

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

Annexes

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 HAMZAQUI	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*

Table des matières

A Rapport préliminaire : Modélisation du comportement vibro-acoustique d'un système plaque-cavité. Optimisation et comparaison d'outils de calcul vibro-acoustique.	1
A.1 Généralités sur le problème fluide-structure intérieur	2
A.1.1 Pose du problème	2
A.1.2 Équations du problème	3
A.1.3 Méthodes de résolution	4
A.1.3.1 Méthodes analytiques	4
A.1.3.1.a Méthodes de séparation des variables	4
A.1.3.1.b Méthodes intégrales	5
A.1.3.2 Méthodes semi-analytiques	5
A.1.3.3 Méthodes numériques	5
A.1.3.3.a Méthode des Éléments Finis - Finite Element Method (FEM)	6
A.1.3.3.b Méthode des Éléments de Frontière - Boundary Element Methods (BEM)	9
A.2 Description du système plaque-cavité étudié	12
A.2.1 Configuration du problème	12
A.2.2 Équations régissant la réponse vibro-acoustique du système	12
A.3 Présentation des outils de calcul vibro-acoustique	13
A.3.1 Plaqcav	13
A.3.1.1 Descriptif	13
A.3.1.2 Équations de couplage	13
A.3.1.2.a Problème acoustique	13
A.3.1.2.b Problème structural	15
A.3.1.2.c Couplage vibro-acoustique	16
A.3.1.2.d Prise en compte de l'amortissement intrinsèque aux deux sous-systèmes	17
A.3.1.2.e Prise en compte de la présence d'un matériau absorbant sur une paroi rigide	17

A.3.2	Sysnoise	18
A.3.2.1	Descriptif	18
A.3.2.2	Maillages	18
A.3.2.3	Équations de couplage	19
A.3.2.3.a	Approche FEM-FEM	19
A.3.2.3.b	Approche FEM-BEM indirecte variationnelle	20
A.3.2.3.c	Approche FEM-BEM directe	20
A.3.3	Translp2	21
A.3.3.1	Descriptif	21
A.3.3.2	Maillages	21
A.3.3.3	Équations de couplage	22
A.3.3.3.a	Équations discrétisées du système couplé	22
A.3.3.3.b	Équations généralisées du système couplé	22
A.3.3.3.c	Prise en compte de l'amortissement intrinsèque aux deux sous-systèmes	23
A.3.4	Synthèse des hypothèses et possibilités de calcul	25
A.3.5	Indicateurs vibro-acoustiques	26
A.4	Optimisation des paramètres de simulation	27
A.4.1	Optimisation des critères de convergence	27
A.4.1.1	Remarques préliminaires	27
A.4.1.2	Plaqcav	28
A.4.1.2.a	Configuration de calcul	28
A.4.1.2.b	Résultats	28
A.4.1.2.c	Discussion sur l'influence de la position de la force ponctuelle sur la valeur optimale du critère de tron- cature modale	31
A.4.1.2.d	Synthèse	33
A.4.1.3	Sysnoise	33
A.4.1.3.a	Approche FEM-FEM	33
A.4.1.3.b	Approche FEM-BEM indirecte	35
A.4.1.3.c	Synthèse	35
A.4.1.4	Translp2	40
A.4.1.4.a	Critère de troncature modale	40
A.4.1.4.b	Critère de convergence sur le maillage	40
A.4.1.4.c	Synthèse	43
A.4.2	Optimisation du pas fréquentiel de calcul	46
A.4.2.1	Configuration de calcul	46
A.4.2.2	Résultats	46
A.4.2.3	Synthèse	51

A.4.3	Augmentation de la fréquence maximale de calcul	51
A.4.3.1	Plaqcav	51
A.4.3.1.a	Configuration de calcul	51
A.4.3.1.b	Résultats	52
A.4.3.1.c	Diminution des temps de calcul par une méthode de tri sélectif des termes de couplage	53
A.4.3.1.d	Synthèse	57
A.4.3.2	Translp2	57
A.4.4	Conclusions et perspectives	59
A.5	Comparaison des réponses vibro-acoustiques calculées par les différents outils	60
A.5.1	Définition du cas test	60
A.5.2	Confrontation des résultats	60
A.5.2.1	Fréquences propres des sous-systèmes découplés et du système couplé	60
A.5.2.2	Indicateurs de la réponse vibro-acoustique	60
A.5.3	Discussion	66
A.5.4	Compléments	66
B	Mesure du coefficient d'absorption acoustique en incidence normale	69
B.1	Principe de la mesure	69
B.2	Protocole expérimental	70
B.3	Résultats	71
C	Compléments relatifs à l'analyse des effets de la variation des paramètres structuraux sur la réponse vibro-acoustique du système plaque-cavité	73
C.1	Paramétrages utilisés pour le calcul de la STFFT	73
C.2	Éléments d'analyse modale	75
C.3	Effets de la variation des conditions de serrage de la plaque sur la réponse vibro-acoustique du système plaque-cavité	89
D	Compléments relatifs à l'appréciation des effets de la dispersion de la me- sure sur la perception auditive par l'analyse de variance (ANOVA)	93
D.1	Lexique de terminologie	93
D.2	Compléments relatifs à l'élaboration du schéma d'analyse	101
D.2.1	Espérances mathématiques des carrés moyens	101
D.2.2	Équations de la variance	101
D.2.3	Calcul des seuils de signification observés p	103
D.2.4	Calcul des coefficients ω^2	103

E	Évaluation du niveau réel de la mesure de dissimilarité par l'intermédiaire de la méthode des intervalles successifs	107
E.1	Les bases théoriques : la loi du jugement catégoriel de Thurstone	107
E.2	Application de la méthode des intervalles successifs aux jugements de dissimilarité	108
E.2.1	Construction du continuum subjectif des dissimilarités	108
E.2.2	Définition d'un indicateur du niveau réel de la mesure	110
E.3	Évaluation de la qualité d'ajustement aux données de dissimilarité de la méthode des intervalles successifs	111
F	Compléments sur l'établissement des tendances qualitatives originales relatives à l'influence de la variation de paramètres structuraux d'un système plaque-cavité	113
F.1	Analyse en clusters des sujets	113
F.1.1	Jugements de dissimilarité	113
F.1.2	Jugements de préférence	114
F.2	Établissement des tendances qualitatives	115
F.2.1	Espace perceptif de dissimilarité	115
F.2.1.1	Évaluation du niveau réel de la mesure de dissimilarité	115
F.2.1.2	Détermination de la dimensionnalité	116
F.2.1.3	Analyse psychoacoustique	118
F.2.2	Espace perceptif de préférence	119
F.2.3	Valeurs de mérite	120
F.2.3.1	Qualité d'ajustement des modèles de mesure unidimensionnelle aux données de préférence	120
F.2.3.2	Construction du modèle prédictif de la préférence	121
G	Quelques éléments complémentaires sur l'analyse auditive réalisée sous dB-Sonic	123
G.1	Le spectrogramme auditif	123
G.2	Le diagramme de contours auditifs	124
G.3	Le diagramme <i>Frequency Tracks</i>	124
H	Compléments relatifs à l'ajustement de la fréquence de coupure des sons	127
H.1	Patterns de sonie des sons réels originaux	127
H.2	Résultats complémentaires relatifs à l'analyse des données issues de l'évaluation auditive des stimuli filtrés passe-bas à $f_{max}^* = 2500$ Hz	134
H.2.1	Analyse en clusters des sujets	134
H.2.1.1	Jugements de dissimilarité	134
H.2.1.2	Jugements de préférence	135
H.2.2	Établissement des tendances qualitatives approximées	138

H.2.2.1	Espace perceptif de dissimilarité	138
H.2.2.1.a	Évaluation du niveau réel de la mesure de dissimilarité	138
H.2.2.1.b	Détermination de la dimensionnalité	138
H.2.2.1.c	Analyse psychoacoustique	139
H.2.2.2	Espace perceptif de préférence	140
H.2.2.3	Valeurs de mérite	141
H.2.2.3.a	Qualité d’ajustement du modèle de Thurstone (<i>Cas</i> <i>V</i>) aux données de préférence	141
H.2.2.3.b	Construction du modèle de préférence	141
H.3	Résultats de l’analyse des données issues de l’évaluation auditive des stimuli filtrés passe-bas à $f_{max} = 5000$ Hz	142
H.3.1	Analyse en clusters des sujets	142
H.3.1.1	Jugements de dissimilarité	142
H.3.1.2	Jugements de préférence	143
H.3.2	Établissement des tendances qualitatives approximées	147
H.3.2.1	Espace perceptif de dissimilarité	147
H.3.2.1.a	Évaluation du niveau réel de la mesure de dissimilarité	147
H.3.2.1.b	Détermination de la dimensionnalité	147
H.3.2.1.c	Analyse psychoacoustique	148
H.3.2.1.d	Confrontation des espaces approximé et original	149
H.3.2.2	Espace perceptif de préférence	150
H.3.2.2.a	Détermination de la dimensionnalité	150
H.3.2.2.b	Confrontation des espaces approximé et original	151
H.3.2.3	Valeurs de mérite	152
H.3.2.3.a	Qualité d’ajustement du modèle de Thurstone (<i>Cas</i> <i>V</i>) aux données de préférence	152
H.3.2.3.b	Construction du modèle de préférence	152
H.3.2.3.c	Confrontation des valeurs de mérite approximées et originales	153
H.4	Résultats de l’analyse des données issues de l’évaluation auditive des stimuli filtrés passe-bas à $f_{max} = 1500$ Hz	154
H.4.1	Analyse en clusters des sujets	154
H.4.1.1	Jugements de dissimilarité	154
H.4.1.2	Jugements de préférence	155
H.4.2	Établissement des tendances qualitatives approximées	158
H.4.2.1	Espace perceptif de dissimilarité	158
H.4.2.1.a	Évaluation du niveau réel de la mesure de dissimilarité	158
H.4.2.1.b	Détermination de la dimensionnalité	158
H.4.2.1.c	Analyse psychoacoustique	159

H.4.2.1.d	Confrontation des espaces approximé et original . . .	160
H.4.2.2	Espace perceptif de préférence	161
H.4.2.2.a	Détermination de la dimensionnalité	161
H.4.2.2.b	Confrontation des espaces approximé et original . . .	162
H.4.2.3	Valeurs de mérite	163
H.4.2.3.a	Qualité d'ajustement du modèle de Thurstone (<i>Cas</i> <i>V</i>) aux données de préférence	163
H.4.2.3.b	Construction du modèle de préférence	163
H.4.2.3.c	Confrontation des valeurs de mérite approximées et originales	164
H.5	Compléments relatifs à la recherche d'un lien entre f_{max}^* et les caractéristiques globales des sons originaux	165
H.5.1	lien entre f_{max}^* et la conservation des niveaux de pression acoustique globaux des stimuli originaux ?	165
H.5.2	Lien entre f_{max}^* et la conservation des niveaux de vitesse quadratique moyenne globaux de la plaque ?	167
H.6	Compléments relatifs à la recherche d'un lien entre f_{max}^* et des caractéristiques fréquentielles des sons originaux	170
I	Compléments relatifs à l'ajustement du pas fréquentiel des sons	173
I.1	Compléments relatifs au procédé de formation des stimuli filtrés modifiés	174
I.2	Résultats complémentaires relatifs aux expériences de discrimination	177
I.3	Résultats complémentaires relatifs à l'appréciation des approximations dues à l'usage des différents pas fréquentiels via l'évaluation auditive d'un corpus partiel de stimuli	184
I.3.1	Analyse en clusters des sujets	184
I.3.1.1	Corpus de stimuli filtrés modifiés formés pour $\Delta f_1 = 2$ Hz . . .	184
I.3.1.2	Corpus de stimuli filtrés modifiés formés pour $\Delta f_2 = 4$ Hz . . .	188
I.3.1.3	Corpus de stimuli filtrés modifiés formés pour $\Delta f_3 = 5$ Hz . . .	192
I.3.1.4	Corpus de stimuli filtrés modifiés formés pour $\Delta f_4 = 10$ Hz . .	196
I.3.2	Confrontation des tendances qualitatives relatives aux valeurs de mérite	200
I.4	Résultats complémentaires relatifs à l'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	201
I.4.1	Analyse en clusters des sujets	201
I.4.1.1	Jugements de dissimilarité	201
I.4.1.2	Jugements de préférence	202
I.4.2	Établissement des tendances qualitatives approximées	205
I.4.2.1	Espace perceptif de dissimilarité	205

I.4.2.1.a	Évaluation du niveau réel de la mesure de dissimilarité	205
I.4.2.1.b	Détermination de la dimensionnalité	205
I.4.2.1.c	Analyse psychoacoustique	206
I.4.2.1.d	Confrontation des espaces approximatés	207
I.4.2.2	Espace perceptif de préférence	208
I.4.2.2.a	Détermination de la dimensionnalité	208
I.4.2.2.b	Confrontation des espaces approximatés	209
I.4.2.3	Valeurs de mérite	210
I.4.2.3.a	Qualité d'ajustement du modèle de Thurstone (<i>Cas</i> <i>V</i>) aux données de préférence	210
I.4.2.3.b	Construction du modèle de préférence	210
I.4.2.3.c	Confrontation des valeurs de mérite approximatées . . .	211

Bibliographie

212

Table des figures

A.1	Géométrie du système vibro-acoustique.	2
A.2	Panorama des principales méthodes analytiques.	4
A.3	Les principales approches semi-analytiques.	6
A.4	Panorama non-exhaustif de méthodes numériques.	6
A.5	Les grandes étapes de la méthode des éléments finis.	7
A.6	Les différentes méthodes des éléments de frontière.	9
A.7	Configuration du problème étudié.	12
A.8	Spectres de niveau de vitesse quadratique moyenne de la plaque calculés pour les différentes valeurs de α	29
A.9	Spectres de niveau de pression quadratique moyenne dans la cavité calculés pour les différentes valeurs de α	29
A.10	Spectres de niveau de pression au point intérieur à la cavité M_1 calculés pour les différentes valeurs de α	30
A.11	Temps de calcul CPU relatifs aux différentes valeurs de α testées sous Plaqcav	30
A.12	Spectres de niveau de vitesse quadratique moyenne de la plaque calculés pour les différentes valeurs de α dans le cas d'une excitation mécanique excentrée.	31
A.13	Spectres de niveau de pression quadratique moyenne dans la cavité calculés pour les différentes valeurs de α dans le cas d'une excitation mécanique excentrée.	32
A.14	Spectres de niveau de pression au point intérieur à la cavité M_1 calculés pour les différentes valeurs de α dans le cas d'une excitation mécanique excentrée.	32
A.15	Comparaison des spectres calculés pour les deux valeurs du critère de troncature modale étudiées : 1.2 et 1.5. Les maillages de plaque et de cavité correspondent à un critère de convergence en $\frac{\lambda}{8}$. Approche FEM-FEM sous Sysnoise	34
A.16	Comparaison des spectres calculés pour des maillages de plaque et de cavité correspondant à un critère de convergence respectivement en $\frac{\lambda}{8}$ et en $\frac{\lambda}{6}$. Approche FEM-FEM sous Sysnoise	36
A.17	Comparaison des spectres calculés pour des maillages de plaque et de cavité correspondant à un critère de convergence respectivement en $\frac{\lambda}{8}$ et en $\frac{\lambda}{6}$. Approche FEM-BEM indirecte sous Sysnoise	37

A.18 Temps de calcul CPU relatifs à la variation du critère de troncature modale α sous Sysnoise (méthode FEM-FEM seulement). Les maillages de plaque et de cavité correspondent à un critère de convergence en $\frac{\lambda}{8}$	38
A.19 Temps de calcul CPU relatifs à la variation du critère de convergence sur le maillage de la plaque et de la cavité sous Sysnoise (méthodes FEM-FEM et FEM-BEM Indirecte). Le critère de troncature modale α est pris égal à 1.5.	39
A.20 Comparaison des spectres calculés pour les deux valeurs du critère de troncature modale étudiées : 1.2 et 1.5. Les maillages de plaque et de cavité correspondent à un critère de convergence respectivement en $\frac{\lambda}{6}$ et $\frac{\lambda}{4}$	41
A.21 Comparaison des spectres calculés pour deux maillages différents de la cavité correspondant aux critères de convergence en $\frac{\lambda}{4}$ et $\frac{\lambda}{3}$. Le maillage de la plaque correspond à un critère en $\frac{\lambda}{6}$	42
A.22 Comparaison des spectres calculés pour deux maillages différents de la plaque correspondant aux critères de convergence en $\frac{\lambda}{6}$ et $\frac{\lambda}{4}$. Le maillage de la cavité correspond à un critère en $\frac{\lambda}{4}$	44
A.23 Temps de calcul CPU relatifs aux différents cas étudiés sous Translp2	45
A.24 Spectres de niveau de vitesse quadratique moyenne calculés pour les différentes valeurs de Δf . Zoom sur les basses fréquences [0, 600] Hz.	47
A.25 Spectres de niveau de pression au point intérieur à la cavité M_1 calculés pour les différentes valeurs de Δf . Zoom sur les basses fréquences [0, 600] Hz.	48
A.26 Spectres de niveau de vitesse quadratique moyenne calculés pour les différentes valeurs de Δf . Zoom sur les plus hautes fréquences [600, 2000] Hz.	49
A.27 Spectres de niveau de pression au point intérieur à la cavité M_1 calculés pour les différentes valeurs de Δf . Zoom sur les plus hautes fréquences [600, 2000] Hz.	50
A.28 Temps de calcul CPU en fonction du pas fréquentiel Δf	51
A.29 Spectres des différents indicateurs vibro-acoustiques calculés pour une fréquence maximale de calcul $f_{max} = 5000$ Hz.	52
A.30 Temps de calcul CPU en fonction de la fréquence maximale f_{max}	53
A.31 Comparaison des spectres de niveau de vitesse quadratique moyenne obtenus pour un calcul complet, pour un calcul avec hypothèse de fluide léger et pour un calcul avec tri sélectif des termes de couplage. Zoom sur les basses fréquences [0, 600] Hz.	55
A.32 Comparaison des spectres de niveau de pression au point intérieur à la cavité M_1 obtenus pour un calcul complet, pour un calcul avec hypothèse de fluide léger et pour un calcul avec tri sélectif des termes de couplage. Zoom sur les basses fréquences [0, 600] Hz.	56
A.33 Temps de calcul CPU pour les différents cas testés avec Plaqcav	58
A.34 Spectres de niveau de vitesse quadratique moyenne de la plaque calculés pour les différentes approches.	64

A.35 Spectres de niveau de pression au point intérieur M_1 calculés pour les différentes approches.	65
A.36 Spectres de niveau de vitesse quadratique moyenne de la plaque calculés pour les différentes approches.	67
A.37 Spectres de niveau de pression au point intérieur M_1 calculés pour les différentes approches.	67
B.1 Schéma illustratif du principe de mesure de $\alpha_{\theta=0^\circ}$ au tube d'impédance.	69
B.2 Tube d'impédance de diamètre 46 mm de l'ENTPE.	71
B.3 Courbes d'évolution du coefficient d'absorption acoustique $\alpha_{\theta=0^\circ}$ en fonction de la fréquence (en tiers d'octave).	72
C.1 Spectre de niveau de pression mesuré au point M_2 pour le stimulus K_1 ($[0, 20000]$ Hz).	74
C.2 Spectres de niveau de vitesse quadratique moyenne de la plaque mesurés pour les différentes modalités des conditions de serrage de la plaque, pour une épaisseur de plaque égale à 3 mm. — : $C = 20$ N.m (configuration G), - - : $C = 50$ N.m (configuration H), — - : $C = 80$ N.m (configuration I).	89
C.3 Spectres de niveau de vitesse quadratique moyenne de la plaque mesurés pour les différentes modalités des conditions de serrage de la plaque, pour une épaisseur de plaque égale à 1.5 mm. — : $C = 20$ N.m (configuration A), - - : $C = 50$ N.m (configuration B), — - : $C = 80$ N.m (configuration C).	90
C.4 Spectres de niveau de pression mesurés au point M_2 pour les modalités extrêmes des conditions de serrage de la plaque, pour une épaisseur de plaque égale à 1.5 mm. — : $C = 20$ N.m (stimulus A_1), — - : $C = 80$ N.m (stimulus J_1).	91
F.1 Classification Ascendante Hiérarchique réalisée à partir de la matrice de dissimilarités \mathbf{D}_1	114
F.2 Étude de la dimensionnalité de l'espace perceptif de préférence dressé via MD-PREF à partir des réponses de tous les sujets. On opte pour une dimensionnalité égale à 5.	114
F.3 Proportion cumulée de variance expliquée en fonction du nombre de dimensions.	116
F.4 Espace perceptif de dissimilarité 3D des stimuli, dans leur ellipsoïde de confiance à 95%.	117
F.5 Diagramme des coordonnées des stimuli le long de la dimension 1 de l'espace perceptif de dissimilarité exprimées en fonction des valeurs de la sonie de Zwicker. — : droite de régression.	118
F.6 Diagramme des coordonnées des stimuli le long de la dimension 2 de l'espace perceptif de dissimilarité exprimées en fonction des valeurs du Centre de Gravité Spectral. — : droite de régression.	118

F.7	Détermination de la dimensionnalité de l'espace perceptif de préférence. Une dimensionnalité égale à 4 apparaît appropriée.	119
F.8	Plan factoriel 3-4 de l'espace perceptif de préférence. \square : stimuli, \circ : extrémités des vecteurs sujets, \bullet : extrémité du vecteur sujet "moyen".	119
F.9	Proportions "théoriques" vs proportions "observées".	120
F.10	Diagramme des valeurs de mérite mesurées des stimuli exprimées en fonction des valeurs de la sonie de Zwicker. — : droite de régression.	121
G.1	Exemple d'ASP calculé sous dBsonic.	124
G.2	Exemple de maxigramme calculé sous dBsonic.	125
H.1	Patterns de sonie calculés pour les différents stimuli originaux à l'aide du logiciel dBsonic © Cortex Instruments - 01dB Metravib Technologies.	127
H.1	Patterns de sonie calculés pour les différents stimuli originaux à l'aide du logiciel dBsonic © Cortex Instruments - 01dB Metravib Technologies. (suite)	128
H.1	Patterns de sonie calculés pour les différents stimuli originaux à l'aide du logiciel dBsonic © Cortex Instruments - 01dB Metravib Technologies. (suite)	129
H.1	Patterns de sonie calculés pour les différents stimuli originaux à l'aide du logiciel dBsonic © Cortex Instruments - 01dB Metravib Technologies. (suite)	130
H.1	Patterns de sonie calculés pour les différents stimuli originaux à l'aide du logiciel dBsonic © Cortex Instruments - 01dB Metravib Technologies. (suite)	131
H.1	Patterns de sonie calculés pour les différents stimuli originaux à l'aide du logiciel dBsonic © Cortex Instruments - 01dB Metravib Technologies. (suite)	132
H.1	Patterns de sonie calculés pour les différents stimuli originaux à l'aide du logiciel dBsonic © Cortex Instruments - 01dB Metravib Technologies. (suite et fin)	133
H.2	Résultats de la Classification Ascendante Hiérarchique réalisée à partir de la matrice de dissemblances \mathbf{D}_1 . Ces résultats ne révèlent pas de sujets "outliers" ou de sous-groupes de sujets.	134
H.3	Résultats de la Classification Ascendante Hiérarchique appliquée sur la matrice de dissemblances \mathbf{D}_2	135
H.4	Résultats de la Classification Ascendante Hiérarchique appliquée sur la matrice de dissemblances \mathbf{D}_3	136
H.5	Etude de la dimensionnalité de l'espace perceptif de préférence dressé via MD-PREF à partir des réponses de tous les sujets. On opte pour une dimensionnalité égale à 4.	137

H.6	Bilan des différences inter-individuelles à partir de l'espace perceptif de préférence 4D dressé via MDPREF sur la base des réponses de tous les sujets. \circ : extrémités des vecteurs sujets, \bullet : extrémité du vecteur sujet "moyen". \times : sujets finalement considérés comme des "outliers" après recouplement avec les résultats des deux CAH.	137
H.7	Proportion cumulée de variance expliquée par le modèle INDSCAL en fonction du nombre de dimensions. On opte pour une dimensionnalité de l'espace égale à 2.	138
H.8	Diagramme des coordonnées des stimuli filtrés passe-bas à f_{max}^* le long de la dimension 1 de l'espace perceptif de dissimilarité approximé exprimées en fonction des valeurs du CGS calculées sur ces stimuli. — : droite de régression. . . .	139
H.9	Diagramme des coordonnées des stimuli filtrés passe-bas à f_{max}^* le long de la dimension 2 de l'espace perceptif de dissimilarité approximé exprimées en fonction des valeurs de la sonie de Zwicker calculées sur ces stimuli. — : droite de régression.	139
H.10	Détermination de la dimensionnalité de l'espace perceptif de préférence. Une dimensionnalité égale à 3 apparaît appropriée.	140
H.11	Plan factoriel 2-3 de l'espace perceptif de préférence approximé. \square : stimuli, \circ : extrémités des vecteurs sujets, \bullet : extrémité du vecteur sujet "moyen".	140
H.12	Proportions "théoriques" vs proportions "observées" pour le modèle de Thurstone (<i>cas V</i>). Le coefficient de corrélation r^2 entre les deux séries de proportions est égal à 0.973 ($p < .001$).	141
H.13	Diagramme des valeurs de mérite mesurées des stimuli filtrés passe-bas à f_{max}^* exprimées en fonction des valeurs de la sonie de Zwicker calculées sur ces stimuli. — : droite de régression.	141
H.14	Résultats de la Classification Ascendante Hiérarchique réalisée à partir de la matrice de dissemblances \mathbf{D}_1 . Le sujet n°23 est considéré comme un sujet "oulier", dont les réponses de dissimilarité ne sont pas prises en compte.	142
H.15	Résultats de la Classification Ascendante Hiérarchique appliquée sur la matrice de dissemblances \mathbf{D}_2	143
H.16	Résultats de la Classification Ascendante Hiérarchique appliquée sur la matrice de dissemblances \mathbf{D}_3	144

H.17 Etude de la dimensionnalité de l'espace perceptif de préférence dressé via MD-PREF à partir des réponses de tous les sujets. Sur la figure (a), la droite est sectionnée en deux parties avec deux pentes distinctes (la rupture de pente intervient pour le facteur 8). Dans ce cas particulier, selon la méthode du <i>scree test</i> , la règle est d'ignorer la partie basse de la droite [Cat66]. La dimensionnalité appropriée peut être estimée par le numéro du facteur dont la valeur propre associée se situe à l'extrémité de la partie haute de la droite, i.e. la dimensionnalité appropriée est ici égale à 4.	145
H.18 Bilan des différences inter-individuelles à partir de l'espace perceptif de préférence 4D dressé via MDPREF sur la base des réponses de tous les sujets. \circ : extrémités des vecteurs sujets, \bullet : extrémité du vecteur sujet "moyen". \times : sujets finalement considérés comme des "outliers" après recouplement avec les résultats des deux CAH.	146
H.19 Proportion cumulée de variance expliquée par le modèle INDSCAL en fonction du nombre de dimensions. On opte pour une dimensionnalité de l'espace égale à 2. Les proportions de variance expliquées par les facteurs 1 et 2 sont respectivement égales à 26% et 22%.	147
H.20 Diagramme des coordonnées des stimuli filtrés passe-bas à 5000 Hz le long de la dimension 1 de l'espace perceptif de dissimilarité approximé exprimées en fonction des valeurs du CGS calculées sur ces stimuli. — : droite de régression.	148
H.21 Diagramme des coordonnées des stimuli filtrés passe-bas à 5000 Hz le long de la dimension 2 de l'espace perceptif de dissimilarité approximé exprimées en fonction des valeurs de la sonie de Zwicker calculées sur ces stimuli. — : droite de régression.	148
H.22 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 5000 Hz, en traits pointillés : configuration originale. L'espace approximé a été ajusté à l'espace original en appliquant une rotation à 90° dans le sens des aiguilles d'une montre puis une symétrie horizontale. L'adéquation entre les deux espaces est bonne : $r = 0.981$, $p < .001$ entre la dimension 1 de l'espace approximé et la dimension 2 de l'espace original, $r = 0.990$, $p < .001$ entre la dimension 2 de l'espace approximé et la dimension 1 de l'espace original.	149
H.23 Détermination de la dimensionnalité de l'espace perceptif de préférence. Une dimensionnalité égale à 3 apparaît appropriée. Les proportions d'inertie expliquées par les facteurs 1, 2 et 3 sont respectivement égales à 83%, 7% et 3%.	150

H.24	Plan factoriel 1-2 de l'espace perceptif de préférence. \square : stimuli filtrés passe-bas à 5000 Hz, \circ : extrémités des vecteurs sujets approximatés, \bullet : extrémité du vecteur sujet "moyen" approximaté, \rightarrow : vecteurs métriques approximatés, \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. L'adéquation entre les configurations de stimuli est satisfaisante : après ajustement, $r = 0.988$, $p < .001$ entre les coordonnées des stimuli originaux et filtrés le long de l'axe 1, $r = 0.916$, $p < .001$ entre leurs coordonnées le long de l'axe 2. La qualité de représentation des vecteurs métriques approximatés dans l'espace approximaté est satisfaisante : respectivement $r = 0.984$, $p < .001$ et $r = 0.925$, $p < .001$ pour la sonie de Zwicker et le CGS.	151
H.25	Proportions "théoriques" vs proportions "observées" pour le modèle de Thurstone (<i>cas V</i>). Le coefficient de corrélation r^2 entre les deux séries de proportions est égal à 0.965 ($p < .001$).	152
H.26	Diagramme des valeurs de mérite mesurées des stimuli filtrés passe-bas à 5000 Hz exprimées en fonction des valeurs de la sonie de Zwicker calculées sur ces stimuli. — : droite de régression.	152
H.27	Comparaison des valeurs de mérite mesurées obtenues par les stimuli originaux et filtrés passe-bas à 5000 Hz. En gris : valeurs de mérite mesurées approximatées, en rouge : valeurs de mérite mesurées originales, I : intervalle de confiance à 95%. Les deux séries de valeurs de mérite mesurées sont fortement corrélées : $r = 0.973$, $p < .001$	153
H.28	Comparaison des valeurs de mérite prédites obtenues par les stimuli originaux et filtrés passe-bas à 5000 Hz. En gris : valeurs de mérite prédites approximatées, en rouge : valeurs de mérite prédites originales.	153
H.29	Résultats de la Classification Ascendante Hiérarchique réalisée à partir de la matrice de dissemblances \mathbf{D}_1 . Ces résultats ne révèlent pas de sujets "outliers" ou de sous-groupes de sujets.	154
H.30	Résultats de la Classification Ascendante Hiérarchique appliquée sur la matrice de dissemblances \mathbf{D}_2	155
H.31	Résultats de la Classification Ascendante Hiérarchique appliquée sur la matrice de dissemblances \mathbf{D}_3	156
H.32	Etude de la dimensionnalité de l'espace perceptif de préférence dressé via MD-PREF à partir des réponses de tous les sujets. On opte pour une dimensionnalité égale à 3.	157

H.33 Bilan des différences inter-individuelles à partir de l'espace perceptif de préférence 3D dressé via MDPREF sur la base des réponses de tous les sujets. \circ : extrémités des vecteurs sujets, \bullet : extrémité du vecteur sujet "moyen". \times : sujets finalement considérés comme des "outliers" après recouplement avec les résultats des deux CAH.	157
H.34 Proportion cumulée de variance expliquée par le modèle INDSCAL en fonction du nombre de dimensions. On opte pour une dimensionnalité de l'espace égale à 2. Les proportions de variance expliquées par les facteurs 1 et 2 sont respectivement égales à 31% et 22%.	158
H.35 Diagramme des coordonnées des stimuli filtrés passe-bas à 1500 Hz le long de la dimension 1 de l'espace perceptif de dissimilarité approximé exprimées en fonction des valeurs de la sonie de Zwicker calculées sur ces stimuli. — : droite de régression.	159
H.36 Diagramme des coordonnées des stimuli filtrés passe-bas à 1500 Hz le long de la dimension 2 de l'espace perceptif de dissimilarité approximé exprimées en fonction des valeurs du CGS calculées sur ces stimuli. — : droite de régression.	159
H.37 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 1500 Hz, en traits pointillés : configuration originale. Aucune transformation n'a été nécessaire pour ajuster l'espace approximé à l'espace original. L'adéquation entre les deux espaces est satisfaisante : $r = 0.951$, $p < .001$ entre les dimensions 1, $r = 0.979$, $p < .001$ entre les dimensions 2. Toutefois, les positions approximée et originale des stimuli A_2 et B_1 se révèlent ici être différentes, au vu du non-chevauchement de leurs ellipses de confiance à 95% respectives.	160
H.38 Détermination de la dimensionnalité de l'espace perceptif de préférence. Une dimensionnalité égale à 4 apparaît appropriée. Les proportions d'inertie expliquées par les facteurs 1, 2, 3 et 4 sont respectivement égales à 84%, 6%, 3% et 2%.	161

H.39 Plan factoriel 1-2 de l'espace perceptif de préférence. \square : stimuli filtrés passe-bas à 1500 Hz, \circ : extrémités des vecteurs sujets approximatés, \bullet : extrémité du vecteur sujet "moyen" approximaté, \rightarrow : vecteurs métriques approximatés, \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. L'adéquation entre les configurations de stimuli est satisfaisante : après ajustement, $r = 0.966$, $p < .001$ entre les coordonnées des stimuli originaux et filtrés le long de l'axe 1, $r = 0.939$, $p < .001$ entre leurs coordonnées le long de l'axe 2. La qualité de représentation des vecteurs métriques approximatés dans l'espace approximaté est satisfaisante : respectivement $r = 0.988$, $p < .001$ et $r = 0.984$, $p < .001$ pour la sonie de Zwicker et le CGS. On peut observer que la direction du vecteur approximaté associé à la sonie de Zwicker diffère de celle du vecteur original. Aussi, l'éloignement de ce vecteur de l'axe 1 peut indiquer que la sonie n'est plus assurément l'attribut auditif auquel se rapporte le facteur de consensus. 162

H.40 Proportions "théoriques" vs proportions "observées" pour le modèle de Thurstone (*cas V*). Le coefficient de corrélation r^2 entre les deux séries de proportions est égal à 0.974 ($p < .001$). 163

H.41 Diagramme des valeurs de mérite mesurées des stimuli filtrés passe-bas à 1500 Hz exprimées en fonction des valeurs de la sonie de Zwicker calculées sur ces stimuli. — : droite de régression. 163

H.42 Comparaison des valeurs de mérite mesurées obtenues par les stimuli originaux et filtrés passe-bas à 1500 Hz. En gris : valeurs de mérite mesurées approximatées, en rouge : valeurs de mérite mesurées originales, I : intervalle de confiance à 95%. Les deux séries de valeurs de mérite mesurées sont corrélées : $r = 0.946$, $p < .001$. Néanmoins, les rangs des stimuli A_2 et K_1 dans le classement approximaté (respectivement 5^{ème} et 6^{ème}) sont significativement différents de ceux qu'ils occupaient dans le classement original (respectivement 8^{ème} et 5^{ème}). 164

H.43 Comparaison des valeurs de mérite prédites obtenues par les stimuli originaux et filtrés passe-bas à 1500 Hz. En gris : valeurs de mérite prédites approximatées, en rouge : valeurs de mérite prédites originales. 164

H.44 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} 165

H.44 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} . (*suite et fin*) 166

H.45	Courbes d'évolution du niveau de vitesse quadratique moyenne global L_{vG} en fonction de la fréquence de coupure f_{cp} du spectre de niveau de vitesse quadratique moyenne $L_v(f)$, pour les différentes configurations de plaque.	167
H.45	Courbes d'évolution du niveau de vitesse quadratique moyenne global L_{vG} en fonction de la fréquence de coupure f_{cp} du spectre de niveau de vitesse quadratique moyenne $L_v(f)$, pour les différentes configurations de plaque. (<i>suite</i>) . . .	168
H.45	Courbes d'évolution du niveau de vitesse quadratique moyenne global L_{vG} en fonction de la fréquence de coupure f_{cp} du spectre de niveau de vitesse quadratique moyenne $L_v(f)$, pour les différentes configurations de plaque. (<i>suite et fin</i>)	169
H.46	Diagrammes <i>Frequency Tracks</i> calculés pour différents stimuli originaux.	170
H.46	Diagrammes <i>Frequency Tracks</i> calculés pour différents stimuli originaux. (<i>suite et fin</i>)	171
I.1	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)). On considère R , le taux de "décimation"/"interpolation", égal à 2. L'enveloppe d'un spectre d'amplitude d'un stimulus synthétisé calculé avec un pas fréquentiel $\Delta f = 0.5$ Hz est ainsi simulée.	174
I.1	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)). On considère R , le taux de "décimation"/"interpolation", égal à 2. L'enveloppe d'un spectre d'amplitude d'un stimulus synthétisé calculé avec un pas fréquentiel $\Delta f = 0.5$ Hz est ainsi simulée. (<i>suite</i>)	175
I.1	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)). On considère R , le taux de "décimation"/"interpolation", égal à 2. L'enveloppe d'un spectre d'amplitude d'un stimulus synthétisé calculé avec un pas fréquentiel $\Delta f = 0.5$ Hz est ainsi simulée. (<i>suite et fin</i>)	176
I.2	Détermination graphique du P.E.S pour les différents stimuli. —x— : $p_i(S)$, --x-- : $p_i(D)$	181
I.2	Détermination graphique du P.E.S pour les différents stimuli. —x— : $p_i(S)$, --x-- : $p_i(D)$. (<i>suite</i>)	182
I.2	Détermination graphique du P.E.S pour les différents stimuli. —x— : $p_i(S)$, --x-- : $p_i(D)$. (<i>suite et fin</i>)	183
I.3	Résultats de la Classification Ascendante Hiérarchique appliquée sur la matrice de dissemblances \mathbf{D}_2	184
I.4	Résultats de la Classification Ascendante Hiérarchique appliquée sur la matrice de dissemblances \mathbf{D}_3	185

I.5	Etude de la dimensionnalité de l'espace perceptif de préférence dressé via MD-PREF à partir des réponses de tous les sujets. En dépit du <i>scree test</i> , qui indique une dimensionnalité optimale égale à 3, on opte plutôt pour une dimensionnalité égale à 4, pour laquelle on obtient des qualités de représentation des vecteurs sujets dans l'espace substantiellement plus élevées.	186
I.6	Bilan des différences inter-individuelles à partir de l'espace perceptif de préférence 4D dressé via MDPREF sur la base des réponses de tous les sujets. \circ : extrémités des vecteurs sujets, \bullet : extrémité du vecteur sujet "moyen". \times : sujets finalement non retenus pour l'établissement des tendances qualitatives relatives aux valeurs de mérite, après recouplement avec les résultats des deux CAH.	187
I.7	Résultats de la Classification Ascendante Hiérarchique appliquée sur la matrice de dissemblances \mathbf{D}_2	188
I.8	Résultats de la Classification Ascendante Hiérarchique appliquée sur la matrice de dissemblances \mathbf{D}_3	189
I.9	Etude de la dimensionnalité de l'espace perceptif de préférence dressé via MD-PREF à partir des réponses de tous les sujets. En dépit du <i>scree test</i> , qui indique une dimensionnalité optimale égale à 2, on opte plutôt pour une dimensionnalité égale à 3, pour laquelle on obtient des qualités de représentation des vecteurs sujets dans l'espace substantiellement plus élevées.	190
I.10	Bilan des différences inter-individuelles à partir de l'espace perceptif de préférence 3D dressé via MDPREF sur la base des réponses de tous les sujets. \circ : extrémités des vecteurs sujets, \bullet : extrémité du vecteur sujet "moyen". \times : sujets finalement non retenus pour l'établissement des tendances qualitatives relatives aux valeurs de mérite, après recouplement avec les résultats des deux CAH.	191
I.11	Résultats de la Classification Ascendante Hiérarchique appliquée sur la matrice de dissemblances \mathbf{D}_2	192
I.12	Résultats de la Classification Ascendante Hiérarchique appliquée sur la matrice de dissemblances \mathbf{D}_3	193
I.13	Etude de la dimensionnalité de l'espace perceptif de préférence dressé via MD-PREF à partir des réponses de tous les sujets. La méthode du <i>scree test</i> est difficilement applicable de par l'allure atypique du diagramme des valeurs propres. Néanmoins, on opte pour une dimensionnalité égale à 4, pour laquelle on obtient des qualités de représentation des vecteurs sujets dans l'espace substantiellement plus élevées que pour une dimensionnalité inférieure, e.g. 3.	194
I.14	Bilan des différences inter-individuelles à partir de l'espace perceptif de préférence 4D dressé via MDPREF sur la base des réponses de tous les sujets. \circ : extrémités des vecteurs sujets, \bullet : extrémité du vecteur sujet "moyen". \times : sujets finalement non retenus pour l'établissement des tendances qualitatives relatives aux valeurs de mérite, après recouplement avec les résultats des deux CAH.	195

I.15	Résultats de la Classification Ascendante Hiérarchique appliquée sur la matrice de dissemblances \mathbf{D}_2	196
I.16	Résultats de la Classification Ascendante Hiérarchique appliquée sur la matrice de dissemblances \mathbf{D}_3	197
I.17	Etude de la dimensionnalité de l'espace perceptif de préférence dressé via MD-PREF à partir des réponses de tous les sujets. En dépit du <i>scree test</i> , qui indique une dimensionnalité optimale égale à 3, on opte plutôt pour une dimensionnalité égale à 4, pour laquelle on obtient des qualités de représentation des vecteurs sujets dans l'espace substantiellement plus élevées.	198
I.18	Bilan des différences inter-individuelles à partir de l'espace perceptif de préférence 4D dressé via MDPREF sur la base des réponses de tous les sujets. \circ : extrémités des vecteurs sujets, \bullet : extrémité du vecteur sujet "moyen". \times : sujets finalement non retenus pour l'établissement des tendances qualitatives relatives aux valeurs de mérite, après recoupement avec les résultats des deux CAH.	199
I.19	Confrontation des valeurs de mérite mesurées des stimuli filtrés modifiés aux valeurs de mérite mesurées des stimuli filtrés passe-bas à f_{max}^* , 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 filtrés passe-bas à f_{max}^* , I : intervalle de confiance à 95%.	200
I.20	Résultats de la Classification Ascendante Hiérarchique réalisée à partir de la matrice de dissemblances \mathbf{D}_1 . Le sujet n°23 est considéré comme un sujet "outlier", dont les réponses de dissimilarité ne sont pas prises en compte.	201
I.21	Résultats de la Classification Ascendante Hiérarchique appliquée sur la matrice de dissemblances \mathbf{D}_2	202
I.22	Résultats de la Classification Ascendante Hiérarchique appliquée sur la matrice de dissemblances \mathbf{D}_3	203
I.23	Etude de la dimensionnalité de l'espace perceptif de préférence dressé via MD-PREF à partir des réponses de tous les sujets. On opte pour une dimensionnalité égale à 3.	204
I.24	Bilan des différences inter-individuelles à partir de l'espace perceptif de préférence 3D dressé via MDPREF sur la base des réponses de tous les sujets. \circ : extrémités des vecteurs sujets, \bullet : extrémité du vecteur sujet "moyen". \times : sujets finalement considérés comme des "outliers" après recoupement avec les résultats des deux CAH.	204
I.25	Proportion cumulée de variance expliquée par le modèle INDSCAL en fonction du nombre de dimensions. La dimensionnalité de l'espace est vraisemblablement égale à 2.	205

