, s'intéressent à l'influence de la variation de paramètres physiques de la plaque et de la cavité sur le comportement du système couplé (Cf. section 1.2) : nous essaierons d'en dégager les points importants, utiles pour la suite de nos travaux (Cf. section 1.3).

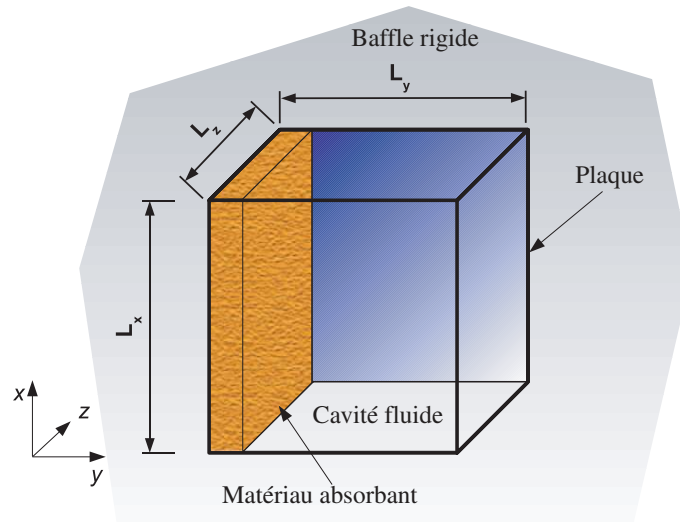


FIG. 1.1 – Configuration classique d'une plaque bafflée homogène couplée à une cavité parallélépipédique.

1.1 Les principales avancées dans la compréhension des phénomènes régissant le couplage vibro-acoustique

Parmi les premiers travaux, on peut citer ceux de Dowell et Voss [DV63] et de Lyon [Lyo63]. Pour la résolution du problème d'interaction fluide-structure, Dowell et Voss ont utilisé une approche modale tandis que Lyon a utilisé une méthode énergétique de type S.E.A. Dowell et Voss ont mis en évidence que, pour des panneaux (plaques) courants et des cavités assez profondes, le couplage intervient surtout en dessous de la première fréquence propre non nulle de la cavité ; seul le premier mode du panneau est véritablement modifié par la présence de la cavité dont l'effet s'apparente à un effet de raideur. Cet effet de raideur est dû au mode rigide de la cavité¹ $(q, r, s) = (0, 0, 0)$.

Par la suite, certains travaux [Pre65, Pre66, BC69, GB73, DGS77, Guy79] ont permis d'améliorer la compréhension des phénomènes ainsi que la précision des modèles.

En particulier, Pretlove [Pre65, Pre66] a utilisé une approche (semi-analytique) basée sur la décomposition du champ de déplacement de la structure et de pression dans la cavité respectivement sur la base des modes propres de la structure *in vacuo*² et de la cavité rigide³. L'approche adoptée par l'auteur conduit à un système d'équations modales de structure dans lequel le couplage modal avec la cavité est représenté par une matrice de raideur acoustique. Les termes diagonaux, appelés *raideurs acoustiques directes*⁴, quantifient le couplage entre un mode de plaque et un mode de cavité ; les termes non-diagonaux, appelés *raideurs acoustiques*

¹Les indices q , r et s sont respectivement associés aux axes x , y et z (Cf. figure 1.1).

²i.e. découplée de la cavité.

³i.e. la cavité avec 6 parois rigides.

⁴Si le terme est négatif, la cavité agit alors comme une masse virtuelle plutôt qu'une raideur.

1.1. Les principales avancées dans la compréhension des phénomènes régissant le couplage vibro-acoustique

transversales, traduisent le couplage entre deux modes de plaque par l'intermédiaire des modes de cavité [Pre65]. Le problème aux valeurs propres est ensuite résolu à l'aide d'une méthode itérative. L'auteur distingue deux configurations pour lesquelles l'importance du couplage entre la plaque et la cavité diffère. Pour une cavité profonde couplée à une plaque flexible⁵, les termes non-diagonaux de la matrice de raideur acoustique sont négligeables par rapport aux termes diagonaux. Seul le premier mode de plaque est légèrement affecté par l'effet de la raideur acoustique directe (sa fréquence propre est augmentée de 3% environ) ; les fréquences propres des autres modes de plaque sont très proches de leurs valeurs *in vacuo*. Si, de plus, la raideur acoustique directe est négligeable par rapport à la raideur mécanique de la plaque, alors on peut considérer que les vibrations du panneau ne sont pas affectées par la cavité. Dans ce cas, le champ acoustique dans la cavité peut être calculé directement à partir des vibrations *in vacuo* du panneau. Au contraire, pour une cavité peu profonde couplée à un panneau très flexible⁶, l'effet de la cavité sur la réponse vibratoire du panneau est très important. Les termes non diagonaux de la matrice de raideur acoustique ne sont plus négligeables par rapport aux termes diagonaux. Le premier mode de plaque est très affecté par la présence de la cavité (sa fréquence propre est augmentée de plus de 900%). Plusieurs modes d'ordre supérieur le sont également ; ces modes sont ceux qui "déplacent" le volume de la cavité (*volume-displacing modes* en anglais [Pre65]), ce sont des modes symétriques (i.e. impair-impair).

Les études menées par Bhattacharya et Crocker [BC69], Guy [Guy79] et Guy et Bhattacharya [GB73] ont utilisé une approche basée sur une combinaison de transformées en cosinus et sinus sur les variables d'espace et d'une transformée de Laplace sur la variable temps. Ces auteurs obtiennent ainsi une solution purement analytique de l'équation d'onde avec des conditions aux limites non homogènes, valable pour une excitation acoustique stationnaire ou transitoire. Bhattacharya et Crocker [BC69], Guy et Bhattacharya [GB73] ont traité en détail le problème de transmission du son à travers la plaque couplée à la cavité. Le comportement en transmission est gouverné principalement par trois facteurs : i) l'impédance acoustique d'un mode individuel de cavité, ii) l'impédance mécanique d'un mode individuel de plaque, et iii) le coefficient de couplage qui est donné par l'intégrale sur la surface d'interaction du produit des déformées modales non-couplées des deux sous-systèmes. Plusieurs phénomènes sont ainsi mis en évidence sur le spectre d'indice d'affaiblissement de la plaque. Une forte résonance, qui se traduit sur le spectre par des valeurs négatives de l'indice d'affaiblissement (i.e. la pression acoustique à l'intérieur de la cavité est supérieure à la pression extérieure), se produit lorsque les impédances d'un mode de plaque et d'un mode de cavité sont égales en amplitude mais opposées en signe. Le phénomène est particulièrement visible pour les couples

⁵L'auteur considère le cas d'une plaque en aluminium d'épaisseur 1.6 mm. Cette plaque est couplée à une cavité de profondeur z telle que le rapport de z à la plus grande dimension de la plaque est égal à $\frac{1}{2}$.

⁶L'auteur considère toujours le cas d'une plaque en aluminium, mais d'épaisseur 0.5 mm. Cette plaque est couplée à une cavité de profondeur z telle que le rapport de z à la plus grande dimension de la plaque est inférieur à $\frac{1}{8}$.

de modes composés des modes de cavité d'indices q et r égaux à 0 et du mode de plaque⁷ $(m, n) = (1, 1)$. Bhattacharya et Crocker [BC69] spécifient d'autre part le phénomène de coïncidence pour une plaque couplée à une cavité comme suit. La coïncidence intervient lorsque les conditions suivantes sont réunies : i) l'impédance du mode de plaque est nulle, ii) l'impédance du mode de cavité tend vers l'infini, iii) le coefficient de couplage est maximal. A la fréquence de coïncidence, les pressions intérieures et extérieures à la cavité sont sensiblement égales et le déplacement de la plaque tend vers 0 ; la cavité agit comme un absorbeur des vibrations de la plaque. Guy et Bhattacharya [GB73] ont validé le modèle théorique par une mesure expérimentale des fréquences propres de la plaque et de son indice d'affaiblissement.

Dowell *et al.* [DGS77] ont proposé une approche modale, améliorée, pour résoudre le problème de couplage plaque-cavité⁸. Le champ de déplacement de la structure et le champ de pression dans la cavité sont respectivement décomposés sur la base des modes propres de la structure *in vacuo* et de la cavité rigide. L'équation d'onde est transformée en un système d'équations généralisées pour le domaine fluide en appliquant le théorème de Green et en utilisant les propriétés d'orthogonalité des modes propres de la cavité rigide. Le système d'équations généralisées structurales est classiquement obtenu à partir de l'équation de mouvement de la structure en utilisant les propriétés d'orthogonalité des modes *in vacuo* de la structure. Le couplage modal entre la plaque et la cavité est traduit par l'intermédiaire des coefficients de couplage (définis dans le paragraphe précédent [BC69, GB73]), figurant dans le second membre des équations généralisées. L'auteur propose des modèles simplifiés pratiques qui précisent le comportement du système à certaines fréquences caractéristiques (fréquence de résonance de la cavité et/ou fréquence de résonance de la structure).

Plus récemment, Pan et Bies [PB90a, PB90b], par une approche modale, ont mené une investigation théorique et expérimentale sur le comportement transitoire et stationnaire d'un système plaque appuyée - cavité. Ils ont notamment étudié l'effet du couplage fluide-structure sur les temps de réverbération de la cavité⁹. Les auteurs expliquent le phénomène de couplage modal comme suit. Un mode du système plaque-cavité couplé résulte de la combinaison entre des modes de la cavité rigide et des modes de la plaque *in vacuo*. On parle néanmoins de mode contrôlé par la cavité et de mode contrôlé par la plaque : dans le premier cas, la plus grande part de l'énergie du mode couplé est principalement emmagasinée dans la cavité sous forme d'énergie potentielle ; dans le second cas, la plus grande part de l'énergie du mode couplé est principalement emmagasinée dans la plaque sous forme d'énergie cinétique. La coïncidence ou la non-coïncidence spatiale des modes des deux sous-structures découplées au niveau de la surface d'interaction — quantifiée par le coefficient de couplage — détermine le transfert énergétique potentiel entre les modes. Lorsque le coefficient de couplage est non nul, l'écart

⁷Les indices m et n sont respectivement associés aux axes x et y (Cf. figure 1.1).

⁸Cette approche est traitée en détail au travers de la section A.3.1.

⁹Les temps de réverbération caractérisent le comportement transitoire du système.

1.2. Les effets de la variation de paramètres physiques sur le comportement vibro-acoustique du système plaque-cavité

entre les fréquences de résonance de ces modes détermine ensuite le taux effectif de transfert énergétique. Aussi, un mode de structure aura tendance à modifier la fréquence de résonance du mode de cavité avec lequel il interagit, comme un mode de cavité aura tendance à modifier la fréquence de résonance du mode de plaque avec lequel il interagit ; cette modification sera d'autant plus importante que le facteur de transfert énergétique entre les deux modes sera fort (condition de fort couplage).

Enfin, de nombreux travaux ont eu recours à des méthodes numériques (FEM, BEM) pour modéliser le comportement en basses et moyennes fréquences du système plaque - cavité couplé. La plupart se rapportent à des domaines d'application industriels (automobile, aéronautique). Tous ces travaux ont contribué à une amélioration de la précision des modèles numériques et à une meilleure compréhension du comportement vibro-acoustique des habitacles par exemple. Parmi ces travaux, on peut citer ceux de Craggs [Cra71], Unruh [Unr80] et Nefske *et al.* [NWH82], qui utilisent un modèle d'éléments finis à la fois pour la structure et la cavité. On peut également citer ceux de Sestieri *et al.* [SDVL84] et Suzuki *et al.* [SMI89], qui s'appuient sur une méthode d'éléments de frontière pour prédire le champ de pression dans la cavité. Les modèles développés dans les études les plus récentes permettent de prendre en compte des conditions aux limites plus complexes, et plus particulièrement la présence de matériaux absorbants sur les parois (pour exemple, Cf. [SMI89]).

1.2 Les effets de la variation de paramètres physiques sur le comportement vibro-acoustique du système plaque-cavité

Certaines études [Che89, CL89a, CL89b, NS81a, NS81b, PB90b], basées sur une méthode modale (avec tri des modes), ont étudié plus précisément l'influence de la variation de paramètres de la plaque et de la cavité sur le comportement du système couplé.

Narayanan et Shanbag [NS81a, NS81b] se sont intéressés au problème de transmission du son à travers un panneau sandwich couplé à une cavité et ont notamment mené une étude paramétrique sur les caractéristiques du matériau viscoélastique constituant l'âme du panneau. Les auteurs ont montré que l'amélioration des capacités amortissantes du matériau (augmentation du facteur de perte β de 0.1 à 1) permet de réduire significativement le bruit transmis dans la cavité aux premières fréquences de résonance du panneau. L'augmentation de l'amortissement de la cavité est quant à elle bénéfique aux fréquences de résonance de la cavité, où l'amortissement du panneau n'a pas d'effet. D'autre part, le comportement en transmission du système est affecté en très basses fréquences par les conditions aux limites du panneau ; la variation de la raideur en translation sur deux bords du panneau (initialement simplement appuyés) influe tout particulièrement sur la réduction du bruit dans ce domaine de fréquences. Enfin, les auteurs soulignent qu'un choix judicieux du paramètre géométrique caractéristique du panneau sandwich, qui correspond au rapport entre l'épaisseur de l'âme et

du parement, et du facteur de cisaillement du matériau viscoélastique permet également de réduire le bruit dans la cavité.

Pan et Bies [PB90b] se sont intéressés à l'effet de la variation de l'épaisseur de la plaque sur le comportement vibro-acoustique du système couplé. Cette variation agit à la fois sur la densité modale de la plaque et la position de ses fréquences de résonance. Par conséquent, la fréquence critique de la plaque est également modifiée, ce qui entraîne une modification de la puissance rayonnée [Les88]. Le nombre moyen de modes de plaque présents dans le voisinage d'un mode résonant de cavité détermine la nature générale du phénomène de couplage tandis que la position de ses fréquences propres détermine les détails du phénomène de couplage. Ainsi, quand la densité modale est faible, seuls quelques modes de plaque sont susceptibles de se trouver dans le voisinage d'un mode résonant de cavité. Le transfert énergétique du mode de cavité vers la plaque est généralement dominé par un seul mode de plaque. Aussi, si ce mode ne satisfait pas la condition de fort couplage (définie dans la section 1.1), le couplage entre le mode de cavité et la plaque sera très faible. Quand la densité modale augmente, un nombre plus important de modes de plaque participe au couplage avec le mode de cavité considéré ; le transfert énergétique du mode de cavité vers la plaque est ainsi réparti sur plusieurs modes de plaque d'importance équivalente.

Cheng et Lesueur se sont intéressés dans un premier temps [CL89a] à l'influence des modèles d'amortissement des deux sous-systèmes, plaque et cavité, sur la réponse vibro-acoustique du système couplé. Le système est excité par un champ acoustique extérieur aléatoire. Pour résoudre le problème d'interaction fluide-structure, les auteurs ont utilisé une approche modale similaire à celle développée par Dowell *et al.* [DGS77] ; toutefois, la réaction du fluide sur la structure est négligée (i.e. hypothèse de fluide léger). Deux modèles d'amortissement sont étudiés : le modèle structural et le modèle visqueux. Pour rappel, en régime sinusoïdal, l'énergie dissipée par cycle est i) proportionnelle à la fréquence, pour le modèle visqueux, et ii) indépendante de la fréquence, pour le modèle structural. Dans cette étude, ces deux modèles globaux sont adoptés pour représenter i) les effets de dissipation intrinsèques du fluide et aux parois (phénomène de couche limite) pour la cavité, et ii) les effets d'amortissement intrinsèques du matériau et aux limites, pour la plaque. Les différents indicateurs vibro-acoustiques calculés sont le niveau de pression quadratique moyenne $\langle L_p \rangle$, le facteur de rayonnement σ , la puissance rayonnée W_{ray} et l'énergie cinétique de la plaque E_p . Les auteurs ont examiné tout d'abord l'influence du modèle d'amortissement de la cavité¹⁰. Ils ont notamment constaté que :

- i) Le spectre de $\langle L_p \rangle$ — où apparaissent toutes les résonances de cavité et de structure — n'est pas influencé par le modèle d'amortissement de la cavité.
- ii) Le spectre de σ — où n'apparaissent que les résonances de cavité — est influencé par

¹⁰Pour cet examen, le modèle d'amortissement utilisé pour la plaque est un modèle visqueux.

le modèle en-deçà de la première fréquence de résonance de la cavité, compte tenu du mode acoustique $(0, 0, 0)$ de fréquence nulle : dans le cas de l'amortissement structural, le mode $(0, 0, 0)$ intervient (i.e. dissipation non nulle), σ est réduit par rapport au cas de l'amortissement visqueux.

Aucune modification notable due au modèle d'amortissement, structural ou visqueux, de la plaque n'a été constatée sur les différents indicateurs vibro-acoustiques¹¹.

Ensuite, en optant pour un modèle d'amortissement structural pour la cavité et visqueux pour la plaque, les auteurs ont étudié l'influence de la variation du facteur de perte par amortissement structural η_A de la cavité sur les différents indicateurs vibro-acoustiques. Deux valeurs extrêmes de η_A sont étudiées : $\eta_A = 0.02$ et $\eta_A = 0.1$. Notamment, les auteurs ont pu observer que :

- i) Globalement, l'augmentation de η_A provoque une diminution de $\langle L_p \rangle$.
- ii) η_A ne joue un rôle significatif sur $\langle L_p \rangle$ qu'au niveau des fréquences de résonance de la cavité. En hautes fréquences, où la densité modale est importante, l'ensemble du spectre de $\langle L_p \rangle$ est affecté par η_A .
- iv) E_p , dont le spectre ne contient que les fréquences de résonance de la structure, n'est pratiquement pas influencée par η_A .
- v) L'augmentation de η_A provoque une diminution de σ au voisinage des fréquences de résonance de la cavité, une augmentation de σ en dehors de ces fréquences.

Ces mêmes auteurs [CL89b] ont également étudié le cas d'une excitation mécanique ponctuelle de la plaque (avec un spectre de type bruit blanc tronqué). Les auteurs montrent que, pour une configuration du système plaque-cavité identique à celle utilisée dans leurs précédents travaux [CL89a], le type d'excitation influe fortement sur la réponse vibro-acoustique du système. Notamment, l'excitation mécanique conduit à un rendement vibro-acoustique inférieur à l'excitation acoustique étudiée dans le papier précédent [CL89a]. Néanmoins, les auteurs aboutissent à des conclusions identiques à celles obtenues pour une excitation acoustique concernant l'influence sur les différents indicateurs vibro-acoustiques ii) du modèle d'amortissement de la cavité, et ii) — en choisissant, de même que pour le cas d'une excitation acoustique, un modèle d'amortissement structural pour la cavité et visqueux pour la plaque — de la variation du facteur de perte par amortissement structural η_A de la cavité.

Par la suite, les auteurs ont examiné la sensibilité du modèle à différents paramètres : la position du point d'excitation sur la plaque, les conditions aux limites de la plaque, le module d'Young du matériau de la plaque et les facteurs de perte par amortissement. Les résultats montrent qu'une modification légère de la position du point d'excitation, de l'ordre de quelques centimètres, influe très peu sur $\langle L_p \rangle$ et E_p , sauf au niveau des anti-résonances de la plaque. Les conditions aux limites jouent quant à elles un rôle important sur E_p et L_p , le niveau de

¹¹Pour cet examen, le modèle d'amortissement utilisé pour la cavité est un modèle visqueux.

pression en un point de la cavité. Lorsque l'on passe de conditions aux limites du type appuyé à des conditions aux limites du type encastré, on note un glissement des spectres vers les hautes fréquences, une répartition différente des fréquences de résonance de la plaque et une modification du couplage vibro-acoustique par l'intermédiaire des coefficients de couplage. Sur le spectre de L_p , les variations les plus importantes se situent au niveau des anti-résonances de plaque et de cavité. Par ailleurs, les conséquences d'une erreur de 20% sur le module d'Young du matériau de la plaque sont identiques à celles de la variation de ses conditions aux limites, décrites ci-avant. Enfin, l'influence des facteurs de perte par amortissement sur la réponse du système est étudiée à travers trois configurations différentes : i) les facteurs de perte par amortissement de la structure et de la cavité mesurés expérimentalement sont injectés dans les modèles d'amortissement respectivement de plaque et de cavité, ii) le facteur de perte par amortissement de la cavité mesuré expérimentalement est injecté dans le modèle d'amortissement structural de cavité, le facteur de perte par amortissement visqueux de la structure est pris égal à 0, et iii) le facteur de perte par amortissement structural de la cavité est pris égal à 0, le facteur de perte par amortissement de la structure mesuré expérimentalement est injecté dans le modèle d'amortissement visqueux de la plaque. Les résultats montrent que, si l'on néglige l'amortissement de la plaque, les effets seront très importants au voisinage des fréquences de résonance de la plaque. Aussi, si l'on néglige l'amortissement de la cavité, les effets seront également importants au voisinage des fréquences de résonance de la cavité et dans la zone où la densité modale acoustique devient importante. En outre, les auteurs montrent que, l'amortissement de la structure étant supérieur à celui de la cavité, les effets de dissipation de la plaque ne peuvent être en aucun cas négligés.

Outre l'influence de la variation du facteur de perte par amortissement de la cavité — qui retranscrit les effets de dissipation intrinsèques du fluide et aux parois (phénomène de couche limite) pour la cavité nue —, les travaux de Cheng [Che89] ont aussi traité l'influence de la présence d'un matériau absorbant sur un mur rigide de la cavité sur la réponse vibro-acoustique du système plaque-cavité. Le comportement mécanique et acoustique du matériau est caractérisé par son impédance acoustique spécifique normale Z (Cf. section A.1.2). Pour résoudre le problème d'interaction fluide-structure, l'auteur a utilisé une approche modale similaire à celle mentionnée ci-avant ; mais, par rapport aux papiers [CL89a, CL89b] cités précédemment, la réaction du fluide sur la structure n'est ici pas négligée. En outre, de par le choix des caractéristiques géométriques, acoustiques et mécaniques du système plaque-cavité étudié, le couplage entre la plaque et la cavité est faible. À partir des équations généralisées pour le domaine fluide dissipatif¹², deux types d'effets dus à la présence du matériau absorbant peuvent être identifiés :

- Des effets de masse ajoutée, liés à sa réactance.

¹²Ces équations généralisées sont données dans la section A.3.1.2.e, par l'expression (A.50).

- Des effets d’amortissement équivalent¹³, liés à sa résistance.

Sur le spectre de L_p — le niveau de pression en un point intérieur à la cavité —, les effets de masse ajoutée se traduisent par un décalage des fréquences de résonance de la cavité vers les basses fréquences (l’auteur note par exemple une chute de 6% pour la première fréquence de résonance de la cavité). Les effets d’amortissement équivalent se traduisent par une diminution du niveau de pression au niveau des fréquences de résonance de la cavité en basses fréquences, où les fréquences de résonance sont encore nettement séparées. En plus hautes fréquences, où la réponse de la cavité est dominée par un nombre important de modes, la diminution du niveau de pression est plus importante. Ainsi, si le champ de pression acoustique est perturbé par la présence du matériau absorbant, l’auteur relève par contre, à travers la comparaison des spectres de E_p — l’énergie cinétique de la plaque —, que la présence du matériau absorbant n’influence quasiment pas la réponse vibratoire de la plaque lorsque le couplage entre la plaque et la cavité est faible.

Il est à noter que les effets de la présence de matériau absorbant sur le champ de pression acoustique à l’intérieur d’une cavité ont été étudiés au travers de nombreux travaux dans le domaine de l’acoustique des salles¹⁴, sur lesquels nous ne nous étendrons pas ici. Toutefois, pour seul exemple, on peut citer les travaux de Morse [Mor39], précurseurs dans ce domaine. Morse [Mor39] a étudié le cas d’une cavité rigide dont les parois sont uniformément recouvertes d’un matériau absorbant (qui peut être différent d’une paroi à l’autre). De même que précédemment, le comportement du matériau, supposé à réaction localisée, est caractérisé par son impédance acoustique spécifique normale Z . Pour résoudre l’équation d’onde, l’auteur a également utilisé une approche modale ; il s’est alors intéressé à étudier l’influence de la variation de l’impédance du matériau absorbant sur les *constantes d’amortissement modales*, en considérant deux parois parallèles données¹⁵. Notamment, pour une impédance donnée, l’auteur a montré que les ondes acoustiques se propageant dans la cavité quasi-parallèlement à une paroi recouverte de matériau absorbant (ondes en incidence quasi-rasante) étaient moins absorbées par cette paroi que les ondes acoustiques arrivant en incidence oblique sur cette paroi.

1.3 Synthèse et perspectives

Dans cet état de l’art sur le comportement vibro-acoustique d’une plaque couplée à une cavité parallélépipédique amortie, nous avons discuté des principaux phénomènes régissant le couplage vibro-acoustique. Tout d’abord, nous avons pu voir que la nature du couplage (forte ou faible) dépend du rapport de la longueur de la plaque à la profondeur de la cavité et de la

¹³Même s’il n’en a pas été fait mention précédemment, ces effets ont également été étudiés par Dowell *et al.* [DGS77].

¹⁴Ces travaux sont d’ailleurs antérieurs aux travaux mentionnés ci-avant. Généralement, dans ces travaux, la cavité est considérée comme entièrement rigide.

¹⁵La *constante d’amortissement modale* quantifie, pour un mode donné, l’effet d’amortissement équivalent dû à la présence de matériau absorbant sur les deux parois parallèles.

densité volumique du fluide. Nous nous intéresserons au cas du fluide léger (air), et au cas où la cavité est relativement profonde par rapport à la plus grande dimension de la plaque¹⁶, i.e. la configuration que nous traiterons présentera des caractéristiques géométriques et mécaniques telles que le couplage entre la plaque et la cavité sera faible. Dans ce cas précis, nous avons vu que le couplage intermodal se manifeste principalement à travers : i) un effet de raideur acoustique ajoutée (dû au mode rigide de la cavité) pour les premiers modes symétriques résonants de structure, dont les fréquences de résonance sont en conséquence augmentées, ii) un fort transfert énergétique entre les modes de cavité et de plaque qui réunissent les conditions de fort couplage, transfert qui se traduit par une modification réciproque des fréquences de résonance de la plaque et de la cavité. Dans les configurations usuelles, ce dernier phénomène intervient notamment en basses fréquences entre un mode de plaque symétrique et le premier mode longitudinal de la cavité $(q, r, s) = (0, 0, 1)$.

Nous avons ensuite passé en revue les principaux travaux portant sur l'influence de la variation de paramètres physiques sur le comportement du système plaque-cavité. Nous pouvons en dégager les paramètres importants d'un point de vue vibro-acoustique, qu'il serait *a priori* intéressant d'étudier d'un point de vue perceptif. Ces paramètres structuraux et leurs effets physiques sur le comportement du système sont répertoriés dans le tableau 1.1.

Plusieurs paramètres n'apparaissent pas dans cette liste : i) les modèles d'amortissement de la plaque et de la cavité car il a été montré [CL89a, CL89b] qu'ils n'influent pas sur le niveau de pression à l'intérieur de la cavité, ii) la position de l'excitation lorsqu'il s'agit d'une force mécanique ponctuelle, car ses effets sur la réponse vibro-acoustique du système apparaissent comme étant du second ordre [CL89a, CL89b], pour un décalage de cette position de l'ordre de quelques centimètres.

¹⁶Cette configuration peut être trouvée dans les domaines des transports et du bâtiment.

Paramètres variables		Effets physiques
Type d'excitation de la plaque [CL89a, CL89b]		<ul style="list-style-type: none"> • Rendement vibro-acoustique de la plaque différent
Facteur de perte par amortissement [CL89a, CL89b, NS81a, NS81b]	Plaque	<ul style="list-style-type: none"> • Réduction de l'amplitude des pics de résonance structuraux en BF
	Cavité	<ul style="list-style-type: none"> • Réduction de l'amplitude des pics de résonance acoustiques en BF • Niveau de pression affecté dans la zone de forte densité modale
Épaisseur de la plaque [Les88, PB90b]		<ul style="list-style-type: none"> • Modification de la densité modale, de la distribution des fréquences propres et de la fréquence critique de la plaque entraînant une modification du couplage vibro-acoustique entre la plaque et la cavité
Conditions aux limites de la plaque [CL89a, CL89b, NS81a, NS81b]		<ul style="list-style-type: none"> • Décalage vers les HF des fréquences propres de la plaque (pour une augmentation de la rigidité sur son contour), entraînant une modification du couplage vibro-acoustique par l'intermédiaire des facteurs de couplage • Différences de niveau de pression en un point intérieur à la cavité importantes aux anti-résonances de plaque et de volume
Module d'Young du matériau de la plaque [CL89a, CL89b]		<ul style="list-style-type: none"> • Effets analogues à ceux induits par une variation des conditions aux limites de la plaque
Présence de matériau absorbant		<ul style="list-style-type: none"> • Décalage vers les BF des fréquences propres de la cavité [Che89] (effets de masse ajoutée liés à la réactance du matériau) • Diminution de l'amplitude des pics de résonance acoustiques en BF et diminution du niveau de pression dans la zone de forte densité modale [Che89, DGS77] (effets d'amortissement équivalents liés à la résistance du matériau)

TAB. 1.1 – Récapitulatif des paramètres physiques importants et des effets associés.

Chapitre 2

La perception auditive : les sensations et leur mesure

Dans une première section, nous rappellerons quelques éléments de psychoacoustique nécessaires à la compréhension de ce travail. Nous présenterons notamment les métriques psychoacoustiques utilisées pour décrire les attributs auditifs des sons. De manière systématique, leur calcul implique une modélisation, plus ou moins simplifiée, du comportement du système auditif.

Dans une seconde section, nous présenterons quelques éléments de psychométrie. Nous passerons en revue différentes méthodes de collecte d'information, applicables au domaine de la perception auditive. Nous décrirons également, d'un point de vue théorique, plusieurs outils d'analyse de données, notamment certains modèles de choix probabiliste et modèles d'échelonnement multidimensionnel.

2.1 Les sensations liées à la perception auditive : quelques éléments de psychoacoustique

La psychoacoustique est définie comme la science traitant des rapports entre les paramètres de la stimulation acoustique et la qualité de la sensation auditive [BCDS89]. Nous allons introduire dans cette section les principales grandeurs de sensation liées à la perception auditive.

2.1.1 Perception de l'intensité sonore

L'intensité subjective d'un son, appelée *sonie*, est reliée à son intensité physique via différents processus de codage et de traitement de l'information par le système auditif [BCDS89], mais dépend également d'autres facteurs acoustiques tels que sa durée et sa fréquence.

2.1.1.1 Sonie d'un son pur

La sonie d'un son pur a été mesurée selon une méthode développée par Stevens¹. Cette méthode consiste à demander à des sujets de choisir des nombres proportionnels à la sonie des sons présentés successivement, correspondant à un son pur de fréquence 1000 Hz variant en niveau de pression acoustique. Il en ressort que la sonie peut s'écrire sous la forme d'une fonction puissance de la pression acoustique :

$$L = kp^{0.6} \tag{2.1}$$

où L est la valeur de la sonie en *sones*, $k = 0.01$ et p la pression acoustique en μPa . Par convention, la valeur 1 sone est la sonie d'un son binaural de fréquence 1000 Hz à 40 dB. L'expression (2.1) est valable pour des niveaux de pression compris entre 30 dB et 120 dB et également pour des sons purs de fréquence supérieure à 1000 Hz.

2.1.1.2 Sonie d'un son complexe

Dans l'évaluation expérimentale de la sonie de sons complexes, les travaux ont généralement recours à une méthode de comparaison qui consiste à demander à des sujets de comparer la sonie d'un son étalon à celle d'un son complexe dont on fait varier la composition spectrale. Notamment, certaines études ont montré que deux sons purs de fréquence différente et de même niveau, présentés simultanément, ont une sonie constante tant que leur écart en fréquence ne dépasse pas une certaine valeur, appelée *bande critique* [BCDS89]; leur sonie est égale à la sonie qu'aurait un seul son pur de fréquence égale à la fréquence centrale de la bande critique. Pour un écart entre les deux sons supérieur à la bande critique, leur sonie devient supérieure à celle d'un seul son pur à la fréquence centrale de la bande critique. Ces expériences ont permis

¹S. S. Stevens. The direct estimation of sensory magnitudes - Loudness. *American Journal of Psychology*, 69 :1-25, 1956 (cité dans [BCDS89]).

de présumer que, dans son mode de fonctionnement, notre système auditif périphérique serait équivalent à une série de filtres passe-bandes, dont les bandes passantes auraient la largeur des bandes critiques. Si l'énergie portée par les composantes spectrales du son complexe se répartit sur plusieurs bandes critiques, l'excitation totale équivaut alors à la somme des excitations induites dans ces différentes bandes critiques [BCDS89]. Plusieurs modèles de calcul de la sonie de sons complexes ont été développés à partir de ces constatations [MG96, ZF99]. Le modèle proposé par Zwicker (présenté dans [ZF99]) est abordé dans la section 2.1.3.1.

2.1.2 Perception de la hauteur

En général, par *hauteur* on entend la position d'un son sur une échelle. Ce terme est employé au sens de la physique, il est associé à la fréquence du son. La grandeur sensorielle qui exprime la sensation de hauteur est la *hauteur tonale* [ZF81].

2.1.2.1 Hauteur tonale des sons purs

La norme AFNOR² définit la hauteur tonale comme "le caractère de la sensation auditive liée à la fréquence d'un son périodique, qui fait dire que le son est aigu ou grave selon que cette fréquence est plus ou moins élevée". Plus précisément, on peut dire pour un son pur que la hauteur tonale est l'attribut auditif sur la base duquel il est possible de lui apparier par ajustement de fréquence un autre son pur différant par le niveau d'intensité [BCDS89]. Toutefois, certaines études révèlent que la qualité "grave/aigü", aussi appelée *tonie*, ne suffit pas à représenter en totalité la hauteur tonale d'un son pur ; l'existence d'une seconde qualité de hauteur tonale, le *chroma*, qui peut se voir comme un élément constituant de la mélodie, est soutenue pour expliquer l'impression d'équivalence perceptive entre deux sons purs séparés par une octave³ [McA94].

2.1.2.2 Hauteur tonale des sons complexes

La hauteur tonale d'un son quelconque correspond à la hauteur tonale d'un son pur subjectivement apparié au son quelconque [McA94]. L'expérience montre que différentes sensations de hauteur peuvent être évoquées à l'écoute d'un son complexe.

Pour un son complexe périodique⁴ (SCP), deux qualités de hauteur tonale sont évoquées spontanément (i.e. leur appréhension ne nécessite pas un effort d'attention élevé dans l'écoute⁵) [BCDS89] :

²AFNOR. *Recueil Des Normes Françaises de L'acoustique, Tome 1 (Vocabulaire), NF S 30-107*. AFNOR Éditions, Saint-Denis La Plaine, France, 1977 (cité dans [BCDS89]).

³i.e. entre deux sons purs dont le rapport de fréquences est 2.

⁴De nombreux bruits environnementaux sont des sons complexes périodiques.

⁵On parle également d'*écoute synthétique*.

- i) la *hauteur brute* comme qualité “grave/aigü ”⁶ ou qualité de brillance liée au centre de gravité de son spectre.
- ii) la *hauteur fondamentale* ou *virtuelle* (*virtual pitch* en anglais) comme élément constituant de sa mélodie⁷. Pour un SCP harmonique, la hauteur fondamentale est étroitement liée à la valeur de sa fréquence fondamentale physique. Par contre, pour un SCP inharmonique, la hauteur fondamentale est éloignée de la sensation de hauteur évoquée par un son pur à la fréquence fondamentale physique du son complexe.

A la différence de la hauteur brute, la perception de la hauteur fondamentale fait l’objet d’un apprentissage [BCDS89].

En outre, au prix d’un effort d’attention plus important dans l’écoute⁸, il est possible à l’auditeur de discerner au sein d’un son complexe certains sons purs qui le composent, présentant leur propre hauteur tonale. Pour qualifier la hauteur tonale évoquée par un son pur qui est une composante spectrale du son complexe, on utilise l’expression *hauteur spectrale* [BCDS89].

La hauteur fondamentale de sons complexes (harmoniques ou inharmoniques), ainsi que les hauteurs spectrales, peuvent être extraites à l’aide d’un algorithme développé par Terhardt *et al.* [TSS82] (Cf. section 2.1.3.3). Cet algorithme est basé sur un modèle de codage spectral de la hauteur tonale des sons ; d’autres modèles ont recours à un codage temporel ou spectro-temporel, plus approprié pour évaluer la hauteur tonale de bruits modulés en amplitude par exemple. Pour une revue des différents modèles avec leurs avantages et inconvénients, on pourra se référer à [McA94].

2.1.3 Les métriques psychoacoustiques

Nous allons décrire ici les métriques que nous serons amenés à calculer afin d’aider à l’identification des attributs auditifs pouvant expliquer pertinemment les résultats des tests d’écoute (Cf. section 6.1.4).

2.1.3.1 La sonie et l’acuité de sons stationnaires

Le modèle de la sonie de Zwicker (présenté dans [ZF99]) pour des sons complexes est spécifié dans la norme ISO532B. Le modèle repose sur les principales hypothèses suivantes : i) l’étendue et l’amplitude de l’excitation induite par un son de fréquence donnée, présenté seul, peut être déduite du pattern de masquage exercé par ce son sur d’autres sons de fréquence différente, ii) la quantité d’excitation induite par un son détermine sa sonie [BCDS89]. Le calcul de la sonie se décompose en plusieurs grandes étapes. Tout d’abord, un filtre est appliqué pour prendre en compte la fonction de transfert entre l’oreille externe et l’oreille moyenne. Puis, à

⁶La hauteur brute d’un SCP s’apparente à la qualité tonie de la hauteur tonale d’un son pur.

⁷La hauteur fondamentale d’un SCP s’apparente à la qualité chroma de la hauteur tonale d’un son pur.

⁸On parle alors d’*écoute analytique*.

partir des niveaux physiques en bandes de tiers d'octave, le pattern d'excitation est déterminé en composant les patterns de masquage exercés par les niveaux physiques dans les différentes bandes, et ce en respectant les règles de masquage⁹. L'échelle physique de fréquence (en Hz) est ensuite transformée en une échelle fréquentielle non linéaire, appelée *échelle des barks*, les barks correspondant aux différentes bandes critiques (au nombre de 24). Puis, la sonie spécifique est calculée à partir du niveau d'excitation suivant une loi de puissance. Enfin, la sonie du son est calculée en intégrant la sonie spécifique sur la totalité du spectre.

L'acuité est un indicateur de la balance spectrale entre les basses et les hautes fréquences. Aussi, elle est souvent employée pour décrire l'attribut "brillance" du timbre [VB74]. Cette métrique est calculée à partir du pattern de sonie :

$$S = 0.11 \frac{\int_0^{24 \text{ Bark}} N' g(z) z dz}{\int_0^{24 \text{ Bark}} N' dz} \quad (2.2)$$

où S est l'acuité en *acums*, z est la fréquence exprimée en *barks*, N' est la sonie spécifique en *sones/bark*. $g(z)$ est une fonction de pondération favorisant les bandes critiques en hautes fréquences. Une acuité de 1 acum correspond à l'acuité d'un bruit à bande étroite de niveau global 60 dB, de fréquence centrale 1000 Hz et avec une largeur de bande inférieure à 150 Hz.

Le modèle d'acuité (2.2) ne permet pas de tenir compte de l'influence de la sonie (N) sur l'acuité ; en effet, du fait de l'apparition de la sonie spécifique (N') au numérateur et au dénominateur, l'acuité varie très peu en fonction de la sonie. Aussi, une modification a été proposée par Aures [Aur85] pour mieux prendre en compte dans le modèle d'acuité l'influence de la sonie sur l'acuité :

$$S = 0.11 \frac{\int_0^{24 \text{ Bark}} N' g'(z) z dz}{\ln \left(\frac{N + 20}{20} \right)} \quad (2.3)$$

où N est la sonie en *sones*, $g'(z)$ est définie par :

$$g'(z) = 0.066e^{0.171z} \quad (2.4)$$

Nous utiliserons par la suite cette expression de l'acuité.

2.1.3.2 Le centre de gravité spectral

Le centre de gravité spectral (CGS) est un paramètre analytique également souvent utilisé pour décrire l'attribut "brillance" du timbre. De manière générale, le CGS est défini comme la

⁹Notamment, un son masque l'excitation due à un autre son uniquement dans la zone où son propre pattern d'excitation présente un niveau supérieur à celui de l'autre son.

moyenne des fréquences du spectre f_i (exprimées en Hz [Rou99] ou en barks [Fre90]) pondérées par leur amplitude A_i :

$$CGS (Hz \text{ ou barks}) = \frac{\sum_i A_i f_i}{\sum_i A_i} \quad (2.5)$$

2.1.3.3 La hauteur fondamentale

Terhardt *et al.* [TSS82] proposent une procédure d'extraction de la hauteur fondamentale basée sur la théorie, exposée dans la section 2.1.2.2, selon laquelle la sensation de hauteur dépend à la fois d'une perception analytique (décomposition en hauteurs spectrales) et d'une perception synthétique du son, i.e. les composantes spectrales dominantes du son sont regroupées et coordonnées pour former une image sonore unique, caractérisée par une seule hauteur, i.e. la hauteur *fondamentale*. Ainsi, l'algorithme produit deux types de patterns, complémentaires. Le pattern des hauteurs spectrales représente les poids affectés aux hauteurs spectrales associées aux différentes composantes tonales dominantes du spectre ; les poids renseignent sur la prépondérance relative des hauteurs spectrales en présence. Ce pattern est déterminé via un processus d'analyse spectrale spécifique basé sur des critères psychoacoustiques dont le masquage fréquentiel et la dominance spectrale (phénomène qui traduit la sensibilité accrue de l'oreille humaine dans une certaine zone de fréquences). A partir du pattern des hauteurs spectrales, le pattern des hauteurs fondamentales est déterminé en partant du principe suivant : la hauteur fondamentale peut être vue comme la $m^{\text{ième}}$ sous-harmonique ($m = 1 \dots M$) d'une hauteur spectrale prépondérante i ($i = 1 \dots R$) du pattern des hauteurs spectrales. Au total, l'algorithme teste $R \times M$ hauteurs fondamentales possibles et évalue pour chacune d'entre elles un "poids", qui renseigne sur sa pertinence. Notamment, le pattern des hauteurs fondamentales représente les différentes hauteurs tonales qui seraient indiquées par des sujets lors de tests d'écoute.

2.1.3.4 La rugosité et la force de fluctuation

La rugosité (R) traduit une sensation liée à l'enveloppe temporelle des sons et plus précisément la sensation de modulation en amplitude d'un son, cette fréquence de modulation étant comprise entre 15 et 300 Hz [ZF99]. La rugosité s'exprime en *aspers* ; un son pur à 1000 Hz, de niveau de pression acoustique 60 dB, modulé en amplitude avec une fréquence de modulation de 70 Hz et un taux de modulation égal à 1, a une rugosité égale à 1 asper. Pour des fréquences de modulation inférieures à 15 Hz, la sensation de modulation est plutôt reflétée par la force de fluctuation (F) [ZF99]. La force de fluctuation est exprimée en *vacils* ; un son pur à 1000 Hz, de niveau de pression acoustique 60 dB, modulé en amplitude avec une fréquence de modulation de 4 Hz et un taux de modulation égal à 1, a une force de fluctuation

égale à 1 vacil.

Les modèles avancés pour le calcul de la rugosité se basent sur les différences de niveau d'excitation provoquées par la modulation ; les modèles les plus couramment utilisés sont ceux de Aures¹⁰, Zwicker et Fastl [ZF99] et Daniel et Weber [DW97]. Ces derniers proposent plusieurs modifications substantielles du modèle d'Aures qui permettent d'améliorer l'adéquation des prédictions de la rugosité aux données subjectives, notamment pour des bruits blancs ; pour une revue des différences existant entre les différents modèles, on pourra se référer à [DW97].

Dans leur ensemble, les modèles de rugosité et de force de fluctuation mentionnés ci-avant ne permettent pas de retranscrire de manière satisfaisante les sensations de modulation évoquées à l'écoute de sons complexes autres que des sons purs modulés en amplitude ou en fréquence, des bruits passe-bande et des bruits blancs.

2.2 La mesure des sensations liées à la perception auditive : quelques éléments de psychométrie

La psychométrie est définie comme l'ensemble des théories et des méthodes de la mesure en psychologie [DTFK94]. Ces méthodes permettent en particulier d'évaluer, de quantifier les réactions ressenties par les personnes vis-à-vis d'un stimulus, d'une opinion, d'un concept, etc. L'évaluation de sensations comporte trois grandes étapes. La première étape consiste à collecter l'information brute, c'est à dire à récolter les observations données par des sujets sur des items¹¹. Nous verrons ainsi succinctement les différents dispositifs d'observation expérimentaux qui peuvent être mis en place dans cette perspective (Cf. section 2.2.1). Puis la seconde étape consiste à transformer ces observations en données. Selon le dispositif employé, les observations peuvent directement constituer des données analysables ; dans le cas contraire, elles doivent être prétraitées pour devenir des données exploitables, dont la forme se prête à l'analyse [TD93]. La dernière étape consiste à transformer les données pour l'interprétation en appliquant un modèle de mesure ou d'analyse de données (Cf. sections 2.2.2 et 2.2.3).

2.2.1 Les dispositifs d'observation

Tout dispositif d'observation est composé d'un dispositif de présentation et d'un dispositif de réponse ; l'activité du sujet est orientée et contrainte par les modalités de ces deux dispositifs et par les consignes qui apportent des spécifications supplémentaires [TD93].

¹⁰W. Aures. Ein Berechnungsverfahren der Rauigkeit. *Acustica*, 66(1) :268-281, 1985 (cité dans [DW97]).

¹¹Le terme "item" regroupe les notions d'"excitant", de "stimulus".

2.2.1.1 Le dispositif de présentation

Le dispositif de présentation comprend la façon dont les stimuli sont présentés au sujet et le contenu des items. Il existe plusieurs types de présentation ; certains sont décrits ci-après [TD93] :

- *Présentation par stimulus unique.* Le sujet fait face à un seul stimulus à la fois : la tâche demandée au sujet ne requiert aucune mise en relation avec les autres stimuli. Les tests d'écoute avec présentation par stimulus unique ont l'avantage d'être relativement courts. Cependant, l'inconvénient majeur est l'absence de stimulus de référence qui peut rendre la tâche de jugement difficile pour le sujet.
- *Présentation des stimuli par paires.* La présentation des stimuli par paires sollicite de la part du sujet un jugement comparatif entre les deux membres de la paire. L'un des deux stimuli peut servir de référence ; il sera possible de construire, seulement, une échelle unidimensionnelle de la sensation. Il peut aussi être demandé au sujet de considérer la paire de stimuli dans son ensemble comme un stimulus unique et d'émettre un jugement de (dis)similarité sur la paire ; il sera alors possible d'obtenir l'espace perceptif à partir de l'analyse des réponses au test. Le nombre total de paires présentées au sujet est égal à $\frac{n(n-1)}{2}$ (avec n, nombre d'éléments), ce type de présentation est donc beaucoup plus lourd que la présentation par stimulus unique.
- *Présentation de l'ensemble des stimuli.* Le sujet dispose de l'ensemble des stimuli pour effectuer sa tâche de jugement. Il peut être amené à les ordonner selon un critère donné, à les trier en catégories ou encore à en choisir un ou plusieurs parmi l'échantillon.

2.2.1.2 Le dispositif de réponse

Par *dispositif de réponse* on entend tous les supports qui conservent la trace des réactions des sujets. Les dispositifs de réponse peuvent être répertoriés selon la qualité mathématique des réponses des sujets ; l'observation peut être de niveau nominal (catégoriel), ordinal ou métrique [TD93] :

- *L'observation est nominale (catégorielle).* Le sujet exprime une réponse qualitative en termes de catégories. Suivant le protocole expérimental, le choix entre plusieurs catégories pré-établies ou la possibilité de constituer ses propres catégories peuvent être proposées au sujet.
- *L'observation est ordinale.* Le sujet donne une réponse qui exprime un ordre ; celui-ci peut découler de l'ordination d'un ensemble de stimuli ou de l'expression d'une domi-

nance entre deux éléments.

- *L’observation est métrique.* La réponse du sujet exprime une information d’intervalles ou de rapports. Les échelles d’intervalles ne comportent pas d’origine absolue et peuvent subir toute transformation du type $y = ax + b$ ($a \neq 0$) tandis que les échelles de rapport en comportent une et peuvent subir toute transformation du type $y = ax$ ($a \neq 0$).

2.2.1.3 Exemples de dispositifs d’observation

Nous abordons ici quelques exemples de dispositifs d’observation découlant de l’association d’un dispositif de présentation et d’un dispositif de réponse. Le lecteur pourra trouver à travers les références citées des illustrations concrètes d’utilisation de ces différents dispositifs dans des domaines de recherche liés à la qualité sonore ou à la gêne sonore.

- *Méthode d’estimation directe des grandeurs.* Les stimuli sonores sont présentés un à un et aléatoirement aux sujets, qui évaluent pour chaque stimulus la magnitude d’un attribut par un nombre proportionnel à la sensation liée à cet attribut. Pour une meilleure fiabilité des résultats, il peut être demandé aux sujets d’effectuer deux fois le test. Les valeurs jugées sont du niveau des rapports, les résultats de chaque sujet sont normalisés avant d’être moyennés. On peut éviter cette normalisation en présentant un son de référence aux sujets avant le test ; dans ce cas, les sujets doivent juger la sensation produite par l’écoute des stimuli proportionnellement à la sensation produite par le son de référence. Cette méthode est souvent utilisée pour obtenir une évaluation directe de l’agrément/désagrément ou de la gêne sonore [BHP94, HMCM02, IM06, ZES04].
- *Méthode de comparaison par paires.* Le dispositif d’observation de la méthode de comparaison par paires a été développé par Thurstone [Thu27b]. Les stimuli sont présentés par paires aux sujets qui doivent donner un jugement de dominance entre les deux stimuli (réponse de niveau ordinal). La tâche des sujets reste assez simple, malgré le nombre important de jugements. Ce type de procédure est souvent utilisé pour évaluer un attribut des sons (la préférence ou l’agrément/désagrément par exemple) sur une échelle unidimensionnelle métrique [EMD04, FMF05, HSP⁺02, MHC01] (voir aussi section 2.2.2). Il est également possible de demander aux sujets d’évaluer la dissimilarité entre les deux stimuli de la paire. Ce type d’information, particulièrement recherché [CHMD04, FMF05, HSA02, MCR04, SMW99], permet de construire l’espace perceptif multidimensionnel d’un panel de sons (via l’utilisation de techniques d’échelonnement multidimensionnel, Cf. section 2.2.3) et de déterminer ainsi les attributs auditifs qui influent sur la perception. L’échelle d’évaluation présentée aux sujets peut être une droite représentant le continuum subjectif dont les extrémités désignent des sons jugés très similaires ou très différents ; dans ce cas, l’observation est du niveau métrique des rapports. Cette échelle

peut aussi être une échelle de catégories numériques ou verbales. Selon que la taille de chaque échelon est perçue comme identique ou non par les sujets, les données seront respectivement considérées comme du niveau métrique ou du niveau ordinal.

- *Méthode d'évaluation directe multidimensionnelle.* Les stimuli sont présentés un à un et aléatoirement aux sujets. Il leur est demandé d'évaluer chaque stimulus selon un nombre important d'attributs d'ordre perceptif (e.g. sonie, brillance, clarté, etc.) ou d'ordre affectif (e.g. désagrément, monotonie, stress, etc.), susceptibles de caractériser les stimuli du corpus étudié. Les échelles d'évaluation associées aux différents attributs sont présentées simultanément ; par rapport à la *méthode d'évaluation directe unidimensionnelle*, où un seul attribut est évalué sur une seule échelle, la combinaison possible des réponses sur les différentes échelles pour former un index fait que l'on qualifie cette méthode de multidimensionnelle [Gus97]. Comme mentionné à l'alinéa précédent, il peut s'agir de droites représentant le continuum subjectif des attributs (échelles métriques) ou d'échelles à plusieurs catégories ordonnées verbales ou numériques avec des labels aux extrémités^{12,13}. En outre, chaque attribut à évaluer peut être décrit par un adjectif seul ; l'échelle est alors *unipolaire* [BRTM02, Ber06, BL05, GHBKL90]. Chaque attribut peut aussi être décrit par deux adjectifs de sens opposé (e.g. "agréable/désagréable") ; l'échelle est alors bipolaire¹⁴ [Bis97, BCSF00, Rai02, Que01, ZH01].

Par leurs réponses, les sujets dressent ainsi un *profil sensoriel*¹⁵ ou *sémantique*¹⁶ pour chaque stimulus, selon que les échelles sont unipolaires ou bipolaires. Les réponses sont alors, si nécessaire, transformées en données numériques. Puis, typiquement, une analyse factorielle des réponses est réalisée afin de déterminer les facteurs importants vis-à-vis de la qualité sonore. Chaque facteur saillant peut être associé à plusieurs adjectifs (ou couples d'adjectifs) corrélés entre eux.

- *Méthode du tri subjectif (ou de catégorisation).* Tous les stimuli sont présentés simultanément au sujet. Il lui est demandé de les trier en différentes catégories. Le nombre de catégories peut être fixé au préalable par l'expérimentateur ou alors laissé à l'appréciation du sujet lors du test. On peut préciser dans une consigne le(s) critère(s) selon le(s)quel(s) le sujet doit effectuer son tri. L'inconvénient de cette méthode réside dans la faiblesse du niveau de l'information recueillie (niveau catégoriel) ; l'utilisation de ce dispositif est néanmoins avantageuse dans les études où le nombre d'éléments à analyser est important. Dans le domaine de la qualité sonore, cette technique est souvent em-

¹²Un nombre de catégories compris entre 5 et 9 est conseillé [CI80].

¹³De même, les échelles de catégories peuvent être assimilées à des échelles d'intervalles si la taille de chaque échelon est perçue comme identique.

¹⁴Pour ce type d'échelle, on parle de *méthode du différentiel sémantique*.

¹⁵*Sensory profile* ou *attribute profile* en anglais, Cf. [Ber06, BL05].

¹⁶*Polarity profile* en anglais, Cf. [BCSF00].

ployée dans le but de différencier des sons suivant leur signature sonore (i.e. leur timbre) [GCG97, Hou03, Koe05, LSWM03].

- *Méthode d'évaluation "mixte"*. Tous les stimuli sont également présentés de manière simultanée au sujet. Il lui est demandé d'évaluer chaque stimulus suivant un attribut spécifié par l'expérimentateur, et ce sur une échelle métrique associée à chaque stimulus. Dans le domaine de la qualité sonore, cette procédure a été utilisée pour évaluer l'agrément de sons [BHL98]; cette procédure donne dans cette situation des résultats semblables à ceux obtenus par une procédure de comparaison par paires [PHS05]. Par la suite, cette procédure a été adaptée pour permettre l'évaluation de la dissimilarité de sons par rapport à un son de référence [KP06]. Le terme "mixte" traduit la possibilité laissée à l'auditeur de combiner évaluation absolue et évaluation comparative dans le premier cas d'utilisation, et de procéder à une double évaluation comparative (comparaison des sons par rapport à la référence et comparaison des sons entre eux) dans le second cas.

2.2.2 Les modèles de choix probabilistes

Dans le champ de la psychologie expérimentale, diverses et multiples théories probabilistes ont été développées pour modéliser le comportement d'un individu dans une situation de choix [LS65]. Dans le domaine de la qualité sonore, il est souvent recherché une mesure unidimensionnelle d'un attribut donné sur la base de jugements de dominance prononcés sur des paires de stimuli. A cet effet, les chercheurs recourent souvent à certains modèles probabilistes ; ces derniers peuvent se répertorier dans la famille des modèles à utilité aléatoire [LS65] — *Random Utility Models* (RUM) en anglais. Dans ce qui suit, nous commencerons par rappeler quelques généralités sur les modèles RUM, notamment leurs principales hypothèses. Puis, nous présenterons la loi du jugement comparatif de Thurstone et le modèle de Bradley-Terry, des modèles de mesure unidimensionnelle souvent utilisés dans le domaine de la qualité sonore.

2.2.2.1 Généralités sur les modèles RUM

Soit un attribut A donné (quantitatif ou qualitatif). Un modèle RUM implique les principales hypothèses suivantes [LS65, Dav88] :

- Il existe une *échelle* (ou *continuum*) *psychologique* de A sur laquelle tout stimulus S_i possède une valeur "vraie" A_i . Un stimulus S_i domine un autre stimulus S_j selon l'attribut A (i.e. " $S_i > S_j$ ") si, sur cette échelle, $A_i > A_j$.
- La valeur "vraie" A_i , telle que ressentie par un sujet, varie d'une présentation à l'autre du stimulus S_i et peut être représentée par une variable aléatoire y_i .
- Dans une comparaison par paires des stimuli S_i et S_j , " $S_i > S_j$ " si $y_i > y_j$. Le jugement

“ $S_i > S_j$ ” intervient avec une probabilité π_{ij} , donnée par :

$$\pi_{ij} = \text{Prob} \{y_i > y_j\} \quad (2.6)$$

$$\pi_{ij} = \text{Prob} \{y_j - y_i < 0\} \quad (2.7)$$

où la différence $y_j - y_i$, notée ci-après y_{j-i} , est également une variable aléatoire. Soit $H_{y_{j-i}}(x)$ la fonction de répartition de la variable aléatoire y_{j-i} définie par :

$$H_{y_{j-i}}(x) = \text{Prob} \{y_{j-i} < x\}$$

On peut ré-écrire l’expression (2.7) comme suit :

$$\pi_{ij} = H_{y_{j-i}}(0) \quad (2.8)$$

2.2.2.2 La loi du jugement comparatif

La loi du jugement comparatif a été proposée par Thurstone [Thu27a]. Elle est originellement associée à la technique de comparaison par paires [Thu27b]. Sur la base de jugements de dominance prononcés sur les paires de stimuli, elle permet d’obtenir, pour l’attribut A étudié, une échelle unidimensionnelle métrique du niveau d’intervalles.

Reprenons les éléments mentionnés dans la section précédente. Thurstone considère que i) les variables aléatoires y_i et y_j suivent respectivement les lois normales $\mathcal{N}(A_i, \sigma_i)$ et $\mathcal{N}(A_j, \sigma_j)$, et ii) la variable y_{j-i} suit une loi normale $\mathcal{N}(A_{j-i}, \sigma_{j-i})$, i.e. de moyenne :

$$A_{j-i} = A_j - A_i \quad (2.9)$$

et d’écart-type :

$$\sigma_{j-i} = \sqrt{\sigma_i^2 + \sigma_j^2 - 2r_{ij}\sigma_i\sigma_j} \quad (2.10)$$

où r_{ij} est la corrélation entre les variables aléatoires y_i et y_j .

Dans l’équation (2.8), $H_{y_{j-i}}$ désigne désormais la fonction de répartition de la loi normale $\mathcal{N}(A_{j-i}, \sigma_{j-i})$. L’équation (2.8) peut encore se ré-écrire comme suit :

$$\pi_{ij} = \Phi \left(\frac{-A_{j-i}}{\sigma_{j-i}} \right) \quad (2.11)$$

où Φ est la fonction de répartition de la loi normale centrée-réduite $\mathcal{N}(0, 1)$.

Ainsi, en composant les deux membres de l’équation (2.11) par la fonction de répartition inverse de la loi normale centrée-réduite $\mathcal{N}(0, 1)$, i.e. $\Phi^{-1}(x)$, on obtient l’expression suivante :

$$\Phi^{-1}(\pi_{ij}) = \frac{-A_{j-i}}{\sigma_{j-i}} \quad (2.12)$$

où $\Phi^{-1}(\pi_{ij})$ est la valeur de la fonction $\Phi^{-1}(x)$ au point d'abscisse π_{ij} , appelée *score centré-réduit* (z_{ij}).

En injectant (2.9) et (2.10) dans (2.12), l'équation fondamentale de la loi du jugement comparatif s'écrit alors :

$$A_i - A_j = z_{ij} \sqrt{\sigma_i^2 + \sigma_j^2 - 2r_{ij} \sigma_i \sigma_j} \quad (2.13)$$

D'un point de vue pratique, l'équation (2.13) est inutilisable. En effet, l'expérience permet seulement de disposer d'une estimation p_{ij} de la probabilité π_{ij} que " $S_i > S_j$ " (voir ci-après pour son obtention). Ainsi, dans l'équation (2.13), seule la quantité z_{ij} peut être estimée. Pour la comparaison de n stimuli par paires, le système des $\frac{n(n-1)}{2}$ équations (2.13) formulées pour les $\frac{n(n-1)}{2}$ différentes paires de stimuli S_i et S_j possibles ne peut être résolu car trop d'inconnues subsistent (i.e. n termes A_i , n termes σ_i et $\frac{n(n-1)}{2}$ termes r_{ij}).

Aussi, Thurstone [Thu27a] a développé différents cas, en introduisant des postulats supplémentaires qui permettent d'obtenir une solution au problème. Notamment, le *cas V*, à la fois le plus simple et le plus utilisé, suppose que i) les variables aléatoires y_i et y_j sont indépendantes, i.e. les corrélations r_{ij} sont nulles, et ii) l'écart-type de la distribution normale de la variable aléatoire y_{j-i} est constant et égal à 1, $\forall(i, j)$. Pour ce cas, l'équation fondamentale de la loi du jugement comparatif (2.13) s'écrit alors :

$$A_i - A_j = z_{ij} \quad (2.14)$$

Désormais, la quantité z_{ij} exprime directement la différence entre les valeurs "vraies" A_i et A_j des stimuli S_i et S_j , i.e. une estimation p_{ij} de la probabilité π_{ij} que " $S_i > S_j$ " est suffisante pour résoudre le problème. Dans la pratique, cette estimation est donnée par la proportion "observée" de jugements " $S_i > S_j$ ", définie comme le rapport entre le nombre de sujets ayant émis le jugement " $S_i > S_j$ " et le nombre total de sujets ayant participé au test de comparaison par paires.

2.2.2.3 Le modèle de Bradley-Terry

Bradley et Terry¹⁷ ont avancé un autre modèle, tout aussi répandu que le modèle de Thurstone, qui conduit pour l'attribut A à une échelle unidimensionnelle métrique du niveau des rapports. Notamment, la probabilité π_{ij} que " $S_i > S_j$ " est donnée par :

$$\pi_{ij} = \frac{\pi_i}{\pi_i + \pi_j} \quad (2.15)$$

où les termes π_i et π_j sont les valeurs "vraies" des stimuli S_i et S_j sur l'échelle du niveau des rapports.

¹⁷R.A. Bradley and M.E. Terry. The rank analysis of incomplete bock designs. I. The method of paired comparisons. *Biometrika*, 39 :324-345, 1952 (cité dans [Dav88]).

La relation (2.15) peut être retrouvée en reprenant le développement introduit dans la section 2.2.2.1.

Le modèle de Bradley-Terry postule que les variables aléatoires y_i et y_j suivent des lois double-exponentielle (ou de Laplace) respectivement de moyenne A_i et A_j . Aussi, la fonction de répartition $H_{y_{j-i}}(x)$ de la variable aléatoire y_{j-i} — dont la distribution a pour moyenne A_{j-i} — est donnée par (d’après [Dav88]) :

$$H_{y_{j-i}}(x) = \int_{-\infty}^x \operatorname{sech}^2\left(\frac{1}{2}(x - A_{j-i})\right) dx \quad (2.16)$$

où la fonction $\operatorname{sech}(x)$ équivaut à $\frac{1}{\cosh(x)}$.

Ainsi, après calcul de $H_{y_{j-i}}(0)$, l’équation (2.8) devient :

$$\pi_{ij} = \frac{1}{2} \left[1 + \tanh\left(\frac{1}{2}(A_i - A_j)\right) \right] \quad (2.17)$$

On obtient alors :

$$A_i - A_j = \ln\left(\frac{\pi_{ij}}{1 - \pi_{ij}}\right) \quad (2.18)$$

On observe ainsi que la différence entre les valeurs “vraies” A_i et A_j s’exprime simplement comme une fonction *logit*¹⁸ de la probabilité π_{ij} . En posant $A_i = \ln \pi_i$, on retrouve l’expression (2.15).