I.26	Diagramme des coordonnées des stimuli filtrés modifiés le long de la dimension 1 de l'espace perceptif de dissimilarité approximé exprimées en fonction des valeurs de la sonie de Zwicker calculées sur ces stimuli. — : droite de régression.	206
I.27	Diagramme des coordonnées des stimuli filtrés modifiés le long de la dimension 2 de l'espace perceptif de dissimilarité approximé exprimées en fonction des valeurs du CGS calculées sur ces stimuli. — : droite de régression.	206
I.28	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 approximée obtenue pour les stimuli filtrés passe-bas à f_{max}^* . Le premier espace approximé a été ajusté au second en appliquant une rotation à 90° dans le sens des aiguilles d'une montre puis une symétrie horizontale. L'adéquation entre les deux espaces est bonne : $r = 0.943$, $p < .001$ entre la dimension 1 de l'espace approximé des stimuli filtrés modifiés et la dimension 2 de l'espace approximé des stimuli filtrés passe-bas à f_{max}^* ; $r = 0.981$, $p < .001$ entre la dimension 2 de l'espace approximé des stimuli filtrés modifiés et la dimension 1 de l'espace approximé des stimuli filtrés passe-bas à f_{max}^* . Toutefois, les deux positions approximées du stimulus B_1 se révèlent ici être différentes, au vu du non-chevauchement de leurs ellipses de confiance respectives.	207
I.29	Détermination de la dimensionnalité de l'espace perceptif de préférence. Une dimensionnalité égale à 3 apparaît appropriée. Les proportions d'inertie expliquées par les facteurs 1, 2 et 3 sont respectivement égales à 85%, 6% et 2%. . .	208
I.30	Plan factoriel 1-2 de l'espace perceptif de préférence. \square : stimuli filtrés modifiés, \circ : extrémités des vecteurs sujets approximés obtenus pour une modification avec $\Delta f_p = 4$ Hz, \bullet : extrémité du vecteur sujet "moyen" approximé obtenu pour une modification avec $\Delta f_p = 4$ Hz, \rightarrow : vecteurs métriques approximés obtenus pour une modification avec $\Delta f_p = 4$ Hz, \star : stimuli filtrés passe-bas à f_{max}^* , \triangle : extrémités des vecteurs sujets délimitant le faisceau approximé de vecteurs sujets obtenu pour un filtrage passe-bas à f_{max}^* , \blacktriangle : extrémité du vecteur sujet "moyen" approximé obtenu pour un filtrage passe-bas à f_{max}^* , $--\rightarrow$: vecteurs métriques approximés obtenus pour un filtrage passe-bas à f_{max}^* . L'adéquation entre les configurations de stimuli est globalement satisfaisante : après ajustement, $r = 0.962$, $p < .001$ entre les coordonnées des stimuli originaux et filtrés modifiés le long de l'axe 1, $r = 0.944$, $p < .001$ entre leurs coordonnées le long de l'axe 2. Localement, on peut observer pour plusieurs stimuli (notamment E_1 , I_1 et J_1) des écarts entre leurs deux positions approximées.	209
I.31	Proportions "théoriques" vs proportions "observées" pour le modèle de Thurstone (<i>cas V</i>). Le coefficient de corrélation r^2 entre les deux séries de proportions est égal à 0.972 ($p < .001$).	210

I.32	Diagramme des valeurs de mérite mesurées des stimuli filtrés modifiés exprimées en fonction des valeurs de la sonie de Zwicker calculées sur ces stimuli. — : droite de régression.	210
I.33	Comparaison des valeurs de mérite mesurées obtenues par les stimuli filtrés modifiés et par les stimuli filtrés passe-bas à f_{max}^* . En gris : valeurs de mérite mesurées obtenues par les stimuli filtrés modifiés, en rouge : valeurs de mérite mesurées obtenues par les stimuli filtrés passe-bas à f_{max}^* , I : intervalle de confiance à 95%. Les deux séries de valeurs de mérite mesurées sont fortement corrélées : $r = 0.958$, $p < .001$	211
I.34	Comparaison des valeurs de mérite prédites obtenues par les stimuli filtrés modifiés et par les stimuli originaux. En gris : valeurs de mérite prédites obtenues par les stimuli filtrés modifiés, en rouge : valeurs de mérite prédites obtenues par les stimuli filtrés passe-bas à f_{max}^*	211

Liste des tableaux

A.1	Récapitulatif des hypothèses et possibilités de calcul des différents codes.	25
A.2	Plus grands modes de plaque (m, n) et de cavité (q, r, s) pris en compte en fonction de la valeur du critère α	28
A.3	Fréquences propres des sous-systèmes découplés.	61
A.3	Fréquences propres des sous-systèmes découplés. (<i>suite et fin</i>)	62
A.4	Fréquences propres couplées calculées par Sysnoise.	63
C.1	Caractéristiques — indices (m, n) et fréquences propres f_{mn} — des modes couplés d’origine structurale pour les configurations A à I (entre parenthèses, sont rappelées respectivement les modalités des facteurs α , β et γ). Un tiret (-) indique un mode non détecté. Un point d’interrogation (?) indique une incertitude sur la fréquence propre du mode concerné.	75
C.1	Caractéristiques — indices (m, n) et fréquences propres f_{mn} — des modes couplés d’origine structurale pour les configurations A à I (entre parenthèses, sont rappelées respectivement les modalités des facteurs variables α , β et γ). Un tiret (-) indique un mode non détecté. Un point d’interrogation (?) indique une incertitude sur la fréquence propre du mode concerné. (<i>suite et fin</i>)	76
C.2	Fréquences propres théoriques f_{qrs}^{theo} des modes propres de la cavité nue, considérée comme entièrement rigide.	77
C.3	Identification de modes couplés à l’origine de pics de résonance visibles sur les spectres de niveau de pression aux points M_1 et M_2 . Un point d’interrogation (?) indique une incertitude sur l’identité du mode à l’origine du pic de résonance observé.	78
C.3	Identification de modes couplés à l’origine de pics de résonance visibles sur les spectres de niveau de pression aux points M_1 et M_2 . Un point d’interrogation (?) indique une incertitude sur l’identité du mode à l’origine du pic de résonance observé. (<i>suite</i>)	79

C.3	Identification de modes couplés à l'origine de pics de résonance visibles sur les spectres de niveau de pression aux points M_1 et M_2 . Un point d'interrogation (?) indique une incertitude sur l'identité du mode à l'origine du pic de résonance observé. (<i>suite</i>)	80
C.3	Identification de modes couplés à l'origine de pics de résonance visibles sur les spectres de niveau de pression aux points M_1 et M_2 . Un point d'interrogation (?) indique une incertitude sur l'identité du mode à l'origine du pic de résonance observé. (<i>suite</i>)	81
C.3	Identification de modes couplés à l'origine de pics de résonance visibles sur les spectres de niveau de pression aux points M_1 et M_2 . Un point d'interrogation (?) indique une incertitude sur l'identité du mode à l'origine du pic de résonance observé. (<i>suite</i>)	82
C.3	Identification de modes couplés à l'origine de pics de résonance visibles sur les spectres de niveau de pression aux points M_1 et M_2 . Un point d'interrogation (?) indique une incertitude sur l'identité du mode à l'origine du pic de résonance observé. (<i>suite</i>)	83
C.3	Identification de modes couplés à l'origine de pics de résonance visibles sur les spectres de niveau de pression aux points M_1 et M_2 . Un point d'interrogation (?) indique une incertitude sur l'identité du mode à l'origine du pic de résonance observé. (<i>suite</i>)	84
C.3	Identification de modes couplés à l'origine de pics de résonance visibles sur les spectres de niveau de pression aux points M_1 et M_2 . Un point d'interrogation (?) indique une incertitude sur l'identité du mode à l'origine du pic de résonance observé. (<i>suite</i>)	85
C.3	Identification de modes couplés à l'origine de pics de résonance visibles sur les spectres de niveau de pression aux points M_1 et M_2 . Un point d'interrogation (?) indique une incertitude sur l'identité du mode à l'origine du pic de résonance observé. (<i>suite</i>)	86
C.3	Identification de modes couplés à l'origine de pics de résonance visibles sur les spectres de niveau de pression aux points M_1 et M_2 . Un point d'interrogation (?) indique une incertitude sur l'identité du mode à l'origine du pic de résonance observé. (<i>suite</i>)	87
C.3	Identification de modes couplés à l'origine de pics de résonance visibles sur les spectres de niveau de pression aux points M_1 et M_2 . Un point d'interrogation (?) indique une incertitude sur l'identité du mode à l'origine du pic de résonance observé. (<i>suite et fin</i>)	88

D.1	Espérances mathématiques des carrés moyens et nombres de degrés de liberté (ddl) associés aux différentes sources de variabilité considérées dans l'analyse globale.	101
D.2	Espérances mathématiques des carrés moyens et nombres de degrés de liberté associés aux différentes sources de variabilité considérées dans l'analyse des effets simples de la dispersion de la mesure pour chaque configuration structurale.	101
E.1	Tableau des correspondances entre le continuum psychologique construit par la méthode des intervalles successifs et le continuum subjectif "ciblé", découlant de l'hypothèse d'une échelle à catégories du niveau d'intervalles.	110
F.1	Indicateur r_{bornes}^2 du niveau de la mesure et indicateur r_{valid}^2 de la qualité d'ajustement aux données de la méthode des intervalles successifs.	115
H.1	Indicateur r_{bornes}^2 du niveau de la mesure et indicateur r_{valid}^2 de la qualité d'ajustement aux données de la méthode des intervalles successifs. Sur la base des valeurs élevées des deux indicateurs, proches de 1, on peut avancer que les sujets ont relativement bien perçu globalement l'échelle de catégories comme une échelle métrique du niveau d'intervalles.	138
H.2	Indicateur r_{bornes}^2 du niveau de la mesure et indicateur r_{valid}^2 de la qualité d'ajustement aux données de la méthode des intervalles successifs. Sur la base des valeurs élevées des deux indicateurs, proches de 1, on peut avancer que les sujets ont relativement bien perçu globalement l'échelle de catégories comme une échelle métrique du niveau d'intervalles.	147
H.3	Indicateur r_{bornes}^2 du niveau de la mesure et indicateur r_{valid}^2 de la qualité d'ajustement aux données de la méthode des intervalles successifs. Sur la base des valeurs élevées des deux indicateurs, proches de 1, on peut avancer que les sujets ont relativement bien perçu globalement l'échelle de catégories comme une échelle métrique du niveau d'intervalles.	158
I.1	Réponses des sujets aux expériences de discrimination. "1" : son perçu différent du son de référence, "0" : son perçu identique au son de référence, en caractères gras : les réponses incohérentes.	177
I.1	Réponses des sujets aux expériences de discrimination. "1" : son perçu différent du son de référence, "0" : son perçu identique au son de référence, en caractères gras : les réponses incohérentes. (<i>suite</i>)	178
I.1	Réponses des sujets aux expériences de discrimination. "1" : son perçu différent du son de référence, "0" : son perçu identique au son de référence, en caractères gras : les réponses incohérentes. (<i>suite</i>)	179

I.1	Réponses des sujets aux expériences de discrimination. “1” : son perçu différent du son de référence, “0” : son perçu identique au son de référence, en caractères gras : les réponses incohérentes. (<i>suite et fin</i>)	180
I.2	Indicateur r^2_{bornes} du niveau de la mesure et indicateur r^2_{valid} de la qualité d’ajustement aux données de la méthode des intervalles successifs.	205

Annexe A

Rapport préliminaire : Modélisation du comportement vibro-acoustique d'un système plaque-cavité. Optimisation et comparaison d'outils de calcul vibro-acoustique.

Cette annexe constitue un travail préliminaire aux travaux de thèse ; elle vise à procéder à l'ajustement des efforts de calcul d'un point de vue uniquement vibro-acoustique ; cet ajustement est nécessaire lorsque l'on a recours à la modélisation du comportement physique d'un système vibro-acoustique tel que le système plaque-cavité.

Dans cet objectif, nous présenterons dans une première section le problème intérieur qui se pose dans l'étude du comportement vibro-acoustique d'une structure vibrante couplée à un espace clos. Nous rappellerons les équations générales régissant la réponse vibro-acoustique du système et dresserons un panorama des différentes méthodes de résolution de ce type de problème. Ce panorama ne saurait être exhaustif ; nous expliciterons les domaines d'application, hypothèses et déclinaisons de certaines méthodes traditionnelles.

Dans une seconde section, nous définirons le système vibro-acoustique étudié sous simulations, une plaque rectangulaire couplée à une cavité parallélépipédique. Nous décrirons plus précisément ses différentes caractéristiques demeurant inchangées, et spécifierons les équations qui régissent la réponse vibro-acoustique d'un tel système.

*Dans une troisième section, nous présenterons les différents outils de calcul vibro-acoustique utilisés pour simuler la réponse vibro-acoustique du système plaque-cavité : *Plaqcav*, *Translp2* et *Sysnoise* © LMS International. Le premier est un code semi-analytique tandis que les deux derniers sont des outils de calcul numérique. Nous ferons un point sur les hypothèses intrinsèques à leur utilisation et leurs possibilités de calcul ; ce point sera utile pour la confrontation ultérieure des résultats.*

La quatrième section présente l'étude d'optimisation des paramètres de simulation menée pour chacun des outils de calcul. Dans un premier temps, il a été question d'optimiser les

critères de convergence de calcul relatifs à chaque méthode. Puis, une investigation a été menée sur l'influence de paramètres de simulation tels que la fréquence maximale de calcul ou le pas fréquentiel de calcul sur les temps de calcul.

Dans une dernière section, nous comparerons pour un cas test les réponses vibro-acoustiques calculées par les différents codes.

A.1 Généralités sur le problème fluide-structure intérieur

A.1.1 Pose du problème

La figure A.1 présente la géométrie d'un système vibro-acoustique consistant en une structure mécanique vibrante couplée à un espace clos, i.e. une cavité. Aucune hypothèse n'est émise à ce stade sur la forme de la structure et de la cavité.

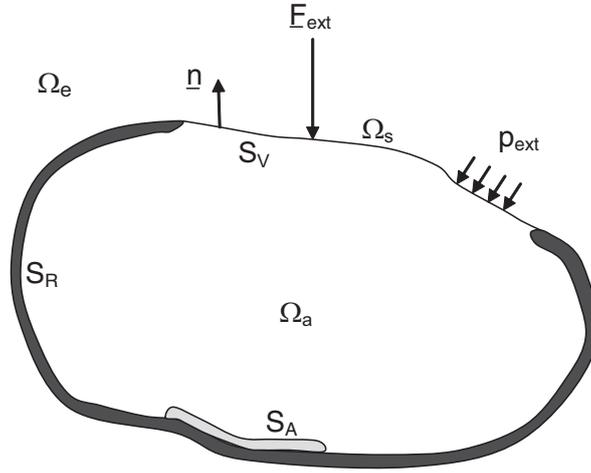


FIG. A.1 – Géométrie du système vibro-acoustique.

avec :

Ω_e : milieu acoustique extérieur,

Ω_a : milieu acoustique intérieur supposé homogène,

Ω_s : structure mécanique, supposée élastique linéaire, de frontière $\partial\Omega_s$,

S_R : surface rigide sans absorbant,

S_A : surface rigide avec absorbant,

S_V : surface vibrante,

$\partial\Omega_a = S_R \cup S_A \cup S_V$: frontière du domaine Ω_a ,

\underline{n} : normale à $\partial\Omega_a$ orientée vers l'extérieur,

\underline{F}_{ext} : excitation ponctuelle appliquée en $M_e \in \partial\Omega_s$,

p_{ext} : excitation répartie sur $\partial\Omega_s$.

A.1.2 Équations du problème

Les équations générales qui régissent la réponse vibro-acoustique du système sont :

– Équations de mouvement des différents milieux :

$$\mathcal{K}\{\underline{u}(M_s, t)\} + \mathcal{M}\left\{\frac{\partial^2}{\partial t^2}\underline{u}(M_s, t)\right\} = \underline{F}(M_s, t) \quad M_s \in \Omega_s \quad (\text{A.1})$$

$$\Delta p(M_a, t) - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} p(M_a, t) = 0 \quad M_a \in \Omega_a \quad (\text{A.2})$$

– Conditions aux limites :

$$\frac{\partial}{\partial n} p(M_a, t) = 0 \quad M_a \in S_R \quad (\text{A.3})$$

$$\frac{\partial}{\partial n} p(M_a, t) = -\frac{\rho_0}{Z(\omega, M_a)} \frac{\partial}{\partial t} p(M_a, t) \quad M_a \in S_A \quad (\text{A.4})$$

$$\frac{\partial}{\partial n} p(M_a, t) = -\rho_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} u_n(M_a, t) \quad M_a \in S_V \quad (\text{A.5})$$

+ Conditions aux limites mécaniques de la structure vibrante Ω_s

où \mathcal{K} est l'opérateur d'élasticité de la structure, \mathcal{M} est l'opérateur de masse de la structure, $\underline{u}(M_s, t)$ est le champ de déplacement de la structure, $p(M_a, t)$ est la pression interne à la cavité, c est la célérité du son dans le milieu intérieur, $Z(\omega, M_a)$ est l'impédance acoustique spécifique normale du matériau absorbant, $u_n(M_a, t)$ est le déplacement vibratoire de la structure suivant la normale \underline{n} ,

et :

$$\underline{F}(M_s, t) = p(M_s, t) \cdot \underline{n} - \underline{F}_{ext}(t) \cdot \delta(M_s - M_e) + p_{ext}(M_s, t) \cdot \underline{n} \quad M_e \in \Omega_e \quad (\text{A.6})$$

L'objectif est de déterminer le champ de déplacement vibratoire de la structure et le champ de pression interne résultant du rayonnement acoustique de la structure dans la cavité.

Il est à noter que le comportement mécanique et acoustique du matériau absorbant de surface S_A est ici caractérisé par son impédance acoustique spécifique normale $Z(\omega, M_a)$, définie comme le rapport entre la pression acoustique $p(M_a, t)$ et la vitesse normale des particules de fluide $v_a(M_a, t)$ à la surface du matériau (modèle d'impédance à réaction localisée). Z est une grandeur complexe, de la forme $R + jX$ (R est la *résistance*, X est la *réactance*), qui dépend de la pulsation ω et du point M_a considéré mais est supposée ici indépendante de l'angle d'incidence des ondes acoustiques. Pour cette modélisation (simple et approximative), la présence du matériau est ainsi traduite au travers de la condition aux limites (A.4) du milieu acoustique Ω_a .

D'autres types de modèles — que nous n'aborderons pas ici —, plus complexes et plus réalistes, existent pour décrire le comportement du matériau absorbant : modèles de fluide équivalent, modèles poroélastiques. Ces derniers impliquent alors d'écrire l'équation de mouvement du matériau absorbant, avec ses conditions aux limites.

A.1.3 Méthodes de résolution

Parmi les méthodes traditionnelles utilisées pour résoudre des problèmes fluide-structure¹, on peut distinguer deux grandes familles : les méthodes analytiques et les méthodes numériques. Par définition, les méthodes analytiques donnent des solutions exactes mais sont seulement applicables à des problèmes relativement simples. *A contrario*, les méthodes numériques, par le biais d'approximations, permettent de traiter une large variété de problèmes complexes (avec une géométrie complexe et/ou des conditions aux limites complexes) [AB94].

A.1.3.1 Méthodes analytiques

La figure A.2 montre un panorama des principales méthodes analytiques utilisées pour traiter du problème fluide-structure.

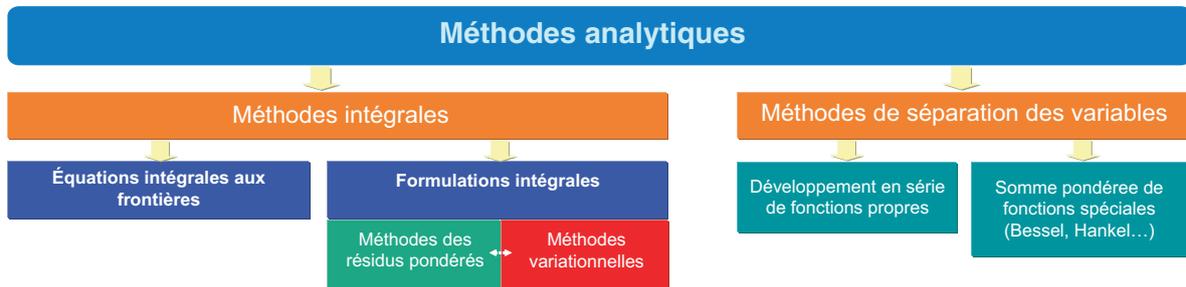


FIG. A.2 – Panorama des principales méthodes analytiques.

A.1.3.1.a Méthodes de séparation des variables

Ces méthodes permettent de résoudre les équations aux dérivées partielles associées à un problème dont la géométrie et les conditions aux limites peuvent se projeter facilement dans un système de coordonnées orthogonal. En général, la solution s'exprime sous la forme d'une série de fonctions propres², ou bien d'une somme pondérée de fonctions spéciales (Bessel, Hankel ...) dont les poids respectifs sont déterminés en utilisant des transformations de type Fourier, Laplace ...

¹La plupart de ces méthodes peuvent traiter à la fois des problèmes intérieurs et extérieurs.

²*Fonction propre* est un terme mathématique, on emploiera plutôt par la suite le terme *de mode propre*, plus approprié au problème vibro-acoustique posé.

A.1.3.1.b Méthodes intégrales

Formulations intégrales Cette famille regroupe tout un ensemble de techniques utilisées pour obtenir une forme intégrale sur le domaine d'étude des équations régissant la réponse du système.

Dans les méthodes de résidus pondérés, une fonctionnelle appelée résidu est construite à partir des équations aux dérivées partielles associées au problème ; le principe consiste ensuite à rechercher la solution qui annule sur le domaine l'intégrale du résidu pondéré par une fonction test. Le choix de la fonction test détermine le type de méthode (Galerkin, collocation, moindres carrés).

Dans la méthode variationnelle, la forme intégrale associée au problème est obtenue en invoquant la stationnarité d'une fonctionnelle énergétique (énoncé variationnel), lorsque celle-ci existe. Une méthode dérivée (Rayleigh-Ritz) consiste à introduire une solution postulée dans la fonctionnelle énergétique et à calculer les coefficients qui rendent la fonctionnelle extrémale.

Généralement, les formulations intégrales peuvent être utilisées pour simplifier le problème car une partie des conditions aux limites (les conditions aux limites dites géométriques) est contenue dans la formulation même [AB94].

Équations intégrales aux frontières Ces méthodes simplifient le problème en exprimant les équations du fluide et ses conditions aux limites en terme d'équations intégrales de surface (2D). Cependant, les applications analytiques restent limitées : l'intégration analytique des expressions obtenues n'est possible que pour un nombre très réduit de problèmes fluide-structure. Aussi, ces méthodes se prêtent plutôt à une approche numérique ; on trouvera plus de précisions sur ces méthodes dans la section A.1.3.3.b.

A.1.3.2 Méthodes semi-analytiques

La recherche d'une solution exacte des équations aux dérivées partielles entraîne des calculs fastidieux. Ainsi, il est courant d'introduire des approximations numériques lors de l'étape de résolution³ : les méthodes analytiques qui recourent à ces approximations sont appelées *méthodes semi-analytiques*. Le type d'approximation utilisé dépend souvent de l'intervalle de fréquences étudié (Cf. figure A.3).

A.1.3.3 Méthodes numériques

La figure A.4 présente un panorama non exhaustif de méthodes numériques. Nous présenterons par la suite plus en détail les deux méthodes les plus répandues : la méthode des éléments finis et la méthode des éléments de frontière.

³A la différence des méthodes numériques où des approximations numériques sont introduites dès l'étape de formulation du problème.

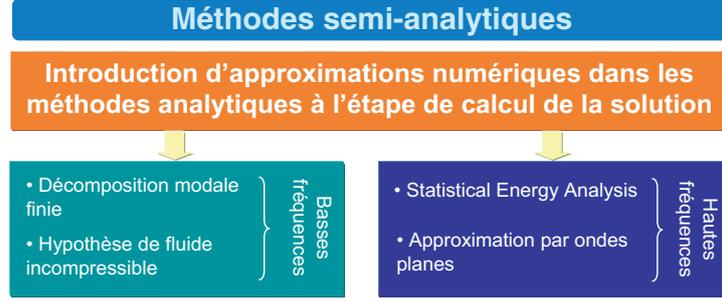


FIG. A.3 – Les principales approches semi-analytiques.

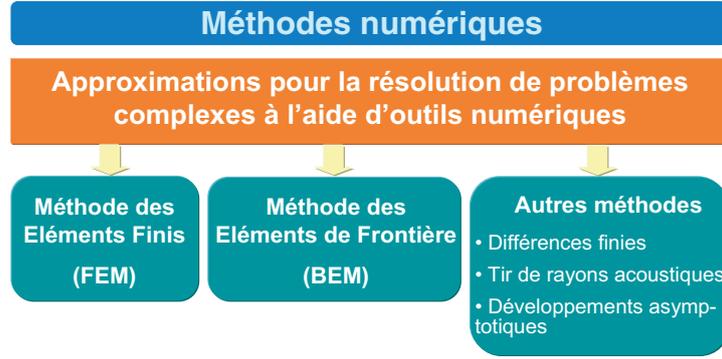


FIG. A.4 – Panorama non-exhaustif de méthodes numériques.

A.1.3.3.a Méthode des Éléments Finis - Finite Element Method (FEM)

La figure A.5 présente schématiquement les différentes étapes de la méthode des éléments finis.

Formulation de base Les méthodes d'éléments finis reposent sur une formulation variationnelle des équations gouvernant le système. Les premières études⁴ [Cra72] utilisent une formulation (\underline{u}, p) , i.e. l'inconnue pour la structure est le champ de déplacement, l'inconnue pour le fluide est le champ de pression acoustique.

En régime harmonique, la forme intégrale faible des équations relatives à la structure soumise aux actions de pression du fluide et à une excitation mécanique ponctuelle de pulsation ω s'écrit [Ata01] :

$$\int_{\Omega_s} \underline{\underline{\sigma}}(\underline{u}) : \underline{\underline{\varepsilon}}(\delta\underline{u}) d\Omega_s - \int_{\Omega_s} \rho_s \omega^2 \underline{u} \cdot \delta\underline{u} d\Omega_s - \int_{S_V} p \underline{n} \cdot \delta\underline{u} dS_V = \int_{\partial\Omega_s} \underline{F}_{ext} \cdot \delta\underline{u} d\Gamma_s \quad (\text{A.7})$$

où $\underline{\underline{\sigma}}$ est le tenseur des contraintes de la structure, $\underline{\underline{\varepsilon}}$ est le tenseur de déformation de la structure et $\delta\underline{u}$ est une variation admissible quelconque de \underline{u} .

⁴G. M. L. Gladwell. A variational formulation of damped acousto-structural vibration problems. *Journal of Sound and Vibration*, 4(2) :172-186, 1966 (cité dans [AB94]).

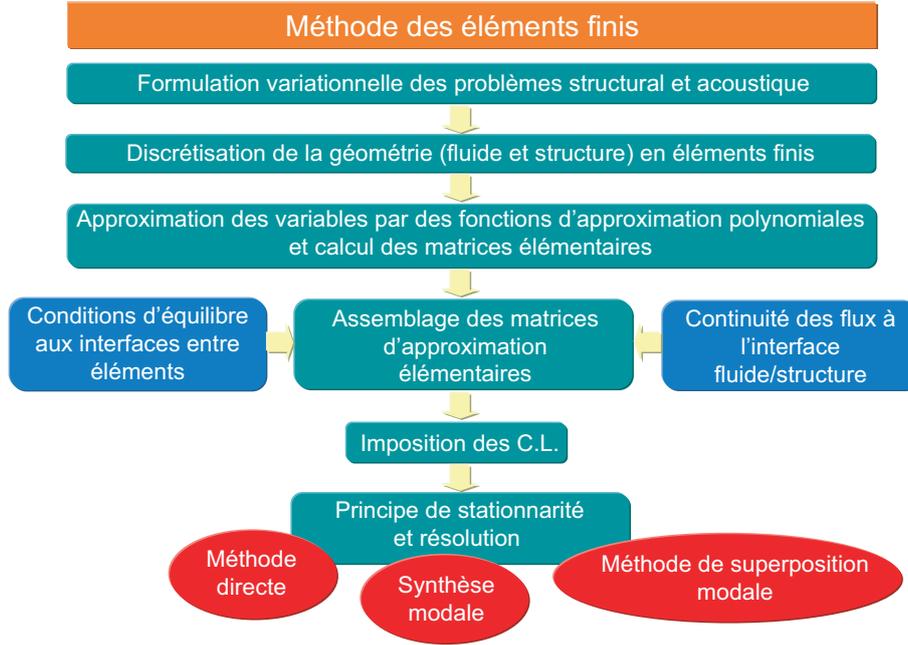


FIG. A.5 – Les grandes étapes de la méthode des éléments finis.

La forme intégrale faible des équations relatives au fluide soumis aux déplacements de la structure s'écrit [Ata01] :

$$\int_{\Omega_a} \frac{1}{\rho_0} (\nabla p \cdot \nabla \delta p) d\Omega_a - \omega^2 \int_{\Omega_a} \frac{1}{\rho_0 c^2} p \cdot \delta p d\Omega_a - \omega^2 \int_{S_V} (\underline{u} \cdot \underline{n}) \delta p dS_V = 0 \quad (\text{A.8})$$

où ∇p est le gradient de p et δp est une variation admissible de p .

D'autres types de formulation existent dans la littérature ; nous en ferons mention dans la suite de l'exposé.

Mise en œuvre numérique La première étape consiste à discrétiser de manière approximative chaque domaine par un ensemble de sous-domaines appelés *éléments finis*. Sur chaque élément, on définit une fonction approchée de la solution exacte ; cette fonction est appelée *fonction d'approximation nodale*.

Ensuite, on procède au calcul de matrices élémentaires. Cette étape consiste à évaluer sur chaque élément l'approximation nodale de la forme intégrale des équations du domaine considéré.

Ces matrices élémentaires sont ensuite assemblées dans une matrice globale. La forme intégrale est ainsi évaluée pour l'ensemble du domaine étudié. L'assemblage doit satisfaire les conditions d'équilibre aux interfaces entre éléments et la continuité des flux à l'interface fluide-structure. Les fonctions d'approximation et les matrices élémentaires obtenues sont indé-

pendantes de la fréquence⁵. Cette caractéristique constitue l'un des avantages de la méthode des éléments finis : pour un calcul de la réponse en fréquence du système, les matrices ne sont pas régénérées à chaque fréquence de calcul. Ces matrices sont des matrices bandes et symétriques ; ces propriétés permettent de réduire significativement les temps de calcul.

Après imposition des conditions aux limites, le principe de stationnarité est ensuite invoqué pour obtenir un système d'équations algébriques.

Méthodes de résolution numérique Le système obtenu peut être résolu directement avec les méthodes classiques d'intégration directe. Cependant, ces méthodes sont assez coûteuses en ressources informatiques car le système complet (avec le nombre maximal de degrés de liberté) est traité.

La résolution peut s'effectuer par la méthode de superposition modale. Le principal avantage de cette méthode réside dans le remplacement du système initial par un système de plus petite taille obtenu en effectuant une troncature de la base modale ; le gain d'espace mémoire et de temps est conséquent. Notons que cette méthode se limite à l'étude de problèmes où seuls les premiers modes du système interviennent dans le comportement dynamique ; ceci nécessite également que le contenu fréquentiel de l'excitation soit limité à ces premiers modes du système. Les solutions modales peuvent être obtenues en résolvant le problème aux valeurs propres associé. Malheureusement, ce système aux valeurs propres est plein et non symétrique ; on doit alors faire appel à des techniques de symétrisation assez coûteuses en temps de calcul. L'utilisation du champ de déplacement du fluide comme inconnue dans la formulation variationnelle⁶ conduit directement à un système symétrique, mais cette approche produit un système d'équations de dimensions importantes. De plus, la nécessité d'imposer la condition d'irrotationnalité du déplacement dans le domaine fluide comme une condition aux limites complique la formulation. Une autre alternative consiste à utiliser le potentiel des vitesses comme inconnue⁷ ; cependant le système obtenu devient à variables complexes. Enfin, dans le cas d'un fluide léger, la résolution du problème aux valeurs propres peut être évitée ; on peut découpler le système d'équations et utiliser les bases modales de la structure *in vacuo* et de la cavité fluide rigide. La méthode consiste alors à projeter le système d'équations sur ces bases modales pour obtenir la réponse du système.

Une autre technique de résolution couramment utilisée en analyse structurale est la synthèse modale ou sous-structuration dynamique⁸. Elle consiste à décomposer la structure en un ensemble de sous-structures. Pour chacune des sous-structures, une étude modale est réalisée ;

⁵Ceci est vrai en l'absence de matériau absorbant sur les parois ou lors de l'utilisation d'un modèle d'impédance indépendant de la fréquence pour décrire le comportement du matériau.

⁶M. A. Hamdi. *Étude des vibrations elasto-acoustiques par une méthode d'éléments finis aux déplacements*. PhD thesis, Université de Technologie de Compiègne, Compiègne, France, 1978 (cité dans [AB94]).

⁷G. C. Everstine. A symmetric potential formulation for fluid-structure interactions. *Journal of Sound and Vibration*, 79(1) :157-160, 1981 (cité dans [AB94]).

⁸R. R. Craig Jr. A review of time-domain and frequency-domain component-mode synthesis methods. *Journal of Modal Analysis*, 2 :59-72, 1987 (cité dans [AB94]).

les modes de ces sous-structures sont ensuite assemblés par continuité afin d’obtenir les modes de la structure globale. Cette technique présente deux avantages majeurs. Le premier est la réduction de la mémoire nécessaire pour traiter des problèmes de grande taille, puisque ce système initial est morcelé en sous-systèmes de plus petite taille ; le second est la réduction du temps de calcul des modes de la structure globale, notamment lorsque les paramètres d’une seule sous-structure changent.

A.1.3.3.b Méthode des Éléments de Frontière - *Boundary Element Methods (BEM)*

Comme nous l’avons déjà mentionné dans la section A.1.3.1.b, ces méthodes permettent de simplifier les problèmes en exprimant les équations du fluide et ses conditions aux limites en termes d’intégrales surfaciques, via l’application du théorème de Green. La principale difficulté réside dans la détermination d’une fonction de Green vérifiant l’équation d’onde et les conditions aux limites. L’utilisation de la solution élémentaire, fonction de Green en champ libre, conduit à la résolution des problèmes acoustiques via deux méthodes : directe et indirecte [AB94] (Cf. figure A.6). La méthode directe découle directement de la formulation intégrale de l’équation d’Helmholtz ; la méthode indirecte découle de la théorie des potentiels de couche appliquée à la résolution des équations intégrales. Pour l’une ou l’autre, une technique de résolution peut être utilisée afin de pallier les difficultés numériques majeures lors de la résolution : la méthode variationnelle.

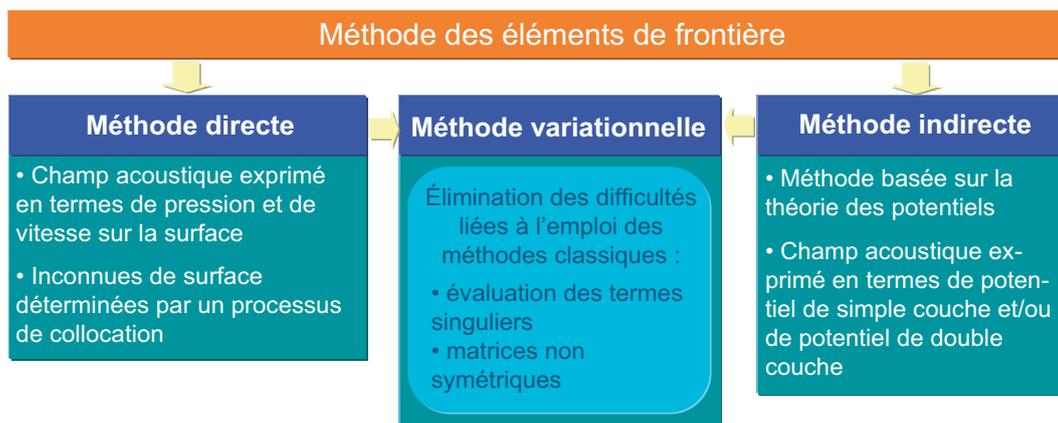


FIG. A.6 – Les différentes méthodes des éléments de frontière.

Le principal avantage de ces méthodes est la réduction de la dimensionnalité du problème (3D à 2D) et donc du nombre de degrés de liberté. Cependant, elles comportent de nombreuses difficultés. Ces difficultés comprennent notamment l’évaluation de termes singuliers et la non-unicité de la solution dans certains cas. De plus, les formulations directes et indirectes produisent des matrices non-symétriques, pleines et dépendantes de la fréquence. La méthode variationnelle produit des matrices symétriques mais l’évaluation numérique de ces matrices

est très onéreuse en temps de calcul. Le principal avantage des méthodes FEM sur les méthodes BEM réside dans la possibilité de calculer pour des problèmes intérieurs les fréquences propres et les déformées modales du fluide. Pour les BEM, une analyse modale classique est impossible à cause de la dépendance fréquentielle des matrices. Néanmoins, des formulations ont été proposées pour déterminer les fréquences propres acoustiques du système.

Abordons maintenant chacune des trois méthodes.

Méthode directe L'équation intégrale d'Helmholtz s'écrit pour un problème intérieur [CS63, Sch68, SSRS85] :

$$C(M) P(M) = \int_{\partial\Omega_a} \left[G(M, Q) \frac{\partial P(Q)}{\partial n_Q} - P(Q) \frac{\partial G(M, Q)}{\partial n_Q} \right] d\Gamma_a \quad (\text{A.9})$$

où $P(M)$ est la pression au point $M \in \Omega_a$ (point de calcul), $P(Q)$ la pression au point $Q \in \partial\Omega_a$ (Q mobile sur $\partial\Omega_a$), \underline{n}_Q la normale rentrante au point Q et $G(M, Q)$ la fonction de Green en champ libre donnée par :

$$G(M, Q) = \frac{e^{-ikr}}{4\pi r} \quad (\text{A.10})$$

où r est la distance entre les points M et Q et k le nombre d'onde acoustique.

$C(M)$ est un coefficient qui dépend de la position de M : en dehors du domaine Ω_a , $C(M)$ est égal à 0 ; à l'intérieur du domaine Ω_a , $C(M)$ est égal à 1 ; sur la frontière $\partial\Omega_a$, $C(M)$ est donné par :

$$C(M) = 1 - \frac{\Omega}{4\pi} \quad (\text{A.11})$$

où Ω est l'angle solide extérieur au point M de la frontière.

La première étape de la mise en œuvre numérique consiste à discrétiser la frontière $\partial\Omega_a$ du domaine Ω_a en éléments de frontière. Pour chaque élément de frontière, les variables de surface sont approchées par une fonction d'approximation polynômiale.

On évalue ensuite la forme intégrale ainsi discrétisée ; on obtient ainsi une équation algébrique pour chaque point de calcul du domaine en termes de pression et vitesse sur les éléments discrétisés de la frontière.

Aussi, les variables inconnues sur les éléments de frontières sont déterminées au préalable en utilisant un processus de collocation : le point de calcul M est déplacé en une position discrétisée de la frontière (point de collocation). Le processus est répété autant de fois que de points de collocation définis (noeuds du maillage en général). Le système d'équations algébriques ainsi obtenu est résolu en imposant les conditions aux limites connues du problème (Neumann ou Dirichlet).

Méthode indirecte Pour des problèmes courants présentant des conditions aux limites mixtes (conditions combinées de pression et vitesse ou conditions d'impédance), le champ

acoustique rayonné par la frontière $\partial\Omega_a$ en un point M du domaine Ω_a est exprimé à l'aide de potentiels de simple couche et de potentiels de double couche⁹ :

$$P(M) = \int_{\partial\Omega_a} \left[\mu(Q) \frac{\partial G(M, Q)}{\partial n_Q} - \sigma(Q) G(M, Q) \right] d\Gamma_a \quad (\text{A.12})$$

où $\mu(Q)$ représente la densité de potentiel de double couche au point $Q \in \partial\Omega_a$, \underline{n}_Q la normale à $\partial\Omega_a$ au point Q , $\sigma(Q)$ la densité de potentiel de simple couche au point Q et $G(M, Q)$ la fonction de Green en espace libre définie par l'équation (A.10).

Tout comme pour la méthode directe, l'implémentation numérique débute par la discrétisation de la frontière en éléments de frontière. Sur chaque élément, la distribution de potentiels est approchée par des fonctions d'approximation polynômiales.

On obtient pour chaque point M du domaine Ω_a une forme intégrale discrétisée qui exprime la pression au point sous la forme d'une somme pondérée de valeurs discrètes de densités de potentiels disposés sur des éléments de la frontière discrétisée. Les densités de potentiels de couche sont déterminées en appliquant les conditions aux limites sur la frontière.

Méthode variationnelle Les méthodes d'éléments de frontière décrites précédemment souffrent de deux difficultés majeures. La première est liée à l'évaluation numérique de termes singuliers et la seconde au fait que ces formulations produisent des matrices non symétriques. Pour éliminer ces deux difficultés, on utilise une formulation variationnelle qui consiste à multiplier l'équation intégrale d'Helmholtz¹⁰ ou l'équation intégrale indirecte¹¹ par une fonction test admissible et à intégrer le résultat sur la frontière du domaine.

L'implémentation numérique de l'approche variationnelle est similaire à celle des méthodes auxquelles elle se rapporte ; à la différence des deux premières méthodes, une double intégration de surface est cependant nécessaire.

On peut noter également que, contrairement aux méthodes BEM classiques de collocation, l'approche variationnelle n'utilise pas de points de collocation ; en effet, le système final d'équation algébriques est obtenu directement à partir de la discrétisation de la fonctionnelle construite qui prend explicitement en compte les conditions aux limites imposées sur la frontière du domaine.

⁹P. Filippi. Layer potentials and acoustic diffraction. *Journal of Sound and Vibration*, 54(4) :473-500, 1977 (cité dans [AB94]).

¹⁰A. D. Pierce. Variational formulations in acoutic radiation and scattering. *Physical Acoustics*, XXII, 1993 (cité dans [AB94]).

¹¹M. A. Hamdi. *Formulation variationnelle par équations intégrales pour le calcul de champs acoustiques linéaires proches et lointains*. PhD thesis, Université de Technologie de Compiègne, Compiègne, France, 1982 (cité dans [AB94]).

A.2 Description du système plaque-cavité étudié

A.2.1 Configuration du problème

La figure A.7 montre la configuration du problème étudié.