2.2.2.4 Construction d’une échelle de préférence

Considérons que l’attribut étudié, dénoté A ci-avant, est la préférence. Un corpus de n stimuli sonores est présenté à un jury de N sujets selon la méthode de comparaison par paires (soit $\frac{n(n-1)}{2}$ paires). Pour chaque paire, les sujets donnent un jugement de dominance entre les deux stimuli selon la préférence, i.e. expriment un choix dichotomique entre le premier et le second son de la paire. Les réponses sont conditionnées dans une matrice de proportions “observées” \mathbf{P} de dimension $n \times n$ [Dav88] :

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1j} & \cdots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2j} & \cdots & p_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \cdots & \vdots \\ p_{i1} & p_{i2} & \cdots & p_{ij} & \cdots & p_{in} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{n1} & p_{n2} & \cdots & p_{nj} & \cdots & p_{nn} \end{bmatrix}$$

¹⁸La fonction *logit*, i.e. notée $\operatorname{logit}(x)$, est définie comme suit :

$$\operatorname{logit}(x) = \ln \frac{x}{1-x}$$

où les proportions “observées” p_{ij} sont données par :

$$p_{ij} = \frac{f_{ij}}{N} \quad (2.19)$$

où f_{ij} indique le nombre de sujets ayant préféré le son S_i au son S_j et N le nombre total de sujets ayant participé au test. Dans le cas où il est demandé au sujet d’évaluer la préférence sur une échelle à 3 catégories (i.e. “premier son préféré”, “second son préféré”, “pas de préférence”), la proportion “observée” p_{ij} s’écrit [Dav88] :

$$p_{ij} = \frac{f_{ij} + 0.5 f_{ij}^*}{N} \quad (2.20)$$

où f_{ij} indique le nombre de sujets ayant préféré le son S_i au son S_j , f_{ij}^* indique le nombre de sujets n’ayant préféré aucun des 2 sons et N est le nombre total de sujets ayant participé au test. Les valeurs de la diagonale sont prises égales à 0.5 et les jugements sont supposés symétriques, soit $p_{ij} = 1 - p_{ji}$. Ensuite, les proportions “observées” p_{ij} sont converties en i) scores réduits centrés z_{ij} (matrice \mathbf{Z}), si le cas V de la loi du jugement comparatif est utilisé, ou en ii) valeurs *logit* l_{ij} (matrice \mathbf{L}), si le modèle de Bradley-Terry est utilisé¹⁹. Les éléments z_{ij} ou l_{ij} expriment la différence entre les valeurs de mérite²⁰ des stimuli S_i et S_j . Cependant, la solution du système d’équations (2.14) ou (2.18) est surdéterminée (i.e. plus d’équations que d’inconnues). Aussi, ces équations peuvent être satisfaites “en moyenne” en posant [Dav88] :

$$a_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \delta_{ij} \quad (2.21)$$

où δ_{ij} désigne z_{ij} ou l_{ij} , selon le modèle utilisé ; les termes a_i sont des estimations optimales, au sens des moindres carrés, des valeurs de mérite A_i ($i = 1$ à n) [Dav88]. Ainsi, dans la pratique, les valeurs de mérite estimées a_i sont déterminées en moyennant les vecteurs colonne de la matrice \mathbf{Z} ou \mathbf{L} . Le continuum des valeurs de mérite estimées a_i représente une échelle unidimensionnelle de l’attribut A , métrique du niveau d’intervalles²¹.

¹⁹Lorsque les proportions “observées” p_{ij} sont égales à 0 ou 1, les scores centrés réduits z_{ij} et les valeurs *logit* l_{ij} sont indéterminées (respectivement $-\infty$ ou $+\infty$) ; David [Dav88] recommande de les remplacer respectivement par $\frac{1}{2N}$ et $1 - \frac{1}{2N}$ (N : nombre de sujets).

²⁰Lorsque l’attribut étudié est la préférence (ou un autre attribut qualitatif comme l’agrément, le désagrément, ...), le terme *valeurs de mérite* est souvent employé, notamment dans le domaine de la qualité sonore des habitacles automobiles [OAEL01], pour désigner les valeurs “vraies” des stimuli sur l’échelle psychologique ; par la suite, nous ferons usage de ce terme de manière récurrente.

²¹En fait, cette remarque est, d’une façon générale, valable pour tout modèle RUM pour lequel les variables aléatoires y_i ($i = 1$ à n) sont indépendantes et suivent une même loi de distribution, symétrique.

Concernant le modèle de Bradley-Terry, les estimations p_i des valeurs de mérite π_i — du niveau des rapports — peuvent être obtenues comme suit :

$$p_i = \frac{e^{a_i}}{\sum_{j=1}^n e^{a_j}} \quad (2.22)$$

Dans l'expression (2.22), la division par la somme $\sum_{j=1}^n e^{a_j}$ est introduite afin de respecter la condition imposée par le modèle de Bradley-Terry, i.e. $\sum_{i=1}^n \pi_i = 1$ [Dav88].

2.2.3 Les modèles d'échelonnement multidimensionnel

Les modèles d'échelonnement multidimensionnel (E.M.D.) sont des modèles de représentation spatiale [TD93]. Ces modèles effectuent une transformation sur des données de proximité²² pour les représenter dans un espace de dimensionnalité minimale. Communément, on peut distinguer trois notions fondamentales : les données, la transformation, le type de modèle [Cox82].

- les données se présentent sous la forme d'une ou plusieurs matrices, symétriques ou asymétriques, carrées ou rectangulaires, etc.
- la transformation appliquée aux données est étroitement liée au niveau de la mesure (nominal, ordinal, d'intervalles ou de rapports, Cf. section 2.2.1.2) ; elle peut être monotone, linéaire ou logarithmique.
- le type de modèle (*de distance* ou *de produit scalaire*) conditionne la façon selon laquelle les données pourront être interprétées.

Tout croisement des modalités prises par ces 3 notions donne un modèle E.M.D. différent ; le panel de modèles d'échelonnement résultant est ainsi très large ; aussi, nous ne présenterons ici que quelques exemples choisis de modèles, néanmoins assez illustratifs des jeux de combinaison possibles des 3 caractéristiques mentionnées ci-avant. Pour plus de lisibilité, les modèles sont répertoriés suivant le type de données traité, dissimilarité (Cf. section 2.2.3.1) ou score (Cf. section 2.2.3.2).

2.2.3.1 Modèles d'échelonnement de données de type dissimilarité

Les modèles d'échelonnement traitant ce type de données sont des modèles *de distance* : les objets sont des points positionnés dans un espace euclidien et les distances euclidiennes

²²Il peut s'agir de similarités, dissimilarités, scores, co-occurrences, corrélations, etc.

entre les points représentent les données de dissimilarité. L'obtention d'une solution optimale peut nécessiter l'utilisation d'un processus itératif.

Dans cette section, nous nous bornerons à décrire le modèle de base non métrique, pour illustrer le principe de fonctionnement d'un modèle E.M.D., et à aborder des modèles prenant en compte les différences individuelles, plus complexes, qui sont des extensions du modèle de base.

2.2.3.1.a Le modèle de base

Le modèle de base de Kruskal [Kru64a, Kru64b] porte sur des données ordinales (échelonnement dit non-métrique). Ces données se présentent sous la forme d'une matrice carrée symétrique (2 entrées²³, 1 mode²⁴), dont chacun des éléments indique la dissimilarité entre l'objet (ou stimulus) en ligne et l'objet en colonne.

La transformation monotone sur laquelle repose le modèle suppose que l'information significative se limite au seul ordre hiérarchique des éléments de la matrice de données. Comme les données sont toujours entachées d'une certaine erreur, il n'est en général pas possible de calculer des distances reflétant parfaitement l'ordre des dissimilarités ; Kruskal emploie le terme de "disparités" pour qualifier les valeurs approchées des distances.

Ainsi, l'objectif du modèle est de trouver une configuration de points dans l'espace de représentation, pour laquelle les distances inter-points reflètent au mieux l'ordre hiérarchique des données. Les deux grandeurs "disparités" et "distances" sont reliées par l'expression suivante :

$$\mathbf{D}^\circ = \mathbf{D} + \mathbf{E} \quad (2.23)$$

où \mathbf{D}° est la matrice des disparités, \mathbf{D} la matrice des distances et \mathbf{E} la matrice d'erreurs. L'écart moyen entre les distances et les disparités, mesuré par le *stress*, permet d'évaluer la qualité de la solution obtenue. L'algorithme itératif proposé par Kruskal [Kru64b] cherche ainsi à déterminer une solution (i.e une configuration de points), pour laquelle le stress est minimal.

2.2.3.1.b Les modèles prenant en compte les différences individuelles

A partir du modèle de base, des modèles permettant l'étude simultanée de plusieurs matrices individuelles de données à 2 entrées et 1 mode²⁵ sont vite apparus.

L'un des plus répandus, nommé INDSCAL (INDividual Difference Scaling), a été développé par Carroll et Chang [CC70]. INDSCAL prend en compte les différences individuelles dans les échelonnements, en postulant que les sujets (au nombre de N) ont utilisé les mêmes dimensions pour effectuer les jugements de (dis)similarité sur les paires de stimuli (au nombre de n). Le

²³Le nombre d'entrées d'une matrice de données est simplement égal à sa dimensionnalité.

²⁴Le nombre de modes est le nombre d'ensembles d'objets distincts auxquels les données se réfèrent.

²⁵Ce qui équivaut à l'étude d'une matrice à 3 entrées et 2 modes ; l'un des modes est alors l'entité "stimulus", l'autre est l'entité "individu".

modèle produit les coordonnées x_{jt} des n stimuli dans l'espace commun à p dimensions ($j = 1$ à n , $t = 1$ à p), ainsi que les pondérations w_{it} des sujets ($i = 1$ à N , $t = 1$ à p) qui montrent l'importance que chaque sujet accorde à chacune des dimensions. Le modèle requiert des données d'entrée métriques (i.e. du niveau d'intervalles ou des rapports). L'utilisation d'INDSCAL n'a intérêt que si la dimensionnalité de l'espace est supérieure à 1 ; le cas échéant, le modèle n'apporte pas d'amélioration notable par rapport au modèle de base de Shepard-Kruskal. L'avantage majeur d'INDSCAL par rapport au modèle de base est de donner une signification psychologique aux dimensions de l'espace perceptif de dissimilarité ; leur interprétation s'en trouve ainsi simplifiée. En effet, dans le modèle classique, les distances ne dépendent pas des sujets, le choix des axes est fait de manière arbitraire, le modèle est invariant en rotation ; par conséquent, les axes de l'espace n'ont pas obligatoirement de signification psychologique directe. Dans le modèle INDSCAL, la pondération des distances, calculées à partir des coordonnées des stimuli dans l'espace commun, par le poids "psychologique" accordé par les sujets à chaque dimension rend les axes directement interprétables comme dimensions psychologiques. Aussi, l'espace commun est souvent appelé "espace perceptif" dans les études de qualité sonore (Cf. par exemple [PHS05]). Pour plus de détails concernant l'algorithme itératif d'INDSCAL, on se reportera à la référence [CC70].

Ultérieurement, Takane *et al.* ont proposé le modèle ALSCAL²⁶ (Alternating Least Squares Scaling) ; ce modèle repose sensiblement sur les mêmes postulats qu'INDSCAL, mais, par rapport à INDSCAL, il permet aussi de traiter des données de niveau ordinal ou nominal. En outre, à la différence de l'algorithme itératif d'INDSCAL dont le critère d'arrêt des moindres carrés porte sur des produits scalaires, celui de l'algorithme d'ALSCAL porte sur les carrés des disparités (dans le sens employé par Kruskal) et des distances euclidiennes pondérées.

Certaines études basées sur des simulations de Monte Carlo se sont intéressées à comparer INDSCAL et ALSCAL quant à leur aptitude à recouvrer la structure *vraie* de données de dissimilarité tandis que différents facteurs sont variés (e.g. la transformation monotone des distances *vraies* en dissimilarités, le pourcentage d'erreur adjoint à la transformation, le nombre de sujets, le nombre de stimuli).

Notamment, Weinberg et Menil [WM93] mesurent le recouvrement à l'aide de deux indicateurs, portant sur les deux jeux de paramètres produits par ces modèles, i.e. les coordonnées des stimuli dans l'espace perceptif et la matrice des poids des sujets. Parmi les transformations testées, une première est une transformation linéaire (satisfaisant les hypothèses d'INDSCAL), une seconde est une transformation ordinale, les trois dernières sont des transformations non linéaires. Leurs résultats montrent que, pour chaque transformation étudiée, INDSCAL surclasse ALSCAL de manière significative, et ce quelque soit les modalités prises par les autres facteurs ; les auteurs soulignent la robustesse de l'algorithme INDSCAL vis-à-vis d'une viola-

²⁶Y. Takane, F.W. Young, and J. De Leeuw. Nonmetric individual differences multidimensional scaling : An alternating least squares method with optimal scaling features. *Psychometrika*, 42 :7-67, 1977 (cité dans [CC01]).

tion de l’hypothèse de données du niveau d’intervalles et son utilisation possible pour traiter des données de niveau ordinal.

2.2.3.2 Un exemple de modèle d’échelonnement de données de type score

Les modèles d’échelonnement traitant ce type de données peuvent être des modèles *de distance* ou de *produit scalaire*. Les données se présentent (ou peuvent être réduites) sous la forme d’une matrice rectangulaire à 2 entrées et 2 modes. Cette matrice, notée \mathbf{S} , renferme des scores — nous supposons dans la suite du propos qu’il s’agit de scores de préférence²⁷ — donnés par un jury d’auditeurs (N sujets, en lignes) à un ensemble de stimuli (n stimuli, en colonnes).

MDPREF²⁸ appartient à la famille des modèles *de produit scalaire* [Cox82]. L’objectif du modèle est de représenter dans un espace conjoint les stimuli et les sujets. Plus précisément, le modèle fournit une configuration de n points, représentant les stimuli, et de N vecteurs unitaires passant par l’origine, représentant les sujets. Ces entités sont placées dans l’espace les unes par rapport aux autres de manière à ce que les projections orthogonales²⁹ des points sur chaque vecteur soient en adéquation maximale avec les scores de préférence donnés par chaque sujet aux stimuli (Cf. figure 2.1). Les scores de préférence augmentent de manière continue dans la direction du vecteur sujet ; plus un stimulus se projette “loin” sur le vecteur, plus il est préféré par le sujet.

L’algorithme de MDPREF repose sur la décomposition en valeurs singulières de la matrice de scores \mathbf{S} suivant la procédure d’Eckart-Young³⁰ ; en ce sens, MDPREF s’apparente fortement à l’Analyse en Composantes Principales (ACP) [EP98]. En effet, l’algorithme détermine par diagonalisation les valeurs propres des matrices de covariance majeure (i.e. le produit $\mathbf{S}\mathbf{S}^t$) et mineure (i.e. le produit $\mathbf{S}^t\mathbf{S}$) et leurs vecteurs propres associés ; la magnitude des valeurs propres, communes aux deux matrices de covariance, permet d’estimer le nombre r de facteurs principaux à retenir (Cf. section 6.1.4.3.a). Dans l’espace de représentation de dimensionnalité r , les composantes des vecteurs sujets sont déterminées en calculant le produit de la matrice des r premiers vecteurs propres de $\mathbf{S}\mathbf{S}^t$ par la matrice diagonale des r premières valeurs propres ; les coordonnées des points stimuli sont données par les composantes des r premiers vecteurs propres de $\mathbf{S}^t\mathbf{S}$ [New81].

²⁷Il peut aussi s’agir de toute autre sorte de score, traduisant un jugement prononcé sur les stimuli par les sujets suivant un attribut donné (désagrément, force sonore, etc.).

²⁸J. D. Carroll. Individual differences and multidimensional scaling. In R. N. Shepard, A. K. Romney, et S. B. Nerlove, éditeurs, *Multidimensional Scaling : Theory and Applications in the Behavioral Sciences*, volume 1, pages 105-155. Seminar Press, New York and London, 1972 (cité dans [Cox82]).

²⁹D’où l’appellation “modèle *de produit scalaire*”.

³⁰C. Eckart and G. Young. The approximation of one matrix by another of lower rank. *Psychometrika*, 1 :211-218, 1936 (cité dans [Cox82]).

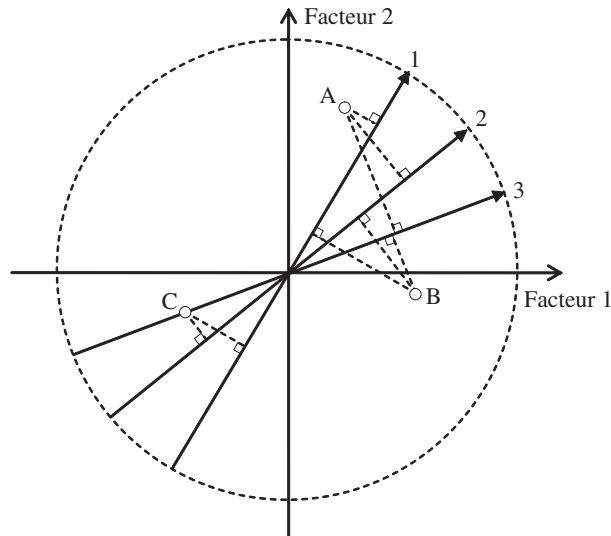


FIG. 2.1 – Schéma illustratif d'un espace de représentation fourni par MDPREF. Soit le cas d'un espace 2D dans lequel sont représentés trois stimuli A, B et C et trois sujets 1, 2 et 3. Dans cet exemple, les projections respectives des points A, B et C sur les vecteurs 1, 2 et 3 reproduisent les scores de préférence donnés par les 3 sujets aux 3 stimuli.

2.3 Conclusions

Dans ce chapitre, nous avons rappelé les principales notions de psychoacoustique nécessaires à la compréhension de la suite de ce travail et défini notamment les différentes métriques psychoacoustiques auxquelles nous pourrions avoir recours pour expliquer les jugements prononcés par les sujets lors des tests d'écoute. Nous avons également exposé différentes méthodes d'évaluation en psychométrie couramment utilisées dans le domaine de la perception auditive, et spécifié leurs avantages et inconvénients. Enfin, plusieurs outils d'analyse ont été présentés (notamment des modèles de choix probabiliste, avec la loi du jugement comparatif et le modèle de Bradley-Terry, et des modèles d'échelonnement multidimensionnel). Certains de ces outils seront utilisés pour exploiter les réponses récoltées lors des tests d'écoute basés sur la méthode de comparaison par paires (Cf. section 6.1).

Chapitre 3

La perception de sons rayonnés par des structures vibrantes

Durant cette dernière décennie, de concert avec l'essor de la qualité sonore [BJ97] dans divers domaines industriels, certaines études académiques, couplant vibro-acoustique et psychoacoustique, se sont intéressées à examiner les relations entre les paramètres physiques de structures vibrantes simples, au comportement vibro-acoustique bien connu, et les attributs auditifs des sons rayonnés par ces structures. Ces études recourent notamment à l'utilisation de méthodes psychométriques issues du domaine de la psychologie expérimentale (vues dans la section 2.2) pour mesurer les sensations auditives induites par la variation de ces paramètres.

Aussi, dans une première section, nous exposerons un état de l'art sur les effets de la variation de paramètres physiques de structures vibrantes simples sur la perception auditive. Notamment, les premières études ont concerné des barres ou des plaques vibrantes ; nous nous bornerons ici à l'évocation des seules plaques. Les études les plus récentes sont relatives au cas d'une plaque couplée à une cavité, auquel nous nous intéressons dans le cadre de ces travaux. Ces différents travaux diffèrent selon la nature du son (son stationnaire ou non-stationnaire) et selon le type d'excitation (mécanique ou acoustique) considérés.

Au-delà d'une évaluation des effets de la variation des paramètres physiques des structures vibrantes sur la perception auditive, plusieurs de ces études couplant vibro-acoustique et psychoacoustique ont particulièrement visé à optimiser la définition de paramètres de simulation (inhérente à l'utilisation d'outils de prédiction vibro-acoustique pour la génération des sons) vis-à-vis des besoins de la synthèse sonore et de l'évaluation auditive. Ces travaux, portant sur une simple plaque bafflée ou sur une plaque couplée à une cavité, seront présentés dans une seconde section.

3.1 Influence de la variation de paramètres physiques sur la perception auditive

3.1.1 Cas d'une simple plaque

De nombreuses études couplant l'analyse du comportement vibro-acoustique d'une structure et l'analyse de la perception des sons qu'elle rayonne se sont concentrées sur le cas d'une simple plaque car cet élément constitue un composant de base d'un grand nombre de structures (bardage, vitrage, tôle en acier ...). L'objectif de ces travaux a notamment été de dresser de premières tendances qualitatives pouvant servir de base pour l'étude de structures plus complexes.

3.1.1.1 Sons non-stationnaires

Roussarie [Rou99] s'intéresse à la perception de sons rayonnés par une plaque — infinie —, frappée par un maillet. Quinze stimuli sont construits à partir d'un modèle de synthèse qui permet de contrôler les différentes pertes énergétiques qui contribuent au phénomène d'amortissement (i.e. pertes viscoélastiques, thermoélastiques et par rayonnement). Deux paramètres mécaniques sont variés simultanément : l'amortissement et l'élasticité de la plaque ; de par la plage de variation choisie pour l'amortissement, les matériaux simulés constituant les différentes plaques sont des matériaux hybrides, entre l'aluminium et le verre.

L'analyse multidimensionnelle des jugements de dissemblance obtenus lors d'une première expérience montre un espace perceptif à deux dimensions. La dimension 1 est liée à l'amortissement et corrélée au paramètre analytique $P_\alpha^{0.3}$ (P_α étant la pente de la droite du coefficient de décroissance de l'enveloppe temporelle α exprimé en fonction de la fréquence). La dimension 2 est corrélée à la fréquence de l'émergence de niveau le plus élevé. À travers une seconde expérience d'identification, l'auteur montre que l'amortissement structural est le paramètre prépondérant utilisé par les auditeurs pour reconnaître le matériau constitutif des plaques.

Meunier *et al.* [MHC01] étudient la relation entre les caractéristiques psychoacoustiques des sons émis par une plaque bafflée immergée dans un fluide lourd et l'agrément porté sur les sons. L'étude traite également de l'influence de certains paramètres physiques des signaux acoustiques sur leur qualité sonore. Les auteurs ont synthétisé 15 sons harmoniques, pour lesquels la pression acoustique rayonnée par la plaque a été calculée à partir de l'accélération vibratoire imposée à sa surface.

Dans un premier temps, deux séries de stimuli sont soumises successivement à un jury d'auditeurs qui estiment le désagrément des sons selon la méthode d'estimation directe des grandeurs. Pour la première série, le niveau original des sons a été conservé (variation maximale en sonie de 33.5 sones) ; pour la seconde série, les niveaux des sons ont été corrigés de manière à ce que la variation en sonie soit réduite (9.3 sones). Les valeurs d'agrément obtenues sont corrélées aux valeurs des métriques psychoacoustiques et physiques calculées (sonie, acuité,

niveaux de pression acoustique en dB et dB(A)). Il apparaît que, pour la série comportant de fortes variations en sonie, la sonie et le désagrément induit par les sons sont très fortement corrélés ($r = 0.96$). Cependant, les résultats obtenus pour la série comportant de faibles variations en sonie montrent que la sonie n'est pas la seule cause de désagrément : l'acuité semble également influencer sur le désagrément.

Pour explorer cette voie, les auteurs mettent en place une seconde expérience : les 15 stimuli sont égalisés en sonie et soumis à des tests de similarité et de préférence selon la méthode de comparaison par paires. Il est également demandé aux auditeurs de juger l'agrément des sons selon la méthode d'estimation directe des grandeurs. L'espace perceptif issu de l'analyse multidimensionnelle des données de similarité comporte trois dimensions : la première dimension est fortement corrélée à la hauteur des sons ($r = -0.93$) ; la seconde dimension est corrélée à leur balance spectrale¹ ($r = -0.82$). La balance spectrale est estimée en calculant la différence entre le niveau de pression acoustique à la fréquence fondamentale et le niveau de pression acoustique de la somme des harmoniques. Cette métrique est bien corrélée à la métrique acuité ($r = -0.72$) ainsi qu'aux valeurs de mérite ($r = 0.86$). Les valeurs d'agrément sont fortement corrélées aux valeurs de mérite ($r = 0.96$). Cette expérience montre que, en l'absence de variation de sonie, les paramètres prépondérants de l'espace perceptif sont la balance spectrale et la hauteur des stimuli sonores.

Canévet *et al.* [CHMD04] s'intéressent aux attributs auditifs et à la qualité de sons générés par une plaque vibrante bafflée, excitée par une force mécanique impulsionnelle.

Les vibrations de la plaque et le champ de pression rayonné sont respectivement calculés selon la méthode de décomposition modale dans le domaine temporel et la formule intégrale de Rayleigh-Kirchhoff. Dix-sept sons sont synthétisés, correspondant à différentes combinaisons des trois paramètres suivants : l'amortissement structural, le point d'impact de l'excitation et la durée de l'excitation. Une analyse temps-fréquence des signaux montre deux parties bien distinctes : une partie "transitoire", qui constitue la réponse à la force excitatrice et une partie "résonante", que les auteurs comparent à la partie réverbérante d'un signal dans une salle. Ces sons sont soumis à un test de dissimilarité selon la méthode de comparaison par paires. D'autre part, l'amortissement perçu et l'agrément des sons sont évalués par les auditeurs selon la méthode d'estimation directe des grandeurs.

L'analyse multidimensionnelle de la matrice de dissimilarité révèle un espace perceptif à trois dimensions. La dimension 1 est associée à un attribut auditif des sons lié à l'amortissement temporel de l'amplitude des signaux dans leur partie "résonante", lui-même résultant de l'amortissement structural de la plaque. De plus, la dimension 1 est clairement corrélée à la sonie partielle des composantes hautes-fréquences des signaux (barks 17 à 24). Tous ces éléments sont liés : l'augmentation de l'amortissement structural contribue à la fois à réduire la durée et l'énergie en hautes-fréquences des signaux. La dimension 2 est liée au caractère tonal

¹*spectral balance* en anglais dans le texte.

(*tonality* en anglais) des sons, qui dépend lui-même de la durée de l’excitation. La dimension 3 est liée à un attribut du timbre des sons dans leur partie “transitoire” (brillance ou acuité). Enfin, les valeurs d’agrément des sons estimées sont fortement corrélées à l’amortissement structural, négativement ou positivement selon les auditeurs : ceux qui n’ont considéré que les sons en eux-mêmes, sans chercher à caractériser la source, ont jugé les sons les moins amortis comme étant les plus agréables ; les autres auditeurs ont plutôt jugé la structure à l’origine des sons et ont considéré les sons les plus amortis comme étant les plus agréables.

3.1.1.2 Sons stationnaires

Hamzaoui *et al.* [HSP⁺02] étudient l’influence de la variation de paramètres structuraux de plaques minces en acier sur la perception auditive.

Dans la première partie de l’étude, la plaque est excitée par une force mécanique ponctuelle avec un spectre de type bruit blanc dans la plage de fréquence [0,2000] Hz. La pression rayonnée, calculée par la méthode intégrale de Rayleigh-Kirchhoff, est fonction des paramètres géométriques et mécaniques de la plaque. Au total, 12 sons stationnaires variant simultanément en épaisseur (1 mm, 1.5 mm, 2 mm), amortissement (10^{-3} , 10^{-2}) et conditions aux limites (simplement appuyée et encastrée), sont synthétisés et soumis à un test de préférence selon la méthode de comparaison par paires. Les résultats montrent que l’amortissement structural est un paramètre déterminant dans l’établissement de la préférence : les sons préférés sont les sons émis par les structures les plus amorties. L’épaisseur apparaît aussi comme un paramètre important ; un modèle de préférence basé sur ces deux paramètres explique les valeurs de mérite obtenues ($R^2=0.74$).

Dans une seconde partie, les auteurs enregistrent avec un mannequin artificiel les sons rayonnés par des plaques et des structures embouties, composées de matériaux différents. Ces sons sont soumis à des tests de similarité et de préférence. Il est observé que la première dimension de l’espace perceptif issu de l’analyse multidimensionnelle des données de similarité est corrélée à la sonie ($r^2 = 0.90$), ainsi qu’à la masse surfacique de la plaque ($r^2 = 0.80$). D’autre part, les valeurs de mérite sont également corrélées à la sonie, ainsi qu’à l’amortissement structural de la plaque. Cette étude met en relief l’effet prépondérant de l’amortissement sur la sonie des sons rayonnés, et la préférence des sujets pour les sons stationnaires les moins “forts”, émis par les structures les plus amorties.

Faure et Marquis-Favre [FMF05, MFF08] s’intéressent à la relation entre le comportement physique d’une plaque et les attributs auditifs des sons qu’elle transmet.

Faure et Marquis-Favre étudient tout d’abord l’effet de la variation de paramètres structuraux d’une plaque en acier sur la perception auditive, et en particulier l’épaisseur, le module d’Young et l’amortissement structural [FMF05]. La plaque, incorporée dans un baffle infini et considérée comme simplement appuyée, est excitée par une onde acoustique incidente oblique

avec un spectre de type bruit blanc. Sa réponse vibro-acoustique est calculée pour plusieurs valeurs de chaque paramètre étudié, un seul paramètre variant à la fois. Les sons sont synthétisés par Transformée de Fourier Inverse à partir de leur spectre de module de pression affecté d'un spectre de phase aléatoire. Chaque série de sons, correspondant à la variation d'un paramètre, est soumise à un jury d'auditeurs auquel il est à la fois demandé de donner un jugement de dissimilarité sur les paires de sons et d'exprimer leur préférence pour l'un des deux sons de la paire.

Pour l'amortissement structural, il apparaît que l'espace perceptif issu de l'échelonnement multidimensionnel des données de dissimilarité comporte une seule dimension. Cette dimension est fortement corrélée à la sonie de Zwicker ($r = -0.992$). La préférence est également expliquée par la variation de sonie : les auditeurs ont préféré les sons de plus faible intensité subjective, correspondant aux plus fortes valeurs d'amortissement. Pour le module d'Young, l'analyse multidimensionnelle révèle un espace perceptif à une seule dimension, corrélée au logarithme de N.F.D ($r = 0.985$), lui-même corrélé à la première fréquence de résonance de la plaque. La métrique physique N.F.D. (Natural Frequency Deviation) quantifie le phénomène de décalage des fréquences de résonance de la plaque lié aux variations du module d'Young. Pour les jugements de préférence, l'analyse en clusters des sujets montre deux groupes. Des valeurs de mérite sont calculées pour les stimuli, et ce séparément pour les deux groupes. Les classements des stimuli selon leur valeur de mérite montrent que le premier groupe de sujets préfère les sons avec plus d'aigus (correspondant à des valeurs élevées de N.F.D., i.e. à des valeurs élevées du module d'Young) tandis que le second préfère les sons avec plus de graves. Ces résultats ne permettent pas de statuer sur une valeur optimale du module d'Young à utiliser pour la conception de ces plaques en verre. Pour l'épaisseur, pour une petite plage de variation (entre 1 et 3 mm), l'analyse de la matrice de dissimilarité montre l'existence d'une seule dimension perceptive, corrélée à la sonie de Zwicker et au logarithme de N.F.D. ($R = 0.997$). Le classement des stimuli selon leur valeur de mérite indique que les sujets ont préféré les sons correspondant aux plus hautes valeurs de l'épaisseur. L'ensemble des résultats montre, d'un point de vue perceptif, l'importance de la précision à accorder aux valeurs d'épaisseur de la plaque.

Marquis-Favre et Faure [MFF08] étudient les effets des conditions aux limites viscoélastiques (uniformes et non-uniformes) d'une plaque en verre, excitée par une onde acoustique incidente oblique avec un spectre de type bruit rose, sur la perception des sons transmis à travers une fenêtre. Plus précisément, l'auteur s'intéresse à l'influence de la variation des caractéristiques des joints d'étanchéité et des conditions de montage du vitrage dans son châssis sur la perception des sons qu'elle transmet.

Pour l'étude des C.L. viscoélastiques uniformes, les différents joints d'étanchéité sont modélisés par quatre sous-structures de masse négligeable dont les propriétés de raideur en rotation et de raideur en translation varient. Au total, 13 stimuli correspondant à différentes combi-

naisons de ces deux paramètres (y compris les cas de conditions aux limites classiques : libre, simplement appuyé, encastré) sont synthétisés. Pour l'étude des C.L. viscolélastiques non uniformes, deux types de châssis sont retenus : le châssis à la française et le châssis oscillo-battant. Pour chacun, les cas suivants sont envisagés : a) deux cas avec calage latéral du vitrage par un joint d'étanchéité (un avec de fortes valeurs des raideurs en translation et en rotation et un avec de faibles valeurs), b) un cas avec cales latérales ponctuelles en bois, c) un cas avec cales latérales ponctuelles en matériau viscoélastique, d) un cas avec cales latérales continues en bois ; soit au total 10 stimuli. Les deux séries de stimuli sont soumises à un test de dissimilarité et à un test de préférence selon la méthode de comparaison par paires.

Pour la variation des C.L. uniformes, l'échelonnement multidimensionnel des jugements de dissimilarité révèle un espace perceptif à deux dimensions. La première dimension est fortement corrélée avec le logarithme de N.F.D. ($r = 0.94$), ainsi qu'avec la tonie de la première fréquence propre de la plaque ($r = -0.92$) ; ces corrélations s'expliquent par l'accroissement de la rigidité globale de la plaque entre les cas extrêmes, libre et encastré. La seconde dimension est fortement corrélée à la sonie de Zwicker ($r = 0.97$). Les valeurs de sonie sont maximales pour les cas de C.L. "mixtes" (c'est-à-dire les cas avec des valeurs intermédiaires des raideurs en translation et en rotation). Un modèle de régression basé sur les deux métriques N.F.D. et sonie explique de manière satisfaisante les notes de préférence ($R = 0.96$). Les auditeurs ont préféré les cas se rapprochant du cas C.L. libre. Il apparaît aussi qu'il est préférable d'avoir une plaque encastrée plutôt qu'une solution de C.L. intermédiaire. Pour la variation des C.L. non uniformes, l'espace perceptif comporte également deux dimensions. De manière générale, les deux types de châssis étudiés n'ont pas été différenciés par les sujets. La dimension 1 est corrélée à la sonie ($r = 0.92$). Les stimuli correspondant à des cales latérales continues et à des cales latérales ponctuelles sont différenciés : ils forment distinctement deux groupes selon la dimension 1. La dimension 2 est fortement corrélée avec la tonie de la première fréquence propre de la plaque ($r = 0.99$), étroitement liée à la rigidité de la plaque. Un modèle de préférence basé sur la sonie et la tonie de la première fréquence propre de la plaque permet d'expliquer à 95% les notes estimées par les auditeurs. Il apparaît que les conditions de montage préférées sont celles avec cales latérales ponctuelles, et en particulier celles avec cales en matériau viscoélastique. Parmi les montages avec calage latéral par joint élastomère, les structures les plus contraintes sont préférées.

Les auteurs donnent ainsi une tendance générale de l'importance de chacun des paramètres sur la perception pour des sons stationnaires transmis par une plaque excitée par une onde plane en incidence oblique et pour un spectre large bande : les paramètres prépondérants sont l'amortissement (variation entre 5×10^{-3} et 8×10^{-2}) et l'épaisseur (variation sur une grande plage de valeurs : 4 à 19 mm) ; les conditions aux limites (CL uniformes et conditions de montage) ont une influence non négligeable sur la perception auditive, supérieure à celle de la variation de l'épaisseur sur une petite plage de valeurs (de 3.8 à 6.2 mm). Cette tendance générale est confirmée par les résultats d'un test d'écoute mettant en jeu simultanément toutes

ces variations [FMF04].

3.1.1.3 Synthèse

Les études menées sur la perception des sons émis par des plaques soumises à une excitation mécanique impulsionnelle [Rou99, MHC01, CHMD04] montrent que la variation de différents paramètres physiques fait naître deux voire trois sensations principales chez les personnes, selon les spécificités de l'étude. Une première sensation semble liée à un attribut du timbre de la partie "résonante" des stimuli sonores, correspondant à la perception de l'amortissement [Rou99, CHMD04]. Une seconde sensation est liée à la hauteur tonale des sons, qui peut dépendre des caractéristiques spatio-temporelles de la source [MHC01, CHMD04], des variations de la densité ou du module d'Young de la plaque [Rou99]. Enfin, l'étude de Canévet *et al.* [CHMD04] révèle une sensation liée à un attribut du timbre (acuité) dans la partie "initiale" des sons ; l'étude de Meunier *et al.* [MHC01], qui traite de sons harmoniques, montre également une sensation liée à un attribut du timbre (balance spectrale).

Il ressort également des études menées pour des sons stationnaires rayonnés par des plaques que l'amortissement est un paramètre prépondérant vis-à-vis de la perception auditive [HSP⁺02, FMF05] ; la sensation induite semble plus liée à la sonie qu'à un attribut du timbre des sons. Pour ce même type de son, il apparaît que la variation de l'épaisseur de la plaque influe également [HSP⁺02, FMF05] ; les sensations induites sont à la fois en rapport avec la hauteur tonale et la sonie des sons rayonnés [FMF05]. Enfin, la variation des conditions aux limites de la plaque a des effets non négligeables sur la perception auditive [MFF08] ; elle provoque des sensations également liées à la sonie des sons et à la tonie de la première fréquence propre de la plaque.

3.1.2 Cas d'une plaque couplée à une cavité

Les études récentes couplant vibro-acoustique et psychoacoustique se sont penchées sur le cas d'une plaque vibrante couplée à une cavité d'air parallélépipédique. En se basant sur un tel système physique, leur objectif consiste à établir des tendances de recommandation pouvant être adaptées à différentes structures vibrantes de notre environnement composées d'éléments couplés à des espace clos. Aussi, ces études partagent certains traits avec de précédents travaux dans les domaines de l'acoustique des salles (e.g. Réfs. [SGS74, BL86, Bar88, SB95]) et de l'acoustique des habitacles automobiles (e.g. Réfs. [Bis97, BHL98, SMW99, Web99]) traitant des aspects qualitatifs des sons.

Tout comme Marquis-Favre et Faure [MFF08], Girardin [Gir04] s'intéresse à l'influence de la variation des conditions aux limites viscoélastiques uniformes d'une plaque en verre sur la perception auditive, mais lorsque celle-ci est couplée à une cavité rigide aux parois parfaitement réfléchissantes. La plaque est également excitée par une onde plane en incidence oblique, avec

un spectre de type bruit rose. Pour 11 cas de conditions aux limites², variant selon les raideurs en translation et en rotation des joints placés sur le pourtour de la plaque, la pression rayonnée par la plaque en deux points intérieurs à la cavité est calculée. Les 11 stimuli synthétisés sont soumis à un test de dissimilarité et à un test de préférence, selon le protocole utilisé par Faure [Fau03]. L’analyse multidimensionnelle des données de dissimilarité fait ressortir un espace perceptif à une seule dimension. Celle-ci est liée à l’acuité ($r = -0.99$), dont la variation est régie par les variations antagonistes de la sonie spécifique dans le bark 1 d’une part, et de la sonie totale³ dans les barks 3 à 5 d’autre part. D’un point de vue physique, la variation de l’acuité est reliée à deux phénomènes vibro-acoustiques : i) le décalage des fréquences propres de la plaque dû à la variation des raideurs en translation et en rotation des joints périphériques, et — en conséquence du premier phénomène — ii) la modification du couplage entre la plaque et la cavité.

L’analyse en clusters des sujets révèle l’existence de deux groupes avec des logiques différentes. Toutefois, les classements de préférence établis pour les deux groupes de sujets comportent un aspect en commun : les sons les plus appréciés sont ceux correspondant à une plaque avec des C.L. “mixtes”, ce qui est en contradiction avec les résultats obtenus par Marquis-Favre et Faure [MFF08] pour une plaque seule bafflée⁴. Ces résultats différents peuvent s’expliquer par l’intervention du couplage vibro-acoustique entre la plaque et la cavité.

Marquis-Favre *et al.* [MFFH05] examinent les relations entre les propriétés acoustiques de différents matériaux absorbants couvrant successivement l’une des parois rigides d’une chambre réverbérante et les attributs auditifs des bruits à large bande enregistrés à l’intérieur de la chambre. Le son est rayonné par une plaque en métal, encastrée dans une autre paroi rigide et mécaniquement excitée par un pot vibrant injectant un effort avec un spectre à large bande. Parmi les matériaux testés figurent des mousses automobiles (d’épaisseur 20 mm ou 40 mm, avec ou sans plénum), une moquette, des dalles de plafond acoustique (d’épaisseur 15 mm, avec ou sans plénum) et une laine minérale de 100 mm d’épaisseur. Les bruits enregistrés sont présentés par paires à un panel d’auditeurs auxquels il est demandé d’évaluer la dissimilarité entre les bruits et d’exprimer un jugement de dominance selon la préférence. Les auteurs montrent que la perception auditive des stimuli est principalement contrôlée par la sonie globale ($r^2 = 0.93$, $p < .001$ entre la dimension 1 de l’espace perceptif révélé et la sonie de Zwicker) et la balance spectrale entre graves et aigus ($r^2 = 0.62$, $p = 0.004$ entre la dimension 2 de l’espace perceptif révélé et l’acuité d’Aures). La variation de la sonie apparaît reliée aux différences de propriétés globales d’absorption parmi les matériaux ; néanmoins, cette plausible relation ne se reflète pas dans la corrélation entre la sonie de Zwicker et l’indice d’évaluation de l’absorption α_w , qui se révèle comme non significative. La variation de la

²Les 11 cas de C.L. étudiés figurent parmi les 13 cas étudiés par Marquis-Favre et Faure [MFF08].

³La sonie totale dans les barks 3 à 5 est calculée par sommation des sonies spécifiques dans les barks 3, 4 et 5.

⁴Pour rappel, les sons correspondant à une plaque avec des C.L. “mixtes” étaient les moins appréciés.

balance spectrale entre graves et aigus est associée aux différences relevées entre les matériaux quant à l'évolution de leur propriétés d'absorption (i.e. leur coefficient d'absorption α) en fonction de la fréquence. Par ailleurs, la sonie apparaît également comme un attribut influant fortement sur la préférence, mais ne suffisant pas à expliquer complètement les valeurs de mérite obtenues. La balance spectrale entre graves et aigus joue également sur la préférence, à la manière d'une variable d'ajustement.

Guibert *et al.* [GHPG06] étudient, pour un système plaque-cavité modélisé, l'influence de la variation de paramètres de nature différente sur la perception de sons rayonnés à l'intérieur de la cavité. Parmi les paramètres étudiés figurent le couple point d'impact sur la plaque / points d'écoute dans la cavité et le coefficient de réflexion R des murs rigides de la cavité. La plaque est excitée par une force mécanique ponctuelle transitoire. Quinze sons, correspondant à différentes combinaisons des modalités prises par les paramètres étudiés, sont générés puis soumis par paires à un jury d'auditeurs auxquels il est demandé d'évaluer la dissemblance entre les sons. Tout d'abord, les auteurs mettent en parallèle les positions des stimuli dans l'espace perceptif avec les combinaisons initiales des paramètres du modèle physique. Ainsi, le couple point d'impact / points d'écoute apparaît comme le paramètre de premier plan influant sur la perception auditive ; suit ensuite le coefficient de réflexion R . L'analyse psychoacoustique menée montre que les deux premières dimensions perceptives sont corrélées à des caractéristiques fréquentielles des sons ; la première dimension perceptive est reliée à leur caractère tonal / bruité, la seconde à leur brillance (décrite par le centre de gravité spectral, $r = 0.872$ entre les coordonnées suivant la dimension 2 et les valeurs du CGS). La troisième dimension perceptive révélée est en rapport avec un attribut temporel des sons : la présence ou l'absence de modulation d'amplitude.

3.2 Ajustement des paramètres de simulation aux besoins de la synthèse sonore et de l'évaluation auditive

3.2.1 Cas d'une simple plaque

Pour une plaque impactée, Demirdjian *et al.* [DMHC05] se sont appliqués à déterminer l'intervalle de fréquences devant être considéré dans les simulations afin que des sons synthétisés à partir d'un modèle physique (basé sur une méthode de décomposition modale) soient aussi proches que possible, d'un point de vue perceptif, des sons enregistrés. À cette fin, le principe de l'expérience psychoacoustique adoptée consiste à évaluer la dissimilarité entre un son enregistré filtré passe-bas selon différentes fréquences de coupure (14 valeurs entre 300 et 8000 Hz) et ce même son non filtré, utilisé comme stimulus de référence. Au total, trois expériences psychoacoustiques sont lancées, concernant trois sons dont les configurations d'enregistrement différent suivant le lieu de l'impact sur la plaque expérimentale. Les résultats des trois tests de dissimilarité montrent que les sons filtrés à 8000 Hz sont perçus comme très similaires au son

de référence. En-deçà de cette valeur de fréquence de coupure, les dissimilarités augmentent progressivement, indiquant ainsi que les composantes fréquentielles dès lors supprimées sont importantes au sens de la perception. Les auteurs définissent en conséquence le nombre de modes de structure à prendre en compte dans leurs simulations vibro-acoustiques pour permettre par la suite une synthèse adéquate des sons (i.e. incorporant toutes les composantes perceptibles, jusqu'à 8000 Hz).

Faure et Marquis-Favre [FMF05] se sont intéressés à évaluer les effets de la variation de paramètres de simulation sur la perception de sons rayonnés par une plaque excitée acoustiquement (par onde plane d'incidences normale ou oblique). Plus précisément, les auteurs visent à ajuster deux paramètres du calcul fréquentiel de la réponse acoustique de la plaque, i.e. la fréquence maximale f_{max} et le pas fréquentiel Δf , de façon à ce que leur valeur n'influe pas sur la perception des sons générés, évitant ainsi toute interférence avec l'évaluation auditive des effets de variations structurales (Cf. section 3.1.1.2). Pour chacun des deux paramètres de simulation étudiés, les auteurs mènent deux tests de discrimination (i.e. un par incidence considérée pour l'onde plane excitatrice) fondés sur la méthode du stimulus constant avec paradigme "Identique/Différent" [Bon86]. Pour une configuration structurale de la plaque donnée, les sujets comparent au cours de chaque expérience psychoacoustique 6 sons "test", chacun correspondant à une valeur "test" du paramètre étudié ($1 \text{ Hz} \leq \Delta f \leq 64 \text{ Hz}$, $8000 \text{ Hz} \leq f_{max} \leq 16000 \text{ Hz}$), à un son de référence, présentant la valeur de référence du paramètre (0.25 Hz pour Δf , 22050 Hz pour f_{max}). Afin de s'affranchir du moindre effet sur la perception auditive qui serait lié à la définition de ces paramètres de simulation, les auteurs adoptent un critère plus contraignant que le Point d'Égalité Subjective [Bon86] ; ils retiennent comme valeur optimale de ces paramètres à utiliser pour le calcul des sons la valeur pour laquelle aucun sujet n'a perçu de différence entre le son "test" et le son de référence. Ainsi, la fréquence maximale de calcul f_{max} est prise égale à 15000 et 16000 Hz respectivement pour une incidence normale et pour une incidence oblique, le pas fréquentiel de calcul Δf égal à 4 et 6 Hz respectivement pour une incidence normale et pour une incidence oblique.

3.2.2 Cas d'une plaque couplée à une cavité

Dans leur étude d'un système plaque-cavité modélisé (Cf. section 3.1.2), Guibert *et al.* [GHPG06] ont également retenu comme paramètre variable un paramètre intrinsèque à la méthode adoptée pour la résolution du problème vibro-acoustique : le nombre de termes utilisés dans la fonction de Green employée pour le calcul de la pression à l'intérieur de la cavité. L'espace perceptif construit montre notamment que les effets de la variation de ce paramètre sur la perception sont faibles devant ceux induits par les autres paramètres variables de l'étude ; ses effets sont avant tout visibles lorsque le coefficient de réflexion R est élevé, i.e. proche de 1. Néanmoins, les auteurs tirent parti de ces observations pour définir le nombre adéquat de termes à prendre en compte dans le calcul de la fonction de Green, i.e. requis afin

de s'affranchir du moindre effet sur la perception auditive.

3.3 Conclusions

Dans ce chapitre, un état de l'art sur les phénomènes liés à la perception de sons rayonnés par des structures vibrantes a été présenté ; plus précisément, notre intérêt s'est porté sur les études couplant vibro-acoustique et psychoacoustique dans le dessein d'évaluer les effets de la variation de paramètres physiques de structures simples sur la perception des sons qu'elles rayonnent. Nous avons pu voir que le cas d'une plaque simple a fait l'objet de nombreux travaux. Ces travaux ont couvert un large panel de paramètres physiques, i.e. des paramètres structuraux (épaisseur de plaque, amortissement et élasticité du matériau, conditions aux limites), d'excitation (type, localisation), et ce pour des sons de nature stationnaire ou non-stationnaire. Puis, nous avons passé en revue certaines études, plus récentes, moins nombreuses, traitant du cas d'une plaque couplée à une cavité parallélépipédique. Ces études se sont pêle-mêle intéressées à évaluer les effets liés à la variation des propriétés en absorption de la cavité et à un déplacement conjoint du point d'application de l'excitation sur la plaque et du point d'écoute dans la cavité.

Pour ces deux structures simples, au comportement vibro-acoustique bien connu, ces travaux ont permis d'établir des liens entre les différents paramètres physiques étudiés et les attributs auditifs des sons rayonnés. Aussi, la plupart de ces études ont mené une investigation sur l'influence des attributs auditifs de ces sons sur leur qualité perçue, mesurée en termes de préférence ou d'agrément. Leurs résultats se sont avérés particulièrement utiles pour fournir des tendances de recommandation en mesure d'améliorer la qualité sonore de ces structures dès l'étape de leur conception.

Les éléments rassemblés via cet état de l'art sur la perception des sons rayonnés par une plaque (simple ou couplée à une cavité) viennent compléter les informations recueillies relativement à l'influence de paramètres physiques sur le comportement vibro-acoustique d'un système plaque-cavité (Cf. section 1.3), en renseignant sur les paramètres également influents d'un point de vue perceptif. Ces enseignements seront pris en considération au moment de décider des paramètres physiques variables à retenir dans le cadre de notre expérimentation (Cf. section 4.2.1).

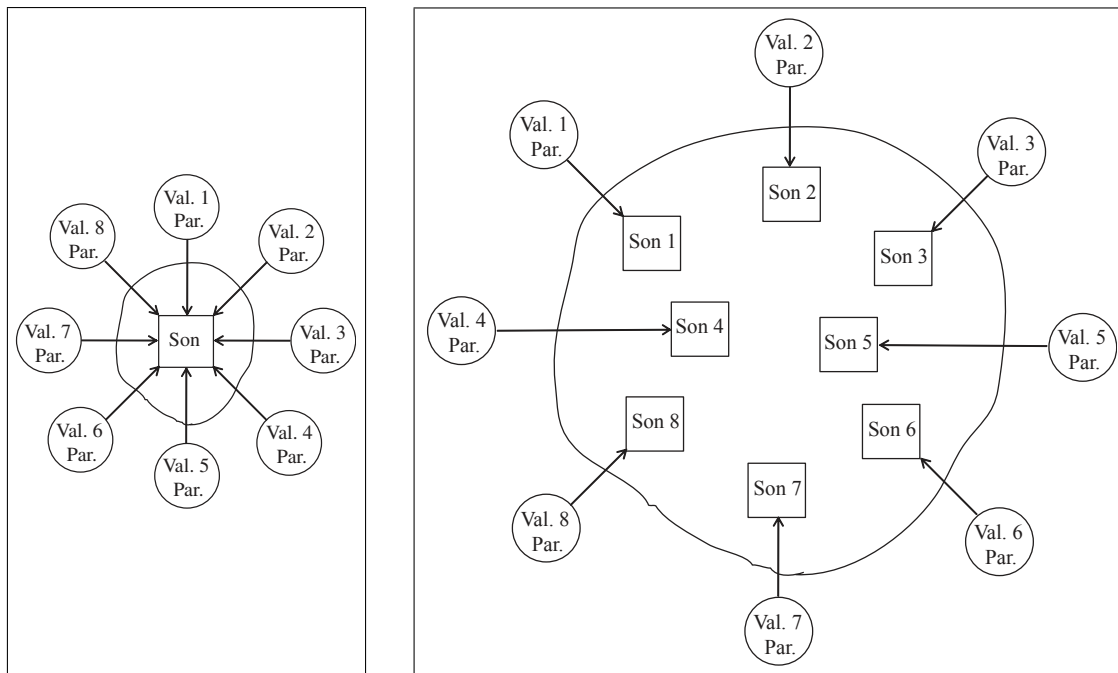
Dans une seconde partie de ce chapitre, nous nous sommes concentrés sur certaines des études qui, en vue de l'utilisation d'outils de prédiction vibro-acoustique pour créer les sons, se sont intéressées en outre à la problématique d'ajustement de paramètres de simulation (notamment fréquentiels) vis-à-vis des besoins mêmes de la synthèse sonore et de l'évaluation auditive. Cette problématique a été abordée à des échelles différentes selon les études. Notamment, certains travaux [DMHC05, FMF05] ont traité cette problématique à l'échelle d'un son⁵ (Cf. figure 3.1(a)), référant à un état structural donné du système étudié. L'objectif est

⁵Ou de plusieurs sons considérés séparément.

alors de sélectionner, parmi un panel de valeurs possibles, une valeur optimale du paramètre de simulation, qui n'entraîne aucune différence dans la perception de ce son. Nous avons ainsi vu que cette sélection était opérée à partir des résultats à un test de dissimilarité ou de discrimination avec comparaison de différents sons (renvoyant à différentes valeurs du paramètre de simulation) à un son de référence (renvoyant à une valeur de référence du paramètre de simulation). D'autres travaux [GHPG06] ont abordé la problématique différemment, à l'échelle d'un ensemble de sons (Cf. figure 3.1(b)). Chaque son se voit attribuer une valeur différente du paramètre de simulation ; chaque son renvoie par ailleurs à une combinaison différente de modalités d'autres paramètres variables étudiés, liés à la structure même. L'objectif reste le même que précédemment, mais la valeur optimale du paramètre de simulation est cette fois-ci déterminée en examinant l'espace perceptif dressé à partir de l'analyse de jugements de dissimilarité, issus d'un test de comparaison par paires portant sur l'ensemble de sons.

L'ajustement de paramètres fréquentiels de simulation vis-à-vis des contraintes perceptives constitue la problématique majeure des travaux présentés dans ce mémoire. En comparaison des précédents travaux, cette problématique sera abordée à une autre échelle encore, i.e. l'échelle de plusieurs ensembles de sons (Cf. figure 3.1(c)). Les sons des différents ensembles référeront à un même lot de combinaisons de modalités de paramètres structuraux du système plaque-cavité, mais les sons d'un même ensemble renverront à une seule valeur du paramètre de simulation, différente selon l'ensemble considéré. L'objectif est ainsi d'ajuster la valeur du paramètre de simulation de manière à ce que les tendances qualitatives⁶ issues de l'évaluation auditive des sons ne diffèrent pas significativement d'un ensemble à l'autre. Ce type d'ajustement devrait conduire à des valeurs de paramètre de simulation à même de réduire plus encore les ressources informatiques requises et les temps de calcul vibro-acoustique. En effet, le critère d'absence d'effet du paramètre de simulation sur les tendances qualitatives est moins contraignant qu'un critère d'absence d'effet de ce paramètre sur la perception auditive ; notamment, tant que la modification du paramètre de simulation n'agit pas de manière trop hétérogène sur les sons, le maintien des tendances qualitatives d'un ensemble de sons à l'autre peut être envisagé, et ce même si les sons renvoyant à une même combinaison de modalités de paramètres structuraux et issus d'ensembles différents ne sont pas similaires d'un point de vue perceptif. Néanmoins, cette procédure d'ajustement est plus lourde du fait que plusieurs ensembles de sons sont à évaluer de manière indépendante. Il sera indispensable de cibler les valeurs du paramètre de simulation à tester.

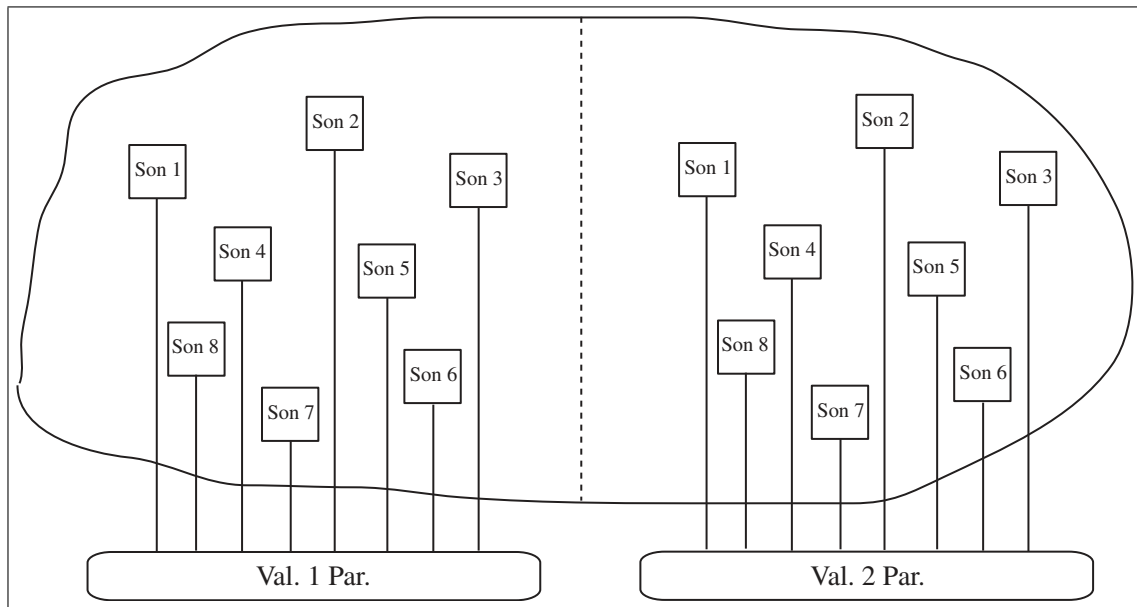
⁶Par "tendances qualitatives", nous entendons des informations d'ordre perceptif, notamment quant aux attributs auditifs utilisés par les auditeurs pour différencier les sons et exprimer des jugements de préférence sur ces sons. Nous entendons également des informations à propos des relations existant entre ces attributs auditifs et les paramètres structuraux variables du système plaque-cavité et des configurations structurales les plus à même d'améliorer la qualité des sons à l'intérieur de la cavité (Cf. chapitre 6).



(a) À l'échelle d'un son : pour cet exemple, 8 valeurs du paramètre de simulation sont testées sur le son, qui renvoie à un état structural donné du système étudié. L'évaluation auditive vise à déterminer l'influence du paramètre de simulation sur la perception de ce son.

(b) À l'échelle d'un ensemble de sons : pour cet exemple, à chacun des 8 sons est attribuée une valeur différente du paramètre de simulation ; chacun des 8 sons renvoie également à une combinaison différente de modalités d'autres paramètres variables du système. L'évaluation auditive porte sur l'ensemble de sons et vise à déterminer simultanément les effets du paramètre de simulation et des autres paramètres sur la perception.

FIG. 3.1 – Les différentes échelles possibles de traitement de la problématique d'ajustement d'un paramètre de simulation aux contraintes perceptives (les échelles sont matérialisées par les contours tracés à main levée).



(c) À l'échelle de plusieurs ensembles de sons : pour cet exemple, les sons des deux ensembles (séparés par le trait en pointillés) réfèrent à un même lot de combinaisons de modalités de paramètres structuraux du système ; mais une même valeur du paramètre de simulation est assignée aux sons de chaque ensemble, différente d'un ensemble à l'autre. On cherchera à comparer les tendances qualitatives issues d'évaluations auditives réalisées séparément sur les deux ensembles de sons.

FIG. 3.1 – Les différentes échelles possibles de traitement de la problématique d'ajustement d'un paramètre de simulation aux contraintes perceptives (les échelles sont matérialisées par les contours tracés à main levée). *(suite et fin)*

Deuxième partie

Élaboration d'un corpus de sons réels via l'expérimentation

Chapitre 4

La mise en œuvre de l'expérimentation

Le processus d'ajustement des paramètres fréquentiels des sons vis-à-vis des contraintes perceptives vise expressément la conservation de tendances qualitatives obtenues à partir de l'évaluation auditive de sons réels. Ce processus d'ajustement est mené pour des sons rayonnés par une plaque vibrante à l'intérieur d'une cavité parallélépipédique, et ce dans différentes configurations structurales. Ce chapitre vise ainsi à décrire l'expérimentation menée pour acquérir les sons réels.

Dans une première section, nous présenterons le dispositif expérimental retenu ; nous spécifierons notamment les caractéristiques du système plaque-cavité et le type d'excitation appliqué à la plaque.

L'élaboration des configurations structurales, proposée dans une seconde section, s'appuie sur un plan d'expériences factoriel fractionnaire. Nous exposerons précisément les paramètres structuraux retenus comme facteurs variant d'une configuration à l'autre ainsi que le type de plan employé afin de définir les combinaisons de modalités* des paramètres structuraux assignées aux différentes configurations.*

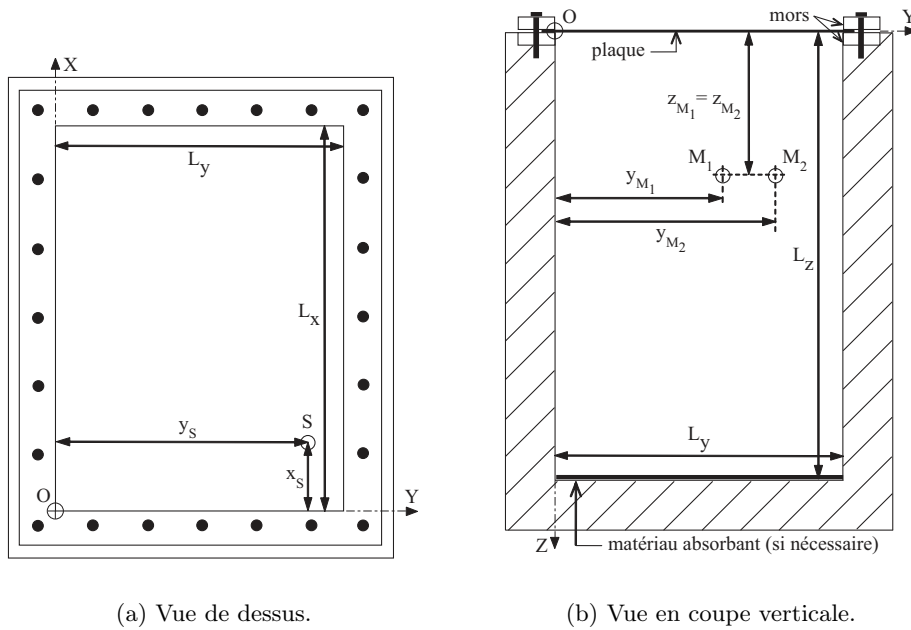
Dans une dernière section, nous présenterons la campagne de mesures expérimentales, acoustiques et vibratoires, pratiquées sur les différentes configurations. Nous spécifierons le protocole suivi pour chaque type de mesure. Puis, nous discuterons de l'élaboration des stimuli à partir des enregistrements sonores réalisés ; ces stimuli forment le terreau pour l'ensemble des tests d'écoute réalisés dans le cadre de ces travaux. Enfin, nous proposerons une analyse des effets de la variation des paramètres structuraux sur la réponse vibro-acoustique du système plaque-cavité.

*Cf. définition donnée dans la section [D.1](#).

4.1 Définition du dispositif expérimental

4.1.1 Les caractéristiques du système plaque-cavité

La cavité est une cuve en béton de dimensions intérieures, en m, $(L_x, L_y, L_z) = (0.6, 0.5, 0.7)$. L'utilisation du matériau béton pour les parois de la cavité permet d'approcher au mieux les conditions de paroi rigide théoriques (i.e. vitesse particulière nulle sur la paroi). Le système plaque-cavité est schématisé sur la figure 4.1; le repère de la plaque $(O X Y Z)$, ultérieurement pris comme référence pour exprimer la position des points d'excitation et de réception, est reporté sur la figure. La plaque en acier, de surface "mouillée"¹ S_V égale à L_x



(a) Vue de dessus.

(b) Vue en coupe verticale.

FIG. 4.1 – Le système plaque-cavité expérimental. S : position de l'excitation mécanique, M_1 et M_2 : position des microphones.

$\times L_y$, est posée sur la face supérieure de la cuve et maintenue en place par des mors en acier vissés sur le bâti de la cuve à l'aide d'une clé dynamométrique (Cf. figure 4.2).

4.1.2 Choix de la position de l'excitation mécanique

L'excitation mécanique ponctuelle est appliquée à la plaque à l'aide d'un pot vibrant (Cf. figure 4.2), au point S de coordonnées (en m) : $(x_S, y_S, z_S) = (0.10, 0.425, 0)$; la position de l'excitation mécanique est reportée sur la figure 4.1(b). Le spectre d'excitation est un spectre large bande ($[0, 20000]$ Hz) de type bruit rose, proche de celui de sources de bruit environnementales. Le choix du point d'application de l'excitation a fait l'objet d'une étude préalable

¹i.e. surface en contact avec le fluide interne.

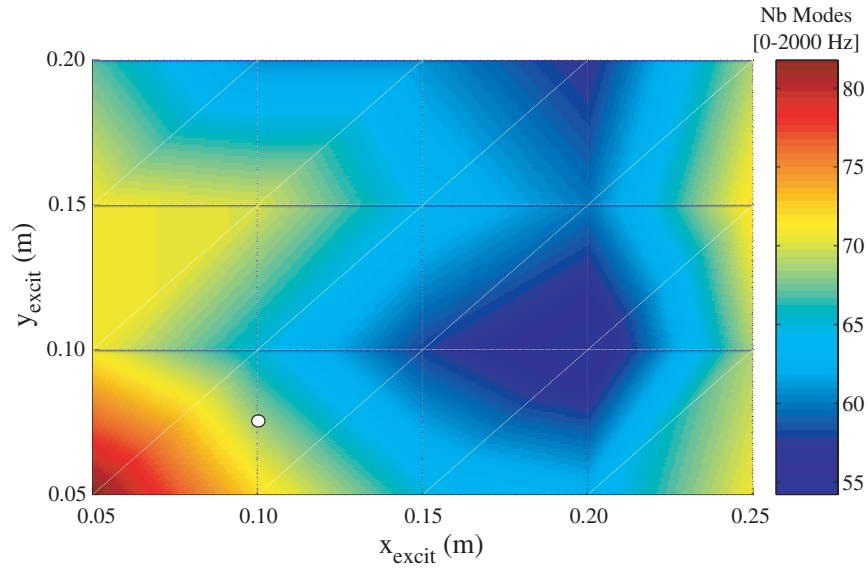


FIG. 4.2 – Vue d’ensemble sur le banc de mesure.

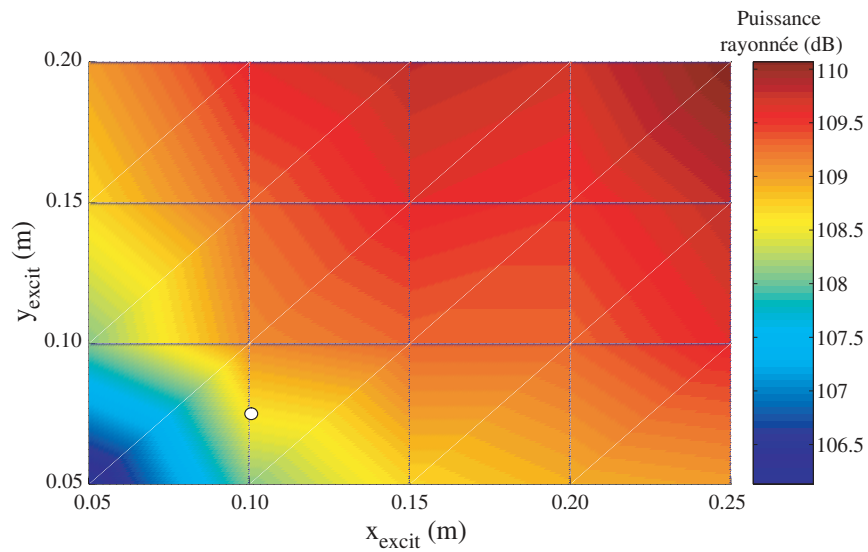
sous le logiciel ADNR © Mecanum Inc. : cette étude — qualitative — est réalisée pour une plaque bafflée en acier, de dimensions $L_x \times L_y$, d’épaisseur 1.5 mm, simplement appuyée et excitée par une force mécanique ponctuelle harmonique d’amplitude 1 N. La position sélectionnée répond à un compromis entre un nombre élevé de modes de plaque excités dans le domaine modal $[0, 2000] \text{ Hz}^2$ et une puissance acoustique rayonnée importante. Les figures 4.3(a) et (b) montrent l’influence de la position de l’excitation mécanique respectivement sur le nombre de modes de plaque excités et sur la puissance acoustique rayonnée. Sur les graphiques, x_{excit} et y_{excit} représentent les coordonnées du point d’excitation dans un repère centré sur un coin quelconque de la plaque ; les valeurs des deux indicateurs sont calculées par pas de 0.025 m. La position choisie, i.e. $(x_{excit}, y_{excit}) = (0.10, 0.075)$ ³, est repérée par un cercle sur les graphiques. En outre, la figure 4.4 montre les spectres de puissance acoustique rayonnée calculés pour 3 positions représentatives de l’excitation mécanique, i.e. une position excentrée $(x_{excit}, y_{excit}) = (0.05, 0.05)$, la position choisie et une position quasi-centrale $(x_{excit}, y_{excit}) = (0.25, 0.20)$.

²La fréquence limite de champ diffus calculée pour la plaque étudiée s’élève à 2194 Hz.

³Ce qui correspond aux coordonnées $(x_s, y_s, z_s) = (0.10, 0.425, 0)$ dans le repère de la plaque $(OXYZ)$.



(a) Nombre de modes excités entre 0 et 2000 Hz.



(b) Puissance acoustique rayonnée.

FIG. 4.3 – Influence de la position de la force ponctuelle (x_{excit}, y_{excit}) sur le nombre de modes de plaque excités sur le domaine $[0, 2000]$ Hz et la puissance acoustique rayonnée par la plaque (étude réalisée sous le logiciel ADNR © Mecanum Inc.). \circ : position choisie de la force ponctuelle.

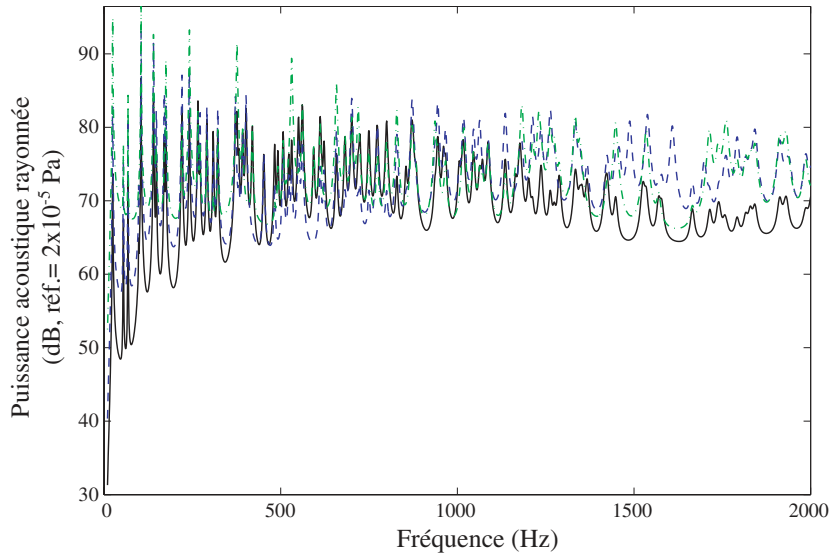


FIG. 4.4 – Spectres de puissance acoustique rayonnée calculés sous ADNR © Mecanum Inc. pour 3 positions représentatives de l’excitation mécanique. — : position excentrée $(x_{excit}, y_{excit}) = (0.05, 0.05)$, - - : position choisie $(x_{excit}, y_{excit}) = (0.10, 0.075)$, — - : position quasi-centrale $(x_{excit}, y_{excit}) = (0.25, 0.20)$.

4.2 Élaboration des configurations structurales

4.2.1 Définition des paramètres structuraux variables et de leurs modalités

Le choix des paramètres structuraux variant d’une configuration à l’autre a été guidé par les résultats des études précédentes portant sur la perception auditive des sons rayonnés par des structures vibrantes (Cf. chapitre 3). Notamment, nous avons sélectionné trois paramètres structuraux déjà identifiés comme prééminents d’un point de vue perceptif. Deux premiers paramètres concernent la plaque en acier ; il s’agit de son épaisseur et de ses conditions de montage (il s’agira plus précisément de ses conditions de serrage dans le cadre de notre expérimentation). Leurs effets sur la perception auditive ont été mis en exergue dans les cas d’une plaque simple bafflée [FMF05, HSP⁺02, MFF08] et d’une plaque couplée à une cavité [Gir04]. Nous adjoignons à ces deux premiers paramètres les propriétés en absorption de la cavité, dont les effets sur la perception auditive ont été montrés comme importants au travers des études traitant d’une plaque couplée à une cavité [GHPG06, MFFH05].

Ainsi, le choix de ces paramètres structuraux n’est pas à proprement parler original. Toutefois, leur association n’a pas encore été étudiée ; il sera donc intéressant d’estimer leur influence relative sur la perception des sons rayonnés, et ce pour le domaine d’étude choisi, défini par les modalités extrêmes retenues pour ces trois paramètres (voir ci-après). En outre, par ce choix (des paramètres et de leurs modalités), le parti-pris affiché est de s’assurer que des effets liés aux variations structurales contrôlées seront “observables” d’un point de vue perceptif ; après quoi, nous pourrons nous pencher sur la problématique qui nous intéresse : ajuster des

paramètres de simulation d'outils de calcul vibro-acoustique de manière à réduire les temps de calcul et les ressources informatiques nécessaires tout en conservant les tendances qualitatives relatives à l'influence de la variation des paramètres structuraux du système.

Pour chaque paramètre structural, trois modalités sont définies pour permettre l'évaluation des effets de sa variation. Les modalités des trois paramètres structuraux sont reportées dans le tableau 4.1.

Label	Paramètre	Modalité		
		1	2	3
α	Épaisseur de la plaque	1.5×10^{-3} m	2×10^{-3} m	3×10^{-3} m
β	Propriétés en absorption de la cavité	faibles (pas de couche absorbante)	moyennes (une couche de moquette d'épaisseur 5 mm)	fortes (une couche de mousse d'épaisseur 2 cm)
γ	Conditions de serrage de la plaque	faibles ($C = 20$ N.m)	moyennes ($C = 50$ N.m)	fortes ($C = 80$ N.m)

TAB. 4.1 – Définition des modalités des paramètres structuraux

Les épaisseurs de plaque retenues (α) sont des épaisseurs de tôle en acier dont la commercialisation est très répandue. Les modalités des propriétés en absorption de la cavité (β) résultent de l'application (ou non) d'une couche de matériaux absorbants différents sur le fond de la cuve en béton (Cf. figure 4.1). Les matériaux sélectionnés sont des matériaux couramment utilisés dans le secteur automobile : une mousse réticulée (à réseau de pores connectés) d'épaisseur 2 cm et une moquette synthétique d'épaisseur 5 mm. La courbe d'évolution de leur coefficient d'absorption acoustique en incidence normale $\alpha_{\theta=0^\circ}$ en fonction de la fréquence (en tiers d'octave) est présentée sur la figure B.3. Enfin, les modalités des conditions de serrage de la plaque (γ) correspondent à différentes valeurs du couple de serrage C , relevées sur la clé dynamométrique ; les trois conditions de serrage résultantes équivalent pour la plaque à des conditions aux limites se répartissant de façon relativement uniforme entre des conditions théoriques d'appui simple et d'encastrement.

4.2.2 Usage des plans d'expériences factoriels fractionnaires

Un *plan d'expériences factoriel complet*, où toutes les combinaisons possibles entre les modalités des facteurs contrôlés (i.e. les paramètres structuraux variables) sont étudiées, paraît difficilement réalisable en raison du nombre trop important d'*essais*⁴ engendré ($3^3 = 27$ essais).

⁴Un *essai* désigne dans notre cas une configuration structurale du système plaque-cavité.

Dans le cadre de cette étude expérimentale, on cherchera plutôt à retenir un nombre réduit de combinaisons entre les modalités des facteurs, permettant néanmoins une évaluation des effets des variations structurales sur la perception auditive. A cette fin, les *plans d'expériences factoriels fractionnaires* [Pil97] sont particulièrement utiles ; pour 3 facteurs à 3 modalités, nous adoptons la table standard de Taguchi $L_9(3^4)$, qui permet de définir 9 premières configurations structurales du système plaque-cavité (Cf. tableau 4.2, configurations *A* à *I*).

Config.	α	β	γ
A	1	1	1
B	1	2	2
C	1	3	3
D	2	3	1
E	2	1	2
F	2	2	3
G	3	2	1
H	3	3	2
I	3	1	3
J	1	1	3
K	3	3	3

TAB. 4.2 – Plan d'expériences.

Deux configurations complémentaires (Cf. tableau 4.2, configurations *J* et *K*) sont ajoutées pour disposer au final d'un plus grand nombre de stimuli.

4.3 Campagne de mesures expérimentales

4.3.1 Vue d'ensemble

L'ensemble des mesures réalisées sur le banc de mesure est récapitulé dans le tableau 4.3.

Pour les 9 essais du plan fractionnaire L_9 , des mesures de la vitesse vibratoire de la plaque sont réalisées, selon le protocole décrit dans la section 4.3.2.1.

En outre, une première mesure acoustique est réalisée pour l'intégralité des configurations, en suivant le protocole décrit dans la section 4.3.2.2.

Pour les 9 essais du plan fractionnaire L_9 , une seconde mesure acoustique est accomplie, en suivant un protocole en tout point identique à celui observé pour la réalisation de la première mesure. Dans la pratique, pour chacun des essais concernés, cette seconde mesure est lancée à la suite de la première, après qu'il est procédé à un démontage/remontage de ladite configuration. La réalisation de cette seconde série de mesures a été décidée après l'observation, lors d'essais préliminaires de répétabilité, de disparités, mesurées malgré tout, entre les signaux acoustiques justement acquis avant et après un démontage/remontage d'une même configuration expérimentale. Ainsi, la répétition de la mesure acoustique pour ces 9 configurations est destinée à rendre possible une évaluation auditive de la fiabilité du banc de

Config.	Mesures vibratoires	1 ^{ère} mesure acoustique	2 ^{nde} mesure acoustique
A	X	X	X
B	X	X	X
C	X	X	X
D	X	X	X
E	X	X	X
F	X	X	X
G	X	X	X
H	X	X	X
I	X	X	X
J		X	
K		X	

TAB. 4.3 – Récapitulatif des différentes mesures réalisées.

mesure. Nous chercherons plus précisément à évaluer l'influence de la dispersion de la mesure acoustique sur la perception des sons rayonnés (Cf. chapitre 5).

4.3.2 Protocoles de mesure

4.3.2.1 Mesures vibratoires

Les mesures de vitesse vibratoire normale de la plaque sont réalisées à l'aide d'un vibromètre laser à balayage Polytec PSV-400 (Cf. figure 4.2).

On adopte un maillage vibratoire fin constitué de 5185 points de mesure, commun à toutes les séries de mesures (i.e. inchangé quelque soient l'épaisseur et les conditions de serrage de la plaque). Le nombre de points fixé suivant chacune des dimensions (85 suivant l'axe (OX), 61 suivant l'axe (OY)) répond à un critère de maillage théorique utilisé dans les modélisations par éléments finis afin de définir le nombre minimal d'éléments nécessaires pour représenter de manière adéquate la déformée du mode structural de plus petite longueur d'onde ; ce critère stipule que le nombre d'éléments doit être choisi de façon à ce que la longueur des éléments soit 6 fois inférieure à la plus petite longueur d'onde étudiée (Cf. section A.4.1.1). Le nombre de points ici retenu permet de prendre en compte convenablement les modes de structure jusqu'à 5000 Hz, et ce dans le cas le plus défavorable (plaque d'épaisseur 1.5 mm avec les conditions de serrage les plus proches de conditions d'appui simple).

4.3.2.2 Mesures acoustiques

Le son rayonné par la plaque vibrante est enregistré à l'aide de microphones 1/2 pouces omnidirectionnels B&K (avec un angle de 0°) placés en deux points de réception intérieurs à la cuve M_1 et M_2 , de coordonnées respectives $(x_{M_1}, y_{M_1}, z_{M_1}) = (0.22, 0.26, 0.145)$ et $(x_{M_2}, y_{M_2}, z_{M_2}) = (0.22, 0.38, 0.145)$; la position des micros est reportée sur la figure 4.1(b).

L'acquisition du son (d'une durée de 30 secondes environ) est réalisée à l'aide d'un PC équipé d'une carte son haute qualité LynxONE © Lynx Studio Technology et du logiciel Sound Quality © M.T.S., avec une fréquence d'échantillonnage égale à 44100 Hz et une résolution de 16 bits.

4.3.3 Formation des stimuli sonores pour l'évaluation auditive

Chaque séquence sonore enregistrée est réduite à un échantillon court de quatre secondes. Un fade-in et un fade-out de 20 ms sont appliqués respectivement au début et à la fin de chaque échantillon pour éviter la présence de "clics" (produits par des valeurs de pression nulles) à la restitution sonore. Puis, les échantillons sont stockés dans des fichiers de données au format UNV, afin de conserver une information absolue (i.e. en Pa) sur les valeurs de pression.

Par la suite, les échantillons sont corrigés par la fonction de transfert inverse du casque ouvert Sennheiser HD600⁵ utilisé lors des tests d'écoute. Dans la pratique, cette correction est réalisée sous Matlab © Mathworks : après lecture des fichiers de données au format UNV, les signaux stéréophoniques sont déconvolués par la réponse impulsionnelle du casque d'écoute. Puis, les signaux corrigés ainsi obtenus sont encodés dans des fichiers audio au format WAV avec une fréquence d'échantillonnage égale à 44100 Hz et une résolution de 16 bits. Sous Matlab, le codage sur 16 bits des valeurs d'amplitude est réalisé dans l'intervalle $[-1, +1]$ (soit $2^{16} - 1$ valeurs d'amplitude possibles comprises entre -1 et +1). Aussi, pour réaliser un codage optimal⁶ tout en conservant les différences relatives de niveau existant entre les signaux corrigés, les valeurs de pression de chaque signal sont, juste avant encodage, divisées par la valeur maximale détectée sur l'ensemble des signaux corrigés.

La désignation des stimuli sonores ainsi formés (20 au total), à laquelle nous nous référerons dans la suite de ces travaux, est donnée dans le tableau 4.4.

⁵La mesure de la fonction de transfert du casque en position d'écoute a été réalisée en suivant une démarche similaire à celle utilisée par Faure ; celle-ci est détaillée dans [Fau03].

⁶i.e. pour i) éviter la saturation du signal, et ii) utiliser toute la dynamique offerte.

Config.	1 ^{er} enregistrement sonore	2 nd enregistrement sonore
A	A ₁	A ₂
B	B ₁	B ₂
C	C ₁	C ₂
D	D ₁	D ₂
E	E ₁	E ₂
F	F ₁	F ₂
G	G ₁	G ₂
H	H ₁	H ₂
I	I ₁	I ₂
J	J ₁	-
K	K ₁	-

TAB. 4.4 – Désignation des stimuli associés aux configurations.

4.3.4 Analyse des effets de la variation des paramètres structuraux sur la réponse vibro-acoustique du système plaque-cavité

4.3.4.1 Remarques préliminaires

4.3.4.1.a Indicateurs vibro-acoustiques

Les effets de la variation des paramètres structuraux sur la réponse vibro-acoustique du système plaque-cavité étudié⁷ sont illustrés à partir de l'examen des spectres des indicateurs vibro-acoustiques disponibles à partir des mesures réalisées, soit :

- i) Le spectre de niveau de vitesse quadratique moyenne de la plaque :

$$L_v(f) = 10 \times \log_{10} \left(\frac{\langle |\bar{v}_n(M_s, f)|^2 \rangle_{S_V}}{v_{ref}^2} \right) \quad (4.1)$$

où v_{ref} est la vitesse vibratoire de référence, égale 5×10^{-8} m/s, et $\langle |\bar{v}_n(M_s, f)|^2 \rangle_{S_V}$ est le spectre de vitesse quadratique moyenne⁸ donné par :

$$\langle |\bar{v}_n(M_s, f)|^2 \rangle_{S_V} = \frac{1}{S_V} \int_{S_V} |\bar{v}_n(M_s, f)|^2 dS_V \quad (4.2)$$

où S_V est la surface “mouillée” de la plaque ; $|\bar{v}_n(M_s, f)|$ correspond, pour un point M_s du maillage vibratoire, à la moyenne des modules des spectres calculés par Transformée de Fourier à Court Terme [OSB99] — *Short-Time Fourier Transform* en anglais (STFT) — à partir du signal $v_n(M_s, t)$ enregistré avec le vibromètre laser. Le paramétrage utilisé pour le calcul de la STFT⁹ est détaillé dans la section C.1.

Rappelons que les mesures vibratoires ont été réalisées pour les seules 9 configurations du plan fractionnaire L_9 , ce qui ne rend *a priori* pas possible une évaluation indépendante des effets liés à la variation de chaque paramètre structural sur la réponse vibratoire de la plaque. Néanmoins, d'après les éléments présentés dans la section 1.2 (Cf. travaux de Cheng [Che89]), on peut arguer que sa réponse vibratoire n'est quasiment pas affectée par la variation des propriétés en absorption de la cavité car le couplage entre la plaque et la cavité est, pour le système plaque-cavité expérimental étudié, faible. De ce fait, il sera possible, à partir de l'examen des spectres de niveau de vitesse quadratique moyenne appropriés, d'évaluer séparément les effets sur la réponse vibratoire de la plaque liés à i) la variation de son épaisseur (Cf. section 4.3.4.3), et à ii) la variation de ses conditions de serrage (Cf. section 4.3.4.4).

- ii) Les spectres de niveau de pression acoustique aux points M_1 et M_2 intérieurs à la

⁷Ces effets ont été évoqués dans la revue bibliographique sur le comportement vibro-acoustique d'une plaque couplée à une cavité amortie exposée au chapitre 1.

⁸Le symbole $\langle \langle \rangle \rangle$ est généralement utilisé pour indiquer une moyenne sur des variables d'espace.

⁹Réalisé avec le logiciel PSV-400 © Polytec.

cavité :

$$L_{p_1}(f) = 10 \times \log_{10} \frac{|\bar{p}(M_1, f)|^2}{p_0^2} \quad (4.3)$$

$$L_{p_2}(f) = 10 \times \log_{10} \frac{|\bar{p}(M_2, f)|^2}{p_0^2} \quad (4.4)$$

où p_0 est la pression acoustique de référence, égale à 2.10^{-5} Pa ; $|\bar{p}(M_1, f)|$ et $|\bar{p}(M_2, f)|$ correspondent à la moyenne des modules des spectres calculés par STFT à partir des échantillons stéréophoniques de 4 secondes issus de la première série de mesures acoustiques, non corrigés par la fonction de transfert inverse du casque. Le paramétrage utilisé pour le calcul de la STFT¹⁰ est détaillé dans la section C.1. En exemple, le spectre $L_{p_2}(f)$ mesuré pour le stimulus K_1 ($[0, 20000]$ Hz) est donné sur la figure C.1.

4.3.4.1.b Analyse modale

En vue de l'illustration, une analyse modale sommaire est réalisée dans le domaine des basses et moyennes fréquences. Aux plus hautes fréquences, l'analyse modale devient impossible en raison des amortissements moyens et du couplage inter-modal élasto-acoustique. Tout d'abord, il est procédé à la détermination des modes couplés contrôlés par la plaque (notés S_1, S_2 , etc.) pour les configurations A à I : en balayant en fréquence les spectres de niveau de vitesse quadratique moyenne de la plaque¹¹, les modes couplés contrôlés par la plaque sont déterminés à partir de la reconnaissance des déformées modales de la plaque¹² ; leurs caractéristiques, indices¹³ (m,n) et fréquences propres f_{mn} , sont reportées dans le tableau C.1.

La détermination des modes couplés contrôlés par la cavité (notés A_1, A_2 , etc.) à partir de la reconnaissance des déformées modales de la cavité ne peut être réalisée ; en effet, les mesures acoustiques ont été limitées à l'enregistrement du son rayonné par la plaque aux deux points intérieurs à la cavité M_1 et M_2 (Cf. section 4.3.2.2). Nous disposons seulement des fréquences propres théoriques f_{qrs}^{theo} des modes¹⁴ (q,r,s) de la cavité nue rigide (Cf. tableau C.2) ; leur calcul est réalisé sous `Plaqcav` (Cf. section A.3.1 pour une description de ce code semi-analytique).

Aussi, sur les spectres des deux indicateurs vibro-acoustiques, lorsque les fréquences de résonance des modes couplés contrôlés par la cavité et des modes couplés contrôlés par la plaque sont relativement bien distinctes, les pics de résonance liés à des modes couplés contrôlés par la cavité peuvent être identifiés avec l'appui des fréquences propres théoriques précédemment

¹⁰Réalisé avec le logiciel dBsonic © Cortex Instruments - 01dB Metravib Technologies [Cor04].

¹¹Jusqu'à une fréquence maximale allant de 700 à 950 Hz environ, suivant la configuration considérée.

¹²Cette opération est réalisée à l'aide de la Laser ToolBox développée par Quentin Leclerc (LVA) sous Matlab © Mathworks.

¹³Les indices m et n sont respectivement associés aux axes (OX) et (OY) (Cf. figure 4.1).

¹⁴Les indices q, r et s sont respectivement associés aux axes (OX) , (OY) et (OZ) (Cf. figure 4.1).

calculées, et ce après identification des pics de résonance liés à des modes couplés contrôlés par la plaque.

Par contre, dans le cas où les fréquences de résonance d'un mode couplé contrôlé par la cavité et d'un mode couplé contrôlé par la plaque sont très proches, leur contribution respective au pic de résonance observé est plus ou moins appréciable selon l'indicateur vibro-acoustique. Sur les spectres de niveau de vitesse quadratique moyenne, la contribution du mode couplé contrôlé par la plaque au pic de résonance est vraisemblablement prééminente. En effet, pour un faible couplage entre la plaque et la cavité, la réponse vibratoire de la plaque n'est pratiquement pas affectée par la présence de la cavité ; la réponse vibratoire de la plaque est gouvernée par les modes couplés contrôlés par la plaque. *A contrario*, sur les spectres de niveau de pression locale, à défaut d'autres indicateurs vibro-acoustiques tels que la puissance acoustique rayonnée par la plaque¹⁵ et le niveau de pression quadratique moyenne¹⁶, on ne peut proprement apprécier la contribution de chaque mode au pic de résonance.

Notons que le tableau C.3 propose, pour les stimuli A_1 à K_1 , une identification de modes couplés à l'origine de pics de résonance visibles sur les spectres de niveau de pression aux points intérieurs à la cavité M_1 et M_2 ¹⁷.

4.3.4.2 Effets de la variation des propriétés en absorption de la cavité sur la réponse vibro-acoustique du système plaque-cavité

La figure 4.5 porte à la comparaison les spectres de niveau de pression mesurés au point M_2 pour les stimuli I_1 et K_1 , i.e. pour les modalités extrémales des propriétés en absorption de la cavité (pas de couche de matériau absorbant et une couche de mousse réticulée au fond de la cuve), l'épaisseur et les conditions de serrage de la plaque restant inchangées (épaisseur de 3 mm et fortes conditions de serrage).

On peut observer les deux types d'effet caractéristiques dûs à la présence de la couche de mousse réticulée sur le fond de la cuve :

- Les effets de masse ajoutée, qui se traduisent par un décalage vers les basses fréquences des pics de résonance liés à des modes couplés contrôlés par la cavité¹⁸ : par exemple,

¹⁵Utile à la détermination des modes de vibration de la plaque qui rayonnent acoustiquement à l'intérieur de la cavité.

¹⁶Utile à la détermination des modes de cavité excités par les vibrations de la plaque.

¹⁷Jusqu'à une fréquence maximale allant de 700 à 900 Hz environ, suivant le stimulus considéré.

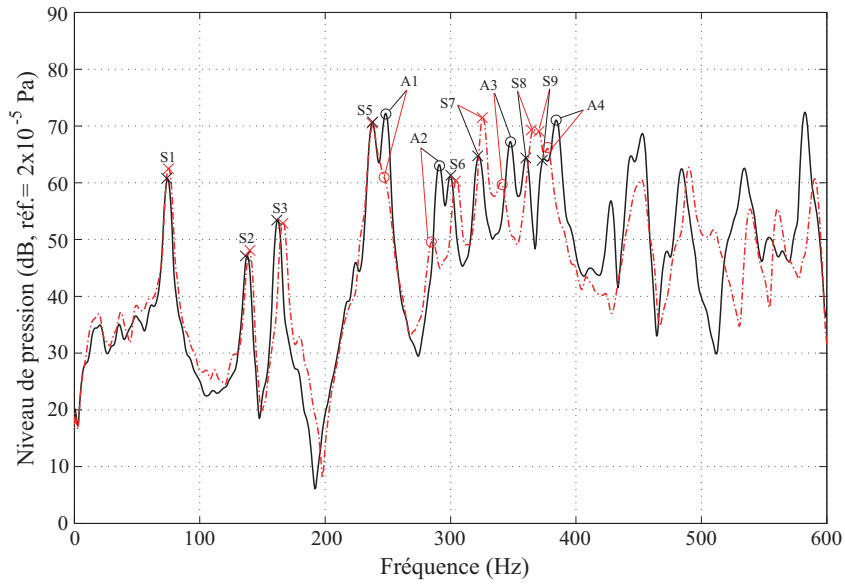
¹⁸Dans la réalité, deux types d'effets entrent en jeu : i) les effets de masse ajoutée liés à la réactance de la mousse absorbante, et ii) les effets de raideur ajoutée dus à la diminution du volume d'air à la suite de l'insertion de la mousse absorbante (pour rappel, son épaisseur est égale à 2 cm). Les premiers effets se traduisent par un décalage vers les basses fréquences des fréquences propres des modes contrôlés par la cavité, les seconds par un décalage vers les hautes fréquences. Dans l'ensemble, les premiers effets dominent les seconds, i.e. les fréquences propres des modes contrôlés par la cavité sont décalées vers les basses fréquences. Par exemple, pour le premier mode contrôlé par la cavité A_1 (0,0,1), les premiers effets se traduisent par une diminution théorique de 242.8 Hz à 233.6 Hz (en utilisant la formule (4.9) donnée dans [Che89]); les seconds effets se traduisent par une augmentation théorique de la fréquence propre de 242.8 Hz à 250 Hz (Cf. formule (A.21) dans la section A.3.1.2). Au final adviennent des effets de masse ajoutée qui se traduisent par un décalage théorique de la fréquence propre du mode A_1 de 2 Hz vers les basses fréquences. Ce décalage n'est pas visible

en basses fréquences, pour les pics de résonance liés aux modes A_2 à A_4 , ce décalage est respectivement égal à 6, 8 et 7 Hz environ (Cf. figure 4.5(a)).

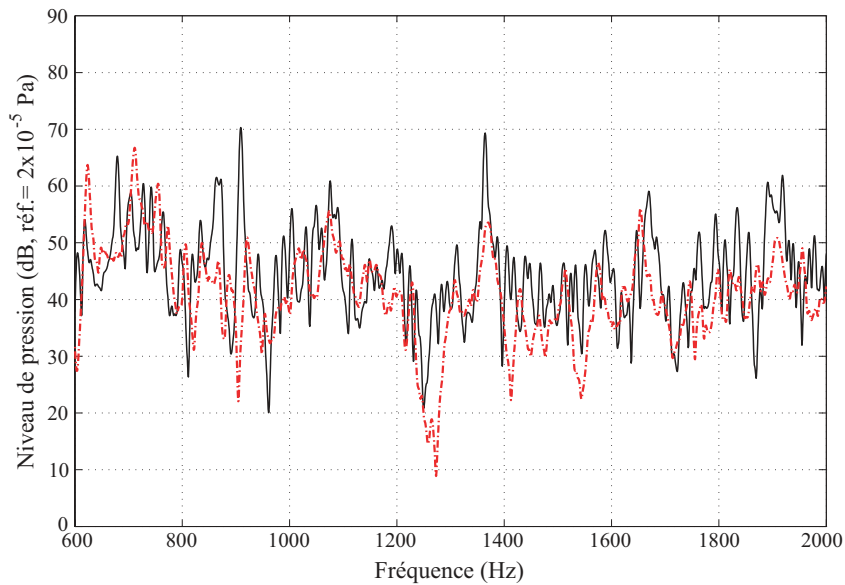
- Les effets d'amortissement équivalent, qui se traduisent par :
 - en basses fréquences, une diminution de l'amplitude des pics de résonance liés à des modes couplés contrôlés par la cavité : par exemple, pour les pics de résonance liés aux modes A_1 à A_4 , la diminution de niveau de pression acoustique est respectivement égale à 12, 14, 7 et 5 dB environ (Cf. figure 4.5(a)).
 - en plus hautes fréquences, où la réponse de la cavité est dominée par un nombre important de modes, une diminution systématique du niveau de pression acoustique, et ce au-delà de 800 Hz environ (Cf. figure 4.5(b)).

Notons que des observations analogues peuvent être émises à partir des spectres de niveau de pression acoustique mesurés au point M_1 (non présentés ici).

sur la figure 4.5(a) en raison des effets d'amortissement équivalent.



(a) Zoom sur les basses fréquences [0, 600] Hz.



(b) Zoom sur les plus hautes fréquences [600, 2000] Hz.

FIG. 4.5 – Spectres de niveau de pression mesurés au point M_2 pour les modalités extrémales des propriétés en absorption de la cavité (et pour une épaisseur de plaque de 3 mm de fortes conditions de serrage de la plaque). — : pas de couche de matériau absorbant (stimulus I_1), — - : une couche de mousse réticulée (stimulus K_1).

4.3.4.3 Effets de la variation de l'épaisseur de la plaque sur la réponse vibro-acoustique du système plaque-cavité

La figure 4.6 montre les spectres de niveau de vitesse quadratique moyenne de la plaque mesurés pour les configurations *C* et *I*, i.e. pour les valeurs extrémales d'épaisseur de la plaque (1.5 mm et 3 mm), et ce pour de fortes conditions de serrage de la plaque.

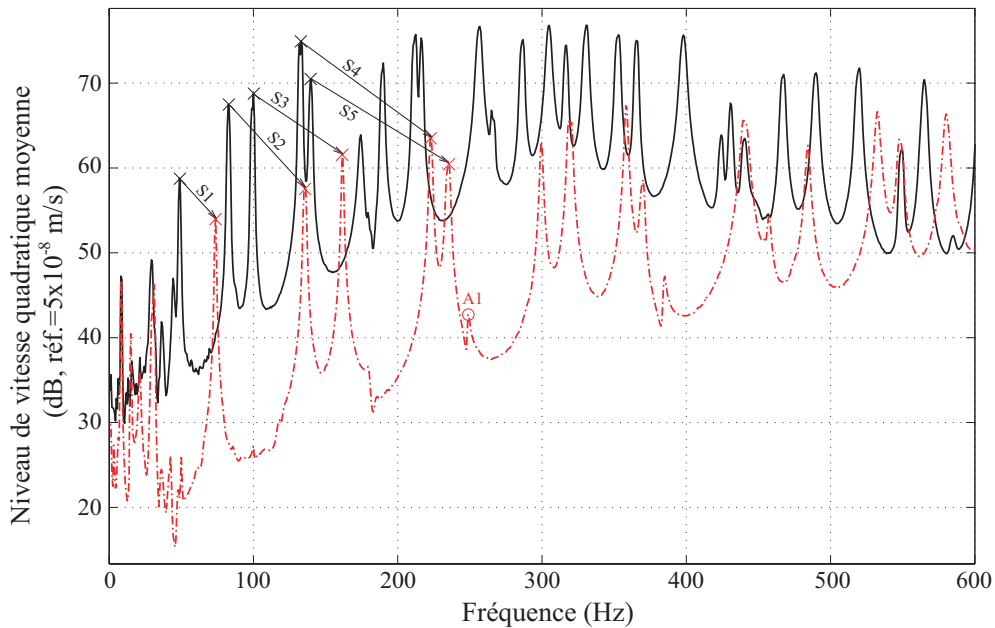


FIG. 4.6 – Spectres de niveau de vitesse quadratique moyenne de la plaque mesurés pour les valeurs extrémales d'épaisseur de la plaque (et pour de fortes conditions de serrage de la plaque). — : épaisseur 1.5 mm (configuration *C*), - - : épaisseur 3 mm (configuration *I*).

À partir de ces spectres, on peut observer les deux effets caractéristiques liés à une augmentation de l'épaisseur sur la réponse vibratoire de la plaque [Les88] :

- Un décalage des fréquences propres de la plaque vers les hautes fréquences¹⁹ : par exemple, pour les pics de résonance liés aux modes couplés contrôlés par la plaque S_1 à S_5 , l'augmentation de l'épaisseur de 1.5 à 3 mm provoque un décalage respectivement égal à 25, 53, 62, 90 et 96 Hz environ.
- Une diminution de l'amplitude des déplacements modaux²⁰ : par exemple, pour les pics de résonance liés aux modes couplés contrôlés par la plaque S_1 à S_5 , l'augmentation de

¹⁹L'épaisseur h de la plaque figure à la fois dans les expressions du module de rigidité de flexion D et de la masse surfacique M_P de la plaque (Cf. section A.2.2), dont le ratio intervient dans l'expression (A.30) des fréquences propres de la plaque (Cf. section A.3.1.2.b). D'après cette expression, les valeurs des fréquences propres sont théoriquement proportionnelles à la valeur de h .

²⁰Dans l'équation généralisée (A.47) (Cf. section A.3.1.2.d), on peut observer que l'amplitude du déplacement modal est inversement proportionnelle à la masse généralisée structurale, dans l'expression de laquelle (Cf. expression (A.28) dans la section A.3.1.2.b) la masse surfacique M_P de la plaque, i.e. l'épaisseur h , intervient. Autrement dit, d'un point de vue théorique, l'amplitude du déplacement modal est inversement proportionnelle à la valeur de h .

l'épaisseur de 1.5 à 3 mm provoque une diminution du niveau de vitesse quadratique moyenne respectivement égale à 5, 10, 7, 11 et 10 dB environ.

Notons que des effets analogues sont également visibles à partir des spectres de niveau de vitesse quadratique moyenne de la plaque calculés pour les configurations *A* et *G* (conditions de serrage de la plaque faibles), ou encore pour les configurations *B* et *H* (conditions de serrage de la plaque moyennes), non présentés ici.

La figure 4.7 présente les spectres de niveau de pression mesurés au point M_2 pour les stimuli C_1 et K_1 , i.e. pour les valeurs extrémales d'épaisseur de la plaque (1.5 mm et 3 mm), et ce pour de fortes conditions de serrage de la plaque et de fortes propriétés en absorption de la cavité.

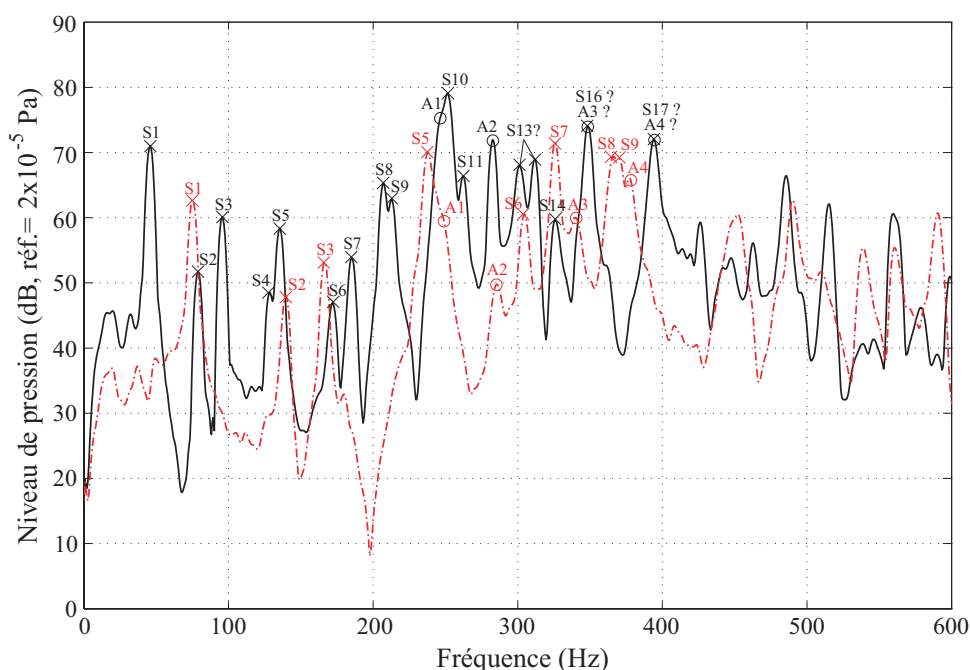


FIG. 4.7 – Spectres de niveau de pression mesurés au point M_2 pour les valeurs extrémales d'épaisseur de la plaque (et pour de fortes conditions de serrage de la plaque et de fortes propriétés en absorption de la cavité). — : épaisseur 1.5 mm (stimulus C_1), - - : épaisseur 3 mm (stimulus K_1).

De même que sur les spectres $L_v(f)$, on peut observer le décalage vers les hautes fréquences des pics de résonance liés aux modes couplés contrôlés par la plaque. En outre, nous avons pu noter dans la section 1.3 (Cf. tableau 1.1) que la modification de la densité modale et de la distribution des fréquences propres de la plaque, du fait de la variation de l'épaisseur, entraînait une modification du couplage inter-modal. Sur les spectres $L_{p_2}(f)$, ceci se traduit par des différences dans le niveau de réponse des modes couplés contrôlés par la cavité : par exemple, la réponse des modes *A1* et *A2* est moins importante pour une valeur d'épaisseur égale à 3 mm que pour une valeur d'épaisseur égale à 1.5 mm (différence de niveau de pression

égale à 16 et 22 dB environ respectivement pour les modes $A1$ et $A2$).

4.3.4.4 Effets de la variation des conditions de serrage de la plaque sur la réponse vibro-acoustique du système plaque-cavité

La figure 4.8 présente les spectres de niveau de vitesse quadratique moyenne de la plaque mesurés pour les configurations D et F , i.e. pour les modalités extrémales des conditions de serrage de la plaque ($C = 20$ N.m et $C = 80$ N.m), l'épaisseur de la plaque restant inchangée et égale à 2 mm.

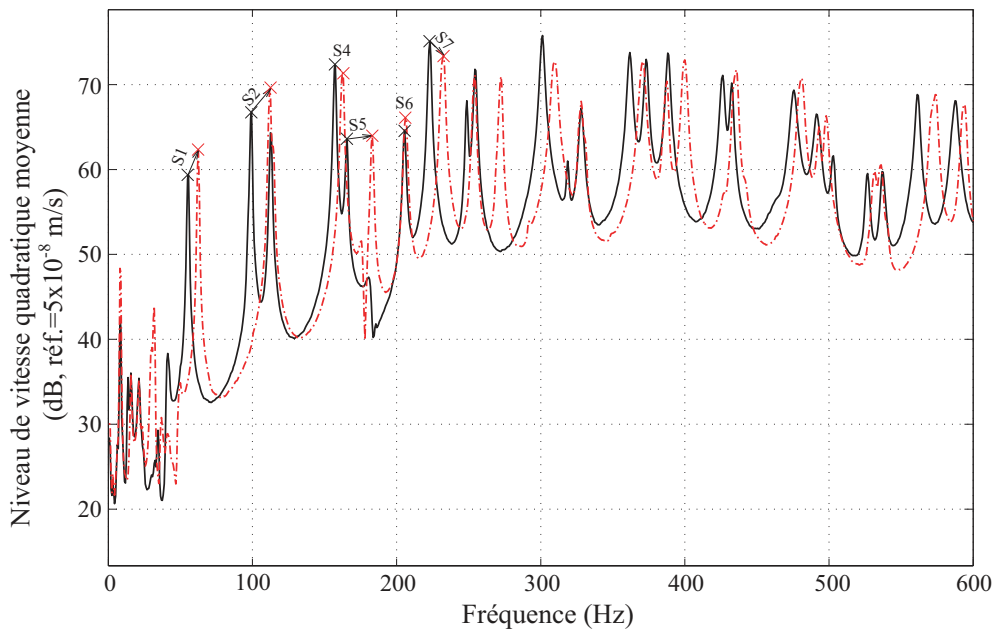


FIG. 4.8 – Spectres de niveau de vitesse quadratique moyenne de la plaque mesurés pour les modalités extrémales des conditions de serrage de la plaque, pour une épaisseur de plaque égale à 2 mm. — : $C = 20$ N.m (configuration D), - - : $C = 80$ N.m (configuration F).

On peut observer l'effet caractéristique dû à une augmentation de la rigidité sur le contour de la plaque, à savoir un décalage des fréquences propres de la plaque vers les hautes fréquences. Toutefois, on peut noter que le décalage provoqué par une augmentation du couple de serrage C de 20 N.m à 80 N.m est dans l'ensemble moins important que celui induit par une augmentation de l'épaisseur de 1.5 mm à 3 mm : par exemple, pour les pics de résonance liés aux modes couplés contrôlés par la plaque $S1$, $S2$, $S4$ et $S5$, le décalage est respectivement égal à 7, 13, 5 et 17 Hz environ.

Notons qu'un effet analogue est aussi visible à partir des spectres $L_v(f)$ calculés pour les configurations G , H et I (Cf. figure C.2), mais dans une moindre mesure : le décalage des fréquences propres vers les hautes fréquences est très faible pour certains modes (e.g. $S1$, $S3$, $S6$ et $S7$).

La figure 4.9 montre les spectres de niveau de pression mesurés au point M_2 pour les stimuli H_1 et K_1 , i.e. pour de moyennes et fortes conditions de serrage de la plaque, et ce pour une épaisseur de plaque égale à 3 mm²¹ et de fortes propriétés en absorption de la cavité.

Outre le décalage vers les hautes fréquences des pics de résonance liés aux modes couplés contrôlés par la plaque, on observe sur les spectres L_{p_2} l'autre effet caractéristique dû à une variation des conditions aux limites de la plaque, i.e. la modification du couplage vibro-acoustique entre la plaque et la cavité (Cf. tableau 1.1). Cet effet se traduit par des différences dans le niveau de réponse de certains modes couplés contrôlés par la cavité : par exemple, la réponse des modes A1 et A3 est plus importante pour un couple de serrage C égal à 80 N.m que pour un couple de serrage C égal à 50 N.m (différence de niveau de pression égale 7 et 6 dB environ respectivement pour les modes A1 et A3).

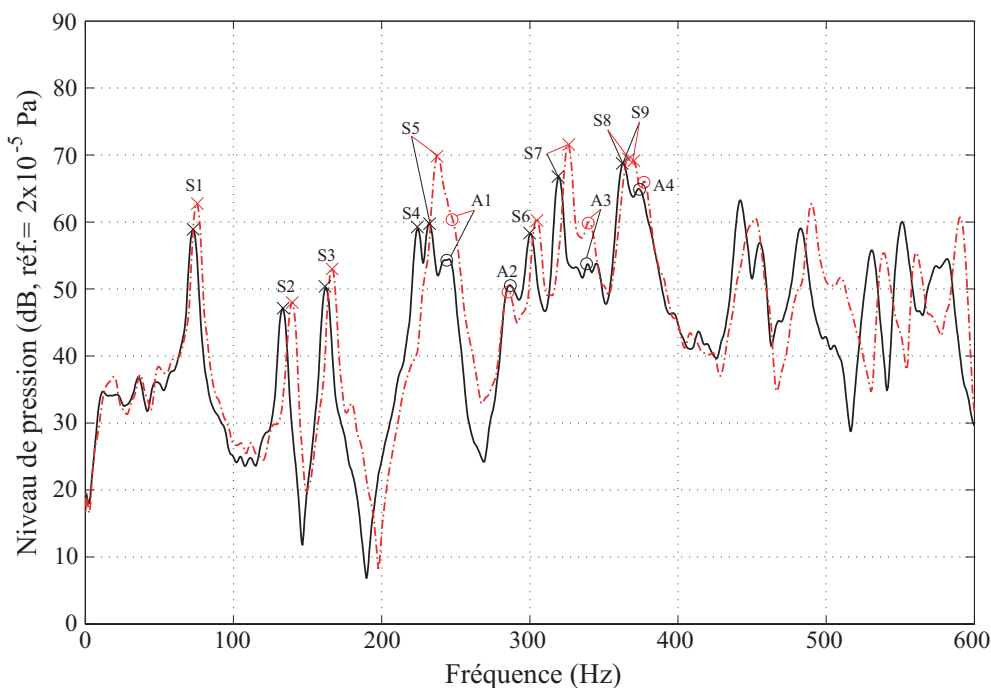


FIG. 4.9 – Spectres de niveau de pression mesurés au point M_2 pour de moyennes et fortes conditions de serrage de la plaque, pour une épaisseur de plaque égale à 3 mm. — : $C = 50$ N.m (stimulus H_1), - - : $C = 80$ N.m (stimulus K_1).

Enfin, il est à noter que, pour la plaque de plus faible épaisseur (i.e. 1.5 mm), sur les spectres des deux indicateurs vibro-acoustiques, on ne retrouve pas en basses fréquences le phénomène de décalage des fréquences propres de la plaque vers les hautes fréquences dû à une augmentation du couple de serrage C de 20 N.m à 80 N.m (Cf. figures C.3 et C.4). En effet, on observe pour les premiers modes couplés contrôlés par la plaque un léger décalage des fréquences propres vers les basses fréquences (e.g. S1 à S9). Au regard des mesures réalisées et

²¹N.B. : Le plan d'expériences sélectionné ne permet pas une comparaison de spectres $L_{p_2}(f)$ pour une épaisseur de plaque égale à 2 mm.

de la revue bibliographique menée, nous ne pouvons fournir de façon certaine une explication à ce phénomène singulier.

4.4 Conclusions

L'expérimentation mise en œuvre pour enregistrer des sons rayonnés par une plaque vibrante à l'intérieur d'une cavité dans des configurations structurales du système différentes a été définie dans ce chapitre. Nous avons notamment spécifié les caractéristiques du système plaque-cavité expérimental, i.e. une cuve en béton surmontée d'une plaque en acier, et le type d'excitation utilisé pour mettre la plaque en vibration, i.e. une force mécanique ponctuelle excentrée avec un spectre de type bruit rose.

Nous nous sommes ensuite penchés plus précisément sur l'élaboration des configurations structurales. Pour l'essentiel, ces dernières résultent de la combinaison des modalités prises par trois paramètres structuraux (l'épaisseur de la plaque, les propriétés en absorption de la cavité et les conditions de serrage de la plaque), dont le choix a été justifié. Neuf de ces combinaisons ont été définies via l'utilisation d'un plan fractionnaire de Taguchi (L_9), deux l'ont été par nos soins.

Puis nous avons passé en revue les protocoles suivis pour la réalisation des différentes mesures, vibratoires et acoustiques, sur les configurations du système plaque-cavité. À partir des enregistrements sonores réalisés, nous avons procédé à la formation de stimuli, des échantillons de 4 secondes corrigés par la fonction de transfert inverse du casque utilisé pour la restitution sonore lors des évaluations auditives.

Par la suite, nous avons illustré les effets de la variation des différents paramètres structuraux sur la réponse vibro-acoustique du système plaque-cavité au travers de l'analyse des spectres de deux indicateurs vibro-acoustiques, le niveau de vitesse quadratique moyenne de la plaque et le niveau de pression acoustique aux points M_1 et M_2 intérieurs à la cavité.

Enfin, concernant les mesures acoustiques, nous avons vu qu'il était procédé pour les 9 configurations du plan fractionnaire à une répétition (incluant un montage/démontage de la configuration) de l'enregistrement des sons rayonnés par la plaque à l'intérieur de la cavité, après avoir préliminairement observé une certaine dispersion de la mesure, imputable aux manipulations requises pour la mise en place d'une configuration. Aussi, avant toute chose, nous souhaitons au cours du chapitre suivant évaluer l'effet de la dispersion de la mesure sur la perception auditive en usant des stimuli issus de cette répétition de la mesure.

Chapitre 5

Évaluation des effets de la dispersion de la mesure acoustique sur la perception auditive

Dans la pratique, la mise en place d'une configuration sur le banc de mesure nécessite différentes manipulations telles que l'établissement de la liaison collée entre la plaque et le pot vibrant, la mise en position de la plaque sur la face supérieure de la cavité, ou encore le serrage à la clé dynamométrique des écrous. Malgré le soin pris à réaliser ces manipulations¹, l'ensemble des incertitudes qui sont inhérentes à ces manipulations est susceptible d'engendrer de la dispersion dans le comportement vibratoire de la plaque. Cette dispersion, sujette à fluctuer de manière assez aléatoire et qui plus est dans des proportions différentes selon la configuration considérée, peut par la suite provoquer de la dispersion dans la pression acoustique rayonnée par la plaque, mesurée aux deux points de réception à l'intérieur de la cavité. Par conséquent, cette dispersion est susceptible d'affecter à terme la perception auditive des sons enregistrés, en sus de la variation des paramètres structuraux, dont les effets font proprement l'objet de l'étude.

Ainsi, un test d'écoute est en premier lieu lancé dans le but d'évaluer les effets liés à la dispersion de la mesure sur la perception des sons rayonnés à l'intérieur de la cavité. Cette première évaluation permet de juger de la fiabilité du banc de mesure vis-à-vis de l'usage auquel il est voué : évaluer les effets sur la perception auditive liés à la variation des paramètres structuraux du système plaque-cavité.

La répétition de la mesure acoustique pour les 9 configurations structurales issues de la table de Taguchi — impliquant un montage/démontage de la configuration (Cf. section 4.3) — a été réalisée spécifiquement pour rendre possible l'évaluation auditive des effets liés à la dispersion de la mesure ; cette répétition nous procure pour chaque configuration deux niveaux de dispersion.

Dans une première section, nous aborderons la mise en œuvre du test d'écoute ; notamment, nous précisons les stimuli soumis à évaluation et présenterons le protocole adopté, reposant

¹Notons que, suivant l'ordre des configurations donné par le plan d'expériences, certaines manipulations sont requises et d'autres non lors du passage d'une configuration à l'autre.

sur une procédure d'évaluation "mixte" de la dissimilarité par rapport à un son de référence.

Le traitement des données de dissimilarité recueillies, basé sur l'analyse de variance (ANOVA), sera exposé dans une seconde section. Nous spécifierons le schéma d'analyse retenu, formulé en adéquation avec les spécificités liées à l'expérimentation présentée au chapitre 4 et à l'évaluation auditive des sons rayonnés. Puis, nous procéderons à l'examen des résultats de l'analyse, et statuerons sur l'influence de la dispersion de la mesure sur la perception des sons rayonnés, i.e. sur la fiabilité du banc de mesure expérimental utilisé.

5.1 Mise en œuvre du test d’écoute

5.1.1 Sujets

Trente sujets, 7 femmes et 23 hommes, d’âge compris entre 20 et 60 ans, ont pris part au test d’écoute. Ces auditeurs sont principalement des étudiants de l’INSA et de l’ENTPE ou des membres du LVA. Aucun n’a reporté de problème auditif particulier.

5.1.2 Stimuli

Les stimuli issus des deux enregistrements sonores réalisés pour les 9 configurations structurales du plan d’expériences fractionnaire, i.e. A_1, B_1, \dots, I_1 et A_2, B_2, \dots, I_2 , sont retenus. Les stimuli provenant de l’unique enregistrement sonore réalisé pour les configurations complémentaires, i.e. J_1 et K_1 , sont également considérés. Ainsi, 20 stimuli sont soumis à l’évaluation auditive par les auditeurs.

5.1.3 Protocole de test

Nous optons pour une procédure d’évaluation “mixte” [KP06], autorisant la présentation simultanée de tous les stimuli à l’auditeur. La tâche proposée consiste à évaluer la dissimilarité entre chaque stimulus mentionné ci-dessus et un stimulus de référence. Nous avons vu dans la section 2.2.1.3 que, pour cette tâche, la procédure laisse la possibilité à l’auditeur de procéder à une double évaluation comparative, i.e. comparaison des sons par rapport au son de référence et comparaison des sons entre eux. De ce fait, le score de dissimilarité donné par l’auditeur à un stimulus sur l’échelle unidimensionnelle peut être vu comme le fruit d’une combinaison entre i) la distance psychologique qu’il évalue entre ce stimulus et le stimulus de référence, et ii) les distances psychologiques qu’il évalue entre ce stimulus et les autres stimuli du test. Notamment, l’accès de l’auditeur à cette seconde évaluation permet d’arguer qu’une égalité entre deux scores de dissimilarité évalués par l’auditeur pour deux sons différents (i.e. deux positions de curseur analogues, Cf. section 5.1.3.1) signifie que ces deux sons ont été très vraisemblablement perçus comme similaires par l’auditeur. Cette correspondance autorise à dresser, à partir des résultats de l’analyse de variance que nous mènerons sur les scores de dissimilarité (Cf. section 5.2), des conclusions opportunes quant à la problématique qui nous intéresse, i.e. l’appréciation des effets de la dispersion de la mesure, liée aux manipulations, sur la perception des sons rayonnés.

5.1.3.1 Dispositif expérimental

Le test d’écoute se déroule dans la salle de test du LVA. Les sons sont restitués par un casque ouvert Sennheiser HD600 via une carte son haute qualité Gina3G © Echo. Le mode de restitution stéréophonique par casque est adéquat à la technique d’enregistrement adoptée pour les mesures acoustiques expérimentales (i.e. enregistrement simultané aux points

M_1 et M_2 dans la cavité). Le niveau moyen de diffusion est égal à 72 dB(A). La procédure d'évaluation est entièrement régie par un programme développé sous Matlab © Mathworks par Koehl [Koe05]. Au début du test, une écoute préalable de l'ensemble des stimuli est proposée aux auditeurs. Puis, des instructions leur sont données à l'écran (Cf. figure 5.1).

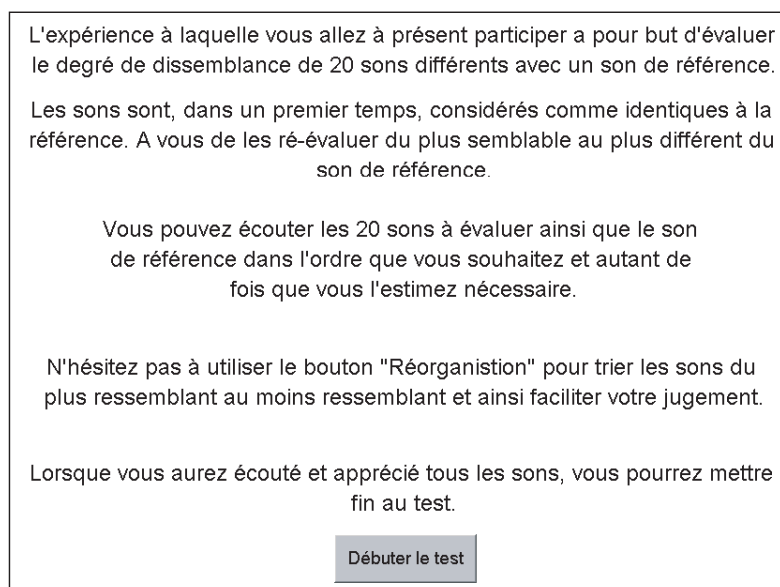


FIG. 5.1 – Instructions données aux auditeurs au début du test.

Après lecture des instructions, l'interface de présentation et de réponse s'affiche, avec l'ensemble des stimuli à évaluer ainsi que le stimulus de référence (Cf. Figure 5.2). Pour chaque auditeur, les stimuli sont présentés dans un ordre initial différent, i.e. la numérotation des sons (dans la partie gauche de l'interface, Cf. Figure 5.2) est définie de manière aléatoire.

Pour évaluer la dissimilarité entre les stimuli et le stimulus de référence, l'auditeur peut déplacer un curseur propre à chaque stimulus, positionné par défaut à l'extrémité "identique à la référence". L'échelle de réponse est quasi-continue ; les réponses sont codées entre 0 (pour un son jugé identique au son de référence) et 1 (pour un son jugé très différent du son de référence).

Afin de faciliter la tâche à l'auditeur et de lui permettre d'affiner son évaluation, il lui est laissée la possibilité de réorganiser les sons à tout moment du test suivant leur différence croissante par rapport au son de référence.

Pour un nombre relativement important de stimuli à évaluer (i.e. 20), la procédure d'évaluation "mixte", i.e. avec présentation simultanée des stimuli, présente l'avantage de permettre des durées de test raisonnables (entre 15 et 25 minutes suivant les auditeurs).

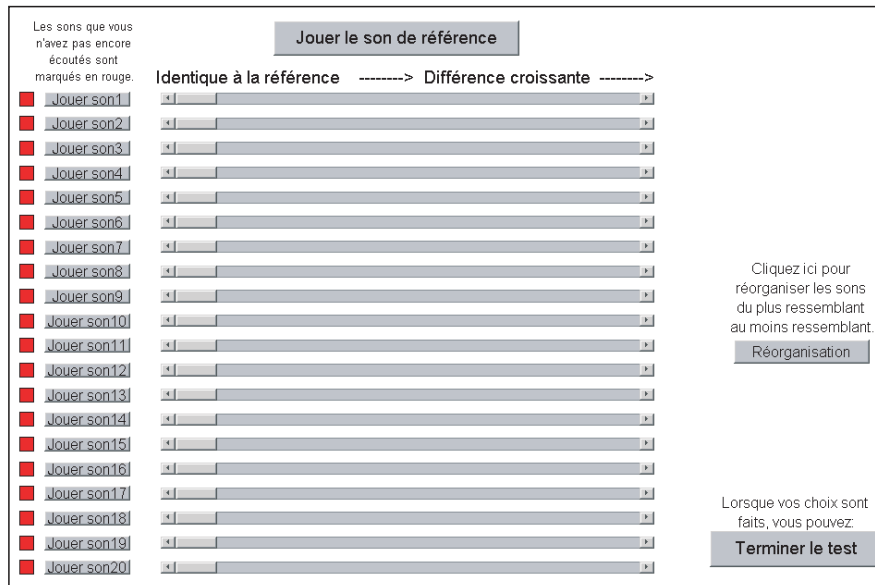


FIG. 5.2 – Interface de présentation et de réponse “mixte” développée par Koehl [Koe05].

5.1.3.2 Choix du stimulus de référence

La sélection du stimulus de référence, opérée parmi les stimuli, requiert une attention toute particulière. En effet, ce choix conditionne *a priori* la gamme des distances psychologiques qui pourront alors exister entre le stimulus de référence et les stimuli du test². Ce choix peut donc avoir une influence non négligeable à terme sur la dynamique d'échelle utilisée par les auditeurs pour l'ensemble de leurs jugements. En outre, dans le cas où cette dynamique d'échelle serait réduite, le potentiel de notre analyse s'en trouverait fortement affaibli ; aussi, avons-nous tout intérêt à favoriser l'utilisation de la pleine échelle par les auditeurs ; le choix du stimulus de référence doit pleinement s'inscrire dans cette logique.

Notre quête est guidée par la vue de l'esprit selon laquelle l'évaluation de la distance psychologique existant entre le stimulus de référence et un stimulus du test³ résulte d'un processus d'évaluation, propre à chaque auditeur, des distances existant entre les deux sons selon différents attributs auditifs saillants. De ce point de vue, nous proposons de sélectionner comme stimulus de référence un stimulus qui présente simultanément des valeurs extrémales de ces attributs auditifs saillants. Ce choix devrait permettre d'accroître *a priori* la dynamique d'échelle utilisée par les auditeurs.

Ainsi, un test d'écoute préliminaire⁴, basé sur la méthode de comparaison par paires (introduite dans la section 2.2.1.1), est lancé dans le but spécifique de repérer le(s) son(s) pouvant présenter les caractéristiques recherchées. Le test porte uniquement sur les stimuli A_1 à K_1 . En

²Distances dont l'évaluation par l'auditeur rentre en ligne de compte dans l'établissement final de son score de dissimilarité, comme nous avons pu le voir précédemment.