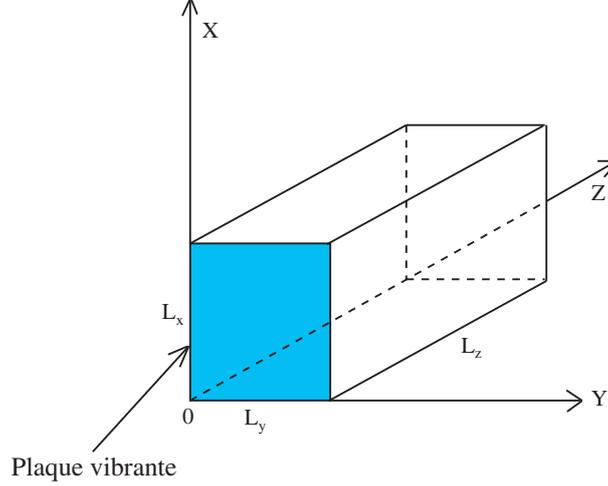


FIG. A.7 – Configuration du problème étudié.

Les données géométriques, mécaniques et acoustiques du problème sont les suivantes :

- Milieu acoustique extérieur : air,
- Cavité acoustique parallélépipédique (domaine V) :
 - 5 murs rigides (de surface S_R) et 1 paroi vibrante (de surface S_V),
 - dimensions $L_x = 0.6$ m, $L_y = 0.4$ m et $L_z = 0.8$ m,
 - fluide : air ($\rho_0 = 1.2$ kg/m³, $c = 340$ m/s, $\eta_f = 10^{-2}$).
- Plaque rectangulaire vibrante (domaine Ω_s) simplement appuyée en $z = 0$ de surface “mouillée”¹² S_V :
 - dimensions $L_x = 0.6$ m, $L_y = 0.4$ m.
 - matériau : acier ($E = 2 \times 10^{11}$ N.m⁻², $\eta_s = 7 \times 10^{-3}$, $\nu = 0.32$, $\rho_s = 7870$ kg/m³).

A.2.2 Équations régissant la réponse vibro-acoustique du système

Dans cette configuration, le système d'équations (A.1) à (A.5) se réduit à :

- Équations de mouvement dans les différents milieux supposés non dissipatifs :

$$\left(D\nabla^4 + M_P \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) w(M_s, t) = F(M_s, t) \quad M_s \in \Omega_s \quad (\text{A.13})$$

$$\Delta p(M_a, t) - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} p(M_a, t) = 0 \quad M_a \in V \quad (\text{A.14})$$

¹²i.e. en contact avec le fluide interne.

– Conditions aux limites :

$$\frac{\partial}{\partial n} p(M_a, t) = 0 \quad M_a \in S_R \quad (\text{A.15})$$

$$\frac{\partial}{\partial n} p(M_a, t) = -\rho_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} w(M_a, t) \quad M_a \in S_V \quad (\text{A.16})$$

où :

w est la déformée de la plaque,

$M_P = \rho_s h$ est la masse surfacique de la plaque,

$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$ est le module de rigidité de flexion de la plaque,

ρ_s est la masse surfacique de la plaque,

h est l'épaisseur de la plaque,

E est le module d'Young de la plaque.

A.3 Présentation des outils de calcul vibro-acoustique

A.3.1 Plaqcav

A.3.1.1 Descriptif

Plaqcav est un code semi-analytique développé par F. Sgard et N. Atalla ; ce code permet une résolution du problème d'interaction fluide-structure (spécifiquement pour une plaque rectangulaire couplée à une cavité parallélépipédique) par une méthode semi-analytique de séparation des variables avec décomposition modale finie (Cf. section A.1.3.2), telle que proposée par Dowell *et al.* [DGS77] et également utilisée par Cheng [Che89]. Deux variantes du code existent ; l'une permet de calculer la réponse du système pour une excitation mécanique ponctuelle normale à la plaque, l'autre considère une excitation ponctuelle acoustique (monopôle) intérieure à la cavité. Sa présentation se concentre sur la première variante.

A.3.1.2 Équations de couplage

Dans ce qui suit, nous rappelons les principaux éléments théoriques de l'approche modale implémentée sous Plaqcav.

A.3.1.2.a Problème acoustique

Considérons la cavité entièrement rigide sur sa frontière $\partial V = S_R \cup S_V$. Les modes propres de la cavité rigide F_N sont solutions de l'équation d'onde (A.14) et satisfont les conditions suivantes :

$$\Delta F_N(M_a) = -(\omega_N/c)^2 F_N(M_a) \quad (\text{A.17})$$

$$\frac{\partial}{\partial n} F_N(M_a) = 0 \quad \text{sur } \partial V = S_R \cup S_V \quad (\text{A.18})$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{V} \int_V F_R(M_a) F_N(M_a) dV &\equiv M_N, & R = N \\ &= 0, & R \neq N \end{aligned} \quad (\text{A.19})$$

où ω_N est la $N^{\text{ième}}$ pulsation propre de la cavité rigide, F_N le mode propre associé et M_N la masse généralisée acoustique.

Les modes propres F_N de la cavité rigide sont donnés par :

$$F_N(M_a) = F_{qrs}(x, y, z) = \cos\left(\frac{q\pi x}{L_x}\right) \cos\left(\frac{r\pi y}{L_y}\right) \cos\left(\frac{s\pi z}{L_z}\right) \quad (\text{A.20})$$

et les pulsations propres ω_N par :

$$\omega_N = \omega_{qrs} = c \sqrt{\left(\frac{q\pi}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{r\pi}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{s\pi}{L_z}\right)^2} \quad (\text{A.21})$$

La pression interne $p(M_a, t)$ est décomposée sur la base des N premiers modes propres de la cavité rigide :

$$p(M_a, t) = \sum_N \frac{\rho_0 c^2}{M_N} p_N(t) F_N(M_a) \quad (\text{A.22})$$

où $p_N(t)$ est l'amplitude modale du mode N :

$$p_N(t) = \frac{1}{V} \int_V p(M_a, t) F_N(M_a) dV \quad (\text{A.23})$$

En appliquant le théorème de Green sous la forme

$$\begin{aligned} \int_V [p(M_a, t) \Delta F_N(M_a) - F_N(M_a) \Delta p(M_a, t)] dV = \\ \int_{\partial V} [p(M_a, t) \frac{\partial}{\partial n} F_N(M_a) - F_N(M_a) \frac{\partial}{\partial n} p(M_a, t)] d(\partial V), \end{aligned} \quad (\text{A.24})$$

et en utilisant les équations (A.14), (A.15), (A.16), (A.17), (A.18), (A.19) et (A.22), on peut obtenir les équations généralisées acoustiques :

$$p_N''(t) + \omega_N^2 p_N(t) = -w_N''(t) \frac{S_V}{V} \quad (\text{A.25})$$

avec :

$$w_N(t) = \frac{1}{S_V} \int_{S_V} w(M_s, t) F_N(M_s) dS_V \quad (\text{A.26})$$

A.3.1.2.b Problème structural

Considérons la plaque *in vacuo*. Les modes propres structuraux ψ_M vérifient l'équation aux valeurs propres associées à l'équation (A.13) :

$$D\nabla^4\psi_M(M_s) - M_P\omega_M^2\psi_M(M_s) = 0 \quad (\text{A.27})$$

et la condition d'orthogonalité :

$$\begin{aligned} \int_{\Omega_s} M_P\psi_M(M_s)\psi_R(M_s)d\Omega_s &\equiv M_M, & M = R \\ &= 0, & M \neq R \end{aligned} \quad (\text{A.28})$$

où ω_M est la $M^{\text{ième}}$ pulsation propre de la plaque, ψ_M le mode propre associé et M_M la masse généralisée structurale.

Pour une plaque simplement appuyée, les modes propres structuraux ψ_M sont donnés par :

$$\psi_M(M_s) = \psi_{mn}(x, y) = \sin\left(\frac{m\pi x}{L_x}\right) \sin\left(\frac{n\pi y}{L_y}\right) \quad (\text{A.29})$$

et les pulsations propres ω_M par :

$$\omega_M = \omega_{mn} = \sqrt{\frac{D}{M_P} \left[\left(\frac{m\pi}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{L_y}\right)^2 \right]} \quad (\text{A.30})$$

On décompose $w(M_s, t)$ le déplacement transversal de la plaque sur la base de ses M premiers modes propres *in vacuo* :

$$w(M_s, t) = \sum_M q_M(t) \psi_M(M_s) \quad (\text{A.31})$$

En substituant l'équation (A.31) dans l'équation (A.13) et en utilisant l'équation (A.27), on obtient¹³ :

$$\sum_M M_M [q_M''(t) + \omega_M^2 q_M(t)] \psi_M(M_s) = p(M_s, t) - F_{ext}(t) \cdot \delta(x - x_0) \cdot \delta(y - y_0) \quad (\text{A.32})$$

Après multiplication par ψ_M , intégration sur Ω_s et utilisation de la propriété d'orthogonalité (A.28), l'équation (A.32) devient :

$$M_M [q_M''(t) + \omega_M^2 q_M(t)] = Q_M^{int}(t) + Q_M^{ext}(t) \quad (\text{A.33})$$

¹³On considère une excitation mécanique ponctuelle au point de coordonnées (x_0, y_0) de la plaque.

où :

$$Q_M^{int}(t) = \int_{S_V} p(M_s, t) \psi_M(M_s) dS_V \quad (\text{A.34})$$

et :

$$Q_M^{ext}(t) = - \int_{\Omega_s} F_{ext}(t) \delta(x - x_0) \cdot \delta(y - y_0) \psi_M(M_s) d\Omega_s \quad (\text{A.35})$$

A.3.1.2.c Couplage vibro-acoustique

Si on remplace $p(M_a, t)$ et $w(M_s, t)$ dans les équations (A.26) et (A.23) par leurs expressions respectives (A.22) et (A.31), les équations (A.25) et (A.33) peuvent se réécrire :

$$p_N''(t) + \omega_N^2 p_N(t) = - \frac{S_V}{V} \sum_M L_{NM} q_M''(t) \quad (\text{A.36})$$

$$q_M''(t) + \omega_M^2 q_M(t) = \rho_0 c^2 S_V \sum_N p_N(t) \frac{L_{NM}}{M_M M_N} + \frac{Q_M^{ext}(t)}{M_M} \quad (\text{A.37})$$

où :

$$L_{NM} = \frac{1}{S_V} \int_{S_V} F_N(M_s) \psi_M(M_s) dS_V \quad (\text{A.38})$$

Le système d'équations (A.36) et (A.37) traduit le couplage fluide-structure ; le coefficient de couplage L_{NM} traduit la coïncidence spatiale ou non des déformées modales du fluide et de la plaque au niveau de la surface d'interaction S_V .

Si l'on se place en régime harmonique, alors :

$$F_{ext}(t) = F_0 e^{j\omega t} \quad (\text{A.39})$$

$$p_N(t) = \overline{p_N}(\omega) e^{j\omega t} \quad (\text{A.40})$$

$$q_M(t) = \overline{q_M}(\omega) e^{j\omega t} \quad (\text{A.41})$$

où F_0 est l'amplitude de l'excitation mécanique appliquée, $\overline{p_N}(\omega)$ est l'amplitude complexe de la pression modale et $\overline{q_M}(\omega)$ est l'amplitude complexe du déplacement modal.

La force généralisée donnée par l'expression (A.35) devient :

$$Q_M^{ext}(t) = \overline{Q_M^{ext}} e^{j\omega t} \quad (\text{A.42})$$

avec :

$$\overline{Q_M^{ext}} = -F_0 \psi_M(x_0, y_0) \quad (\text{A.43})$$

Les équations généralisées du système (A.36) et (A.37) peuvent se réécrire :

$$\overline{p}_N(\omega) (\omega_N^2 - \omega^2) = \frac{S_V}{V} \omega^2 \sum_M L_{NM} \overline{q}_M(\omega) \quad (\text{A.44})$$

$$\overline{q}_M(\omega) (\omega_M^2 - \omega^2) = \rho_0 c^2 S_V \sum_N \overline{p}_N(\omega) \frac{L_{NM}}{M_M M_N} + \frac{\overline{Q}_M^{ext}}{M_M} \quad (\text{A.45})$$

A.3.1.2.d *Prise en compte de l'amortissement intrinsèque aux deux sous-systèmes*

Plaqa_{cav} utilise un modèle d'amortissement structural à la fois pour la plaque et le fluide. L'amortissement est injecté dans l'expression de la célérité pour le fluide, dans l'expression du module d'Young du matériau en ce qui concerne la plaque. Les équations (A.44) et (A.45) deviennent pour un système amorti :

$$\overline{p}_N(\omega) [\omega_N^2 - \omega^2(1 - j\eta_f)] = \frac{S_V}{V} \omega^2 \sum_M L_{NM} \overline{q}_M(\omega) \quad (\text{A.46})$$

$$\overline{q}_M(\omega) [\omega_M^2(1 + j\eta_s) - \omega^2] = \rho_0 c^2 S_V \sum_N \overline{p}_N(\omega) \frac{L_{NM}}{M_M M_N} + \frac{\overline{Q}_M^{ext}}{M_M} \quad (\text{A.47})$$

où η_f est le facteur de perte par amortissement structural du fluide et η_s le facteur de perte par amortissement structural du matériau constitutif de la plaque.

A.3.1.2.e *Prise en compte de la présence d'un matériau absorbant sur une paroi rigide*

Plaqa_{cav} utilise un modèle d'impédance à réaction localisée (Cf. section A.1.2) pour prendre en compte la présence d'un matériau absorbant réparti uniformément sur une paroi rigide de la cavité (i.e. l'impédance acoustique spécifique normale Z est supposée indépendante du point M_a considéré sur la surface S_A du matériau). En introduisant la condition aux limites (A.4), les équations généralisées pour le milieu fluide dissipatif (A.46) deviennent :

$$\overline{p}_N(\omega) \left[\omega_N^2 - \omega^2 + j \left(\eta_f \omega^2 + \frac{S_A}{V} \rho_0 c^2 \omega \sum_R \frac{C_{NR}}{M_R} \right) \right] = \frac{S_V}{V} \omega^2 \sum_M L_{NM} \overline{q}_M(\omega) \quad (\text{A.48})$$

avec :

$$\begin{aligned} C_{NR} &= \frac{1}{S_A Z(\omega)} \int_{S_A} F_N(M_a) F_R(M_a) dS_A \\ &= \frac{Z^*(\omega)}{|Z(\omega)|^2} G_{NR} \end{aligned} \quad (\text{A.49})$$

où $Z^*(\omega)$ et $|Z(\omega)|$ sont respectivement le conjugué complexe et le module de l'impédance acoustique spécifique normale du matériau absorbant, et :

$$G_{NR} = \frac{1}{S_A} \int_{S_A} F_N(M_a) F_R(M_a) dS_A$$

Les termes croisés C_{NR} ($N \neq R$) traduisent un couplage entre les modes de la cavité dû à la présence du matériau absorbant. Toutefois, l'hypothèse d'un faible couplage est généralement admise [DGS77, Che89], i.e. les termes croisés C_{NR} ($N \neq R$) sont faibles par rapport aux termes diagonaux C_{NN} . Avec cette hypothèse, et en introduisant l'expression complexe de l'impédance $Z(\omega)$ (i.e. $Z(\omega) = R(\omega) + jX(\omega)$, Cf. section A.1.2), les équations généralisées (A.48) deviennent :

$$\begin{aligned} \bar{p}_N(\omega) \left[\omega_N^2 - \omega^2 \left(1 - \frac{S_A}{V\omega} \rho_0 c^2 \frac{X(\omega) G_{NN}}{M_N |Z(\omega)|^2} \right) + j\omega \left(\eta_f \omega + \frac{S_A}{V} \rho_0 c^2 \frac{R(\omega) G_{NN}}{M_N |Z(\omega)|^2} \right) \right] = \\ \frac{S_V}{V} \omega^2 \sum_M L_{NM} \bar{q}_M(\omega) \end{aligned} \quad (\text{A.50})$$

A.3.2 Sysnoise

A.3.2.1 Descriptif

Sysnoise © LMS International est un logiciel d'analyse vibro-acoustique, dans lequel sont implémentées les méthodes numériques traditionnelles FEM-BEM (Cf. section A.1.3.3). L'analyse peut être réalisée dans le domaine temporel ou dans le domaine fréquentiel. Pour ce dernier cas qui nous intéresse plus particulièrement, les approches proposées par **Sysnoise** pour traiter les problèmes fluide-structure sont variées :

- FEM Structure - FEM fluide,
- FEM Structure - BEM indirecte variationnelle.
- FEM Structure - BEM directe,

Sysnoise utilise la méthode FEM en offrant la possibilité de résoudre les équations soit par la méthode directe, soit par la méthode de superposition modale.

A.3.2.2 Maillages

Sysnoise dispose d'un module de maillage qui permet de discrétiser les surfaces en éléments isoparamétriques quadrilatéraux à 4 nœuds (QUAD4), dont les fonctions d'interpolation sont de type Lagrange linéaire, et les volumes en éléments linéaires hexaédriques à 8 nœuds (HEXA8). **Sysnoise** permet d'autre part de réaliser des maillages non-coïncidents, i.e. les

topologies nodales des surfaces de couplage entre les modèles de la structure et du fluide sont différentes. Les procédures de maillage sont décrites dans [LMSb].

A.3.2.3 Équations de couplage

Nous allons présenter succinctement les équations de couplage (non amorties) traitées par `Sysnoise` dans chaque approche. Pour des informations complémentaires, concernant notamment l'introduction de l'amortissement intrinsèque aux deux sous-systèmes¹⁴, on pourra se reporter à [LMSa].

A.3.2.3.a Approche FEM-FEM

Après discrétisation des formes intégrales faibles des équations de mouvement de la structure (A.7) et du fluide (A.8) puis imposition des conditions aux limites, l'invocation de la stationnarité conduit au système forcé :

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_s - \omega^2 \mathbf{M}_s & \mathbf{C} \\ \omega^2 \mathbf{C}^t & \mathbf{K}_f - \omega^2 \mathbf{M}_f \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{u} \\ \mathbf{p} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{F}_s \\ \mathbf{F}_a \end{pmatrix} \quad (\text{A.51})$$

où \mathbf{K}_s et \mathbf{M}_s sont les matrices de raideur et de masse structurales, \mathbf{C} est la matrice de couplage entre la plaque et la cavité, \mathbf{K}_f et \mathbf{M}_f sont les matrices de raideur et de masse acoustiques, \mathbf{u} est le vecteur des déplacements nodaux de la plaque, \mathbf{p} est le vecteur des pressions nodales de la cavité, \mathbf{F}_s et \mathbf{F}_a sont les vecteurs de chargement structural et acoustique qui comprennent les excitations mécaniques ou acoustiques ou encore certaines conditions aux limites définies sur la structure et le volume acoustique (e.g. respectivement des déplacements imposés et des valeurs d'admittance).

Ce système peut être résolu par la méthode directe. Il peut être également résolu par la méthode de superposition modale. Dans ce cas, le système d'équations (A.51) devient après projection sur la base modale couplée :

$$\begin{bmatrix} \widehat{\mathbf{K}}_s - \omega^2 \widehat{\mathbf{M}}_s & \widehat{\mathbf{C}} \\ \omega^2 \widehat{\mathbf{C}}^t & \widehat{\mathbf{K}}_f - \omega^2 \widehat{\mathbf{M}}_f \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{a}_s \\ \mathbf{a}_f \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \widehat{\mathbf{F}}_s \\ \widehat{\mathbf{F}}_a \end{pmatrix} \quad (\text{A.52})$$

où le symbole ($\widehat{}$) indique la projection sur la base modale et \mathbf{a}_s et \mathbf{a}_f sont respectivement les facteurs de participation modaux structuraux et acoustiques.

Parce que la taille du système modal est plus faible — et par conséquent les temps de calcul correspondants sont plus faibles —, nous avons privilégié cette méthode de résolution dans la suite de nos travaux.

¹⁴`Sysnoise` propose les deux modèles d'amortissement courants : structural et visqueux.

A.3.2.3.b Approche FEM-BEM indirecte variationnelle

A partir des conditions aux limites connues sur la frontière ∂V du domaine V , les inconnues de la structure (déplacements) et du fluide (potentiels à simple et double couche) sont d'abord déterminées. Puis, à partir de ces résultats primaires, il est possible de calculer le champ de pression dans la cavité (pressions et vitesses acoustiques) en n'importe quel point de la cavité. La procédure de calcul construit puis résout un système couplé d'équations dans lequel figurent comme inconnues les déplacements structuraux et les sauts de pression acoustique :

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_s - \omega^2 \mathbf{M}_s & \mathbf{C}^t \\ \mathbf{C} & \frac{\mathbf{H}(\omega)}{\rho_0 \omega^2} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{u} \\ \mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{F}_s \\ \frac{\mathbf{F}_a}{\rho_0 \omega^2} \end{pmatrix} \quad (\text{A.53})$$

où $\mathbf{H}(\omega)$ est la matrice d'influence de la BEM indirecte, \mathbf{K}_s et \mathbf{M}_s sont les matrices de raideur et de masse structurales, \mathbf{C} est la matrice de couplage spatial entre la plaque et la cavité, \mathbf{u} est le vecteur des déplacements nodaux de la plaque, μ est le vecteur des sauts de pression nodaux de la cavité, et \mathbf{F}_s et \mathbf{F}_a sont les vecteurs de chargement structural et acoustique.

De même que pour l'approche FEM-FEM, ce système peut être résolu par la méthode directe ou par la méthode de superposition modale ; dans ce dernier cas, le système d'équations (A.53) devient après projection dans la base modale structurale :

$$\begin{bmatrix} \widehat{\mathbf{K}}_s - \omega^2 \widehat{\mathbf{M}}_s & \widehat{\mathbf{C}}^t \\ \widehat{\mathbf{C}} & \frac{\mathbf{H}(\omega)}{\rho_0 \omega^2} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{a}_s \\ \mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \widehat{\mathbf{F}}_s \\ \frac{\mathbf{F}_a}{\rho_0 \omega^2} \end{pmatrix} \quad (\text{A.54})$$

où le symbole (\wedge) indique la projection sur la base modale de la structure et \mathbf{a}_s sont les facteurs de participation modaux structuraux.

Pour les mêmes raisons que précédemment, nous avons privilégié cette méthode de résolution pour la suite de nos travaux.

A.3.2.3.c Approche FEM-BEM directe

A partir des conditions aux limites connues sur la frontière $\partial\Omega_a$ du domaine Ω_a , les inconnues de la structure (déplacements) et du fluide (pressions et vitesses normales acoustiques sur la frontière) sont d'abord déterminées. Puis, à partir de ces résultats primaires, il est possible d'évaluer le champ de pression dans la cavité (pressions et vitesses acoustiques). La procédure de calcul construit puis résout un système couplé d'équations dans lequel figurent comme inconnues les déplacements structuraux et les pressions acoustiques :

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_s - \omega^2 \mathbf{M}_s & \mathbf{C}^t \\ \rho_0 \omega^2 \mathbf{B}(\omega) & \mathbf{A}(\omega) \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{u} \\ \mathbf{p} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{F}_s \\ \mathbf{F}_a \end{pmatrix} \quad (\text{A.55})$$

où $\mathbf{A}(\omega)$ et $\mathbf{B}(\omega)$ sont les matrices d'influence de la BEM directe, \mathbf{K}_s et \mathbf{M}_s sont les matrices de raideur et de masse structurales, \mathbf{C} est la matrice de couplage spatial entre la

plaque et la cavité, \mathbf{u} est le vecteur des déplacements nodaux de la plaque, \mathbf{p} est le vecteur des pressions nodales de la cavité et \mathbf{F}_s et \mathbf{F}_a sont les vecteurs de chargement structural et acoustique.

Ce système peut être résolu suivant la méthode directe ou la méthode de superposition modale. Dans ce dernier cas, le système d'équations (A.55) devient :

$$\begin{bmatrix} \widehat{\mathbf{K}}_s - \omega^2 \widehat{\mathbf{M}}_s & \widehat{\mathbf{C}}^t \\ \rho_0 \omega^2 \widehat{\mathbf{B}}(\omega) & \mathbf{A}(\omega) \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{a}_s \\ \mathbf{p} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \widehat{\mathbf{F}}_s \\ \mathbf{F}_a \end{pmatrix} \quad (\text{A.56})$$

où le symbole (\wedge) indique la projection sur la base modale de la structure et \mathbf{a}_s sont les facteurs de participation modaux structuraux.

A.3.3 Translp2

A.3.3.1 Descriptif

`Translp2` est une version révisée du code `Trans` développé initialement par O. Chiello [Chi00] pour étudier les problèmes d'isolation en basses fréquences. Ce code associe une méthode d'analyse modale par sous-structuration dynamique à une méthode d'éléments finis (Cf. section A.1.3.3.a). Ce code permet en particulier de prendre en compte des sous-structures de masse nulle de type joint de jonction. Parmi les configurations possibles, figure le système plaque-cavité couplé qui nous intéresse. La version révisée apporte la possibilité de calculer le niveau de pression en un point intérieur de la cavité (Cf. section A.3.5).

A.3.3.2 Maillages

Pour la plaque, il est possible d'utiliser des éléments quadrilatéraux isoparamétriques à 4 nœuds (QUAD4), 8 nœuds (QUAD8) ou 9 nœuds (QUAD9) dont les fonctions d'interpolation sont respectivement de type Lagrange linéaire, Lagrange quadratique incomplet et Lagrange quadratique.

Pour le fluide intérieur, la discrétisation peut être effectuée avec des éléments linéaires hexaédriques à 8 nœuds ou quadratiques hexaédriques à 20 nœuds.

Dans ces travaux, nous avons choisi des éléments quadratiques à 8 nœuds et des éléments quadratiques hexaédriques à 20 nœuds pour modéliser respectivement la plaque et le fluide intérieur. Notons que les maillages doivent être choisis de façon à ce que, au niveau de la surface d'interaction, chaque nœud du maillage de la cavité coïncide avec un nœud du maillage de la plaque ; ainsi le rapport du nombre d'éléments de plaque au nombre d'éléments de fluide suivant les directions x et y doit être un nombre entier.

A.3.3.3 Équations de couplage

A.3.3.3.a Équations discrétisées du système couplé

L'invocation de la stationnarité des fonctionnelles fluide et structure aboutit à un système d'équations similaire à (A.51), ce système comporte néanmoins des particularités liées à l'approche par sous-structuration dynamique [Chi00] :

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_s - \omega^2 \mathbf{M}_s & \mathbf{C} \\ \omega^2 \mathbf{C}^t & \mathbf{K}_f - \omega^2 \mathbf{M}_f \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{u} \\ \mathbf{p} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{\mathbf{f}} + \bar{\mathbf{f}}_e \\ \bar{\mathbf{s}} \end{pmatrix} \quad (\text{A.57})$$

où \mathbf{K}_s et \mathbf{M}_s sont les matrices de raideur et de masse de l'assemblage de sous-structures¹⁵, \mathbf{K}_f et \mathbf{M}_f sont les matrices de raideur et de masse acoustiques, \mathbf{u} est le vecteur des déplacements nodaux de la structure, \mathbf{p} est le vecteur des pressions nodales de la cavité, $\bar{\mathbf{s}}$ est le vecteur source dûs aux sources acoustiques internes.

$\bar{\mathbf{f}}$ est le vecteur force dû aux forces mécaniques donné par :

$$\bar{\mathbf{f}} = \sum_{c=1}^{N_{sub}} \mathbf{D}^{(c)t} \bar{\mathbf{f}}^{(c)} \quad (\text{A.58})$$

où N_{sub} est le nombre de sous-structures, $\mathbf{D}^{(c)t}$ est la matrice booléenne de localisation et $\bar{\mathbf{f}}^{(c)}$ est le vecteur force agissant sur la sous-structure c dus aux forces mécaniques.

$\bar{\mathbf{f}}_e$ est le vecteur force dû aux pressions extérieures donné par :

$$\bar{\mathbf{f}}_e = \sum_{c=1}^{N_{sub}} \mathbf{D}^{(c)t} \bar{\mathbf{f}}_e^{(c)} \quad (\text{A.59})$$

où $\bar{\mathbf{f}}_e^{(c)}$ est le vecteur force agissant sur la sous-structure c dus aux pressions extérieures.

\mathbf{C} est la matrice de couplage entre la structure et la cavité fluide donnée par :

$$\mathbf{C} = \sum_{c=1}^{N_{sub}} \mathbf{D}^{(c)t} \mathbf{C}^{(c)} \quad (\text{A.60})$$

où $\mathbf{C}^{(c)}$ est la matrice de couplage entre la sous-structure c et le fluide.

A.3.3.3.b Équations généralisées du système couplé

La résolution du problème aux valeurs propres associé à (A.57) est évitée. La réponse du système est calculée en projetant le système d'équations (A.57) sur les bases modales de la structure *in vacuo* et de la cavité rigide (Cf. théorie développée dans la section A.3.1.2). En

¹⁵Dans le cas présent, la plaque est la seule sous-structure.

utilisant les réductions modales provenant respectivement de la sous-structuration dynamique et de l'analyse modale des sous-systèmes découplés, on aboutit ainsi au système d'équations généralisées suivant [Chi00] :

$$\begin{bmatrix} \Omega_s - \omega^2 \mathbf{I}_s & \mathbf{C}_m \\ \omega^2 \mathbf{C}_m^t & \Omega_f - \omega^2 \mathbf{I}_f \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{q}_s \\ \mathbf{q}_f \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{\mathbf{f}}_m + \bar{\mathbf{f}}_{me} \\ \bar{\mathbf{s}}_m \end{pmatrix} \quad (\text{A.61})$$

où Ω_s est la matrice diagonale des pulsations propres de la structure, Ω_f est la matrice diagonale des pulsations propres du fluide, \mathbf{I}_s et \mathbf{I}_f sont des matrices identités respectivement de dimensions $m_s \times m_s$ (m_s modes structuraux) et $m_f \times m_f$ (m_f modes acoustiques), \mathbf{q}_s est le vecteur inconnu des coordonnées modales de la structure, \mathbf{q}_f est le vecteur inconnu des coordonnées modales de fluide, et d'autre part :

$$\bar{\mathbf{f}}_m = \sum_{c=1}^{N_{sub}} \bar{\mathbf{f}}_m^{(c)} = \sum_{c=1}^{N_{sub}} \Phi_s^{(c)t} \bar{\mathbf{f}}^{(c)} \quad (\text{A.62})$$

$$\bar{\mathbf{f}}_{me} = \sum_{c=1}^{N_{sub}} \bar{\mathbf{f}}_{me}^{(c)} = \sum_{c=1}^{N_{sub}} \Phi_s^{(c)t} \bar{\mathbf{f}}_e^{(c)} \quad (\text{A.63})$$

$$\mathbf{C}_m = \sum_{c=1}^{N_{sub}} \mathbf{C}_m^{(c)} = \sum_{c=1}^{N_{sub}} \Phi_s^{(c)t} \mathbf{C}^{(c)} \Phi_f \quad (\text{A.64})$$

$$\bar{\mathbf{s}}_m = \Phi_f^t \bar{\mathbf{s}} \quad (\text{A.65})$$

où $\Phi_s^{(c)}$ sont les vecteurs propres de la sous-structure c et Φ_f sont les vecteurs propres du fluide.

A.3.3.3.c Prise en compte de l'amortissement intrinsèque aux deux sous-systèmes

Translp2 utilise tout comme Plaqaav un modèle d'amortissement structural pour la plaque et le fluide (Cf. section A.3.1.2.d). Le système d'équations (A.61) devient pour un système amorti [Chi00] :

$$\begin{bmatrix} \tilde{\Omega}_s - \omega^2 \mathbf{I}_s & \mathbf{C}_m \\ \omega^2 \mathbf{C}_m^t & \Omega_f - \omega^2 \tilde{\mathbf{I}}_f \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{q}_s \\ \mathbf{q}_f \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{\mathbf{f}}_m + \bar{\mathbf{f}}_{me} \\ \bar{\mathbf{s}}_m \end{pmatrix} \quad (\text{A.66})$$

où :

$$\tilde{\Omega}_s = (1 + j\eta_s) \Omega_s \quad (\text{A.67})$$

et :

$$\tilde{\mathbf{I}}_{\mathbf{f}} = (1 - j\eta_f) \mathbf{I}_{\mathbf{f}} \quad (\text{A.68})$$

A.3.4 Synthèse des hypothèses et possibilités de calcul

Le tableau A.1 compare les différentes hypothèses et possibilités de calcul liées à chacun des codes.

		LOGICIELS			
		Code semi-analytique	Codes numériques		
		PLAQCAV	TRANSLP2	SYSNOISE	
Hypothèses / possibilités	Milieu extérieur	Hypothèse fluide léger extérieur	OUI	OUI	OUI
		Sous-système Cavité	Type modèle amortissement	Structural	Structural
	Type parois		Rigide	Rigide / Flexible	Rigide / Flexible
	Prise en compte de matériau absorbant sur les parois		OUI Modèle d'impédance à réaction localisée (Delany-Bazley)	NON	OUI - Modèle d'impédance à réaction localisée (Delany-Bazley) - Modèle fluide-équivalent
	Excitation acoustique ponctuelle interne		OUI	OUI	OUI
	Sous-système Plaque		Hypothèses Modèle Plaque	Kirchhoff-Love (Plaques minces)	Mindlin (Plaques épaisses)
		Type modèle amortissement	Structural	Structural	Structural / Visqueux
		Conditions aux limites	Simplement Appuyée	Quelconques	Quelconques
		Excitation externe	Mécanique (force ponctuelle)	- Mécanique (force ponctuelle) - Acoustique (monopôle, onde plane)	- Mécanique (force ponctuelle, déplacement ou vitesse imposés, pression pariétale imposée) - Acoustique (monopôle, onde plane, champ diffus)
	Système couplé plaque-cavité	Calcul des fréquences couplées	NON	NON	OUI (par résolution du problème d'oscillations libres)

TAB. A.1 – Récapitulatif des hypothèses et possibilités de calcul des différents codes.

A.3.5 Indicateurs vibro-acoustiques

Pour analyser la réponse vibro-acoustique du système plaque-cavité, nous utiliserons les indicateurs suivants, disponibles pour les 3 outils de calcul utilisés :

- Niveau de vitesse quadratique moyenne de la plaque :

$$L_v(f) = 10 \times \log_{10} \left(\frac{\langle |\bar{v}_n(M_s, f)|^2 \rangle_{S_V}}{v_{ref}^2} \right) \quad (\text{A.69})$$

où v_{ref} est la vitesse vibratoire de référence, égale à 5×10^{-8} m/s, et :

$$\langle |\bar{v}_n(M_s, f)|^2 \rangle_{S_V} = \frac{1}{S_V} \int_{S_V} |\bar{v}_n(M_s, f)|^2 dS_V \quad (\text{A.70})$$

où $\bar{v}_n(M_s, f)$ est la vitesse vibratoire normale à la surface, prise au point M_s et pour une fréquence f donnée.

- Niveau de pression quadratique moyenne dans la cavité :

$$L_{pq}(f) = 10 \times \log_{10} \left(\frac{\langle |\bar{p}(M_a, f)|^2 \rangle_V}{p_0^2} \right) \quad (\text{A.71})$$

où p_0 est la pression acoustique de référence, égale à 2.10^{-5} Pa, et :

$$\langle |\bar{p}(M_a, f)|^2 \rangle_V = \frac{1}{V} \int_V |\bar{p}(M_a, f)|^2 dV \quad (\text{A.72})$$

où $\bar{p}(M_a, f)$ est la pression acoustique en un point M_a intérieur à la cavité, pour une fréquence f donnée.

- Niveau de pression au point M_1 intérieur à la cavité, de coordonnées en m, $(x_1, y_1, z_1) = (0.4, 0.12, 0.5)$:

$$L_p(M_1, f) = 10 \times \log_{10} \frac{|\bar{p}(M_1, f)|^2}{p_0^2} \quad (\text{A.73})$$

A.4 Optimisation des paramètres de simulation

A.4.1 Optimisation des critères de convergence

A.4.1.1 Remarques préliminaires

Pour le code `Plaqcav` basé sur une approche modale, cette phase d'optimisation se réduit à déterminer la valeur du critère de troncature modale α nécessaire pour obtenir une solution convergée de la réponse vibro-acoustique du système. Le déplacement de la plaque et la pression interne à la cavité sont calculés jusqu'à une pulsation maximale $2\pi f_{max}$ en sommant d'une part la contribution de tous les modes de plaque *in vacuo* (m, n) et d'autre part la contribution de tous les modes de cavité rigide (q, r, s) jusqu'à ce que les pulsations ω_{mn} et ω_{qrs} des derniers modes de plaque et de cavité pris en compte soient supérieures ou égales à α fois la pulsation maximale ; les valeurs maximales correspondantes des couples d'indices (m, n) et (q, r, s) sont à indiquer dans le code.

Pour les codes basés sur une approche numérique FEM-FEM ou FEM-BEM, on cherche à la fois à déterminer le nombre de modes ainsi que le nombre d'éléments finis de plaque et de cavité nécessaires pour obtenir une solution convergée de la réponse vibro-acoustique du système. Sur ce second point, le critère classique utilisé en vibro-acoustique consiste à choisir le nombre d'éléments de plaque et de fluide de façon à ce que la longueur des éléments soit respectivement b_M et b_N fois inférieure à la plus petite longueur d'onde. Ce critère peut se traduire dans la base des vecteurs d'onde par :

– Plaque :

$$\begin{aligned}\lambda_{x,m} &= \frac{2\pi}{k_{x,m}} = \frac{2L_x}{m} \geq b_M \times \delta_{l_x}^M \implies nb_x^M = \frac{L_x}{\delta_{l_x}^M} \geq \frac{b_M}{2} m \\ \lambda_{y,n} &= \frac{2\pi}{k_{y,n}} = \frac{2L_y}{n} \geq b_M \times \delta_{l_y}^M \implies nb_y^M = \frac{L_y}{\delta_{l_y}^M} \geq \frac{b_M}{2} n\end{aligned}\tag{A.74}$$

où nb_x^M et nb_y^M sont les nombres d'éléments de plaque respectivement suivant la direction x et y , $\delta_{l_x}^M$ et $\delta_{l_y}^M$ sont les dimensions de l'élément suivant x et y .

– Cavité :

$$\begin{aligned}\lambda_{x,q} &= \frac{2\pi}{k_{x,q}} = \frac{2L_x}{q} \geq b_N \times \delta_{l_x}^N \implies nb_x^N = \frac{L_x}{\delta_{l_x}^N} \geq \frac{b_N}{2} q \\ \lambda_{y,r} &= \frac{2\pi}{k_{y,r}} = \frac{2L_y}{r} \geq b_N \times \delta_{l_y}^N \implies nb_y^N = \frac{L_y}{\delta_{l_y}^N} \geq \frac{b_N}{2} r \\ \lambda_{z,s} &= \frac{2\pi}{k_{z,s}} = \frac{2L_z}{s} \geq b_N \times \delta_{l_z}^N \implies nb_z^N = \frac{L_z}{\delta_{l_z}^N} \geq \frac{b_N}{2} s\end{aligned}\tag{A.75}$$

où nb_x^N , nb_y^N et nb_z^N sont les nombres d'éléments de fluide respectivement suivant la direction x , y et z , $\delta_{i_x}^N$, $\delta_{i_y}^N$ et $\delta_{i_z}^N$ sont les dimensions de l'élément suivant x , y et z .

En vibro-acoustique, b_M et b_N sont couramment pris égaux à 6 (pour des éléments finis linéaires).

A.4.1.2 Plaqa-cav

A.4.1.2.a Configuration de calcul

On considère la plaque excitée par une force ponctuelle d'amplitude $F_0 = 1$ N placée au point M_0 de coordonnées $(x_0, y_0, z_0) = (0.25, 0.18, 0)$.

Les calculs sont effectués pour un pas fréquentiel $\Delta f = 2$ Hz et une fréquence maximale $f_{max} = 1000$ Hz.

Les valeurs du critère de troncature modale α étudiées sont : 1, 1.2, 1.5, 2. Les plus grands modes de plaque (m, n) et de cavité (q, r, s) pris en compte sont donnés dans le tableau A.2.

α	(m, n)	(q, r, s)
1	(9,6)	(3,2,4)
1.2	(10,7)	(4,2,5)
1.5	(12,8)	(5,3,7)
2	(14,6)	(7,4,9)

TAB. A.2 – Plus grands modes de plaque (m, n) et de cavité (q, r, s) pris en compte en fonction de la valeur du critère α .

A.4.1.2.b Résultats

La figure A.8 montre les spectres de niveau de vitesse quadratique moyenne de la plaque calculés pour les différentes valeurs du critère α étudiées. On peut observer que tous les spectres se confondent ; ainsi, pour la valeur la plus faible de α , le calcul de la réponse vibratoire de la plaque a déjà convergé.

La figure A.9 présente les spectres de niveau de pression quadratique moyenne dans la cavité calculés pour les différentes valeurs du critère α étudiées. Les spectres sont quasiment confondus ; de même qu'auparavant, la variation du critère de troncature α dans l'intervalle étudié n'a pas d'influence sur l'allure du spectre.

La figure A.10 montre les spectres de niveau de pression au point M_1 calculés pour les différentes valeurs de α . En hautes fréquences ([850-1000] Hz), on peut observer que le spectre correspondant à $\alpha = 1$ se différencie légèrement des autres spectres ; le calcul a donc tout juste convergé. Pour s'assurer de la convergence du calcul de la pression acoustique en un point de la cavité, il semble ainsi prudent d'opter pour une valeur de α égale à 1.2. Qui plus est, l'emploi de cette valeur n'entraîne qu'une augmentation très légère du temps de calcul CPU par rapport à l'emploi une valeur de α égale à 1 (Cf. figure A.11).

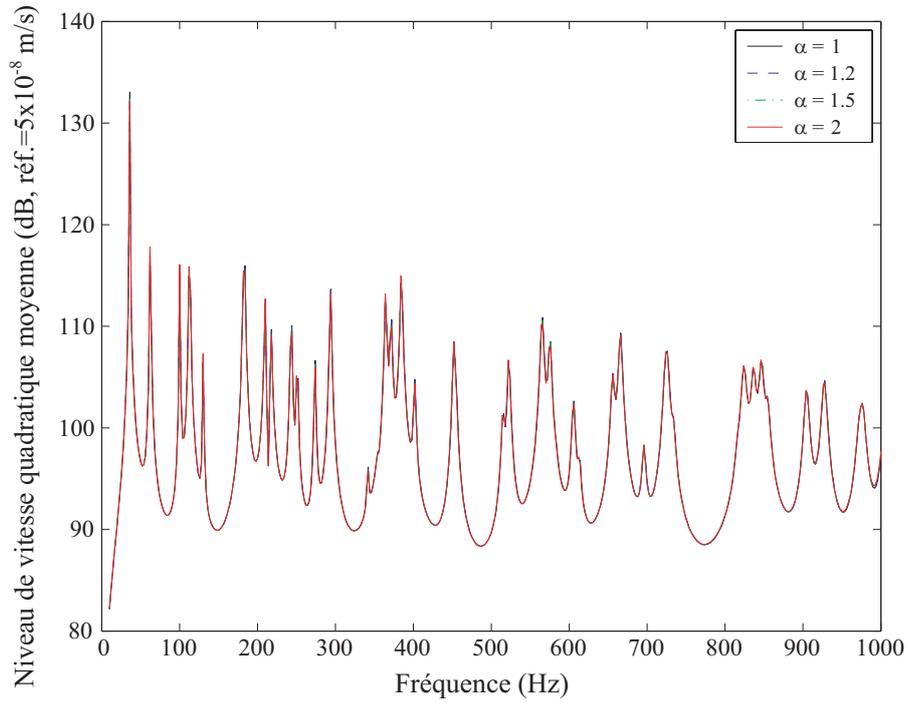


FIG. A.8 – Spectres de niveau de vitesse quadratique moyenne de la plaque calculés pour les différentes valeurs de α .