³Ainsi que l'évaluation de la distance psychologique existant entre deux stimuli du test.

⁴Le protocole suivi est présenté en détail dans la section 6.1.3.

effet, pour parvenir à des durées de test raisonnables, il est nécessaire de restreindre le nombre de stimuli à présenter ; en outre, la sélection des 11 sons issus du premier enregistrement sonore permet de préserver l'étendue des disparités existant entre les 20 sons du corpus initial. La tâche demandée à chaque auditeur participant au test (33 auditeurs au total) consiste à évaluer pour chaque paire la dissimilarité entre les deux stimuli. Le traitement des données de dissimilarité via le modèle E.M.D. INDSCAL⁵ (introduit dans la section 2.2.3) mène à l'établissement de l'espace perceptif de dissimilarité (à 2 dimensions) des stimuli A_1 à K_1 , qui rend compte des distances psychologiques pouvant exister entre eux (Cf. figure 5.3). Les axes de cet espace désignent les attributs auditifs saillants des sons vraisemblablement utilisés par les sujets pour les différencier⁶ ; leur identification précise n'est pas recherchée ici, nous souhaitons seulement nous enquerir des positions relatives des stimuli dans l'espace perceptif de dissimilarité. À partir de la figure 5.3, on peut arguer que les stimuli C_1 , H_1 , I_1 et J_1 (entourés en traits pointillés sur la figure), présentant simultanément des coordonnées (quasi-)extrémales suivant les deux dimensions de l'espace, constituent les alternatives possibles pour le choix du stimulus de référence.

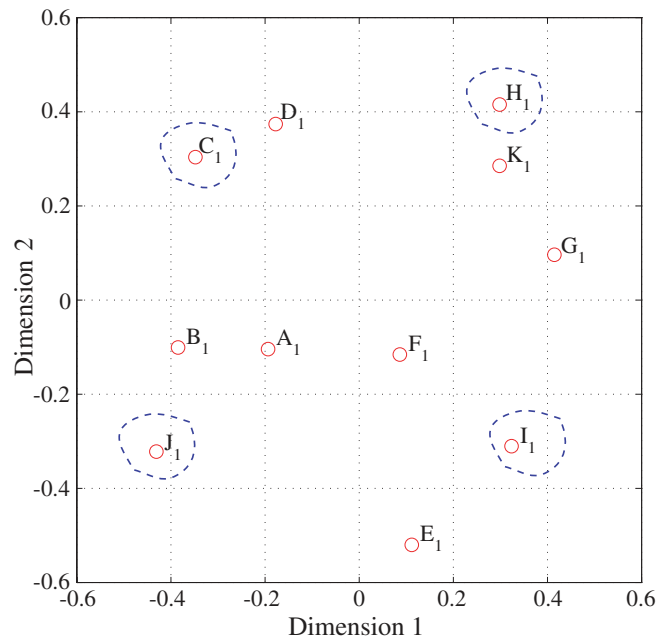


FIG. 5.3 – Espace perceptif de dissimilarité 2D dressé pour les stimuli A_1 à K_1 . -- : alternatives possibles pour le choix du stimulus de référence.

Pour aider à notre choix final parmi ces quatre alternatives, nous dressons pour chaque stimulus de référence pressenti un profil des distances existant entre lui et les autres stimuli,

⁵L'analyse E.M.D. est réalisée conformément aux points de méthodologie présentés dans les sections 6.1.4.2.a et 6.1.4.2.b.

⁶Le modèle INDSCAL suppose que les auditeurs utilisent les mêmes attributs auditifs saillants, ce qui constitue une hypothèse simplificatrice.

classées par ordre croissant (Cf. figure 5.4); ces distances sont recalculées à partir de leurs coordonnées respectives dans l'espace.

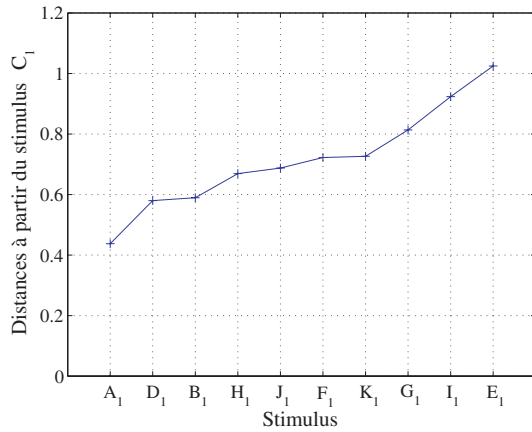
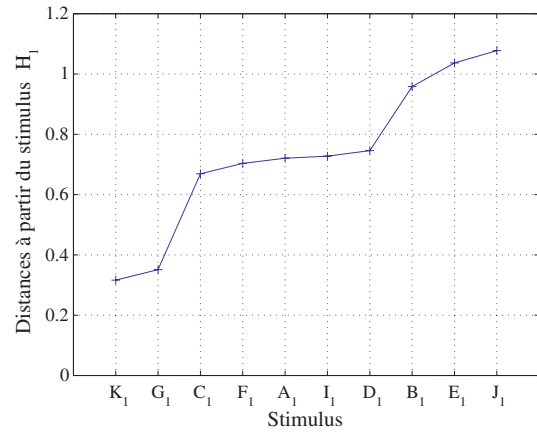
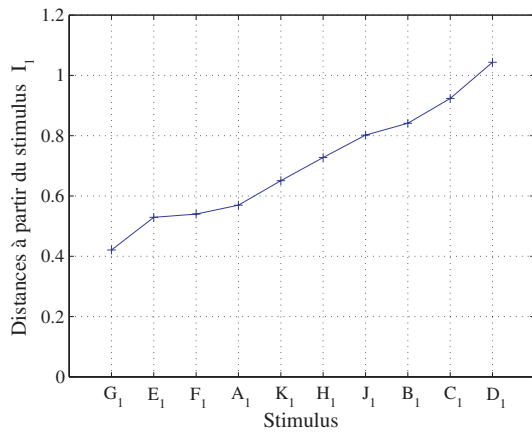
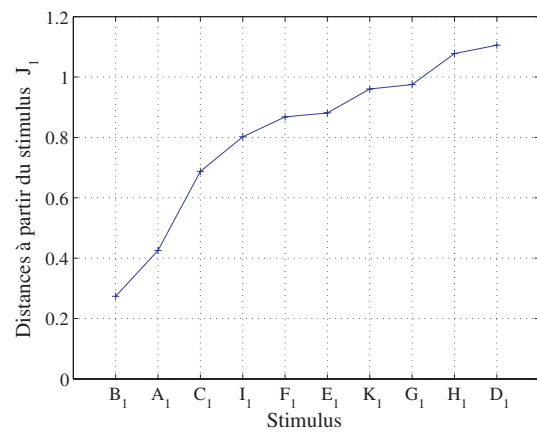
(a) Stimulus de référence : C_1 .(b) Stimulus de référence : H_1 .(c) Stimulus de référence : I_1 .(d) Stimulus de référence : J_1 .

FIG. 5.4 – Distances entre chaque stimulus de référence pressenti et les autres stimuli, recalculées à partir des coordonnées dans l'espace perceptif de dissimilarité.

Parmi les quatre profils affichés sur la figure 5.4, celui associé au stimulus J_1 apparaît comme le plus intéressant : les distances s'étendent sur un large intervalle, et l'accroissement de la distance d'un stimulus à l'autre est assez régulier. Ces éléments favorables nous amènent à retenir le stimulus J_1 comme stimulus de référence.

5.2 Appréciation des effets de la dispersion de la mesure sur la perception auditive par l'analyse de variance (ANOVA)

En préalable à la présentation du schéma d'analyse élaboré pour notre cas d'étude (Cf. section 5.2.1) et des résultats de cette analyse (Cf. section 5.2.2), un lexique de terminologie est proposé dans la section D.1. L'usage de l'ANOVA est très répandu dans le domaine de la psychologie expérimentale. Fondamentalement, cette analyse statistique permet de tester les différences entre plusieurs moyennes d'échantillon de réponses, classifiées suivant un ou plusieurs facteurs sous-jacents au plan d'expériences mis en oeuvre pour collecter les réponses.

5.2.1 Élaboration d'un schéma d'analyse adapté à notre cas d'étude

En premier lieu, on peut considérer comme échantillon de réponses un ensemble de scores de dissimilarité donnés par les auditeurs à un seul et même son testé. Pour l'analyse de variance, nous ne retenons finalement que les échantillons de réponses correspondant aux stimuli A_1 à I_1 et A_2 à I_2 . Ainsi, tous les échantillons peuvent, dans une première esquisse, se classifier suivant les quatre facteurs variables du plan d'expériences : l'épaisseur de la plaque (α), les propriétés en absorption de la cavité (β), les conditions de serrage de la plaque (γ) et la dispersion de la mesure (D). Dans ce qui suit, nous commencerons par spécifier certains points importants relatifs à l'expérimentation (Cf. chapitre 4) et à l'évaluation auditive des stimuli selon la procédure "mixte" (Cf. section 5.2.1.1), en considération desquels nous avons procédé par la suite à la formulation du schéma d'analyse (Cf. section 5.2.1.2).

5.2.1.1 Les points importants

5.2.1.1.a La prise en compte des différences inter-sujets : incursion d'un facteur sujets (S) et fusion des trois facteurs α , β , γ en un facteur unique

p_s

La figure 5.5 représente les scores de dissimilarité moyens (dans leur intervalle de confiance à 95%) obtenus par les stimuli A_1 à I_1 et A_2 à I_2 . On peut observer que la largeur des intervalles de confiance à 95% est substantielle.

Dans l'analyse de variance, lorsque les différences inter-individuelles sont substantiellement à l'origine de variabilité à l'intérieur des échantillons, il devient nécessaire de "contrôler" les effets dus à ces différences, ceci afin de ne pas fausser l'issue du test des hypothèses nulles concernant l'absence d'effets liés aux facteurs étudiés (i.e. ici les paramètres structuraux et la dispersion de la mesure) ou aux interactions entre ces facteurs [How98]. Dans la pratique, on a recours à la formation d'un facteur propre aux sujets (S), ayant pour effet d'enlever de la composante d'erreur les différences inter-individuelles. Ce "contrôle" n'est toutefois envisageable que dans le cadre de mesures répétées, cadre dans lequel nous nous plaçons puisque les différents échantillons de scores de dissimilarité proviennent de l'évaluation des différents sons

5.2. Appréciation des effets de la dispersion de la mesure sur la perception auditive par l'analyse de variance (ANOVA)

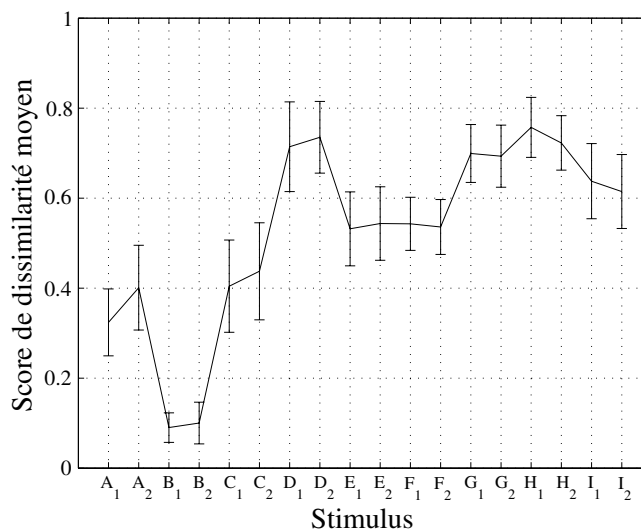


FIG. 5.5 – Scores de dissimilarité moyens, dans leur intervalle de confiance à 95%, obtenus par les stimuli A_1 à I_1 et A_2 à I_2 .

par un même groupe de sujets.

En outre, cette pratique nécessite que nous disposions des réponses des sujets pour toutes les combinaisons possibles entre les *niveaux* des facteurs en présence [How98] (i.e. α , β , γ et D). Or, de par notre utilisation d'un plan fractionnaire⁷ pour la définition des combinaisons entre les *modalités* des trois paramètres structuraux (α , β et γ), cette condition ne peut être remplie. Néanmoins, pour pallier ce problème, une solution consiste à transformer pour l'analyse le plan factoriel fractionnaire à trois facteurs α , β et γ (à trois niveaux chacun) en un plan factoriel complet à un seul facteur à neuf niveaux ; en d'autres termes, cette transformation revient donc à "mettre à plat" les 9 *cellules pleines*⁸ du plan factoriel fractionnaire d'origine. Cette mise à plat sous-entend que la comparaison entre les moyennes des cellules du plan fractionnaire est permise ; dans notre cas de figure, cette comparaison est sensée puisque les trois facteurs sous-jacents au plan fractionnaire sont de la même nature (ce sont tous trois des paramètres structuraux). Aussi, le facteur unique résultant de cette transformation peut se voir comme le paramétrage structural (p_s) du système plaque-cavité, ses différents niveaux correspondant aux 9 configurations structurales de la table L_9 (configurations A à I).

En contre-partie, l'adoption de cette solution ne permet plus l'évaluation des effets sur la perception auditive liés à chacun des paramètres structuraux α , β et γ . Toutefois, cette évaluation n'est pas indispensable puisque notre principale préoccupation dans cette partie reste l'évaluation des effets de la dispersion de la mesure (D) sur la perception auditive, ce que rend possible l'analyse de variance sur les observations finalement classifiées suivant les

⁷Dont le principe ne consiste à retenir qu'un nombre réduit de combinaisons.

⁸Pour un plan factoriel à 3 facteurs à 3 niveaux, le nombre total de cellules est égal à 27 ; toutes les cellules sont pleines, i.e. comportent des *observations*, si le plan factoriel est complet ; seulement 9 cellules sont pleines si le plan factoriel est un plan fractionnaire L_9 .

facteurs S , p_s et D . L'évaluation des effets de la variation des différents paramètres structuraux sur la perception des sons rayonnés figurera au premier plan de nos préoccupations dans la suite de ces travaux (Cf. chapitre 6 : établissement de tendances qualitatives originales relatives à l'influence de la variation de paramètres structuraux d'un système plaque-cavité).

5.2.1.1.b La nature des facteurs S , p_s et D

La nature des facteurs est étroitement liée au processus selon lequel leurs niveaux sont obtenus; aussi, leur nature influe sur l'espérance mathématique des carrés moyens associés aux différentes sources de variabilité, et donc sur la formation des statistiques-test [How98].

Parce que les configurations structurales, i.e. les niveaux du paramétrage structural, ont été choisies par nos soins, le facteur p_s est un *facteur fixe*.

Communément, le facteur sujets S est un *facteur aléatoire*⁹; les sujets participant à l'expérience sont toujours considérés comme étant choisis au hasard parmi une quasi-infinité de sujets possibles.

Enfin, la dispersion de la mesure n'est pas contrôlée lors de l'expérimentation; ainsi, les deux niveaux obtenus pour chaque configuration structurale peuvent se voir comme deux états de dispersion de la mesure tirés au hasard parmi une quasi-infinité d'états possibles. Le facteur D est donc également aléatoire.

5.2.1.1.c La nature des relations entre les facteurs S , p_s et D

En ce qui concerne p_s et D , comme nous avons pu le mentionner dans l'introduction de ce chapitre, la dispersion de la mesure (D) est sujette à fluctuer dans des proportions différentes selon la configuration structurale considérée (i.e. le niveau considéré du paramétrage structural p_s); les deux niveaux du facteur D sont ainsi propres à chaque configuration, i.e. il n'existe aucune correspondance entre les premiers niveaux de dispersion de la mesure associés aux différentes configurations structurales et de même aucune correspondance entre les seconds niveaux : le facteur D est *subordonné* au facteur p_s [Dag06].

Le facteur sujets S est quant à lui *croisé* à la fois avec le facteur p_s et avec le facteur D , puisque les mêmes sujets évaluent les effets liés au paramétrage structural et les effets liés à la dispersion de la mesure à l'intérieur des différentes configurations structurales.

Les inter-relations entre les trois facteurs p_s , D et S sont résumées à travers le schéma présenté sur la figure 5.6, tiré de la référence [Dag06]. Chaque ligne représente un facteur; une ligne parallèle (et incluse) à une autre désigne un facteur subordonné à un autre, deux lignes intersectées désignent deux facteurs croisés.

⁹Nous spécifions ici les règles de casse utilisées jusqu'ici implicitement pour les facteurs [Dag06]: une lettre minuscule désigne un facteur fixe; une lettre majuscule désigne un facteur aléatoire (valable également pour toute variable à caractère aléatoire).

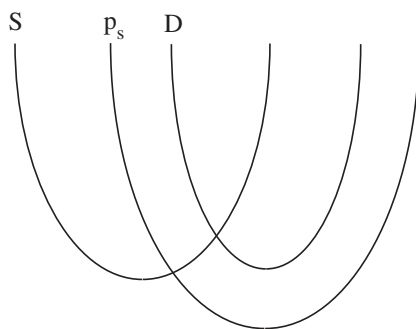


FIG. 5.6 – Schéma des inter-relations entre les 3 facteurs S , p_s et D , tiré de la référence [Dag06].

5.2.1.2 Formulation du schéma d'analyse

Dans cette section, nous présentons le schéma d'analyse formulé afin de traiter les scores de dissimilarité classifiés, comme vu précédemment, suivant i) le facteur sujets S , à $N = 30$ niveaux, ii) le facteur paramétrage structural p_s , à $n_{p_s} = 9$ niveaux¹⁰, et iii) le facteur dispersion de la mesure D , à $n_D = 2$ niveaux¹¹.

Ce schéma comporte deux phases : i) l'analyse globale (Cf. section 5.2.1.2.a), ii) l'analyse des *effets simples* de la dispersion de la mesure pour les différentes configurations structurales (Cf. section 5.2.1.2.b).

5.2.1.2.a Analyse globale

Dans cette première phase, la procédure ANOVA porte sur l'ensemble des données récoltées (Cf. tableau de données 5.1) ; nous cherchons à analyser les effets dûs aux différentes sources de variabilité afférentes aux facteurs S , p_s et D , i.e. les facteurs eux-mêmes et les possibles interactions existant entre eux.

Modèle théorique Le *modèle théorique* est un modèle *partiellement hiérarchisé, mixte*, à 3 facteurs ; il est défini comme suit [Dag06] :

$$X_{ijk} = m_{...} + S_i + p_{sj} + (Sp_s)_{ij} + D_{k|j} + (SD)_{ik|j} + E_{ijk} \quad (5.1)$$

où :

- X_{ijk} est une réponse donnée par un sujet i ,
- $m_{...}$ est la *moyenne générale*,
- les termes S_i sont les *effets principaux* du facteur S ,
- les termes p_{sj} sont les effets principaux du facteur p_s ,

¹⁰Niveau 1 = configuration A , ..., niveau 9 = configuration J .

¹¹Niveau 1 = état de dispersion correspondant à la première mesure acoustique, niveau 2 = état de dispersion correspondant à la seconde mesure acoustique (NB : après démontage/remontage de la configuration).

	p_s											
	1			...	j			...	9			Moy.
	D			...	D			...	D			
S	1	2	Moy.	...	1	2	Moy.	...	1	2	Moy.	
1	x_{111}	x_{112}	$\bar{x}_{11.}$	...	x_{1j1}	x_{1j2}	$\bar{x}_{1j.}$	...	x_{191}	x_{192}	$\bar{x}_{19.}$	$\bar{x}_{1..}$
⋮	⋮	⋮	⋮		⋮	⋮	⋮		⋮	⋮	⋮	⋮
i	x_{i11}	x_{i12}	$\bar{x}_{i1.}$	...	x_{ij1}	x_{ij2}	$\bar{x}_{ij.}$	...	x_{i91}	x_{i92}	$\bar{x}_{i9.}$	$\bar{x}_{i..}$
⋮	⋮	⋮	⋮		⋮	⋮	⋮		⋮	⋮	⋮	⋮
30	$x_{30\ 11}$	$x_{30\ 12}$	$\bar{x}_{30\ 1.}$	...	$x_{30\ j1}$	$x_{30\ j2}$	$\bar{x}_{30\ j.}$	...	$x_{30\ 91}$	$x_{30\ 92}$	$\bar{x}_{30\ 9.}$	$\bar{x}_{30..}$
Moy.	$\bar{x}_{.11}$	$\bar{x}_{.12}$	$\bar{x}_{.1.}$	...	$\bar{x}_{.j1}$	$\bar{x}_{.j2}$	$\bar{x}_{.j.}$	...	$\bar{x}_{.91}$	$\bar{x}_{.92}$	$\bar{x}_{.9.}$	$\bar{x}_{...}$

TAB. 5.1 – Tableau de données pour l’analyse globale.

- les termes $(Sp_s)_{ij}$ sont les termes d’interaction entre les facteurs S et p_s ,
- les termes $D_{k|j}$ sont les effets principaux du facteur D , pour les différentes modalités du facteur p_s ; ces termes remplacent les termes D_k et $(p_s D)_{jk}$ qui seraient présents si le modèle était *croisé*¹²,
- les termes $(SD)_{ik|j}$ sont les termes d’interaction entre le facteur S et le facteur D , pour les différentes modalités du facteur p_s ; ces termes prennent la place des termes $(SD)_{ik}$ et $(Sp_s D)_{ijk}$ qui seraient présents si le modèle était croisé,
- E_{ijk} est l’erreur expérimentale associée au sujet i pour le $k^{\text{ème}}$ niveau du facteur D à l’intérieur du $j^{\text{ème}}$ niveau du facteur p_s .

Les interactions présentes dans le modèle sont indiquées par les intersections des lignes qui apparaissent dans le schéma de la figure 5.6.

Hypothèses nulles et statistiques-test associées L’hypothèse nulle que nous souhaitons tester en premier lieu concerne l’absence d’effet principal de la dispersion de la mesure à l’intérieur des différentes configurations structurales :

$$H_0 : \sigma_{D|p_s}^2 = 0 \quad (5.2)$$

On peut remarquer que, pour une source de variabilité à caractère aléatoire¹³, ici $D|p_s$, l’énonciation de l’hypothèse nulle fait intervenir la composante de la variance totale qui lui est associée, ici $\sigma_{D|p_s}^2$. Cette énonciation renvoie au fait que l’hypothèse nulle porte sur les moyennes d’une quasi-infinité de *populations*¹⁴, et non pas sur les moyennes d’un nombre fini

¹²Cf. rubrique “Modèle croisé / hiérarchisé” dans la section D.1.

¹³Toute source de variabilité impliquant au moins un facteur aléatoire revêt également un caractère aléatoire. Ainsi, D et S étant des facteurs aléatoires, Sp_s , $D|p_s$ et $SD|p_s$ sont des sources de variabilité à caractère aléatoire.

¹⁴Concernant la source $D|p_s$, nous disposons de deux échantillons de N réponses pour chaque configuration structurale, i.e. un par niveau de dispersion de la mesure ; ces échantillons sont prélevés dans deux populations, tirées au hasard parmi une quasi-infinité de populations possibles renvoyant à une quasi-infinité d’états possibles

5.2. *Appréciation des effets de la dispersion de la mesure sur la perception auditive par l'analyse de variance (ANOVA)*

de populations comme il est le cas pour les sources de variabilité à caractère fixe¹⁵. Dans ce dernier cas, l'énonciation de l'hypothèse nulle fait directement intervenir les moyennes de population, i.e. les effets principaux s'il s'agit d'un facteur (Cf. ci-après le cas du facteur fixe p_s) ou les termes d'interaction s'il s'agit d'une interaction entre facteurs (Cf. exemple D.3 dans la section D.1).

Une autre hypothèse nulle intéressante à tester concerne l'absence d'effet principal du paramétrage structural :

$$H'_0 : p_{s_1} = p_{s_2} = \dots = p_{s_9} = 0 \quad (5.3)$$

En effet, le test de cette hypothèse nulle procure un moyen de vérifier, via son hypothétique rejet, que les différences de paramétrage structural entre les configurations expérimentées sont effectivement à l'origine de différences dans la perception des sons rayonnés par la plaque à l'intérieur de la cavité.

La procédure ANOVA permet de tester deux autres hypothèses nulles qui concernent respectivement l'absence d'effet principal des sujets et l'absence de terme d'interaction entre les sujets et le paramétrage structural :

$$H''_0 : \sigma_S^2 = 0 \quad (5.4)$$

$$H'''_0 : \sigma_{Sp_s}^2 = 0 \quad (5.5)$$

où σ_S^2 et $\sigma_{Sp_s}^2$ sont les composantes de la variance totale respectivement liées au facteur S et à l'interaction entre les facteurs S et p_s . Ces hypothèses nulles revêtent une importance moindre relativement aux problématiques qui nous intéressent directement¹⁶.

Les statistiques-test $F_{D|p_s}$, F_S et F_{Sp_s} , respectivement associées au test des hypothèses nulles H_0 , H''_0 et H'''_0 , s'écrivent :

$$F_{D|p_s} = \frac{CM_{D|p_s}}{CM_{SD|p_s}} \quad (5.6)$$

$$F_S = \frac{CM_S}{CM_{SD|p_s}} \quad (5.7)$$

$$F_{Sp_s} = \frac{CM_{Sp_s}}{CM_{SD|p_s}} \quad (5.8)$$

de dispersion de la mesure.

¹⁵Toute source de variabilité n'impliquant que des facteurs fixes revêt également un caractère fixe.

¹⁶D'après Howell [How98], l'interaction Sp_s renverrait au fait que différents sujets puissent réagir différemment aux stimuli correspondant à différentes configurations structurales, et ainsi classifier ces stimuli différemment suivant leur dissimilarité avec le stimulus de référence. Le facteur S , quant à lui, dénoterait le fait que les auditeurs puissent avoir une conception différente du niveau de dissimilarité requis pour donner un score donné, i.e. que les auditeurs, lorsqu'ils sont d'accord pour dire quels stimuli sont les plus dissimilaires du stimulus de référence (et les plus similaires), puissent ne pas être d'accord sur l'ampleur de la dissimilarité constatée.

où $CM_{D|p_s}$, CM_S , CM_{Sp_s} et $CM_{SD|p_s}$ sont les carrés moyens respectivement associés aux sources de variabilité $D|p_s$, S , Sp_s et $SD|p_s$. Ces trois statistiques-test sont formées en suivant la règle de base énoncée dans la section D.1, rubrique “Variable de Fisher-Snedecor-Statistique-test”. Les espérances mathématiques des carrés moyens, dont l’examen guide la formation des statistiques-test, sont reportées dans le tableau D.1.

Concernant le test de l’hypothèse nulle H'_0 , on ne peut constituer de statistique-test satisfaisant à la règle de base¹⁷. Toutefois, à condition que l’hypothèse nulle H_0 (i.e. $\sigma_{D|p_s}^2 = 0$) ne puisse être rejetée à un *risque de première espèce* α élevé, e.g. $\alpha = 0.25$ comme préconisé par Montgomery [Mon97], on pourra utiliser la variable F_{p_s} suivante :

$$F_{p_s} = \frac{CM_{p_s}}{CM_{Sp_s}} \quad (5.9)$$

où CM_{p_s} est le carré moyen associé au facteur p_s .

Dans la pratique, les différents carrés moyens CM_S , CM_{p_s} , CM_{Sp_s} , $CM_{SD|p_s}$ et $CM_{SD|p_s}$ sont calculés à partir de leurs *sommes des carrés des écarts* respectives¹⁸, i.e. SCE_S , SCE_{p_s} , SCE_{Sp_s} , $SCE_{SD|p_s}$ et $SCE_{SD|p_s}$. L’équation de la variance¹⁹ correspondante est présentée dans la section D.2.2.

Enfin, on pourra remarquer qu’une hypothèse nulle n’a pas été abordée ici, celle concernant l’absence de terme d’interaction entre les sujets et la dispersion de la mesure à l’intérieur des différentes configurations structurales (i.e. $SD|p_s$). En effet, la procédure ANOVA adoptée rend impossible son test²⁰.

5.2.1.2.b Analyse des effets simples de la dispersion de la mesure

Dans cette seconde phase, nous cherchons à analyser les effets simples de la dispersion de la mesure pour les différentes configurations structurales, i.e. l’effet de la dispersion de la mesure, configuration structurale par configuration structurale. À cet égard, pour chaque configuration structurale, on procède isolément à une ANOVA sur les réponses récoltées pour les deux stimuli renvoyant à ses deux niveaux de dispersion²¹ (Cf. tableau 5.2). La procédure ANOVA appliquée à chaque niveau j du paramétrage structural est spécifiée ci-après.

¹⁷L’absence d’effet principal du facteur p_s ne peut être proprement testée, du fait de la présence de la composante de la variance liée à la source de variabilité $D|p_s$ (i.e. $\sigma_{D|p_s}^2$) dans l’expression de l’espérance mathématique du carré moyen associé au facteur p_s (Cf. tableau D.1).

¹⁸Cf. section D.1, rubrique “Carrés moyens”.

¹⁹Cf. section D.1, rubrique “Sommes des carrés des écarts”.

²⁰La composante de la variance totale liée à cette interaction, i.e. $\sigma_{SD|p_s}^2$ est indissociable de la variance de l’erreur E_{ijk} , i.e. σ^2 (Cf. tableau D.1), dont l’estimation n’est pas accessible [How98].

²¹Ce qui revient à procéder à un *test t sur échantillons appariés* [How98].

5.2. *Appréciation des effets de la dispersion de la mesure sur la perception auditive par l'analyse de variance (ANOVA)*

D				D				D					
S	1	2	Moy.	S	1	2	Moy.	S	1	2	Moy.		
1	x_{111}	x_{112}	$\bar{x}_{11.}$	1	x_{1j1}	x_{1j2}	$\bar{x}_{1j.}$	1	x_{191}	x_{192}	$\bar{x}_{19.}$		
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮		
i	x_{i11}	x_{i12}	$\bar{x}_{i1.}$	⋯	i	x_{ij1}	x_{ij2}	$\bar{x}_{ij.}$	⋯	i	x_{i91}	x_{i92}	$\bar{x}_{i9.}$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮		
30	$x_{30\ 11}$	$x_{30\ 12}$	$\bar{x}_{30\ 1.}$	30	$x_{30\ j1}$	$x_{30\ j2}$	$\bar{x}_{30\ j.}$	30	$x_{30\ 91}$	$x_{30\ 92}$	$\bar{x}_{30\ 9.}$		
Moy.	$\bar{x}_{.11}$	$\bar{x}_{.12}$	$\bar{x}_{.1.}$	Moy.	$\bar{x}_{.j1}$	$\bar{x}_{.j2}$	$\bar{x}_{.j.}$	Moy.	$\bar{x}_{.91}$	$\bar{x}_{.92}$	$\bar{x}_{.9.}$		

Tableau 1 : Niveau 1 de p_s .

Tableau j : Niveau j de p_s .

Tableau 9 : Niveau 9 de p_s .

TAB. 5.2 – Tableaux de données pour l'analyse des effets simples de la dispersion de la mesure.

Modèle théorique Le *modèle théorique* est un modèle croisé, *aléatoire*, à 2 facteurs ; il est défini comme suit [Dag06] :

$$X_{ik}^{(j)} = m_{..}^{(j)} + S_i^{(j)} + D_k^{(j)} + (SD)_{ik}^{(j)} + E_{ik}^{(j)} \quad (5.10)$$

où :

- $X_{ik}^{(j)}$ est une réponse donnée par un sujet i ,
- $m_{..}^{(j)}$ est la moyenne générale,
- les termes $S_i^{(j)}$ sont les effets principaux du facteur S ,
- les termes $D_k^{(j)}$ sont les effets principaux du facteur D , i.e. les effets simples de la dispersion de la mesure pour le niveau j considéré du paramétrage structural,
- les termes $(SD)_{ik}^{(j)}$ sont les termes d'interaction entre le facteur S et le facteur D ,
- $E_{ik}^{(j)}$ est l'erreur expérimentale associée au sujet i pour le $k^{\text{ème}}$ niveau du facteur D .

Hypothèse nulle et statistique-test associée Notre attention se porte sur une seule hypothèse nulle, celle concernant l'absence d'effet simple de la dispersion de la mesure pour la configuration structurale considérée :

$$H_0^{(j)} : \sigma_D^{(j)2} = 0 \quad (5.11)$$

où $\sigma_D^{(j)2}$ est la composante de la variance totale liée au facteur D .

La statistique-test $F_D^{(j)}$ associée au test de l'hypothèse nulle $H_0^{(j)}$ s'écrit :

$$F_D^{(j)} = \frac{CM_D^{(j)}}{CM_{SD}^{(j)}} \quad (5.12)$$

où $CM_D^{(j)}$ et $CM_{SD}^{(j)}$ sont les carrés moyens respectivement associés au facteur D et à l'interaction entre les facteurs S et D . Les espérances mathématiques des carrés moyens sont reportées dans le tableau D.2. L'équation de la variance et les différentes sommes des carrés des écarts

sont présentées dans la section [D.2.2](#).

5.2.1.2.c Interprétation des résultats des tests d'hypothèse

Les formules de calcul des *seuils de signification observés*²² p associés au test des différentes hypothèses nulles énoncées dans les deux phases de l'analyse sont fournies dans la section [D.2.3](#).

Le choix de la valeur du risque de première espèce²³ α est subjectif ; néanmoins, α est généralement pris égal à 0.01 et 0.05 [[Poi04](#)]. Aussi communément, une autre approche, plus graduelle, est possible pour apprécier le degré de significativité des valeurs de p calculées ; c'est cette approche que nous emploierons par la suite. Notamment, l'hypothèse nulle pourra être rejetée pour trois niveaux de significativité de p : i) pour p inférieur à $\alpha = 0.001$, le résultat du test d'hypothèse sera déclaré *hautement significatif* ; ii) pour p inférieur à $\alpha = 0.01$, le résultat sera déclaré *très significatif* ; iii) pour p inférieur à $\alpha = 0.05$, le résultat sera déclaré *significatif*. Pour p supérieur à $\alpha = 0.05$, le résultat sera considéré comme *non significatif* et l'hypothèse nulle ne pourra être rejetée.

En outre, pour chaque hypothèse nulle, le résultat du test d'hypothèse indique seulement si la source considérée est à l'origine ou non de variabilité dans les données qui ne peut être imputée à l'erreur. Ce résultat ne renseigne pas vraiment sur l'importance de l'effet expérimental dû à cette source. Aussi, en prolongement du test d'hypothèse, comme recommandé par certains auteurs [[Poi04](#)], *la grandeur de l'effet expérimental*²⁴ dû à la source de variabilité sera mesurée via le calcul du coefficient ω^2 . Les formules de calcul des coefficients ω^2 associés aux effets expérimentaux dûs aux différentes sources de variabilité considérées dans les deux phases de l'analyse sont fournies dans la section [D.2.4](#).

Par ailleurs, il faut noter que, en théorie, l'analyse des effets simples de la dispersion de la mesure pour les différentes configurations structurales (Cf. section [5.2.1.2.b](#)) n'est normalement nécessaire que si, dans l'analyse globale (Cf. section [5.2.1.2.a](#)), l'hypothèse nulle H_0 concernant l'absence d'effet principal de la dispersion de la mesure est rejetée lors de son test. Toutefois, l'analyse des effets simples sera conduite même si cette hypothèse nulle ne peut être rejetée. En effet, le cas échéant, dans l'analyse des effets simples, nous ne serons pas tant intéressés par les résultats des tests de signification²⁵ (aspect inférentiel) que par la mesure, pour les différentes configurations structurales, de la grandeur de l'effet expérimental dû à la dispersion de la mesure (aspect descriptif) : nous pourrons ainsi détecter d'éventuelles configurations pour lesquelles l'effet expérimental dû à la dispersion de la mesure serait, tout en restant limité, plus important.

²²Cf. section [D.1](#), rubrique "Seuil de signification observé p ".

²³Cf. section [D.1](#), rubrique "Risque de première espèce α ".

²⁴Cf. section [D.1](#), rubrique "Grandeur de l'effet expérimental".

²⁵*A priori* non significatifs si le résultat du test de l'hypothèse nulle H_0 est non significatif.

5.2.2 Résultats des analyses

Les calculs inhérents à l'application des procédures ANOVA sont réalisés sous Matlab © Mathworks.

5.2.2.1 Analyse globale

Les résultats de la procédure ANOVA sont présentés dans le tableau résumé 5.3.

Source	ddl	SCE	CM	F	p	ω^2
S	29	3.898	0.134	10.095	<.001	0.076
p_s	8	20.882	2.610	40.510	<.001	0.481
Sp_s	232	14.949	0.064	4.840	<.001	0.290
$D|p_s$	9	0.143	0.016	1.196	0.298	<.001
$SD|p_s$	261	3.475	0.013			
Total	539	43.346				

TAB. 5.3 – Tableau résumé. ddl : nombre de degrés de liberté, SCE : somme des carrés des écarts, CM : carrés moyens, F : statistique-test, p : seuil de signification observé, ω^2 : indicateur de la grandeur de l'effet expérimental.

Tout d'abord, pour les sujets (S) et l'interaction entre les sujets et le paramétrage structural (Sp_s), les résultats des tests d'hypothèse sont tous deux *hautement significatifs* ($p < 0.001$). Les valeurs de ω^2 associées (respectivement 0.076 et 0.290) confirment la présence de différences de jugement entre les sujets²⁶.

Ensuite — point le plus important —, concernant la source de variabilité $D|p_s$, le résultat du test d'hypothèse est non significatif ($p = 0.298$); ainsi, l'analyse ne permet pas d'inférer l'existence d'un effet lié à la dispersion de la mesure à l'intérieur des différentes configurations structurales. En outre, on peut observer que la grandeur de l'effet expérimental dû à la dispersion de la mesure est très faible ($\omega^2 < 0.001$).

Étant donné que l'hypothèse nulle H_0 concernant l'absence d'effet dû la source de variabilité $D|p_s$ ne peut être rejetée à un risque de première espèce α élevé égal à 0.25 (Cf. section 5.2.1.2.a), l'hypothèse nulle H'_0 concernant l'absence d'effet principal du paramétrage structural (p_s) a pu être testée en recourant à la statistique F_{p_s} définie par l'expression (5.9). Le résultat du test se révèle hautement significatif ($p < 0.001$); on peut donc conclure à l'existence d'un effet dû au paramétrage structural. La grandeur de l'effet expérimental vient conforter cette conclusion : la composante de variance liée au facteur p_s représente près de 50% de la variance totale ($\omega^2 = 0.481$).

²⁶La valeur de ω^2 associée à l'interaction Sp_s est en outre plus importante ; les différences observées semblent ainsi s'expliquer en plus grande partie par le fait que les sujets aient réagi différemment aux stimuli correspondant à différentes configurations structurales (Cf. note de pied de page n°16, page 87).

5.2.2.2 Analyse des effets simples de la dispersion de la mesure

Le tableau 5.4 montre les résultats de la procédure ANOVA réalisée isolément pour chaque configuration structurale; dans le tableau sont reportées les valeurs de statistique-test $F_D^{(j)}$ et de seuil de signification observé $p_D^{(j)}$ associées aux tests de l'hypothèse nulle concernant l'absence d'effet simple de la dispersion de la mesure, ainsi que les valeurs de $\omega_D^{(j)^2}$ correspondantes. Les configurations sont classées par ordre croissant de la valeur de $p_D^{(j)}$.

Config.	$F_D^{(j)}$	$p_D^{(j)}$	$\omega_D^{(j)^2}$
<i>A</i>	3.471	0.073	0.040
<i>H</i>	1.675	0.214	0.008
<i>C</i>	1.067	0.310	<.001
<i>I</i>	0.762	0.390	<.001
<i>B</i>	0.406	0.529	<.001
<i>E</i>	0.324	0.574	<.001
<i>D</i>	0.288	0.596	<.001
<i>F</i>	0.058	0.810	<.001
<i>G</i>	0.050	0.825	<.001

TAB. 5.4 – Résultats de la procédure ANOVA réalisée isolément pour chaque configuration structurale.

En cohérence avec le résultat non significatif observé pour le test de l'hypothèse nulle H_0 (Cf. section 5.2.2.1), les résultats des tests d'hypothèse se révèlent ici tous non significatifs (au minimum $p = 0.073$). Néanmoins, on peut remarquer que l'effet expérimental dû à la dispersion de la mesure semble, tout en restant très faible, légèrement plus important pour certaines configurations, i.e. *A* et *H* (respectivement $\omega_D^{(j)^2} = 0.04$ et $\omega_D^{(j)^2} = 0.008$).

En outre, les commentaires formulés ci-dessus concernant la valeur de $\omega_D^{(j)^2}$ relative à chaque configuration structurale, qui relèvent donc de seules considérations statistiques, sont confortés par les impressions laissées après une écoute minutieuse des différents couples de stimuli renvoyant à une même configuration structurale, i.e. $(A_1, A_2), \dots, (I_1, I_2)$: les couples de stimuli (A_1, A_2) et (H_1, H_2) , pour lesquels les valeurs de $\omega_D^{(j)^2}$ se distinguent, sont les couples au sein desquels apparaissent effectivement à l'écoute des différences légèrement perceptibles entre les deux stimuli ; pour les autres couples, il est réellement difficile à l'écoute de faire une distinction entre les deux stimuli.

5.3 Conclusions

Ce chapitre visait à évaluer qualitativement la fiabilité du banc de mesure en regard de l'usage auquel il est destiné : la génération de sons réels, renvoyant à différentes configurations structurales du système, destinés à l'étude de l'influence de la variation de paramètres

structuraux sur la perception auditive. Notamment, de par les manipulations nécessitées par la mise en place des configurations structurales, l'existence d'effets liés à la dispersion de la mesure induite par ces manipulations sur la perception des sons rayonnés n'était pas à écarter.

Ainsi, les sons issus de la répétition de la mesure opérée pour chacune des configurations du plan fractionnaire ont été soumis à une première évaluation auditive menée auprès d'un jury d'auditeurs. Un protocole de test d'écoute fondé sur une évaluation "mixte" de la dissimilarité par rapport à un son de référence a été adopté. Les effets de la dispersion de la mesure sur la perception des sons rayonnés à l'intérieur de la cavité ont ainsi pu être évalués au travers de l'analyse de variance des réponses récoltées au test. Notamment, un schéma d'analyse, en deux phases, a été établi en réponse à certaines spécificités liées à l'expérimentation même et à l'évaluation auditive :

- la présence d'importantes différences de jugement entre auditeurs, qui a notamment impliqué de considérer trois facteurs : les sujets (S), le paramétrage structural (p_s) et la dispersion de la mesure (D) ;
- le caractère aléatoire de la dispersion de la mesure ;
- la subordination de la dispersion de la mesure au paramétrage structural.

De l'examen des résultats des analyses ont été tirés les principaux enseignements suivants :

- i) il existe assurément un effet dû au paramétrage structural ; l'effet expérimental associé est très important ;
- ii) on ne peut inférer l'existence d'un effet dû à la dispersion de la mesure pour les différentes configurations structurales ; l'effet expérimental associé est très faible ;
- iii) l'effet expérimental dû à la dispersion de la mesure apparaît, tout en restant limité, relativement plus important pour les configurations A et H .

Les trois paramètres structuraux variables de l'étude (α , β et γ) avaient été initialement sélectionnés afin de s'assurer que des effets sur la perception auditive liés aux variations structurales contrôlées seraient bien "observables" (Cf. section 4.2.1) ; le choix des modalités de ces paramètres est en outre validé par le fait que les effets du paramétrage structural, variant dans le domaine d'étude défini par les modalités extrêmes des paramètres, apparaissent très importants d'un point de vue perceptif (point i).

Le fait que l'on ne puisse inférer l'existence d'un effet dû à la dispersion de la mesure pour les différentes configurations structurales (point ii) laisse présager d'une fiabilité satisfaisante du banc de mesure, i.e. de la bonne aptitude du banc de mesure à générer de façon répétée, pour chaque configuration structurale, des sons très proches perceptivement. Dans le cadre de l'expérimentation, la dispersion de la mesure semble rester globalement dans une proportion telle, que les sons obtenus à partir de la répétition de la mesure sur une configuration structurale donnée demeurent, d'un point de vue perceptif, représentatifs du paramétrage structural imputé à cette configuration. Aussi, pour la suite de ces travaux, ceci signifie que l'établissement des tendances qualitatives relatives à l'influence de la variation des paramètres

structuraux sur la perception auditive (Cf. chapitre 6) pourra être réalisé en ayant l'assurance que ces tendances seront essentiellement le fait de la variation contrôlée de ces paramètres (et non liées à l'intervention d'un facteur parasite telle que la dispersion de la mesure).

Le fait que l'effet expérimental dû à la dispersion de la mesure soit, tout en demeurant faible, relativement plus important pour certaines configurations telles que A et H (point iii) incite toutefois à la prudence. Pour ces configurations en particulier, il semble à propos de confirmer les conclusions dressées au paragraphe précédent ; cette confirmation peut passer par l'évaluation de la dissimilarité entre les stimuli via un autre protocole de test. À cet égard, on peut envisager d'incorporer les couples de stimuli concernés (A_1, A_2) et (H_1, H_2) au corpus de stimuli sur la base duquel seront établies les tendances qualitatives relatives aux effets de la variation des paramètres structuraux sur la perception auditive, établissement qui passe par l'évaluation de la dissimilarité via la méthode de comparaison par paires (Cf. section 6.1.3.1).

Troisième partie

Ajustement de paramètres fréquentiels des sons en vue d'une étude de la qualité sonore du système plaque-cavité à partir de simulations vibro-acoustiques

Chapitre 6

Établissement de tendances qualitatives originales relatives à l'influence de la variation de paramètres structuraux d'un système plaque-cavité

Dans ce chapitre, il est question d'étudier la qualité sonore du système plaque-cavité expérimental¹ ; nous cherchons à dresser des tendances qualitatives originales relatives à l'influence de la variation des paramètres structuraux sur la perception des sons rayonnés par la plaque à l'intérieur de la cavité ; ces tendances qualitatives sont qualifiées d' "originales" car elles émanent de l'évaluation auditive d'un corpus de sons réels, i.e. enregistrés pour différentes configurations structurales du système plaque-cavité expérimental.

En vue d'une étude de la qualité sonore du système plaque-cavité à partir de simulations de sa réponse vibro-acoustique dans le domaine fréquentiel (e.g. simulations FEM/BEM), notre objectif sera d'ajuster certains paramètres fréquentiels inhérents au calcul vibro-acoustique de façon à ce que i) les efforts de calcul vibro-acoustique (ressources informatiques et temps de calcul) nécessaires restent raisonnables, et ii) les tendances qualitatives issues de l'évaluation auditive du corpus de sons synthétisés puissent refléter convenablement ces tendances qualitatives originales, qui font office de référence. L'ajustement de ces paramètres fréquentiels sera abordé au travers des chapitres 7 et 8.

Dans une première section, nous décrirons les caractéristiques du test d'écoute mis en oeuvre. Notamment, nous préciserons le corpus de stimuli sonores adopté et le protocole expérimental utilisé pour collecter des informations subjectives sur ces stimuli auprès d'un jury d'auditeurs ; ce protocole, fondé sur la méthode de comparaison par paires, propose une double évaluation à l'auditeur, i.e. évaluation de la dissimilarité entre les sons et évaluation de la préférence. En outre, nous détaillerons les outils utilisés pour traiter et analyser les réponses

¹Plus précisément, il est question d'étudier la qualité des sons rayonnés par la plaque à l'intérieur de la cavité.

données par les sujets. Dans cette analyse, 3 grandes phases sont planifiées : i) l'analyse en clusters des sujets, ii) l'analyse des jugements de dissimilarité, et iii) l'analyse des jugements de préférence. Nous préciserons leurs objectifs.

La seconde section est dédiée à la présentation des résultats des différentes analyses proposées. À partir de leur interprétation, nous dégagerons les tendances qualitatives relatives à l'influence de la variation des paramètres structuraux du système plaque-cavité sur la perception auditive. Par "tendances qualitatives", nous entendons des informations d'ordre perceptif telles que i) les attributs auditifs utilisés par les auditeurs pour différencier les sons réels et exprimer des jugements de préférence sur ces sons, ii) les relations existant entre ces attributs auditifs et les paramètres structuraux variables du système plaque-cavité, et iii) les configurations structurales les plus à même d'améliorer la qualité des sons à l'intérieur de la cavité.

6.1 Mise en œuvre du test d'écoute

6.1.1 Sujets

Trente-trois sujets (12 femmes et 21 hommes), âgés de 20 à 55 ans, ont participé au test d'écoute. Ces auditeurs sont des membres du LASH ou des étudiants et personnels de l'ENTPE.

6.1.2 Stimuli

Selon les conclusions établies au chapitre 5 relativement aux effets de la dispersion de la mesure sur la perception auditive, on peut choisir indifféremment les stimuli issus de la première ou de la seconde série de mesures acoustiques, ou bien un mélange de stimuli issus des deux séries, pour évaluer l'influence de la variation des paramètres structuraux sur la perception des sons rayonnés par la plaque à l'intérieur de la cavité. Les stimuli A_1 à K_1 ont été choisis pour former le socle du corpus de stimuli soumis à l'évaluation auditive. Sur la base des mêmes conclusions, les stimuli A_2 et H_2 , pour lesquels de légères différences perceptives avec leur associé respectif (A_1 et H_1) avaient pu toutefois être soulignées, sont ajoutés au corpus de stimuli. Leur sélection offre ainsi l'opportunité de confirmer, via une autre méthode d'évaluation, la proximité des sons au sein de ces deux couples, i.e. la faiblesse de l'effet dû à la dispersion de la mesure comparativement à ceux dus aux variations structurales du système expérimental. Ainsi, au total, 13 stimuli sont soumis à l'évaluation auditive par le jury d'auditeurs.

6.1.3 Protocole de test

Le protocole de test d'écoute utilisé, développé au LASH par Faure [Fau03], repose sur la méthode de comparaison par paires. Afin d'éviter tout biais méthodologique, l'ordre de présentation des paires et l'ordre des sons dans la paire sont déterminés aléatoirement pour chaque sujet. Le protocole permet l'évaluation simultanée de la dissimilarité et de la préférence pour chaque paire de sons jouée. Ses caractéristiques principales sont détaillées ci-après.

6.1.3.1 Évaluation de la dissimilarité

Les sujets se voient poser la question suivante : "Comment jugez-vous ces deux sons?". Les jugements de dissimilarité sont récoltés sur une échelle numérique à catégories allant de 0 à 6. Des indications verbales sont associées aux extrémités de l'échelle : "Très semblables" pour la catégorie "0" et "Très différents" pour la catégorie "6". Le nombre de sept catégories apparaît comme un bon compromis entre une échelle avec plus de de catégories qui risquerait de rendre la tâche de jugement assez difficile et une échelle avec moins de catégories qui donnerait une information moins précise sur les dissimilarités [Ram06].

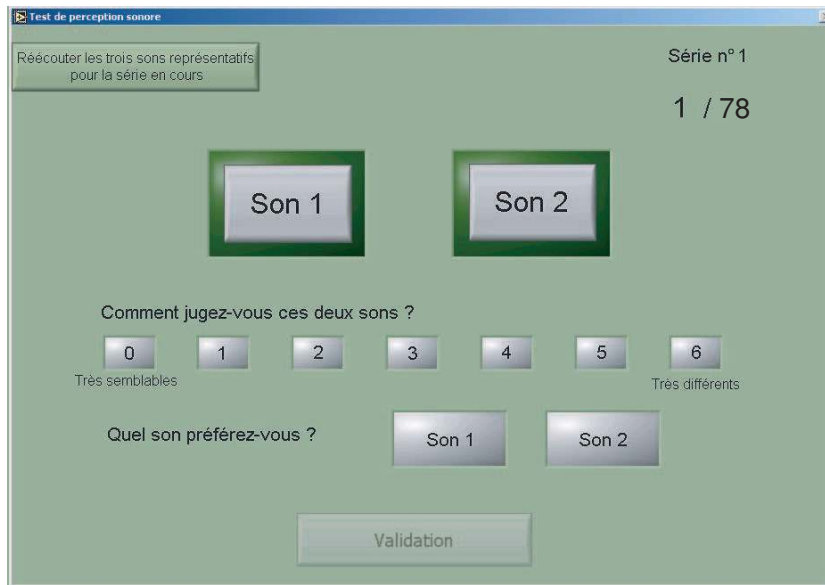


FIG. 6.1 – Interface de présentation et de réponse développée par Faure [Fau03].

L'échelle est présentée aux sujets comme une échelle métrique, i.e. une note de 4 implique des sons deux fois plus différents qu'une note de 2. Nous évaluerons *a posteriori* à l'aide d'un calcul fondé sur la méthode des intervalles successifs si cette échelle a réellement été interprétée comme une échelle métrique (Cf. section 6.1.4.2.a).

6.1.3.2 Évaluation de la préférence

Un jugement de dominance selon la préférence est demandé aux sujets à la suite de la question portant sur la dissimilarité. La question posée est : "Quel son préférez-vous?". L'échelle de réponse à choix forcé comporte deux catégories : "Son 1" et "Son 2". Les sujets ayant jugé deux sons très semblables (catégorie "0") n'ont pas à faire ce choix.

6.1.3.3 Dispositif expérimental

Le test se déroule dans la chambre semi-anéchoïque du LASH. Les sons sont restitués par un casque ouvert Sennheiser HD600 via une carte son haute qualité LynxONE © Lynx Studio Technology. Le niveau moyen de diffusion est égal à 72 dB(A).

Les dispositifs de présentation et de réponse sont regroupés sur une même interface, développée par Faure [Fau03] sous Labview © National instruments (Cf. figure 6.1). Cette interface guide les sujets tout le long du test et permet d'enregistrer les réponses. Les sujets peuvent écouter chacun des sons de la paire autant de fois qu'ils le désirent en cliquant sur l'icône "Son 1" ou "Son 2".

Au début du test, des instructions sont présentées à l'écran (Cf. figure 6.2). À la suite de la lecture des instructions, un panel de 3 sons, choisis au préalable par nos soins comme

représentatifs de la série de sons à tester, est soumis à l'écoute des auditeurs. Les sujets peuvent ainsi se familiariser au type de son du test en cours et s'approprier l'interface et la dynamique de l'échelle de réponse. La possibilité de réécouter ces sons représentatifs à tout moment du test est laissée aux sujets.

Instructions pour le test

- Vous allez comparer différents sons présentés par paires. Ce sont différents bruits de plaque vibrante.
- Pour chaque paire, vous donnerez une note de différence sur une échelle allant de " 0 " à " 6 ".
" 0 " = deux sons très semblables; " 6 " = deux sons très différents.
L'échelle est métrique, c'est à dire qu'une note de " 4 " implique des sons deux fois plus différents qu'une note de " 2 ".
- Le test comporte une série de 55 paires de sons. Pour vous permettre d'utiliser au mieux la dynamique de l'échelle, tous les sons de la série (11 au total) vous sont proposés à l'écoute au début de la série. Si nécessaire, vous pourrez réécouter le panel entier de sons à tout moment au cours de la série en appuyant sur le bouton à gauche en haut de l'écran.
- Pour chaque paire, il vous sera également demandé d'indiquer le son que vous préférez. Si pour une paire votre note de différence est égale à " 0 ", vous n'avez pas à juger la préférence.
- Au cours du test, si vous vous apercevez après validation que vous vous êtes trompé, notez le numéro de la paire et les bonnes réponses sur un papier.

La durée du test est estimée à 20 mn. Le but n'est pas de finir le test le plus rapidement possible, mais de répondre le plus justement possible.

Enfin, veuillez ne surtout pas modifier le volume sonore.

Bon test, Merci !!

Nom Sexe Tranche d'âge

FIG. 6.2 – Instructions données au début de chaque session de test.

6.1.4 Traitement et analyse des données

Cette section vise à définir les outils retenus pour l'analyse des données issues du test d'écoute et également à fixer le cadre de leur utilisation.

6.1.4.1 Analyse en clusters des sujets

L'analyse en clusters des sujets suit deux objectifs :

- i) Le premier objectif est de repérer *a priori* des sous-groupes de sujets répondant avec des logiques clairement différentes :
 - Concernant les jugements de dissimilarité, le modèle INDSCAL sera utilisé pour représenter les stimuli dans un espace perceptif multidimensionnel (Cf. section 6.1.4.2) ; ce modèle renseigne sur le poids accordé par chacun des sujets à chacune des dimensions de l'espace (Cf. section 2.2.3.1.b). Aussi, si l'espace perceptif représente un compromis entre des configurations relatives à des sous-groupes de sujets avec des logiques de pondération foncièrement différentes, il ne pourra alors être interprété correctement [Cox82]. L'analyse en clusters des sujets apparaît utile en préalable à l'analyse INDSCAL pour repérer ces éventuels sous-groupes. Le cas échéant, l'analyse INDSCAL devra alors être réalisée séparément pour chaque sous-groupe.

- Concernant les jugements de préférence, un modèle de mesure unidimensionnelle sera utilisé pour calculer les valeurs de mérite des stimuli (Cf. section 6.1.4.3.b). Quelque soit le modèle utilisé (*cas V* de la loi du jugement comparatif ou modèle de Bradley-Terry), celui-ci suppose que les variables aléatoires y_i , qui représentent les valeurs de mérite A_i des différents stimuli, suivent une loi de distribution de même forme, unimodale (Cf. section 2.2.2.1). Dans la pratique, les différentes réalisations d'une variable y_i dénotent ici l'appréciation d'une valeur de mérite A_i par différents sujets. La propriété d'unimodalité de la distribution sous-entend que, même si cette appréciation peut varier d'un sujet à l'autre, tous les sujets localisent néanmoins le stimulus S_i "à peu près" à un même endroit sur l'échelle unidimensionnelle de la préférence. *A contrario*, i.e. en la présence de sous-groupes de sujets montrant, d'un sous-groupe à l'autre, une appréciation très différente de la valeur de mérite A_i , la variable y_i ne suit plus une loi de distribution unimodale mais plutôt multimodale ; en outre, cette différence d'appréciation peut s'étendre simultanément à plusieurs stimuli. Là encore, l'analyse en clusters des sujets apparaît nécessaire pour détecter la présence éventuelle de sous-groupes en préalable à l'application du modèle de mesure. Si des sous-groupes sont mis à jour, une utilisation adéquate du modèle de mesure passera alors par un traitement séparé des jugements de préférence prononcés par les sujets des différents sous-groupes.
- ii) Le second objectif est de détecter *a priori* la présence de sujets avec des réponses anormalement extrémales sur l'ensemble du test (i.e. des "outliers"). Reprenons les éléments mentionnés au point i).
 - Concernant les jugements de dissimilarité, dans l'analyse INDSCAL, un sujet "outlier" se caractérise, par une logique de pondération anormalement différente de celle des autres sujets. Certes, la présence de sujets "outliers" n'influera pour ainsi dire pas sur le positionnement des stimuli dans l'espace perceptif (et ce en raison du principe de pondération) ; toutefois, l'espace perceptif obtenu ne rendra pas compte correctement des distances entre stimuli perçues par ces sujets "outliers". Pour cette raison, nous préférons ne pas intégrer leurs réponses dans l'analyse INDSCAL.
 - Concernant les jugements de préférence, dans l'analyse unidimensionnelle, un sujet "outlier" se caractérise par une appréciation d'une ou plusieurs valeurs de mérite A_i anormalement éloignées du reste des autres appréciations. Aussi, les réponses des "outliers" ne seront pas prises en compte dans le calcul de valeurs de mérite.

Pour la réalisation de l'analyse en clusters des sujets, nous avons recours à la méthode de Classification Ascendante Hiérarchique² (CAH). La CAH permet de construire un arbre hiérarchique indicé, aussi appelé *dendrogramme*, sur la base d'une matrice de dissemblances entre objets (ici les sujets). Le dendrogramme correspond à "un système de classes emboîtées

²Cette méthode est développée sous **Matlab** © **Mathworks**.

dont l'hétérogénéité augmente avec la taille des classes" [NC05]. Les différentes étapes de l'application de la méthode CAH aux données sont détaillées ci-après.

6.1.4.1.a Calcul des dissemblances entre sujets

Les dissemblances entre sujets sont calculées à partir de leurs réponses données sur les différentes paires de stimuli. La mesure de dissemblance adoptée dépend de la nature des réponses.

Les notes de dissimilarité sont considérées comme étant du niveau d'intervalles³. Par ailleurs, dans le calcul des dissemblances, nous souhaitons seulement prendre en compte les différences de perception individuelle et nous affranchir des différences de stratégie dans l'utilisation de l'échelle de catégories. À cet effet, la mesure $d_1(k, l)$ adoptée pour quantifier la dissemblance entre deux sujets k et l est définie comme suit [Ste04] :

$$d_1(k, l) = 1 - r(k, l) \quad (6.1)$$

où $r(k, l)$ est le coefficient de corrélation linéaire de Bravais-Pearson [Sap90] entre les notes de dissimilarité prononcées par le sujet k et celles prononcées par le sujet l .

Concernant les jugements de préférence, deux mesures de dissemblance sont sélectionnées, i.e. deux dendrogrammes seront dressés et portés à la comparaison afin d'affiner notre analyse en clusters des sujets.

La première mesure porte sur les jugements de dominance, i.e. les données de préférence brutes, du niveau nominal⁴ ; la mesure de dissemblance $d_2(k, l)$ adoptée est définie comme suit [NC05] :

$$d_2(k, l) = \frac{N_p - m(k, l)}{N_p} \quad (6.2)$$

où N_p est le nombre de paires ; $m(k, l)$ est le nombre de paires pour lesquelles les sujets k et l ont prononcé un jugement identique.

La seconde mesure porte sur les scores individuels, i.e. les données de préférence après application d'une transformation ; ces scores sont déterminés à partir des jugements de dominance comme suit :

$$s_i^{(k)} = \sum_{j=1}^n \varphi_{ij}^{(k)} \quad (6.3)$$

où $s_i^{(k)}$ est le score d'un stimulus i donné pour le sujet k ; n est le nombre de stimuli ; les termes $\varphi_{ij}^{(k)}$ désignent les jugements de dominance prononcés par le sujet k sur les différentes paires

³Nous considérons ici que les notes de dissimilarité sont du niveau d'intervalles car, en utilisant la procédure décrite ultérieurement dans la section 6.1.4.2.a, il a été systématiquement vérifié que les sujets ont globalement perçu l'échelle à 7 catégories comme une échelle métrique du niveau d'intervalles.

⁴Pour rappel, les sujets peuvent prononcer les jugements "premier son préféré", "second son préféré", et indirectement "pas de préférence" s'ils ont considéré les deux sons d'une paire comme identiques.

de stimuli i et j et peuvent prendre les valeurs suivantes : 1 si le stimulus i est préféré au stimulus j , -1 si le stimulus j est préféré au stimulus i , 0 si aucune préférence n'est exprimée. La mesure de dissemblance $d_3(k, l)$ adoptée est la distance euclidienne, définie comme suit [NC05] :

$$d_3(k, l) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (s_i^{(k)} - s_i^{(l)})^2} \quad (6.4)$$

où $s_i^{(k)}$ et $s_i^{(l)}$ sont les scores d'un stimulus i donné, respectivement pour le sujet k et le sujet l ; n est le nombre de stimuli.

Les indices de dissemblance $d_1(k, l)$, $d_2(k, l)$ et $d_3(k, l)$ sont calculés pour tous les couples de sujets (k, l) puis respectivement reportés dans des matrices symétriques \mathbf{D}_1 , \mathbf{D}_2 et \mathbf{D}_3 , de taille N sujets $\times N$ sujets, traitées séparément par l'algorithme de classification.

6.1.4.1.b Construction du dendrogramme

Pour chaque matrice de dissemblances entre sujets, le dendrogramme est construit en suivant un processus algorithmique. Initialement, sont définies autant de classes que de sujets (i.e. les éléments terminaux du dendrogramme). Dans une première étape, les deux sujets les plus proches, au sens de la mesure de dissemblance adoptée, sont agrégés en une nouvelle classe ; sur le dendrogramme, des deux éléments terminaux partent deux branches qui se rejoignent pour former un noeud. Puis, il est procédé à une mise à jour de la matrice des dissemblances ; les dissemblances entre la classe nouvellement formée et les autres sujets restants sont calculées en utilisant un critère d'agrégation (voir paragraphe ci-après). Dès lors, on recherche à nouveau les deux classes les plus proches, que l'on agrège, et ainsi de suite jusqu'à l'agrégation de tous les sujets en une seule classe [NC05]. L'algorithme produit au final une matrice de dissemblances entre sujets, appelées *distances ultramétriques*, qui représentent les niveaux d'agrégation des différentes classes ; ces niveaux sont reportés en ordonnée sur le dendrogramme.

Plusieurs critères d'agrégation usuels sont ici testés : le critère du saut minimal, le critère du diamètre, le critère de la moyenne non pondérée, le critère de la moyenne pondérée, le critère de Ward⁵ [Gor99, NC05]. Est finalement retenu le critère pour lequel le degré d'adéquation entre les distances ultramétriques calculées et les dissemblances originales est le plus élevé. Ce degré d'adéquation est mesuré via le coefficient de corrélation cophénétique r_{coph} [SR62, Gor99] et le coefficient de Goodman-Kruskal γ [Gor99] ; plus les valeurs prises par ces coefficients sont proches de 1, plus le degré d'adéquation est élevé.

⁵Ce critère ne peut être utilisé que lorsque la mesure de dissemblance est la distance euclidienne ; il est donc seulement testé pour le traitement de la matrice \mathbf{D}_3 .

6.1.4.1.c Détermination du nombre optimal de classes

Le dendrogramme procure un nombre important de partitions en classes possibles⁶, allant de la partition la plus fine, composée d'autant de classes que de sujets, à la partition la plus grossière, composée d'une seule classe rassemblant tous les sujets. Parmi toutes ces partitions, la partition optimale, i.e. avec un nombre optimal de classes, est la partition la "meilleure en termes de compacité et de séparabilité des classes"⁷ [NC05]. Afin de déterminer le nombre m optimal de classes, un indice de qualité est calculé pour chaque partition présentant un nombre de classes m différent. L'indice de qualité est défini comme suit [NC05] :

$$Q(m) = \frac{1}{N} \sum_{x=1}^m n_x \bar{s}_x \quad (6.5)$$

où $Q(m)$ est l'indice de qualité d'une partition quelconque en m classes (compris entre 0 et 1) ; N est le nombre total de sujets ; n_x est le nombre de sujets dans la classe C_x et \bar{s}_x est la moyenne des valeurs "silhouette" dans la classe C_x . La valeur "silhouette" s_k d'un sujet k quelconque donne une indication sur la qualité de sa classification ; notamment, le calcul de cette valeur repose sur la comparaison de la distance moyenne entre le sujet k et tous les autres sujets de la classe à laquelle il appartient, avec la distance moyenne entre lui et les sujets de la classe la plus voisine [NC05].

Au final, la partition optimale est celle pour laquelle on observe, dans l'idéal, un pic sur la courbe d'évolution de l'indice de qualité en fonction du nombre de classes m . Selon l'effectif des classes, faible ou important, celles-ci dénotent respectivement des sujets "outliers" ou des sous-groupes de sujets⁸.

6.1.4.2 Analyse des données de dissimilarité

Après l'analyse en clusters des sujets, l'analyse des jugements de dissimilarité est menée. À cet effet, nous avons recours à la technique d'échelonnement multidimensionnel (Cf. section 2.2.3.1) pour dresser l'espace perceptif de dissimilarité et ainsi rendre compte des distances perceptives existant entre les stimuli.

6.1.4.2.a Choix du modèle E.M.D. et évaluation du niveau réel de la mesure

Il est demandé aux sujets de considérer l'échelle à 7 catégories qui leur est présentée comme une échelle métrique (Cf. section 6.1.3.1). Dans les faits, un sujet peut effectivement l'avoir considérée comme telle ; tout autrement, il peut avoir borné sa signification à celle d'une échelle de catégories, éventuellement du fait de la difficulté éprouvée à produire une estimation

⁶Toute coupure du dendrogramme par une droite horizontale fournit une partition possible.

⁷Du moins s'il en existe une.

⁸On se propose d'adopter la convention suivante : i) pour un effectif inférieur ou égal à 3 (NB : ce nombre correspond à 10% environ du nombre total de sujets participant au test d'écoute), la classe dénote des sujets "outliers", et ii) pour un effectif supérieur à 3, la classe dénote un sous-groupe de sujets.

métrique de la dissimilarité. Ainsi, selon la façon dont l'échelle a été considérée par le sujet, les données de dissimilarité recueillies peuvent être respectivement i) métriques (du niveau des rapports, ou du niveau d'intervalles⁹), ou ii) ordinales. Pour pallier ces deux alternatives, le choix du modèle E.M.D. prenant en compte les différences individuelles INDSCAL¹⁰ paraît adapté, d'après la discussion présentée dans la section 2.2.3.1.b quant à sa robustesse vis-à-vis du niveau des données traitées [WM93].

Pour autant, nous souhaitons évaluer le niveau réel de la mesure afin d'apprécier le degré de violation de l'hypothèse de données du niveau d'intervalles présumée par INDSCAL¹¹. La procédure d'évaluation adoptée permet seulement de juger si les sujets ont globalement considéré l'échelle à 7 catégories comme une échelle métrique du niveau d'intervalles. Cette procédure, basée sur la méthode des intervalles successifs [Edw52], est présentée en détail dans l'annexe E.

Dans l'hypothèse où les sujets considèrent l'échelle à 7 catégories comme une échelle métrique du niveau d'intervalles, ils doivent percevoir toutes les catégories avec une largeur identique. La méthode des intervalles successifs permet d'évaluer la largeur des intervalles sous-tendant le continuum subjectif des dissimilarités, correspondant à la largeur des catégories perçue par les sujets. Dans la pratique, afin d'estimer le niveau réel de la mesure (entre ordinal et métrique du niveau d'intervalles) procurée par l'échelle à 7 catégories, le coefficient de corrélation r_{bornes}^2 [Fau03] entre les valeurs "vraies" des bornes supérieures des catégories calculées sur le continuum subjectif par la méthode des intervalles successifs¹² et les valeurs "ciblées" des bornes supérieures des catégories¹³ est utilisé.

6.1.4.2.b Détermination de la dimensionnalité de l'espace perceptif

Communément, le choix de la dimensionnalité est basé sur la comparaison des valeurs d'un indicateur de l'ajustement du modèle aux données initiales, calculé pour chaque dimensionnalité. Pour INDSCAL, un indicateur possible est le pourcentage cumulé de variance expliquée (donné en sortie du programme, Cf. Réf. [Smi06]). Plus le nombre de dimensions augmente, plus la valeur de cet indicateur tend vers 100%. Toutefois, une configuration de dimensionna-

⁹Le fait de considérer les données comme étant métriques du niveau des rapports sous-entend que le sujet a bien utilisé la catégorie "0" comme origine absolue de l'échelle de dissimilarité. Ce point peut être vérifié en introduisant dans le test de dissimilarité n paires supplémentaires présentant deux fois le même son, n étant le nombre de sons. Toutefois, nous n'avons pas suivi cette démarche, jugeant le nombre de paires présentant des stimuli différents déjà conséquent (78 paires de sons différents constituées à partir de 13 sons à évaluer, Cf. section 6.1.2); à défaut de vérification, il est donc plus juste d'affirmer que, si les données sont métriques, elles sont au minimum du niveau d'intervalles.

¹⁰Dans la pratique, l'analyse est réalisée à l'aide du programme `sindscal.exe`, téléchargeable sur : <http://www.netlib.org/mds/sindscal.dos/>

¹¹Pour rappel, INDSCAL est initialement destiné au traitement de données métriques, aussi bien du niveau d'intervalles que du niveau des rapports (Cf. section 2.2.3.1.b).

¹²Ces valeurs ne peuvent être calculées par la méthode des intervalles successifs que pour les catégories "0", "1", "2", "3", "4" et "5" (Cf. annexe E).

¹³i.e. 0.5, 1.5, 2.5, 3.5, 4.5 et 5.5 respectivement pour les catégories "0", "1", "2", "3", "4" et "5" (Cf. annexe E).

lité trop importante par rapport au nombre de stimuli à représenter n'est pas significative ; il faut donc retenir une configuration de dimensionnalité minimale, pour laquelle la valeur de cet indicateur reste acceptable [TD93]. On peut déterminer de manière graphique la dimensionnalité la plus vraisemblable de l'espace perceptif en traçant l'évolution de la proportion cumulée de variance expliquée en fonction du nombre de dimensions ; la dimensionnalité la plus vraisemblable est alors celle pour laquelle, dans l'idéal, on peut détecter un coude sur la courbe [Ste02] (procédure analogue à la méthode du *scree test* utilisée en analyse factorielle, Cf. section 6.1.4.3.a).

6.1.4.2.c Détermination des attributs auditifs saillants

Les dimensions de l'espace perceptif de dissimilarité données par le modèle INDSCAL ont une signification psychologique ; elles représentent les attributs auditifs saillants des sons vraisemblablement utilisés par les sujets pour les différencier.

Une écoute minutieuse des sons ordonnés suivant leur coordonnée sur la dimension perceptive étudiée permet dans un premier temps de discerner l'attribut auditif lié à cette dimension [SMW99]. Puis, parmi les métriques acoustiques et psychoacoustiques calculées sur les sons et susceptibles de décrire cet attribut, nous retenons la métrique pour laquelle l'analyse statistique (menée sous *Statistica* © Statsoft) montre que ses valeurs sont les plus corrélées avec les coordonnées des sons sur cette dimension, i.e. la métrique pour laquelle le coefficient de corrélation linéaire de Bravais-Pearson, r , est, en valeur absolue, le plus proche de 1 (et le seuil de signification observé p associé¹⁴ le plus proche de 0).

6.1.4.2.d Construction des ellipsoïdes de confiance par la méthode du Bootstrap

Des ellipsoïdes de confiance à 95% sont calculés sur les positions des stimuli dans l'espace INDSCAL selon la méthode du Bootstrap [WCC84]. L'objectif est double : i) estimer le degré de confiance que l'on peut accorder à l'interprétation des dimensions de l'espace perceptif, ii) identifier, via le recouvrement des ellipsoïdes de confiance, les stimuli perçus comme identiques — ou au contraire comme distincts — par les sujets.

Originellement, le bootstrap est une technique de rééchantillonnage introduite par Efron¹⁵ qui permet de calculer l'erreur standard d'un paramètre estimé dont la loi de probabilité est inconnue. Le principe du bootstrap consiste à créer, à partir d'un échantillon original de N observations, K nouveaux échantillons (appelés échantillons bootstrap) de N observations,

¹⁴Dans le cadre de l'étude des corrélations, p est le seuil de signification observé associé au test de l'hypothèse nulle selon laquelle la variable indépendante étudiée, i.e. une métrique, et la variable dépendante, i.e. la dimension perceptive, sont linéairement indépendantes. À l'instar de l'analyse de variance, le résultat du test d'hypothèse peut être déclaré i) *hautement significatif* si $p < 0.001$, ii) *très significatif* si $p < 0.01$, et iii) *significatif* si $p < 0.05$. Dans les trois cas, l'hypothèse nulle peut être rejetée et on peut conclure qu'il existe une relation linéaire entre les deux variables.

¹⁵B. Efron. Bootstrap methods : Another look at the jackknife. *Annals of Statistics*, 7 :1-26, 1979 (cité dans [Pal02, WCC84]).

tirées aléatoirement et avec remise dans l'échantillon original. L'erreur standard est estimée par l'écart-type des K valeurs du paramètre calculées pour les K échantillons bootstrap. Un nombre K important d'échantillons bootstrap est nécessaire à une estimation correcte de l'erreur standard.

Les paramètres estimés sont, ici, les vecteurs de coordonnées “vraies” des stimuli dans l'espace perceptif ; une observation correspond à un ensemble complet de notes de dissimilarité exprimées par un sujet. Pour chaque échantillon bootstrap, les vecteurs de coordonnées sont obtenus après traitement (par l'algorithme E.M.D. INDSCAL) des réponses de N sujets, tirés aléatoirement et avec remise dans l'échantillon original des N sujets. Pour chaque stimulus, l'ellipsoïde de confiance à 95% est construit à partir de la matrice de covariance des vecteurs de coordonnées bootstrap¹⁶ [WCC84]. L'estimation est réalisée sur la base de 250 échantillons bootstrap (nombre jugé suffisant à la lecture de la référence [Pal02] et notamment utilisé par Roussarie [Rou99] et Faure [Fau03]).

6.1.4.3 Analyse des jugements de préférence

Deux variantes d'analyse, i.e. une analyse multidimensionnelle (Cf. section 6.1.4.3.a) et une analyse unidimensionnelle (Cf. section 6.1.4.3.b), aux desseins complémentaires, sont proposées pour traiter les jugements de dominance selon la préférence.

6.1.4.3.a Analyse multidimensionnelle de la préférence par MDPREF

Les jugements de préférence exprimés par les sujets sont analysés suivant le modèle d'échelonnement MDPREF¹⁷ (Cf. section 2.2.3.2). Ce modèle offre la possibilité d'inspecter graphiquement les différences inter-individuelles à partir de l'espace perceptif de préférence fourni. En outre, il est possible de procéder à l'identification des attributs auditifs des sons pouvant expliquer les jugements de préférence prononcés par les sujets.

Pré-traitement des données Par défaut, l'algorithme prend en charge des données de type score (rangées dans une matrice rectangulaire à 2 entrées et 2 modes, Cf. section 2.2.3.2). Une fonctionnalité présente dans MDPREF permet la transformation des matrices de dominance individuelles en une matrice de scores, appelée matrice de scores *primaires* [New81]; le codage utilisé offre la possibilité de tenir compte des jugements de préférence “neutres” relatifs aux paires jugées très semblables (catégorie “0” sur l'échelle de dissimilarité).

Choix de la dimensionnalité de l'espace de préférence Le nombre de facteurs principaux à retenir peut être déterminé au moyen de la méthode du *scree test* [Cat66],

¹⁶Dans la pratique, la construction de l'ellipsoïde est réalisée à l'aide d'une routine développée sous Matlab © Mathworks par Johnson. Cette routine est téléchargeable sur :

http://www.mathworks.com/matlabcentral/files/4705/error_ellipse.m

¹⁷Dans la pratique, l'analyse est réalisée à l'aide du programme MDPREF.exe, téléchargeable sur : <http://www.newmdsx.com/MDPREF/mdpref.htm>

utilisée en analyse factorielle. Le test porte sur le diagramme des valeurs propres des matrices de covariance \mathbf{SS}^t et $\mathbf{S}^t\mathbf{S}$ (Cf. section 2.2.3.2) exprimées en fonction du numéro du facteur principal associé ; un diagramme illustratif est présenté sur la figure 6.3. Selon cette méthode, la dimensionnalité appropriée peut être estimée par le numéro du facteur dont la valeur propre associée se situe à l'extrémité de la droite pouvant relier d'un seul trait un nombre maximal de faibles valeurs propres¹⁸. Sur le diagramme illustratif (Cf. figure 6.3), une droite passant par les valeurs propres 3 à 10 peut être tracée ; d'après la méthode décrite ci-dessus, le nombre de facteurs à retenir est vraisemblablement égal à 3.

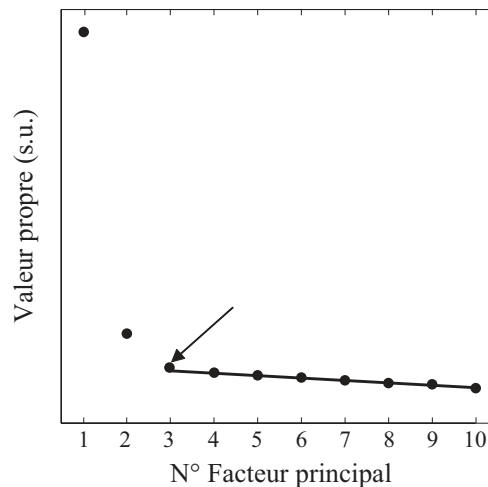


FIG. 6.3 – Exemple de diagramme des valeurs propres exprimées en fonction du numéro du facteur principal associé.

Dans le cadre d'un bilan des différences inter-individuelles (Cf. paragraphe suivant), on peut, en sus de la méthode globale du *scree test*, déterminer le nombre de facteurs principaux approprié via la consultation des qualités de représentation des vecteurs sujets obtenues pour des espaces de dimensionnalité différente. Pour un espace de dimensionnalité donnée, la qualité de représentation de chaque vecteur sujet est fournie en sortie du programme MDPREF au travers du coefficient de corrélation entre les projections des stimuli sur le vecteur sujet et les scores primaires initialement calculés pour ce même sujet [New81] ; plus la valeur du coefficient est proche de 1, meilleure est la représentation des scores primaires du sujet dans l'espace de dimensionnalité choisie. Au final, on aura plutôt tendance à retenir la dimensionnalité pour laquelle la qualité de représentation de l'ensemble des vecteurs sujets est élevée. En minimisant de la sorte les distortions dans la représentation des scores primaires, on pourra procéder à moindre risque au bilan des différences inter-individuelles.

Bilan des différences inter-individuelles À partir de l'espace perceptif de préférence, il est procédé à un bilan des différences inter-individuelles en inspectant les positions relatives

¹⁸Les valeurs propres les plus faibles désignent les facteurs qui représentent du "bruit" de mesure.

des vecteurs sujets. En effet, le cosinus de l'angle de séparation entre deux vecteurs sujets fournit une mesure de la concordance entre les scores primaires calculés pour les deux sujets¹⁹ [Cox82]. Ce bilan est confronté avec les résultats de l'analyse en clusters des sujets (i.e. avec les résultats de la CAH appliquée respectivement sur les matrices de dissemblance \mathbf{D}_2 et \mathbf{D}_3 , Cf. section 6.1.4.1). Cette confrontation vise à entériner l'identification des sujets "outliers" et des sous-groupes de sujets. Pour l'interprétation de l'espace perceptif de préférence qui suit, l'analyse MDPREF est relancée après élimination des réponses des sujets jugés comme "outliers".

Interprétation de l'espace perceptif de préférence Il est procédé à l'examen des liaisons entre les vecteurs sujets et les axes de l'espace. La direction dans laquelle pointe un vecteur sujet laisse présager de la façon dont le sujet combine les caractéristiques des stimuli dans l'établissement de ses jugements de préférence²⁰ [Cox82], à supposer que les facteurs ont une signification psychologique et renvoient à des caractéristiques des sons (voir paragraphe ci-après). Aussi, une situation dans laquelle les vecteurs sont très fortement liés à un axe, et situés d'un même côté de cet axe, dénote un facteur de *consensus* parmi les préférences exprimées par les sujets ; au contraire, une situation dans laquelle les vecteurs sujets présentent à la fois des composantes positives et négatives le long d'un axe dénote un facteur de différences individuelles [SGS74].

Pour investiguer l'hypothèse selon laquelle les facteurs ont une signification psychologique, il est procédé à l'examen des liaisons entre les facteurs, représentés par les axes, et les métriques calculées sur les sons, représentées dans l'espace comme des vecteurs en utilisant une procédure PREFMAP^{21,22}. Un vecteur métrique pointe dans une direction telle que les projections des stimuli sur le vecteur sont en adéquation maximale avec les valeurs de la métrique ; la longueur du vecteur (non normé), équivalant au coefficient de corrélation linéaire entre les projections et les valeurs de la métrique, indique la qualité de représentation de la métrique dans l'espace [SGS74]. Ainsi, un vecteur métrique très proche d'un axe laisse présager que le facteur se rapporte fortement à l'attribut auditif décrit par la métrique ; cet attribut auditif est vraisemblablement utilisé par les sujets dans l'établissement des jugements de préférence. Il est en outre procédé à une écoute minutieuse des stimuli ordonnés suivant leur projection sur le vecteur métrique afin de vérifier que la métrique traduit bien un attribut auditif dont

¹⁹Lorsque les deux vecteurs sont parfaitement représentés dans l'espace, le cosinus de l'angle équivaut au coefficient de corrélation entre les deux séries de scores primaires ; lorsqu'ils ne sont pas parfaitement représentés dans l'espace, le cosinus de l'angle est toujours inférieur au coefficient de corrélation entre les deux séries de scores primaires.

²⁰Le cosinus de l'angle que le vecteur forme avec l'axe fournit une mesure de l'importance accordée par ce sujet au facteur.

²¹J. D. Carroll. Individual differences and multidimensional scaling. In R. N. Shepard, A. K. Romney, et S. B. Nerlove, éditeurs, *Multidimensional Scaling : Theory and Applications in the Behavioral Sciences*, volume 1, pages 105-155. Seminar Press, New York and London, 1972 (cité dans [Cox82]).

²²Dans la pratique, l'analyse est réalisée à l'aide du programme PREFMAP.exe, téléchargeable sur : <http://www.newmdsx.com/PREFMAP/prefmap.htm>

la variation parmi les stimuli est perceptible, et ce de façon saillante.

Au final, sur la base des éléments établis précédemment, il est procédé à une typologie des stimuli, conjointement en fonction des préférences exprimées par les sujets²³ et des attributs auditifs²⁴ identifiés comme pouvant expliquer ces préférences.

6.1.4.3.b Analyse unidimensionnelle de la préférence par un modèle de choix probabiliste

Après leur analyse multidimensionnelle par MDPREF, les réponses des sujets au test de préférence sont analysées suivant un modèle de choix probabiliste afin de construire une échelle unidimensionnelle de la préférence (Cf. section 2.2.2.4). Ce type d'analyse est très utilisé dans le domaine de la qualité sonore car il permet, via le calcul des valeurs de mérite, d'obtenir un classement des sons selon la préférence, très pratique pour dégager la ou les solutions techniques plus à même d'améliorer la qualité acoustique d'un produit ou le confort acoustique en général.

Prise en compte des paires jugées très semblables Afin de prendre en compte les paires jugées très semblables (i.e. les paires notées "0" sur l'échelle à catégories de dissimilarité), les éléments de la matrice de proportions \mathbf{P} (Cf. section 2.2.2.4) sont déterminés en utilisant la formule de calcul (2.20) des proportions dans le cas d'une échelle à 3 catégories [Dav88], selon le schéma détaillé dans la référence [Fau03].

Évaluation de la qualité d'ajustement et choix du modèle de mesure Dans la section 2.2.2, nous avons évoqué deux modèles de mesure, i.e. le cas V de la loi du jugement comparatif de Thurstone et le modèle de Bradley-Terry. Ces modèles sont couramment utilisés dans le secteur automobile [OAEL01]; tous deux sont pris en considération dans cette étude. Après comparaison de leur qualité d'ajustement, nous ne retiendrons au final qu'un seul de ces modèles pour établir le classement de préférence sur lequel reposera l'interprétation.

La procédure suivie pour évaluer la qualité d'ajustement des modèles aux données expérimentales est fondée sur la comparaison des proportions "observées" p_{ij} à des proportions "théoriques" p'_{ij} reconstruites à partir des valeurs de mérite a_i calculées [Dav88] (Cf. section 2.2.2.4).

Dans un premier temps, des différences "théoriques" entre les valeurs de mérite a_i sont calculées, puis reportées dans une matrice Δ' :

²³i.e. de leurs projections sur les vecteurs sujets.

²⁴i.e. de leurs projections sur les vecteurs métriques.

$$\Delta' = \begin{bmatrix} a'_{1-1} & a'_{1-2} & \cdots & a'_{1-j} & \cdots & a'_{1-n} \\ a'_{2-1} & a'_{2-2} & \cdots & a'_{2-j} & \cdots & a'_{2-n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \cdots & \vdots \\ a'_{i-1} & a'_{i-2} & \cdots & a'_{i-j} & \cdots & a'_{i-n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a'_{n-1} & a'_{n-2} & \cdots & a'_{n-j} & \cdots & a'_{n-n} \end{bmatrix}$$

où les éléments a'_{i-j} sont donnés par :

$$a'_{i-j} = a_i - a_j \quad (6.6)$$

où a_i et a_j sont les valeurs de mérite respectivement calculées pour les stimuli S_i et S_j .

La matrice Δ' correspond à i) la matrice \mathbf{Z}' des scores centrés réduits “théoriques” dans le cas où le modèle de Thurstone est utilisé, ou ii) la matrice \mathbf{L}' des valeurs *logit* “théoriques” dans le cas où le modèle de Bradley-Terry est utilisé.

Ensuite, les éléments p'_{ij} de la matrice \mathbf{P}' des proportions “théoriques” sont calculés en utilisant i) la fonction de répartition de la loi normale centrée-réduite $\mathcal{N}(0,1)$ si le modèle de Thurstone est utilisé, ou ii) l'expression (2.17) si le modèle de Bradley-Terry est employé [Dav88], soit :

$$p'_{ij} = \frac{1}{2} \left[1 + \tanh \left(\frac{1}{2} l'_{ij} \right) \right] \quad (6.7)$$

où l'_{ij} est la valeur *logit* “théorique” calculée pour la paire de stimuli S_i et S_j .

Les proportions étant symétriques, seuls les éléments (non diagonaux) p_{ij} et p'_{ij} placés dans la partie triangulaire supérieure (ou inférieure) respectivement des matrices de proportions observées et de proportions “théoriques” sont portés à la comparaison. Les proportions “théoriques” p'_{ij} sont alors tracées en fonction des proportions “observées” p_{ij} . Ainsi, la dispersion du nuage de points sur le diagramme permet d'apprécier la qualité d'ajustement du modèle aux données expérimentales. Cette première évaluation qualitative est complétée par le calcul du coefficient de corrélation r^2 entre les deux séries de proportions.

La confrontation des résultats (i.e. diagramme proportions “théoriques” *vs* proportions observées et valeur de r^2 associée) obtenus pour les deux modèles permet ainsi de déterminer lequel est le plus adéquat.

Construction des intervalles de confiance par la méthode du Bootstrap Des intervalles de confiance à 95 % sont calculés sur les valeurs de mérite des stimuli par la méthode du Bootstrap. L'objectif est de repérer si des configurations structurales peuvent être considérées comme similaires en termes de préférence ; le chevauchement des intervalles de confiance rend compte de cette similitude.

Si l'on reprend les points théoriques du Bootstrap énoncés dans la section 6.1.4.2.d, les paramètres estimés sont ici les valeurs de mérite des stimuli ; une observation correspond à un

ensemble complet de jugements de préférence exprimés par un sujet. Pour chaque échantillon bootstrap, les valeurs de mérite sont estimées, en utilisant le modèle de mesure désigné ci-avant comme le plus adéquat, à partir des réponses de N sujets, tirés aléatoirement et avec remise dans l'échantillon original des N sujets. Les intervalles de confiance à 95% sont calculés sur les valeurs de mérite des stimuli suivant la méthode de l'erreur standard [Pal02]. Un nombre de 250 échantillons bootstrap est retenu comme dans le cas de l'analyse des dissimilarités (Cf. section 6.1.4.2.d).

Construction d'un modèle prédictif de la préférence L'un des principaux objectifs de l'analyse unidimensionnelle de la préférence est de fournir un modèle de préférence capable de prédire les valeurs de mérite mesurées. Le modèle est construit à partir de la régression linéaire entre les valeurs de mérite mesurées et les valeurs d'une ou plusieurs métriques mises en avant lors de l'analyse multidimensionnelle de la préférence par MDPREF (Cf. section 6.1.4.3.a).

6.2 Résultats relatifs à l'établissement des tendances qualitatives originales

6.2.1 Analyse en clusters des sujets

Pour illustration, seule l'analyse en clusters des sujets réalisée pour les jugements de préférence est développée ici. L'analyse en clusters des sujets réalisée pour les jugements de dissimilarité est présentée dans la section F.1.1.

Les figures 6.4 et 6.5 présentent les résultats de la Classification Ascendante Hiérarchique appliquée respectivement sur les matrices de dissemblances entre sujets \mathbf{D}_2 et \mathbf{D}_3 (Cf. section 6.1.4.1.a).

Pour les deux CAH, deux partitions se démarquent des autres de par leur indice de qualité plus élevé : tout d'abord la partition en 2 classes, puis la partition en 3 classes. Cette démarcation est plus prononcée pour la CAH appliquée à la matrice de dissemblances \mathbf{D}_3 (Cf. figures 6.4(b) et 6.5(b)). Pour la première partition, l'une des deux classes est composée d'un seul sujet, i.e. le sujet n°17; on peut le considérer comme un "outlier". Pour la seconde partition, deux des trois classes sont composées d'un seul sujet, i.e. respectivement le sujet n°17 et le sujet n°29; de même, chacun peut être considéré comme un "outlier". En outre, dans leur ensemble, les résultats montrent qu'il n'existe pas de sous-groupes de sujets.

La figure 6.6 montre le plan factoriel 1-2 de l'espace perceptif de préférence 5D dressé via l'analyse MDPREF des réponses de tous les sujets (l'étude de la dimensionnalité de l'espace perceptif de préférence est présentée dans la section F.1.2). Seuls les vecteurs sujets, suffisants à un bilan des différences inter-individuelles, sont représentés; pour plus de lisibilité, seules leurs

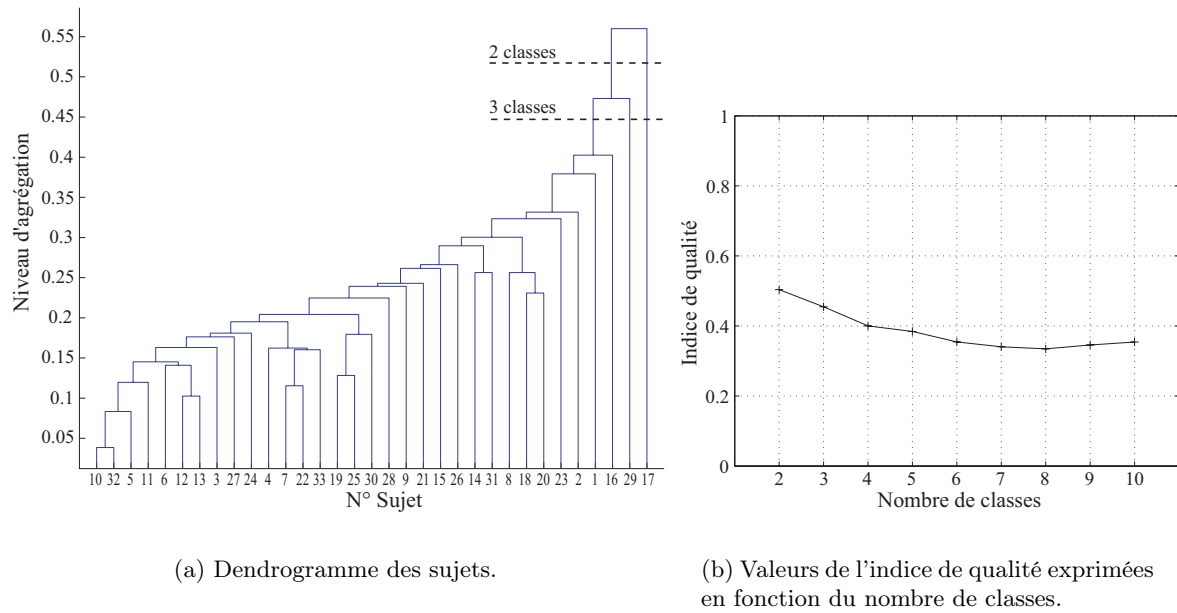


FIG. 6.4 – Résultats de la Classification Ascendante Hiérarchique appliquée sur la matrice de dissemblances \mathbf{D}_2 .

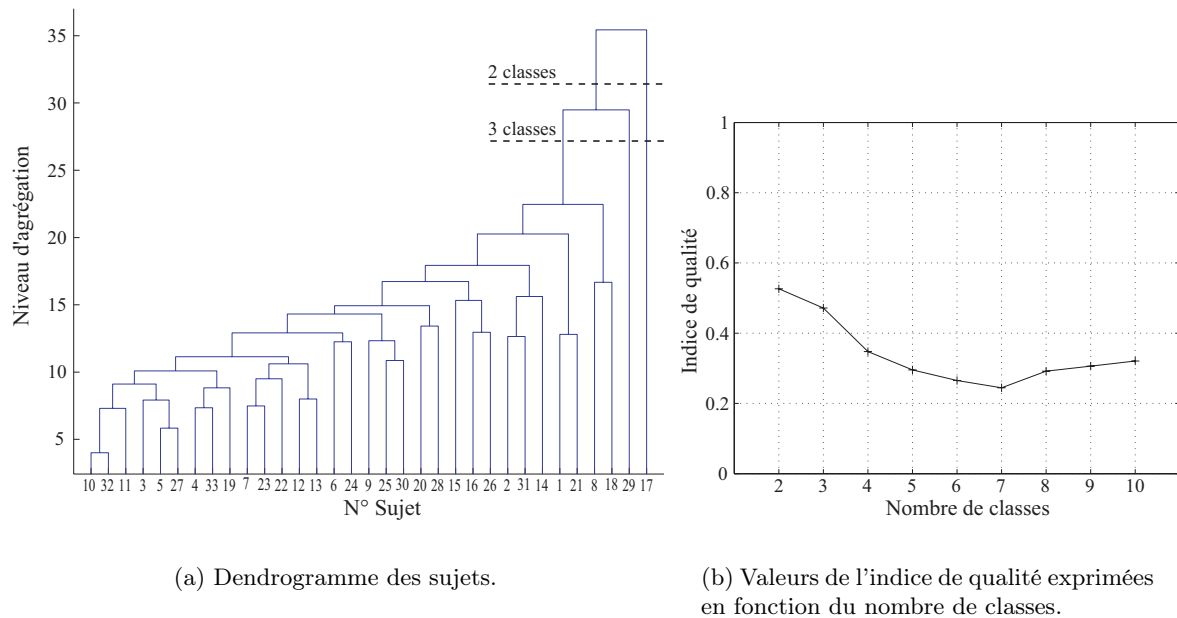


FIG. 6.5 – Résultats de la Classification Ascendante Hiérarchique appliquée sur la matrice de dissemblances \mathbf{D}_3 .

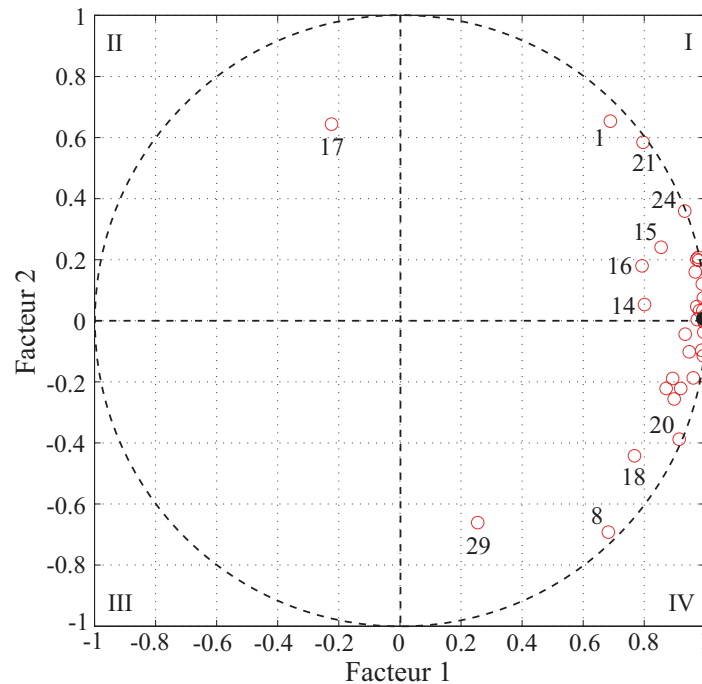


FIG. 6.6 – Bilan des différences inter-individuelles à partir de l'espace perceptif de préférence 5D (plan factoriel 1-2) dressé via MDPREF sur la base des réponses de tous les sujets. \circ : extrémités des vecteurs sujets, \bullet : extrémité du vecteur sujet “moyen”.

extrémités sont reportées sur la figure. Est également représenté le vecteur sujet “moyen”²⁵ (son extrémité est marquée par un point noir sur la figure).

La représentation du plan factoriel 1-2 suffit pour rendre compte des différences inter-individuelles. Sur la figure 6.6, on peut observer que le vecteur sujet n°17 pointe dans une zone (quadrant II) marginale par rapport à la zone dans laquelle pointent les autres vecteurs (quadrants I et IV) ; dans le quadrant IV, la direction du vecteur sujet n°29 diffère légèrement de celle des autres vecteurs. Par ailleurs, on peut remarquer que les vecteurs sujets sont dans l'ensemble bien représentés dans le plan factoriel 1-2 (i.e. leur extrémité est proche du cercle unitaire), excepté quelques uns, dont les vecteurs sujets n°17 et n°29. À partir de ces observations, on peut considérer les sujets n°17 et n°29 comme des sujets “outliers”.

Au final, de la confrontation des résultats des deux CAH avec le bilan des différences inter-individuelles réalisé à partir de l'espace perceptif de préférence, il ressort que i) on peut considérer à la fois le sujet n°17 et le sujet n°29 comme des sujets “outliers”, et ii) des sous-groupes de sujets ne se sont pas formés. Pour l'établissement des tendances qualitatives originales (Cf. section 6.2.2), les jugements de préférence prononcés par les sujets n°17 et n°29 seront écartés de l'analyse.

²⁵Le vecteur sujet “moyen” est la somme vectorielle de tous les vecteurs sujets, divisée par sa norme.

6.2.2 Établissement des tendances qualitatives originales

6.2.2.1 Espace perceptif de dissimilarité

Les données de dissimilarité ont été échelonnées dans un espace perceptif à deux dimensions (Cf. figure 6.7) ; l'évaluation du niveau réel de la mesure et l'étude de la dimensionnalité de l'espace perceptif de dissimilarité sont proposées respectivement dans les sections F.2.1.1 et F.2.1.2. Les proportions de variance expliquées par les dimensions 1 et 2 sont toutes deux égales à 23%.

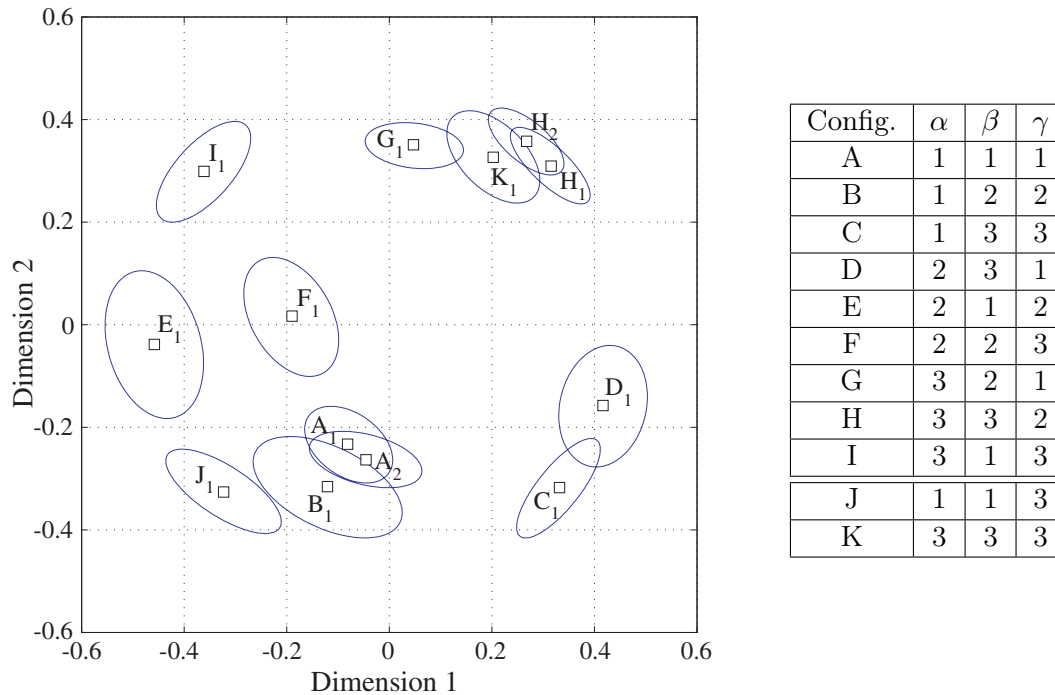


FIG. 6.7 – Espace perceptif de dissimilarité 2D des stimuli, dans leur ellipse de confiance à 95%. Les combinaisons des modalités des paramètres structuraux associées aux stimuli sont rappelées dans le tableau de droite, reproduction du tableau 4.2.

Liens avec les paramètres structuraux

La première dimension de l'espace perceptif semble être reliée à la fois aux propriétés en absorption de la cavité (α) et aux conditions de serrage de la plaque (γ). L'influence du premier paramètre apparaît nettement au premier plan. En effet, les stimuli correspondant à une configuration qui implique de fortes propriétés en absorption de la cavité (i.e. C , D , H , K) sont tous localisés dans la partie droite de l'espace ; les autres stimuli, renvoyant à des configurations qui impliquent de plus faibles propriétés en absorption de la cavité obtiennent des coordonnées plus basses le long de cette dimension. L'influence du second paramètre apparaît plutôt à l'arrière-plan. En l'occurrence, parmi les stimuli pour lesquels la configuration sous-jacente implique les deux plus faibles niveaux de propriétés en absorption, ceux pour

lesquels la configuration renferme également de faibles conditions de serrage de la plaque (e.g. A_1) obtiennent des coordonnées plus élevées le long de la dimension, en comparaison des stimuli pour lesquels la configuration implique de fortes conditions de serrage (e.g. I_1 et J_1).

La seconde dimension perceptive apparaît contrôlée par l'épaisseur de la plaque (β). Les stimuli qui se rapportent à une configuration comprenant la plaque de plus faible épaisseur 1.5 mm (A, B, C, J) présentent les coordonnées les plus basses le long de cette dimension ; au contraire, les stimuli qui se rapportent à une configuration comprenant la plaque de plus forte épaisseur 3 mm (G, H, I, K) obtiennent les coordonnées les plus élevées.

Analyse psychoacoustique

L'analyse psychoacoustique révèle que la première dimension perceptive est liée à la sonie des sons : plus la coordonnée d'un stimulus le long de cette dimension est importante, moins sa sonie est élevée. La sonie de Zwicker²⁶ [ZF99] apparaît comme la métrique la plus corrélée avec cette dimension ($r = -0.936$, $p < .001$) ; le diagramme des coordonnées des stimuli le long de la dimension 1 exprimées en fonction des valeurs de la sonie de Zwicker est présenté sur la figure F.5.

La seconde dimension se rapporte à la balance spectrale des stimuli : plus la coordonnée d'un stimulus le long de cette dimension est importante, plus l'énergie acoustique aux plus hautes fréquences est importante par rapport à celle aux basses fréquences. Cet attribut peut se décrire par le Centre de Gravité Spectral²⁷ ($r = 0.905$, $p < .001$) ; de même, le diagramme des coordonnées des stimuli le long de la dimension 2 exprimées en fonction des valeurs du CGS est présenté sur la figure F.6.

Retour sur l'effet de la dispersion de la mesure

On peut remarquer que les stimuli A_2 et H_2 sont très proches dans l'espace perceptif de leur associé respectif (A_1 et H_1). Pour les deux couples de stimuli, les ellipses de confiance à 95% calculées sur les positions des deux stimuli se chevauchent en grande partie, montrant ainsi que la distance perceptive entre les deux stimuli est très réduite ; ceci confirme les conclusions dressées au chapitre 5 quant à la faiblesse de l'effet de la dispersion de la mesure sur la perception des sons rayonnés et quant au fait que les distances perçues entre stimuli peuvent être essentiellement imputées à la variation des paramètres structuraux.

6.2.2.2 Espace perceptif de préférence

Les données de préférence ont été échelonnées dans un espace perceptif à 4 dimensions (Cf. étude de la dimensionnalité présentée dans la section F.2.2). Les proportions d'inertie

²⁶La métrique "sonie de Zwicker" est calculée à l'aide du logiciel Sound Quality © M.T.S.

²⁷La métrique "CGS" est calculée selon l'expression (2.5) (Cf. section 2.1.3.2), à partir du spectre auditif calculé à l'aide du logiciel dBsonic © Cortex Instruments - OldB Metravib Technologies [Cor04] (Cf. section G.1).

expliquées par les facteurs²⁸ 1,2,3 et 4 sont respectivement égales à 80%, 7%, 4% et 2%. Seuls les deux premiers facteurs ont finalement été retenus dans l'interprétation car les facteurs 3 et 4 n'ont pu donner lieu à une interprétation claire [EP98]. Le plan factoriel 1-2 de l'espace perceptif de préférence est présenté sur la figure 6.8. Notons que le plan factoriel 3-4 est présenté sur la figure F.8.

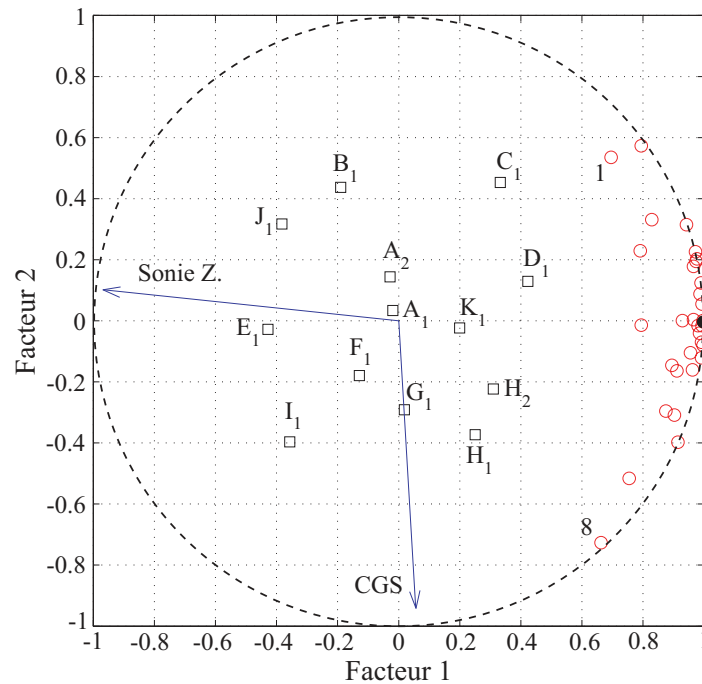


FIG. 6.8 – Plan factoriel 1-2 de l'espace perceptif de préférence. \square : stimuli, \circ : extrémités des vecteurs sujets, \bullet : extrémité du vecteur sujet “moyen”, \rightarrow : vecteurs métriques.

Pour revenir sur les différences inter-individuelles, on peut noter que, dans le plan factoriel 1-2 (Cf. figure 6.8), la dispersion des extrémités des vecteurs sujets sur le cercle unitaire apparaît dans l'ensemble limitée, i.e. l'angle que forme les deux vecteurs extrêmes (n°1 et n°8) ne dépasse pas 90° ; ceci indique un consensus élevé parmi les préférences des sujets [Cox82].

Les vecteurs sujets sont tous situés du côté droit de l'axe 1 ; ainsi, le premier facteur correspond à un facteur de consensus. On peut observer, qui plus est, que le vecteur sujet “moyen” coïncide avec l'axe 1. Au contraire, selon l'axe 2, certains vecteurs sujets présentent une composante positive et d'autres une composante négative ; le second facteur est ainsi un facteur de différences inter-individuelles ; ces différences inter-individuelles restent néanmoins modérées, aucun vecteur sujet n'étant réellement proche de l'axe.

Des métriques testées, seules la sonie de Zwicker et le CGS sont représentées dans le plan factoriel 1–2 (Cf. figure 6.8) ; ces métriques possèdent une qualité de représentation élevée

²⁸La proportion de variance expliquée par un facteur est définie comme le rapport entre la valeur propre associée à ce facteur et la trace de la matrice des valeurs propres.

(respectivement $r = 0.991$, $p < .001$ et $r = 0.943$, $p < .001$) et décrivent des attributs auditifs saillants à l'écoute. Notamment, la proximité du vecteur associé à la sonie de Zwicker avec l'axe 1 fournit la présomption selon laquelle le facteur de consensus se rapporte à la sonie des sons; de même, la proximité du vecteur associé au CGS avec l'axe 2 donne à penser que le facteur de différences inter-individuelles est lié à la balance spectrale des sons.

Sur la base des éléments précédents, les coordonnées des stimuli dans le plan factoriel peuvent s'interpréter comme suit.

Les stimuli situés tout à gauche de l'axe 1 (i.e. B_1 , E_1 , F_1 , I_1 et J_1), de sonie importante, sont les stimuli qui ne sont pas appréciés par les sujets à l'unanimité. Pour rappel, ces stimuli correspondent à des configurations structurales impliquant les propriétés en absorption de la cavité faibles ou moyennes ainsi que des conditions de serrage de la plaque moyennes ou fortes. Les stimuli situés au milieu de l'axe 1 (i.e. A_1 , A_2 et G_1), de sonie moyenne, sont des stimuli qui ne suscitent pas, sur l'ensemble des sujets, de préférence ou d'antipathie prononcée. Ces stimuli correspondent à des configurations renfermant, outre des propriétés en absorption de la cavité faibles ou moyennes, les conditions de serrage de la plaque les plus faibles. Les stimuli situés du côté droit de l'axe 1 (i.e. C_1 , D_1 , H_1 , H_2 et K_1), de sonie peu élevée, sont les stimuli préférés à l'unanimité par les sujets. Ces stimuli renvoient aux configurations avec les plus fortes propriétés en absorption de la cavité.

Par ailleurs, pour une sonie quasi-équivalente, les stimuli situés sur le côté bas de l'axe 2, présentant une balance spectrale penchant vers les hautes fréquences, sont les stimuli préférés par les sujets pour lesquels le vecteur présente une composante négative le long de cet axe; ces stimuli correspondent à des configurations structurales impliquant la plaque de plus grande épaisseur, i.e. 3 mm. Par exemple, le sujet n°8 préfère le stimulus H_1 au stimulus C_1 . Au contraire, toujours pour une sonie quasi-équivalente, les stimuli situés sur le côté haut de l'axe 2, avec une balance spectrale penchant vers les basses fréquences, sont les stimuli préférés par les sujets pour lesquels le vecteur présente une composante positive le long de cet axe. Ces stimuli correspondent à des configurations structurales impliquant la plaque de plus faible épaisseur, i.e. 1.5 mm. Par exemple, le sujet n°1 préfère, au contraire du sujet n°8, le stimulus C_1 au stimulus H_1 .

6.2.2.3 Valeurs de mérite

La figure 6.9 montre les valeurs de mérite mesurées²⁹ des stimuli, classées par ordre croissant. Ces valeurs de mérite sont calculées en utilisant la loi du jugement comparatif de Thurstone (*cas V*); l'évaluation de la qualité d'ajustement du modèle aux données est présentée dans la section F.2.3.1. Toutes les réponses des sujets considérées ci-dessus pour l'établisse-

²⁹Le terme "mesurées" désigne le fait que les valeurs de mérite sont calculées à partir des jugements de préférence recueillis lors du test d'écoute; *a contrario*, le terme "prédites" sera par la suite employé pour désigner les valeurs de mérite données par le modèle de préférence, i.e. calculées à partir des valeurs des métriques jugées pertinentes.

ment de l'espace perceptif de préférence sont prises en compte dans le calcul des valeurs de mérite.

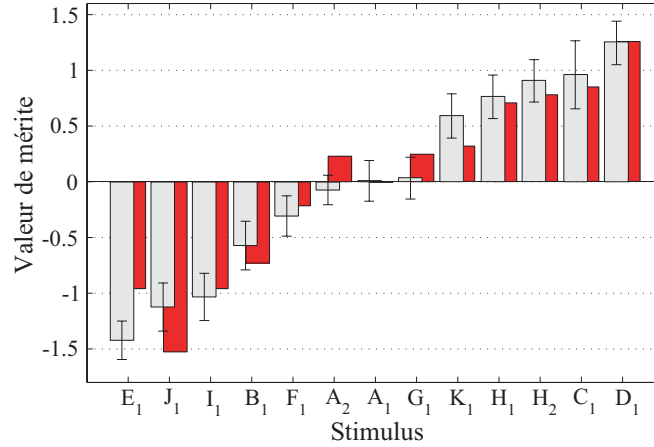


FIG. 6.9 – Valeurs de mérite des stimuli. En gris : préférence mesurée, I : intervalle de confiance à 95%, En rouge : modèle de préférence.

On peut observer que la position des stimuli dans le classement de préférence respecte leur position le long de l'axe 1 de l'espace perceptif de préférence (notamment $r = 0.998$, $p < .001$ entre les valeurs de mérite et les coordonnées le long de cet axe). Ainsi, l'influence au premier plan des propriétés en absorption de la cavité (β) est également visible au travers du classement de préférence ; les configurations impliquant de fortes propriétés en absorption de la cavité occupent les premières places du classement. On retrouve ensuite les deux autres groupes de configurations déjà distingués le long de l'axe 1 de l'espace perceptif de préférence : i) en milieu de classement, le groupe des configurations renfermant en sus de propriétés en absorption de la cavité faibles ou moyennes les conditions de serrage de la plaque (γ) les plus faibles, ii) en queue de classement, le groupe des configurations structurales impliquant les propriétés en absorption de la cavité faibles ou moyennes ainsi que des conditions de serrage de la plaque moyennes ou fortes. Ces groupes sont reportés dans le tableau 6.1. Notons que la frontière entre les groupes de tête et intermédiaire est nette ; on n'observe pas de chevauchement des intervalles de confiance calculés sur les valeurs de mérite du stimulus K_1 , en dernière position dans le groupe de tête, et du stimulus G_1 , en première position dans le groupe intermédiaire.

Groupe	Modalités des paramètres structuraux			Configurations
	α	β	γ	
de tête	1 ou 2 ou 3	3	1 ou 2 ou 3	C, D, H et K
intermédiaire	1 ou 2 ou 3	1 ou 2	1	A et G
de queue	1 ou 2 ou 3	1 ou 2	2 ou 3	B, E, F, I et J

TAB. 6.1 – Groupes de configurations structurales érigés à partir du classement de préférence.

Un modèle de régression linéaire simple basé sur les seules valeurs de la sonie de Zwicker suffit à prédire les valeurs de mérite ($r^2 = 0.93$, $p < .001$); le diagramme des valeurs de mérite mesurées exprimées en fonction des valeurs de la sonie de Zwicker est présenté sur la figure F.10. Les valeurs prédites sont reportées sur la figure 6.9 (en rouge).

6.3 Synthèse et commentaires

Dans une première partie de ce chapitre, la procédure expérimentale utilisée pour l'évaluation auditive des sons rayonnés à l'intérieur de la cavité pour différentes configurations structurales étudiées du système plaque-cavité a tout d'abord été définie. Cette procédure, similaire à celle utilisée dans de précédents travaux [Fau03], est basée sur la méthode de comparaison par paires : les sons sont soumis par paires à un jury d'auditeurs. Pour chaque paire, le sujet évalue la dissimilarité entre les deux sons sur une échelle à 7 catégories puis prononce un jugement de dominance selon la préférence. Ensuite, ont été présentés les outils utilisés pour l'analyse des données issues du test d'écoute. Cette analyse comporte trois grandes phases : i) l'analyse en clusters des sujets, ii) l'analyse multidimensionnelle des jugements de dissimilarité, iii) l'analyse multidimensionnelle puis unidimensionnelle des jugements de préférence. Les différentes opérations de traitement des réponses au test d'écoute sont récapitulées sur la figure 6.10.

Puis, dans une seconde partie, les tendances qualitatives originales ont été dégagées de l'interprétation des résultats de l'analyse des jugements de dissimilarité et de préférence. Revenons ici sur quelques points importants.

En rapprochant les espaces perceptifs de dissimilarité et de préférence (plan factoriel 1-2) issus de l'analyse multidimensionnelle des jugements de dissimilarité et de préférence (menée respectivement via INDSCAL et MDPREF), on a pu noter que la configuration spatiale des stimuli était relativement similaire (notamment $r = 0.988$, $p < .001$ entre les coordonnées des stimuli le long des premiers axes, $r = -0.877$, $p < .001$ entre leurs coordonnées le long des seconds axes). En outre, l'analyse psychoacoustique a montré que les jugements de dissimilarité et de préférence étaient basés sur les mêmes attributs saillants des sons, i.e. leur sonie et leur balance spectrale. Cette stabilité dans les attributs utilisés par les sujets, indifféremment de la tâche demandée, a déjà été mise en évidence dans de précédents travaux, traitant notamment de la qualité sonore de systèmes de ventilation de voiture [PHS05] ou d'unités d'air conditionné dans le bâtiment [SMW⁺04]. En fait, dans le cas présent, l'évaluation de la dissimilarité et de la préférence dans un même test d'écoute force quelque peu le constat³⁰.

Par ailleurs, nous avons pu noter que la variation de la sonie le long des premiers axes des espaces perceptifs était vraisemblablement reliée d'abord à la variation des propriétés en absorption de la cavité puis à la variation des conditions de serrage de la plaque. La relation

³⁰Dans les deux études citées ci-dessus, l'évaluation de la dissimilarité et de la préférence n'était pas menée dans un même test d'écoute.

entre les propriétés en absorption de la cavité et la sonie est bien connue dans le domaine de l'acoustique des salles [Bar93]. Par ailleurs, ce résultat est aussi en accord avec ceux de précédentes études couplant vibro-acoustique et psychoacoustique (Cf. section 3.1). Notamment, Marquis-Favre *et al.* [MFFH05], s'intéressant à l'évaluation auditive de sons rayonnés par une plaque en acier dans une salle comportant successivement différents matériaux absorbants, ont identifié la sonie comme étant un attribut auditif de premier plan. En outre, Marquis-Favre et Faure [MFF08], traitant d'une plaque en verre bafflée, ont pu souligner que la sonie était aussi l'un des attributs auditifs sur lequel une variation des conditions aux limites uniformes de la plaque agissait.

La variation de la balance spectrale le long des seconds axes des espaces perceptifs est apparue comme liée à la variation de l'épaisseur de la plaque. Concernant le rôle de l'épaisseur d'une plaque en acier bafflée sur la perception, les travaux de Faure [Fau03] ont montré que la variation de ce paramètre³¹, en induisant un décalage des fréquences propres de la plaque, occasionnait principalement des différences de hauteur et de niveau perçu entre les sons rayonnés, mais également des différences de balance spectrale. Néanmoins, la métrique psychoacoustique utilisée pour traduire la balance spectrale entre graves et aigus, i.e. l'acuité d'Aures, apparaissait corrélée dans une moindre mesure aux résultats des tests d'écoute. Par ailleurs, pour des sons harmoniques rayonnés par une plaque dont le champ d'accélération présentait des variations imposées, Meunier *et al.* [MHC01] ont relié l'une des dimensions de l'espace perceptif 3D obtenu à la balance spectrale des sons. Dans leur étude, cet attribut était défini comme le ratio entre l'amplitude de la fréquence fondamentale et celles des harmoniques.

Enfin, des valeurs de mérite ont été calculées pour les différents stimuli en appliquant un modèle de mesure unidimensionnelle, le *cas V* de la loi du jugement comparatif de Thurstone, sur les jugements de préférence prononcés par l'ensemble des sujets (hormis ceux prononcés par les deux sujets identifiés comme "outliers"). D'un point de vue perceptif, nous avons pu noter que le classement de préférence donné par les valeurs de mérite était gouverné par le facteur de consensus révélé par l'analyse MDPREF : la sonie. Il a été noté également que les effets du facteur de différences inter-individuelles, la balance spectrale entre graves et aigus, sur la préférence exprimée ne transparaissaient plus à travers le classement de préférence. Ainsi, d'un point de vue physique, seule la variation des propriétés en absorption de la cavité, et dans une moindre mesure la variation des conditions de serrage de la plaque, a une influence sur le classement de préférence. Trois groupes de configurations structurales ont été érigés à partir de ce classement ; il est à retenir principalement que les configurations avec les plus fortes propriétés en absorption de la cavité composent le groupe de tête, i.e. apparaissent comme les configurations les plus à même d'améliorer la qualité des sons à l'intérieur de la cavité.

³¹Dans un intervalle quasiment identique à celui étudié ici : entre 1 et 3 mm.

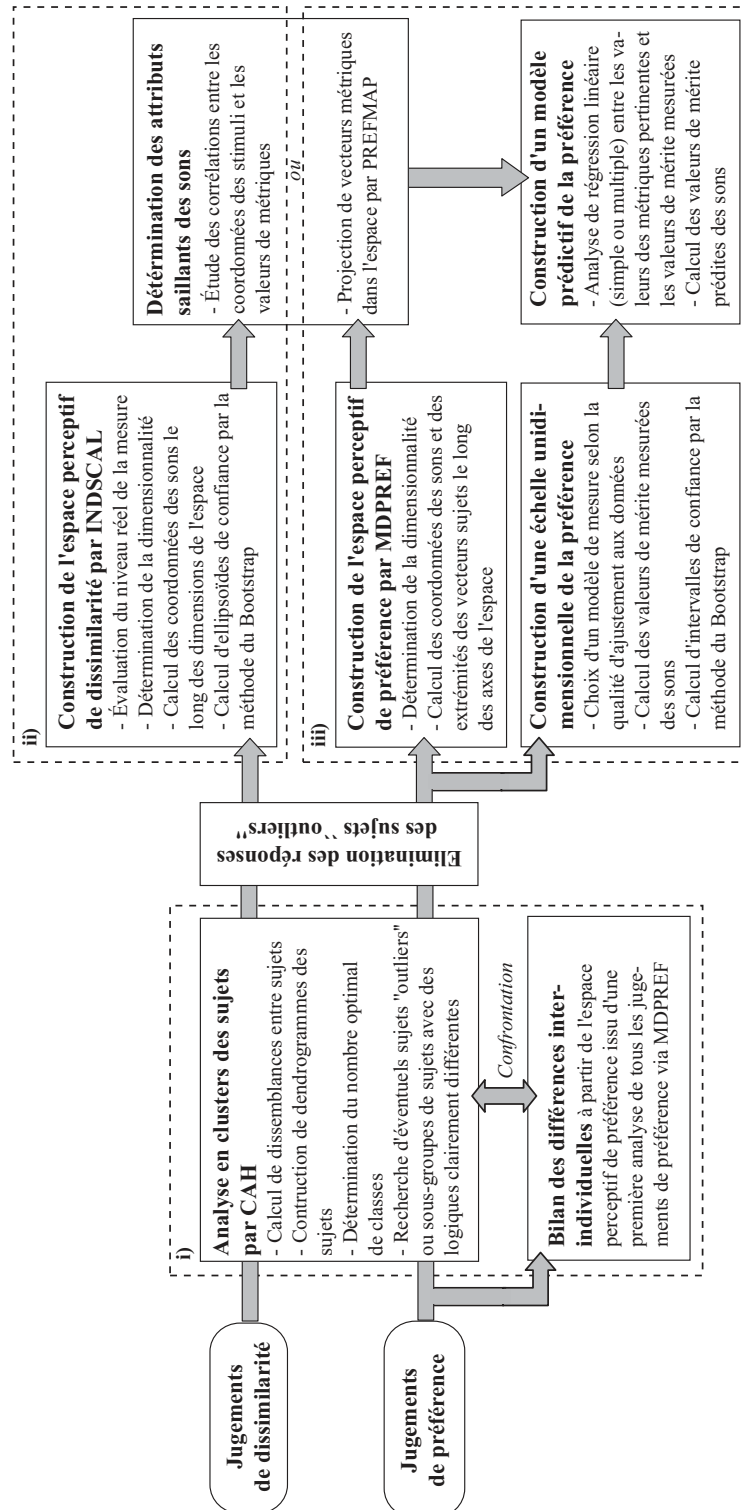


FIG. 6.10 – Schéma récapitulatif des différentes opérations de traitement des réponses au test d'écoute.

Chapitre 7

Ajustement de la fréquence de coupure des sons

En vue d'une étude de la qualité sonore du système plaque-cavité à partir de simulations vibro-acoustiques menées dans le domaine fréquentiel (e.g. simulations FEM/BEM), un premier paramètre fréquentiel à ajuster, inhérent au calcul vibro-acoustique, est la fréquence maximale de calcul. Sa définition joue de façon prééminente sur les efforts de calcul vibro-acoustique nécessaires (ressources informatiques et temps de calcul), et constitue un point critique dans la perspective d'une étude de qualité sonore puisqu'elle détermine l'étendue du contenu fréquentiel des sons synthétisés. Aussi, de concert avec la contrainte de limiter les efforts de calcul vibro-acoustique, il est impératif de s'assurer que, en dépit de l'élimination du contenu fréquentiel au-delà de la fréquence maximale de calcul sélectionnée, les tendances qualitatives issues de l'évaluation auditive des sons synthétisés représentent adéquatement les tendances qualitatives originales qui seraient dressées à partir de l'évaluation auditive des sons réels correspondants.