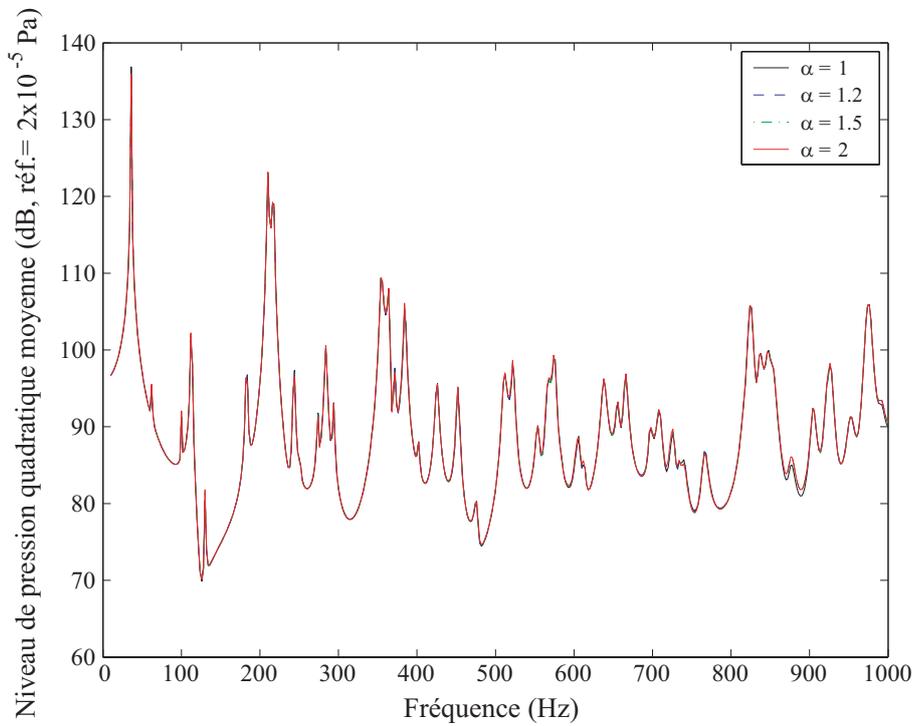


FIG. A.9 – Spectres de niveau de pression quadratique moyenne dans la cavité calculés pour les différentes valeurs de α .

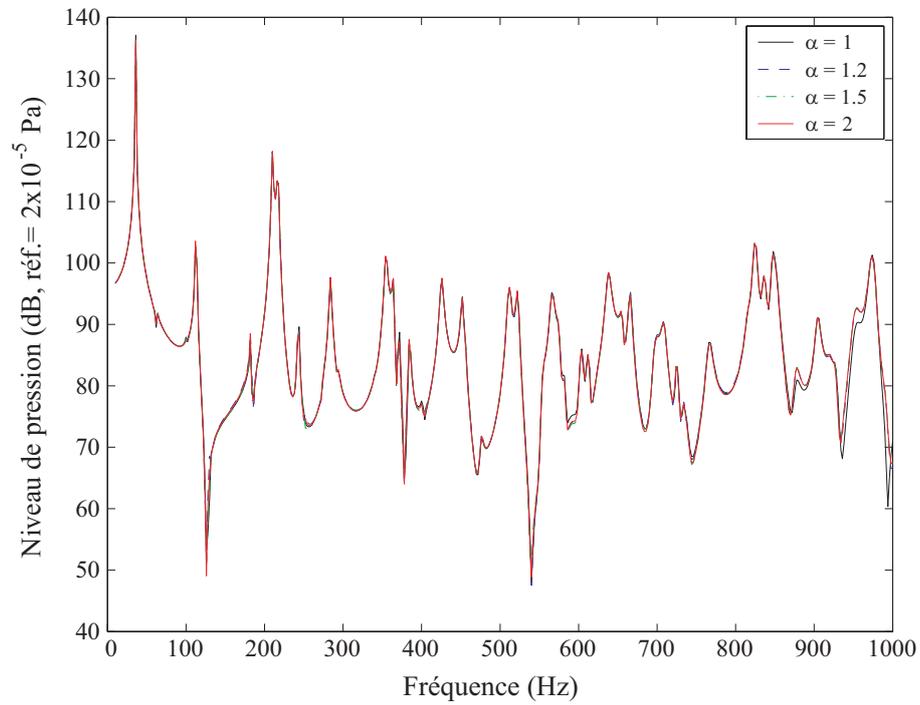


FIG. A.10 – Spectres de niveau de pression au point intérieur à la cavité M_1 calculés pour les différentes valeurs de α .

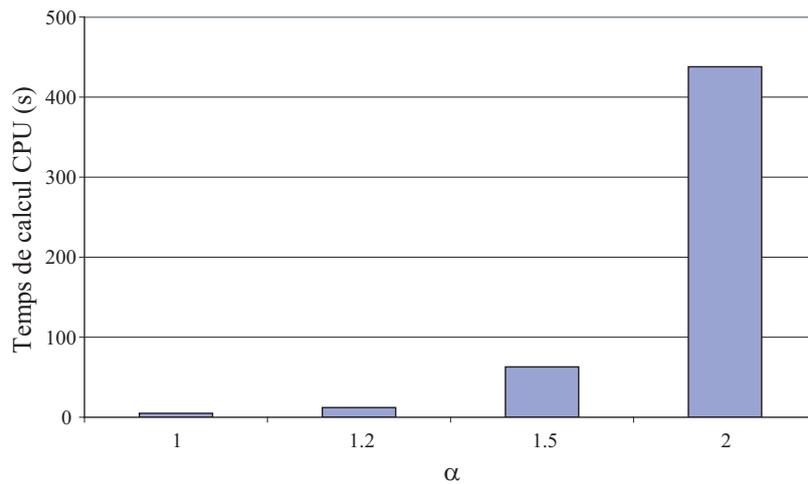


FIG. A.11 – Temps de calcul CPU relatifs aux différentes valeurs de α testées sous Plaqcav.

A.4.1.2.c Discussion sur l'influence de la position de la force ponctuelle sur la valeur optimale du critère de troncature modale

On cherche à s'assurer que la position de la force ponctuelle sur la plaque n'a pas d'influence sur le choix de la valeur du critère de troncature modale α . On s'intéresse plus particulièrement à une position excentrée de l'excitation mécanique — l'excitation est appliquée au point M_0 de coordonnées $(x_0, y_0, z_0) = (0.12, 0.075, 0)$ — pour laquelle un nombre plus important de modes de plaque est excité [CHMD04].

Les figures A.12 et A.13 montrent les spectres de niveau de vitesse quadratique moyenne de la plaque et de niveau de pression quadratique moyenne à l'intérieur de la cavité calculés pour les différentes valeurs du critère α étudiées. Pour ces deux indicateurs, on arrive aux mêmes conclusions que pour la position de l'excitation mécanique utilisée dans la section A.4.1.2.b.

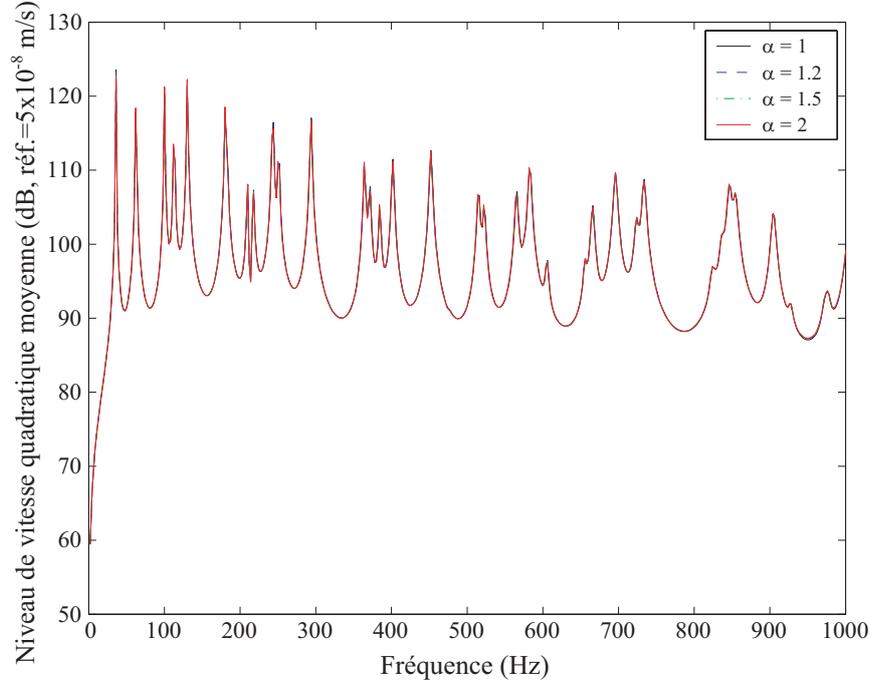


FIG. A.12 – Spectres de niveau de vitesse quadratique moyenne de la plaque calculés pour les différentes valeurs de α dans le cas d'une excitation mécanique excentrée.

Si on s'intéresse aux spectres de niveau de pression locale au point M_1 (Cf. figure A.14), on retrouve en hautes fréquences de légères différences entre le spectre correspondant à $\alpha = 1$ et les autres spectres. On observe d'autre part que, sur l'ensemble du domaine fréquentiel, la variation du critère α entraîne des variations d'amplitude au niveau des anti-résonances; les anti-résonances sont plus marquées pour $\alpha = 1$. Ces résultats viennent conforter le choix d'une valeur de α égale à 1.2.

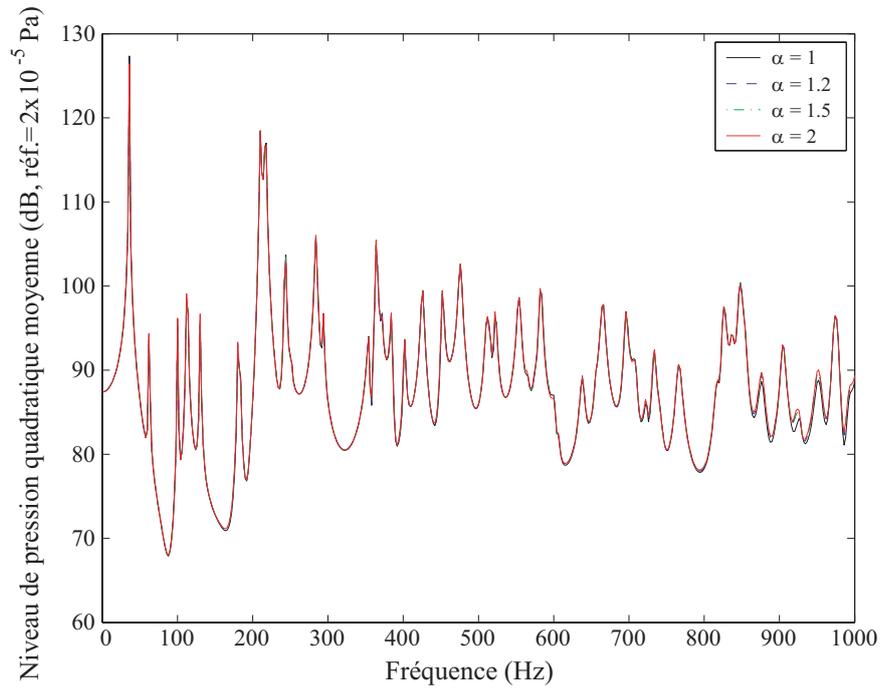


FIG. A.13 – Spectres de niveau de pression quadratique moyenne dans la cavité calculés pour les différentes valeurs de α dans le cas d'une excitation mécanique excentrée.

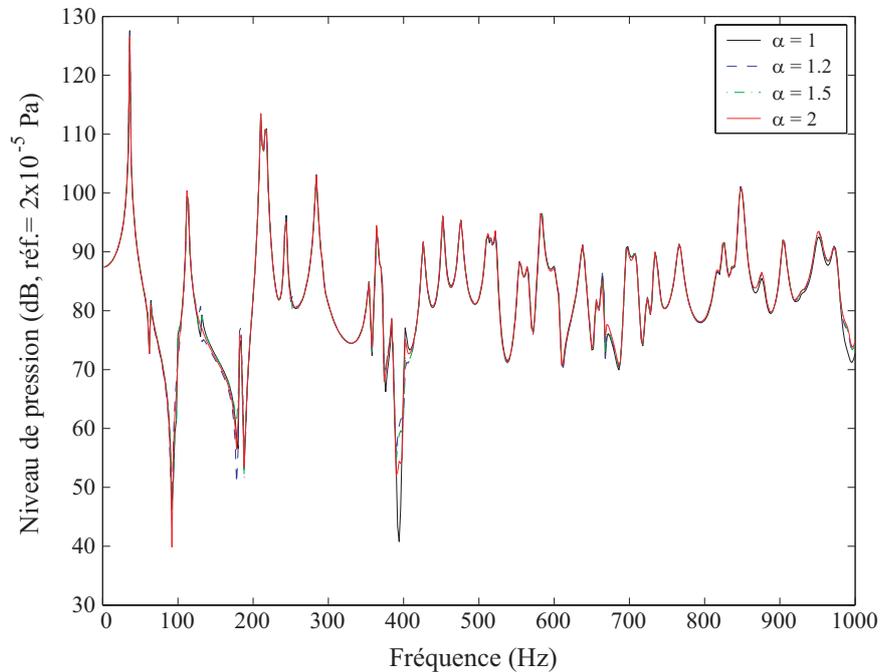


FIG. A.14 – Spectres de niveau de pression au point intérieur à la cavité M_1 calculés pour les différentes valeurs de α dans le cas d'une excitation mécanique excentrée.

A.4.1.2.d Synthèse

Pour obtenir un calcul convergé de la réponse vibro-acoustique du système plaque-cavité couplé, il apparaît opportun de prendre le critère de troncature modale α égal à 1.2. La position de l'excitation mécanique ponctuelle sur la plaque n'a pas d'influence sur le choix de cette valeur.

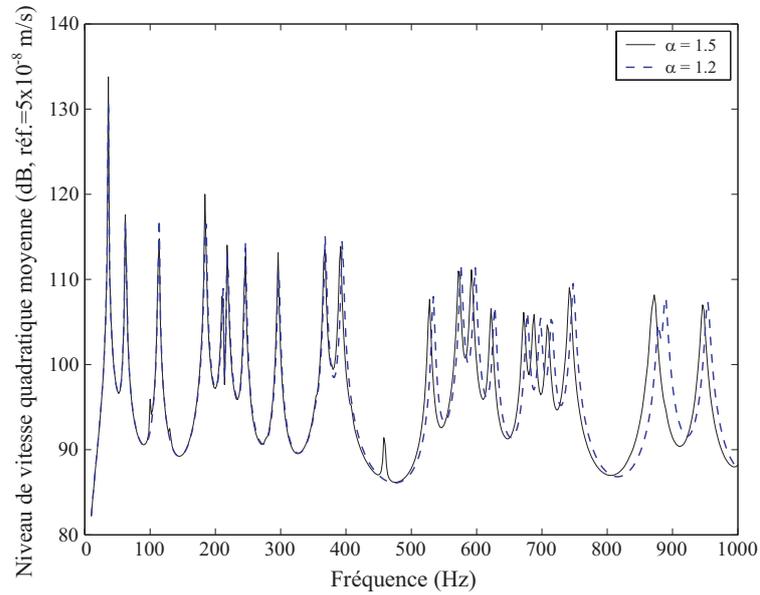
A.4.1.3 Sysnoise

A.4.1.3.a Approche FEM-FEM

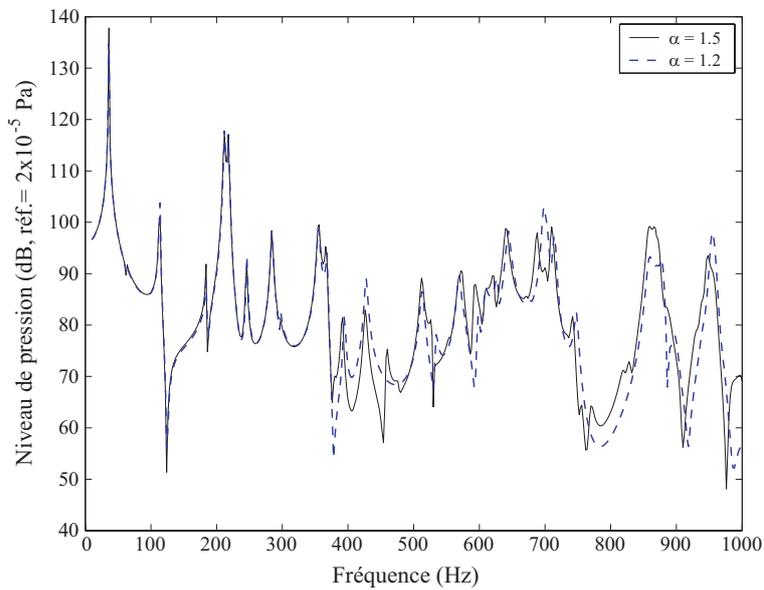
Critère de troncature modale On considère la plaque excitée par une force ponctuelle d'amplitude $F_0 = 1$ N placée au point M_0 de coordonnées $(x_0, y_0, z_0) = (0.24, 0.20, 0)$. Les calculs sont effectués pour un pas fréquentiel $\Delta f = 2$ Hz et une fréquence maximale $f_{max} = 1000$ Hz.

La plaque et la cavité sont discrétisées en éléments finis linéaires respectivement à 4 nœuds et à 8 nœuds. Pour les deux sous-systèmes, on choisit un maillage correspondant à un critère de convergence en $\frac{\lambda}{8}$, supérieur à celui couramment utilisé, i.e. en $\frac{\lambda}{6}$ (Cf. section A.4.1.1). Les valeurs du critère de troncature modale α étudiées sont 1.2 et 1.5.

Sur la figure A.15, on peut observer à partir de 350 – 400 Hz un décalage fréquentiel du spectre de niveau de vitesse quadratique correspondant à un critère $\alpha = 1.2$ par rapport à celui obtenu pour $\alpha = 1.5$. D'autre part, des écarts assez importants apparaissent également entre les spectres de niveau de pression au point intérieur M_1 et notamment dans le domaine des plus hautes fréquences ([700, 1000] Hz), où l'allure du spectre obtenu pour $\alpha = 1.2$ se démarque fortement de celle obtenue pour $\alpha = 1.5$. Un critère de troncature modale égal à 1.2 ne permet donc pas d'obtenir une solution convergée.



(a) Niveau de vitesse quadratique moyenne de la plaque.



(b) Niveau de pression au point intérieur à la cavité M_1 .

FIG. A.15 – Comparaison des spectres calculés pour les deux valeurs du critère de troncature modale étudiées : 1.2 et 1.5. Les maillages de plaque et de cavité correspondent à un critère de convergence en $\frac{\lambda}{8}$. Approche FEM-FEM sous Sysnoise.

Critère de convergence sur le maillage On utilise un critère de troncature modale égal à 1.5. On teste un critère de convergence en $\frac{\lambda}{8}$ à la fois pour le maillage de la plaque et de la cavité, puis un critère de convergence en $\frac{\lambda}{6}$.

On peut observer sur la figure A.16, à partir de 350 – 400 Hz, que le spectre de niveau de vitesse quadratique correspondant à un critère de convergence en $\frac{\lambda}{6}$ se décale par rapport à celui correspondant à un critère de convergence en $\frac{\lambda}{8}$. On remarque d'autre part entre les spectres de niveau de pression des différences importantes, et ceci dès 400 Hz. Un critère de convergence en $\frac{\lambda}{6}$ n'est donc pas suffisant pour représenter correctement les déformées des modes d'ordre élevé et ainsi assurer la convergence du calcul.

A.4.1.3.b Approche FEM-BEM indirecte

On considère toujours la plaque excitée par une force ponctuelle placée au point M_0 de coordonnées $(x_0, y_0, z_0) = (0.24, 0.20, 0)$. Les calculs sont effectués pour un pas fréquentiel $\Delta f = 2$ Hz et une fréquence maximale $f_{max} = 1000$ Hz. Sur la base des résultats obtenus pour l'approche FEM-FEM, nous choisissons d'emblée un critère de troncature modale égal à 1.5.

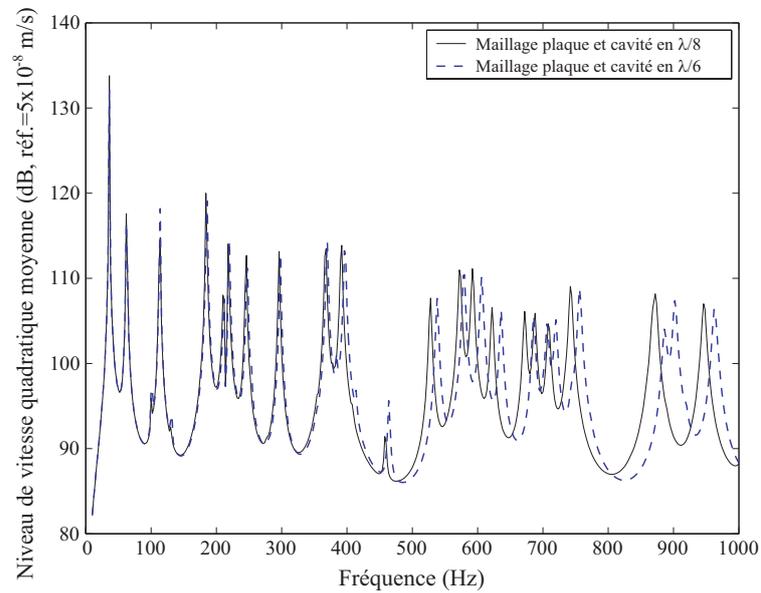
Nous cherchons alors à déterminer la valeur optimale du critère de convergence sur le maillage. On étudie à nouveau pour les maillages de la plaque et de la cavité les valeurs du critère de convergence suivantes : $\frac{\lambda}{8}$ et $\frac{\lambda}{6}$.

A partir des spectres obtenus par cette approche FEM-BEM indirecte (Cf. figure A.17), on peut dresser les mêmes conclusions qu'à partir de ceux obtenus par l'approche FEM-FEM, à savoir qu'il faut retenir au final un critère de convergence au minimum en $\frac{\lambda}{8}$.

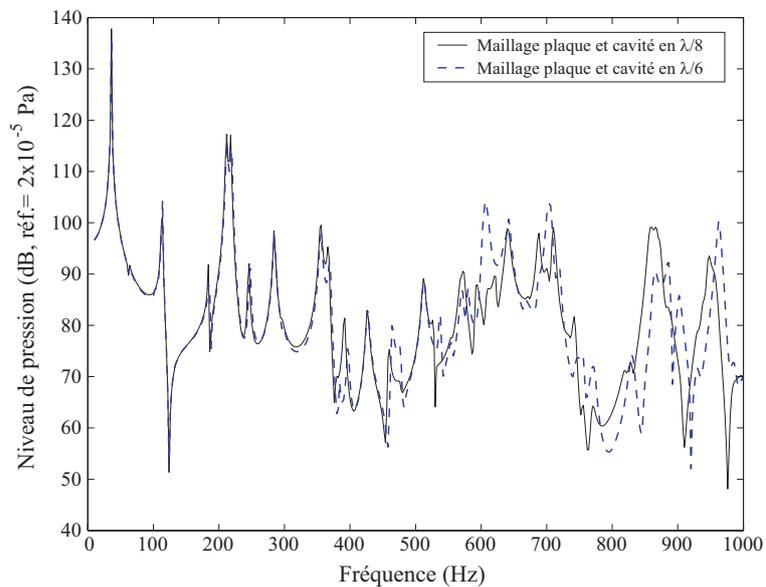
A.4.1.3.c Synthèse

Sous Sysnoise, de manière générale, la méthode de résolution par superposition modale requiert la sommation de la contribution de tous les modes jusqu'à ce que la pulsation du dernier mode pris en compte soit supérieure ou égale à 1.5 fois la pulsation maximale de calcul. D'autre part, les maillages de la plaque et de la cavité doivent répondre au minimum à un critère de convergence en $\frac{\lambda}{8}$. Pour information, les temps de calcul CPU correspondant aux différents cas étudiés sont présentés sur les figures A.18 et A.19; la méthode FEM-FEM est nettement moins coûteuse en termes de temps de calcul que la méthode FEM-BEM Indirecte (Cf. figure A.19).

L'approche FEM-BEM directe n'a finalement pas fait l'objet d'une étude d'optimisation, les temps de calcul étant beaucoup trop longs (10 fréquences calculées en 15 heures).

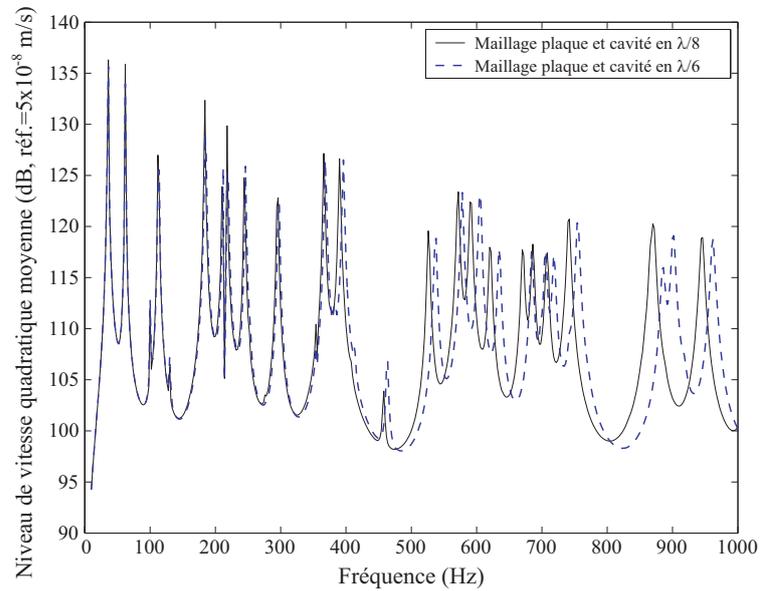


(a) Niveau de vitesse quadratique moyenne de la plaque.

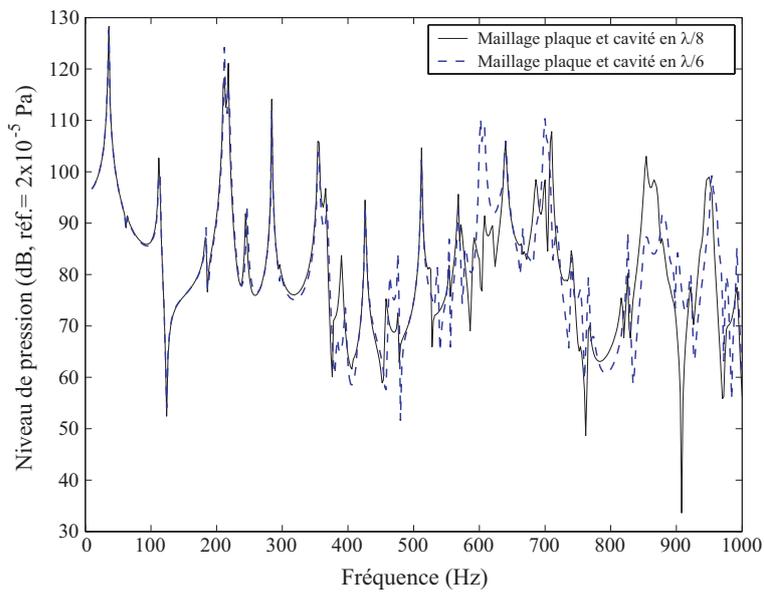


(b) Niveau de pression au point intérieur à la cavité M_1 .

FIG. A.16 – Comparaison des spectres calculés pour des maillages de plaque et de cavité correspondant à un critère de convergence respectivement en $\frac{\lambda}{8}$ et en $\frac{\lambda}{6}$. Approche FEM-FEM sous Sysnoise.



(a) Niveau de vitesse quadratique moyenne de la plaque.



(b) Niveau de pression au point intérieur à la cavité M_1 .

FIG. A.17 – Comparaison des spectres calculés pour des maillages de plaque et de cavité correspondant à un critère de convergence respectivement en $\frac{\lambda}{8}$ et en $\frac{\lambda}{6}$. Approche FEM-BEM indirecte sous Sysnoise.

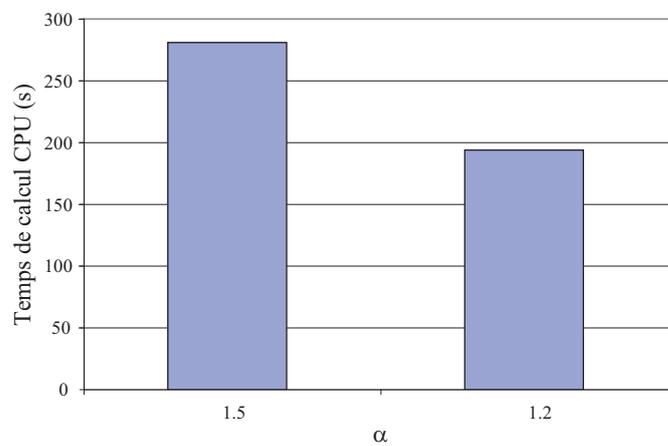
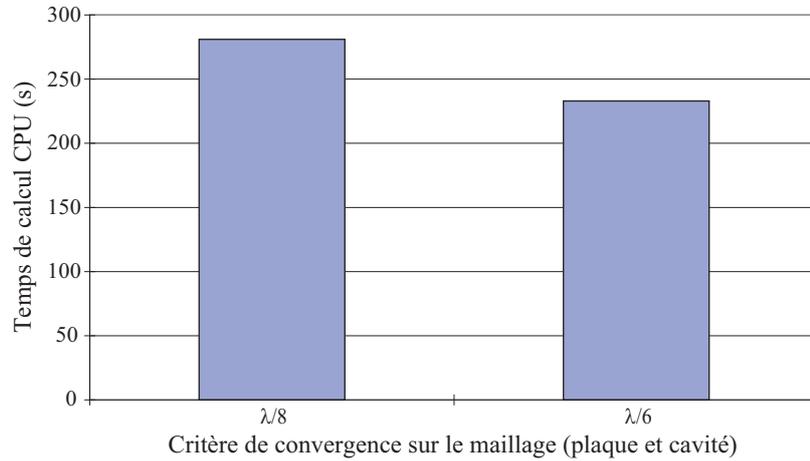
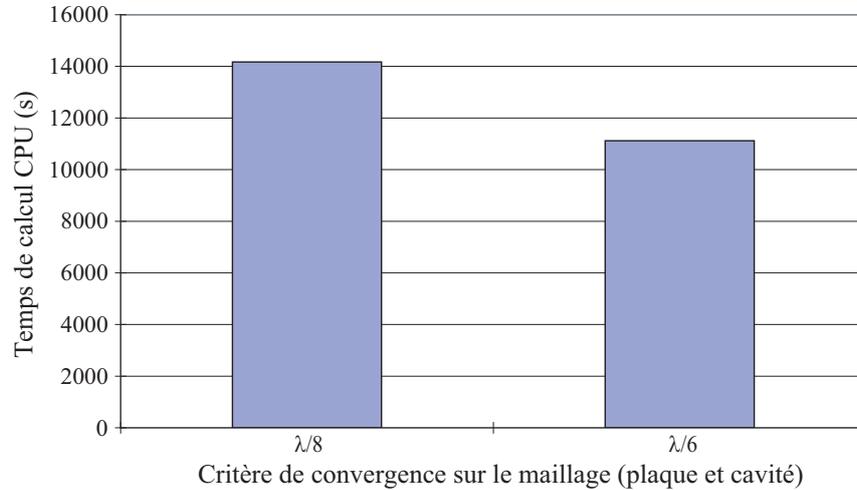


FIG. A.18 – Temps de calcul CPU relatifs à la variation du critère de troncature modale α sous **Sysnoise** (méthode FEM-FEM seulement). Les maillages de plaque et de cavité correspondent à un critère de convergence en $\frac{\lambda}{8}$.



(a) Méthode FEM-FEM.



(b) Méthode FEM-BEM Indirecte.

FIG. A.19 – Temps de calcul CPU relatifs à la variation du critère de convergence sur le maillage de la plaque et de la cavité sous **Sysnoise** (méthodes FEM-FEM et FEM-BEM Indirecte). Le critère de troncature modale α est pris égal à 1.5.

A.4.1.4 Translp2

A.4.1.4.a Critère de troncature modale

Configuration de calcul On considère la plaque excitée par une onde plane acoustique oblique d'inclinaison $(\theta, \phi) = (45^\circ, 30^\circ)$. Ce choix a été fait afin de faciliter la comparaison des résultats obtenus pour les différents (et nombreux) cas testés sous **Translp2**¹⁶.

Les calculs sont effectués pour un pas fréquentiel $\Delta f = 2$ Hz et une fréquence maximale $f_{max} = 1000$ Hz. Les deux sous-systèmes sont discrétisés en éléments finis quadratiques (Quad8 pour la plaque, Brick20 pour le fluide). On choisit un maillage pour la cavité et la plaque correspondant à un critère de convergence respectivement en $\frac{\lambda}{4}$ et $\frac{\lambda}{6}$ ¹⁷. Les valeurs du critère de troncature modale étudiées sont : 1.2 et 1.5.

Résultats Sur la figure A.20, on peut observer une bonne concordance entre les deux spectres de niveau de vitesse quadratique de la plaque. Les deux spectres de niveau de pression au point M_1 sont également assez semblables ; quelques légers écarts en amplitude sont visibles au niveau des anti-résonances. Néanmoins, on peut retenir au final un critère de convergence égal à 1.2, qui permettra de réduire notablement les temps de calcul CPU (Cf. figure A.23).

A.4.1.4.b Critère de convergence sur le maillage

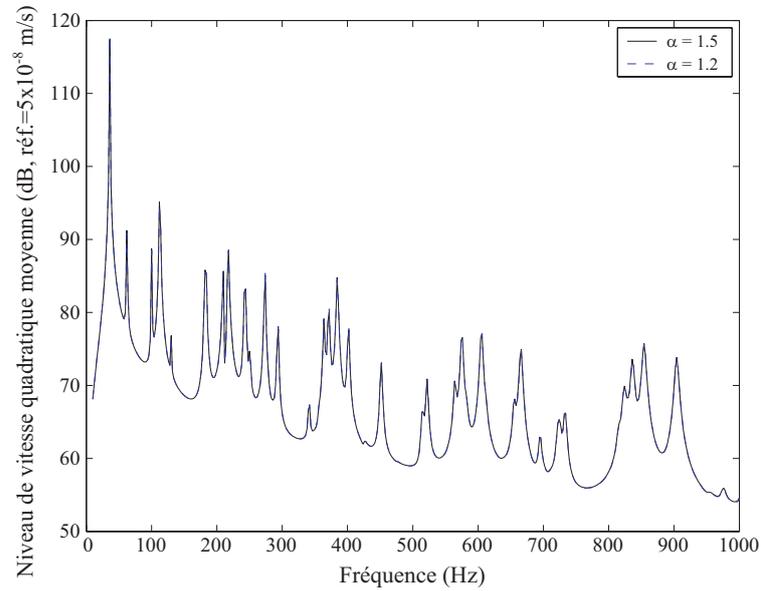
Configuration de calcul On utilise la valeur optimale du critère de troncature modale, i.e. 1.2. On teste dans un premier temps les critères de convergence en $\frac{\lambda}{4}$ et $\frac{\lambda}{3}$ pour le maillage de la cavité, puis les critères en $\frac{\lambda}{6}$ et $\frac{\lambda}{4}$ pour le maillage de la plaque.

Résultats La figure A.21 montre les spectres de niveau de vitesse quadratique moyenne de la plaque et de niveau de pression au point intérieur M_1 à la cavité calculés pour deux maillages de la cavité correspondant à un critère de convergence respectivement en $\frac{\lambda}{4}$ et en $\frac{\lambda}{3}$; le maillage de la plaque reste inchangé et répond à un critère de convergence en $\frac{\lambda}{6}$. On peut observer une très bonne concordance entre les spectres de niveau de vitesse quadratique. Cependant, pour un maillage en $\frac{\lambda}{3}$, on remarque sur les spectres de niveau de pression des différences importantes dans le domaine des plus hautes fréquences ([500, 1000] Hz) par rapport à un maillage en $\frac{\lambda}{4}$; pour un critère en $\frac{\lambda}{3}$, le calcul n'a apparemment pas convergé. On conservera donc un critère de convergence en $\frac{\lambda}{4}$ pour mailler la cavité par la suite.

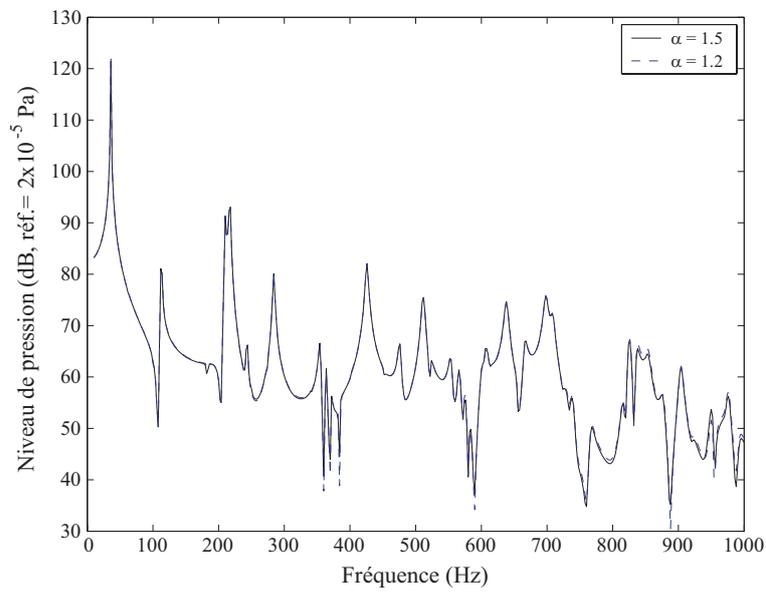
La figure A.22 présente les spectres de niveau de vitesse quadratique moyenne de la plaque et de niveau de pression au point intérieur à la cavité M_1 calculés pour deux maillages de la plaque correspondant à un critère de convergence respectivement en $\frac{\lambda}{6}$ et en $\frac{\lambda}{4}$; le maillage de

¹⁶L'excitation mécanique ponctuelle nécessite d'être placée en un nœud du maillage de la plaque ; le nombre d'éléments variant d'un cas à l'autre, il devient vite fastidieux et contraignant de vouloir trouver une position commune de la force pour tous les maillages que l'on veut tester.

¹⁷Avec ces tailles de maillage et un critère de troncature modale égal à 1.5, on atteint le nombre maximal de degrés de liberté pouvant être traités par **Translp2** pour la configuration géométrique du problème étudié.

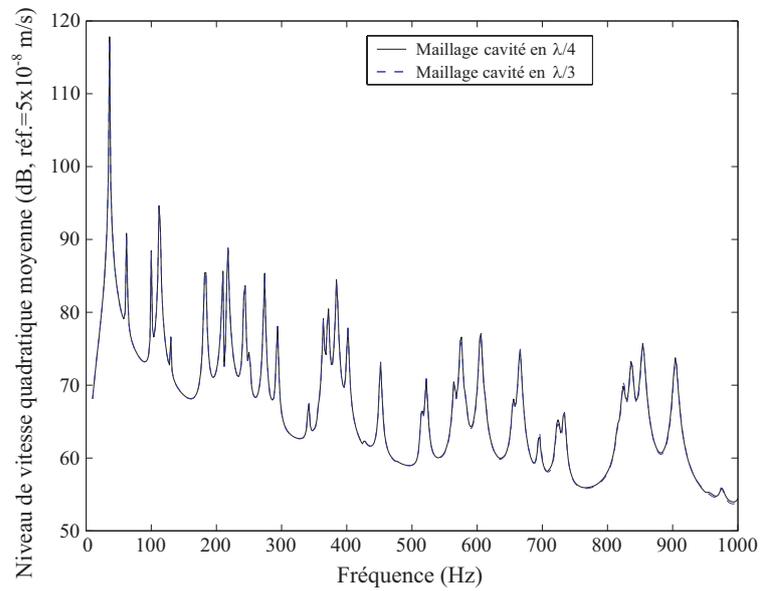


(a) Niveau de vitesse quadratique moyenne de la plaque.

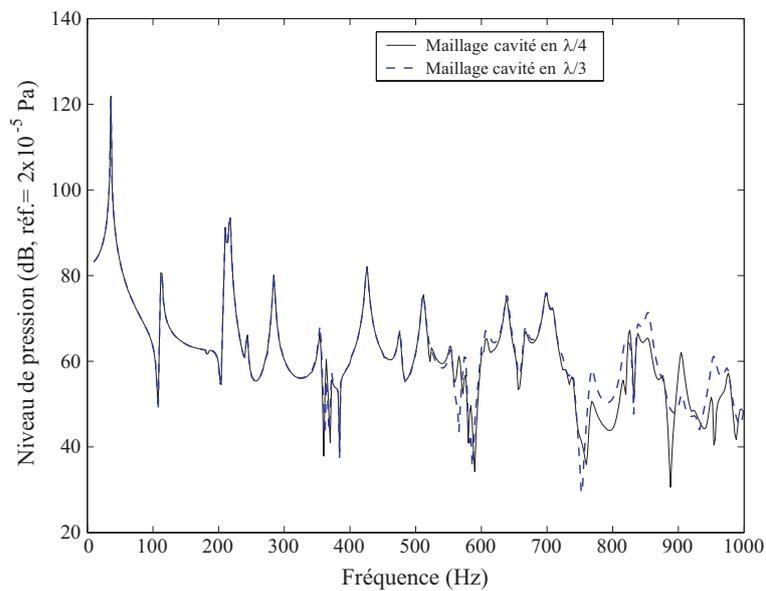


(b) Niveau de pression au point intérieur à la cavité M_1 .

FIG. A.20 – Comparaison des spectres calculés pour les deux valeurs du critère de troncature modale étudiées : 1.2 et 1.5. Les maillages de plaque et de cavité correspondent à un critère de convergence respectivement en $\frac{\lambda}{6}$ et $\frac{\lambda}{4}$.



(a) Niveau de vitesse quadratique moyenne de la plaque.