Au chapitre précédent, nous avons dressé les tendances qualitatives originales relatives à l'influence de la variation de paramètres structuraux d'un système plaque-cavité, à partir de l'évaluation auditive de sons réels enregistrés pour différentes configurations structurales du système plaque-cavité expérimental. Aussi, dans ce chapitre, nous visons à définir une fréquence maximale de calcul qui permette de répondre aux deux objectifs cités au paragraphe précédent, et ce en continuant à opérer à partir des sons réels. Dans ce contexte, en usant du filtrage passe-bas, la tâche d'ajustement consiste alors à déterminer, au sein du contenu fréquentiel des sons réels, une fréquence de coupure f_{max} minimale pour laquelle les tendances qualitatives issues de l'évaluation auditive des sons réels filtrés passe-bas à cette fréquence restent similaires aux tendances qualitatives originales.

Dans une première section, nous présenterons la démarche méthodologique adoptée pour déterminer une fréquence de coupure des sons qui permette de conserver les tendances qualitatives originales. Dans une seconde section, seront exposés les résultats du processus d'ajustement ; notamment, nous procéderons à une confrontation entre les tendances qualitatives originales et les tendances qualitatives issues de l'évaluation auditive du corpus des sons réels filtrés passe-

bas à la fréquence de coupure ajustée. Dans une dernière section, nous tenterons d'expliquer l'ajustement réalisé.

7.1 Démarche méthodologique

7.1.1 Vue d'ensemble

La figure 7.1 présente une vue d'ensemble sur la démarche méthodologique adoptée pour déterminer une fréquence de coupure des sons qui permette de conserver les tendances qualitatives originales relatives à l'influence de la variation de paramètres structuraux d'un système plaque-cavité, établies au chapitre 6 (cadre à gauche en traits pleins) et tenant lieu de référence ; le processus d'ajustement suit un schéma itératif (cadre à droite en traits pointillés).

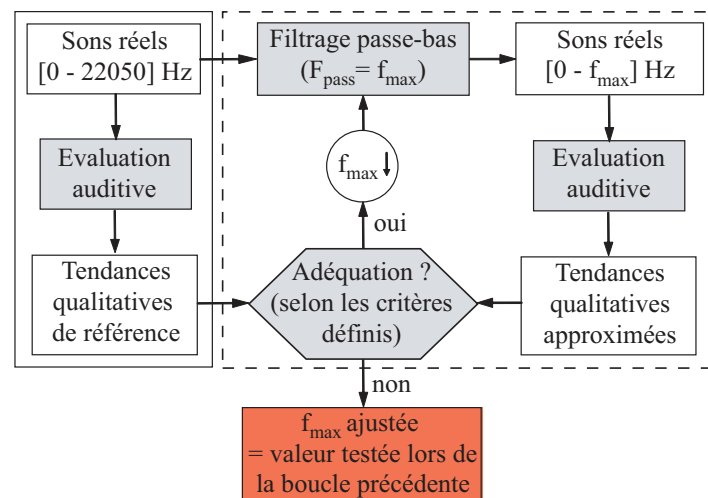


FIG. 7.1 – Vue d'ensemble sur la démarche méthodologique adoptée. Cadre en traits pleins : établissement des tendances qualitatives originales (réalisé au chapitre 6). Cadre en traits pointillés : boucle itérative du processus d'ajustement.

Pour chaque valeur de fréquence de coupure f_{max} testée (i.e. au sein de chaque boucle itérative), un corpus de 13 sons réels artificiellement limités en fréquence (i.e. avec un contenu fréquentiel limité à l'intervalle de fréquences $[0, f_{max}]$ Hz) est obtenu en appliquant un filtre passe-bas aux 13 sons réels originaux (i.e. avec un contenu fréquentiel étendu sur l'intervalle de fréquences $[0, 22050]$ Hz) du corpus utilisé pour établir les tendances qualitatives originales. Puis, le corpus formé est soumis à l'évaluation auditive par un jury d'auditeurs via un protocole de test basé sur la méthode de comparaison par paires, identique à celui décrit dans la section 6.1.3. Enfin, les tendances qualitatives dressées à partir de l'analyse des réponses de dissimilarité et de préférence (Cf. section 6.1.4), qualifiées ci-après d' "approximées" car émanant de l'évaluation auditive de sons filtrés passe-bas, sont confrontées aux tendances qualitatives originales.

Dans ce qui suit, nous précisons l'opération de filtrage passe-bas des sons réels originaux et l'orientation prise pour apprécier l'adéquation entre les tendances qualitatives approximées et originales lors de leur confrontation.

7.1.2 Filtrage passe-bas des sons réels originaux

7.1.2.1 Synthèse d'un filtre passe-bas adapté

Pour le filtrage passe-bas des sons réels originaux, nous optons pour un filtre digital à Réponse Impulsionnelle Finie (RIF) à phase linéaire ; ce type de filtre est couramment utilisé en audiologie, notamment car l'effet "secondaire" d'une phase linéaire se réduit à un simple décalage temporel pour le signal filtré, i.e. aucun effet de distortion de phase sur le signal temporel n'est induit par la sélection fréquentielle, ce qui adviendrait si le filtre était à phase non-linéaire [OSB99].

Parmi les méthodes utilisées pour la synthèse de filtres RIF à phase linéaire, deux sont particulièrement répandues : la méthode de fenêtrage de Kaiser¹ et la procédure algorithmique d'approximation optimale de Parks-McClellan². Contrairement à la seconde méthode, la première méthode est non-itérative, la synthèse de filtres est alors plus rapide via cette méthode. Néanmoins, la seconde méthode permet d'obtenir des filtres légèrement plus optimisés, i.e. légèrement plus proches du filtre passe-bas idéal. Pour des cas comparables, à longueur de réponse impulsionnelle fixée, l'algorithme de Parks-McClellan permet de réduire l'erreur d'approximation d'environ 5 dB par rapport à la méthode de fenêtrage de Kaiser [OSB99]. Pour cette raison, nous optons finalement pour un calcul du filtre passe-bas par l'algorithme de Parks-McClellan, la lourdeur de la procédure n'étant en outre pas un obstacle grâce aux ressources informatiques actuellement à disposition.

La synthèse des filtres passe-bas est réalisée sous **Matlab** © **Mathworks**. Les paramètres d'entrée requis pour le calcul sont reportés sur la figure 7.2, qui présente le module de la fonction de transfert du filtre RIF passe-bas $|H_{pb}|$. Leur définition est la suivante :

- F_s est la fréquence d'échantillonnage du filtre. Elle est prise égale à la fréquence d'échantillonnage des sons réels enregistrés, i.e. 44100 Hz.
- F_{pass} est la dernière fréquence non atténuée de la bande passante ; elle est prise égale à la valeur de f_{max} testée.
- F_{stop} est la première fréquence atténuée de la bande d'arrêt ; elle est choisie de telle manière à ce que la bande de transition $\Delta F = F_{stop} - F_{pass}$ soit la plus faible possible, et ce afin de reproduire au mieux la coupure brute à f_{max} d'un spectre d'un son calculé lors de simulations vibro-acoustiques. Dans notre étude, tous les filtres passe-bas sont calculés avec une bande de transition ΔF égale à 10 Hz, i.e. la plus petite valeur permise par les ressources de notre PC de calcul.
- A_{pass} est l'amplitude maximale, crête à crête, de l'ondulation de la réponse en fréquence

¹J. F. Kaiser. Nonrecursive digital filter design using the I_0 -sinh window function. In *Proc. of IEEE International Symposium on Circuits and Systems 1974*, pages 20-23, San Francisco, CA, USA, 1974 (cité dans [OSB99]).

²T. W. Parks and J. H. McClellan. A program for the design of linear phase finite impulse response filters. *IEEE Trans. Audio Electroacoustics*, AU-20(3) :195-199, 1972 (cité dans [OSB99]).

du filtre dans la bande passante. La plus petite valeur possible est préconisée ; elle est prise égale à 0.01 dB.

- A_{stop} est l'atténuation d'amplitude entre la bande passante et la bande d'arrêt. Elle est prise égale à 100 dB, garantissant ainsi l'inaudibilité du contenu fréquentiel présent dans la bande d'arrêt.

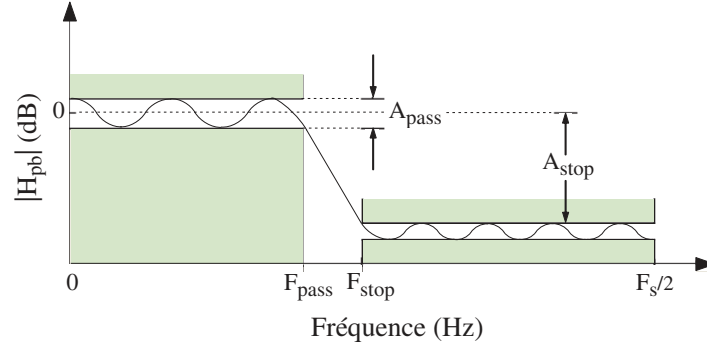


FIG. 7.2 – Paramètres requis pour la synthèse de filtres FIR passe-bas par l'intermédiaire de l'algorithme de Parks-McClellan sous Matlab © Mathworks.

Pour illustration, la fonction de transfert H_{pb} du filtre FIR passe-bas synthétisé pour une valeur de f_{max} égale à 2500 Hz est présentée sur la figure 7.3. La réponse impulsionnelle h_{pb} de ce filtre, causal ($h_{pb}(t) = 0$ pour $t < 0$), est donnée sur la figure 7.4. Sa longueur L , en nombre d'échantillons, est égale à l'ordre du filtre M plus un, soit ici $L = M + 1 = 20830 + 1 = 20831$, ce qui équivaut à une durée, en secondes, égale à $\frac{L}{F_s} = \frac{20831}{44100} = 0.4724$. L'ordre du filtre est déterminé automatiquement lors du calcul, en adéquation avec les valeurs des paramètres d'entrée renseignées. Pour un ordre pair, la réponse impulsionnelle du filtre FIR causal à phase linéaire satisfait à la condition de symétrie par rapport à l'abscisse $\frac{M}{2}$, soit ici à l'abscisse temporelle $t = \frac{M}{2 \times F_s} = \frac{20830}{2 \times 44100} = 0.2362$ s (Cf. figure 7.4).

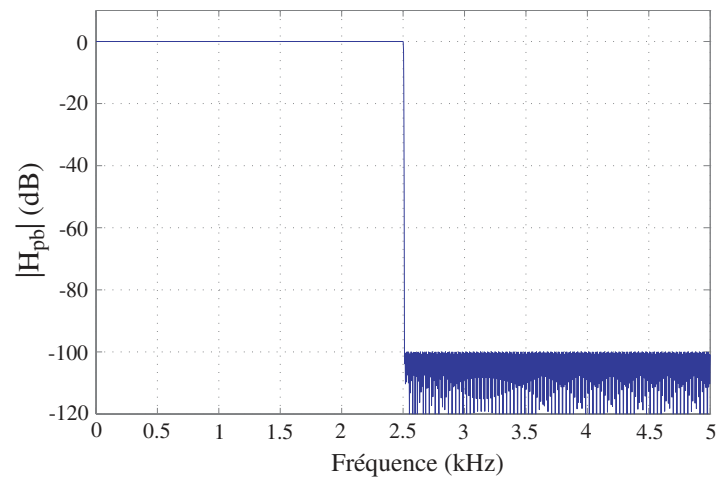
7.1.2.2 Calcul des sons filtrés par convolution

Pour chaque valeur de f_{max} testée, des stimuli filtrés passe-bas sont calculés en convoluant les stimuli originaux par la réponse impulsionnelle du filtre passe-bas synthétisé :

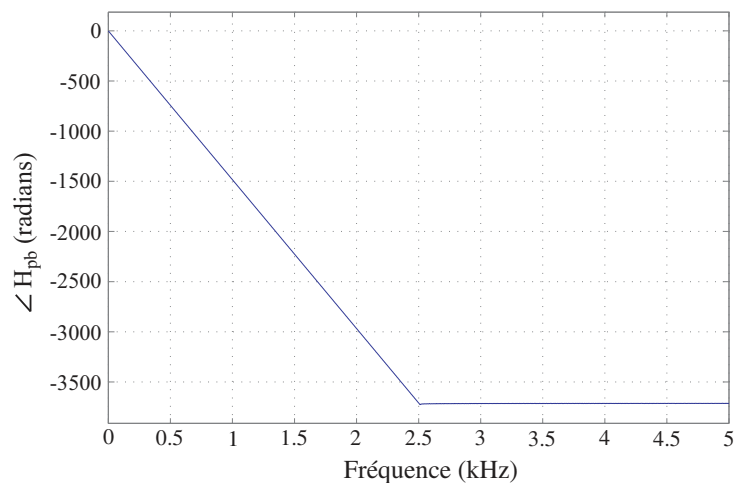
$$y_i[n] = x_i[n] \otimes h_{pb}[n] \quad (7.1)$$

où n est l'indice d'échantillon, $x_i[n]$ est le signal d'entrée de longueur X ($0 \leq n \leq X - 1$) correspondant à la voie i ($i = 1$ à 2)³ d'un stimulus original donné, $h_{pb}[n]$ est la réponse impulsionnelle du filtre synthétisé de longueur $L = M + 1$ (M étant l'ordre du filtre, $0 \leq n \leq M$) et $y_i[n]$ est le signal filtré passe-bas à f_{max} de longueur $Y = X + L - 1 = X + M$

³Voie 1, i.e. voie gauche : signal enregistré au point M_1 . Voie 2, i.e. voie droite : signal enregistré au point M_2 .



(a) Module de la fonction de transfert $|H_{pb}|$.



(b) Phase de la fonction de transfert $\angle H_{pb}$.

FIG. 7.3 – Fonction de transfert H_{pb} du filtre FIR passe-bas synthétisé pour $f_{max} = 2500$ Hz.

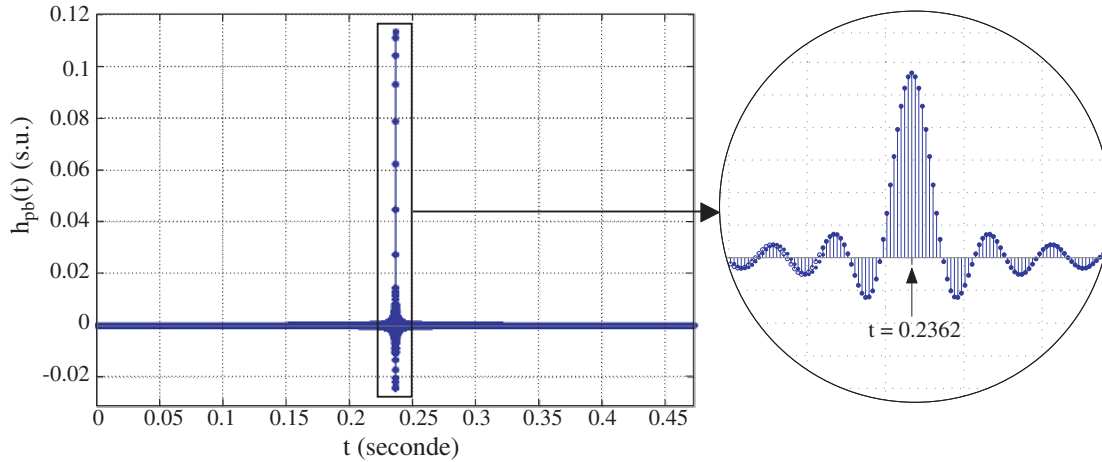


FIG. 7.4 – Réponse impulsionnelle $h_{pb}(t)$ du filtre FIR passe-bas synthétisé pour $f_{max} = 2500$ Hz. A droite, zoom sur l'intervalle de temps $[0.2350, 0.2374]$ s.

($0 \leq n \leq X + M - 1$) résultant de l'opération de convolution [OSB99]. Le signal filtré $y_i[n]$ est retardé de $\frac{M}{2}$ échantillons par rapport au signal non-filtré $x_i[n]$; $y_i[n]$ est non nul pour $\frac{M}{2} \leq n \leq X + \frac{M}{2} - 1$ [OSB99]. La partie non nulle des signaux $y_1[n]$ et $y_2[n]$ est extraite pour former le stimulus filtré proprement dit, présenté à l'évaluation auditive.

Pour illustration, le filtrage passe-bas à 2500 Hz de la voie gauche du stimulus A_1 est présenté sur la figure 7.5. Le signal d'entrée $x_1[n]$ de longueur $X = 176400$ échantillons est convolué par la réponse impulsionnelle du filtre passe-bas $h_{pb}[n]$ de longueur $L = 20831$ échantillons; on obtient un signal filtré $y_1[n]$ de longueur $Y = 197230$ échantillons, dont l'intervalle $[10415, 186814]$ (d'une durée de 4 s) est extrait pour former la voie gauche du stimulus A_1 filtré. Il est procédé à la même opération pour obtenir la seconde voie filtrée, et les autres stimuli filtrés passe-bas à 2500 Hz.

Dans la pratique, le calcul des sons filtrés passe-bas est également réalisé sous Matlab © Mathworks. Après lecture des 13 fichiers audio originaux, pour chaque valeur de f_{max} testée, on exécute les opérations mentionnées ci-avant (i.e. convolution / extraction). Les 13 signaux stéréophoniques filtrés passe-bas ainsi obtenus sont encodés dans des fichiers audio au format WAV avec une fréquence d'échantillonnage égale à 44100 Hz et une résolution de 16 bits. A l'instar de la création des fichiers audio originaux (Cf. section 4.3.3), afin de réaliser un codage optimal tout en conservant les différences relatives de niveau existant entre les signaux filtrés passe-bas à une même fréquence de coupure f_{max} , les valeurs de pression de chaque signal filtré passe-bas à f_{max} sont, juste avant encodage, divisées par la valeur maximale détectée sur l'ensemble des signaux filtrés passe-bas à f_{max} .

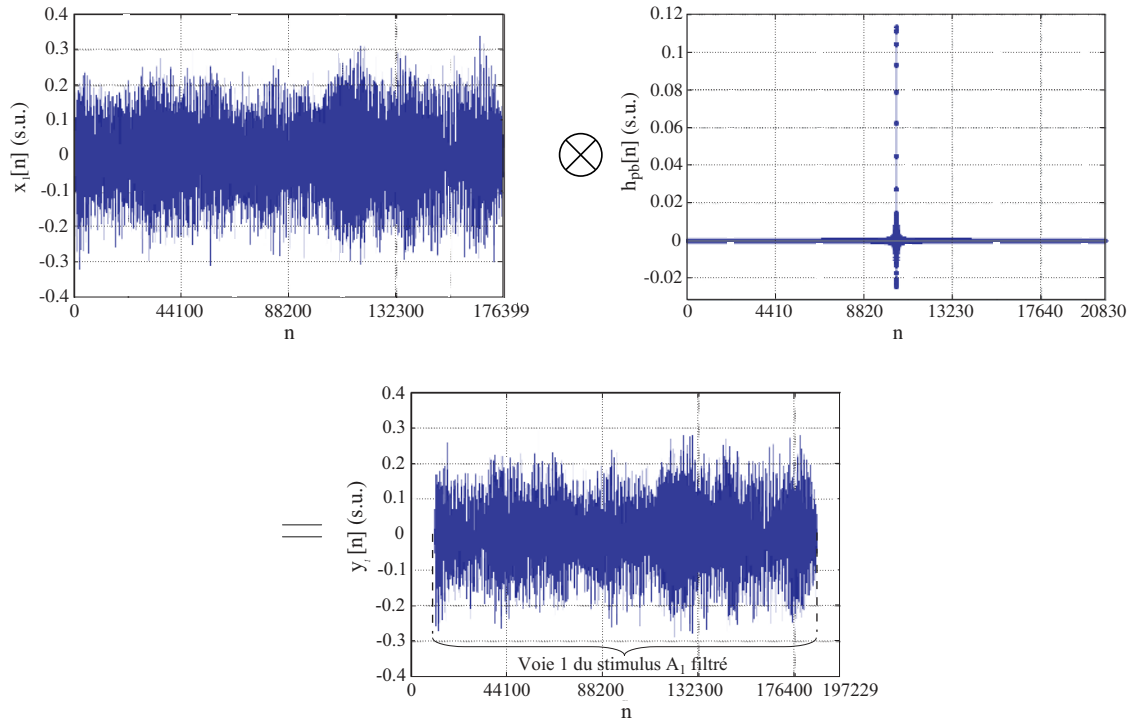


FIG. 7.5 – Filtrage passe-bas à 2500 Hz de la voie gauche du stimulus A_1 .

7.1.3 Appréciation de l'adéquation entre les tendances qualitatives

7.1.3.1 Définition de priorités dans la préservation des tendances qualitatives

Les tendances qualitatives originales rassemblent des informations d'ordre perceptif, à propos notamment i) des attributs auditifs utilisés par les auditeurs pour différencier les sons réels originaux et exprimer des jugements de préférence sur ces sons (identifiés via l'analyse psychoacoustique menée à partir des espaces perceptifs de dissimilarité et de préférence), ii) des relations existant entre ces attributs auditifs et les paramètres physiques variables du système plaque-cavité (mises en relief via l'examen des positions relatives des stimuli dans les espaces), et iii) des configurations structurales les plus à même d'améliorer globalement la qualité des sons à l'intérieur de la cavité (identifiées à partir du classement des stimuli selon leur valeur de mérite).

A priori, il est difficile de prévoir exactement comment l'ajustement de la fréquence de coupure va affecter les tendances qualitatives ; notamment, il est envisageable que le filtrage passe-bas des sons affecte diversement les différents aspects mentionnés ci-dessus. Aussi, nous concentrons nos efforts à préserver en premier lieu les tendances qualitatives afférentes aux valeurs de mérite. La raison qui motive ce choix de priorités est le souhait de se placer dans la lignée d'études de qualité sonore du secteur industriel recourant aux simulations vibro-acoustiques, dont les préoccupations résident dans l'obtention d'un indicateur pratique de la

préférence des clients pour une ou plusieurs solutions techniques proposées⁴. Notre objectif principal consiste donc à s'assurer que les recommandations avancées à partir du classement selon la préférence des sons réels filtrés passe-bas, quant à des configurations structurales plus aptes à améliorer la qualité des sons à l'intérieur de la cavité, reflètent bien celles avancées à partir du classement des sons réels originaux.

7.1.3.2 Formulation de critères de “bonne adéquation” entre les tendances qualitatives relatives aux valeurs de mérite

Lors de la confrontation des tendances qualitatives afférentes aux valeurs de mérite approximées et originales, nous souhaitons que les deux critères suivants soient remplis afin de décréter leur “bonne adéquation” :

- i) L'ordre d'apparition des stimuli dans le classement de préférence est globalement conservé. Surtout, les premières places du classement (i.e. les sons préférés, i.e. les configurations structurales du système plaque-cavité préférées) sont inchangées.
- ii) L'attribut auditif sur lequel se base le modèle de préférence (i.e. la sonie) reste le même, la qualité d'ajustement du modèle de régression linéaire ne s'est pas détériorée.

Si ces conditions sont remplies, le processus d'ajustement est poursuivi ; une autre boucle itérative est lancée pour une nouvelle valeur, abaissée, de f_{max} . Dans le cas contraire, les tendances qualitatives relatives aux valeurs de mérite sont considérées comme perdues ; le processus d'ajustement a été trop loin ; il est stoppé. La valeur de f_{max} testée à la boucle précédente, i.e. la dernière valeur pour laquelle les tendances approximées se sont révélées être une bonne approximation des tendances originales, est considérée comme la valeur ajustée (dénnotée dans ce qui suit f_{max}^*).

Du fait même de sa nature itérative, le processus d'ajustement adopté ici est plutôt lourd à mettre en oeuvre (une évaluation auditive par valeur de f_{max} testée). Aussi, afin de minimiser autant que possible le nombre de boucles pour converger vers f_{max}^* , la sélection de chaque valeur à tester est guidée par un examen des spectres auditifs des sons réels originaux. Cet examen aide à repérer les parties supérieures des spectres des sons susceptibles d'être peu importantes d'un point de vue perceptif et dont l'élimination ne serait pas à même de causer, à terme, une perte des tendances qualitatives.

7.2 Résultats du processus d'ajustement

7.2.1 Détermination d'une fréquence de coupure ajustée f_{max}^*

Le tableau 7.1 montre les rangs des stimuli au sein du classement de préférence original et des classements de préférence approximés établis pour les différentes valeurs de f_{max} testées :

⁴Ici, l'indicateur pratique est la valeur de mérite.

5000 Hz, 2500 Hz et 1500 Hz.

Stimulus	Rang original	Rang approximé		
		5000 Hz	2500 Hz	1500 Hz
D_1	1	1	1	1
C_1	2	4	2	2
H_2	3	2	4	4
H_1	4	3	3	3
K_1	5	5	5	6 [†]
G_1	6	8	8	7
A_1	7	7	7	8
A_2	8	6	6	5 [†]
F_1	9	10	9	9
B_1	10	9	10	10
I_1	11	13	13	13
J_1	12	12	12	11
E_1	13	11	11	12

[†]modification significative du rang au sein du classement.

TAB. 7.1 – Comparaison entre le classement de préférence original et les classements de préférence approximés établis pour les différentes valeurs de f_{max} testées : 5000 Hz, 2500 Hz et 1500 Hz.

Au sein des deux premiers classements de préférence approximés établis pour $f_{max} = 5000$ Hz et $f_{max} = 2500$ Hz, aucune modification significative des rangs des stimuli n'apparaît⁵ ; on peut arguer que les classements approximés concordent avec le classement original.

Au sein du classement de préférence approximé établi pour $f_{max} = 1500$ Hz, les stimuli A_2 et K_1 occupent des rangs significativement différents de ceux qu'ils occupaient dans le classement original (A_2 passe du 8^{ème} au 5^{ème} rang, K_1 du 5^{ème} au 6^{ème} rang). Ainsi, le groupe de tête du classement original, qui rassemblait tous les stimuli correspondant à des configurations structurales avec de fortes propriétés en absorption de la cavité (dont K_1), s'est disloqué ; la relation existant entre ce paramètre physique et la préférence exprimée, précédemment mise en relief à travers le classement original, ne tient plus pour ce classement approximé. À cet égard, le premier critère de "bonne adéquation" est clairement outrepassé.

En outre, le tableau 7.2 affiche la qualité d'ajustement (exprimée en termes de proportion de variance expliquée, i.e. r^2) du modèle de préférence original et des modèles de préférence approximés, construits pour les différentes valeurs de f_{max} testées à partir de la régression linéaire entre les valeurs de la sonie de Zwicker calculées sur les sons filtrés passe-bas correspondants et les valeurs de mérite approximées obtenues par ces mêmes sons.

⁵Pour juger d'une modification significative de rang d'un stimulus au sein d'un classement approximé, on procède indépendamment à l'étude des intervalles de confiance à 95% calculés sur les valeurs de mérite originales et à l'étude des intervalles de confiance à 95% calculés sur les valeurs de mérite approximées.

f_{max}	Qualité d'ajustement	
	r^2	p
22050 Hz [†]	0.93	< .001
5000 Hz	0.93	< .001
2500 Hz	0.92	< .001
1500 Hz	0.82	< .001

[†]valeur de référence.

TAB. 7.2 – Comparaison de la qualité d'ajustement (exprimée en termes de proportion de variance expliquée, i.e. r^2) du modèle de préférence original et des modèles de préférence approximatifs construits pour les différentes valeurs de f_{max} testées.

Pour $f_{max} = 5000$ Hz et $f_{max} = 2500$ Hz, la qualité d'ajustement des modèles de préférence approximatifs apparaît équivalente à celle du modèle original. Par contre, pour $f_{max} = 1500$ Hz, même s'il est vrai que la valeur de p reste inchangée, on peut noter une réduction de plus de 10% de la proportion de variance r^2 expliquée par le modèle.

Cette dernière observation, et surtout les anomalies déjà relevées quant à la position des stimuli dans le classement de préférence, signifient la perte des tendances qualitatives afférentes aux valeurs de mérite pour une coupure des sons à 1500 Hz. Ainsi, la valeur $f_{max} = 2500$ Hz, i.e. la dernière valeur pour laquelle les tendances qualitatives approximatifs sont trouvées en bon accord avec les tendances originales, est désignée comme f_{max}^* , la fréquence de coupure ajustée des sons.

7.2.2 Confrontation étendue des tendances qualitatives originales et approximatifs

Seules les tendances qualitatives approximatifs relatives aux stimuli filtrés passe-bas à $f_{max}^* = 2500$ Hz sont ici présentées et confrontées aux tendances originales. Cette confrontation sous-entend la comparaison entre les espaces perceptifs de dissimilarité (Cf. section 7.2.2.1), entre les espaces perceptifs de préférence (Cf. section 7.2.2.2) et entre les valeurs de mérite (Cf. section 7.2.2.3). L'analyse préliminaire en clusters des sujets est présentée dans la section H.1.1. En outre, les tendances qualitatives relatives aux stimuli filtrés passe-bas à $f_{max} = 5000$ Hz et à $f_{max} = 1500$ Hz sont présentées et confrontées aux tendances originales dans les sections H.2 et H.3.

7.2.2.1 Espace perceptif de dissimilarité

Les données de dissimilarité ont été échelonnées dans un espace perceptif à deux dimensions; l'évaluation du niveau réel de la mesure et l'étude de la dimensionnalité de l'espace perceptif de dissimilarité sont proposées respectivement dans les sections H.1.2.1.a et H.2.2.1.b.

La figure 7.6 porte à la comparaison l'espace approximé (tracé en traits pleins) et l'espace original (tracé en traits pointillés). Pour rendre possible cette comparaison, l'espace approximé

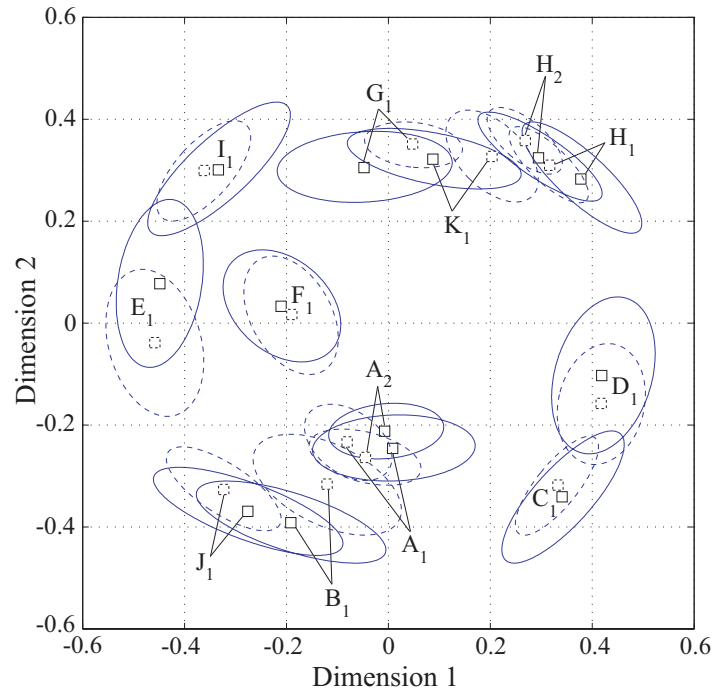


FIG. 7.6 – Espace perceptif de dissimilarité 2D des stimuli, dans leur ellipse de confiance à 95%. En traits pleins : configuration approximée obtenue pour un filtrage passe-bas à f_{max}^* , en traits pointillés : configuration originale. La numérotation des dimensions est celle correspondant à la configuration originale.

a été ajusté à l'espace original en utilisant l'analyse procrustéenne [CC01]. De manière générale, l'analyse procrustéenne est une méthode utilisée afin d'ajuster un nuage de points à un autre. Les deux nuages de points sont souvent définis par un ensemble de variables mesurées sur les mêmes individus ; les individus sont ici les stimuli et les variables les dimensions perceptives [Koe05]. L'ajustement implique ici, pour l'espace approximé, une rotation à 90° dans le sens des aiguilles d'une montre puis une symétrie par rapport à l'axe horizontal⁶.

Les attributs auditifs auxquels les dimensions perceptives de l'espace approximé se réfèrent restent inchangés ; la dimension 1 est liée à la balance spectrale des sons filtrés passe-bas ($r = 0.940$, $p < .001$ entre les coordonnées des stimuli et les valeurs du CGS) et la dimension 2 à leur sonie ($r = -0.929$, $p < .001$ entre les coordonnées des stimuli et les valeurs de la sonie de Zwicker). Les diagrammes des coordonnées des stimuli filtrés passe-bas à f_{max}^* suivant les dimensions 1 et 2 de l'espace approximé respectivement exprimées en fonction des valeurs

⁶L'orientation des axes de l'espace perceptif donné par INDSCAL est déterminée de manière unique, aux permutations et réflexions d'axes près [WCC84] ; aussi, la rotation à 90° , la symétrie axiale ou la dilatation uniforme sont les seules transformations procrustéennes permises pour l'ajustement d'un espace INDSCAL à un autre [Car06]. Dans le cas présent, une dilatation des axes ne permet pas d'améliorer l'adéquation entre les espaces original et approximé.

du CGS et de la sonie de Zwicker sont présentés respectivement sur les figures H.7 et H.8. Par ailleurs, les proportions de variance expliquées par deux dimensions coïncidentes restent relativement proches (respectivement 23% et 21% pour la dimension des espaces original et approximé reliée à la sonie ; respectivement 23% et 29% pour la dimension des espaces original et approximé reliée à la balance spectrale).

Malgré cette approximation, l'adéquation entre les deux espaces se révèle plutôt bonne ($r = 0.985$, $p < .001$ entre la dimension 1 de l'espace approximé et la dimension 2 de l'espace original, $r = 0.977$, $p < .001$ entre la dimension 2 de l'espace approximé et la dimension 1 de l'espace original). De surcroît, les positions approximée et originale de chaque stimulus se révèlent être similaires, au vu du chevauchement de leurs ellipses de confiance à 95% respectives : ceci signifie que les distances perceptives relatives existant entre les stimuli originaux n'ont pas été modifiées. En aucun cas ceci ne signifie que les versions originale et filtrée passe-bas d'un même stimulus sont proches d'un point de vue perceptif ; en effet, à l'écoute des versions originale et filtrée passe-bas d'un même stimulus, on peut entendre des différences de timbre entre les deux sons, liées à la réduction du contenu fréquentiel par le filtrage passe-bas.

Ainsi, on peut déduire de cette confrontation des espaces perceptifs de dissimilarité que l'élimination du contenu fréquentiel au-delà de 2500 Hz n'a pas eu d'effet significatif sur la cartographie perceptive par les sujets des sons rayonnés par la plaque dans les différentes configurations structurales du système plaque-cavité.

7.2.2.2 Espace perceptif de préférence

Les données de préférence ont été échelonnées dans un espace perceptif à 3 dimensions (Cf. étude de la dimensionnalité présentée dans la section H.1.2.2). Les proportions d'inertie expliquées par les facteurs 1, 2 et 3 sont respectivement égales à 84%, 6% et 3%, i.e. les proportions d'inertie expliquées par les facteurs 1 et 2 restent du même ordre de grandeur que celles relevées pour l'espace original⁷. À l'instar des facteurs 3 et 4 de l'espace original, le facteur 3 de l'espace approximé n'a pu donner lieu à une interprétation claire ; le plan factoriel 2-3 de l'espace approximé est présenté sur la figure H.10.

La figure 7.7 porte à la comparaison les plans factoriels 1-2 des espaces approximé et original. À cette fin, la configuration approximée 3D des stimuli filtrés à f_{max}^* a tout d'abord été ajustée à la configuration 4D des stimuli originaux par le biais d'une analyse procrustéenne^{8,9} [CC01]. Puis, afin d'ajuster la configuration approximée 3D des vecteurs sujets à la configuration originale 4D, une rotation rigide a été appliquée à la première en utilisant la ma-

⁷Pour rappel, égales à 80% et 7%.

⁸Pour la comparaison d'une configuration de stimuli fournie par MDPREF à une autre, toutes les transformations linéaires non-singulières rendues possibles par l'analyse procrustéenne (notamment toute rotation rigide ou toute dilatation uniforme) sont permises [Car06].

⁹L'analyse procrustéenne est réalisée à l'aide d'une routine développée sous Matlab © Mathworks par Koehl [Koe05]. Pour utiliser cette routine, les tableaux de données à ajuster doivent avoir le même nombre de dimensions. Dans le cas contraire — comme ici —, on complète le tableau avec le plus faible nombre de dimensions par des colonnes de zéros.

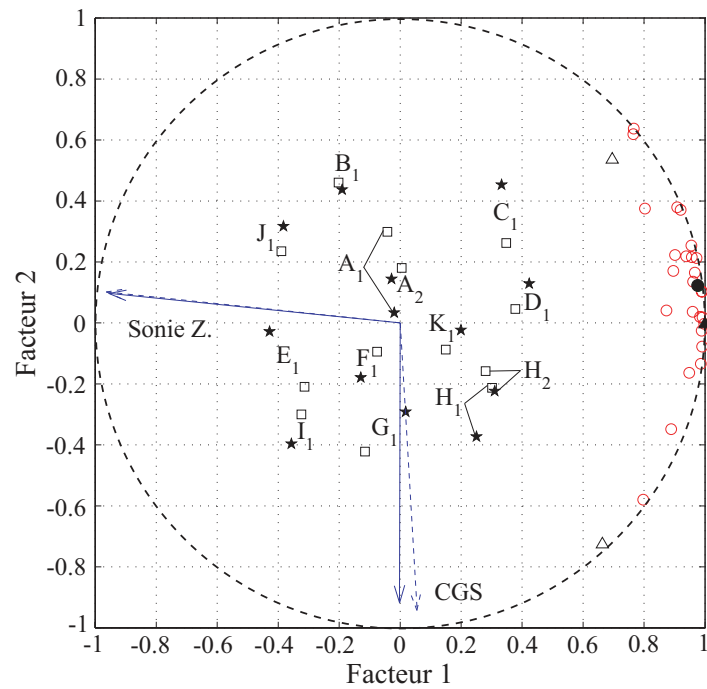


FIG. 7.7 – Plan factoriel 1-2 de l’espace perceptif de préférence. □ : stimuli filtrés passe-bas à f_{max}^* , ○ : extrémités des vecteurs sujets approximés, ● : extrémité du vecteur sujet “moyen” approximé, → : vecteurs métriques approximés, ★ : stimuli originaux, △ : extrémités des vecteurs sujets délimitant le faisceau original de vecteurs sujets, ▲ : extrémité du vecteur sujet “moyen” original, ---→ : vecteurs métriques originaux.

trice de rotation orthogonale issue de l'analyse procrustéenne précédemment réalisée [Car06]. Dans un souci de lisibilité, pour la configuration originale, seules les extrémités des vecteurs sujets délimitant le faisceau de vecteurs et celle du vecteur sujet "moyen" sont reportées sur la figure 7.7. Enfin, la configuration approximée 3D des vecteurs métriques a été ajustée à la configuration originale 4D en suivant une procédure analogue à celle utilisée pour l'ajustement des configurations de vecteurs sujets.

L'adéquation entre les configurations de stimuli est satisfaisante (après ajustement, $r = 0.978$, $p < .001$ entre les coordonnées des stimuli originaux et filtrés le long de l'axe 1, $r = 0.883$, $p < .001$ entre leurs coordonnées le long de l'axe 2). Par ailleurs, le faisceau approximé de vecteurs sujets concorde relativement bien, en termes de dispersion et de direction moyenne, avec son homologue original : un consensus élevé apparaît toujours parmi les préférences des sujets. La sonie et la balance spectrale des stimuli filtrés passe-bas à f_{max}^* sont, comme pour les stimuli originaux, les attributs dont la variation a vraisemblablement affecté les sujets dans l'expression de leur préférence. Notamment, on peut relever une qualité de représentation encore satisfaisante des vecteurs métriques approximés associés, i.e. la sonie de Zwicker et le CGS, dans l'espace approximé¹⁰ (respectivement $r = 0.992$, $p < .001$ et $r = 0.926$, $p < .001$) ; ces vecteurs coïncident pratiquement avec leur semblable original respectif.

L'ensemble des points de concordance relevés ci-avant entre les espaces perceptifs de préférence approximé et original laisse à penser que le filtrage passe-bas à f_{max}^* opéré sur les stimuli n'a pas vraiment perturbé les sujets dans leur évaluation de la préférence.

7.2.2.3 Valeurs de mérite

La figure 7.8 montre les valeurs de mérite mesurées obtenues par les stimuli filtrés passe-bas à f_{max}^* (en gris), classées par ordre croissant. Notons que les valeurs de mérite approximées sont calculées en utilisant la loi du jugement comparatif de Thurstone (*cas V*), à l'instar du calcul des valeurs de mérite originales (Cf. section 6.2.2.3). L'évaluation de la qualité d'ajustement du modèle aux données est présentée dans la section H.1.2.3.a. Les valeurs de mérite mesurées obtenues par les stimuli originaux sont également reportées sur la figure 7.8 (en rouge). Les deux séries de valeurs de mérite mesurées sont fortement corrélées ($r = 0.965$, $p < .001$).

Au travers du classement approximé, on retrouve les groupes de configurations structurales érigés à partir du classement original (Cf. tableau 6.1) : hormis le groupe de tête¹¹, qui comprend les stimuli renvoyant aux configurations structurales avec les plus fortes propriétés en absorption de la cavité¹², on retrouve i) le groupe intermédiaire, avec les stimuli qui cor-

¹⁰Cf. section 6.1.4.3.a pour l'évaluation de la qualité de représentation d'un vecteur métrique projeté avec PREFMAP.

¹¹Groupe dont la conservation équivaut au premier critère de "bonne adéquation" sur la base duquel l'ajustement fréquentiel a été réalisé.

¹²N.B. : Alors que les valeurs de mérite mesurées des stimuli A_1 et K_1 originaux sont significativement distinctes, on pourra remarquer que les valeurs de mérite mesurées des stimuli A_1 et K_1 filtrés passe-bas à f_{max}^* sont ici équivalentes (à la vue du chevauchement de leurs intervalles de confiance à 95%). Toutefois, au

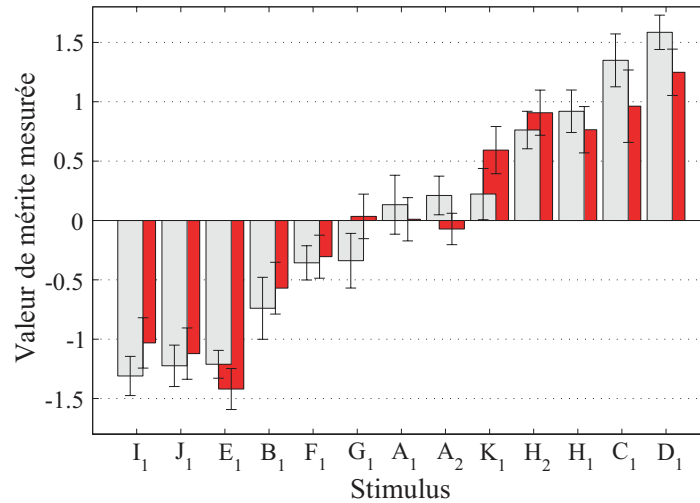


FIG. 7.8 – Comparaison des valeurs de mérite mesurées obtenues par les stimuli originaux et filtrés passe-bas à f_{max}^* . En gris : valeurs de mérite mesurées approximées, en rouge : valeurs de mérite mesurées originales, I : intervalle de confiance à 95%.

respondent aux configurations renfermant des propriétés en absorption de la cavité faibles ou moyennes et les conditions de serrage de la plaque les plus faibles, ii) le groupe de queue, avec les stimuli associés aux configurations structurales impliquant les propriétés en absorption de la cavité faibles ou moyennes et des conditions de serrage de la plaque moyennes ou fortes.

Les valeurs de mérite prédites par le modèle de préférence approximé sont présentées sur la figure 7.9 (en gris) ; le diagramme des valeurs de mérite mesurées approximées exprimées en fonction des valeurs de la sonie de Zwicker calculées sur les sons filtrés est présenté sur la figure H.12. Les valeurs de mérite prédites approximées restent relativement proches des originales (reportées en rouge sur la figure 7.9).

Dans la suite de ce chapitre, nous tenterons de trouver une signification à la valeur trouvée pour f_{max}^* , cette valeur qui permet une bonne approximation des tendances qualitatives originales.

sein du classement de préférence approximé, on n'observe pas de modification significative de rang pour les stimuli A_1 et K_1 . Aussi, on peut considérer que le groupe de tête est encore conservé.

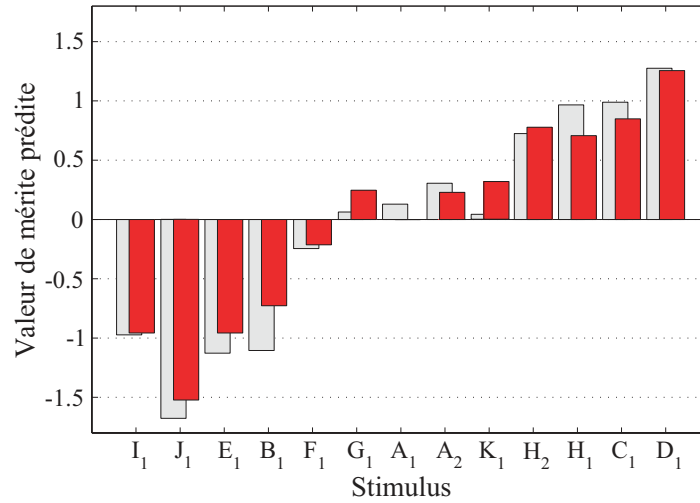


FIG. 7.9 – Comparaison des valeurs de mérite prédites obtenues par les stimuli originaux et filtrés passe-bas à f_{max}^* . En gris : valeurs de mérite prédites approximées, en rouge : valeurs de mérite prédites originales.

7.3 Comment expliquer l'ajustement de f_{max} à 2500 Hz ?

Dans notre effort d'interprétation de l'ajustement de f_{max} à 2500 Hz, nous adopterons deux approches complémentaires. Tout d'abord, nous suivrons une approche holistique, i.e. nous tenterons de dresser un lien entre f_{max}^* et la conservation de caractéristiques globales des sons originaux (Cf. section 7.3.1). Puis, nous adopterons une approche analytique, i.e. nous chercherons à établir s'il existe un lien entre f_{max}^* et des caractéristiques fréquentielles des sons originaux (Cf. section 7.3.2).

7.3.1 Lien entre f_{max}^* et la conservation de caractéristiques globales des sons originaux ?

Dans un premier temps, cette question sera traitée d'un point de vue perceptif (Cf. section 7.3.1.1); notamment, nous étudierons l'hypothèse d'un lien entre f_{max}^* et la conservation des écarts relatifs entre les sonies des stimuli.

Dans un second temps, la question sera traitée d'un point de vue physique (Cf. section 7.3.1.2); nous examinerons l'éventualité d'un lien entre f_{max}^* et la conservation de différentes caractéristiques globales des réponses vibro-acoustiques du système plaque-cavité.

7.3.1.1 D'un point de vue perceptif

7.3.1.1.a Avant-propos : comment influe le filtrage passe-bas sur l'évaluation de la préférence ?

De la confrontation des différents espaces perceptifs de préférence approximés à l'espace original^{13,14,15}, il ressort que, malgré le filtrage passe-bas, les attributs auditifs saillants des stimuli restent les mêmes. Le spectre basses et moyennes fréquences apparaît ainsi comme porteur de ces attributs saillants.

On peut penser que, pour ces bruits roses rayonnés par la plaque dans la cavité, le filtrage passe-bas agit donc sur l'évaluation de la préférence selon le mode suivant. À l'intérieur des différentes séries de stimuli filtrés, les magnitudes des attributs auditifs des différents stimuli sont plus ou moins affectées par l'opération de filtrage passe-bas. Tant que ces magnitudes demeurent relativement inchangées les unes par rapport aux autres, les sujets semblent évaluer comparativement les stimuli filtrés de la même façon qu'ils évaluent comparativement les stimuli originaux. Par contre, dans le cas où ces magnitudes varient substantiellement les unes par rapport aux autres, de telle sorte qu'elles s'invertissent, les sujets sont vraisemblablement amenés à établir une nouvelle "hiérarchie" des stimuli selon les magnitudes modifiées de leurs attributs auditifs saillants, et en conséquence à modifier leurs jugements de préférence vis-à-vis des stimuli.

7.3.1.1.b Lien entre f_{max}^* et la conservation des écarts relatifs entre les sonies des stimuli ?

Il a été relevé que la sonie, l'attribut auditif prééminent dans l'évaluation de la préférence, régissait à elle seule le classement des stimuli selon leur valeur de mérite (Cf. section 6.2.2.3). En reprenant les éléments évoqués dans la section précédente, on peut avancer que la préservation des groupes de configurations structurales érigés à partir du classement de préférence original¹⁶ est essentiellement conditionnée par la conservation de la hiérarchie entre les sonies des stimuli issus de groupes différents. La conservation ou la perte de cette hiérarchie est étroitement liée au degré d'altération par le filtrage passe-bas des écarts relatifs existant initialement entre les sonies des stimuli originaux. Dans ce qui suit, nous allons examiner cette dépendance présumée des tendances qualitatives vis-à-vis des écarts relatifs entre les sonies des stimuli.

La figure 7.10 présente, pour chaque stimulus, la courbe d'évolution de la valeur centrée-réduite z_N de sa sonie (Cf. équation (7.2)) en fonction de la fréquence de coupure f_{cp} du pattern de sonie¹⁷ calculé à partir du signal original (i.e. non-filtré passe-bas), f_{cp} variant de 100 à

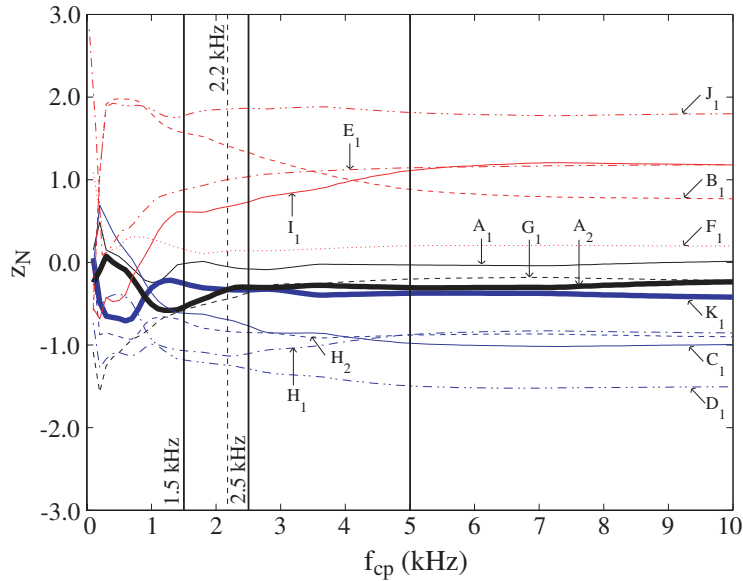
¹³Stimuli filtrés passe-bas à 5000 Hz : Cf. figure H.23.

¹⁴Stimuli filtrés passe-bas à 2500 Hz : Cf. figure 7.7.

¹⁵Stimuli filtrés passe-bas à 1500 Hz : Cf. figure H.38.

¹⁶Ce que sous-entend *a posteriori* la conservation des tendances qualitatives relatives aux valeurs de mérite (Cf. section 7.2.2.3).

¹⁷Il s'agit en fait d'un pattern *moyen* de sonie ; ce pattern correspond à la moyenne des 2000 patterns de sonie calculés, sous le logiciel dBsonic © Cortex Instruments - 01dB Metravib Technologies [Cor04], sur



Groupe	Modalités des paramètres structuraux			Configurations
	α	β	γ	
de tête	1 ou 2 ou 3	3	1 ou 2 ou 3	C, D, H et K
intermédiaire	1 ou 2 ou 3	1 ou 2	1	A et G
de queue	1 ou 2 ou 3	1 ou 2	2 ou 3	B, E, F, I et J

FIG. 7.10 – Courbes d'évolution de la valeur centrée-réduite z_N de la sonie en fonction de la fréquence de coupure f_{cp} du pattern de sonie, pour les différents stimuli. En bleu : configurations structurales du groupe de tête ; en noir : configurations structurales du groupe intermédiaire ; en rouge : configurations structurales du groupe de queue. Dans le tableau au-dessous du graphique, reproduction du tableau 6.1, est rappelée la composition de ces trois groupes de configurations structurales, dressés à partir du classement de préférence original des stimuli selon leur valeur de mérite.

10000 Hz. Notons que, au-delà de 10000 Hz, on n'observe strictement plus aucune évolution de z_N . Sur la figure 7.10, les courbes d'une même couleur renvoient à des configurations structurales d'un même groupe dans le classement de préférence original (la composition des groupes est rappelée dans le tableau au bas de la figure 7.10, reproduction du tableau 6.1).

Dans la pratique, le calcul de z_N est réalisé tous les $\Delta f_{cp} = 100$ Hz. À chaque incrément de f_{cp} , la valeur centrée-réduite z_N de la sonie d'un stimulus donné est calculée comme suit :

$$z_N = \frac{N - \bar{N}}{\sigma_N} \quad (7.2)$$

les 4 secondes de signal (soit un pattern calculé toutes les 2 millisecondes).

où :

- N est la sonie du stimulus considéré, calculée comme suit :

$$N = \sum_{k=1}^{n_{f_{cp}}} N'_k \times \Delta z \quad (7.3)$$

où $n_{f_{cp}}$ est le nombre de points de calcul du pattern de sonie compris dans le domaine $[0, f_{cp}]$ Hz ; N'_k est la sonie spécifique calculée au point k , exprimée en sones/bark ; Δz est le pas de calcul du pattern de sonie, égal à 0.1 bark.

- \bar{N} est la moyenne des sonies des différents stimuli, calculées suivant l'expression (7.3) ; σ_N est l'écart-type de ces sonies.

Les patterns de sonie ainsi tronqués à une fréquence f_{cp} donnée sont voués à approximer les patterns de sonie des stimuli qui résulteraient du filtrage passe-bas des stimuli originaux à la fréquence dite¹⁸. Au final, en procédant de la sorte, on peut plus finement i) appréhender pour chaque stimulus l'évolution de sa sonie en fonction du filtrage passe-bas, relativement à l'évolution de la sonie des autres stimuli, et ii) ainsi juger du degré d'altération des écarts relatifs entre les sonies des stimuli en fonction du filtrage passe-bas.

De la figure 7.10, il ressort principalement que :

- i) Pour un filtrage passe-bas à $f_{cp} = 5000$ Hz, les écarts relatifs entre les sonies des stimuli filtrés passe-bas sont tous quasi-identiques aux écarts relatifs existant entre les sonies des stimuli originaux. La hiérarchie initiale des stimuli selon leur sonie est entièrement conservée.
- ii) Pour un filtrage passe-bas à $f_{cp} = 2500$ Hz, seuls les écarts relatifs entre les sonies des stimuli compris dans un même groupe sont substantiellement modifiés. Notamment, dans le groupe de queue, la sonie du stimulus B_1 est intervertie avec les sonies des stimuli E_1 et I_1 ; dans le groupe de tête, la sonie du stimulus C_1 est intervertie avec celles des stimuli H_1 et H_2 . Toutefois, la hiérarchie initiale entre les sonies des stimuli provenant de groupes différents reste inchangée.
- iii) Pour un filtrage passe-bas à $f_{cp} = 1500$ Hz, les sonies des stimuli K_1 et A_2 (initialement assez proches, Cf. courbes en trait épais sur la figure 7.10), issus respectivement du groupe de tête et du groupe intermédiaire, sont interverties ; la hiérarchie qui s'établissait initialement entre les sonies de stimuli issus de groupes différents est perdue à cette fréquence f_{cp} .
- iv) L'interversion entre les sonies des stimuli K_1 et A_2 , i.e. la perte de la hiérarchie initiale

¹⁸Le verbe "approximer" est utilisé car, pour un filtrage passe-bas à f_{cp} qui serait réalisé par convolution des signaux temporels originaux à la réponse impulsionnelle du filtre, les patterns de sonie spécifique calculés pour les stimuli ainsi filtrés seraient non nuls dans une zone fréquentielle immédiatement adjacente à f_{cp} , et ce en raison du phénomène de masquage fréquentiel [ZF99].

entre les sonies de stimuli issus de groupes différents, adviendrait dès lors que les stimuli originaux seraient filtrés passe-bas à une fréquence de coupure f_{cp} inférieure à 2200 Hz.

Afin de proposer valablement à partir d'un classement de préférence approximé des recommandations pour des configurations structurales plus aptes à améliorer la qualité des sons à l'intérieur de la cavité, il apparaît dans notre étude nécessaire que l'ajustement fréquentiel ne modifie pas l'ordre entre les groupes de configurations structurales (groupe de tête, intermédiaire, de queue) révélés par le classement de préférence original. Cet ordre semble donné par la hiérarchie entre les sonies des stimuli rattachés aux différents groupes de configurations structurales. Le résultat graphique évoqué au point iv) fait apparaître que f_{max}^* s'apparente fortement à la dernière fréquence de coupure qui peut garantir la préservation de cette hiérarchie.

7.3.1.2 D'un point de vue physique

En premier lieu, on se propose d'étudier l'hypothèse d'un lien entre f_{max}^* et la conservation des niveaux de pression acoustique globaux des stimuli originaux. Ceci revient à s'intéresser à la question qui suit : f_{max}^* ne délimite-t-elle pas un domaine fréquentiel au sein duquel la quasi-totalité de l'énergie acoustique contenue dans les sons originaux est comprise ?

Les figures 7.11 et H.43 présentent, pour chaque stimulus pris séparément, les courbes d'évolution des niveaux de pression acoustique globaux L_{p_1G} et L_{p_2G} — respectivement voie gauche et voie droite — en fonction de la fréquence de coupure f_{cp} des spectres de niveau de pression acoustique $L_{p_1}(f)$ et $L_{p_2}(f)$, f_{cp} variant entre 100 et 5000 Hz¹⁹. Les spectres $L_{p_1}(f)$ et $L_{p_2}(f)$ ont été définis dans la section 4.3.4.1.a (Cf. expressions (4.3) et (4.4)); pour rappel, ces spectres sont calculés à partir des échantillons stéréophoniques originaux de 4 secondes, non corrigés par la fonction de transfert inverse du casque de restitution.

Dans la pratique, le calcul de L_{p_1G} et L_{p_2G} est réalisé tous les $\Delta f_{cp} = 100$ Hz ; pour chaque stimulus, ils sont calculés à chaque incrément de f_{cp} comme suit :

$$L_{p_1G} = 10 \times \log_{10} \left(\sum_{k=1}^{n_{f_{cp}}} 10^{\frac{L_{p_1,k}}{10}} \right) \quad (7.4)$$

$$L_{p_2G} = 10 \times \log_{10} \left(\sum_{k=1}^{n_{f_{cp}}} 10^{\frac{L_{p_2,k}}{10}} \right) \quad (7.5)$$

où $n_{f_{cp}}$ est le nombre de points FFT compris dans le domaine $[0, f_{cp}]$ Hz ; $L_{p_1,k}$ et $L_{p_2,k}$ sont les niveaux de pression acoustique (exprimés en dB) calculés au point FFT d'indice k .

On peut observer qu'au-delà d'une fréquence de coupure f_{cp} égale à 2500 Hz, les niveaux de pression acoustique globaux n'évoluent quasiment plus, et ce pour l'ensemble des stimuli. Pour certains stimuli, le palier est atteint très en-deçà de 2500 Hz ; par exemple, pour les stimuli

¹⁹On n'observe strictement plus aucune évolution des niveaux globaux au-delà de 5000 Hz.

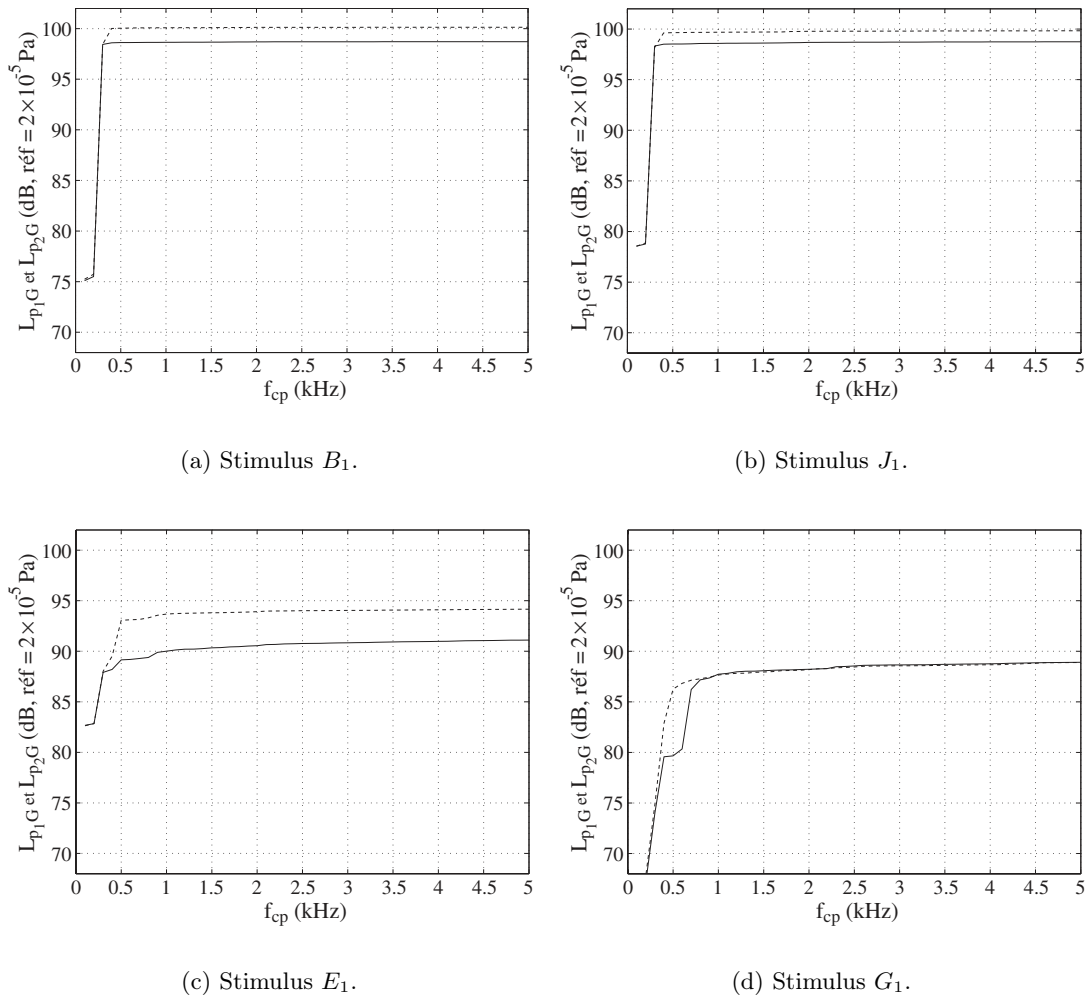


FIG. 7.11 – Courbes d'évolution des niveaux de pression acoustique globaux L_{p_1G} et L_{p_2G} en fonction de la fréquence de coupure f_{cp} des spectres de niveau de pression acoustique $L_{p_1}(f)$ et $L_{p_2}(f)$. — : L_{p_1G} , - - : L_{p_2G} .

B_1 et J_1 (Cf. figures 7.11(a) et (b)), les niveaux de pression acoustique globaux demeurent inchangés à partir d'une fréquence de coupure f_{cp} égale à 300 ou 400 Hz. Pour d'autres, le palier est atteint dans le voisinage proche de 2500 Hz ; par exemple, pour les stimuli E_1 et G_1 (Cf. figures 7.11(c) et (d)), les niveaux de pression acoustique globaux restent inchangés à partir d'une fréquence de coupure f_{cp} comprise entre 2100 et 2500 Hz.

Ainsi, les observations émises précédemment laissent à penser que f_{max}^* peut effectivement correspondre à la borne supérieure du domaine fréquentiel au sein duquel la quasi-totalité de l'énergie acoustique portée par les différents stimuli originaux est présente.

En second lieu, nous nous penchons sur l'éventualité d'un lien entre f_{max}^* et la conservation des niveaux de vitesse quadratique moyenne globaux de la plaque. La problématique peut s'énoncer plus précisément ainsi : f_{max}^* ne délimite-t-elle pas un domaine fréquentiel au sein duquel la plaque présente la quasi-totalité de son énergie vibratoire, et ce pour ses différentes configurations ? Ce lien apparaît *a priori* moins vraisemblable puisque les aspects acoustiques sont éludés ; l'investigation menée, présentée dans la section H.4.2, abonde *a posteriori* dans ce sens.

7.3.2 Lien entre f_{max}^* et des caractéristiques fréquentielles des sons originaux ?

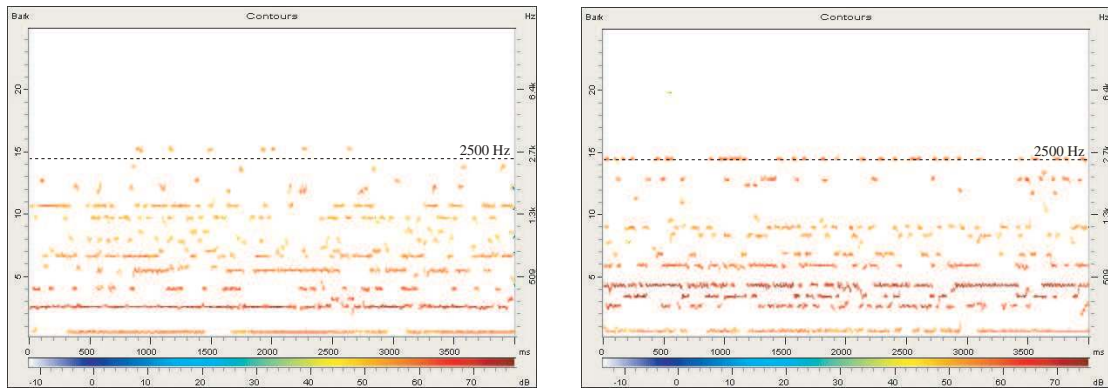
Selon le même schéma qu'à la section 7.3.1, cette question sera tout d'abord traitée d'un point de vue perceptif (Cf. section 7.3.2.1) : on se propose d'étudier l'éventualité d'un lien entre f_{max}^* et la préservation des composantes tonales auditivement pertinentes des stimuli originaux.

Puis, cette question sera abordée d'un point de vue physique (Cf. section 7.3.2.2) : nous serons amenés à examiner l'hypothèse d'un lien entre f_{max}^* et les plus hautes fréquences limites de champ diffus de la plaque et de la cavité.

7.3.2.1 D'un point de vue perceptif

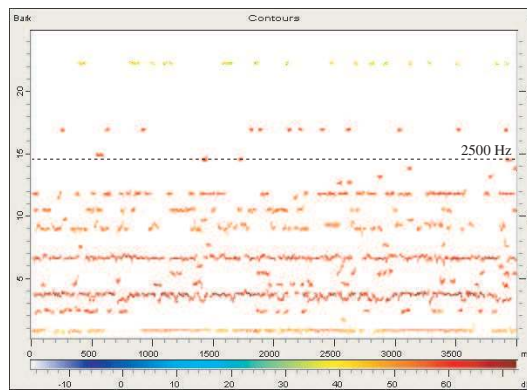
Nous avons pu voir au travers de la section 4.3.4 que le spectre des stimuli originaux présentait, surtout en basses et moyennes fréquences, de fortes émergences fréquentielles, susceptibles de représenter des composantes tonales auditivement pertinentes²⁰ ; ces composantes tonales jouent un rôle important dans la perception des stimuli originaux, dans le sens où elles concourent à former leur image sonore (Cf. travaux de Terhardt [TSS82] présentés dans la section 2.1.3.3). Aussi, nous nous penchons sur la question suivante : f_{max}^* ne délimiterait-elle pas un domaine fréquentiel minimal commun aux stimuli originaux où serait comprise la quasi-totalité de leurs composantes tonales auditivement pertinentes, cette présence permettant ainsi de se forger une image sonore d'eux non erronée ?

²⁰De l'anglais *aurally relevant tonal components* [TSS82].



(a) Stimulus C_1 (voie gauche).

(b) Stimulus D_1 (voie droite).



(c) Stimulus H_1 (voie droite).

FIG. 7.12 – Diagrammes *Frequency Tracks* calculés pour différents stimuli originaux.

Afin de détecter les composantes tonales auditivement pertinentes, un diagramme *Frequency Tracks* est calculé pour chaque stimulus original à l'aide du logiciel dB Sonic © Cortex Instruments - 01dB Metravib Technologies (Cf. figures 7.12 et H.45). Un complément d'information sur le diagramme *Frequency Tracks* est fourni dans la section G.3. Pour l'essentiel, le diagramme *Frequency Tracks* représente sous forme de *pistes* les composantes tonales auditivement pertinentes (leur amplitude est exprimée en dB) ; le reste de l'information contenue dans les sons, assimilé à du bruit, est éliminé de la représentation [Cor04].

Sur l'ensemble des diagrammes, on observe peu, voire pas, de pistes au-delà de 2500 Hz ; les diagrammes jugés les plus défavorables, i.e. avec quelques pistes détectées au-delà de 2500 Hz, sont reportés sur la figure 7.12. D'après ces observations, f_{max}^* peut effectivement coïncider avec la borne supérieure d'un domaine fréquentiel minimal commun aux stimuli originaux englobant leurs composantes tonales auditivement pertinentes.

7.3.2.2 D'un point de vue physique

7.3.2.2.a Avant-propos : quelle(s) caractéristique(s) fréquentielle(s) du comportement vibro-acoustique du système ?

Les émergences fréquentielles observées sur les spectres des stimuli originaux (e.g. spectres des stimuli I_1 et K_1 présentés sur la figure 4.5) peuvent être rattachées à la forte réponse de certains modes couplés du système plaque-cavité (Cf. section 4.3.4). On peut ainsi émettre l'hypothèse d'un lien entre la présence d'émergences fréquentielles — *in fine* de composantes tonales auditivement pertinentes — et la nature modale du champ acoustique à l'intérieur de la cavité. Toutefois, comme il a été noté dans la section 4.3.4.1.b, dans le cas où les fréquences de résonance de modes couplés contrôlés par la cavité et de modes couplés contrôlés par la plaque sont très proches, l'identification des modes couplés responsables des émergences fréquentielles est souvent entachée d'incertitudes. Au final, les émergences fréquentielles sont-elles dues i) principalement à la réponse de modes couplés contrôlés par la cavité (hypothèse *I*) ? ii) principalement à la réponse de modes couplés contrôlés par la cavité (hypothèse *II*) ? iii) pêle-mêle à la réponse de modes couplés contrôlés par la cavité *et* de modes contrôlés par la plaque ? Relativement aux deux premières hypothèses, on peut respectivement se poser les deux questions qui suivent : i) f_{max}^* ne correspond-elle pas à la plus haute fréquence limite de champ diffus de la cavité f_{lim}^c ? ii) f_{max}^* ne correspond-elle pas à la plus haute fréquence limite de champ diffus de la plaque f_{lim}^p ? Dans ces deux hypothèses, la présence de composantes tonales auditivement pertinentes pourrait s'expliquer ainsi : en-deçà de f_{max}^* , les modes couplés contrôlés par la cavité (hypothèse *I*) *ou* par la plaque (hypothèse *II*) sont encore bien séparés, leur nombre n'est pas très élevé, de telle sorte que la réponse d'un mode particulier peut provoquer une émergence fréquentielle suffisamment forte pour donner une composante tonale auditivement pertinente. *A contrario*, l'absence de composantes tonales auditivement pertinentes — i.e. le caractère "bruité" des stimuli originaux — au-delà de f_{max}^* , pourrait s'expliquer ainsi : la séparation entre les modes couplés contrôlés par la cavité (hypothèse *I*) *ou* par la plaque (hypothèse *II*) est très faible, leur nombre est élevé, de telle sorte que la réponse par paquets des modes présents dans une bande d'excitation ne peut provoquer une émergence fréquentielle suffisamment importante pour donner une composante tonale auditivement pertinente.

Dans le paragraphe qui suit, on se propose d'étudier ce lien possible entre f_{max}^* et la plus haute fréquence limite de champ diffus de l'un des deux sous-systèmes.

7.3.2.2.b Lien entre f_{max}^* et la plus haute fréquence limite de champ diffus d'un sous-système ?

La fréquence limite de champ diffus f_{lim} est définie — indifféremment pour une structure vibrante ou une cavité d'air — en utilisant des critères fondés sur la comparaison entre la séparation modale s_m et la bande passante à -3 dB des modes, notée Δf_{-3dB} . Nous considérons

le critère, couramment utilisé, selon lequel f_{lim} est la fréquence vérifiant l'égalité [?] :

$$s_m(f_{lim}) = \Delta f_{-3dB}(f_{lim}) \quad (7.6)$$

La séparation modale $s_m(f)$ est définie comme suit :

$$s_m(f) = \frac{1}{n(f)} \quad (7.7)$$

où $n(f)$ est la densité modale du sous-système considéré.

La bande passante à -3 dB d'un mode de fréquence propre f , $\Delta f_{-3dB}(f)$, peut être définie comme suit :

$$\Delta f_{-3dB}(f) = \eta(f) \times f \quad (7.8)$$

où $\eta(f)$ est le facteur de perte par amortissement du mode.

Lien entre f_{max}^* et la plus haute fréquence limite de champ diffus de la cavité ?

Parmi les différentes configurations de cavité, la fréquence limite de champ diffus la plus élevée est obtenue dans le cas de la cavité nue ; son calcul est abordé ci-après.

La densité modale de la cavité nue $n^c(f)$ est donnée approximativement par [?] :

$$n^c(f) = \frac{4\pi f^2 V}{c^3} \quad (7.9)$$

où V est le volume de la cavité et c est la célérité des ondes acoustiques dans la cavité.

Pour le calcul de la bande passante à -3 dB d'un mode de cavité, Δf_{-3dB}^c , nous utilisons les valeurs expérimentales de facteur de perte par amortissement η^c mesurées par Ryu [Ryu02] pour la même cavité d'air. La mesure de η^c a été réalisée selon la méthode du lâcher²¹ sur l'intervalle de fréquences [0,4000] Hz, par bande de fréquences de largeur égale à 400 Hz. Ainsi, les valeurs de η^c mesurées correspondent au facteur de perte par amortissement moyen d'un mode situé dans les différentes bandes (de fréquences centrales f_{cent}) ; ces valeurs sont reportées sur la figure 7.13.

Ainsi, les calculs de s_m^c et Δf_{-3dB}^c sont réalisés ici par bande de fréquences de 400 Hz, de telle sorte que les expressions (7.7) et (7.8) se déclinent respectivement comme suit :

$$s_m^c(f_{cent}) = \frac{1}{n^c(f_{cent})} \quad (7.10)$$

où $s_m^c(f_{cent})$ et $n^c(f_{cent})$ désignent respectivement la séparation modale moyenne et la densité modale moyenne dans une bande de 400 Hz de fréquence centrale f_{cent} ;

et :

$$\Delta f_{-3dB}^c(f_{cent}) = \eta^c(f_{cent}) \times f_{cent} \quad (7.11)$$

²¹R. H. Lyon and R. G. Dejong. *Theory and Application of Statistical Energy Analysis. Second Edition.* Butterworth-Heinemann, Boston, MA, USA, 1995 (cité dans [Ryu02]).

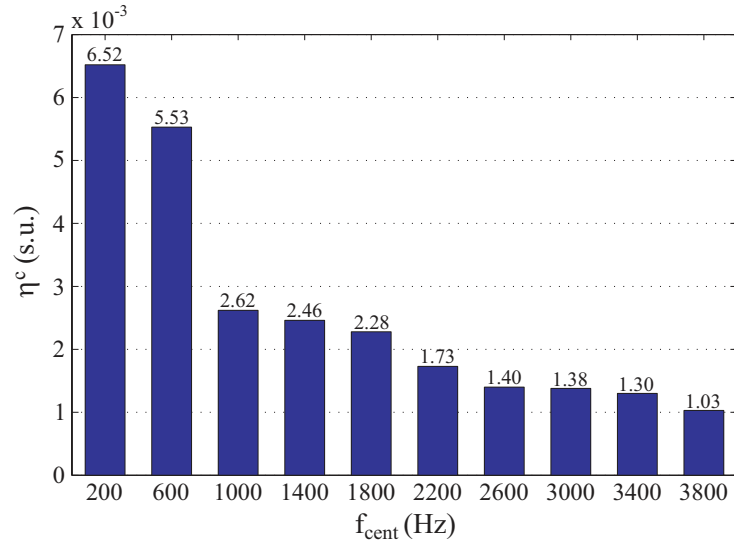


FIG. 7.13 – Facteur de perte par amortissement moyen d'un mode de cavité situé dans les différentes bandes (de fréquences centrales f_{cent}) [Ryu02].

où $\Delta f_{-3dB}^c(f_{cent})$ et $\eta^c(f_{cent})$ désignent respectivement la bande passante à -3 dB moyenne et le facteur de perte par amortissement moyen d'un mode de cavité situé dans une bande de 400 Hz de fréquence centrale f_{cent} .

On peut alors déterminer graphiquement (Cf. figure 7.14) la fréquence limite de champ diffus f_{lim}^c de la cavité nue vérifiant l'égalité (7.6). Le cas le plus critique se présente : l'abscisse

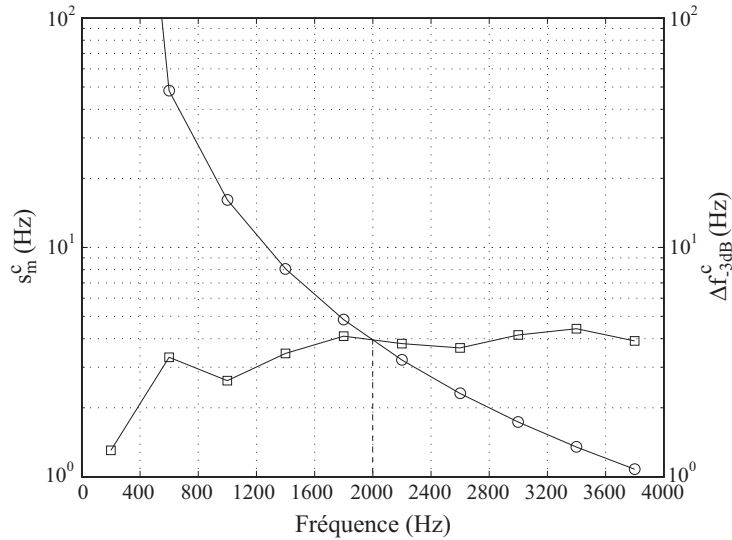


FIG. 7.14 – Courbes d'évolution de s_m^c et Δf_{-3dB}^c en fonction de la bande de fréquences. $-\circ-$: s_m^c , $-\square-$: Δf_{-3dB}^c .

du point d'intersection entre les courbes d'évolution de s_m^c et de Δf_{-3dB}^c en fonction de la

bande de fréquences coïncide avec une limite entre deux bandes de fréquences successives, i.e. 2000 Hz. Ainsi, dans le cas le plus défavorable, f_{lim}^c serait comprise dans le domaine [1600-2000] Hz ; dans le cas le plus favorable, f_{lim}^c serait comprise dans le domaine [2000-2400] Hz. Seulement dans ce dernier cas, l'existence d'un lien entre f_{max}^* et f_{lim}^c paraîtrait plausible. Pour statuer sur ce point, il serait nécessaire de réaliser à nouveau une mesure expérimentale de η^c , mais en utilisant une bande d'analyse plus fine, donnant la possibilité d'approximer plus finement f_{lim}^c et d'établir avec précision un lien entre f_{max}^* et f_{lim}^c . Mais, dans les deux cas cités précédemment, f_{max}^* est atteinte après que le champ acoustique est devenu diffus, i.e. homogène, sans présence marquée de modes. Ce constat rejoint les conclusions de la section 7.3.2.1 selon lesquelles f_{max}^* délimite une partie basse-fréquence et moyenne-fréquence avec émergences fréquentielles (dues au modes) et une partie haute-fréquence sans émergences assimilée à du bruit.

Lien entre f_{max}^* et la plus haute fréquence limite de champ diffus de la plaque ?

La densité modale $n^p(f)$ de la plaque²² est définie approximativement — indépendamment des conditions aux limites de la plaque — comme suit [?] :

$$n^p(f) = \frac{S}{2} \left(\frac{\rho_s h}{D} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (7.12)$$

où S est la surface de la plaque, ρ_s la masse volumique de l'acier, h l'épaisseur de la plaque et D la rigidité de flexion de la plaque définie comme suit :

$$D = \frac{E h^3}{12(1 - \nu^2)} \quad (7.13)$$

où E et ν sont respectivement le module d'Young et le coefficient de Poisson de l'acier.

Pour le calcul de la bande passante à -3 dB d'un mode de plaque, Δf_{-3dB}^p , nous ne disposons pas de valeurs expérimentales de facteur de perte par amortissement η^p de l'acier. Aussi, nous procédons à un calcul théorique de Δf_{-3dB}^p (avec des valeurs théoriques de η^p). En injectant les expressions (7.7) et (7.8) dans l'expression (7.6), la fréquence limite de champ diffus de la plaque f_{lim}^p est alors donnée analytiquement par [?] :

$$f_{lim}^p = \frac{1}{\eta^p n^p(f)} \quad (7.14)$$

où η^p est ici le facteur de perte par amortissement visqueux.

La plus haute fréquence limite de champ diffus est obtenue pour la plaque de plus grande épaisseur, i.e. 3 mm. Le calcul est réalisé pour 2 valeurs de η^p : 7×10^{-3} et 1.2×10^{-2} ; les valeurs de f_{lim}^p calculées²³ pour ces 2 valeurs de η^p sont présentées dans le tableau 7.3.

²²La plaque est considérée comme étant mince et en flexion pure.

²³A.N. : $S = 0.3 \text{ m}^2$, $\rho_s = 7520 \text{ kg/m}^3$, $E = 2.068 \times 10^{11} \text{ Pa}$ et $\nu = 0.29$.

η^p	f_{lim}^p (Hz)
7×10^{-3}	4432
1.2×10^{-2}	2585

TAB. 7.3 – Valeurs de f_{lim}^p pour la plaque d'épaisseur 3 mm.

On observe que, pour un acier avec un facteur de perte par amortissement visqueux $\eta^p = 1.2 \times 10^{-2}$, on obtient une valeur de f_{lim}^p égale à 2585 Hz pour la plaque d'épaisseur 3 mm, proche de la valeur de f_{max}^* . Néanmoins, il n'est pas possible d'affirmer que cette valeur de η^p reflète réellement les propriétés d'amortissement de la plaque en acier utilisée lors de l'expérimentation. En outre, comme on peut le voir dans le tableau 7.3, une incertitude sur la valeur de η^p provoque d'importants écarts sur la valeur calculée de f_{lim}^p . Sur la base de ces éléments, l'existence d'un lien effectif entre f_{max}^* et f_{lim}^p est difficile à affirmer.

7.4 Conclusions

Dans une première partie, a été exposée la démarche méthodologique retenue afin de déterminer une fréquence de coupure ajustée des sons f_{max}^* , pour laquelle, malgré la réduction de l'étendue du contenu fréquentiel, les tendances qualitatives approximées, i.e. issues de l'évaluation auditive d'un corpus de sons réels limités en fréquence, restent en adéquation avec les tendances qualitatives originales établies au chapitre 6.

Cette démarche implique un processus d'ajustement par itération. À chaque itération, est testée une valeur de fréquence de coupure f_{max} : les sons réels originaux sont filtrés passe-bas à f_{max} en utilisant un filtre RIF à phase linéaire ; puis, les sons filtrés passe-bas à f_{max} sont soumis à l'évaluation auditive par un jury d'auditeurs en utilisant un protocole de test identique à celui utilisé au chapitre 6 ; enfin, les tendances qualitatives approximées dressées à partir de l'analyse des réponses au test d'écoute sont confrontées aux tendances qualitatives originales.

Dans la détermination de f_{max}^* , notre attention s'est portée exclusivement sur la préservation des tendances qualitatives relatives aux valeurs de mérite. Notamment, pour décréter de leur préservation, deux critères à remplir nécessairement ont été arrêtés : i) les sons préférés, i.e. les configurations structurales préférées du système plaque-cavité, restent inchangés, et ii) l'attribut auditif sur lequel se base le modèle de préférence original (i.e. la sonie) reste le même (et la qualité d'ajustement du modèle de régression linéaire n'est pas dégradée).

Dans une seconde partie, les résultats du processus d'ajustement fréquentiel ont été présentés.

Notamment, parmi les différentes valeurs de f_{max} testées itération après itération, la valeur $f_{max} = 2500$ Hz, i.e. la dernière valeur pour laquelle les tendances qualitatives approximées relatives aux valeurs de mérite se sont révélées être en "bonne" adéquation avec les tendances

originales (conformément aux 2 critères arrêtés), a été désignée comme la fréquence de coupure ajustée f_{max}^* .

Par la suite, nous avons procédé à la confrontation des espaces perceptifs de dissimilarité et de préférence originaux et approximés dressés pour un filtrage passe-bas à f_{max}^* . Cette confrontation a montré que l'élimination du contenu fréquentiel au-delà de f_{max}^* affectait peu les mécanismes de différenciation et d'évaluation de la préférence. Notamment, les auditeurs ont vraisemblablement utilisé les mêmes attributs saillants des sons, i.e. leur sonie et leur balance spectrale; les configurations structurales ont été cartographiées de façon similaire dans les espaces perceptifs de dissimilarité et de préférence approximés et originaux.

Dans une dernière partie, nous avons tenté d'expliquer l'ajustement de f_{max} à 2500 Hz. Plusieurs pistes ont été explorées, suivant deux approches complémentaires, holistique et analytique; les pistes *a posteriori* les plus crédibles sont récapitulées ci-après.

Suivant une approche holistique, nous avons pu noter que i) d'un point de vue perceptif, f_{max}^* s'apparentait fortement à la dernière fréquence de coupure qui peut garantir la préservation de la hiérarchie entre les sonies des stimuli afférents aux différents groupes de configurations structurales érigés à partir du classement de préférence original, et ii) d'un point de vue physique, f_{max}^* pouvait coïncider avec la borne supérieure du domaine fréquentiel au sein duquel la quasi-totalité de l'énergie acoustique portée par les différents stimuli originaux est incluse.

Suivant une approche analytique, nous avons pu relever que, d'un point de vue perceptif, f_{max}^* pouvait délimiter un domaine fréquentiel minimal commun où est présente la quasi-totalité des composantes tonales auditivement pertinentes des stimuli originaux, leur présence permettant de se forger une image sonore d'eux non erronée. Notons que le diagramme *Frequency Tracks* s'est révélé comme un outil particulièrement utile pour détecter ces composantes tonales auditivement pertinentes. D'un point de vue physique, nous avons pu noter que, sous certaines conditions, l'existence d'un lien entre f_{max}^* et la plus haute fréquence limite de champ diffus de la cavité f_{lim}^c paraissait envisageable, cette piste nécessitant toutefois une investigation expérimentale supplémentaire pour être confirmée.

Chapitre 8

Ajustement du pas fréquentiel des sons

En vue d'une étude de la qualité sonore du système plaque-cavité à partir de simulations dans le domaine fréquentiel de sa réponse vibro-acoustique, un second paramètre de calcul à ajuster est le pas fréquentiel de calcul. Sa définition joue également sur les efforts de calcul vibro-acoustique en déterminant le nombre de points de calcul dans l'intervalle fréquentiel d'étude, et — point important dans le cadre d'une étude de qualité sonore — influe sur l'enveloppe des spectres de pression calculés. Notamment, plus le pas fréquentiel est grossier, plus l'enveloppe spectrale est lissée, i.e. moins les émergences fréquentielles sont prononcées¹. Aussi, il faut veiller à ce que, en dépit de la modification de l'enveloppe spectrale causée par la sélection d'un pas fréquentiel grossier, les tendances qualitatives issues de l'évaluation auditive du corpus de sons synthétisés reflètent les tendances qualitatives dressées à partir de l'évaluation auditive du corpus de sons réels.

Dans ce chapitre, nous visons à définir un pas fréquentiel de calcul qui permet de remplir les deux objectifs évoqués ci-dessus. Comme précédemment pour l'ajustement de la fréquence maximale de calcul, on opère à partir des sons réels. L'enveloppe spectrale des sons réels est modifiée de façon à simuler l'enveloppe de spectres de sons synthétisés qui seraient calculés avec un pas fréquentiel Δf . Dès lors, la tâche d'ajustement consiste à déterminer un pas fréquentiel Δf ajusté pour lequel les tendances qualitatives issues de l'évaluation auditive du corpus des sons modifiés restent une bonne approximation des tendances qualitatives originales.

Dans une première section, nous préciserons les aspects méthodologiques ; notamment, nous justifierons le choix du processus d'ajustement adopté, qui appelle à trois phases successives d'expérimentation perceptive. Aussi, dans les trois sections qui suivent, nous présenterons leurs résultats respectifs.

¹Cf. section [A.4.2](#) pour une illustration.

8.1 Démarche méthodologique

8.1.1 Vue d'ensemble

La figure 8.1 présente une vue d'ensemble sur la démarche méthodologique adoptée afin de déterminer un pas fréquentiel Δf ajusté qui permet de conserver les tendances qualitatives originales relatives à l'influence de la variation des paramètres structuraux du système plaque-cavité et définies au chapitre 6.

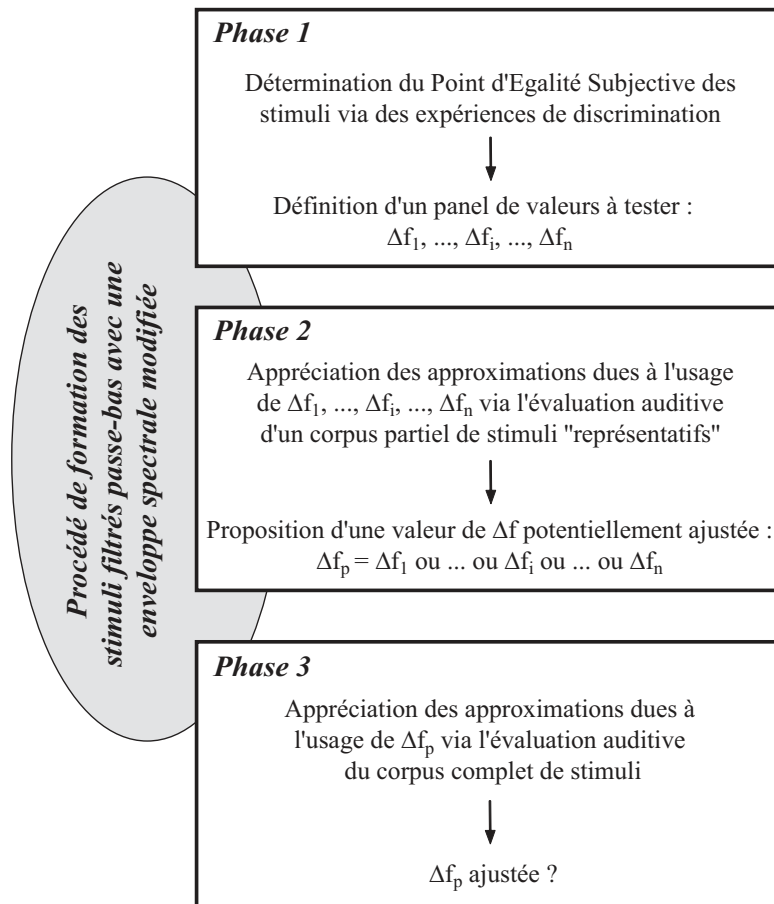


FIG. 8.1 – Vue d'ensemble sur la démarche méthodologique adoptée.

L'ajustement de Δf est réalisé en prenant en compte les résultats de l'ajustement de la fréquence de coupure f_{max} des sons, i.e. les stimuli présentés lors des différentes expériences perceptives mises en œuvre au travers de la démarche proposée sont par défaut filtrés passe-bas à la fréquence de coupure ajustée f_{max}^* . Dans la section 8.1.2, est décrit le procédé utilisé pour former des stimuli filtrés passe-bas à f_{max}^* dont l'enveloppe spectrale calque l'enveloppe de spectres de stimuli synthétisés qui seraient calculés jusqu'à une fréquence maximale f_{max}^* et avec un pas fréquentiel Δf donné. Dans ce qui suit, dans un souci d'allègement du texte, nous emploierons souvent l'expression "stimuli filtrés modifiés" pour désigner des stimuli filtrés

passé-bas à f_{max}^* dont l’enveloppe spectrale aura été modifiée.

Le processus d’ajustement proposé demande trois phases successives d’expérimentation perceptive, et diffère ainsi du processus adopté pour ajuster la fréquence de coupure des sons, de nature itérative (Cf. section 7.1.1). Plusieurs raisons expliquent ce changement de méthodologie.

Une première raison concerne le choix des valeurs à tester. Pour l’ajustement de f_{max} , il était possible de présumer *a priori*, à partir d’un examen des spectres auditifs des sons originaux, des contenus haute-fréquence vraisemblablement peu importants d’un point de vue perceptif et dont l’élimination par filtrage-passe bas n’aurait pas été à même de causer une perte des tendances qualitatives². Concernant l’ajustement de Δf , il apparaît plus difficile, à partir de ces mêmes représentations, d’appréhender *a priori* les effets d’une modification de l’enveloppe spectrale des sons sur leur perception, et par là-même de présager des répercussions d’une telle modification sur les tendances qualitatives. Aussi, une première phase d’expérimentation perceptive est jugée nécessaire pour définir un panel pertinent de valeurs de Δf ($\Delta f_1, \dots, \Delta f_i, \dots, \Delta f_n$) à tester (Cf. section 8.2). Dans cette perspective, pour chacun des 13 stimuli ($A_1, \dots, K_1, A_2, H_2$), une expérience de discrimination est lancée afin de déterminer le Point d’Égalité Subjective (P.E.S.) en termes de pas fréquentiel. Pour des valeurs situées en-deçà du P.E.S., Δf n’influe pas sur la perception du stimulus ; ainsi, à la connaissance des différentes valeurs du P.E.S. (i.e. déterminées pour les différents stimuli), il sera possible de définir la valeur limite inférieure en-deçà de laquelle il ne sera assurément pas utile de porter la recherche de la valeur ajustée de Δf , et de définir un panel de valeurs à tester adapté en conséquence.

Ensuite, dans l’optique de réduire la durée de l’expérimentation perceptive, la recherche de la valeur ajustée de Δf (opérée parmi les valeurs du panel précédemment constitué) est scindée en deux phases. Ainsi, une seconde phase est tout d’abord consacrée à l’appréciation des approximations dues à l’usage des différentes valeurs de Δf via l’évaluation auditive d’un corpus partiel de stimuli “représentatifs” (Cf. section 8.3). Une valeur de pas fréquentiel potentiellement ajustée Δf_p est alors extraite ; Δf_p équivaut au pas fréquentiel le plus grossier pour lequel les tendances qualitatives dressées relativement aux valeurs de mérite restent encore une bonne approximation des tendances originales. Puis, dans une troisième et dernière phase sont appréciées les approximations dues à l’usage de Δf_p via l’évaluation auditive du corpus complet de stimuli (Cf. section 8.4). Cette appréciation permet de statuer quant à l’ajustement — effectif ou non — de Δf_p . En adoptant cette procédure en deux phases, le nombre total de sessions de test à mettre en oeuvre est *a priori* réduit par rapport à celui que nécessiterait l’application d’une procédure consistant à conduire une évaluation auditive du corpus complet de stimuli pour chaque valeur de Δf du panel (une évaluation auditive du corpus complet demande une session de test).

²Cf. section 7.1.3.2.

8.1.2 Procédé de formation des stimuli filtrés modifiés

Dans le processus d’ajustement de Δf , le procédé adopté pour former un stimulus filtré modifié a été élaboré en cherchant à se caler — autant que possible — sur la méthode³ qui serait utilisée pour synthétiser un bruit rose artificiel à partir de spectres d’amplitude de la pression acoustique calculés aux deux points de réception intérieurs à la cavité M_1 et M_2 , et ce jusqu’à une fréquence maximale f_{max}^* et avec un pas fréquentiel Δf . Les différentes étapes de la synthèse sonore seraient les suivantes⁴ :

- i) Les spectres d’amplitude calculés sur $[0, f_{max}^*]$ avec un pas fréquentiel Δf sont interpolés avec un taux R de manière à obtenir un pas fréquentiel Δf_0 égal à $\frac{1}{T}$, où T est la durée du son à synthétiser ; R est donc égal à $\frac{\Delta f}{\Delta f_0}$. Pour une durée T égale à 4 secondes, Δf_0 est égal à 0.25 Hz. Les valeurs de Δf utilisées sous simulations étant généralement de l’ordre du hertz, R est un nombre entier positif.
- ii) Il est procédé à du “Zero padding” sur $]f_{max}^*, \frac{F_s}{2}]$, où F_s est la fréquence d’échantillonnage des sons à synthétiser (égale à 44100 Hz) : des zéros (i.e. 0 Pa) sont rajoutés à la fin des spectres d’amplitude jusqu’à la fréquence de Nyquist $\frac{F_s}{2}$, incluse. On obtient ainsi des spectres d’amplitude définis sur $[0, \frac{F_s}{2}]$, avec un pas fréquentiel Δf_0 .
- iii) Il est procédé à la reconstruction de spectres complexes sur $[0, \frac{F_s}{2}]$, en introduisant une phase aléatoire à chaque échantillon.
- iv) Il est procédé à la reconstruction des spectres complexes sur $[0, F_s[$ en utilisant la propriété de symétrie conjuguée de la Transformée de Fourier Discrète — *Discrete Fourier Transform* en anglais (DFT) — d’une séquence réelle à durée finie⁵. Dans la pratique, pour la partie réelle des spectres complexes, il est opéré une symétrie des valeurs de l’intervalle $]0, \frac{F_s}{2}[$ par rapport à l’axe vertical passant par l’abscisse $\frac{F_s}{2}$; pour la partie imaginaire des spectres complexes, il est opéré une symétrie des valeurs de l’intervalle $]0, \frac{F_s}{2}[$ par rapport au point de coordonnées $(\frac{F_s}{2}, 0)$. Les spectres ainsi reconstruits comportent $N = F_s \times T$ échantillons, soit $N = 176400$.
- v) Un signal stéréophonique, de durée T (i.e. de longueur N), est synthétisé à partir des

³Cette méthode est fondée sur celle adoptée par Faure [Fau03] pour synthétiser un bruit rose artificiel transmis par une plaque bafflée, modélisée.

⁴Si l’on se reporte aux travaux de Faure [Fau03], on pourra remarquer que les étapes présentées ci-après diffèrent légèrement de celles mentionnées par l’auteur ; toutefois, les résultats produits, i.e. les sons synthétisés, suivant les deux méthodes de synthèse sonore sont identiques. Aussi, notons que les étapes iv) et v) sont dérivées de la méthode utilisée dans [HGS⁺99] pour construire la réponse impulsionnelle acoustique d’une plaque bafflée à partir de sa fonction de transfert acoustique calculée.

⁵Pour une séquence réelle à durée finie $x[n]$ d’une longueur égale à N échantillons ($n \in [0, N - 1]$), la propriété de symétrie conjuguée de sa DFT $X[k]$ s’écrit [OSB99] :

$$X[k] = X^*[N - k] , \quad k \in [0, N - 1]$$

spectres complexes reconstitués par application d'une Transformée de Fourier Discrète Inverse — *Inverse Discrete Fourier Transform* en anglais (IDFT).

Ces différentes étapes sont récapitulées sur la figure 8.2(a).

Ainsi, relativement aux étapes de la synthèse sonore, les différentes étapes de la formation d'un stimulus filtré modifié ont été définies comme suit :

- i) Les spectres complexes (voies gauche et droite) sont calculés par application d'une DFT sur le stimulus filtré passe-bas à f_{max}^* . Ces spectres sont définis sur $[0, F_s[$ — où F_s est la fréquence d'échantillonnage utilisée pour l'enregistrement sonore — avec un pas fréquentiel Δf_0 égal à $\frac{1}{T}$, où T est la durée du stimulus filtré passe-bas à f_{max}^* . Pour $T = 4$ s, $\Delta f_0 = 0.25$ Hz.
- ii) Les spectres d'amplitude sont dissociés des spectres de phase. En effet, la modification de l'enveloppe spectrale concerne les seuls spectres d'amplitude ; les spectres de phase sont conservés intacts pour l'étape ultérieure de reconstruction des spectres complexes (Cf. étape vii).
- iii) Les valeurs de l'intervalle $]\frac{F_s}{2}, F_s[$ sont supprimées : on obtient des spectres d'amplitude définis sur $[0, \frac{F_s}{2}]$, avec un pas fréquentiel Δf_0 .
- iv) On procède à une “décimation” des spectres d'amplitude avec un taux R égal à $\frac{\Delta f}{\Delta f_0}$. Dans la pratique, une valeur sur R est conservée, en commençant par la composante nulle^{6,7}. On obtient des spectres d'amplitude définis sur $[0, \frac{F_s}{2}]$, avec un pas fréquentiel Δf . On peut considérer ces spectres d'amplitude comme les pendants des spectres d'amplitude qui auraient été calculés sur $[0, f_{max}^*]$ avec un pas fréquentiel Δf .
- v) On procède à une “interpolation” des spectres d'amplitude avec un taux R , de manière à obtenir de nouveau des spectres d'amplitude avec un pas fréquentiel Δf_0 . Dans la pratique, on opère une interpolation linéaire entre les valeurs précédemment conservées tous les Δf .
- vi) On procède à la reconstruction des spectres d'amplitude sur $[0, F_s[$ en utilisant la propriété de symétrie conjuguée de la DFT. Dans la pratique, on opère une symétrie des valeurs de l'intervalle $]0, \frac{F_s}{2}[$ par rapport à l'axe vertical passant par l'abscisse $\frac{F_s}{2}$.
- vii) On procède à la reconstruction des spectres complexes sur $[0, F_s[$ en ré-introduisant les spectres de phase précédemment conservés.
- viii) Un signal stéréophonique, de durée T (i.e. de longueur N), est synthétisé à partir des

⁶La composante nulle est la valeur de pression à 0 Hz.

⁷En procédant de la sorte, il se peut que, suivant la valeur de R , la valeur de pression à l'abscisse $\frac{F_s}{2}$ soit supprimée. Cependant, afin de pouvoir procéder à l' “interpolation” des spectres d'amplitude sur l'intervalle $[\frac{F_s}{2} - \Delta f, \frac{F_s}{2}]$ (Cf. étape v), il est indispensable de disposer de la valeur de pression à la borne $\frac{F_s}{2}$. Ainsi, cette valeur est conservée quelque soit la valeur de R .

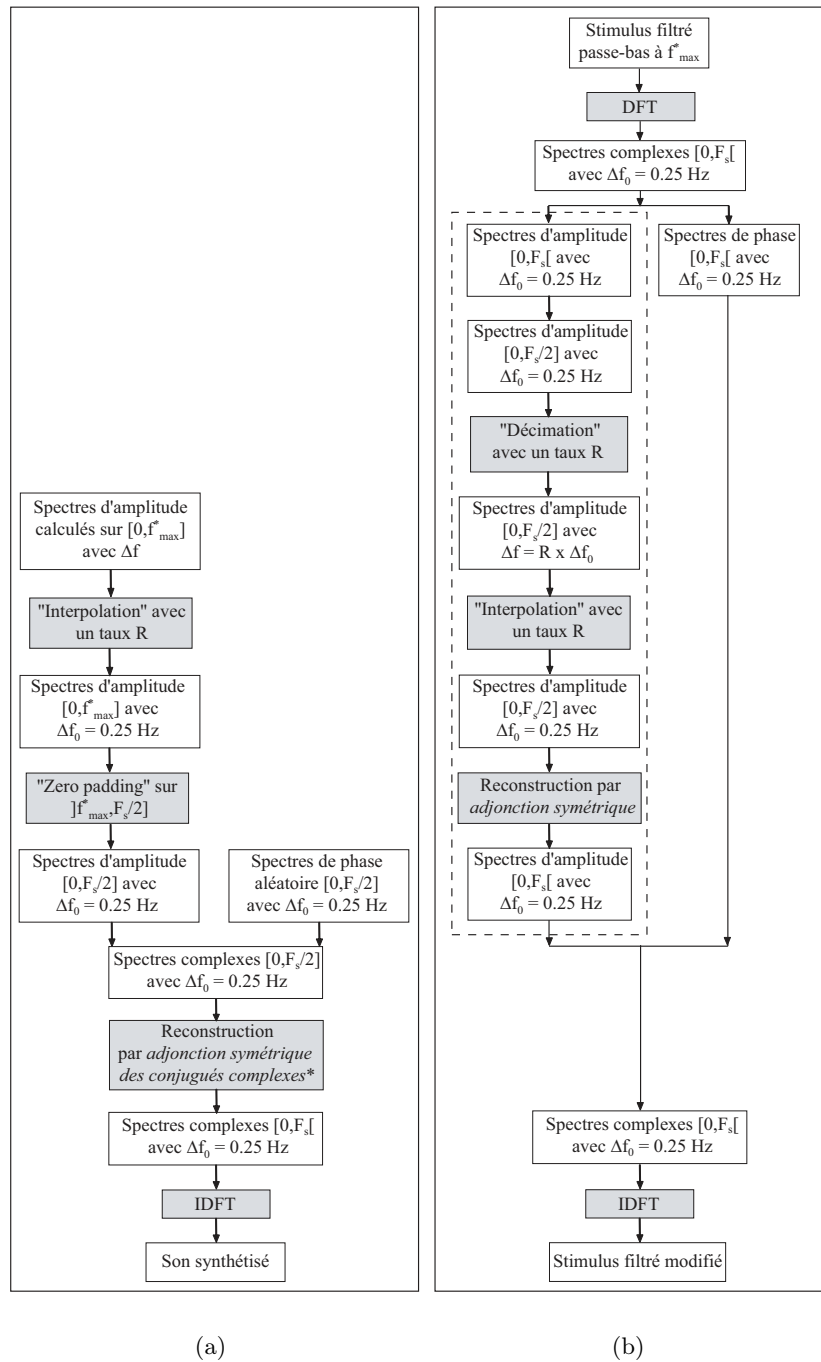


FIG. 8.2 – Mise en parallèle des étapes sous-jacentes à (a) la synthèse d'un bruit rose artificiel à partir de spectres d'amplitude de la pression acoustique calculés sous simulations aux deux points de réception M_1 et M_2 jusqu'à une fréquence maximale f_{max}^* et avec un pas fréquentiel Δf , et à (b) la formation d'un stimulus filtré modifié.*De l'anglais *Symmetric addition of complex conjugates* [HGS+99].

spectres complexes reconstitués par application d'une IDFT.

Ces différentes étapes sont récapitulées sur la figure 8.2(b). La figure I.1 propose une illustration des étapes sous-jacentes à la modification de l'enveloppe d'un spectre d'amplitude d'un stimulus filtré passe-bas à f_{max}^* (encadrées en traits pointillés sur la figure 8.2(b)), pour un taux de “décimation”/“interpolation” R égal à 2.

8.2 Définition d'un panel de valeurs de Δf à tester

8.2.1 Méthode du stimulus constant pour la détermination du Point d'Égalité Subjective (P.E.S.)

L'expérience de discrimination lancée pour chaque stimulus ($A_1, \dots, K_1, A_2, H_2$) afin de déterminer le Point d'Égalité Subjective (P.E.S.) repose sur la méthode du stimulus constant avec paradigme “Identique / Différent” [Bon86]. Le principe de la méthode est brièvement rappelé ci-après.

8.2.1.1 Principe de la méthode

Au cours de l'expérience de discrimination, plusieurs paires de sons sont présentées dans un ordre aléatoire à un panel de sujets. Chaque paire comporte un son de référence et un son testé. Les sons testés correspondent à différents pas fréquentiels Δf . Pour chaque paire, les sujets évaluent si le son testé est identique ou différent du son de référence. Les sujets peuvent répéter plusieurs fois l'expérience. Ainsi, pour chaque paire, la probabilité estimée $p_i(D)$ que le $i^{\text{ème}}$ son testé soit différent du son de référence est donnée par :

$$p_i(D) = \frac{N_i(D)}{N} \quad (8.1)$$

où $N_i(D)$ est le nombre de réponses “le $i^{\text{ème}}$ son testé est différent du son de référence” et N est le nombre total de réponses.

La probabilité estimée $p_i(S)$ que le $i^{\text{ème}}$ son testé soit similaire au son de référence est alors donnée par :

$$p_i(S) = 1 - p_i(D) \quad (8.2)$$

Dans le cas d'un paradigme “Identique / Différent”, le P.E.S. est déterminé graphiquement, i.e. le P.E.S. est donné par l'abscisse du point d'intersection des courbes d'évolution de $p_i(D)$ et $p_i(S)$ en fonction de Δf ⁸ [Bon86].

⁸L'ordonnée du point d'intersection est systématiquement égale à 0.5, de par la relation de complémentarité existant entre $p_i(D)$ et $p_i(S)$ (Cf. équation (8.2)).

8.2.1.2 Sujets

Onze sujets, 3 femmes et 8 hommes, âgés entre 20 et 30 ans, ont effectué les 13 expériences de discrimination ; les sujets ont répété deux fois chaque expérience. Ces auditeurs sont des doctorants ou chercheurs permanents du LASH.

8.2.1.3 Stimuli

Au sein d'une expérience de discrimination, le son de référence est un stimulus filtré passe-bas à f_{max}^* ($A_1, \dots, K_1, A_2, H_2$) ; les différents sons testés correspondent à ce même stimulus, mais modifié selon le procédé décrit dans la section 8.1.2 pour différentes valeurs de pas fréquentiel Δf : 1 Hz, 2 Hz, 4 Hz, 8 Hz, 10 Hz et 12 Hz. Ces valeurs ont été pré-sélectionnées en se référant aux travaux de Faure [Fau03] (Cf. section 3.2.1). Afin de réaliser un codage optimal tout en conservant les différences relatives de niveau existant entre les 7 sons d'une même expérience (i.e. le son de référence et les 6 sons testés), les valeurs de pression acoustique sont, juste avant encodage dans des fichiers audio au format WAV⁹, divisées par la valeur maximale détectée sur l'ensemble des 7 sons.

8.2.1.4 Dispositif expérimental

Le test se déroule dans la chambre semi-anéchoïque du LASH. Les sons sont restitués par un casque ouvert Sennheiser HD600 via une carte son haute qualité LynxONE © Lynx Studio Technology. Pour chaque expérience de discrimination, le volume est réglé de façon à ce que le niveau de diffusion du stimulus filtré passe-bas à f_{max}^* (i.e. le son de référence) soit identique au niveau auquel il était diffusé lors du test de comparaison par paires portant sur la série de stimuli filtrés passe-bas à f_{max}^* (Cf. chapitre 7).

Une interface graphique permet l'écoute des 6 paires de sons et la saisie des réponses des sujets (Cf. figure 8.3). Cette interface a été développée par Faure [Fau03] sous Labview © National instruments.

8.2.2 Résultats des expériences de discrimination

Les réponses données par les sujets au cours des 13 expériences de discrimination sont présentées dans le tableau récapitulatif I.1. Certains sujets ont donné des réponses incohérentes (e.g. le sujet n°3 pour le stimulus D_1) ; leurs réponses n'ont pas été prises en compte dans la détermination du P.E.S.

La détermination graphique du P.E.S. pour les différents stimuli est présentée sur la figure I.2. Les valeurs de P.E.S. sont reportées sur la figure 8.4.

⁹L'encodage est réalisé avec une fréquence d'échantillonnage égale à 44100 Hz et une résolution de 16 bits.

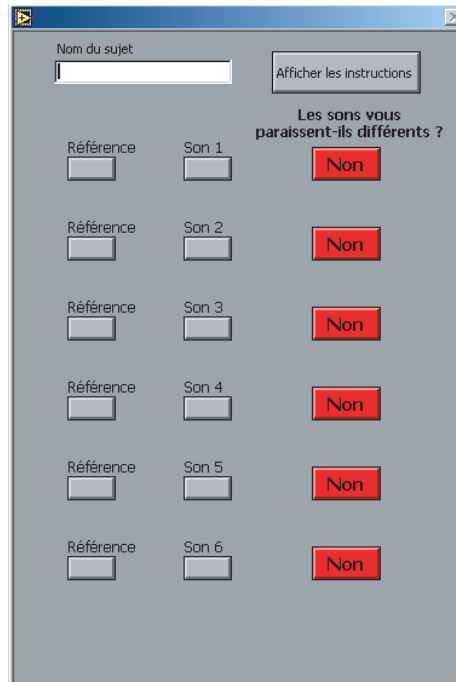


FIG. 8.3 – Expériences de discrimination : interface de présentation et de réponse, développée par Faure [Fau03].

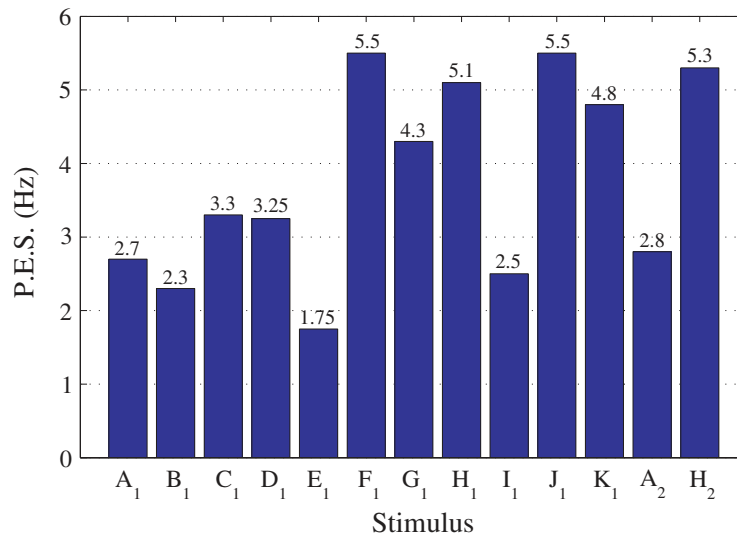


FIG. 8.4 – Valeurs de P.E.S. pour les différents stimuli.

8.2.3 Définition du panel

À partir des résultats précédents, nous avons jugé pertinent de focaliser la recherche de la valeur ajustée de Δf sur un panel limité à 4 valeurs ; ces valeurs, qui sont de nature à être utilisées sous simulations, sont les suivantes :

- $\Delta f_1 = 2$ Hz : cette valeur correspond approximativement à la plus petite valeur de P.E.S. obtenue¹⁰. Δf_1 n'a ainsi que très peu d'influence sur la perception des 13 stimuli.
- $\Delta f_2 = 4$ Hz et $\Delta f_3 = 5$ Hz : autour de ces valeurs se concentrent près de la moitié des valeurs de P.E.S. obtenues. Dans les deux cas, pour certains stimuli, le pas fréquentiel a une influence sur leur perception, pour d'autres non.
- $\Delta f_4 = 10$ Hz : cette valeur est supérieure à toutes les valeurs de P.E.S. obtenues. Δf_4 influe ainsi sur la perception des 13 stimuli.

8.3 Appréciation des approximations dues à l'usage des différents pas fréquentsiels via l'évaluation auditive d'un corpus partiel de stimuli "représentatifs"

Pour chaque valeur Δf_i ($i = 1$ à 4) du panel précédemment défini, nous allons maintenant chercher à apprécier les approximations que son usage induit sur les tendances qualitatives relatives aux valeurs de mérite ; cette appréciation est réalisée à partir de l'évaluation auditive d'un corpus partiel de stimuli "représentatifs".

8.3.1 Mise en œuvre du test d'écoute

8.3.1.1 Sujets

Trente-quatre sujets (17 femmes et 17 hommes), âgés de 20 à 55 ans, ont participé au test d'écoute. Ces auditeurs sont des membres du LASH ou des étudiants et personnels de l'ENTPE.

8.3.1.2 Stimuli

Le corpus "partiel" ne comprend plus que 6 stimuli (contre 13 pour le corpus "complet"). Ainsi, pour un test de comparaison par paires (Cf. section 8.3.1.3), le nombre de paires qui en découle est réduit (15 au lieu de 78) ; la durée nécessaire à l'évaluation d'un corpus partiel de stimuli est substantiellement réduite en comparaison de celle nécessaire à l'évaluation d'un corpus complet de stimuli, de telle sorte que les 4 corpus partiels de stimuli peuvent être évalués successivement au cours d'un même test d'écoute (soit 60 paires au total, pour une durée de test qui ne dépasse pas 15 à 20 minutes). Une première appréciation rapide des approximations liées à l'usage des 4 valeurs de Δf retenues est ainsi possible. Toutefois, pour pouvoir juger

¹⁰Cette valeur, i.e. 1.75 Hz, est obtenue pour le stimulus E_1 (Cf. figure 8.4).

valablement de l’adéquation entre les tendances qualitatives originales et approximées relatives aux valeurs de mérite, les 6 stimuli doivent être suffisamment “représentatifs” du classement de préférence. Notamment, la sélection doit être orientée de telle façon à ce que la dislocation du groupe de tête, qui serait du fait d’approximations trop importantes sur les valeurs de mérite mesurées, soit constatable le cas échéant. Au final, nous avons sélectionné :

- 4 stimuli dans le groupe de tête : D_1 , en première position, et H_1 , H_2 et K_1 , qui occupent les trois dernières positions.
- 1 stimulus dans le groupe intermédiaire : A_1 , en position intermédiaire.
- 1 stimulus dans le groupe de queue : I_1 , en dernière position.

Pour chaque valeur Δf_i étudiée, les 6 stimuli filtrés modifiés sont formés en utilisant le procédé décrit dans la section 8.1.2. Afin de réaliser un codage optimal tout en conservant les différences relatives de niveau existant entre les 6 stimuli, les valeurs de pression acoustique sont, juste avant encodage dans des fichiers audio au format WAV¹¹, divisées par la valeur maximale détectée sur l’ensemble des 6 sons.

8.3.1.3 Protocole de test, traitement et analyse de données

Le protocole de test utilisé, fondé sur la méthode de comparaison par paires, est identique à celui décrit dans la section 6.1.3. Les 4 séries indépendantes de 15 paires sont évaluées successivement. Au début de chaque série, les 6 sons sont présentés aux auditeurs.

Seuls les jugements de préférence sont traités et analysés. L’analyse comprend l’analyse en clusters des sujets (Cf. section 6.1.4.1) et l’analyse unidimensionnelle (Cf. section 6.1.4.3.b).

8.3.2 Résultats du test d’écoute

Les résultats de l’analyse en clusters des sujets sont présentés dans la section I.3.1.

8.3.2.1 Confrontation des tendances qualitatives relatives aux valeurs de mérite

Dans ce qui suit, les tendances qualitatives approximées dressées à partir de l’évaluation auditive des différents corpus partiels de stimuli filtrés modifiés sont confrontées aux tendances qualitatives originales (Cf. section 6.2.2.3). En fait, pour chaque valeur Δf_i , les approximations cumulées liées à l’usage du pas fréquentiel Δf et à l’usage de la fréquence maximale de calcul f_{max}^* peuvent être dégagées de cette confrontation.

Dans la section I.3.2, est proposée une confrontation des tendances qualitatives approximées dressées à partir de l’évaluation auditive des différents corpus partiels de stimuli filtrés modifiés aux tendances qualitatives approximées dressées à partir de l’évaluation auditive du corpus de stimuli filtrés passe-bas à f_{max}^* (Cf. section 7.2.2.3). Pour chaque valeur Δf_i du pas

¹¹L’encodage est réalisé avec une fréquence d’échantillonnage égale à 44100 Hz et une résolution de 16 bits.

fréquentiel, les approximations dues uniquement à l'usage du pas fréquentiel Δf peuvent être dégagées de cette confrontation.

8.3.2.1.a Classements de préférence

Pour les différentes valeurs Δf_i ($i = 1$ à 4) du pas fréquentiel, la figure 8.5 porte à la comparaison les valeurs de mérite mesurées des stimuli filtrés modifiés et celles des stimuli originaux.

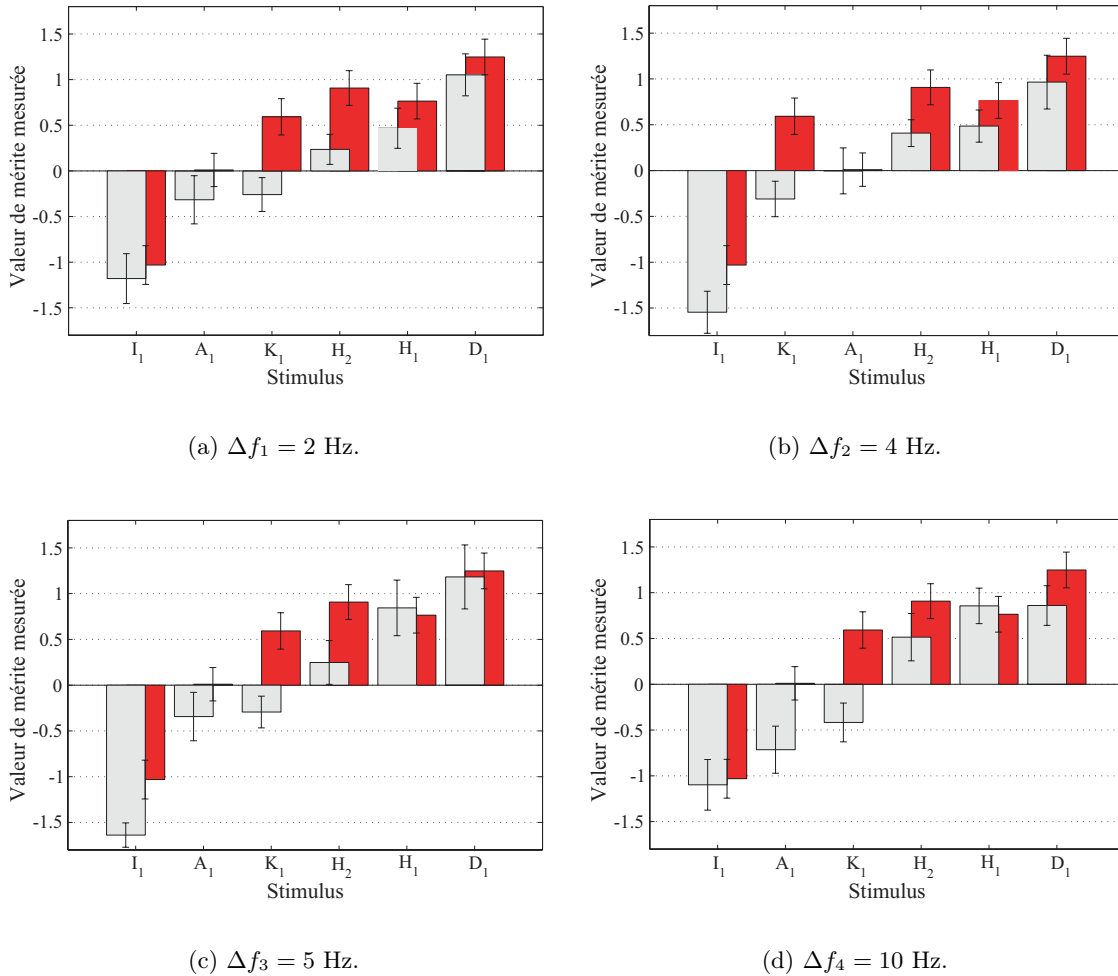


FIG. 8.5 – Confrontation des valeurs de mérite mesurées des stimuli filtrés modifiés aux valeurs de mérite mesurées des stimuli originaux, pour les différentes valeurs Δf_i ($i = 1$ à 4) du pas fréquentiel. En gris : valeurs de mérite mesurées des stimuli filtrés modifiés, en rouge : valeurs de mérite mesurées des stimuli originaux, I : intervalle de confiance à 95%.

Quelque soit la valeur de Δf , on peut remarquer que les valeurs de mérite mesurées des stimuli A_1 et K_1 filtrés modifiés sont équivalentes (à la vue du chevauchement de leurs intervalles de confiance à 95%) alors que les valeurs de mérite mesurées des stimuli A_1 et K_1

originaux étaient significativement distinctes. Notons que cette observation était déjà valable pour les stimuli A_1 et K_1 filtrés passe-bas à f_{max}^* (Cf. figure 7.8).

Par rapport au classement de préférence original, on n'observe pas, au sein des quatre classements approximatifs, d'inversion significative de rang (i.e. avec une absence de chevauchement des intervalles de confiance) entre le stimulus K_1 et les stimuli A_1 et I_1 , qui serait synonyme d'une dislocation du groupe de tête (configurations structurales relatives à la cavité la plus amortie).

8.3.2.1.b *Qualités d'ajustement du modèle de préférence*

La qualité d'ajustement (exprimée en termes de proportion de variance expliquée, i.e. r^2) des modèles de préférence basés sur la sonie de Zwicker, construits pour les différentes valeurs Δf_i étudiées, est donnée dans le tableau 8.1.

Pour $\Delta f_1 = 2$ Hz et $\Delta f_2 = 4$ Hz, la qualité d'ajustement du modèle de préférence est équivalente à celle du modèle original (pour rappel : $r^2 = 0.92$, $p < .001$).

Pour $\Delta f_3 = 5$ Hz et $\Delta f_4 = 10$ Hz, la qualité d'ajustement du modèle de préférence est dégradée par rapport à celle du modèle original.

Δf	Qualité d'ajustement	
	r^2	p
2 Hz	0.90	0.004
4 Hz	0.93	0.002
5 Hz	0.69	0.04
10 Hz	0.63	0.04

TAB. 8.1 – Qualité d'ajustement (exprimée en termes de proportion de variance expliquée, i.e. r^2) des modèles de préférence basés sur la sonie de Zwicker, construits pour les différentes valeurs Δf_i étudiées.

8.3.2.2 *Synthèse*

Nous avons pu noter que i) quelque soit la valeur de Δf , le premier critère de préservation des tendances qualitatives relatives aux valeurs de mérite, i.e. la conservation des configurations structurales avec la cavité la plus amortie en tête du classement de préférence, était respecté, et ii) *a contrario*, pour une valeur de Δf supérieure ou égale à 5 Hz, le second critère de préservation des tendances qualitatives relatives aux valeurs de mérite, i.e. la non-détérioration de la qualité d'ajustement du modèle de préférence basé sur la sonie de Zwicker, n'était plus rempli.

Ainsi, sur la base des résultats de cette série de confrontations, on peut considérer la valeur $\Delta f_2 = 4$ Hz, i.e. la valeur de Δf la plus grossière pour laquelle les tendances qualitatives

approximées reflètent encore les tendances originales (et ce conformément aux deux critères retenus), comme la valeur potentiellement ajustée, notée ci-après Δf_p .

8.4 Appréciation des approximations dues à l’usage d’un pas fréquentiel $\Delta f_p = 4 \text{ Hz}$ via l’évaluation auditive du corpus complet de stimuli

8.4.1 Mise en œuvre du test d’écoute

8.4.1.1 Sujets

Trente-quatre sujets (12 femmes et 22 hommes), âgés de 20 à 65 ans, ont participé au test d’écoute. Ces auditeurs sont des membres du LASH ou des étudiants et personnels de l’ENTPE.

8.4.1.2 Stimuli

De nouveau, on considère un corpus complet de 13 stimuli, i.e. composé des stimuli A_1 à K_1 , A_2 et H_2 . Les 13 stimuli filtrés modifiés sont formés en utilisant le procédé présenté dans la section 8.1.2. Toujours afin de réaliser un codage optimal tout en conservant les différences relatives de niveau existant entre les 13 stimuli, les valeurs de pression acoustique sont divisées par la valeur maximale détectée sur l’ensemble des 13 sons avant encodage dans des fichiers audio au format WAV¹².

8.4.1.3 Protocole de test, traitement et analyse des données

Le corpus des 13 stimuli filtrés modifiés est soumis à l’évaluation auditive par le jury d’auditeurs via le protocole de test fondé sur la méthode de comparaison par paires précédemment utilisé (Cf. section 6.1.3). Les jugements de dissimilarité et de préférence prononcés par les auditeurs sont traités et analysés selon le protocole décrit dans la section 6.1.4.