(b) Niveau de pression au point intérieur à la cavité M_1 .

FIG. A.21 – Comparaison des spectres calculés pour deux maillages différents de la cavité correspondant aux critères de convergence en $\frac{\lambda}{4}$ et $\frac{\lambda}{3}$. Le maillage de la plaque correspond à un critère en $\frac{\lambda}{6}$.

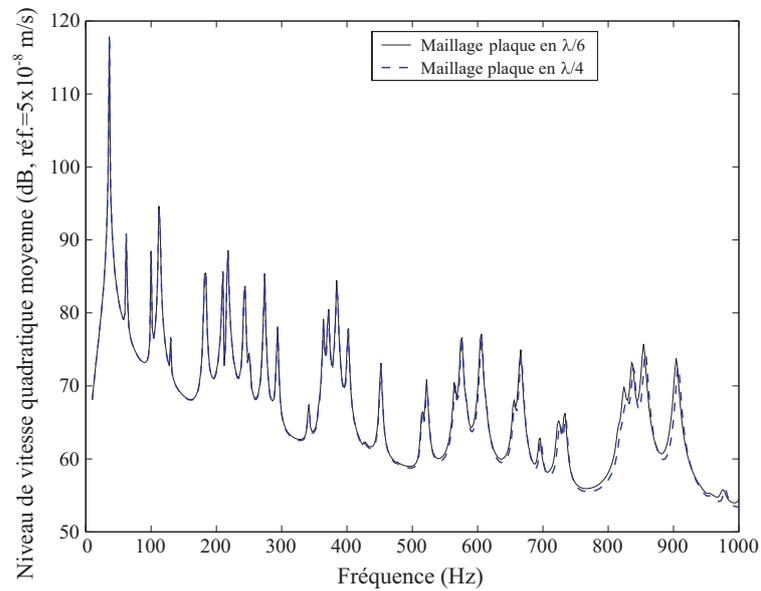
la cavité correspond à un critère de convergence en $\frac{\lambda}{4}$. Sur les spectres de niveau de vitesse quadratique, on observe pour un maillage de la plaque correspondant à un critère de convergence en $\frac{\lambda}{4}$ un décalage des pics de résonance à partir de 700 Hz. Sur les spectres de niveau de pression, on relève également des différences notables entre les deux maillages étudiés dans le domaine de fréquences [720, 820] Hz. Pour ces raisons, on conservera pour le maillage de la plaque un critère de convergence en $\frac{\lambda}{6}$.

A.4.1.4.c Synthèse

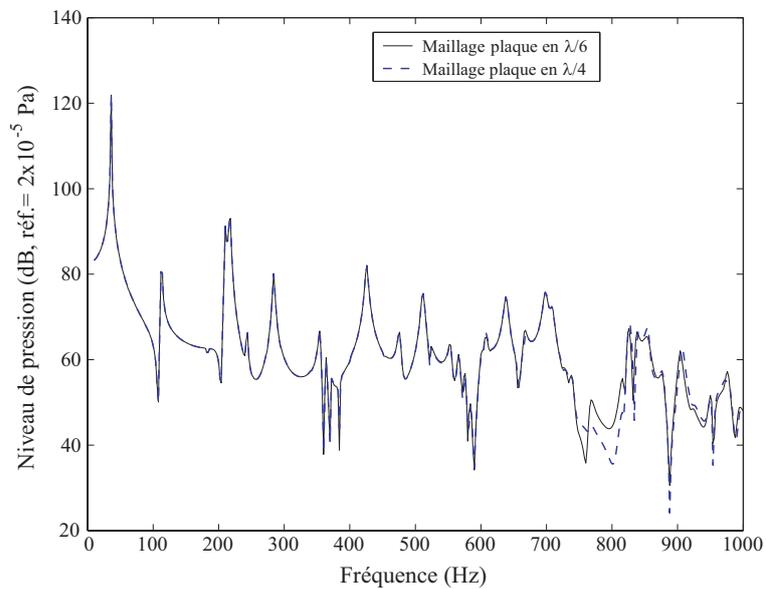
Le calcul de la réponse vibro-acoustique du système plaque-cavité couplé doit être réalisé avec les valeurs de critères suivantes :

- Critère de troncature modale : 1.2,
- Critère de convergence sur le maillage : $\frac{\lambda}{6}$ pour la plaque, $\frac{\lambda}{4}$ pour la cavité.

Notons que les temps de calcul CPU relatifs aux différents cas étudiés sont présentés sur la figure [A.23](#).

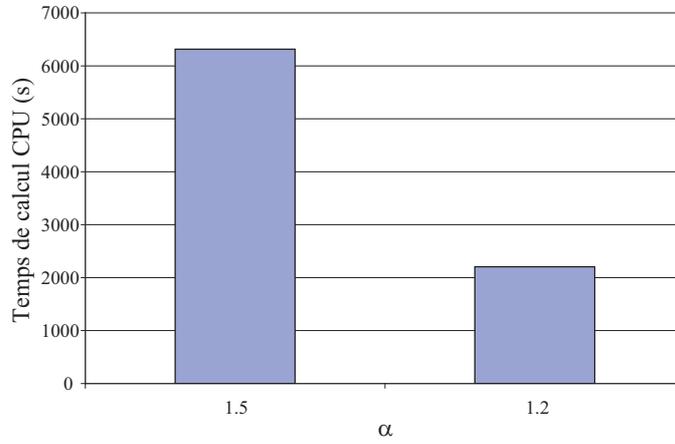


(a) Niveau de vitesse quadratique moyenne de la plaque.

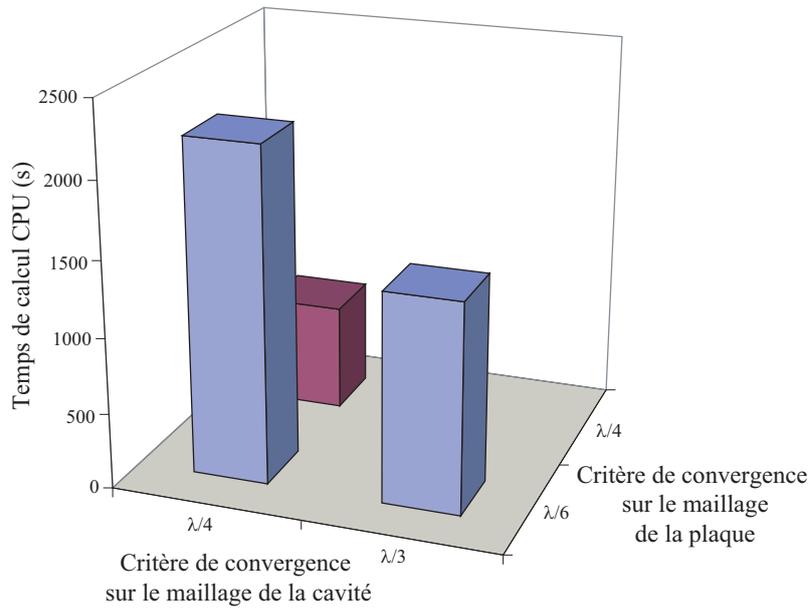


(b) Niveau de pression au point intérieur à la cavité M_1 .

FIG. A.22 – Comparaison des spectres calculés pour deux maillages différents de la plaque correspondant aux critères de convergence en $\frac{\lambda}{6}$ et $\frac{\lambda}{4}$. Le maillage de la cavité correspond à un critère en $\frac{\lambda}{4}$.



(a) Variation du critère de troncature modale α . Les maillages de plaque et de cavité correspondent à un critère de convergence respectivement en $\frac{\lambda}{6}$ et en $\frac{\lambda}{4}$.



(b) Variation du critère de convergence sur le maillage de la plaque et de la cavité. Le critère de troncature modale α est pris égal à 1.2.

FIG. A.23 – Temps de calcul CPU relatifs aux différents cas étudiés sous Translp2.

A.4.2 Optimisation du pas fréquentiel de calcul

Cette étude a seulement été réalisée pour le code semi-analytique `Plaqcav` dont les temps de calcul sont les plus faibles pour la configuration du problème traité.

On cherche à déterminer la valeur du pas fréquentiel de calcul Δf qui permet de répondre à ces deux besoins :

- une bonne restitution des phénomènes régissant le comportement vibro-acoustique du système,
- des temps de calcul faibles.

A.4.2.1 Configuration de calcul

On considère la plaque excitée par une force ponctuelle d'amplitude $F_0 = 1$ N placée au point M_0 de coordonnées $(x_0, y_0, z_0) = (0.25, 0.18, 0)$. Les calculs sont effectués pour une fréquence maximale $f_{max} = 2000$ Hz. Le critère de troncature modale est pris égal à 1.2 ; les plus grands modes de plaque *in vacuo* et de cavité rigide pris en compte sont respectivement $(m, n) = (15, 10)$ et $(q, r, s) = (8, 5, 11)$. Les différentes valeurs du pas de calcul fréquentiel Δf étudiées sont : 1, 2 et 5 Hz.

A.4.2.2 Résultats

L'analyse est effectuée à partir des spectres de niveau de vitesse quadratique moyenne de la plaque et des spectres de niveau de pression locale au point intérieur M_1 .

On peut observer sur les figures A.24 et A.25 que l'effet du pas fréquentiel Δf sur l'allure de la réponse vibro-acoustique du système couplé plaque-cavité est important en basses fréquences. Pour un pas fréquentiel grossier $\Delta f = 5$ Hz, on relève par rapport à un pas fréquentiel plus fin de légers décalages fréquentiels et des différences d'amplitude assez importantes aux fréquences de résonance. Par exemple, sur les spectres de niveau de vitesse quadratique moyenne (Cf. figure A.24), on note pour les pics de résonance liés aux modes couplés contrôlés par la plaque $S1$, $S2$ et $S4$ des décalages fréquentiels de 1 à 2 Hz mais surtout des écarts d'amplitude de l'ordre de 15 dB. On retrouve des tendances similaires pour les pics de résonance liés aux modes $S1$ et $S4$ figurant également sur les spectres de niveau de pression locale (Cf. figure A.25). Pour un pas fréquentiel égal à 2 Hz, les différences par rapport à un pas fréquentiel plus fin sont moins marquées. On ne relève pas de phénomène de décalage fréquentiel des pics de résonance ; des différences d'amplitude subsistent, elles sont moindres néanmoins : on peut noter par exemple sur les spectres des deux indicateurs un écart de 4 dB pour le pic de résonance lié au mode $S4$.

On peut voir sur les figures A.26 et A.27 que l'effet du pas fréquentiel Δf sur l'allure des spectres est minimale en plus hautes fréquences, où les densités modales des deux sous-systèmes, et plus particulièrement celle de la cavité, sont grandes.

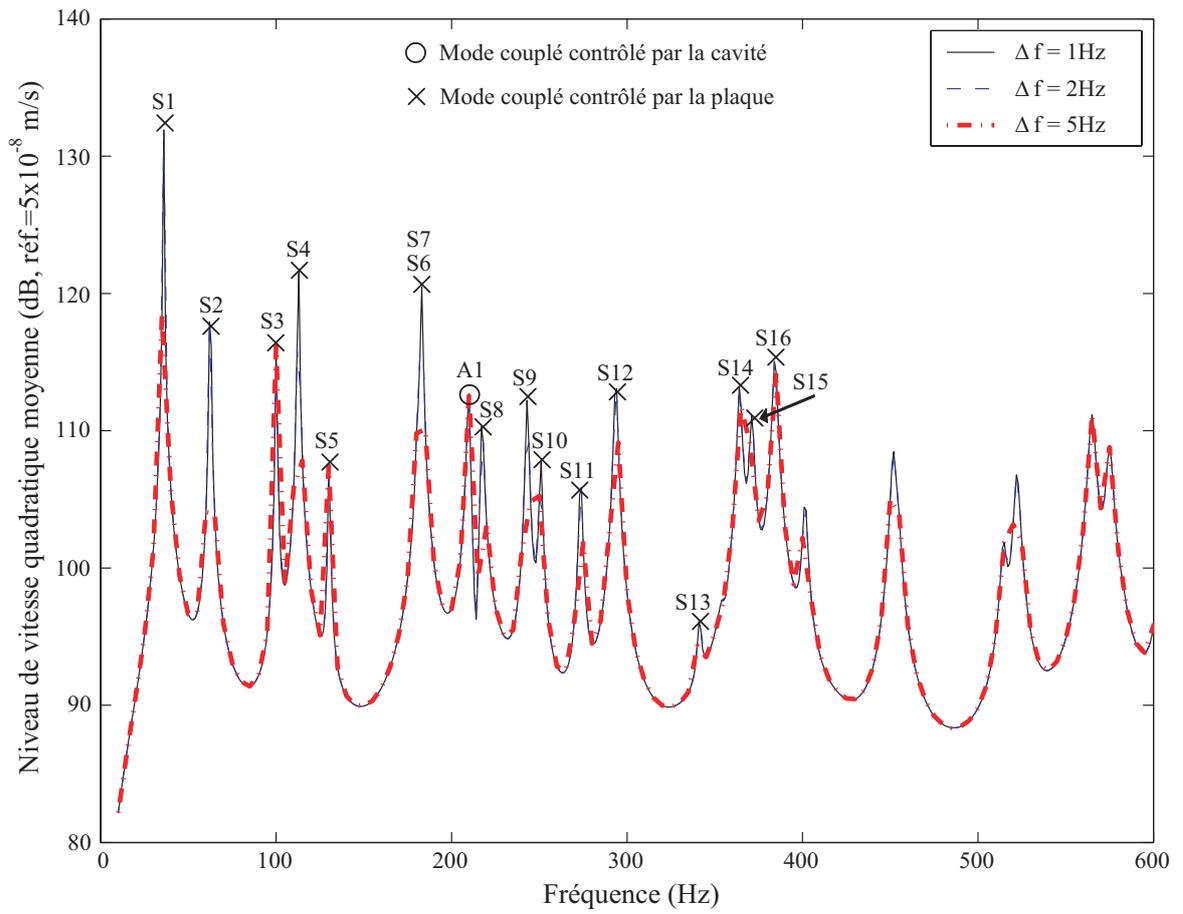


FIG. A.24 – Spectres de niveau de vitesse quadratique moyenne calculés pour les différentes valeurs de Δf . Zoom sur les basses fréquences [0, 600] Hz.

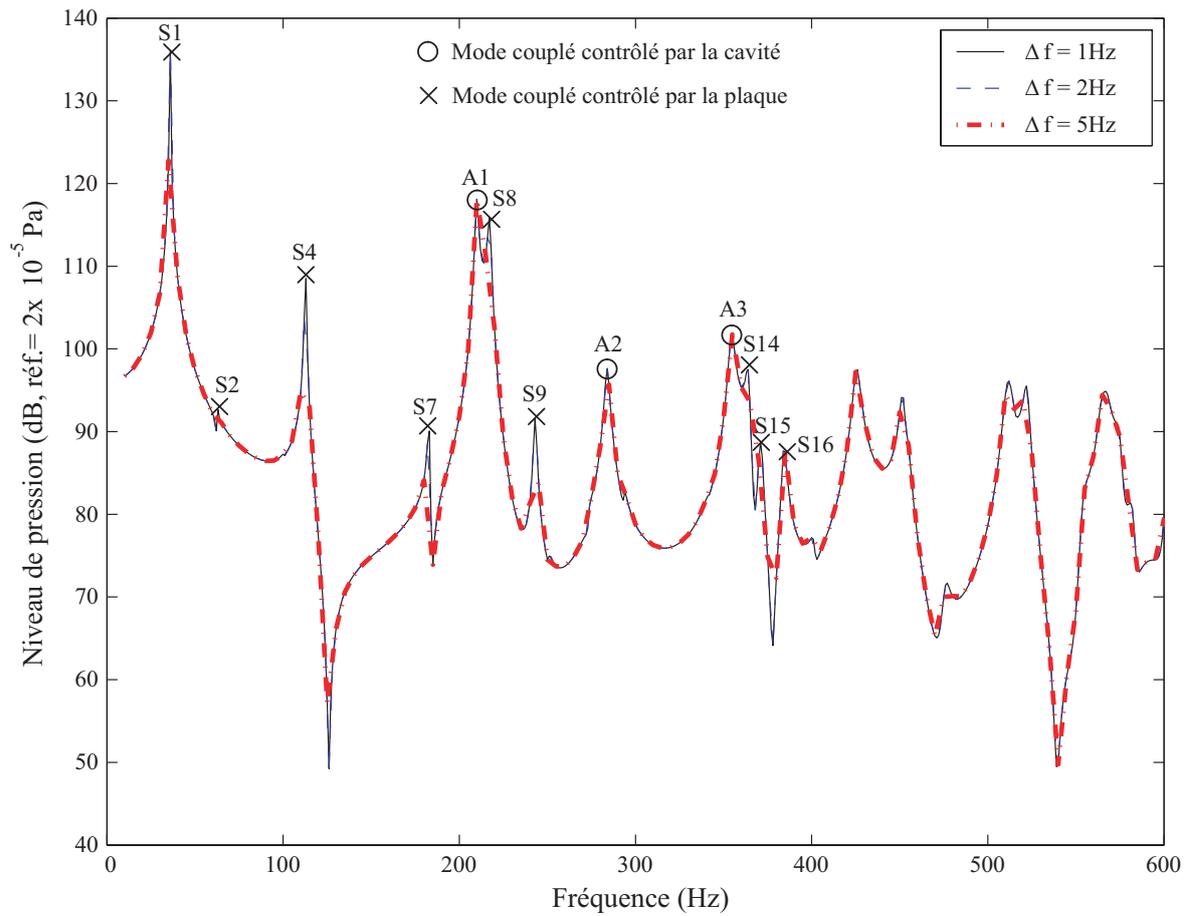


FIG. A.25 – Spectres de niveau de pression au point intérieur à la cavité M_1 calculés pour les différentes valeurs de Δf . Zoom sur les basses fréquences $[0, 600]$ Hz.

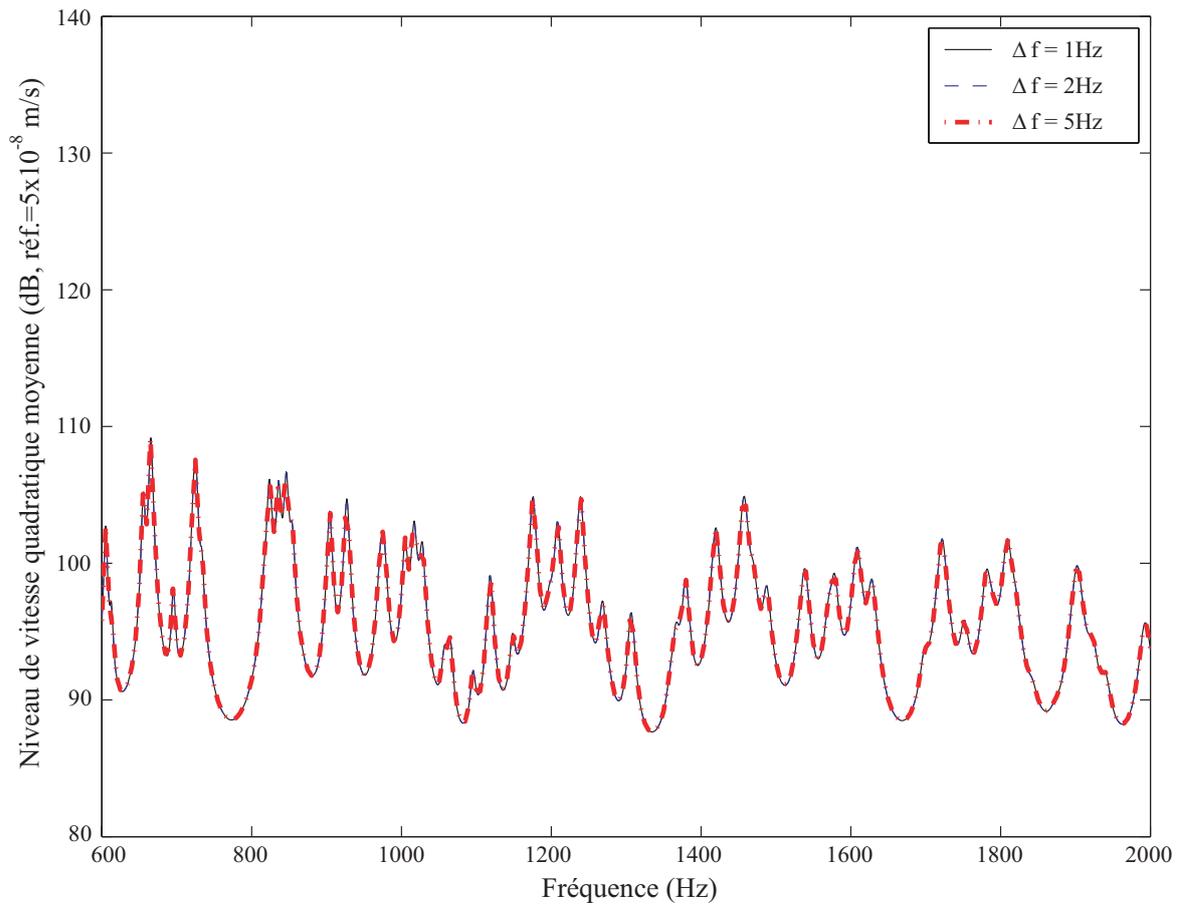


FIG. A.26 – Spectres de niveau de vitesse quadratique moyenne calculés pour les différentes valeurs de Δf . Zoom sur les plus hautes fréquences [600, 2000] Hz.

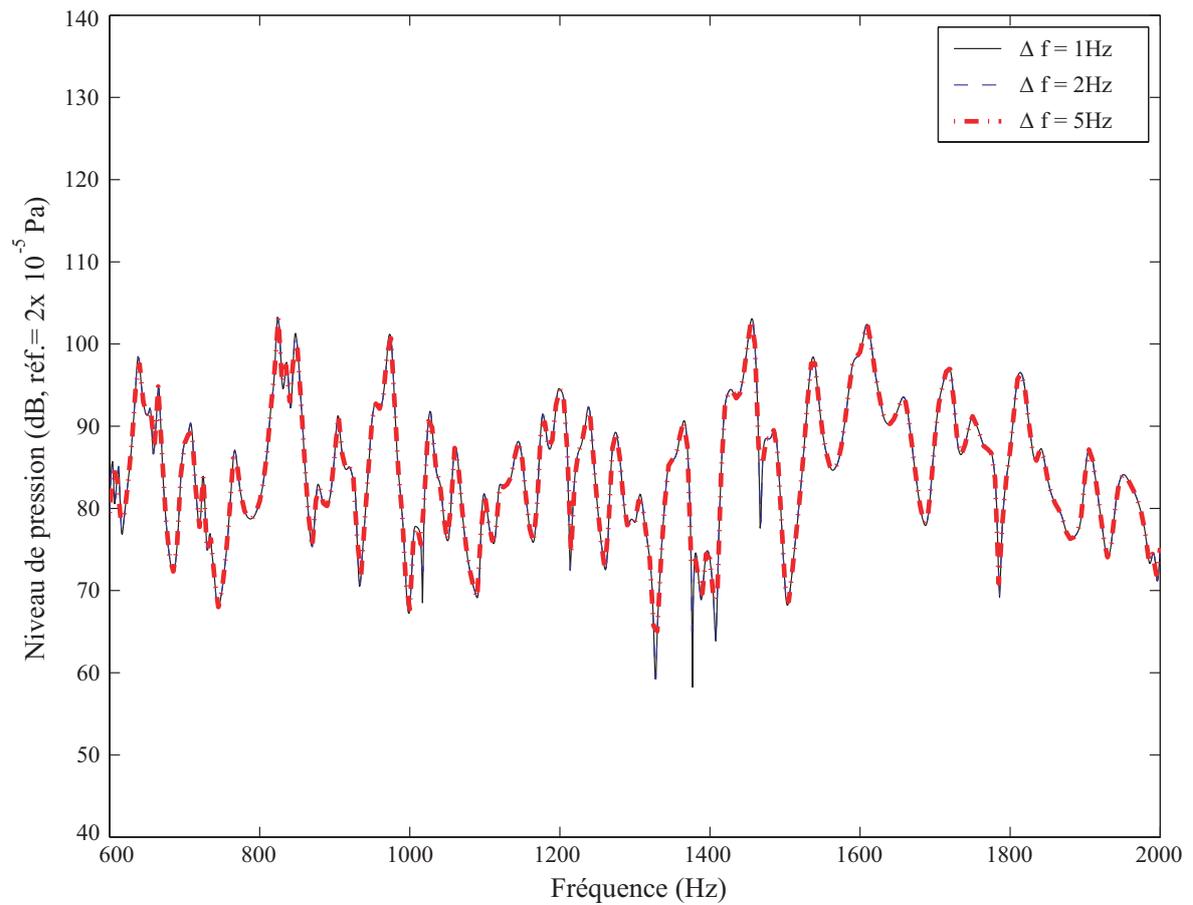


FIG. A.27 – Spectres de niveau de pression au point intérieur à la cavité M_1 calculés pour les différentes valeurs de Δf . Zoom sur les plus hautes fréquences [600, 2000] Hz.

Les temps de calcul CPU correspondant aux différentes valeurs de Δf sont donnés sur la figure A.28.

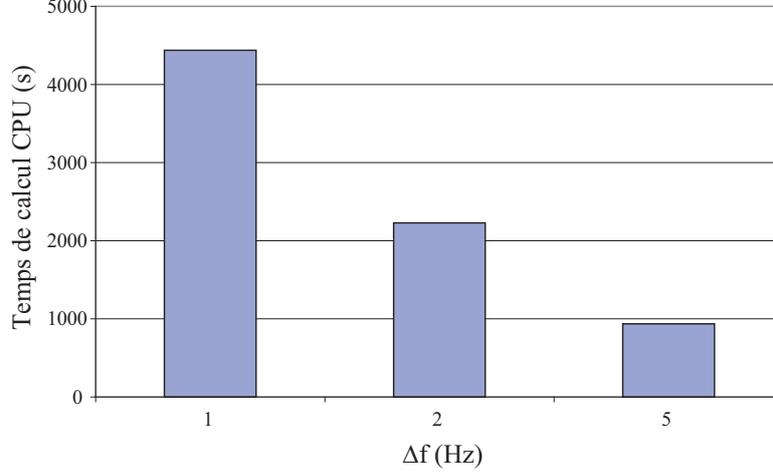


FIG. A.28 – Temps de calcul CPU en fonction du pas fréquentiel Δf .

Par rapport à $\Delta f = 1$ Hz, le temps de calcul CPU est divisé par 2 pour $\Delta f = 2$ Hz, par plus de 4 pour $\Delta f = 5$ Hz.

A.4.2.3 Synthèse

D'un point de vue vibro-acoustique, un pas fréquentiel de calcul de 5 Hz n'est pas satisfaisant en basses et moyennes fréquences; certes les temps de calcul sont très faibles, mais cette valeur ne permet pas de restituer correctement l'amplitude importante des premiers pics de résonance en basses fréquences. Si on veut mettre en évidence les phénomènes liés au comportement vibro-acoustique du système couplé, il paraît ainsi nécessaire de choisir un pas fréquentiel plus fin égal à 1 ou 2 Hz. Si l'on souhaite faire le choix de la rigueur, on optera plutôt pour un pas fréquentiel égal à 1 Hz.

A.4.3 Augmentation de la fréquence maximale de calcul

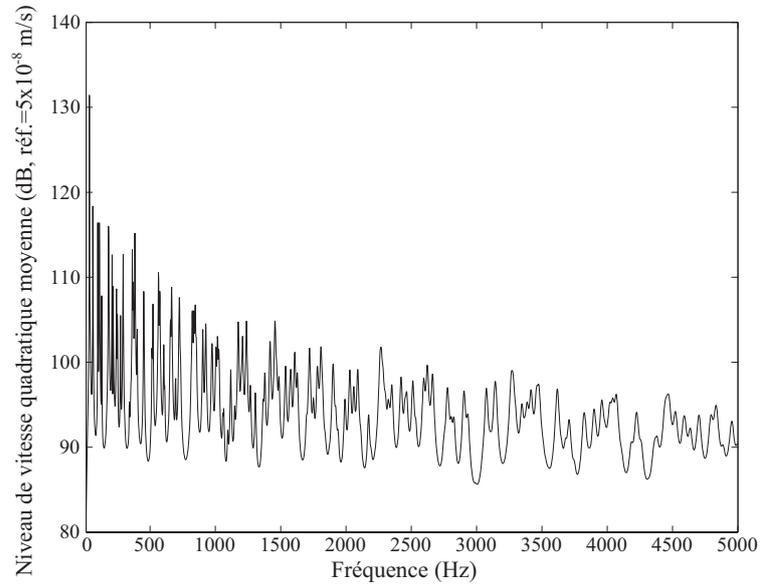
A.4.3.1 Plaqcav

A.4.3.1.a Configuration de calcul

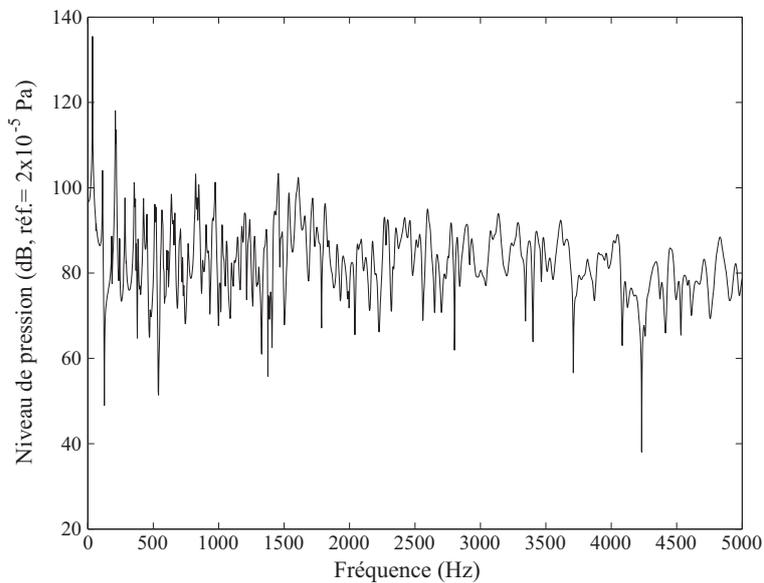
La force ponctuelle reste appliquée au point M_0 de coordonnées $(x_0, y_0, z_0) = (0.25, 0.18, 0)$. Le calcul est effectué avec un pas fréquentiel $\Delta f = 2$ Hz; on augmente la fréquence maximale de calcul f_{max} à 5000 Hz. Le critère de troncature modale est pris égal à 1.2; les plus grands modes de plaque *in vacuo* et de cavité rigide pris en compte sont respectivement $(m, n) = (24, 16)$ et $(q, r, s) = (21, 14, 28)$.

A.4.3.1.b Résultats

Les spectres de niveau de vitesse quadratique moyenne et de niveau de pression au point M_1 sont présentés sur la figure A.29.



(a) Niveau de vitesse quadratique moyenne de la plaque.



(b) Niveau de pression au point intérieur M_1 .

FIG. A.29 – Spectres des différents indicateurs vibro-acoustiques calculés pour une fréquence maximale de calcul $f_{max} = 5000$ Hz.

La figure A.30 récapitule les temps de simulation relatifs aux 3 valeurs de f_{max} testées : 1000, 2000 et 5000 Hz. Le temps de calcul CPU croît de façon exponentielle avec f_{max} ; pour

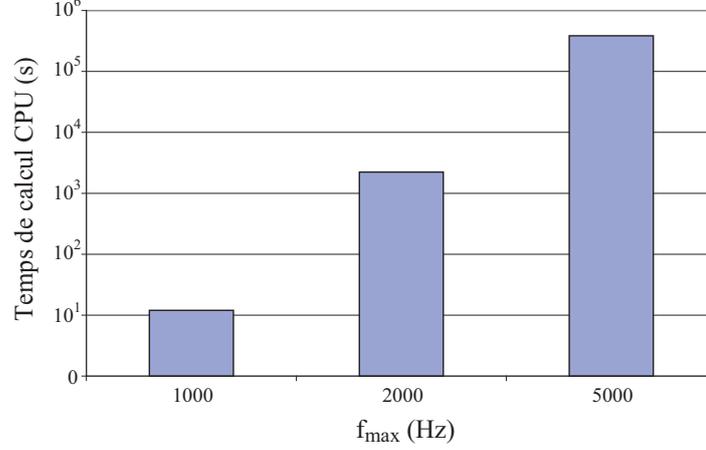


FIG. A.30 – Temps de calcul CPU en fonction de la fréquence maximale f_{max} .

$f_{max} = 5000$ Hz, le temps de calcul est considérable (384300 s, soit 4 j, 10 h et 45 min). La diminution des temps de calcul est indispensable si l'on veut calculer de manière répétitive la réponse vibro-acoustique du système pour des fréquences maximales de calcul élevées.

A.4.3.1.c Diminution des temps de calcul par une méthode de tri sélectif des termes de couplage

Hypothèses L'une des possibilités pour diminuer les temps de calcul est d'opérer une sélection sur les termes de couplage. La configuration de notre problème (plaque en acier couplée à une cavité assez profonde) nous autorise à faire l'hypothèse d'un couplage faible, i.e. on peut se limiter à ne prendre en compte que les termes qui traduisent les principaux effets dus au couplage vibro-acoustique (Cf. section 1.1), à savoir :

- l'effet de raideur acoustique ajoutée sur les premiers modes symétriques de plaque,
- le transfert énergétique important entre deux modes de plaque et de cavité fortement couplés.

Concrètement, cette double sélection s'appuie respectivement sur les indicateurs adimensionnels suivants :

- le ratio de raideur ajoutée p [DGS77] :

$$p = \frac{\rho_0 c^2 S^2 L_{0M}^2}{M_M V \omega_M^2} \quad (\text{A.76})$$

où M_M est la masse généralisée structurale, ω_M est la pulsation propre du mode de structure ψ_M et L_{0M} est le coefficient de couplage entre le mode rigide de cavité et le

mode de structure ψ_M .

– le facteur de transfert énergétique $F_{M,N}$ [PB90] :

$$F_{M,N} = \left[1 + \left[\frac{(\omega_N - \omega_M)}{2} \right]^2 \left[\frac{1}{B_{(M,N)^2}} \right] \right]^{-1} \quad (\text{A.77})$$

où ω_M et ω_N sont respectivement les pulsations propres du mode de cavité F_N et du mode de structure ψ_M et :

$$B_{(M,N)} = \left[\frac{\rho_0 c^2 V}{M_M M_N} \right]^{1/2} L_{NM} \quad (\text{A.78})$$

où M_M et M_N sont respectivement la masse généralisée structurale et la masse généralisée acoustique et L_{NM} est le coefficient de couplage entre le mode de cavité F_N et le mode de structure ψ_M .

Au final, cette méthode de tri conduit donc à remplacer les termes de couplage non sélectionnés par des 0 dans les équations généralisées de la structure (A.47). La résolution du système d'équations généralisées est alors moins coûteuse en temps de calcul.

Validation Le calcul est mené pour $f_{max} = 2000$ Hz et $\Delta f = 1$ Hz¹⁸. Sur la base des valeurs calculées du ratio de raideur ajoutée p , on prend en compte les termes de couplage entre les trois premiers modes symétriques de plaque $S1$ (1,1), $S4$ (3,1) et $S8$ (1,3), et le mode rigide de cavité $A0$ (0,0,0). On retient ensuite les termes de couplage entre les modes de plaque et les modes de cavité pour lesquels le facteur de transfert énergétique $F_{M,N}$ est supérieur ou égal à 0.2¹⁹ ; parmi ces couples figure notamment le couple composé du mode de structure $S8$ (1,3) et du mode de cavité $A1$ (0,0,1) pour lequel $F_{M,N}$ est le plus élevé (Cf. section 1.1).

Les figures A.31 et A.32 présentent les spectres de niveau de vitesse quadratique moyenne de la plaque et de niveau de pression au point intérieur M_1 calculés pour un couplage complet, i.e. avec prise en compte de tous les termes de couplage, et pour un couplage “partiel”, i.e. avec sélection des termes de couplage définis ci-avant.

Pour comparaison, les spectres sont également tracés pour l'hypothèse de fluide léger²⁰. Dans ce cas précis, on ne retrouve effectivement pas sur les spectres les principaux effets dûs au couplage vibro-acoustique : d'une part, on n'observe pas l'augmentation des fréquences propres des premiers modes de plaque liée à l'effet de raideur acoustique (les premiers pics de résonance interviennent aux fréquences propres *in vacuo* de la plaque) ; d'autre part, on ne retrouve pas le pic de résonance lié au mode de cavité longitudinal $A1$ (0,0,1), lequel est

¹⁸On choisit un pas fréquentiel égal à 1 Hz pour une meilleure visualisation des phénomènes.

¹⁹Critère jugé satisfaisant après essais.

²⁰Rappelons que, dans cette hypothèse, l'effet de la cavité sur la réponse de la plaque est négligé, i.e. tous les termes de couplage sont nuls dans les équations généralisées de la structure (A.47).

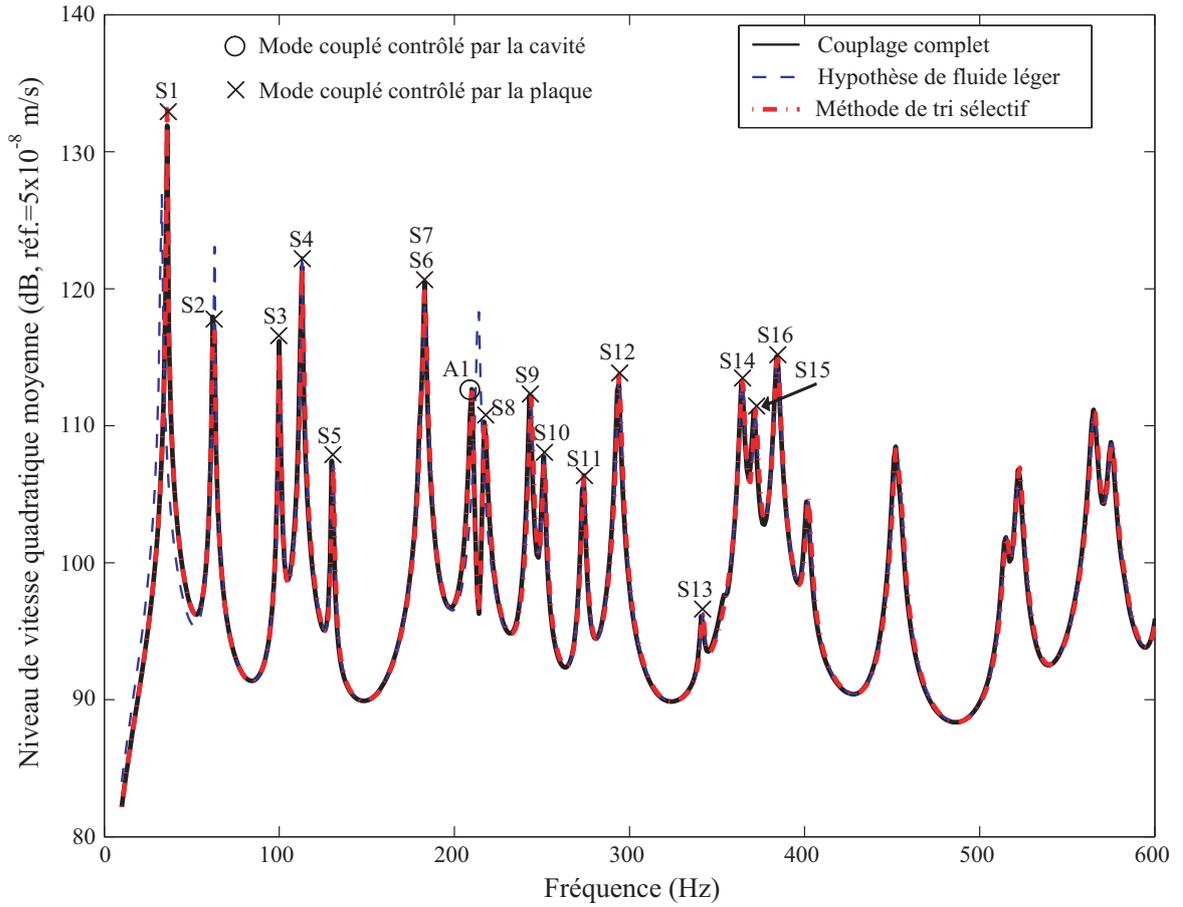


FIG. A.31 – Comparaison des spectres de niveau de vitesse quadratique moyenne obtenus pour un calcul complet, pour un calcul avec hypothèse de fluide léger et pour un calcul avec tri sélectif des termes de couplage. Zoom sur les basses fréquences [0, 600] Hz.

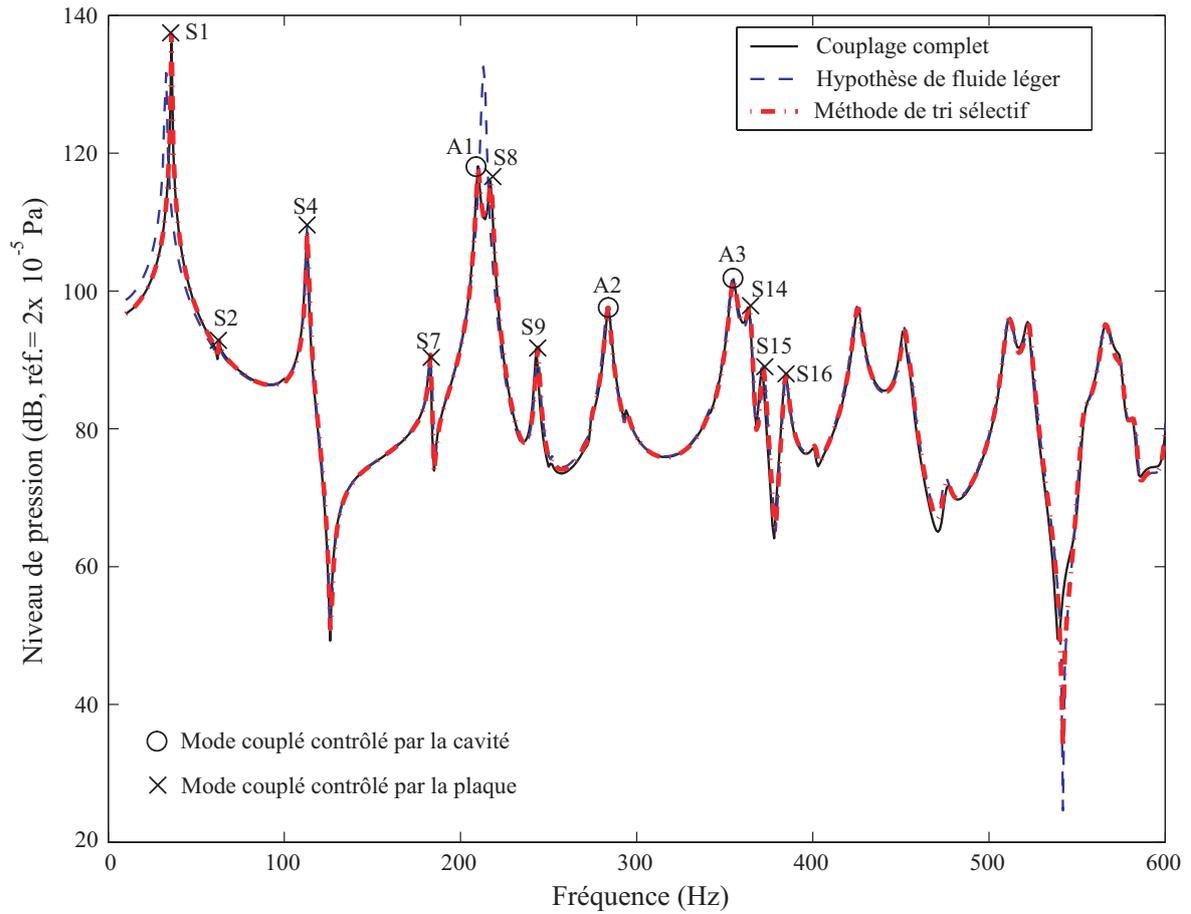


FIG. A.32 – Comparaison des spectres de niveau de pression au point intérieur à la cavité M_1 obtenus pour un calcul complet, pour un calcul avec hypothèse de fluide léger et pour un calcul avec tri sélectif des termes de couplage. Zoom sur les basses fréquences [0, 600] Hz.

fortement couplé avec le mode de plaque symétrique $S8$ (1,3) (i.e. on observe ainsi un pic singulier au lieu de deux pics normalement).

A contrario, on retrouve ces effets dûs au couplage vibro-acoustique sur les spectres calculés avec la méthode de tri sélectif. Par rapport aux spectres obtenus pour un calcul complet, on observe néanmoins quelques petits écarts en amplitude au niveau des premiers pics de résonance (1.5 dB au plus pour le premier pic de résonance lié au mode $S1$, à 36 Hz). Ces résultats satisfaisants valident la méthode proposée. Intéressons-nous maintenant à ses répercussions sur les temps de calcul.

Comparaison des temps de calcul Pour $f_{max} = 2000$ Hz et $f_{max} = 5000$ Hz²¹, les temps de calcul CPU correspondant à un calcul complet, à un calcul avec sélection des termes de couplage et à un calcul avec hypothèse de fluide léger sont présentés sur la figure A.33²².

Lorsque l'on utilise la méthode de tri sélectif, les temps de calcul sont divisés par au moins 3 pour $f_{max} = 2000$ Hz, par au moins 9 pour $f_{max} = 5000$ Hz; le gain de temps est ainsi considérable. Pour $f_{max} = 2000$ Hz, le temps de calcul correspondant à un calcul avec sélection des termes de couplage est sensiblement équivalent à celui correspondant à un calcul avec hypothèse de fluide léger. Pour des valeurs de f_{max} élevées, on pourra donc à l'aide de cette méthode prendre en compte les principaux effets liés au couplage sans rallonger les temps de calcul.

A.4.3.1.d Synthèse

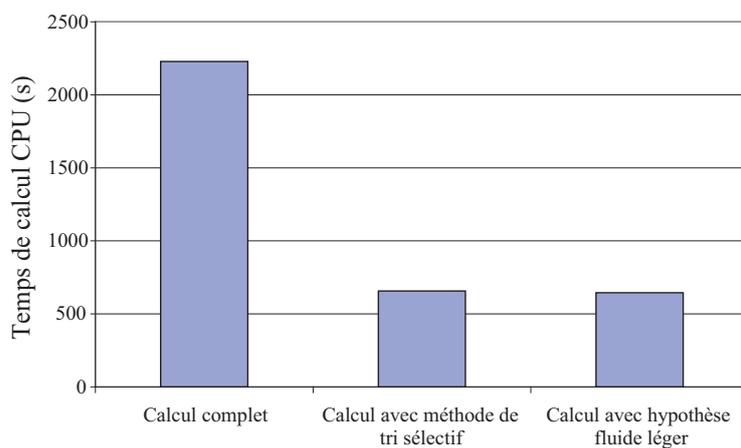
Pour des fréquences maximales de calcul élevées, les temps de calcul deviennent considérables en raison du nombre important de degrés de liberté du problème. L'emploi d'une méthode de sélection des termes de couplage permet de réduire significativement ces temps de calcul.

A.4.3.2 Translp2

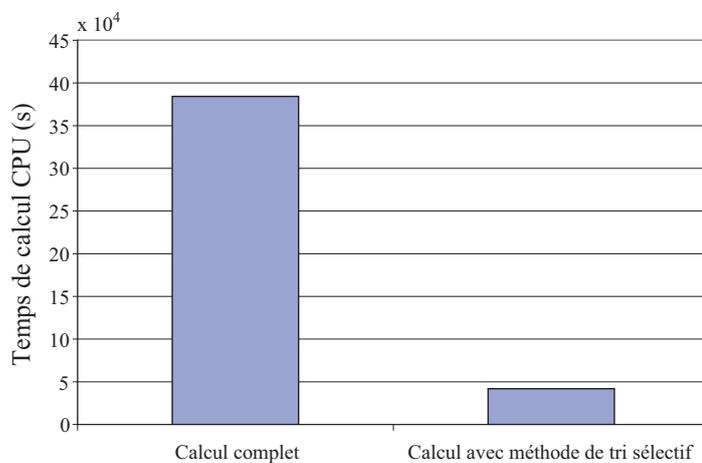
On utilise les valeurs optimales du critère de troncature modale et du critère de convergence sur le maillage définies dans la section A.4.1.4.c. On cherche à augmenter progressivement la fréquence maximale de calcul. La première valeur testée est $f_{max} = 1500$ Hz. Le calcul est stoppé à l'étape de calcul des modes propres de la cavité; le nombre de degrés de liberté est trop important pour Translp2.

²¹Pour ces 2 valeurs de f_{max} , $\Delta f = 2$ Hz.

²²Pour $f_{max} = 5000$ Hz, le calcul avec hypothèse de fluide léger n'a pu être effectué.



(a) $f_{max} = 2000$ Hz.



(b) $f_{max} = 5000$ Hz.

FIG. A.33 – Temps de calcul CPU pour les différents cas testés avec Plaqa_{cav}.

A.4.4 Conclusions et perspectives

Nous avons déterminé dans un premier temps les valeurs optimales des critères de convergence propres à chaque code.

Nous avons pu voir que, pour obtenir une représentation correcte des phénomènes liés au couplage vibro-acoustique, un pas fréquentiel de calcul assez fin (1 ou 2 Hz) est nécessaire.

Enfin, nous avons cherché à accroître, lorsque cela était possible, l'étendue de l'information fréquentielle en augmentant la fréquence maximale de calcul. Les codes numériques montrent vite certaines limites. Concernant `Plaqcav`, nous avons pu observer que les temps de calcul croissent de manière exponentielle avec f_{max} ; nous avons pu montrer qu'ils peuvent être notablement réduits en utilisant une méthode de tri des termes de couplage.

Nous avons jusqu'à maintenant considéré le problème d'optimisation uniquement d'un point de vue vibro-acoustique; il faut aussi prendre en compte la dimension perceptive du problème, qui a toute son importance dans le choix définitif des valeurs des différents paramètres de simulation. D'un point de vue perceptif, on doit en effet s'assurer que i) soit ce choix n'a pas d'influence sur la perception auditive d'un quelconque son rayonné par la plaque dans la cavité, ii) soit ce choix n'introduit pas un biais dans les tendances dégagées quant à l'influence des paramètres géométriques et mécaniques du système sur la perception des sons rayonnés par la plaque dans la cavité.

A.5 Comparaison des réponses vibro-acoustiques calculées par les différents outils

A.5.1 Définition du cas test

On considère la plaque excitée par une force ponctuelle d'amplitude $F_0 = 1$ N placée au point M_0 de coordonnées $(x_0, y_0, z_0) = (0.24, 0.20, 0)$. Les calculs sont effectués avec un pas fréquentiel $\Delta f = 2$ Hz et une fréquence maximale $f_{max} = 1000$ Hz. On utilise pour chaque code les valeurs optimales des critères de convergence définies dans la section A.4.

On confronte les résultats obtenus dans les cas suivants : `Plaqcav`, `Sysnoise FEM-FEM`, `Sysnoise FEM-BEM indirecte`, `Translp2`.

A.5.2 Confrontation des résultats

A.5.2.1 Fréquences propres des sous-systèmes découplés et du système couplé

Les valeurs des fréquences propres des sous-systèmes découplés calculées par `Sysnoise` et `Translp2` sont comparées à leurs valeurs théoriques (calculées par `Plaqcav`) dans le tableau A.3.

L'utilisation d'éléments finis quadratiques permet une meilleure approximation de ces fréquences : sur les fréquences propres *in vacuo* de la plaque, l'erreur maximale commise est de 0.18% pour `Translp2` contre 5.72% pour `Sysnoise` ; sur les fréquences propres de la cavité rigide, l'erreur maximale commise est de 0.16% contre 2.44%.

Pour information, les fréquences propres couplées du système calculées par `Sysnoise`²³ sont données dans le tableau A.4.

On retrouve comme prévu un décalage important (9.51%) de la fréquence propre du premier mode couplé $C1$ par rapport à la fréquence propre du mode de plaque *in vacuo* $S1$ (1,1) et une modification légère des fréquences propres des modes couplés $C8$ (0.47%) et $C9$ (0.98%) par rapport aux fréquences propres du mode de cavité rigide $A1$ (0,0,1) et du mode de plaque *in vacuo* $S8$ (1,3), auxquels ils sont respectivement liés.

A.5.2.2 Indicateurs de la réponse vibro-acoustique

La figure A.34 montre les spectres de niveau de vitesse quadratique moyenne. Sur le graphique, sont identifiés les premiers pics de résonance correspondant au calcul semi-analytique (`Plaqcav`). On observe une bonne adéquation entre les spectres calculés par `Plaqcav` et `Translp2` (seuls quelques légers écarts en amplitude apparaissent au niveau des anti-résonances). Cependant, les spectres fournis par `Sysnoise` (FEM-FEM et FEM-BEM indirecte) se différencient nettement des deux premiers spectres : un décalage fréquentiel se produit dès les basses fréquences (vers 350 Hz), il devient très important en plus hautes fréquences. On peut observer

²³Par résolution du problème d'oscillations libres.

A.5. Comparaison des réponses vibro-acoustiques calculées par les différents outils

Modes de plaque in vacuo			Fréquences propres f_{mn}				
N° Mode	m	n	Valeur théorique (Hz)	Sysnoise		Translp2	
				Valeur (Hz)	Ecart Théorie (%)	Valeur (Hz)	Ecart Théorie (%)
S1	1	1	32,67	32,70	0,10	32,64	0,11
S2	2	1	62,83	62,95	0,19	62,75	0,13
S3	1	2	100,53	101,07	0,54	100,47	0,06
S4	3	1	113,10	113,68	0,52	112,99	0,10
S5	2	2	130,69	131,25	0,43	130,53	0,13
S6	3	2	180,96	181,87	0,51	180,69	0,15
S7	4	1	183,47	185,36	1,03	183,34	0,07
S8	1	3	213,63	216,44	1,32	213,54	0,04
S9	2	3	243,79	246,52	1,12	243,56	0,10
S10	4	2	251,33	253,39	0,82	250,97	0,15
S11	5	1	273,95	278,64	1,71	273,79	0,06
S12	3	3	294,06	296,97	0,99	293,64	0,14
S13	5	2	341,81	346,48	1,37	341,36	0,13
S14	4	3	364,43	368,24	1,05	363,83	0,16
S15	1	4	371,97	381,00	2,43	371,81	0,04
S16	6	1	384,53	394,41	2,57	384,34	0,05
S17	2	4	402,13	410,94	2,19	401,81	0,08
S18	3	4	452,39	461,00	1,90	451,84	0,12
S19	6	2	452,39	461,15	1,93	451,88	0,11
S20	5	3	454,91	462,02	1,56	454,14	0,17
S21	7	1	515,23	532,08	3,27	515,03	0,04
S22	4	4	522,77	533,78	2,11	521,95	0,16
S23	6	3	565,49	576,14	1,88	564,58	0,16
S24	1	5	575,55	597,93	3,89	575,32	0,04
S25	7	2	583,09	601,09	3,09	582,53	0,10
S26	2	5	605,71	624,39	3,09	605,30	0,07
S27	5	4	613,25	627,69	2,36	612,17	0,18
S28	3	5	655,97	677,58	3,29	655,29	0,10
S29	8	1	666,02	698,08	4,81	665,89	0,02
S30	7	3	696,18	714,73	2,66	695,17	0,15
S31	6	4	723,83	738,96	2,09	722,53	0,18
S32	4	5	726,34	748,07	2,99	725,34	0,14
S33	8	2	733,88	765,06	4,25	733,36	0,07
S34	5	5	816,82	839,81	2,81	815,50	0,16
S35	1	6	824,36	871,52	5,72	824,15	0,03
S36	9	1	836,93	876,88	4,77	837,00	0,01
S37	8	3	846,98	878,13	3,68	845,96	0,12
S38	2	6	854,52	888,95	4,03	853,08	0,17
S39	7	4	854,52	901,05	5,44	854,11	0,05
S40	3	6	904,79	950,56	5,06	904,06	0,08
S41	9	2	904,79	953,65	5,40	904,44	0,04
S42	6	5	927,41	955,54	3,03	925,83	0,17
S43	4	6	975,16	1020,50	4,65	974,08	0,11
S44	8	4	1005,32	1039,48	3,40	1003,88	0,14

(a) Fréquences propres de la plaque *in vacuo*.

TAB. A.3 – Fréquences propres des sous-systèmes découplés.

Annexe A. Rapport préliminaire : Modélisation du comportement vibro-acoustique d'un système plaque-cavité. Optimisation et comparaison d'outils de calcul vibro-acoustique.

Modes propres de la cavité rigide				Fréquences propres f_{qrs}				
N° Mode	q	r	s	Valeur théorique (Hz)	Sysnoise		Translp2	
					Valeur (Hz)	Ecart Théorie (%)	Valeur (Hz)	Ecart Théorie (%)
A0	0	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
A1	0	0	1	212.50	212.72	0.10	212.50	0.00
A2	1	0	0	283.33	283.62	0.10	283.34	0.00
A3	1	0	1	354.17	354.53	0.10	354.17	0.00
A4	0	1	0	425.00	426.75	0.41	425.02	0.01
A5	0	0	2	425.00	427.74	0.64	425.05	0.01
A6	0	1	1	475.16	477.71	0.54	475.19	0.00
A7	1	1	0	510.79	512.40	0.32	510.81	0.00
A8	1	0	2	510.79	513.23	0.48	510.83	0.01
A9	1	1	1	553.23	555.56	0.42	553.25	0.00
A10	2	0	0	566.67	569.00	0.41	566.81	0.03
A11	0	1	2	601.04	604.21	0.53	601.09	0.01
A12	2	0	1	605.20	607.46	0.37	605.34	0.02
A13	0	0	3	637.50	643.41	0.93	637.83	0.05
A14	1	1	2	664.48	667.47	0.45	664.52	0.01
A15	1	0	3	697.63	703.15	0.79	697.94	0.04
A16	2	1	0	708.33	711.25	0.41	708.47	0.02
A17	2	0	2	708.33	711.84	0.50	708.48	0.02
A18	2	1	1	739.52	742.95	0.46	739.65	0.02
A19	0	1	3	766.18	772.62	0.84	766.48	0.04
A20	1	1	3	816.89	823.03	0.75	817.17	0.03
A21	2	1	2	826.05	829.96	0.47	826.19	0.02
A22	3	0	0	850.00	857.89	0.93	850.67	0.08
A23	0	2	0	850.00	858.92	1.05	851.06	0.12
A24	0	0	4	850.00	864.04	1.65	851.36	0.16
A25	2	0	3	852.95	871.98	2.23	853.32	0.04
A26	3	0	1	876.16	883.86	0.88	876.81	0.07
A27	0	2	1	876.16	897.55	2.44	877.19	0.12
A28	1	2	0	895.98	909.40	1.50	896.62	0.07
A29	1	0	4	895.98	916.95	2.34	897.28	0.14
A30	1	2	1	920.83	941.30	2.22	921.46	0.07
A31	3	1	0	950.33	958.17	0.82	950.97	0.07
A32	3	0	2	950.33	958.61	0.87	951.30	0.10
A33	0	2	2	950.33	959.53	0.97	951.32	0.10
A34	0	1	4	950.33	964.12	1.45	951.58	0.13
A35	2	1	3	952.97	970.81	1.87	953.32	0.04
A36	3	1	1	973.80	981.92	0.83	974.75	0.10
A37	1	2	2	991.67	1004.97	1.34	992.28	0.06
A38	1	1	4	991.67	1011.39	1.99	992.87	0.12
A39	2	2	0	1021.57	1034.57	1.27	1022.25	0.07
A40	2	0	4	1021.57	1041.21	1.92	1022.86	0.13

(b) Fréquences propres de la cavité rigide.

TAB. A.3 – Fréquences propres des sous-systèmes découplés. (suite et fin)

Modes acoustiques et structuraux découplés	Fréquence découplée (Hz)	Modes couplés	Fréquence couplée	Influence couplage (%)
A0	0,00	C0	0,00	0,00
S1	32,70	C1	35,81	9,51
S2	62,95	C2	62,62	0,53
S3	101,07	C3	100,77	0,30
S4	113,68	C4	113,48	0,18
S5	131,25	C5	130,98	0,21
S6	181,87	C6	181,65	0,12
S7	185,36	C7	185,04	0,17
A1	212,72	C8	211,71	0,47
S8	216,44	C9	218,57	0,98
S9	246,52	C10	246,18	0,14
S10	253,39	C11	253,20	0,08
S11	278,64	C12	278,57	0,02
A2	283,62	C13	284,20	0,20
S12	296,97	C14	296,82	0,05
S13	346,48	C15	346,37	0,03
A3	354,53	C16	355,11	0,16
S14	368,24	C17	368,29	0,01
S15	381,00	C18	380,72	0,07
S16	394,41	C19	394,46	0,01
S17	410,94	C20	410,78	0,04
A4	426,75	C21	427,46	0,17
A5	427,74	C22	428,12	0,09
S18	461,00	C23	460,96	0,01
S19	461,15	C24	461,02	0,03
S20	462,02	C25	461,86	0,03
A6	477,71	C26	478,40	0,14
A7	512,40	C27	512,97	0,11
A8	513,23	C28	513,48	0,05
S21	532,08	C29	532,01	0,01
S22	533,78	C30	533,59	0,04
A9	555,56	C31	556,12	0,10
A10	569,00	C32	569,30	0,05
S23	576,14	C33	576,11	0,00
S24	597,93	C34	597,82	0,02
S25	601,09	C35	600,75	0,06

TAB. A.4 – Fréquences propres couplées calculées par Sysnoise.

par ailleurs la présence incongrue de pics de résonance liés à des modes de structure d'indice n pair (par exemple le mode $S3$ (1, 2) à 100 Hz ou le mode $S6$ (3, 2) à 180 Hz) alors que leur force généralisée est théoriquement nulle (excitation sur un nœud).

La figure A.35 présente les spectres de niveau de pression au point M_1 intérieur à la cavité fournis par les différentes approches. En basses fréquences, les spectres sont relativement proches; on peut tout de même relever des différences d'amplitude au niveau de plusieurs pics de résonance (liés au modes $S8$ (1,3) et $A2$ (1,0,0) par exemple). Cependant, à partir de 400 Hz environ, les spectres calculés avec Sysnoise (FEM-FEM et FEM-BEM indirecte) se démarquent nettement des spectres obtenus pour Plaqcav et Translp2. Entre ces deux derniers, des divergences apparaissent seulement au niveau d'une anti-résonance vers 700 Hz et dans le domaine des plus hautes fréquences [900, 1000] Hz.

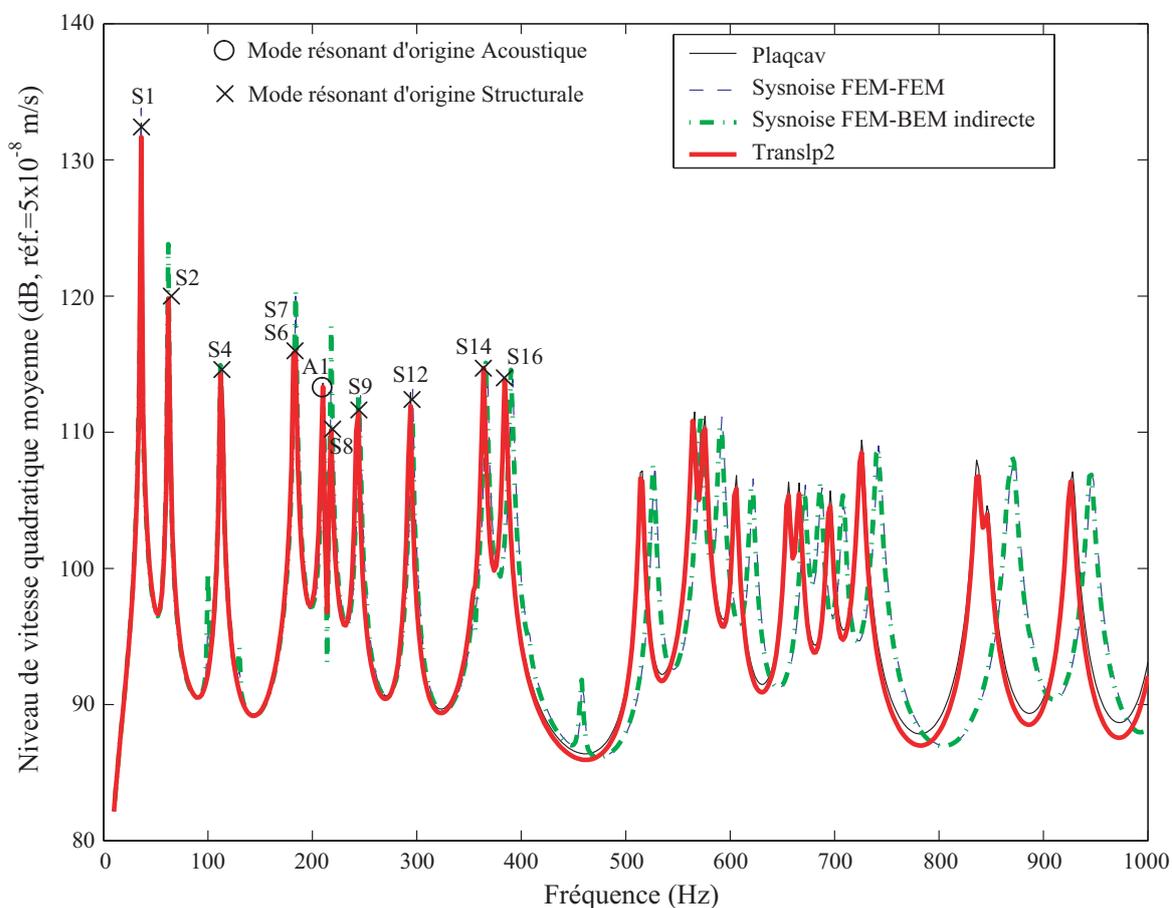


FIG. A.34 – Spectres de niveau de vitesse quadratique moyenne de la plaque calculés pour les différentes approches.

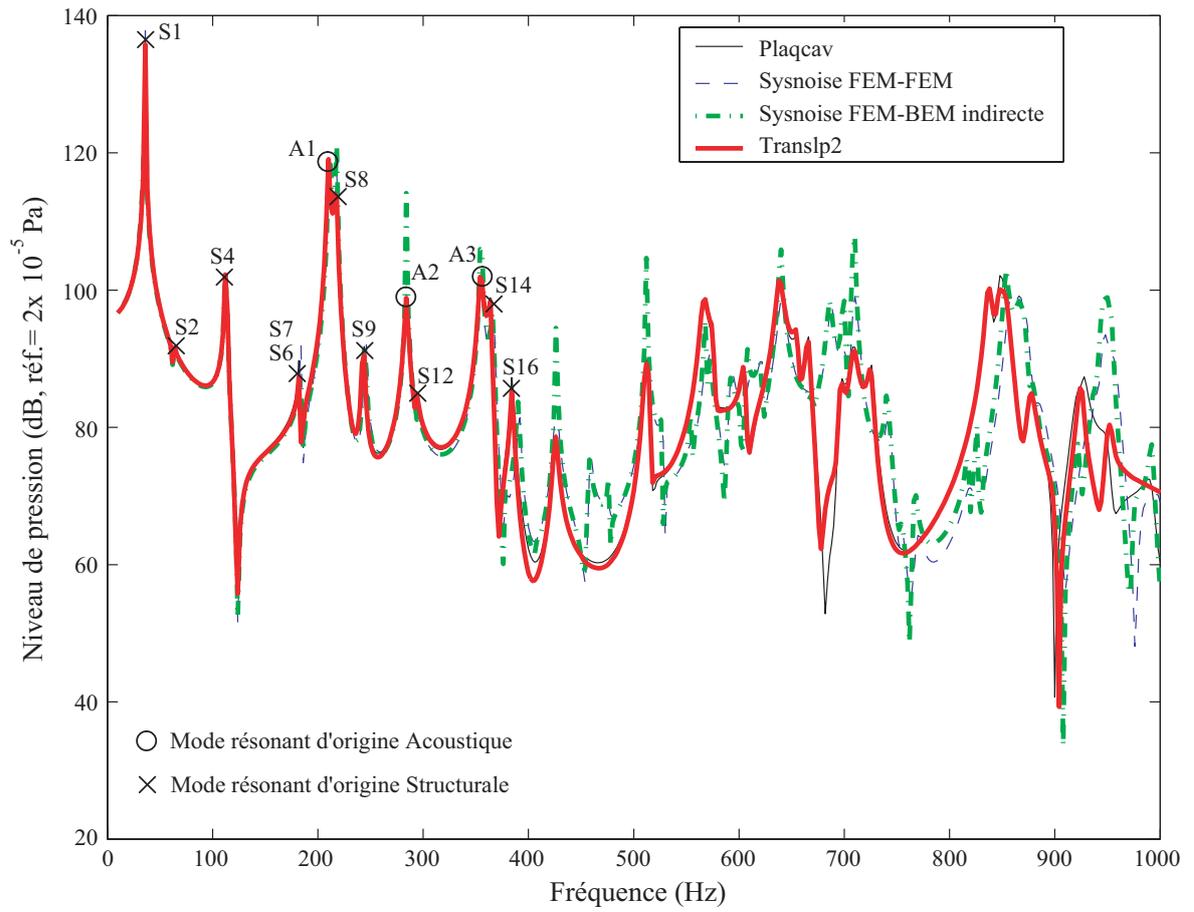


FIG. A.35 – Spectres de niveau de pression au point intérieur M_1 calculés pour les différentes approches.

A.5.3 Discussion

Nous avons pu constater que les spectres fournis par **Sysnoise** diffèrent fortement des autres spectres, ce qui était prévisible à la vue des écarts entre les fréquences propres calculées par **Sysnoise** et les fréquences propres théoriques.

Aussi, il est fortement probable que le maillage en éléments finis linéaires, et le type de fonction d'interpolation associé, soit à l'origine des différences observées. Il faudrait donc utiliser des éléments quadratiques dans **Sysnoise** pour obtenir des résultats plus fiables. Le logiciel ne permettant pas de manier directement ce type d'éléments, les maillages de la cavité et de la plaque doivent être réalisés sous **IDEAS** © M.T.S.. Ce dernier propose les éléments finis quadratiques. Ces maillages doivent être ensuite importés dans **Sysnoise** afin de lancer le calcul de la réponse vibro-acoustique du système plaque-cavité avec ce type de maillage.

A.5.4 Compléments

À la suite des observations faites ci-dessus, on procède à la modélisation par éléments finis quadratiques du système plaque-cavité sous **IDEAS**. Les maillages de la plaque et de la cavité sont identiques aux maillages optimaux définis sous **Translp2**, i.e. le maillage de la plaque répond à un critère de convergence en $\frac{\lambda}{6}$, celui de la cavité à un critère en $\frac{\lambda}{4}$. La réponse vibro-acoustique du système est ensuite calculée sous **Sysnoise**.

Sur la figure [A.36](#) sont comparés les spectres de niveau de vitesse quadratique de la plaque calculés sous **Plaqcav**, **Sysnoise** (éléments quadratiques) et **Translp2**. Cette fois-ci, le spectre calculé sous **Sysnoise** concorde avec les deux autres spectres ; l'important décalage fréquentiel relevé auparavant pour une modélisation par éléments finis linéaires a été éliminé.

La figure [A.37](#) compare les spectres de niveau de pression au point M_1 calculés suivant les différentes approches. On peut observer que les spectres obtenus par les 2 codes numériques **Sysnoise** et **Translp2** sont quasi-identiques. Ce constat supplémentaire permet de valider la démarche de calcul alliant modélisation par éléments finis quadratiques sous **IDEAS** et calcul vibro-acoustique sous **Sysnoise**.

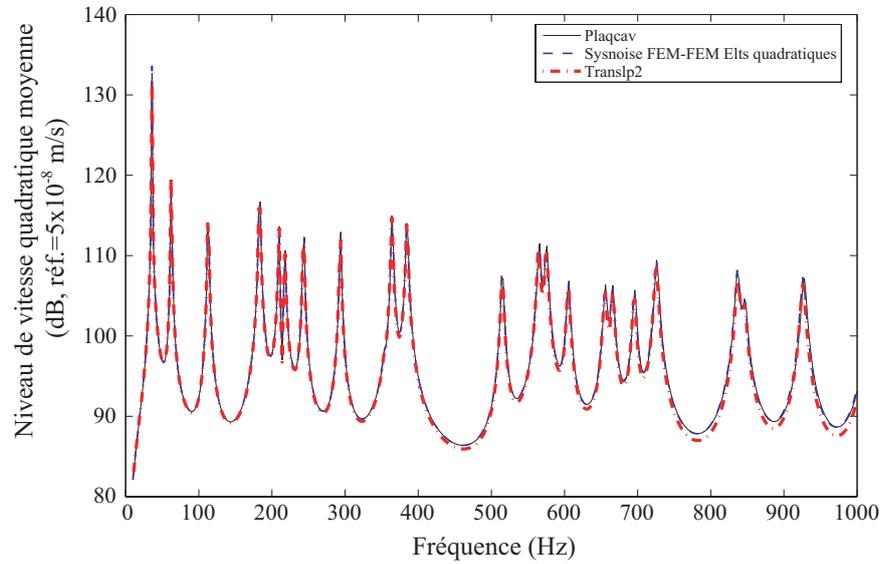


FIG. A.36 – Spectres de niveau de vitesse quadratique moyenne de la plaque calculés pour les différentes approches.

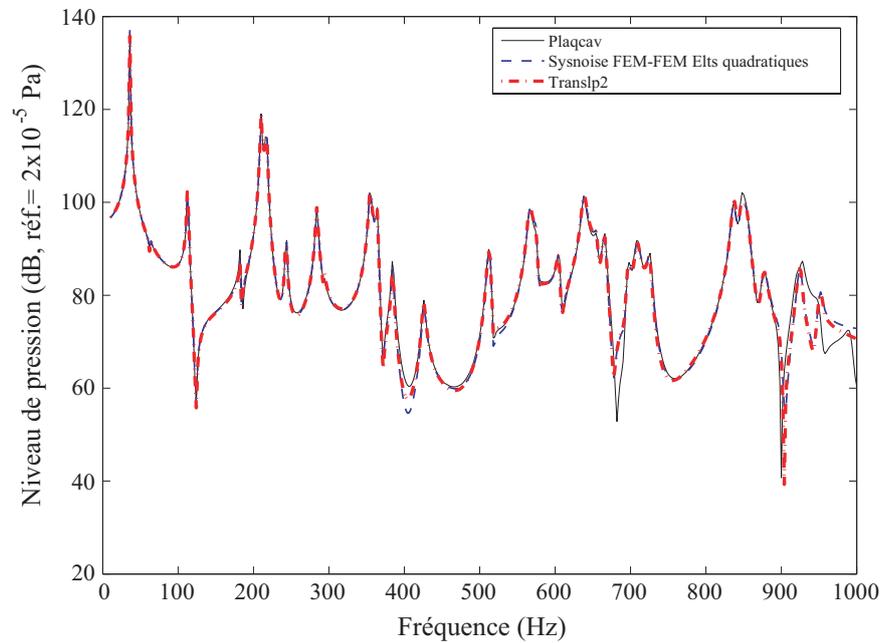


FIG. A.37 – Spectres de niveau de pression au point intérieur M_1 calculés pour les différentes approches.

Annexe B

Mesure du coefficient d'absorption acoustique en incidence normale

Le coefficient d'absorption en incidence normale $\alpha_{\theta=0^\circ}$ des deux matériaux utilisés lors de l'expérimentation (i.e. mousse réticulée et moquette synthétique, Cf. section 4.2.1) est mesuré au tube d'impédance ; la méthode adoptée est la *méthode du doublet microphonique*, adaptée de la norme ISO 10534-2 [ISO01]. Le principe de la mesure et le protocole expérimental utilisé sont respectivement présentés dans les sections B.1 et B.2 ; cette présentation est largement inspirée des références [Oln99, Tea07]. Les résultats de la mesure réalisée sur les deux matériaux sont exposés dans la section B.3.

B.1 Principe de la mesure

Le principe de la mesure de $\alpha_{\theta=0^\circ}$ au tube d'impédance est illustré au travers de la figure B.1.

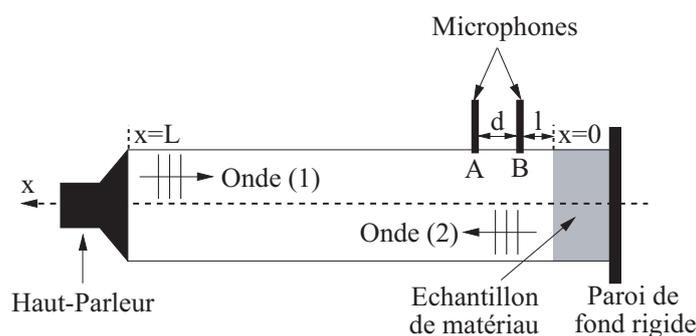


FIG. B.1 – Schéma illustratif du principe de mesure de $\alpha_{\theta=0^\circ}$ au tube d'impédance.

Un échantillon de matériau est placé à une extrémité, rigide, du tube ; l'abscisse du plan défini par la surface du matériau est prise comme origine de l'axe de symétrie x du tube (abscisse $x = 0$ sur la figure B.1). Le système est excité par un Signal sinusoïdal Pseudo-

Aléatoire (SPA)¹, émis par un haut-parleur placé à l'autre extrémité du tube (abscisse $x = L$ sur la figure B.1). En supposant une dépendance temporelle en $e^{j2\pi ft}$, le champ de pression résultant de la superposition de l'onde plane incidente (1) et de l'onde plane réfléchie (2) s'écrit :

$$P(x, f) = P_1(x, f) + P_2(x, f) = C \left(e^{jkx} + R e^{-jkx} \right) \quad (\text{B.1})$$

où C est l'amplitude complexe de l'onde incidente, k est le nombre d'onde et R le coefficient de réflexion du matériau.

Le coefficient de réflexion R peut être déterminé en résolvant le système d'équations constitué à partir de la connaissance du champ de pression en deux points de mesure A et B (Cf. figure B.1) :

$$\begin{cases} P(d+l, f) = C \left(e^{jk(d+l)} + R e^{-jk(d+l)} \right) = P_A(f) \\ P(l, f) = C \left(e^{jkl} + R e^{-jkl} \right) = P_B(f) \end{cases} \quad (\text{B.2})$$

où d est la distance qui sépare les points A et B , l est la distance qui sépare le point B de la surface du matériau (d'abscisse $x = 0$), et $P_A(f)$ et $P_B(f)$ sont les pressions mesurées aux points A et B .

Si le système est inversible, le coefficient de réflexion R peut être exprimé comme suit :

$$R(f) = \frac{H_{AB}(f) - e^{-jkd}}{e^{jkd} - H_{AB}(f)} e^{2jk(d+l)} \quad (\text{B.3})$$

où $H_{AB}(f)$ est la fonction de transfert entre les pressions mesurées aux points A et B définie par :

$$H_{AB}(f) = \frac{P_B(f)}{P_A(f)} \quad (\text{B.4})$$

Finalement, le coefficient d'absorption en incidence normale $\alpha_{\theta=0^\circ}$ du matériau est déterminé à partir de la connaissance de son coefficient de réflexion R , comme suit :

$$\alpha_{\theta=0^\circ}(f) = 1 - |R(f)|^2 \quad (\text{B.5})$$

B.2 Protocole expérimental

La mesure est réalisée au tube d'impédance de diamètre 46 mm de l'ENTPE (Cf. figure B.2); l'utilisation de ce dispositif permet de mesurer le coefficient d'absorption acoustique $\alpha_{\theta=0^\circ}$ dans l'intervalle de fréquences [100, 4200] Hz. Des microphones 1/4" B&K 4187 sont utilisés pour l'acquisition des signaux sonores.

L'échantillon à tester est découpé de telle sorte qu'il n'y ait pas de vide d'air au niveau des jointures avec la paroi latérale du tube; il est aussi prêté attention à ce que l'échantillon soit bien apposé contre la paroi de fond rigide (pas de plénum).

¹Le SPA est un bruit à large bande, consistant en une superposition de signaux sinusoïdaux auxquels il est affecté une phase choisie aléatoirement.

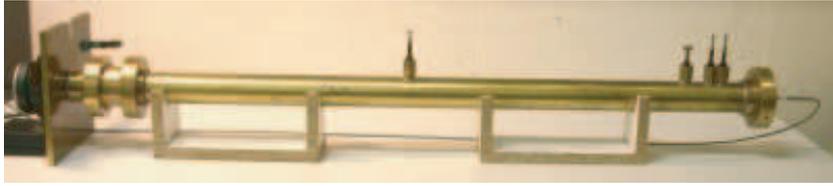


FIG. B.2 – Tube d'impédance de diamètre 46 mm de l'ENTPE.

Les différentes étapes du protocole expérimental (i.e. génération du SPA par le haut-parleur, calibration des microphones, acquisition des signaux acoustiques aux points A et B , détermination du coefficient d'absorption) sont pilotées automatiquement par un programme développé par Olny [Oln99] sous Labview © National instruments.

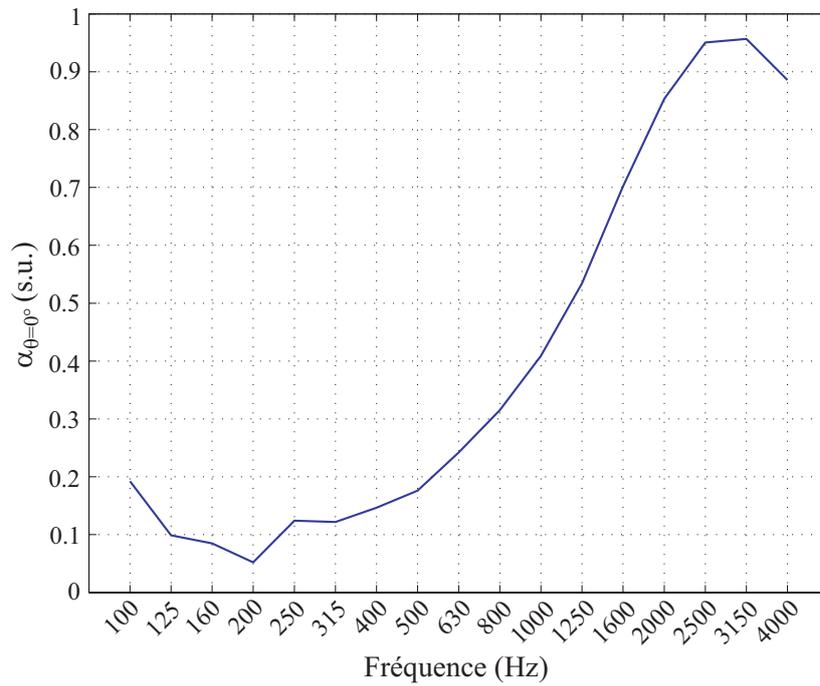
B.3 Résultats

Les figures B.3(a) et (b) présentent les courbes d'évolution du coefficient d'absorption acoustique $\alpha_{\theta=0^\circ}$ en fonction de la fréquence (en tiers d'octave) respectivement mesurées pour la mousse réticulée d'épaisseur 2 cm et la moquette synthétique d'épaisseur 5 mm².

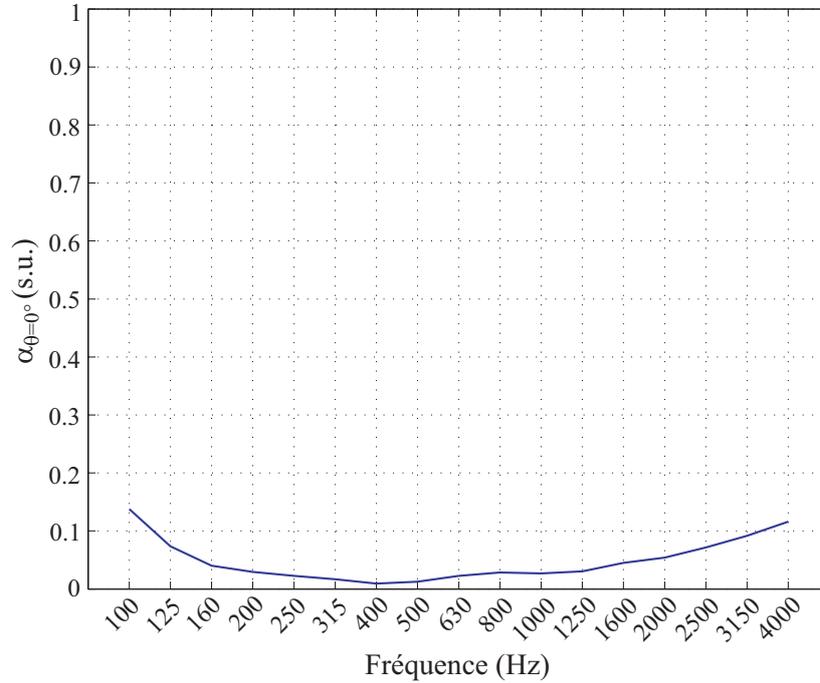
Étant donné son épaisseur, assez faible, la mousse présente globalement un bon coefficient d'absorption (Cf. figure B.3(a)) ; la courbe obtenue est typique du comportement en absorption d'une mousse réticulée avec une forte porosité et une faible résistivité au passage de l'air, pour laquelle la dissipation de l'énergie acoustique est principalement due aux effets visco-thermiques [All93].

Concernant la moquette (Cf. figure B.3(b)), le coefficient d'absorption reste globalement faible ; il ne dépasse pas 0.15 (à 100 Hz).

²La courbe mesurée pour la moquette synthétique d'épaisseur 5 mm est tirée de la référence [Goe04].



(a) Mousse réticulée d'épaisseur 2 cm.



(b) Moquette synthétique d'épaisseur 5 mm (tirée de la référence [Goe04]).