8.4.2 Résultats du test d’écoute

Dans cette section, les tendances qualitatives approximées relatives aux stimuli filtrés modifiés sont présentées et confrontées aux tendances originales. Comme dans la section 7.2.2, cette confrontation comprend la comparaison entre les espaces perceptifs de dissimilarité (Cf. section 8.4.2.1), entre les espaces perceptifs de préférence (Cf. section 8.4.2.2) et entre les valeurs de mérite (Cf. section 8.4.2.3). L’analyse préliminaire en clusters des sujets est exposée dans la section I.4.1. Par ailleurs, dans les sections I.4.2.1.d, I.4.2.2.b et I.4.2.3.c, il est procédé

¹²L’encodage est réalisé avec une fréquence d’échantillonnage égale à 44100 Hz et une résolution de 16 bits.

à une confrontation entre les tendances qualitatives approximées relatives aux stimuli filtrés modifiés et aux stimuli filtrés passe-bas à f_{max}^* .

8.4.2.1 Espace perceptif de dissimilarité

Les données de dissimilarité ont été échelonnées dans un espace perceptif à deux dimensions; l'évaluation du niveau réel de la mesure et l'étude de la dimensionnalité de l'espace perceptif sont présentées respectivement dans les sections I.4.2.1.a et I.4.2.1.b.

La figure 8.6 porte à la comparaison l'espace approximé (tracé en traits pleins) et l'espace original (tracé en traits pointillés); leur comparaison ne nécessite aucune transformation procrustéenne préalable.

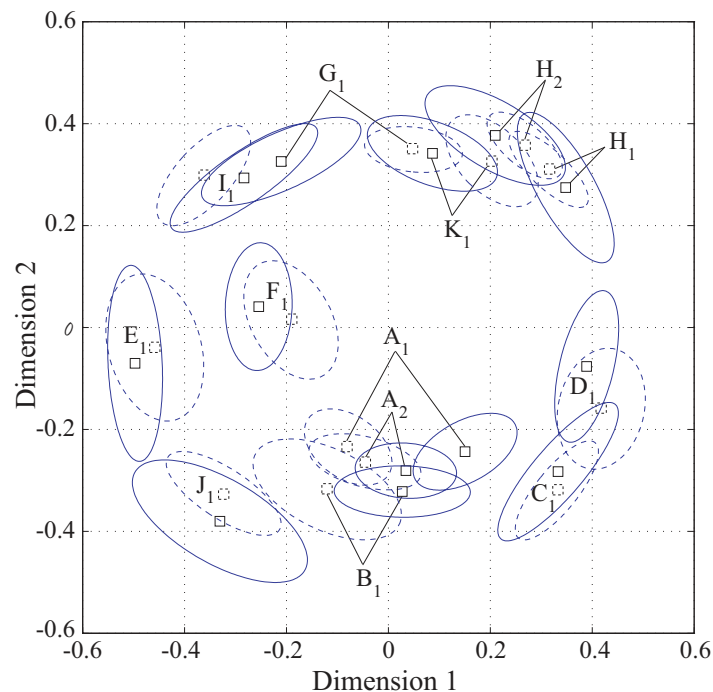


FIG. 8.6 – Espace perceptif de dissimilarité 2D des stimuli, dans leur ellipse de confiance à 95%. En traits pleins : configuration approximée obtenue pour les stimuli filtrés modifiés, en traits pointillés : configuration originale.

À l'instar de l'espace original, les deux dimensions perceptives de l'espace approximé sont reliées respectivement à la sonie ($r = -0.828$, $p = 0.001$ entre les coordonnées le long de la dimension 1 et les valeurs de la sonie de Zwicker) et à la balance spectrale ($r = 0.905$, $p < .001$ entre les coordonnées le long de la dimension 2 et les valeurs du CGS) des stimuli filtrés modifiés. Toutefois, on peut noter que la relation entre la sonie et la dimension 1 est ici moins forte¹³. Les diagrammes des coordonnées des stimuli filtrés modifiés le long des

¹³Pour rappel, pour l'espace original : $r = -0.936$, $p < .001$ entre les coordonnées le long de la dimension 1 et les valeurs de la sonie de Zwicker.

dimensions 1 et 2 de l'espace approximé respectivement exprimées en fonction des valeurs de la sonie de Zwicker et du GCS sont présentés respectivement sur les figures I.26 et I.27. En outre, les proportions de variance expliquées par les dimensions des espaces original et approximé sont proches (23% et 25% pour la dimension 1 respectivement de l'espace original et de l'espace approximé ; 23% et 24% pour la dimension 2 respectivement de l'espace original et de l'espace approximé).

Par ailleurs, l'adéquation entre les deux espaces s'avère globalement satisfaisante ($r = 0.911$, $p < .001$ entre les dimensions 1 des espaces original et approximé ; $r = 0.992$, $p < .001$ les dimensions 2 des espaces original et approximé). Toutefois, on peut noter que les positions approximée et originale des stimuli A_1 et G_1 apparaissent différentes au vu de l'absence de chevauchement de leurs ellipses de confiance à 95 % respectives.

En résumé, de cette confrontation des espaces perceptifs de dissimilarité, il ressort que la modification opérée sur leur enveloppe spectrale, en sus de l'élimination de leur contenu fréquentiel au-delà de 2500 Hz, a eu un effet limité sur la cartographie perceptive par les auditeurs des sons rayonnés par la plaque dans les différentes configurations structurales du système plaque-cavité.

8.4.2.2 Espace perceptif de préférence

Les données de préférence ont été échelonnées dans un espace perceptif à 3 dimensions (Cf. étude de la dimensionnalité présentée dans la section I.4.2.2.a). Les proportions d'inertie expliquées par les facteurs 1 et 2 — les facteurs auxquels il est donné une interprétation — restent relativement proches de celles relevées pour l'espace original (85% et 6% pour l'espace approximé contre 80% et 7% pour l'espace original).

La figure 8.7 porte à la comparaison les plans factoriels 1-2 des espaces approximé et original. La procédure utilisée pour ajuster l'espace approximé à l'espace original est similaire à celle décrite dans la section 7.2.2.2.

L'adéquation entre les configurations de stimuli reste globalement satisfaisante (après ajustement, $r = 0.956$, $p < .001$ entre les coordonnées des stimuli originaux et celles des stimuli filtrés modifiés le long de l'axe 1 ; $r = 0.827$, $p = 0.001$ entre leurs coordonnées respectives le long de l'axe 2). Cependant, on peut observer pour plusieurs stimuli (A_1 , C_1 , H_1 , I_1 et J_1) des écarts assez importants entre leurs positions originale et approximée.

En outre, le faisceau approximé de vecteurs sujets s'écarte, en termes de direction moyenne, légèrement du faisceau original, davantage que ne s'en écartait le faisceau approximé obtenu pour un filtrage passe-bas à f_{max}^* (Cf. figure 7.7). En termes de dispersion, les faisceaux approximé et original restent relativement similaires ; un consensus élevé règne toujours parmi les préférences des sujets.

Aussi, comme pour les stimuli originaux, la sonie et la balance spectrale apparaissent comme les attributs des stimuli filtrés modifiés dont la variation a vraisemblablement guidé les sujets dans l'expression de leur préférence. Toutefois, même si elle reste encore élevée, la

8.4. *Appréciation des approximations dues à l'usage d'un pas fréquentiel $\Delta f_p = 4$ Hz via l'évaluation auditive du corpus complet de stimuli*

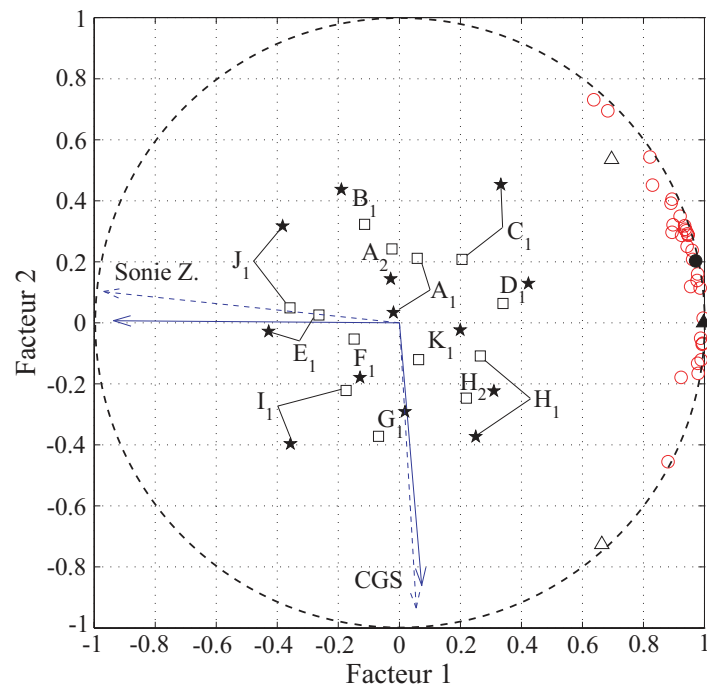


FIG. 8.7 – Plan factoriel 1-2 de l'espace perceptif de préférence. \square : stimuli filtrés modifiés, \circ : extrémités des vecteurs sujets approximés, \bullet : extrémité du vecteur sujet "moyen" approximé, \rightarrow : vecteurs métriques approximés, \star : stimuli originaux, \triangle : extrémités des vecteurs sujets délimitant le faisceau de vecteurs sujets originaux, \blacktriangle : extrémité du vecteur sujet "moyen" original, $--\rightarrow$: vecteurs métriques originaux.

qualité de représentation des vecteurs métriques approximatés associés, i.e. la sonie de Zwicker et le CGS, est légèrement inférieure à celle des vecteurs métriques originaux ($r = 0.941$, $p < .001$ et $r = 0.881$, $p < .001$ pour les vecteurs métriques approximatés contre $r = 0.991$, $p < .001$ et $r = 0.943$, $p < .001$ pour les vecteurs métriques originaux¹⁴). Dans le plan factoriel 1-2, les vecteurs métriques approximatés restent encore proches de leur semblable original respectif.

En bref, à l’image des conclusions précédemment tirées de la confrontation des espaces perceptifs de dissimilarité, il ressort de cette confrontation des espaces perceptifs de préférence que la modification de l’enveloppe spectrale des sons, ajoutée à leur filtrage passe-bas à 2500 Hz, a affecté, de façon mesurée, les auditeurs dans leur évaluation de la préférence.

8.4.2.3 Valeurs de mérite

La figure 8.8 montre les valeurs de mérite mesurées des stimuli filtrés modifiés (en gris), classées par ordre croissant ; l’évaluation de la qualité d’ajustement du modèle de Thurstone (*cas V*) aux données est présentée dans la section I.4.2.3.a. Les valeurs de mérite mesurées des stimuli originaux sont reportées sur la figure 8.8 (en rouge). Les deux séries de valeurs de mérite mesurées sont corrélées ($r = 0.918$, $p < .001$).

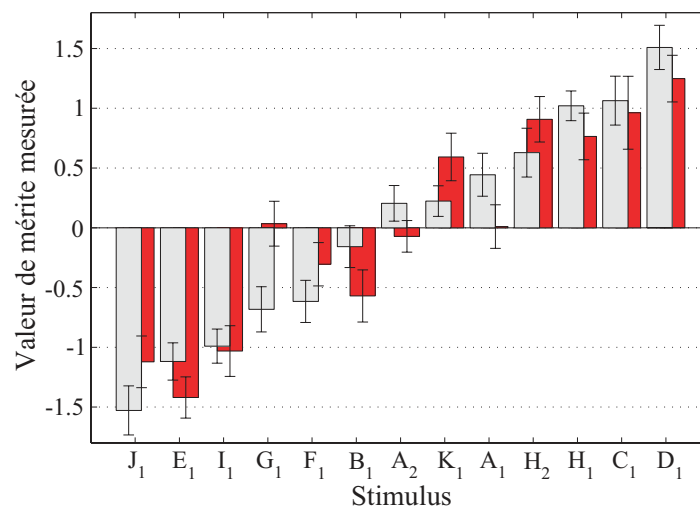


FIG. 8.8 – Confrontation des valeurs de mérite mesurées des stimuli filtrés modifiés aux valeurs de mérite mesurées des stimuli originaux. En gris : valeurs de mérite mesurées des stimuli filtrés modifiés, en rouge : valeurs de mérite mesurées des stimuli originaux, I : intervalle de confiance à 95%.

Au sein du classement approximaté, on peut à nouveau relever une inversion de rang entre les stimuli A_1 et K_1 par rapport au classement original, qui reste cependant non-significative à la vue du chevauchement des intervalles de confiance à 95% calculés sur leurs valeurs de mérite mesurées approximatées respectives. Ainsi, le groupe de tête des configurations structurales

¹⁴Cf. section 6.1.4.3.a pour l’évaluation de la qualité de représentation d’un vecteur métrique projeté avec PREFMAP.

avec la cavité la plus amortie est conservé, i.e. le premier critère de préservation des tendances qualitatives relatives aux valeurs de mérite est rempli.

La figure 8.9 présente les valeurs de mérite des stimuli filtrés modifiés, prédites par le modèle de préférence approximé (en gris). Le diagramme des valeurs de mérite mesurées approximées exprimées en fonction des valeurs de la sonie de Zwicker calculées sur les stimuli filtrés modifiés est présenté sur la figure I.32. Les valeurs de mérite prédites par le modèle original sont reportées sur la figure 8.9 (en rouge). La qualité d'ajustement du modèle de préférence approximé s'avère être inférieure à celle du modèle original ($r^2 = 0.84$, $p < .001$ contre $r^2 = 0.92$, $p < .001$). Cette constatation concorde avec les moindres corrélations précédemment relevées entre les premières dimensions des espaces perceptifs de dissimilarité (Cf. section 8.4.2.1) et de préférence (Cf. section 8.4.2.2) et la sonie de Zwicker. Au final, on ne peut arguer que le second critère de préservation des tendances qualitatives relatives aux valeurs de mérite soit ici pleinement satisfait.

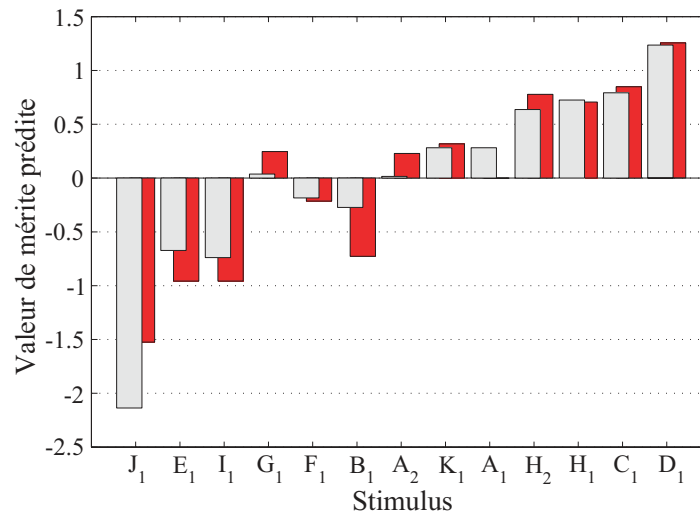


FIG. 8.9 – Confrontation des valeurs de mérite prédites des stimuli filtrés modifiés aux valeurs de mérite prédites des stimuli originaux. En gris : valeurs de mérite prédites des stimuli filtrés modifiés, en rouge : valeurs de mérite prédites des stimuli originaux.

8.5 Conclusions

Au début de ce chapitre, ont été précisés les aspects méthodologiques relatifs à l'ajustement du pas fréquentiel Δf . Un procédé a été avancé pour retoucher l'enveloppe des spectres d'amplitude des sons enregistrés filtrés passe-bas à f_{max}^* (calculés par FFT) de manière à simuler l'enveloppe de spectres d'amplitude calculés jusqu'à une fréquence maximale f_{max}^* et avec un pas fréquentiel Δf . Ce procédé a été calé sur une méthode utilisée pour la synthèse de bruits roses artificiels à partir de spectres d'amplitude calculés. Un processus d'ajustement de Δf avec trois phases successives d'expérimentation perceptive a été proposé afin de

déterminer un pas fréquentiel Δf ajusté pour lequel les tendances qualitatives approximées issues de l'évaluation auditive des stimuli filtrés modifiés restent une bonne approximation des tendances qualitatives originales.

La première phase d'expérimentation perceptive a visé à restreindre un champ large de valeurs de Δf possibles à un panel pertinent de quelques valeurs de Δf où porter la recherche de la valeur ajustée. À cet effet, une expérience de discrimination, fondée sur la méthode du stimulus constant avec paradigme "Identique / Différent", a été réalisée pour chacun des 13 stimuli ; le Point d'Égalité Subjective (P.E.S.) en termes de pas fréquentiel a alors été déterminé graphiquement. À partir de la connaissance des 13 valeurs de P.E.S., nous avons opté pour concentrer la recherche de la valeur ajustée de Δf sur un panel limité à 4 valeurs, de nature à être utilisées sous simulations : $\Delta f_1 = 2$ Hz, $\Delta f_2 = 4$ Hz, $\Delta f_3 = 5$ Hz et $\Delta f_4 = 10$ Hz.

Dans une seconde phase d'expérimentation perceptive, pour chacune des 4 valeurs de Δf du panel précédemment constitué, nous avons cherché à apprécier les approximations correspondantes via l'évaluation auditive d'un corpus partiel de stimuli "représentatifs" (au nombre de 6). Concernant les évaluations auditives, nous avons eu recours au protocole de test fondé sur la méthode de comparaison par paires. Seuls les jugements de préférence ont été traités et analysés ; en outre, seule l'analyse unidimensionnelle suivant le *cas V* de la loi du jugement comparatif de Thurstone a été réalisée. En effet, à ce stade, nous nous sommes bornés à apprécier les approximations induites sur les tendances qualitatives relatives aux valeurs de mérite. Pour la constitution du corpus partiel de stimuli "représentatifs", il a été pris soin d'opérer une sélection de stimuli qui permette de constater, en cas d'approximations trop importantes sur les valeurs de mérite mesurées, la dislocation du groupe de tête des configurations structurales présentant la cavité la plus amortie. Après confrontation des tendances qualitatives approximées dressées à partir de l'évaluation auditive des différents corpus partiels de stimuli filtrés modifiés aux tendances qualitatives originales, la valeur $\Delta f_2 = 4$ Hz s'est révélée comme la valeur de Δf la plus grossière qui permet de préserver les tendances qualitatives originales (conformément aux deux critères déjà utilisés lors de l'ajustement de f_{max}), i.e. comme une valeur de Δf potentiellement ajustée.

La dernière phase d'expérimentation perceptive a visé à statuer quant à l'ajustement d'un pas fréquentiel égal à 4 Hz. À cet effet, il a été procédé à l'évaluation auditive du corpus complet de 13 stimuli filtrés modifiés, en utilisant le protocole de test fondé sur la méthode de comparaison par paires. L'ensemble des réponses au test d'écoute (i.e. jugements de dissimilarité et jugements de préférence) a été traité et analysé. De la confrontation entre les espaces perceptifs de dissimilarité et de préférence respectivement originaux et approximés, il est ressorti que la modification de l'enveloppe spectrale des sons enregistrés due à l'usage d'un pas fréquentiel égal à 4 Hz, ajoutée à leur filtrage passe-bas à 2500 Hz, a davantage affecté les mécanismes de différenciation et d'évaluation de la préférence que ne les avait affectés le seul filtrage passe-bas à 2500 Hz. La sonie et la balance spectrale ont été à nouveau iden-

tifiés comme les attributs saillants des stimuli vraisemblablement utilisés par les auditeurs pour émettre leurs jugements ; toutefois, nous avons pu noter que la relation entre la sonie et la première dimension des espaces perceptifs de dissimilarité et de préférence approximés était moins prononcée. En outre, nous avons pu constater davantage de disparités entre les cartographies des configurations structurales dans les espaces perceptifs de dissimilarité et de préférence respectivement originaux et approximés. De la confrontation des classements de préférence approximé et original, il est ressorti que le premier critère de préservation des tendances qualitatives relatives aux valeurs de mérite, i.e. la conservation du groupe de tête des configurations structurales présentant la cavité la plus amortie, était satisfait. Cependant, le second critère de préservation des tendances qualitatives relatives aux valeurs de mérite, i.e. la conservation de la qualité d'ajustement du modèle de préférence basé sur la sonie de Zwicker, s'est avéré ne pas être vérifié de façon satisfaisante. En ce sens, on ne peut arguer qu'une valeur de Δf égale à 4 Hz soit bien ajustée. On peut alors présumer que la valeur de Δf immédiatement inférieure dans le panel, i.e. 2 Hz, puisse l'être ; le cas échéant, la valeur ajustée de Δf correspondrait ainsi, approximativement, à la plus petite valeur de P.E.S. observée sur l'ensemble des 13 stimuli. Toutefois, pour s'en assurer, il serait nécessaire d'apprécier les approximations dues à l'usage d'un pas fréquentiel égal à 2 Hz via l'évaluation auditive du corpus complet de stimuli filtrés modifiés.

Conclusion générale

Pour le cas académique d'une plaque vibrante couplée à une cavité amortie, ces travaux ont porté sur la problématique d'ajustement des efforts de calcul vibro-acoustique en vue d'une étude de qualité sonore recourant à l'utilisation de sons synthétisés. En effet, cette problématique se pose dès lors que l'on souhaite mener à partir de simulations vibro-acoustiques une étude paramétrique sur le système physique qui prenne en compte les aspects qualitatifs des sons rayonnés ; il est nécessaire de définir les paramètres de simulation plus ou moins finement de telle manière à simultanément i) réduire ces efforts de calcul, et ii) répondre aux contraintes d'ordre perceptif.

Se fondant sur une approche psychoacoustique de la perception auditive, l'ajustement des efforts de calcul a été mené lors de l'évaluation des effets de la variation de paramètres structuraux du système plaque-cavité sur la perception auditive des sons rayonnés à l'intérieur de la cavité ; les paramètres structuraux étudiés étaient les propriétés en absorption de la cavité, l'épaisseur et les conditions de serrage de la plaque. L'évaluation a conduit à désigner les configurations structurales les plus à même d'améliorer la qualité des sons rayonnés. Considérant des sons stationnaires, l'ajustement a porté sur deux paramètres de calcul fréquentiel importants, la fréquence maximale et le pas fréquentiel, dont la définition joue de manière prédominante — outre sur les efforts de calcul vibro-acoustique — sur la perception des sons synthétisés à partir des simulations vibro-acoustiques. L'ajustement a été mené avec la contrainte que l'évaluation auditive de sons synthétisés aboutisse à des recommandations — relatives au design structural du système — analogues à celles qui seraient établies à partir de l'évaluation auditive des sons réels.

Synthèse des résultats

Disposant d'un banc d'essai pour ce système vibro-acoustique, nous avons pu constituer un corpus de sons réels, qui correspondent au son rayonné par la plaque vibrante à l'intérieur de la cavité amortie pour différentes configurations structurales. Ces configurations renvoient à différentes combinaisons des modalités prises par les trois paramètres structuraux étudiés ; elles ont été sélectionnées en s'appuyant sur un plan d'expériences fractionnaire.

Tout d'abord, les résultats d'un test d'écoute préliminaire ont montré que l'influence de

la dispersion de la mesure — inhérente à l'opération de différentes manipulations requises — sur la perception auditive était faible devant celle du paramétrage structural contrôlé.

Puis, nous avons proprement procédé à l'évaluation auditive du corpus de sons réels afin de dresser les tendances qualitatives originales, tenant lieu de référence au sein du processus d'ajustement des deux paramètres fréquentiels. Cette évaluation auditive est fondée sur la méthode de comparaison par paires ; pour chaque paire de stimuli, il a été demandé aux auditeurs de prononcer des jugements de dissimilarité et de préférence. Les jugements de dissimilarité ont été analysés suivant l'E.M.D. INDSICAL afin de dresser un espace perceptif de dissimilarité. Les jugements de préférence ont été analysés suivant l'E.M.D. MDPREF, afin de dresser l'espace perceptif de préférence, et suivant le *cas V* de la loi du jugement comparatif de Thurstone, afin de dresser un classement de préférence des configurations structurales sur la base des valeurs de mérite calculées pour les stimuli associés. À partir de ces analyses, nous avons pu, entre autres :

- i) déterminer les attributs saillants vraisemblablement utilisés par les auditeurs pour différencier les sons et évaluer leur préférence : la sonie et la balance spectrale entre graves et aigus.
- ii) déterminer les configurations structurales préférées par les auditeurs : les configurations structurales présentant de fortes propriétés en absorption de la cavité.
- iii) construire un modèle de préférence — via l'analyse de régression linéaire — basé sur les valeurs de la sonie de Zwicker, suffisant à prédire les valeurs de mérite mesurées.

Ensuite, il a été procédé à l'ajustement de la fréquence maximale de calcul f_{max} . Cette tâche a été réalisée en travaillant à partir des sons réels, afin de s'affranchir d'approximations inhérentes à la modélisation du système plaque-cavité mise en place pour générer des sons synthétisés. Aussi, pour retranscrire la réduction du contenu fréquentiel des sons synthétisés liée à la définition de f_{max} lors de simulations vibro-acoustiques, nous avons eu recours au filtrage passe-bas des sons réels. Dès lors, le processus d'ajustement — itératif — a consisté à rechercher quelle fréquence de coupure de filtre passe-bas pourrait permettre une réduction du contenu fréquentiel des sons tout en préservant les tendances qualitatives originales relatives aux valeurs de mérite. Plusieurs fréquences de coupure ont été testées. Dans les conditions de notre cas d'étude de système plaque-cavité, il est ressorti qu'une fréquence de coupure égale à 2500 Hz était convenable pour obtenir des tendances qualitatives approximées similaires aux originales, car :

- i) les premières places du classement de préférence sont restées inchangées ; notamment, les liens précédemment établis avec le design structural du système plaque-cavité sont respectés.
- ii) la qualité d'ajustement du modèle de préférence basé sur les valeurs de la sonie de Zwicker n'a pas été détériorée.

A posteriori, les autres résultats (espaces perceptifs de dissimilarité et de préférence) se sont révélés être également préservés. On peut donc avancer que la fréquence de coupure retenue remplit les conditions nécessaires à une évaluation auditive correcte des effets des variations structurales considérées. Par la suite, nous avons tenté d'expliquer l'ajustement de f_{max} à 2500 Hz ; plusieurs pistes de réflexion ont été dégagées. Notamment, d'un point de vue physique, nous avons pu relever que f_{max}^* s'apparentait fortement à la borne supérieure du domaine fréquentiel au sein duquel la quasi-totalité de l'énergie acoustique portée par les différents stimuli originaux est présente. D'un point de vue perceptif, nous avons pu en outre noter que f_{max}^* pouvait délimiter un domaine fréquentiel où sont présentes la quasi-totalité des composantes tonales auditivement pertinentes des stimuli originaux.

Enfin, nous avons mené l'ajustement du pas fréquentiel de calcul Δf , en travaillant à partir des sons réels filtrés passe-bas à 2500 Hz. La définition de Δf lors de simulations vibro-acoustiques influe sur l'enveloppe spectrale des sons synthétisés ; aussi, nous avons procédé à une modification de l'enveloppe spectrale des sons réels de façon à simuler l'enveloppe de spectres des sons synthétisés qui seraient calculés avec un pas fréquentiel Δf . Alors, le processus d'ajustement a consisté à déterminer un pas fréquentiel Δf pour lequel les tendances qualitatives approximées relatives aux valeurs de mérite — issues de l'évaluation auditive du corpus des sons réels modifiés — restent analogues aux originales.

Le processus d'ajustement retenu a compté trois phases successives d'expérimentation perceptive.

Une première phase, basée sur des expériences de discrimination visant à déterminer le P.E.S. des stimuli en termes de pas fréquentiel, a abouti à la concentration de la recherche de la valeur ajustée de Δf sur un panel pertinent de 4 valeurs.

Puis, dans une seconde phase d'expérimentation perceptive, pour chacune des 4 valeurs de Δf du panel constitué, nous avons dressé les tendances qualitatives approximées relatives aux valeurs de mérite à partir de l'évaluation auditive d'un corpus partiel de 6 stimuli "représentatifs". Le protocole de test était à nouveau fondé sur la méthode de comparaison par paires. Nous avons pu ainsi apprécier les approximations induites sur les tendances qualitatives originales par l'usage des différentes valeurs de Δf , en sus du filtrage passe-bas à 2500 Hz. Il est ressorti qu'une valeur de Δf égale à 4 Hz permettait de préserver les tendances qualitatives originales (et ce conformément aux deux critères i) et ii) énoncés précédemment pour l'ajustement de f_{max}), cette valeur constituait une valeur de Δf potentiellement ajustée.

Dans une dernière phase d'expérimentation, nous avons tenté de corroborer l'ajustement réalisé précédemment en procédant à l'évaluation auditive du corpus complet de 13 stimuli. La sonie et la balance spectrale sont à nouveau apparus comme les attributs saillants des stimuli vraisemblablement utilisés par les auditeurs pour émettre leurs jugements. Des approximations plus importantes ont été constatées quant à la cartographie des configurations structurales dans les espaces perceptifs de dissimilarité et de préférence. La confrontation des classements

de préférence approximé et original a montré que i) le premier critère de conservation des tendances qualitatives relatives aux valeurs de mérite — la préservation des premières places du classement de préférence — était satisfait, ii) le second critère de conservation des tendances qualitatives relatives aux valeurs de mérite — la préservation de la qualité d’ajustement du modèle de préférence basé sur la sonie de Zwicker — s’est cependant révélé ne pas être vérifié de manière satisfaisante. Aussi, à partir des observations et des critères fixés, nous n’avons pas pu affirmer que la valeur de Δf égale à 4 Hz était ajustée ; un test d’écoute complémentaire serait nécessaire pour s’en assurer.

Perspectives

Comme nous avons déjà pu le mentionner, l’ajustement de la fréquence maximale f_{max} et du pas fréquentiel Δf a été mené en travaillant à partir des sons réels, plutôt qu’à partir de sons synthétisés, et ce en vue de s’affranchir dans un premier temps d’approximations liées à la modélisation du système plaque-cavité. Ces approximations, relatives au contenu fréquentiel des sons synthétisés, seraient entre autres consécutives aux hypothèses de modélisation physique du système (e.g. modèle de plaque, ...). Aussi, afin de corroborer les résultats présentés dans ces travaux, la suite logique consisterait à lancer une évaluation auditive de sons synthétisés à partir de simulations vibro-acoustiques menées avec les valeurs ajustées des deux paramètres fréquenciel de calcul. Pour ce faire, il faudrait tout d’abord compléter les mesures vibratoires réalisées dans ces travaux ; en effet, ces mesures n’ont pas été réalisées pour les configurations J et K . Dès lors, 11 stimuli pourraient être synthétisés à partir de la pression acoustique rayonnée aux deux points de réception intérieurs de la cavité ; cette pression serait calculée en imposant les vitesses vibratoires mesurées correspondantes sur la plaque modélisée. En s’assurant ainsi que les tendances qualitatives approximées dressées sont analogues aux originales, l’ajustement réalisé dans ces travaux serait définitivement validé.

Ensuite, il pourrait être intéressant d’évaluer plus précisément l’influence d’autres paramètres de simulation sur les tendances qualitatives, e.g. la nature du couplage vibro-acoustique entre la plaque et la cavité, le critère de troncature modale, ou encore — pour des simulations FEM — le critère de convergence sur le maillage de la plaque et de la cavité (Cf. annexe A). L’ajustement de ces paramètres permettrait de réduire plus encore les efforts de calcul vibro-acoustiques dans la perspective d’adopter une démarche de qualité sonore dès le stade de conception de la structure.

Bibliographie

- [Aur85] W. Aures. Berechnungsverfahren für den sensorischen wohlklang beliebiger schallsignale. *Acustica*, 59(2) :130–141, 1985. [23](#)
- [Bar88] M. Barron. Subjective study of british symphony concert halls. *Acustica*, 66(1) :1–14, 1988. [45](#)
- [Bar93] M. Barron. *Auditorum acoustics and architectural design*. E & FN SPON, London, England, 1993. [122](#)
- [BC69] M. C. Bhattacharya et M. J. Crocker. Forced vibration of a panel and radiation of sound into a room. *Acustica*, 22 :275–294, 1969. [8](#), [9](#), [10](#)
- [BCDS89] M.-C. Botte, G. Canévet, L. Demany, et C. Sorin. *Psychoacoustique et perception auditive*. Les Éditions INSERM, Paris, France, 1989. [20](#), [21](#), [22](#)
- [BCSF00] S. Buss, N. Chouard, et B. Schulte-Fortkamp. Semantic differential tests show intercultural differences and similarities in perception of car-sounds **[en ligne]**. In *Proc. of DAGA'00*, Oldenburg, Germany, 2000. Disponible sur : <http://physik.uni-oldenburg.de/Docs/aku/literatur/Buss/buss_daga2000.pdf>, consulté le 21.09.2007. [28](#)
- [Ber06] B. Berglund. On a tool for measuring soundscape quality in urban residential areas. *Acta Acustica united with Acustica*, 92(6) :938–944, 2006. [28](#)
- [BHL98] M. Bodden, R. Heinrichs, et A. Linow. Sound quality evaluation of interior vehicle noise using an efficient psychoacoustic method. In *Proc. of the 3rd European Conference on Noise Control - Euronoise'98*, pages 609–614, Munich, Germany, 1998. [29](#), [45](#)
- [BHP94] B. Berglund, K. Harder, et A. Preis. Annoyance perception of sound and information extraction. *Journal of the Acoustical Society of America*, 95(3) :1501–1509, 1994. [27](#)
- [Bis97] R. Bisping. Car interior sound quality : Experimental analysis by synthesis. *Acta Acustica united with Acustica*, 83(5) :813–818, 1997. [28](#), [45](#)
- [BJ97] J. Blauert et U. Jekosch. Sound quality evaluation - A multi-layered problem. *Acta Acustica united with Acustica*, 83(5) :747–753, 1997. [1](#), [39](#)

- [BL86] J. Blauert et W. Lindemann. Auditory spaciousness : Some further psychoacoustic analyses. *Journal of the Acoustical Society of America*, 80(2) :533–542, 1986. [45](#)
- [BL05] D. L. Bowen et R. H. Lyon. Acoustical sensory profiles : A bridge between physical measures and user perceptions of product sound. In *Proc. of Forum Acusticum 2005 [CDROM]*, Budapest, Hungary, 2005. ISBN : 963-8241-68-3. [28](#)
- [Bon86] C. Bonnet. *Manuel pratique de psychophysique*. Armand Colin, Paris, France, 1986. [48](#), [161](#)
- [BRTM02] A. Bardot, V. Roussarie, L. Tsogo, et M.-H. Masson. Pertinence of sensory evaluation of vehicle sounds : Analysis of a multidimensional scaling representation with the classical sensory profiling analysis. In *Proc. of Inter-Noise 2002 [CDROM]*, Dearborn, MI, USA, 2002. [28](#)
- [Car06] J. D. Carroll. *CLASS-L Archives. Procrustes transformations allowed for comparison of two INDSCAL outcomes, of two MDPREF Outcomes [en ligne]*. Disponible sur : <<https://lists.sunysb.edu/index.cgi?A2=ind0611&L=CLASS-L&P=R1322>>, consulté le 27.06.2006. [136](#), [137](#), [139](#)
- [Cat66] R. B. Cattell. The scree test for the number of factors. *Multivariate Behavioral Research*, 1 :245–276, 1966. [108](#)
- [CC70] J. D. Carroll et J. J. Chang. Analysis of individual differences in multidimensional scaling via an n-way generalization of "eckart-young" decomposition. *Psychometrika*, 35(3) :283–319, 1970. [35](#), [36](#)
- [CC01] T. F. Cox et M. A. A. Cox. *Multidimensional scaling*. Chapman & Hall/CRC, Boca Raton, FL, USA, 2001. [36](#), [136](#), [137](#)
- [Che89] L. Cheng. *Étude vibro-acoustique d'une structure couplée à une cavité : Étude des effets de dissipation, recherche de lois de similitude*. PhD thesis, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Villeurbanne, France, Numéro d'ordre 89 ISAL 0042, 1989. [11](#), [14](#), [17](#), [65](#), [67](#)
- [CHMD04] G. Canévet, D. Habault, S. Meunier, et F. Demirdjian. Auditory perception of sounds radiated by a fluid-loaded vibrating plate excited by a transient point force. *Acta Acustica united with Acustica*, 90(1) :181–193, 2004. [27](#), [41](#), [45](#)
- [CI80] E. P. Cox III. The optimal number of response alternatives for a scale : A review. *Journal of Marketing Research*, 17(4) :407–422, 1980. [28](#)
- [CL89a] L. Cheng et C. Lesueur. Influence des amortissements sur la réponse vibro-acoustique : étude théorique d'une plaque excitée acoustiquement et couplée à une cavité. *Journal d'Acoustique*, 2(2) :105–118, 1989. [11](#), [12](#), [13](#), [14](#), [16](#), [17](#)

- [CL89b] L. Cheng et C. Lesueur. Influence des amortissements sur la réponse vibro-acoustique. étude théorique et expérimentale d'une plaque excitée mécaniquement et couplée à une cavité. *Journal d'Acoustique*, 2(4) :347–355, 1989. [11](#), [13](#), [14](#), [16](#), [17](#)
- [Cor04] Cortex Instruments - 01dB Metravib Technologies. *Manuel d'utilisation de dB-Sonic*, 2004. [66](#), [117](#), [142](#), [148](#)
- [Cox82] A. P. M. Coxon. *The user's guide to multidimensional scaling*. Heinemann Educational Books, London, England, 1982. [34](#), [37](#), [101](#), [110](#), [118](#)
- [Cra71] A. Craggs. The transient response of a coupled plate-acoustic system using plate and acoustic finite elements. *Journal of Sound and Vibration*, 15(4) :509–528, 1971. [11](#)
- [Dag06] P. Dagnélie. *Statistique théorique et appliquée. 2. Inférence statistique à une et à deux dimensions*. De Boeck Université, Bruxelles, Belgium, 2006. [XVI](#), [84](#), [85](#), [89](#)
- [Dav88] H. A. David. *The method of paired comparisons*. Oxford University Press, Oxford, England, 1988. [29](#), [31](#), [32](#), [33](#), [34](#), [111](#), [112](#)
- [DGS77] E. H. Dowell, G. F. Gorman, et D. A. Smith. Acoustoelasticity : General theory, acoustic natural modes and forced response to sinusoidal excitation, including comparisons with experiment. *Journal of Sound and Vibration*, 52(4) :519–542, 1977. [8](#), [10](#), [12](#), [15](#), [17](#)
- [DMHC05] F. Demirdjian, S. Meunier, D. Habault, et G. Canévet. A comparative study of recorded and computed sounds radiated by vibrating plates. In *Proc. of Forum Acusticum 2005 [CDROM]*, Budapest, Hungary, 2005. ISBN : 963-8241-68-3. [47](#), [49](#)
- [DTFK94] P. Dickes, J. Tournois, A. Flieller, et J.-L. Kop. *La psychométrie : Théories et méthodes de la mesure en psychologie*. Presses Universitaires de France, Paris, France, 1994. [25](#)
- [DV63] E. H. Dowell et H. M. Voss. The effect of a cavity on panel vibration. *A.I.A.A Journal*, 1(2) :476–477, 1963. [8](#)
- [DW97] P. Daniel et R. Weber. Psychoacoustical roughness : Implementation of an optimized model. *Acta Acustica united with Acustica*, 83(1) :113–123, 1997. [25](#)
- [Edw52] A. L. Edwards. The scaling of stimuli by the method of successive intervals. *Journal of Applied Psychology*, 36 :118–122, 1952. [106](#)
- [EMD04] W. Ellermeier, M. Mader, et P. Daniel. Scaling the unpleasantness of sounds according to the BTL model : Ratio-scale representation and psychoacoustical analysis. *Acta Acustica united with Acustica*, 90(1) :101–107, 2004. [27](#)

- [EP98] B. Escofier et J. Pagès. *Analyses factorielles simples et multiples. Objectifs, méthodes et interprétation*. Dunod, Paris, France, 1998. 37, 118
- [Fau03] J. Faure. *Influence des paramètres d'une plaque rayonnante sur la perception sonore*. PhD thesis, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Villeurbanne, France, Numéro d'ordre 03 ISAL 0087, 2003. XVI, XVIII, 46, 63, 99, 100, 106, 108, 111, 121, 122, 158, 162, 163
- [FMF04] J. Faure et C. Marquis-Favre. Perception of sounds radiated from a vibrating plate : Comparaison of structural parameters influences. In *Proc. of the Joint Congress CFA/DAGA'04 [CDROM]*, Strasbourg, France, 2004. 45
- [FMF05] J. Faure et C. Marquis-Favre. Perceptual assessment of the influence of structural parameters for a radiating plate. *Acta Acustica united with Acustica*, 91(1) :77–90, 2005. 27, 42, 45, 48, 49, 59
- [Fre90] D. J. Freed. Auditory correlates of perceived mallet hardness for a set of recorded percussive sound events. *Journal of Acoustical Society of America*, 87(1) :311–322, 1990. 24
- [GB73] R. W. Guy et M. C. Bhattacharya. The transmission of sound through a cavity-backed finite plate. *Journal of Sound and Vibration*, 27(2) :207–223, 1973. 8, 9, 10
- [GCG97] F. Guyot, M. Castellengo, et B. Gabre. Étude de la catégorisation d'un corpus de bruits domestiques. In D. Dubois, éditeur, *Catégorisation et cognition : De la perception au discours*, chapitre 2, pages 41–58. Éditions Kimé, Paris, France, 1997. 29
- [GHBKL90] A. Gabrielsson, B. Hagerman, T. Bech-Kristensen, et G. Lundberg. Perceived sound quality of reproductions with different frequency responses and sound levels. *Journal of the Acoustical Society of America*, 88(3) :1359–1366, 1990. 28
- [GHPG06] E. Guibert, D. Habault, F. Poisson, et P.-E. Gautier. Psychomécanique d'un système plaque-cavité : Application à une voiture de TGV. In *Proc. of CFA'06 [CDROM]*, Tours, France, 2006. 47, 48, 50, 59
- [Gir04] F. Girardin. Contribution à l'amélioration du confort acoustique d'une salle par la prise en compte des aspects qualitatifs des sons rayonnés par une paroi en basses fréquences. Master's thesis, École Nationale des Travaux Publics de l'État, Vaulx-en-Velin, France, 2004. 45, 59
- [Gor99] A. D. Gordon. *Classification. 2nd Edition*. Chapman & Hall/CRC, Boca Raton, FL, USA, 1999. 104
- [Gus97] R. Guski. Psychological methods for evaluating sound quality and assessing acoustic information. *Acta Acustica united with Acustica*, 83(5) :765–774, 1997. 28

- [Guy79] R. W. Guy. The response of a cavity backed panel to external airborne excitation : A general analysis. *Journal of the Acoustical Society of America*, 65(3) :719–731, 1979. [8](#), [9](#)
- [HGS⁺99] N. Hamzaoui, J. L. Guyader, H. Shiraiwa, A. Chaigne, N. Topalovic, B. Smith, et S. McAdams. Pr evision du bruit rayonn e par les structures en vue d’une évaluation perceptive. Technical Report ENV-D4E-97133, Ministère de l’aménagement du territoire et de l’environnement, Direction de l’évaluation environnementale et des études économiques, 1999. [XVIII](#), [158](#), [160](#)
- [HMCM02] D. Habault, S. Meunier, G. Canévet, et P.-O. Mattei. Psychomechanical study of sounds radiated by fluid-loaded vibrating plates. In *Proc. of Forum Acusticum 2002 [CDROM]*, Sevilla, Spain, 2002. ISBN : 84-87985-06-8. [27](#)
- [Hou03] O. Houix. *Cat gorisation auditive des sources sonores*. PhD thesis, Universit  du Maine, Le Mans, France, 2003. [29](#)
- [How98] D. C. Howell. *Méthodes statistiques en sciences humaines*. Traduit de l’anglais. De Boeck Universit , Paris, France, 1998. [82](#), [83](#), [84](#), [87](#), [88](#)
- [HSA02] T. Hotehama, S. Sato, et Y. Ando. Dissimilarity judgments in relation to temporal and spatial factors for the sound field in an existing hall. *Journal of Sound and Vibration*, 258(3) :429–441, 2002. [27](#)
- [HSP⁺02] N. Hamzaoui, C. Sandier, E. Parizet, P. Wetta, et C. Besseyrias. Subjective assessments of the acoustic radiation from steel structures : Some effects of a few parametric variations. In *Proc. of Forum Acusticum 2002 [CDROM]*, Sevilla, Spain, 2002. ISBN : 84-87985-06-8. [27](#), [42](#), [45](#), [59](#)
- [IM06] M. Ilkowska et A. Miskiewicz. Sharpness versus brightness : A comparison of magnitude estimates. *Acta Acustica united with Acustica*, 92(5) :812–819, 2006. [27](#)
- [Koe05] V. Koehl. *Influence des dispersions de structure sur la perception sonore*. PhD thesis, Institut National des Sciences Appliqu es de Lyon, Villeurbanne, France, Numéro d’ordre 05 ISAL 00102, 2005. [XVI](#), [29](#), [78](#), [79](#), [136](#), [137](#)
- [KP06] V. Koehl et E. Parizet. Influence of structural variability upon sound perception : Usefulness of fractional factorial designs. *Applied Acoustics*, 67(3) :249–270, 2006. [29](#), [77](#)
- [Kru64a] J. B. Kruskal. Multidimensional scaling by optimizing goodness of fit to a non-metric hypothesis. *Psychometrika*, 29(1) :1–27, 1964. [35](#)
- [Kru64b] J. B. Kruskal. Nonmetric multidimensional scaling : A numerical method. *Psychometrika*, 29(2) :115–129, 1964. [35](#)
- [Les88] C. Lesueur. *Rayonnement acoustique des structures : Vibro-acoustique, interactions fluide-structure*.  ditions Eyrolles, Paris, France, 1988. [12](#), [17](#)

- [LS65] R. D. Luce et P. Suppes. Preference, utility, and subjective probability. In R. D. Luce, R. R. Bush, et E. H. Galanter, éditeurs, *Handbook of mathematical psychology*, volume 3, chapitre 19, pages 249–410. Wiley, New York, NY, USA, 1965. [29](#)
- [LSWM03] G. Lemaitre, P. Susini, S. Winsberg, et S. McAdams. Perceptively based design of new car horn sounds **[en ligne]**. In *Proc. of the 2003 International Conference on Auditory Display*, Boston, MA, USA, 2003. Disponible sur : <http://www.icad.org/websiteV2.0/Conferences/ICAD2003/paper/11%20Lemaitre.pdf>, consulté le 16.03.2007. [29](#)
- [LSWM07] G. Lemaitre, P. Susini, S. Winsberg, et S. McAdams. The sound quality of car horns : A psychoacoustical study of timbre. *Acta Acustica united with Acustica*, 93(3) :457–468, 2007. [1](#)
- [Lyo63] R. H. Lyon. Noise reduction of rectangular enclosures with one flexible wall. *Journal of the Acoustical Society of America*, 35(11) :1791–1797, 1963. [8](#)
- [McA94] S. McAdams. Audition : Physiologie, perception et cognition. In M. Richelle, M. Requin, et M. Robert, éditeurs, *Traité de psychologie expérimentale*, chapitre II/3, pages 283–344. Presses Universitaires de France, Paris, France, 1994. [21](#), [22](#)
- [MCR04] S. McAdams, A. Chaigne, et V. Roussarie. The psychomenachics of simulated sound sources : Material properties of impacted bars. *Journal of the Acoustical Society of America*, 115(3) :1306–1320, 2004. [27](#)
- [MFF08] C. Marquis-Favre et J. Faure. Auditory evaluation of sounds radiated from a vibrating plate with various viscoelastic boundary conditions. *Acta Acustica united with Acustica*, 94(3) :419–432, 2008. [42](#), [43](#), [45](#), [46](#), [59](#), [122](#)
- [MFFH05] C. Marquis-Favre, J. Faure, et N. Hamzaoui. Auditory evaluation of sounds generated in a cavity covered with absorbing layers. In *Proc. of the 12th International Congress on Sound and Vibration [CDROM]*, Lisbon, Portugal, 2005. [46](#), [59](#), [122](#)
- [MG96] B. C. J. Moore et B. R. Glasberg. A review of zwicker’s loudness model. *Acta Acustica united with Acustica*, 82(2) :335–345, 1996. [21](#)
- [MHC01] S. Meunier, D. Habault, et G. Canévet. Auditory evaluation of sound signals radiated by a vibrating surface. *Journal of Sound and Vibration*, 247(5) :897–915, 2001. [27](#), [40](#), [45](#), [122](#)
- [Mon97] D. C. Montgomery. *Design and analysis of experiments*. Wiley, New York, NY, USA, 1997. [88](#)
- [Mor39] P. M. Morse. Some aspects of the theory of room acoustics. *Journal of the Acoustical Society of America*, 11(1) :56–66, 1939. [15](#)

- [NC05] J.-P. Nakache et J. Confais. *Approche pragmatique de la classification*. Éditions Technip, Paris, France, 2005. [103](#), [104](#), [105](#)
- [New81] The NewMDSX Project. *The MDS(X) Series of Multidimensional Scaling Programs. User's manual*, 1981. [37](#), [108](#), [109](#)
- [NS81a] S. Narayanan et R. L. Shanbhag. Acoustoelasticity of a damped panel backed by a cavity. *Journal of Sound and Vibration*, 78(4) :453–473, 1981. [11](#), [17](#)
- [NS81b] S. Narayanan et R. L. Shanbhag. Sound transmission through elastically supported sandwich panels into a rectangular enclosure. *Journal of Sound and Vibration*, 77(2) :251–270, 1981. [11](#), [17](#)
- [NWH82] D. J. Nefske, J. A. Jr Wolf, et L. J. Howell. Structural-acoustic finite element analysis of the automobile passenger compartment : A review of current practice. *Journal of Sound and Vibration*, 80(2) :247–266, 1982. [11](#)
- [OAEL01] N. Otto, S. Amman, C. Eaton, et S. Lake. Guidelines for jury evaluations of automotive sounds. *Sound and Vibration*, pages 1–14, April 2001. [33](#), [111](#)
- [OSB99] A. V. Oppenheim, R. W. Schaffer, et J. R. Buck. *Discrete-time signal processing*. Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, USA, 1999. [65](#), [128](#), [131](#), [158](#)
- [Pal02] R. Palm. Utilisation du bootstrap pour les problèmes statistiques liés à l'estimation des paramètres. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, 6(3) :143–153, 2002. [107](#), [108](#), [113](#)
- [PB90a] J. Pan et D. A. Bies. The effect of fluid-structural coupling on sound waves in an enclosure - experimental part. *Journal of the Acoustical Society of America*, 87(2) :708–717, 1990. [10](#)
- [PB90b] J. Pan et D. A. Bies. The effect of fluid-structural coupling on sound waves in an enclosure - theoretical part. *Journal of the Acoustical Society of America*, 87(2) :691–707, 1990. [10](#), [11](#), [12](#), [17](#)
- [PHS05] E. Parizet, N. Hamzaoui, et G. Sabatié. Comparison of some listening test methods : A case study. *Acta Acustica united with Acustica*, 91(2) :356–364, 2005. [29](#), [36](#), [121](#)
- [Pil97] M. Pillet. *Les plans d'expériences par la méthode Taguchi*. Les éditions d'Organisation, Paris, France, 1997. [61](#)
- [Poi04] J. Poitevineau. L'usage des tests statistiques par les chercheurs en psychologie : Aspects normatif, descriptif et prescriptif. *Mathématiques et Sciences humaines*, 167(3) :5–25, 2004. [90](#)
- [Pre65] A. J. Pretlove. Free vibrations of a rectangular panel backed by a closed rectangular cavity. *Journal of Sound and Vibration*, 2(3) :197–209, 1965. [8](#), [9](#)
- [Pre66] A. J. Pretlove. Forced vibrations of a rectangular panel backed by a closed rectangular cavity. *Journal of Sound and Vibration*, 3(3) :252–261, 1966. [8](#)

- [Que01] J. Quehl. *Comfort studies on aircraft interior sound and vibration*. PhD thesis, Universität Oldenburg, Oldenburg, Germany, 2001. 28
- [Rai02] M. Raimbault. *Simulation des ambiances sonores urbaines : Intégration des aspects qualitatifs*. PhD thesis, Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes, Nantes, France, 2002. 28
- [Ram06] J. Ramsay. *Multiscale Manual (Extended Version) [en ligne]*. Disponible sur : <ftp://ego.psych.mcgill.ca/pub/ramsay/multiscl/>, consulté le 02.06.2006. 99
- [Rou99] V. Roussarie. *Analyse perceptive de structures vibrantes simulées par modèle physique*. PhD thesis, Université du Maine, Le Mans, France, 1999. 24, 40, 45, 108
- [Ryu02] M.-S. Ryu. *Application des mobilités énergétiques au couplage fluide-structure*. PhD thesis, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Villeurbanne, France, Numéro d'ordre 02 ISAL 0065, 2002. XVIII, 150, 151
- [Sap90] G. Saporta. *Probabilité, analyse des données et statistique*. Éditions Technip, Paris, France, 1990. 103
- [SB95] G. A. Soulodre et J. S. Bradley. Subjective evaluation of new room acoustic measures. *Journal of the Acoustical Society of America*, 98(1) :294–301, 1995. 45
- [SDVL84] A. Sestieri, D. Del Vescovo, et P. Lucibello. Structural-acoustic coupling in complex shaped cavities. *Journal of Sound and Vibration*, 96(2) :219–233, 1984. 11
- [SGS74] M. R. Schroeder, D. Gottlob, et K. F. Siebrasse. Comparative study of european concert halls : Correlation of subjective preference with geometric and acoustic parameters. *Journal of the Acoustical Society of America*, 56(4) :1195–1201, 1974. 45, 110
- [SMI89] S. Suzuki, S. Maruyama, et H. Ido. Boundary element analysis of cavity noise problems with complicated boundary conditions. *Journal of Sound and Vibration*, 130(1) :79–91, 1989. 11
- [Smi06] S. M. Smith. *How to use INDSCAL : A computer program for canonical decomposition of N-way tables and individual differences in multidimensional scaling [en ligne]*. Disponible sur : <http://marketing.byu.edu/htmlpages/books/pcmds/INDSCAL.html#N_1_>, consulté le 05.04.2006. 106
- [SMW99] P. Susini, S. McAdams, et S. Winsberg. A multidimensional technique for sound quality assessment. *Acta Acustica united with Acustica*, 85(5) :649–654, 1999. 27, 45, 107
- [SMW⁺04] P. Susini, S. McAdams, S. Winsberg, I. Perry, S. Vieillard, et X. Rodet. Characterizing the sound quality of air-conditioning noise. *Applied Acoustics*, 65(8) :763–790, 2004. 121

- [SR62] R. R. Sokal et F. J. Rohlf. The comparison of dendrograms by objective methods. *Taxon*, 11 :33–40, 1962. [104](#)
- [Ste02] M. Steyvers. Multidimensional scaling **[en ligne]**. In *Encyclopedia of cognitive science*. Nature Publishing Group, London, England, 2002. Disponible sur <<http://psiexp.ss.uci.edu/research/papers/MultidimensionalScaling.pdf>>, consulté le 06.08.2007. [107](#)
- [Ste04] S. E. Stemler. A comparison of consensus, consistency, and measurement approaches to estimating interrater reliability **[en ligne]**. *Practical Assessment, Research and Evaluation*, 9(4), 2004. Disponible sur <<http://PAREonline.net/getvn.asp?v=9&n=4>>, consulté le 07.02.2008. [103](#)
- [TD93] J. Tournois et P. Dicks. *Pratique de l'échelonnement multidimensionnel : De l'observation à l'interprétation*. De Boeck-Wesmaël, Bruxelles, Belgium, 1993. [25](#), [26](#), [34](#), [107](#)
- [Thu27a] L. L. Thurstone. A law of comparative judgment. *Psychological Review*, 34 :273–286, 1927. [30](#), [31](#)
- [Thu27b] L. L. Thurstone. The method of paired comparisons for social values. *Journal of Abnormal and Social Psychology*, 21 :385–400, 1927. [27](#), [30](#)
- [TSS82] E. Terhardt, G. Stoll, et M. Seewann. Algorithm for extraction of pitch and pitch salience from complex tonal signals. *Journal of the Acoustical Society of America*, 71(3) :679–688, 1982. [22](#), [24](#), [147](#)
- [Unr80] J. F. Unruh. Finite element subvolume technique for structural-borne interior noise prediction. *Journal of Aircraft*, 17(6) :434–441, 1980. [11](#)
- [VB74] G. Von Bismarck. Sharpness as an attribute of the timbre of steady sounds. *Acustica*, 30(3) :159–172, 1974. [23](#)
- [WCC84] S. L. Weinberg, J. D. Carroll, et H. S. Cohen. Confidence regions for indscal using the jackknife and bootstrap techniques. *Psychometrika*, 49(4) :475–491, 1984. [107](#), [108](#), [136](#)
- [Web99] R. Weber. Interior car sound quality - assessment of acceleration noises. In *Collected Papers / 137. Meeting of the Acoustical Society of America and the 2. Convention of the European Acoustics Association : Forum Acusticum, Integrating the 25. German Acoustics DAGA Conference [CDROM]*, Berlin, Germany, 1999. ISBN : 3-9804568-5-4. [45](#)
- [Wid97] U. Widmann. Three application examples for sound quality design using psychoacoustic tools. *Acta Acustica united with Acustica*, 83 :819–826, 1997. [1](#)
- [WM93] S. L. Weinberg et V. C. Menil. The recovery of structure in linear and ordinal data : INDSCAL versus ALSCAL. *Multivariate Behavioral Research*, 28(2) :215–233, 1993. [36](#), [106](#)

- [ZES04] K. Zimmer, W. Ellermeier, et C. Schmid. Using probabilistic choice models to investigate auditory unpleasantness. *Acta Acustica united with Acustica*, 90(6) :1019–1028, 2004. [27](#)
- [ZF81] E. Zwicker et R. Feldtkeller. *Psychoacoustique - L'oreille récepteur d'information*. Masson, Paris, France, 1981. [21](#)
- [ZF99] E. Zwicker et H. Fastl. *Psychoacoustics, facts and models. Second updated edition*. Springer Verlag, Berlin - Heidelberg, Germany, 1999. [21](#), [22](#), [24](#), [25](#), [117](#), [144](#)
- [ZH01] A. Zeitler et J. Hellbrück. Semantic attributes of environmental sounds and their correlations with psychoacoustic magnitude. In *Proc. of the 17th International Congress on Acoustics [CDROM]*, Rome, Italy, 2001. [28](#)

Références personnelles

A. Trollé, C. Marquis-Favre, et N. Hamzaoui. Auditory evaluation of sounds radiated from a vibrating plate inside a damped cavity. *Acta Acustica united with Acustica*, 95(2) :343-355, 2009.

N. Hamzaoui, A. Trollé et C. Marquis-Favre. Apport de la perception sonore pour l'analyse du rayonnement acoustique à l'intérieur d'une cavité. In *Actes du 3ème Congrès International Conception et Modélisation des Systèmes Mécaniques*, Hammamet, Tunisie, 2009.

A. Trollé et C. Marquis-Favre. An analysis of the effects of structural parameter variations on the auditory perception of environmental noises transmitted through a simulated window. *Applied Acoustics*, 69(12) :1212-1223, 2008.

A. Trollé, N. Hamzaoui, et C. Marquis-Favre. Auditory evaluation of sounds radiated from a vibrating plate inside a damped cavity : adjustment of the computational efforts in frequency. In *Proc. of the 19th International Congress on Acoustics [CDROM]*, Madrid, Spain, 2007, ISBN : 84-87985-12-2.

A. Trollé, C. Marquis-Favre, et N. Hamzaoui. Caractérisation perceptive du bruit à l'intérieur d'une cavité amortie. *3èmes Journées Jeunes Chercheurs en Audition, Acoustique musicale et Signal audio*, Lyon, France, 2006.

A. Trollé, C. Marquis-Favre, et J. Faure. Effects of the window mounting conditions on the auditory perception of transmitted environmental noises. In *Proc. of Forum Acusticum 2005 [CDROM]*, Budapest, Hungary, 2005, ISBN : 963-8241-68-3.

A. Trollé, C. Marquis-Favre, et J. Faure. Influence des conditions de montage d'un vitrage sur la perception de bruits environnementaux transmis. *2ndes Journées Jeunes Chercheurs en Audition, Acoustique musicale et Signal audio*, Marseille, France, 2005.

A. Trollé, C. Marquis-Favre, et J. Faure. Influence des paramètres structuraux d'une plaque en verre sur la perception auditive de divers bruits environnementaux transmis. *Journées annuelles du GDR 2493 Bruit des Transports*, Bron, France, 2005.

THÈSE SOUTENUE DEVANT L'INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES DE LYON

Nom : TROLLÉ	Date de soutenance : le 17 Juillet 2009
Prénoms : Arnaud	
Titre : Évaluation auditive de sons rayonnés par une plaque vibrante à l'intérieur d'une cavité amortie : ajustement des efforts de calcul vibro-acoustique	
Nature : Doctorat	Numéro d'ordre : 09 ISAL
École doctorale : Mécanique, Énergétique, Génie civil et Acoustique	
Spécialité : Acoustique	
Cote B.I.U.-Lyon :	
<p>Résumé : Les travaux traitent de l'ajustement des efforts de calcul vibro-acoustique dans le cadre d'une étude de qualité sonore sur un système vibro-acoustique dès le stade de la conception. Cette recherche d'ajustement est appliquée au système vibro-acoustique constitué d'une plaque vibrante couplée à une cavité amortie. Pour un calcul fréquentiel, un premier pas dans ce sens demande à ajuster deux paramètres de simulation importants : la fréquence maximale de calcul, puis le pas fréquentiel de calcul. En termes de contraintes perceptives, on cherche pour ces paramètres une valeur ajustée permettant de conserver les tendances qualitatives originellement établies à partir d'une évaluation auditive portant sur les sons réels rayonnés par la plaque dans la cavité. Les sons réels sont collectés via l'expérimentation sur un banc d'essai constitué d'une plaque en acier couplée à une cavité parallélépipédique ; ces sons correspondent au son rayonné par la plaque vibrante à l'intérieur de la cavité, enregistré dans diverses configurations structurales du système. Ces configurations impliquent différentes combinaisons des modalités prises par les 3 paramètres structuraux variables retenus : l'épaisseur de la plaque, les conditions de serrage de la plaque et les propriétés en absorption de la cavité. Les sons enregistrés sont ensuite soumis par paires à un jury d'auditeurs auxquels il est demandé d'évaluer leur dissimilarité et de donner un jugement de préférence. À partir de l'analyse des informations recueillies, des tendances qualitatives de référence sont établies, en termes d'espace perceptif de dissimilarité, d'espace perceptif de préférence et de classement de préférence. Dès lors, en travaillant à partir des sons enregistrés, le processus d'ajustement consiste, i) à déterminer, à partir d'un filtrage passe-bas appliqué aux sons, la fréquence de coupure ajustée qui permet de préserver les tendances qualitatives de référence, ii) à rechercher le pas fréquentiel ajusté, à imposer aux spectres des sons avant synthèse, qui permet de maintenir les tendances qualitatives précédemment établies.</p>	
<p>Mots-clés : système plaque-cavité, couplage fluide-structure, rayonnement acoustique, bruit intérieur, absorption acoustique, épaisseur de plaque, conditions aux limites, simulations vibro-acoustiques avec contraintes perceptives, fréquence maximale de calcul, pas fréquentiel de calcul, perception auditive, évaluation auditive, dissimilarité, préférence, espaces perceptifs, valeurs de mérite</p>	
<p>Laboratoires de recherche : Laboratoire Vibrations Acoustique (Institut National des Sciences Appliquées de Lyon) / Département Génie Civil et Bâtiment URA CNRS 1652 (École Nationale des Travaux Publics de L'État)</p>	
<p>Directeurs de Thèse : Catherine MARQUIS-FAVRE et Nacer HAMZAOU</p>	
Président du jury :	Xxxxx XXXXX
Composition du jury :	Xxxxx XXXXX
	Xxxxx XXXXX
	Xxxxx XXXXX
	Nacer HAMZAOU
	Catherine MARQUIS-FAVRE
	Pascale NEPLE
	Directeur de Thèse
	Directrice de Thèse
	Invitée