FIG. B.3 – Courbes d'évolution du coefficient d'absorption acoustique $\alpha_{\theta=0^\circ}$ en fonction de la fréquence (en tiers d'octave).

Annexe C

Compléments relatifs à l'analyse des effets de la variation des paramètres structuraux sur la réponse vibro-acoustique du système plaque-cavité

C.1 Paramétrages utilisés pour le calcul de la STFT

Sous le logiciel PSV-400 © Polytec, la STFT d'un signal temporel enregistré avec le vibromètre laser est calculée avec le paramétrage suivant :

- Fenêtre temporelle :
 - Type : Hanning,
 - Longueur : 8192 points (soit 640 ms pour une fréquence d'échantillonnage égale à 12800 Hz),
 - Recouvrement temporel ("Overlap") : 75%,
- Taille de la Transformée de Fourier Rapide — *Fast Fourier Transform* en anglais (FFT) — : 8192 points (soit un pas fréquentiel de calcul égal à 1.56 Hz, pour une fréquence d'échantillonnage égale à 12800 Hz).

Sous le logiciel dBSONIC © Cortex Instruments - 01dB Metravib Technologies [Cor04], la STFT d'un échantillon sonore est calculée avec le paramétrage suivant :

- Fenêtre temporelle :
 - Type : Hanning,
 - Longueur : 16384 points (soit 371.5 ms pour une fréquence d'échantillonnage égale à 44100 Hz),
 - Recouvrement temporel ("Overlap") : 75%,
- Taille de la FFT : 65536 points (soit un pas fréquentiel de calcul égal à 0.67 Hz, pour une fréquence d'échantillonnage égale à 44100 Hz).

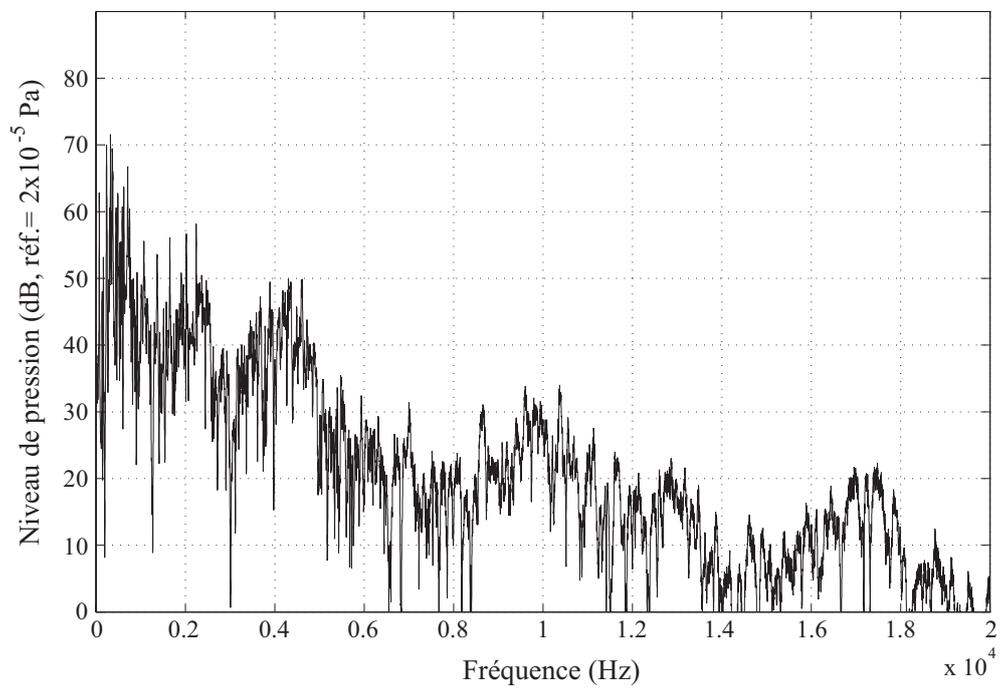


FIG. C.1 – Spectre de niveau de pression mesuré au point M_2 pour le stimulus K_1 ($[0, 20000]$ Hz).

C.2 Éléments d'analyse modale

Modes propres			Fréquences propres f_{mn}								
N° Mode	m	n	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)
S1	1	1	50,63	50,63	48,75	55,63	60,63	62,50	71,25	71,88	73,75
S2	2	1	85,00	84,38	82,50	99,38	108,75	111,88	128,13	131,25	135,63
S3	1	2	101,88	103,13	100,00	112,50	114,38	115,00	161,88	161,25	161,88
S4	2	2	133,75 ? 135,63 ?	136,88	131,88 ? 133,13 ?	156,88	160,00 ? 161,25 ?	162,50	219,38	223,13	223,13
S5	3	1	142,50	140,00	139,38	165,63	175,63	183,13	225,63	228,75	235,00
S6	1	3	183,13	184,38 ? 185,63 ?	179,38	205,63	206,25	206,25	301,25	299,38	299,38
S7	3	2	191,26	192,50	190,00	223,13	228,13 ? 229,38 ?	232,50	317,50	319,38	318,75 ? 320,00 ?
S8	2	3	213,13 ? 214,38 ?	216,85	210,63 ? 212,50 ?	248,75	251,88	254,38	359,38	358,75	358,13
S9	4	1	219,38	219,00	216,25	254,38	264,38	272,50	-	361,25	370,00
S10	4	2	253,75	256,88 ? 268,75 ?	256,90	310,00	305,00	309,38	433,13 ? 443,13 ? 454,38 ?	443,13	439,38 ? 453,13 ? 457,50 ?
S11	3	3	271,25	-	267,50	318,75	315,63	309,38 ? 321,25 ?	443,13 ? 454,38 ?	453,13	457,50 ? 467,50 ?
S12	1	4	286,88	290,00 ? 293,75 ?	286,88	328,13	329,38	331,00	487,50	481,88	484,38
S13	5	1	319,38	318,13	316,25	361,88 ? 373,13 ?	382,50	387,50 ? 400,00 ?	520,63	527,50	532,50
S14	2	4	328,75	324,00	321,25	373,13 ? 388,13 ?	-	370,63 ? 387,50 ?	541,25	545,00	547,50
S15	4	3	343,75	343,00	342,50	388,13 ? 400,00 ? 426,25 ?	393,13 406,25	400,00 ? 427,50 ?	573,13	582,50	580,00 ? 598,63 ? 604,38 ?
S16	5	2	357,50	354,38	353,13	426,25 ? 432,50 ?	426,88 ? 433,13 ?	442,00	616,25 ? 636,25 ?	617,50 ? 639,38 ?	613,75
S17	3	4	374,00 ? 396,88 ?	373,75 ? 399,38 ?	371,88 ? 398,13 ?	432,50 ? 448,75 ?	438,00	456,88	636,25 ? 660,00 ?	639,38	643,75
S18	1	5	427,50	432,50	424,38	476,63 ? 491,25 ?	491,25 ? 496,25 ?	481,25 ? 493,13 ? 498,13 ?	725,63	721,25	726,88
S19	6	1	431,88	426,25	430,63	503,13	520,00	531,88	-	735,63	744,38
S20	5	3	448,13	443,13	440,63	503,13 ? 517,50 ? 526,88 ?	531,82 ? 543,75 ?	536,25	758,13	761,25	764,38
S21	4	4	453,75	449,38	454,38	526,88	-	-	758,13 ? 775,63 ?	761,25 ? 780,00 ?	764,80 ? 782,50 ?
S22	2	5	458,75	460,63	456,88	536,88	543,75	539,00	-	-	-
S23	6	2	472,50 ? 488,75 ?	478,00	475,00	561,25 ? 587,50 ?	564,38 ? 590,00 ?	573,75 ? 581,88 ?	823,75	824,38	826,25 ? 828,75 ?
S24	3	5	522,50	525,00	520,00	612,60	590,00 ? 615,00 ?	594,38 ? 620,00 ?	859,38	858,75	861,88
S25	5	4	540,00	544,00 ? 550,00 ?	536,25 ? 540,00 ?	631,25 ? 641,88 ? 650,00 ?	636,25 ? 644,38 ? 646,25 ?	646,25 ? 649,38 ? 650,63 ?	935,63	944,38	951,88

TAB. C.1 – Caractéristiques — indices (m,n) et fréquences propres f_{mn} — des modes couplés d'origine structurale pour les configurations A à I (entre parenthèses, sont rappelées respectivement les modalités des facteurs α , β et γ). Un tiret (-) indique un mode non détecté. Un point d'interrogation (?) indique une incertitude sur la fréquence propre du mode concerné.

Modes propres			Fréquences propres f_{mn}								
N° Mode	m	n	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)
S26	6	3	554,38 ? 561,25 ?	567,50	549,38	650,00	660,60	665,63			
S27	7	1	561,25 ? 568,13 ?	560,00	565,00	671,25	681,25	695,00 ? 698,13 ?			
S28	4	5	608,13	576,25	577,50 ? 585,00 ?	-	-	688,75 ? 690,00 ? 695,00 ?			
S29	1	6	594,38	-	585,00	671,25 ? 688,13 ?	689,38	673,13 ? 688,75 ?			
S30	7	2	616,00 ?	607,50 ? 621,25 ?	603,75 ? 612,00 ?	731,25	734,38	753,75 ? 755,63 ?			
S31	2	6	616,00 ? 620,00 ?	621,25 ? 632,50 ?	615,63	724,38 731,25	720,00	723,75			
S32	6	4	648,75 ? 666,25 ?	666,88	646,25	775,60 ? 781,25 ?	777,50 ? 783,13 ?	785,63			
S33	3	6	666,25 ? 677,50 ?	666,88 ? 677,50 ? 681,82 ?	661,88	781,25	-	-			
S34	5	5	683,00	-	661,88 ? 676,25 ?	797,50	801,25	802,50 ? 808,75 ?			
S35	7	3	688,13	696,88	680,00	809,38	825,00	830,00			
S36	8	1	710,63	710,00	713,13	845,00	862,50	869,38			

TAB. C.1 – Caractéristiques — indices (m,n) et fréquences propres f_{mn} — des modes couplés d'origine structurale pour les configurations A à I (entre parenthèses, sont rappelées respectivement les modalités des facteurs variables α , β et γ). Un tiret (-) indique un mode non détecté. Un point d'interrogation (?) indique une incertitude sur la fréquence propre du mode concerné. (*suite et fin*)

Modes propres				Fréquences propres théoriques f_{qrs}^{theo} (Hz)
N° Mode	q	r	s	
A0	0	0	0	0,00
A1	0	0	1	242,86
A2	1	0	0	283,33
A3	0	1	0	340,00
A4	1	0	1	373,17
A5	0	1	1	417,83
A6	1	1	0	442,58
A7	0	0	2	485,71
A8	1	1	1	504,83
A9	1	0	2	562,31
A10	2	0	0	566,67
A11	0	1	2	592,89
A12	2	0	1	616,51
A13	1	1	2	657,11
A14	2	1	0	660,84
A15	0	2	0	680,00
A16	2	1	1	704,05
A17	0	2	1	722,07
A18	0	0	3	728,57
A19	1	2	0	736,67
A20	2	0	2	746,34
A21	1	2	1	775,67
A22	1	0	3	781,73
A23	0	1	3	804,00
A24	2	1	2	820,14
A25	0	2	2	835,65
A26	3	0	0	850,00
A27	1	1	3	852,46
A28	1	2	2	882,38
A29	3	0	1	884,01
A30	2	2	0	885,16
A31	3	1	0	915,48
A32	2	2	1	917,87
A33	2	0	3	923,00
A34	3	1	1	947,14
A35	0	0	4	971,43
A36	3	0	2	978,99
A37	2	1	3	983,63
A38	0	2	3	996,60
A39	2	2	2	1009,67

TAB. C.2 – Fréquences propres théoriques f_{qrs}^{theo} des modes propres de la cavité nue, considérée comme entièrement rigide.

Annexe C. Compléments relatifs à l'analyse des effets de la variation des paramètres structuraux sur la réponse vibro-acoustique du système plaque-cavité

Voie 1 (Gauche)		Voie 2 (Droite)	
Fréquence (Hz)	Mode	Fréquence (Hz)	Mode
47,10	S1 (1,1)	47,10	S1 (1,1)
78,10	S2 (2,1)	78,10	S2 (2,1)
97,60	S3 (1,2)	97,60	S3 (1,2)
128,50	S4 (2,2)	128,50	S4 (2,2)
135,30	S5 (3,1)	135,30	S5 (3,1)
174,30	S6 (1,3)?	172,90	S6 (1,3)?
189,10	S7 (3,2)	189,10	S7 (3,2)
218,70	S8 (2,3);S9 (4,1)	218,70	S8 (2,3);S9 (4,1)
249,00	A1 (0,0,1)	249,00	A1 (0,0,1)
282,00	A2 (1,0,0)?;S12 (1,4)?	284,60	A2 (1,0,0)?;S12 (1,4)?
290,00	A2 (1,0,0)?;S12 (1,4)?	289,40	A2 (1,0,0)?;S12 (1,4)?
347,90	A3 (0,1,0)?;S15 (4,3) S16 (5,2)	348,60	A3 (0,1,0)?;S15 (4,3) S16 (5,2)
383,60	A4 (1,0,1)?;S17 (3,4)?	383,60	A4 (1,0,1)?;S17 (3,4)?
395,00	A4 (1,0,1)?;S17 (3,4)?	395,00	A4 (1,0,1)?;S17 (3,4)?
425,30	A5 (0,1,1)?;S18(1,5) S19 (6,1)	428,60	A5 (0,1,1)?;S18(1,5) S19 (6,1)
454,90	A6 (1,1,0);S20 (5,3) S22 (2,5)	454,20	A6 (1,1,0);S20 (5,3) S22 (2,5)
494,60	A7 (0,0,2)?;S23 (6,2)?	493,90	A7 (0,0,2)?;S23 (6,2)?
517,50	A8 (1,1,1)?;S24 (3,5)	518,10	A8 (1,1,1)?;S24 (3,5)
547,10	S25 (5,4)	549,10	S25 (5,4)
557,80	S26 (6,3)?;S27 (7,1)? A9 (1,0,2)?;A10 (2,0,0)?	557,20	S26 (6,3)?;S27 (7,1)? A9 (1,0,2)?;A10 (2,0,0)?
582,70	A11 (0,1,2)?	581,40	A11 (0,1,2)?
607,00	S28 (4,5)	604,90	S28 (4,5)
614,40	S30 (7,2);S31(2,6)?	-	-
633,20	A12 (2,0,1)?	633,90	A12 (2,0,1)?
683,70	S33 (3,6)?;A13 (1,1,2)? S34 (5,5)?;A14 (2,1,0)?	679,00	S33 (3,6)?;A13 (1,1,2)? S34 (5,5)?;A14 (2,1,0)?
695,80	A15 (0,2,0) ?	698,50	A15 (0,2,0) ?

(a) Stimulus A_1 .

TAB. C.3 – Identification de modes couplés à l'origine de pics de résonance visibles sur les spectres de niveau de pression aux points M_1 et M_2 . Un point d'interrogation (?) indique une incertitude sur l'identité du mode à l'origine du pic de résonance observé.

Voie 1 (Gauche)		Voie 2 (Droite)	
Fréquence (Hz)	Mode	Fréquence (Hz)	Mode
46,40	S1 (1,1)	46,40	S1 (1,1)
79,40	S2 (2,1)	79,40	S2 (2,1)
96,20	S3 (1,2)	95,60	S3 (1,2)
133,20	S4 (2,2);S5 (3,1)	133,90	S4 (2,2);S5 (3,1)
174,30	S6 (1,3)?	171,60	S6 (1,3)?
186,40	S7 (3,2)	187,10	S7 (3,2)
212,00	S8 (2,3)	212,00	S8 (2,3)
247,60	A1 (0,0,1)	247,60	A1 (0,0,1)
-	-	261,10	S10 (4,2)?
277,20	S11 (3,3);A2 (1,0,0)?	277,20	S11 (3,3);A2 (1,0,0)?
295,40	A2 (1,0,0)?;S12 (1,4)?	295,40	A2 (1,0,0)?;S12 (1,4)?
311,60	S13 (5,1)	311,60	S13 (5,1)
327,70	S14 (2,4)	327,70	S14 (2,4)
347,90	A3 (0,1,0)?;S15 (4,3) S16 (5,2)	347,90	A3 (0,1,0)?;S15 (4,3) S16 (5,2)
388,90	A4 (1,0,1)	389,60	A4 (1,0,1)
421,20	S19 (6,1)	421,20	S19 (6,1)
-	-	427,30	A5 (0,1,1)?;S18 (1,5)
456,90	A6 (1,1,0)?	452,20	A6 (1,1,0)?
461,60	S22 (2,5)	463,60	S22 (2,5)
485,80	S23 (6,2)?	486,50	S23 (6,2)?
493,20	A7 (0,0,2)?	493,20	A7 (0,0,2)?
512,10	A8 (1,1,1)?	512,80	A8 (1,1,1)?;S24 (3,5)
517,50	S24 (3,5)	-	-
554,50	S25 (5,4)?;A9 (1,0,2)? A10 (2,0,0)?	553,80	S25 (5,4)?;A9 (1,0,2)? A10 (2,0,0)?
581,40	S28 (4,5)	580,70	S28 (4,5)
603,60	A11 (0,1,2)?;S30(7,2) ?	601,60	A11 (0,1,2)?;S30(7,2) ?
625,10	A12 (2,0,1)?;S30 (7,2)? S31 (2,6)?	625,10	A12 (2,0,1)?;S30(7,2)? S31 (2,6)?
672,20	A13 (1,1,2)?;S32 (6,4) A14 (2,1,0)?;S33 (3,6)?	672,20	A13 (1,1,2)?;S32 (6,4) A14 (2,1,0)?;S33 (3,6)?
693,80	A15 (0,2,0)?;S35 (7,3)	-	-

(b) Stimulus B_1 .

TAB. C.3 – Identification de modes couplés à l'origine de pics de résonance visibles sur les spectres de niveau de pression aux points M_1 et M_2 . Un point d'interrogation (?) indique une incertitude sur l'identité du mode à l'origine du pic de résonance observé. (*suite*)

Annexe C. Compléments relatifs à l'analyse des effets de la variation des paramètres structuraux sur la réponse vibro-acoustique du système plaque-cavité

Voie 1 (Gauche)		Voie 2 (Droite)	
Fréquence (Hz)	Mode	Fréquence (Hz)	Mode
45,80	S1 (1,1)	45,80	S1 (1,1)
78,70	S2 (2,1)	78,70	S2 (2,1)
95,60	S3 (1,2)	95,60	S3 (1,2)
127,90	S4 (2,2)	128,50	S4 (2,2)
135,30	S5 (3,1)	135,30	S5 (3,1)
171,60	S6 (1,3)	172,30	S6 (1,3)
185,10	S7 (3,2)	185,10	S7 (3,2)
207,30	S8 (2,3)	207,30	S8 (2,3)
212,60	S9 (4,1)	212,60	S9 (4,1)
251,70	A1 (0,0,1);S10 (4,2)	251,70	A1 (0,0,1);S10 (4,2)
262,40	S11 (3,3)	262,40	S11 (3,3)
282,60	S12 (1,4);A2 (1,0,0)?	282,60	S12 (1,4);A2 (1,0,0)?
301,50	S13 (5,1) ?	301,50	S13 (5,1) ?
311,60	S13 (5,1) ?	311,60	S13 (5,1) ?
348,60	A3 (0,1,0)?;S15 (4,3)	348,60	A3 (0,1,0)?;S15 (4,3)
362,00	S16 (5,2)	360,70	S16 (5,2)
394,30	A4 (1,0,1)?;S17 (3,4)?	394,30	A4 (1,0,1)?;S17 (3,4)?
426,00	A5 (0,1,1)?;S18 (1,5) S19 (6,1)	426,00	A5 (0,1,1)?;S18 (1,5) S19 (6,1)
-	-	442,10	S20 (5,3);A6 (1,1,0)?
-	-	447,50	S21 (4,4);A6 (1,1,0)?
462,30	S22 (2,5);A6 (1,1,0)?	463,00	S22 (2,5);A6 (1,1,0)?
485,80	A7 (0,0,2)?;S23 (6,2)	485,80	A7 (0,0,2)?;S23 (6,2)
515,50	A8 (1,1,1)?;S24 (3,5)	515,50	A8 (1,1,1)?;S24 (3,5)
546,40	S26 (6,3)	-	-
562,60	A9 (1,0,2)?;A10 (2,0,0)? S27 (7,1)	559,90	A9 (1,0,2)?;A10 (2,0,0)? S27 (7,1)
598,20	A11 (0,1,2)?;S30 (7,2)?	598,90	A11 (0,1,2)?;S30 (7,2)?
619,10	A12 (2,0,1)?;S31 (2,6)	619,10	A12 (2,0,1)?;S31 (2,6)
659,50	S33 (3,6);S34 (5,5)?	659,50	S33 (3,6);S34 (5,5)?
672,20	A13 (1,1,2)?;S34 (5,5)? A14 (2,1,0);S35 (7,3)?	671,60	A13 (1,1,2)?;S34 (5,5)? A14 (2,1,0);S35 (7,3)?
707,90	A16 (2,1,1)?	708,60	A16 (2,1,1)?

(c) Stimulus C_1 .

TAB. C.3 – Identification de modes couplés à l'origine de pics de résonance visibles sur les spectres de niveau de pression aux points M_1 et M_2 . Un point d'interrogation (?) indique une incertitude sur l'identité du mode à l'origine du pic de résonance observé. (suite)

Voie 1 (Gauche)		Voie 2 (Droite)	
Fréquence (Hz)	Mode	Fréquence (Hz)	Mode
56,50	S1 (1,1)	56,50	S1 (1,1)
101,60	S2 (2,1)	101,60	S2 (2,1)
114,40	S3 (1,2)	114,40	S3 (1,2)
157,50	S4 (2,2)	158,80	S4 (2,2)
168,90	S5 (3,1)	168,90	S5 (3,1)
207,30	S6 (1,3)	207,30	S6 (1,3)
225,40	S7 (3,2)	225,40	S7 (3,2)
251,70	S8 (2,3);A1 (0,0,1) ?	251,70	S8 (2,3);A1 (0,0,1) ?
258,40	S9 (4,1);A1 (0,0,1) ?	258,40	S9 (4,1);A1 (0,0,1) ?
285,30	A2 (1,0,0)	285,30	A2 (1,0,0)
303,50	S10 (4,2)	303,50	S10 (4,2)
331,70	S12 (1,4)	331,70	S12 (1,4)
340,50	A3 (0,1,0)	339,80	A3 (0,1,0)
366,10	S13 (5,1)?	-	-
376,20	S13 (5,1)?;S14 (2,4)? A4 (1,0,1)?	376,80	S13 (5,1)?;S14 (2,4)? A4 (1,0,1)?
391,00	S14 (2,4)?;S15 (4,3)? A4 (1,0,1)?	391,00	S14 (2,4)?;S15 (4,3)? A4 (1,0,1)?
430,70	A5 (0,1,1)?;S15 (4,3)? S16 (5,2)?;S17 (3,4)?	430,00	A5 (0,1,1)?;S15 (4,3)? S16 (5,2)?;S17 (3,4)?
479,80	A7 (0,0,2)?;S18 (1,5)?	473,10	A7 (0,0,2)?;S18 (1,5)?
491,20	S18 (1,5)?;S19 (6,1) S20(5,3)?	493,20	S18 (1,5)?;S19 (6,1) S20(5,3)?
511,40	A8 (1,1,1)?	510,10	A8 (1,1,1)?
563,90	A9 (1,0,2)?;A10 (2,0,0)? S23 (6,2)?	565,20	A9 (1,0,2)?;A10 (2,0,0)? S23 (6,2)?
590,10	A11 (0,1,2)?;S23 (6,2)?	589,50	A11 (0,1,2)?;S23 (6,2)?
616,40	A12 (2,0,1)?;S24 (3,5)	616,40	A12 (2,0,1)?;S24 (3,5)
675,60	A15 (0,2,0)?;S27 (7,1) S29 (1,6)?	675,60	A15 (0,2,0)?;S27 (7,1) S29 (1,6)?
691,80	S29 (1,6)?;A16 (2,1,1) ?	691,10	S29 (1,6)?;A16 (2,1,1) ?
727,40	S31 (2,6)?;A17 (0,2,1)? S30 (7,2);A18 (0,0,3)?	-	-
-	-	734,10	S30 (7,2);S31 (2,6)? A19 (1,2,0)?
744,90	A20 (2,0,2)?	744,20	A20(2,0,2)?
800,80	A23 (0,1,3)?;S34 (5,5)	800,80	A23 (0,1,3)?;S34 (5,5)
817,60	A24 (2,1,2)?;S35 (7,3)	815,60	A24 (2,1,2)?;S35 (7,3)

(d) Stimulus D_1 .

TAB. C.3 – Identification de modes couplés à l'origine de pics de résonance visibles sur les spectres de niveau de pression aux points M_1 et M_2 . Un point d'interrogation (?) indique une incertitude sur l'identité du mode à l'origine du pic de résonance observé. (suite)

Annexe C. Compléments relatifs à l'analyse des effets de la variation des paramètres structuraux sur la réponse vibro-acoustique du système plaque-cavité

Voie 1 (Gauche)		Voie 2 (Droite)	
Fréquence (Hz)	Mode	Fréquence (Hz)	Mode
61,90	S1 (1,1)	61,90	S1 (1,1)
110,40	S2 (2,1);S3 (1,2)	110,40	S2 (2,1);S3 (1,2)
161,50	S4 (2,2)	162,20	S4 (2,2)
177,60	S5 (3,1)	177,60	S5 (3,1)
207,90	S6 (1,3)	207,90	S6 (1,3)
-	-	230,80	S7 (3,2)
249,70	A1 (0,0,1)?;S8 (2,3)?	249,70	A1 (0,0,1)?;S8 (2,3)?
252,30	S8 (2,3)?;A1 (0,0,1)?	252,30	S8 (2,3)?;A1 (0,0,1)?
267,80	S9 (4,1)	267,80	S9 (4,1)
291,40	A2 (1,0,0)	291,40	A2 (1,0,0)
331,10	S12 (1,4)	331,70	S12 (1,4)
349,20	A3 (0,1,0)	349,20	A3 (0,1,0)
383,60	S13 (5,1);A4 (1,0,1)?	384,20	S13 (5,1);A4 (1,0,1)?
395,70	S15 (4,3)?;A4 (1,0,1)?	395,70	S15 (4,3)?;A4 (1,0,1)?
428,60	A5 (0,1,1)?;S16 (5,2)?	429,30	A5 (0,1,1)?;S16 (5,2)?
434,00	A5 (0,1,1)?;S16 (5,2)? S17 (3,4)	434,00	A5 (0,1,1)?;S16 (5,2)? S17 (3,4)
-	-	453,50	A6 (1,1,0) ?
492,60	S18 (1,5)?;A7 (0,0,2)?	493,20	S18 (1,5)?;A7 (0,0,2)?
522,20	S19 (6,1)	520,20	S19 (6,1)
536,30	S22 (2,5);S20 (5,3)?	537,00	S22 (2,5);S20 (5,3)?
567,90	A9 (1,0,2)?;A10 (2,0,0)? S23 (6,2)?	567,30	A9 (1,0,2)?;A10 (2,0,0)? S23 (6,2)?
591,50	S23 (6,2)?;S24 (3,5)? A11 (0,1,2)?	591,50	S23 (6,2)?;S24 (3,5)? A11 (0,1,2)?
617,70	A12 (2,0,1)?;S24 (3,5)?	617,70	A12 (2,0,1)?;S24 (3,5)?
633,90	A12 (2,0,1)?;S25 (5,4)?	634,60	A12 (2,0,1)?;S25 (5,4)?
665,50	S26 (6,3);A13 (1,1,2)? A14(2,1,0)?	663,50	S26 (6,3);A13 (1,1,2)? A14(2,1,0)?
-	-	680,30	S27 (7,1)
687,00	S29 (1,6);A15 (0,2,0)?	-	-
697,10	A16 (2,1,1)?	-	-
720,70	S31 (2,6);A17 (0,2,1)?	723,40	S31 (2,6);A17 (0,2,1)?
736,20	S30 (7,2);A19 (1,2,0)?	737,50	S30 (7,2);A19 (1,2,0)?
751,00	A20 (2,0,2)?	747,60	A20 (2,0,2)?
800,80	A23 (0,1,3)?;S34 (5,5)	800,10	A23 (0,1,3)?;S34 (5,5)
819,60	A24 (2,1,2)?	818,90	A24 (2,1,2)?

(e) Stimulus E_1 .

TAB. C.3 – Identification de modes couplés à l'origine de pics de résonance visibles sur les spectres de niveau de pression aux points M_1 et M_2 . Un point d'interrogation (?) indique une incertitude sur l'identité du mode à l'origine du pic de résonance observé. (suite)

Voie 1 (Gauche)		Voie 2 (Droite)	
Fréquence (Hz)	Mode	Fréquence (Hz)	Mode
62,60	S1 (1,1)	62,60	S1 (1,1)
112,40	S2 (2,1);S3 (1,2)	112,40	S2 (2,1);S3 (1,2)
162,20	S4 (2,2)	162,80	S4 (2,2)
184,40	S5 (3,1)	183,70	S5 (3,1)
206,60	S6 (1,3)	205,90	S6 (1,3)
-	-	233,50	S7 (3,2)
249,00	A1 (0,0,1)	249,00	A1 (0,0,1)
254,40	S8 (2,3)	254,40	S8 (2,3)
273,90	S9 (4,1)	273,90	S9 (4,1)
290,70	A2 (1,0,0)	290,70	A2 (1,0,0)
327,70	S12 (1,4)	331,70	S12 (1,4)
348,60	A3 (0,1,0)	347,90	A3 (0,1,0)
372,80	S14 (2,4)?;A4 (1,0,1)?	372,10	S14 (2,4)?;A4 (1,0,1)?
388,30	S13 (5,1)?;S14 (2,4)? A4 (1,0,1)?	388,30	S13 (5,1)?;S14 (2,4)? A4 (1,0,1)?
402,40	S13 (5,1)?;S15 (4,3)?	402,40	S13 (5,1)?;S15 (4,3)?
427,30	A5 (0,1,1)?;S15 (4,3)?	-	-
436,00	A6 (1,1,0)	436,00	A6 (1,1,0)
482,50	A7 (0,0,2)?;S18 (1,5)?	-	-
493,90	S18 (1,5)?;A7 (0,0,2)?	493,90	S18 (1,5)?;A7 (0,0,2)?
520,20	A8 (1,1,1)	-	-
532,90	S19 (6,1)?;S20 (5,3)	-	-
572,60	A10 (2,0,0)?;S23 (6,2)?	572,60	A10 (2,0,0)?;S23 (6,2)?
597,50	A11 (0,1,2)?;S23 (6,2)?	594,20	A11 (0,1,2)?;S23 (6,2)?
621,80	A12 (2,0,1)?;S24 (3,5)?	621,80	A12 (2,0,1)?;S24 (3,5)?
674,90	S29 (1,6)?;A13 (1,1,2)? A14 (2,1,0)?	674,90	S29 (1,6)?;A13 (1,1,2)? A14 (2,1,0)?
697,10	S27 (7,1)?;S28 (4,5)? A16 (2,2,1)?	-	-
724,10	S31 (2,6);A17 (0,2,1)? A18 (0,0,3)?	723,40	S31 (2,6);A17 (0,2,1)? A18 (0,0,3)?
740,20	A19 (1,2,0) ?	738,90	A19 (1,2,0) ?

(f) Stimulus F_1 .

TAB. C.3 – Identification de modes couplés à l'origine de pics de résonance visibles sur les spectres de niveau de pression aux points M_1 et M_2 . Un point d'interrogation (?) indique une incertitude sur l'identité du mode à l'origine du pic de résonance observé. (suite)

Annexe C. Compléments relatifs à l'analyse des effets de la variation des paramètres structuraux sur la réponse vibro-acoustique du système plaque-cavité

Voie 1 (Gauche)		Voie 2 (Droite)	
Fréquence (Hz)	Mode	Fréquence (Hz)	Mode
70,70	S1 (1,1)	70,70	S1 (1,1)
128,50	S2 (2,1)	128,50	S2 (2,1)
162,20	S3 (1,2)	161,50	S3 (1,2)
220,70	S4 (2,2)	220,70	S4 (2,2)
226,80	S5 (3,1)	226,80	S5 (3,1)
247,60	A1 (0,0,1)	247,60	A1 (0,0,1)
290,70	A2 (1,0,0)	290,70	A2 (1,0,0)
299,40	S6 (1,3)	299,40	S6 (1,3)
318,30	S7 (3,2)	319,00	S7 (3,2)
-	-	347,20	A3 (0,1,0)
360,70	S8 (2,3)	360,00	S8 (2,3)
383,60	A4 (1,0,1)	383,60	A4 (1,0,1)
-	-	428,00	A5 (0,1,1)?;S10 (4,2)?
435,40	A5 (0,1,1)?;S10 (4,2)?	-	-
-	-	446,10	A6 (1,1,0)?;S10 (4,2)? S11(3,3)?
453,50	A6 (1,1,0)?;S10 (4,2)? S11 (3,3)?	452,90	A6 (1,1,0)?;S10 (4,2)? S11 (3,3)?
485,20	S12 (1,4);A7 (2,0,1)?	485,20	S12 (1,4);A7 (2,0,1)?
522,90	S13 (5,1);A8 (1,1,1)?	520,80	S13 (5,1);A8 (1,1,1)?
543,70	S14 (2,4)	543,00	S14 (2,4)
575,30	A9 (1,0,2)?;A10 (2,0,0)? S15 (4,3)	575,30	A9 (1,0,2)?;A10 (2,0,0)? S15 (4,3)
611,70	A11 (0,1,2)?	604,90	A11 (0,1,2)?
617,70	S16 (5,2)?;A12 (2,0,1)?	618,40	S16 (5,2)?;A12 (2,0,1)?
632,50	S16 (5,2)?;S17 (3,4)?	630,50	S16 (5,2)?;S17 (3,4)?
675,60	A15 (0,2,0)?	677,60	A15 (0,2,0)?
696,50	A16 (2,1,1) ?	698,50	A16 (2,1,1) ?
728,80	A17 (0,2,1)?;A18 (0,0,3)? S18 (1,5)	728,80	A17 (0,2,1)?;A18 (0,0,3)? S18 (1,5)
740,20	A19 (1,2,0)?	742,20	A19 (1,2,0)?
757,70	A20 (2,0,2)?; S20 (5,3) S21 (4,4)?	-	-
799,40	A23 (0,1,3)?	798,70	A23 (0,1,3)?
816,20	S23 (6,2)	817,60	S23 (6,2)
860,00	A26 (3,0,0)?;A27 (1,1,3)? S24 (3,5)	860,00	A26 (3,0,0)?;A27 (1,1,3)? S24 (3,5)

(g) Stimulus G_1 .

TAB. C.3 – Identification de modes couplés à l'origine de pics de résonance visibles sur les spectres de niveau de pression aux points M_1 et M_2 . Un point d'interrogation (?) indique une incertitude sur l'identité du mode à l'origine du pic de résonance observé. (suite)

Voie 1 (Gauche)		Voie 2 (Droite)	
Fréquence (Hz)	Mode	Fréquence (Hz)	Mode
72,70	S1 (1,1)	72,70	S1 (1,1)
133,20	S2 (2,1)	133,20	S2 (2,1)
162,80	S3 (1,2)	162,20	S3 (1,2)
224,10	S4 (2,2)	224,80	S4 (2,2)
232,20	S5 (3,1)	232,20	S5 (3,1)
245,60	A1 (0,0,1)	245,60	A1 (0,0,1)
288,00	A2 (1,0,0)	286,70	A2 (1,0,0)
300,10	S6 (1,3)	300,80	S6 (1,3)
319,00	S7 (3,2)	319,60	S7 (3,2)
347,20	A3 (0,1,0)?	345,20	A3 (0,1,0) ?
363,40	S8 (2,3);S9 (4,1)	363,40	S8 (2,3);S9 (4,1)
373,50	A4 (1,0,1)	373,50	A4 (1,0,1)
442,10	A6 (1,1,0)?;S10 (4,2)	442,10	A6 (1,1,0)?;S10 (4,2)
456,90	S11 (3,3)	455,60	S11 (3,3)
483,80	S12 (1,4);A7 (2,0,1)?	482,50	S12 (1,4);A7 (2,0,1)?
530,90	S13 (5,1)	530,90	S13 (5,1)
548,40	S14 (2,4)	551,10	S14 (2,4)
-	-	574,00	A9 (1,0,2)?;A10 (2,0,0)?
582,70	S15 (4,3)	581,40	S15 (4,3)
622,40	S16 (5,2)?;A12 (2,0,1)?	621,10	S16 (5,2)?;A12 (2,0,1)?
639,90	S17 (3,4)	642,00	S17 (3,4)
704,50	A16 (2,1,1) ?	704,50	A16 (2,1,1) ?
716,00	A17 (0,2,1) ?	715,30	A17 (0,2,1) ?
738,90	A19 (1,2,0)?;S19 (6,1)	739,50	A19 (1,2,0)?;S19 (6,1)
768,50	S20 (5,3);S21 (4,4)? A21 (1,2,1)?	768,50	S20 (5,3);S21 (4,4)? A21 (1,2,1)?
825,70	S23 (6,2);A24 (2,1,2)?	827,00	S23 (6,2);A24 (2,1,2)?
-	-	860,00	S24 (3,5);A26 (3,0,0)? A27 (1,1,3)?
864,70	S24 (3,5);A26 (3,0,0)? A27 (1,1,3)?	-	-
908,40	A31 (3,1,0)?;A32 (2,2,1)? A33 (2,0,3)?	908,40	A31 (3,1,0)?;A32 (2,2,1)? A33 (2,0,3)?

(h) Stimulus H_1 .

TAB. C.3 – Identification de modes couplés à l'origine de pics de résonance visibles sur les spectres de niveau de pression aux points M_1 et M_2 . Un point d'interrogation (?) indique une incertitude sur l'identité du mode à l'origine du pic de résonance observé. (suite)

Annexe C. Compléments relatifs à l'analyse des effets de la variation des paramètres structuraux sur la réponse vibro-acoustique du système plaque-cavité

Voie 1 (Gauche)		Voie 2 (Droite)	
Fréquence (Hz)	Mode	Fréquence (Hz)	Mode
74,70	S1 (1,1)	74,70	S1 (1,1)
137,90	S2 (2,1)	137,90	S2 (2,1)
162,20	S3 (1,2)	162,20	S3 (1,2)
-	-	224,10	S4 (2,2)
237,50	S5 (3,1)	237,50	S5 (3,1)
248,30	A1 (0,0,1)	248,30	A1 (0,0,1)
291,40	A2 (1,0,0)	290,70	A2 (1,0,0)
300,10	S6 (1,3)	300,10	S6 (1,3)
321,70	S7 (3,2)	322,30	S7 (3,2)
-	-	347,90	A3 (0,1,0)
360,70	S8 (2,3)	360,00	S8 (2,3)
374,80	S9 (4,1)	374,80	S9 (4,1)
384,20	A4 (1,0,1)	384,20	A4 (1,0,1)
427,30	A5 (0,1,1)	428,00	A5 (0,1,1)
443,40	A6 (1,1,0)?;S10 (4,2)?	444,10	A6 (1,1,0)?;S10 (4,2)?
453,50	S10 (4,2)?;S11 (3,3)?	452,90	S10 (4,2)?;S11 (3,3)?
485,20	S12 (1,4);A7 (2,0,1)?	484,50	S12 (1,4);A7 (2,0,1)?
534,30	S13 (5,1)	534,30	S13 (5,1)
550,40	S14 (2,4)	553,80	S14 (2,4)
582,70	S15 (4,3)?;A11 (0,1,2)?	582,70	S15 (4,3)?;A11 (0,1,2)?
608,30	S15 (4,3)?;A11 (0,1,2)?	604,90	S15 (4,3)?;A11 (0,1,2)?
618,40	S16 (5,2);A12 (2,0,1)?	618,40	S16 (5,2);A12 (2,0,1)?
677,60	A15 (0,2,0)?	679,00	A15 (0,2,0)?
697,10	A16 (2,1,1) ?	704,50	A16 (2,1,1) ?
728,10	A17 (0,2,1)?;S18 (1,5) A18 (0,0,3)?	727,40	A17 (0,2,1)?;S18 (1,5) A18 (0,0,3)?
742,20	S19 (6,1);A19 (1,2,0)?	742,20	S19 (6,1);A19 (1,2,0)?
755,70	A20 (2,0,2)?	-	-
763,10	S20 (5,3)?;S21 (4,4)?	764,40	S20 (5,3)?;S21 (4,4)?
801,40	A23 (0,1,3) ?	796,70	A23 (0,1,3) ?
-	-	818,90	A24 (2,1,2)?
833,10	S23 (6,2)?;A25 (0,2,2)?	834,40	S23 (6,2)?;A25 (0,2,2)?
-	-	864,00	A26 (3,0,0)?;A27 (1,1,3)?
872,80	S24 (3,5)?	872,10	S24 (3,5)?
909,80	A31 (3,1,0)?;A32 (2,2,1)? A33 (2,0,3)?	909,10	A31 (3,1,0)?;A32 (2,2,1)? A33 (2,0,3)?

(i) Stimulus I_1 .

TAB. C.3 – Identification de modes couplés à l'origine de pics de résonance visibles sur les spectres de niveau de pression aux points M_1 et M_2 . Un point d'interrogation (?) indique une incertitude sur l'identité du mode à l'origine du pic de résonance observé. (suite)

Voie 1 (Gauche)		Voie 2 (Droite)	
Fréquence (Hz)	Mode	Fréquence (Hz)	Mode
43,70	S1 (1,1)	43,70	S1 (1,1)
76,70	S2 (2,1)	76,70	S2 (2,1)
93,50	S3 (1,2)	92,90	S3 (1,2)
-	-	127,90	S4 (2,2)
132,60	S5 (3,1)	132,60	S5 (3,1)
-	-	166,90	S6 (1,3)
181,00	S7 (3,2)	181,70	S7 (3,2)
205,20	S8 (2,3);S9 (4,1)	205,20	S8 (2,3);S9 (4,1)
248,30	A1 (0,0,1);S10 (4,2)?	248,30	A1 (0,0,1);S10 (4,2)?
275,90	S10 (4,2)?;S11 (3,3)?	275,90	S10 (4,2)?;S11 (3,3)?
296,40	S12 (1,4);A2 (1,0,0)?	296,40	S12 (1,4);A2 (1,0,0)?
308,20	S13 (5,1) ?	308,20	S13 (5,1) ?
323,70	S13 (5,1) ?	324,30	S13 (5,1) ?
344,50	A3 (0,1,0)?;S15 (4,3)	344,50	A3 (0,1,0)?;S15 (4,3)
348,60	A3 (0,1,0)?;S16 (5,2)	348,60	A3 (0,1,0)?;S16 (5,2)
383,60	A4 (1,0,1)?;S17 (3,4)?	382,90	A4 (1,0,1)?;S17 (3,4)?
388,30	A4 (1,0,1)?;S17 (3,4)?	388,30	A4 (1,0,1)?;S17 (3,4)?
421,90	A5 (0,1,1)?;S18 (1,5)	421,20	A5 (0,1,1)?;S18 (1,5)
-	-	428,00	A5 (0,1,1)?;S19 (6,1)
458,90	S22 (2,5);A6 (1,1,0)?	459,60	S22 (2,5);A6 (1,1,0)?
481,10	A7 (0,0,2)?;S23 (6,2)?	484,50	A7 (0,0,2)?;S23 (6,2)?
494,60	A7 (0,0,2)?;S23 (6,2)?	494,60	A7 (0,0,2)?;S23 (6,2)?
508,70	A8 (1,1,1)?	509,40	A8 (1,1,1)?;S24 (3,5)
519,50	S24 (3,5)	518,10	S24 (3,5)
540,30	S25 (5,4) ?	-	-
556,50	A9 (1,0,2)?;S26(6,3) A10 (2,0,0)?	556,50	A9 (1,0,2)?;S26(6,3) A10 (2,0,0)?
572,60	S27 (7,1);S28 (4,5)?	571,30	S27 (7,1);S28 (4,5)?
583,40	S28 (4,5)?;S29 (1,6)	583,40	S28 (4,5)?;S29 (1,6)
595,50	A11 (0,1,2)?	596,90	A11 (0,1,2)?;S30 (7,2)?
604,30	S30 (7,2)?	604,30	S30 (7,2)?
618,40	A12 (2,0,1)?;S31 (2,6)	618,40	A12 (2,0,1)?;S31 (2,6)
664,20	A13 (1,1,2)?;S33 (3,6) A14 (2,1,0)?;S34 (5,5)?	664,20	A13 (1,1,2)?;S33 (3,6) A14 (2,1,0)?;S34 (5,5)?
672,20	A15 (0,2,0)?;S34 (5,5)? S35 (7,3)	671,60	A15 (0,2,0)?;S34 (5,5)? S35 (7,3)
697,10	A16 (2,1,1)?	703,90	A16 (2,1,1)?
-	-	713,30	S36 (8,1)

(j) Stimulus J_1 .

TAB. C.3 – Identification de modes couplés à l'origine de pics de résonance visibles sur les spectres de niveau de pression aux points M_1 et M_2 . Un point d'interrogation (?) indique une incertitude sur l'identité du mode à l'origine du pic de résonance observé. (suite)

K(3,3,3)			
Voie 1 (Gauche)		Voie 2 (Droite)	
Fréquence (Hz)	Mode	Fréquence (Hz)	Mode
75,40	S1 (1,1)	75,40	S1 (1,1)
140,00	S2 (2,1)	139,30	S2 (2,1)
166,90	S3 (1,2)	166,20	S3 (1,2)
238,20	S5 (3,1);A1 (0,0,1)	238,20	S5 (3,1);A1 (0,0,1)
286,00	A2 (1,0,0)	285,30	A2 (1,0,0)
304,20	S6 (1,3)	304,80	S6 (1,3)
325,70	S7 (3,2)	325,70	S7 (3,2)
	-	339,80	A3 (0,1,0) ?
366,10	S8 (2,3)	366,10	S8 (2,3)
370,10	S9 (4,1)	370,10	S9 (4,1)
377,50	A4 (1,0,1)?	377,50	A4 (1,0,1)?
453,50	A6 (1,1,0)?;S10 (4,2)? S11 (3,3)?	452,20	A6 (1,1,0)?;S10 (4,2)? S11 (3,3)?
491,20	S12 (1,4);A7 (2,0,1)?	489,90	S12 (1,4);A7 (2,0,1)?
509,40	A8 (1,1,1)?	510,10	A8 (1,1,1)?
538,30	S13 (5,1)?;S14 (2,4)?	539,00	S13 (5,1)?;S14 (2,4)?
557,80	A9 (1,0,2)?;A10 (2,0,0)?	560,50	A9 (1,0,2)?;A10 (2,0,0)?
590,80	S15 (4,3)?;A11 (0,1,2)?	590,10	S15 (4,3)?;A11 (0,1,2)?
623,10	S16 (5,2);A12 (2,0,1)?	623,80	S16 (5,2);A12 (2,0,1)?
712,60	A16 (2,1,1) ?	711,30	A16 (2,1,1) ?
755,70	A20 (2,0,2)?;S20 (5,3)? S21 (4,4)?	755,00	A20 (2,0,2)?;S20 (5,3)? S21 (4,4)?
773,20	A21 (1,2,1)?;S20 (5,3)? S21 (4,4)?	773,20	A21 (1,2,1)?;S20 (5,3)? S21 (4,4)?
806,80	A23 (0,1,3) ?	806,10	A23 (0,1,3) ?

(k) Stimulus K_1 .

TAB. C.3 – Identification de modes couplés à l'origine de pics de résonance visibles sur les spectres de niveau de pression aux points M_1 et M_2 . Un point d'interrogation (?) indique une incertitude sur l'identité du mode à l'origine du pic de résonance observé. (*suite et fin*)

C.3 Effets de la variation des conditions de serrage de la plaque sur la réponse vibro-acoustique du système plaque-cavité

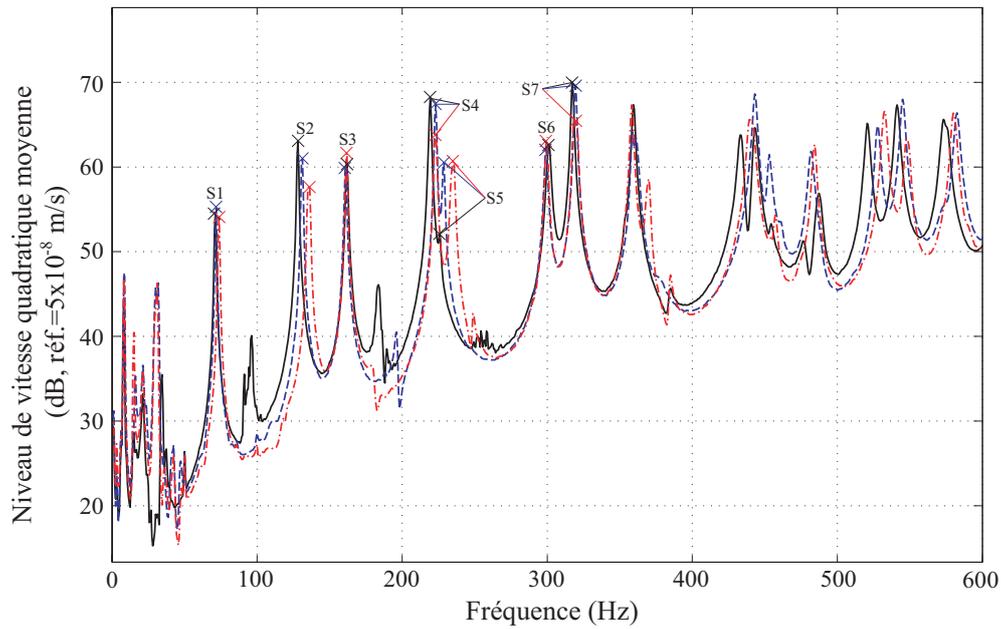


FIG. C.2 – Spectres de niveau de vitesse quadratique moyenne de la plaque mesurés pour les différentes modalités des conditions de serrage de la plaque, pour une épaisseur de plaque égale à 3 mm. — : $C = 20$ N.m (configuration *G*), - - : $C = 50$ N.m (configuration *H*), - - - : $C = 80$ N.m (configuration *I*).

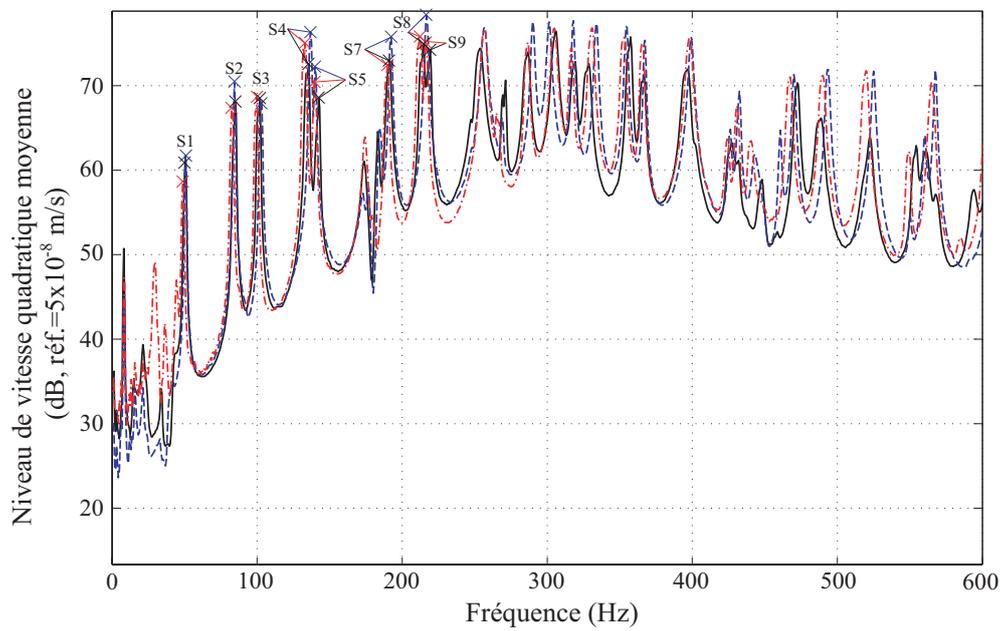


FIG. C.3 – Spectres de niveau de vitesse quadratique moyenne de la plaque mesurés pour les différentes modalités des conditions de serrage de la plaque, pour une épaisseur de plaque égale à 1.5 mm. — : $C = 20$ N.m (configuration A), - - : $C = 50$ N.m (configuration B), - . - : $C = 80$ N.m (configuration C).

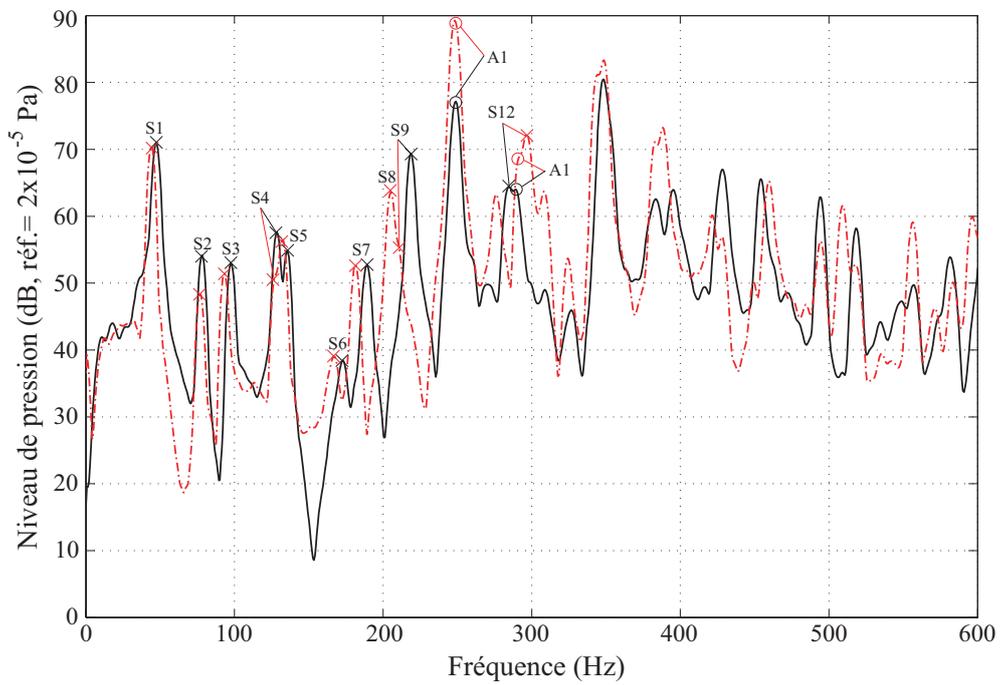


FIG. C.4 – Spectres de niveau de pression mesurés au point M_2 pour les modalités extrémales des conditions de serrage de la plaque, pour une épaisseur de plaque égale à 1.5 mm. — : $C = 20$ N.m (stimulus A_1), - - : $C = 80$ N.m (stimulus J_1).

Annexe D

Compléments relatifs à l'appréciation des effets de la dispersion de la mesure sur la perception auditive par l'analyse de variance (ANOVA)

D.1 Lexique de terminologie

Réponse ou observation

La *réponse*, aussi appelée *observation*, est la grandeur mesurée au cours de l'expérience ; cette grandeur doit être continue.

Population / Échantillon

Une *population* est un ensemble d'évènements qui intéressent l'expérimentateur (scores de sujets, revenus de salariés, poids de personnes ...). Un *échantillon* d'observations est un prélèvement d'évènements dans la population, utilisé pour inférer quelque chose à propos des caractéristiques de cette population.

Paramètre / Statistique

On appelle *paramètre* une mesure qui se réfère à l'ensemble d'une population (e.g. une moyenne, médiane ...). Cette mesure est appelée *statistique* lorsqu'elle est calculée à partir d'un échantillon.

Espérance mathématique

L'*espérance mathématique* d'une statistique ($E()$) est sa valeur moyenne à long terme, i.e. la valeur moyenne que cette statistique prendrait si l'expérimentateur procédait à un échantillonnage répété, et donc la meilleure approximation quant à sa valeur pour tout essai particulier.

Échantillons indépendants / dépendants

On parle d'*échantillons indépendants* lorsque les différents échantillons de réponses formés lors de l'expérience impliquent des groupes différents de sujets. L'analyse de variance dite *classique* suppose de tels échantillons.

A contrario, on parle d'*échantillons dépendants* lorsque les échantillons de réponses formés lors de l'expérience impliquent un seul et même groupe de sujets. On peut parler aussi de *mesures répétées*.

Facteurs ou critères de classification

On appelle *facteurs* ou *critères de classification* les variables indépendantes suivant les niveaux (Cf. rubrique "Niveaux ou modalités" ci-après) desquelles les échantillons de réponses peuvent être classifiés ou séparés.

Niveaux ou modalités

On appelle *niveaux* ou *modalités* d'un facteur les valeurs pouvant être prises par ce dernier au cours de l'expérience.

Cellule

On appelle *cellule* toute combinaison possible entre modalités de facteurs.

Facteurs fixes / aléatoires

Un *facteur fixe* est un facteur pour lequel l'expérimentateur choisit délibérément les niveaux qu'il souhaite étudier ; *a contrario*, un *facteur aléatoire* est un facteur dont les niveaux sont tirés au hasard parmi une quasi-infinité de niveaux possibles.

Effet principal

L'*effet principal* d'un facteur est l'effet de ce facteur à l'un de ses niveaux, sans tenir compte des niveaux des autres facteurs.

Interaction

Une *interaction* entre deux facteurs désigne le fait que l'effet d'un facteur à l'un de ses niveaux dépend du niveau de l'autre facteur.

Effet simple

L'*effet simple* d'un facteur est l'effet de ce facteur à l'un de ses niveaux, à un niveau donné des autres facteurs.

Modèle théorique / observé

L'analyse de variance est sous-tendue par un *modèle théorique* selon lequel toute réponse observée est une variable aléatoire qui peut être considérée comme le résultat de l'addition i) d'une *moyenne générale*, ii) des *effets principaux* des facteurs pris en considération, iii) des termes d'*interaction* éventuels entre ces facteurs¹ et iv) d'une *composante d'erreur* (ou *résidu*) (Cf. exemple D.1).

Le remplacement des paramètres de population du modèle théorique par les statistiques d'échantillon correspondantes donne le *modèle observé*.

Modèle fixe / aléatoire / mixte

Un *modèle fixe* est un modèle théorique n'impliquant que des facteurs fixes ; le modèle fixe ne porte ainsi que sur un nombre limité de populations², pour chacune desquelles peut être prélevé un échantillon (Cf. exemple D.1).

Un *modèle aléatoire* est un modèle théorique n'impliquant que des facteurs aléatoires ; le modèle aléatoire porte sur une quasi-infinité de populations, pour toutes lesquelles il n'est pas envisageable de prélever un échantillon ; un échantillon est prélevé seulement pour un nombre fini d'entre elles³, choisies aléatoirement.

Un *modèle mixte* est un modèle impliquant à la fois des facteurs fixes et des facteurs aléatoires. Tout comme le modèle aléatoire, le modèle mixte porte sur une quasi-infinité de populations. Aussi, pour chaque facteur aléatoire, un nombre fini de modalités est choisi au hasard (Cf. rubrique "Facteurs fixes / aléatoires") puis les modalités des facteurs fixes leur sont associées. Pour chaque population ainsi définie⁴, un échantillon de réponses peut alors être prélevé.

Modèle croisé / hiérarchisé

Un modèle d'analyse de variance est dit *croisé* lorsque les facteurs sous-jacents sont placés sur un pied d'égalité, i.e. lorsque toutes leurs modalités peuvent être croisées (Cf. exemple D.1).

Un modèle est dit *complètement hiérarchisé* lorsque les facteurs sont *subordonnés* les uns aux autres. La subordination d'un facteur à un autre signifie que les niveaux du premier facteur sont choisis au hasard et indépendamment à l'intérieur de chaque niveau du second facteur ; il n'y a aucune correspondance entre les niveaux du premier facteur pour les différents niveaux du second facteur. Aussi, les facteurs subordonnés sont en général des facteurs aléatoires.

Un modèle est dit *partiellement hiérarchisé* lorsque à la fois des croisements et des subordinations entre les facteurs interviennent.

¹Dans le cas de plusieurs facteurs, les termes d'interaction peuvent être retenus dans le modèle théorique ou écartés, selon que l'expérimentateur juge *a priori* ces interactions comme non négligeables ou négligeables.

²Ce nombre est égal au produit des nombres de modalités choisis pour les facteurs fixes.

³Ce nombre est égal au produit des nombres de modalités choisis pour les facteurs aléatoires.

⁴Le nombre de populations est égal au produit des nombres de modalités choisis pour les facteurs fixes et aléatoires.

Considérons le cas simple d'échantillons indépendants de n réponses formés lors de la réalisation d'un plan d'expériences factoriel à deux facteurs fixes a et b avec respectivement p et q niveaux. On suppose ainsi que les pq échantillons sont prélevés dans pq populations différentes. Dans ce cas de figure, le modèle théorique, fixe et croisé, qui sous-tend l'analyse de variance classique s'écrit (avec interaction supposée) [Dag06] :

$$X_{ijk} = m_{..} + a_i + b_j + (ab)_{ij} + E_{ijk} \quad (\text{D.1})$$

où :

- X_{ijk} représente la réponse donnée par un sujet quelconque k ,
- $m_{..}$ est la moyenne générale, donnée par :

$$m_{..} = \frac{1}{pq} \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q m_{ij}$$

où les m_{ij} sont les moyennes des pq populations.

- les termes a_i sont les effets principaux du facteur a , définis comme suit :

$$a_i = m_{i.} - m_{..}$$

où :

$$m_{i.} = \frac{1}{q} \sum_{j=1}^q m_{ij}$$

- les termes b_j sont les effets principaux du facteur b , définis comme suit :

$$b_j = m_{.j} - m_{..}$$

où :

$$m_{.j} = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p m_{ij}$$

- les quantités $(ab)_{ij}$ sont les termes de l'interaction entre les facteurs a et b , définies par :

$$(ab)_{ij} = m_{ij} - m_{i.} - m_{.j} + m_{..}$$

- E_{ijk} est le résidu associé à la réponse X_{ijk} ; E_{ijk} représente ici la variabilité de la réponse de chaque sujet k autour de la moyenne des réponses obtenues pour les niveaux i et j des facteurs a et b [How98]. Les composantes d'erreur E_{ijk} sont des variables aléatoires qui, dans les conditions d'application de l'analyse de variance, sont normales, indépendantes, de moyenne nulle et de même variance σ^2 [Dag06].

EXEMPLE D.1: Modèle théorique, fixe et croisé, sous-tendant une ANOVA classique à deux facteurs fixes a et b .

Source de variabilité

Le terme *source de variabilité* est un terme générique utilisé pour désigner toute source pouvant être à l'origine de différences entre les moyennes de population, i.e. un facteur, une interaction entre facteurs ou une composante d'erreur. On peut parler de *source de variabilité factorielle* pour désigner plus spécifiquement un facteur ou une interaction entre facteurs.

Sommes des carrés des écarts

Les *sommes des carrés des écarts* constituent des mesures globales des variations imputées aux différentes sources de variabilité ; elles vérifient l'*équation de la variance*, dérivée à partir du modèle observé (Cf. exemple D.2).

Pour le modèle théorique (D.1) présenté à l'exemple D.1, l'équation de la variance qui découle du modèle observé correspondant s'écrit :

$$SCE_t = SCE_a + SCE_b + SCE_{ab} + SCE_r \quad (D.2)$$

où SCE_t représente la somme des carrés des écarts totale ; SCE_a , SCE_b , SCE_{ab} et SCE_r sont les sommes des carrés des écarts respectivement liées aux facteurs a et b , à l'interaction entre a et b et à l'erreur résiduelle.

Ces différentes sommes se calculent à partir des données récoltées comme suit :

$$\begin{aligned} SCE_t &= \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q \sum_{k=1}^n (x_{ijk} - \bar{x}_{...})^2 \\ SCE_a &= q \times n \times \sum_{i=1}^p (\bar{x}_{i..} - \bar{x}_{...})^2 \\ SCE_b &= p \times n \times \sum_{j=1}^q (\bar{x}_{.j.} - \bar{x}_{...})^2 \\ SCE_{ab} &= n \times \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q (\bar{x}_{ij.} - \bar{x}_{i..} - \bar{x}_{.j.} + \bar{x}_{...})^2 \\ SCE_r &= \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q \sum_{k=1}^n (x_{ijk} - \bar{x}_{ij.})^2 \end{aligned}$$

où x_{ijk} est une réponse donnée par un sujet quelconque k , $\bar{x}_{...}$ est la moyenne générale calculée sur l'ensemble des réponses recueillies, $\bar{x}_{i..}$ est la moyenne des réponses obtenues lorsque le facteur a est à son $i^{\text{ème}}$ niveau ; $\bar{x}_{.j.}$ est la moyenne des réponses obtenues lorsque le facteur b est à son $j^{\text{ème}}$ niveau, $\bar{x}_{ij.}$ est la moyenne des réponses obtenues lorsque les facteurs a et b sont respectivement à leur $i^{\text{ème}}$ et $j^{\text{ème}}$ niveau.

EXEMPLE D.2: Équation de la variance dérivée à partir du modèle observé correspondant au modèle théorique (D.1) présenté dans l'exemple D.1.

Nombre de degrés de liberté

Pour un modèle croisé, le nombre de degrés de liberté associé à un facteur est égal au nombre de modalités du facteur moins un ; le nombre de degrés de liberté associé à une interaction entre facteurs est égal au produit des nombres de degrés de liberté associés aux facteurs.

Carrés moyens

Comme les sommes des carrés des écarts, les *carrés moyens* constituent des mesures globales des variations imputées aux différentes sources de variabilité, mais homogènes à une variance ; le calcul de leur espérance mathématique montre que les carrés moyens consistent en des sommations de composantes de la variance totale, i.e. de variances, liées à différentes sources de variabilité (Cf. exemple D.3).

Dans la pratique, les carrés moyens sont calculés en divisant les sommes des carrés des écarts par les *nombres de degrés de liberté* respectivement associés.

Hypothèse nulle / alternative

Au sens général, l'*hypothèse nulle* (H_0) est une affirmation émise sur un paramètre relatif à une ou plusieurs populations, paramètre dont l'expérimentateur dispose d'estimations (i.e. les statistiques d'échantillon) ; il s'agit en général d'une hypothèse de non différence formulée de façon à être rejetée lors de son test. Dans le cas de son rejet, l'*hypothèse alternative* (H_1), qui correspond à l'hypothèse de différence que le chercheur souhaiterait prouver, est acceptée.

En analyse de variance, les hypothèses nulles sont émises sur les paramètres du modèle théorique. En particulier, chaque hypothèse nulle concerne l'absence d'effet lié à une source de variabilité factorielle donnée, supposée être à l'origine de différences entre plusieurs moyennes de population. L'hypothèse alternative renvoie à l'existence d'au moins une différence significative parmi ces moyennes de population, i.e. à l'existence d'un effet dû à la source de variabilité factorielle prise en considération. Le test d'une hypothèse nulle appelle à un test d'égalité entre deux carrés moyens (Cf. rubrique "Variable de Fisher-Snedecor - Statistique-test" ci-après).

Variable de Fisher-Snedecor F - Statistique-test

En ANOVA, la variable de Fisher-Snedecor F tient lieu de statistique-test pour le test d'hypothèse nulle ; cette statistique-test se définit comme un rapport entre deux carrés moyens.

La formation de la statistique-test respecte la règle de base suivante : les carrés moyens à placer au numérateur et au dénominateur sont sélectionnés de façon à ce que l'espérance mathématique du carré moyen placé au numérateur ne contienne qu'un terme en plus, i.e. la composante de la variance totale liée à la source de variabilité dont on souhaite tester l'absence d'effet, par rapport à l'espérance mathématique du carré moyen placé au dénominateur (Cf. exemple D.3).

Pour le modèle théorique (D.1) présenté à l'exemple D.1, les deux premières hypothèses nulles concernent l'absence d'effet principal des deux facteurs a et b :

$$\begin{aligned} H_0 : m_{1.} = m_{2.} = \dots = m_{p.} \quad \text{ou} \quad a_1 = a_2 = \dots = a_p = 0 \\ H'_0 : m_{.1} = m_{.2} = \dots = m_{.q} \quad \text{ou} \quad b_1 = b_2 = \dots = b_q = 0 \end{aligned}$$

La troisième concerne l'absence de terme d'interaction entre les deux facteurs :

$$H''_0 : (ab)_{11} = (ab)_{12} = \dots = (ab)_{pq} = 0$$

Les variables de Fisher-Snedecor F_a , F_b et F_{ab} respectivement associées au test des hypothèses nulles H_0 , H'_0 et H''_0 s'écrivent :

$$F_a = \frac{CM_a}{CM_r}, \quad F_b = \frac{CM_b}{CM_r} \quad \text{et} \quad F_{ab} = \frac{CM_{ab}}{CM_r}$$

où CM_a , CM_b et CM_{ab} sont les carrés moyens factoriels respectivement liés au facteur a , au facteur b et à l'interaction entre a et b ; CM_r est le carré moyen résiduel. Ces carrés moyens sont calculés à partir des sommes des carrés des écarts correspondantes, présentées à l'exemple D.2. Leur *espérance mathématique* s'écrit :

$$E(CM_a) = \sigma^2 + qn \frac{\sum_{i=1}^p a_i^2}{p-1} \quad (\text{D.3})$$

$$E(CM_b) = \sigma^2 + pn \frac{\sum_{j=1}^q b_j^2}{q-1} \quad (\text{D.4})$$

$$E(CM_{ab}) = \sigma^2 + n \frac{\sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q (ab)_{ij}^2}{(p-1)(q-1)} \quad (\text{D.5})$$

$$E(CM_r) = \sigma^2 \quad (\text{D.6})$$

Les rapports dans les seconds termes des expressions (D.3), (D.4) et (D.5) représentent les composantes de la variance totale respectivement liées au facteur a (cette composante équivaut à la variance des p moyennes $m_{i.}$), au facteur b (cette composante équivaut à la variance des q moyennes $m_{.j}$) et à l'interaction entre ces facteurs. Pour cet exemple, les espérances mathématiques montrent que les carrés moyens factoriels (i.e. CM_a , CM_b et CM_{ab}) sont égaux, en moyenne, à la variance de l'erreur σ^2 lorsque l'hypothèse nulle qui leur est associée (respectivement H_0 , H'_0 et H''_0) est vraie. Dans tous les autres cas, ces carrés moyens sont, en moyenne, supérieurs à σ^2 , i.e. les rapports de carrés moyens sont supérieurs à 1.

EXEMPLE D.3: Les hypothèses nulles émises sur les paramètres du modèle théorique (D.1), présenté dans l'exemple D.1, et leur statistique-test associée.

Risque de première espèce α

Le risque de première espèce α est la probabilité de commettre une erreur de première espèce (appelée aussi *erreur de type I*), i.e. la probabilité de rejeter l'hypothèse nulle alors que cette hypothèse est vraie.

Seuil de signification observé p

Le seuil de signification observé p (*p-value* en anglais) est la probabilité d'observer, l'hypothèse nulle étant vraie, une valeur de statistique-test aussi extrême que celle obtenue, à cause du seul hasard. p est calculé à l'aide de la fonction de répartition de la variable de Fisher-Snedecor F . Les paramètres de la fonction de répartition sont donnés par les nombres de degrés de liberté associés aux carrés moyens respectivement placés aux numérateur et dénominateur de la statistique-test [Sap90].

Dans la pratique, lorsqu'un seuil de signification observé p est inférieur au risque de première espèce α préalablement fixé par l'expérimentateur, le résultat du test est déclaré *significatif* et l'hypothèse nulle testée est rejetée ; on peut conclure à l'existence de l'effet supposé [Poi04]. Dans le cas contraire (i.e. $p \geq \alpha$), le résultat du test est déclaré *non significatif* et l'hypothèse nulle ne peut être rejetée ; on ne peut inférer l'existence de l'effet supposé.

Grandeur de l'effet expérimental

La *grandeur de l'effet expérimental* désigne l'importance de l'effet dû à une source de variabilité. Cette importance est mesurée en calculant la part de la variabilité globale observée pouvant être attribuée à l'effet considéré.

Parmi les indicateurs possibles de cette grandeur, l'un des moins biaisés est le coefficient ω^2 , défini comme le rapport entre la composante de la variance totale liée à la source de variabilité considérée et la variance totale [How98] ; plus ω^2 est proche de 1, plus l'effet considéré est important.

D.2 Compléments relatifs à l'élaboration du schéma d'analyse

D.2.1 Espérances mathématiques des carrés moyens

Les espérances mathématiques des carrés moyens impliquées par les modèles théoriques (5.1) et (5.10), respectivement associés à l'analyse globale (Cf. section 5.2.1.2.a) et à l'analyse des effets simples de la dispersion de la mesure pour chaque configuration structurale (Cf. section 5.2.1.2.b), sont respectivement reportées dans les tableaux D.1 et D.2. Les nombres de degrés de liberté associés aux différentes sources de variabilité considérées dans chacune des deux phases sont également indiqués. Ces espérances mathématiques sont établies en suivant les règles énoncées par Dagnélie [Dag06].

Source	ddl	E(CM)
S	$N - 1$	$\sigma^2 + \sigma_{SD p_s}^2 + n_D n_{p_s} \sigma_S^2$
p_s	$n_{p_s} - 1$	$\sigma^2 + \sigma_{SD p_s}^2 + N \sigma_{D p_s}^2 + n_D \sigma_{Sp_s}^2 + n_D N \frac{\sum_{j=1}^{n_{p_s}} p_{s_j}^2}{n_{p_s} - 1}$
Sp_s	$(N - 1)(n_{p_s} - 1)$	$\sigma^2 + \sigma_{SD p_s}^2 + n_D \sigma_{Sp_s}^2$
$D p_s$	$n_{p_s}(n_D - 1)$	$\sigma^2 + \sigma_{SD p_s}^2 + N \sigma_{D p_s}^2$
$SD p_s$	$n_{p_s}(N - 1)(n_D - 1)$	$\sigma^2 + \sigma_{SD p_s}^2$

TAB. D.1 – Espérances mathématiques des carrés moyens et nombres de degrés de liberté (ddl) associés aux différentes sources de variabilité considérées dans l'analyse globale.

Source	ddl	E(CM)
S	$N - 1$	$\sigma^{(j)^2} + \sigma_{SD}^{(j)^2} + n_D \sigma_S^{(j)^2}$
D	$n_D - 1$	$\sigma^{(j)^2} + \sigma_{SD}^{(j)^2} + N \sigma_D^{(j)^2}$
SD	$(N - 1)(n_D - 1)$	$\sigma^{(j)^2} + \sigma_{SD}^{(j)^2}$

TAB. D.2 – Espérances mathématiques des carrés moyens et nombres de degrés de liberté associés aux différentes sources de variabilité considérées dans l'analyse des effets simples de la dispersion de la mesure pour chaque configuration structurale.

D.2.2 Équations de la variance

Pour l'analyse globale, l'équation de la variance s'écrit :

$$SCE_t = SCE_S + SCE_{p_s} + SCE_{Sp_s} + SCE_{D|p_s} + SCE_{SD|p_s} \quad (D.7)$$

avec :

$$\begin{aligned}
 SCE_t &= \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{n_{p_s}} \sum_{k=1}^{n_D} (x_{ijk} - \bar{x}_{...})^2 \\
 SCE_S &= n_D \times n_{p_s} \times \sum_{i=1}^N (\bar{x}_{i..} - \bar{x}_{...})^2 \\
 SCE_{p_s} &= n_D \times N \times \sum_{j=1}^{n_{p_s}} (\bar{x}_{.j.} - \bar{x}_{...})^2 \\
 SCE_{S p_s} &= n_D \times \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{n_{p_s}} (\bar{x}_{ij.} - \bar{x}_{i..} - \bar{x}_{.j.} + \bar{x}_{...})^2 \\
 SCE_{D|p_s} &= N \times \sum_{j=1}^{n_{p_s}} \sum_{k=1}^{n_D} (\bar{x}_{.jk} - \bar{x}_{.j.})^2 \\
 SCE_{SD|p_s} &= \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{n_{p_s}} \sum_{k=1}^{n_D} (x_{ijk} - \bar{x}_{ij.} - \bar{x}_{.jk} + \bar{x}_{.j.})^2
 \end{aligned}$$

Concernant l'analyse des effets simples de la dispersion de la mesure pour les différentes configurations structurales, l'équation de la variance s'écrit :

$$SCE_t^{(j)} = SCE_S^{(j)} + SCE_D^{(j)} + SCE_{SD}^{(j)} \quad (D.8)$$

avec :

$$\begin{aligned}
 SCE_t^{(j)} &= \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^{n_D} (x_{ijk} - \bar{x}_{.j.})^2 \\
 SCE_S^{(j)} &= n_D \times \sum_{i=1}^N (\bar{x}_{ij.} - \bar{x}_{.j.})^2 \\
 SCE_D^{(j)} &= N \times \sum_{k=1}^{n_D} (\bar{x}_{.jk} - \bar{x}_{.j.})^2 \\
 SCE_{SD}^{(j)} &= \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^{n_D} (x_{ijk} - \bar{x}_{ij.} - \bar{x}_{.jk} + \bar{x}_{.j.})^2
 \end{aligned}$$

Pour rappel, x_{ijk} est une réponse donnée par le sujet i , $\bar{x}_{...}$ est la moyenne générale calculée sur l'ensemble des réponses recueillies, $\bar{x}_{i..}$ est la moyenne des réponses données par le sujet i ; $\bar{x}_{.j.}$ est la moyenne des réponses pour la $j^{\text{ème}}$ configuration structurale, $\bar{x}_{ij.}$ est la moyenne des réponses données par le sujet i pour la $j^{\text{ème}}$ configuration structurale et $\bar{x}_{.jk}$ est la moyenne des réponses pour le $k^{\text{ème}}$ niveau de dispersion de la mesure à l'intérieur de la $j^{\text{ème}}$ configuration structurale (Cf. tableaux de données 5.1 et 5.2).

Notons que, par rapport à l'équation (D.2) donnée dans l'exemple D.2 (Cf. section D.1), la somme des carrés des écarts résiduelle $SC E_r$ n'apparaît pas dans les équations (D.7) et (D.8); en effet, pour notre cas d'étude, les échantillons ne contiennent à proprement parler qu'une seule observation⁵, de par la présence du facteur sujets S (Cf. tableaux de données 5.1 et 5.2); aussi, dans cette situation précise, la variation résiduelle n'a pas lieu d'être.

D.2.3 Calcul des seuils de signification observés p

Pour les hypothèses nulles énoncées dans le cadre de l'analyse globale, i.e. H_0 , H'_0 , H''_0 et H'''_0 , les seuils de signification observés $p_{D|p_s}$, p_{p_s} , p_S et p_{Sp_s} associés à leur test respectif se calculent comme suit :

$$\begin{aligned} p_{D|p_s} &= \mathcal{F}(F_{D|p_s} | ddl_{D|p_s}, ddl_{SD|p_s}) \\ p_{p_s} &= \mathcal{F}(F_{p_s} | ddl_{p_s}, ddl_{Sp_s}) \\ p_S &= \mathcal{F}(F_S | ddl_S, ddl_{SD|p_s}) \\ p_{Sp_s} &= \mathcal{F}(F_{Sp_s} | ddl_{Sp_s}, ddl_{SD|p_s}) \end{aligned}$$

où \mathcal{F} désigne la fonction de répartition de la variable aléatoire F de Fisher-Snedecor [Sap90]; $F_{D|p_s}$, F_{p_s} , F_S et F_{Sp_s} sont les statistiques-test respectivement associées aux tests des hypothèses nulles H_0 , H'_0 , H''_0 et H'''_0 ; $ddl_{D|p_s}$, ddl_{p_s} , ddl_S , ddl_{Sp_s} et $ddl_{SD|p_s}$ sont les nombres de degrés de liberté respectivement associés aux carrés moyens $CM_{D|p_s}$, CM_{p_s} , CM_S , CM_{Sp_s} et $CM_{SD|p_s}$ (Cf. tableau D.1).

Pour l'hypothèse nulle $H_0^{(j)}$ énoncée dans le cadre de l'analyse des effets simples de la dispersion de la mesure pour chaque configuration structurale, le seuil de signification observé $p_D^{(j)}$ associé à son test se calcule comme suit :

$$p_D^{(j)} = \mathcal{F}(F_D^{(j)} | ddl_D, ddl_{SD}) \quad (\text{D.9})$$

où $F_D^{(j)}$ est la statistique-test associée au test de l'hypothèse nulle $H_0^{(j)}$; ddl_D et ddl_{SD} sont les nombres de degrés de liberté respectivement associés aux carrés moyens $CM_D^{(j)}$ et $CM_{SD}^{(j)}$ (Cf. tableau D.2).

D.2.4 Calcul des coefficients ω^2

Dans l'analyse globale, les coefficients $\omega_{D|p_s}^2$, $\omega_{p_s}^2$, ω_S^2 et $\omega_{Sp_s}^2$ respectivement associés aux effets expérimentaux dûs aux sources de variabilité $D|p_s$, p_s , S et Sp_s sont calculés comme

⁵Pour l'ANOVA classique sur échantillons indépendants traitée en exemple dans la section D.1, chaque échantillon comporte n réponses données par n sujets, des sujets qui diffèrent d'un échantillon à l'autre.

suit :

$$\begin{aligned}\omega_{D|p_s}^2 &= \frac{\hat{\sigma}_{D|p_s}^2}{\hat{\sigma}_{D|p_s}^2 + \hat{\sigma}_{p_s}^2 + \hat{\sigma}_S^2 + \hat{\sigma}_{Sp_s}^2 + \hat{\sigma}_{SD|p_s}^2 + \hat{\sigma}^2} \\ \omega_{p_s}^2 &= \frac{\hat{\sigma}_{p_s}^2}{\hat{\sigma}_{D|p_s}^2 + \hat{\sigma}_{p_s}^2 + \hat{\sigma}_S^2 + \hat{\sigma}_{Sp_s}^2 + \hat{\sigma}_{SD|p_s}^2 + \hat{\sigma}^2} \\ \omega_S^2 &= \frac{\hat{\sigma}_S^2}{\hat{\sigma}_{D|p_s}^2 + \hat{\sigma}_{p_s}^2 + \hat{\sigma}_S^2 + \hat{\sigma}_{Sp_s}^2 + \hat{\sigma}_{SD|p_s}^2 + \hat{\sigma}^2} \\ \omega_{Sp_s}^2 &= \frac{\hat{\sigma}_{Sp_s}^2}{\hat{\sigma}_{D|p_s}^2 + \hat{\sigma}_{p_s}^2 + \hat{\sigma}_S^2 + \hat{\sigma}_{Sp_s}^2 + \hat{\sigma}_{SD|p_s}^2 + \hat{\sigma}^2}\end{aligned}$$

où $\hat{\sigma}_{D|p_s}^2$, $\hat{\sigma}_{p_s}^2$, $\hat{\sigma}_S^2$, $\hat{\sigma}_{Sp_s}^2$, $\hat{\sigma}_{SD|p_s}^2$ et $\hat{\sigma}^2$ sont les composantes de la variance totale respectivement liées aux sources de variabilité $D|p_s$, p_s , S , Sp_s , $SD|p_s$ et à l'erreur expérimentale, définies comme suit :

$$\begin{aligned}\hat{\sigma}_{D|p_s}^2 &= \frac{CM_{D|p_s} - CM_{SD|p_s}}{N} \\ \hat{\sigma}_{p_s}^2 &= \frac{CM_{p_s} - CM_{D|p_s} - CM_{Sp_s} + CM_{SD|p_s}}{n_D N} \\ \hat{\sigma}_S^2 &= \frac{CM_S - CM_{SD|p_s}}{n_D n_{p_s}} \\ \hat{\sigma}_{Sp_s}^2 &= \frac{CM_{Sp_s} - CM_{SD|p_s}}{n_D} \\ \hat{\sigma}_{SD|p_s}^2 + \hat{\sigma}^2 &= CM_{SD|p_s}\end{aligned}$$

où $CM_{D|p_s}$, CM_{p_s} , CM_S , CM_{Sp_s} et $CM_{SD|p_s}$ sont les carrés moyens respectivement associés aux sources de variabilité $D|p_s$, p_s , S , Sp_s et $SD|p_s$.

Dans l'analyse des effets simples de la dispersion de la mesure pour chaque configuration structurale, le coefficient $\omega_D^{(j)2}$ associé à l'effet expérimental dû à la dispersion de la mesure est calculé comme suit :

$$\omega_D^{(j)2} = \frac{\hat{\sigma}_D^{(j)2}}{\hat{\sigma}_D^{(j)2} + \hat{\sigma}_S^{(j)2} + \hat{\sigma}_{SD}^{(j)2} + \hat{\sigma}^{(j)2}}$$

où $\hat{\sigma}_D^{(j)2}$, $\hat{\sigma}_S^{(j)2}$, $\hat{\sigma}_{SD}^{(j)2}$ et $\hat{\sigma}^{(j)2}$ sont les composantes de la variance totale respectivement liées aux sources de variabilité D , S , SD , et à l'erreur expérimentale, définies come suit :

$$\begin{aligned}\hat{\sigma}_D^{(j)2} &= \frac{CM_D^{(j)} - CM_{SD}^{(j)}}{N} \\ \hat{\sigma}_S^{(j)2} &= \frac{CM_S^{(j)} - CM_{SD}^{(j)}}{n_D}\end{aligned}$$

$$\hat{\sigma}_{SD}^{(j)2} + \hat{\sigma}^{(j)2} = CM_{SD}^{(j)}$$

où $CM_D^{(j)}$, $CM_S^{(j)}$ et $CM_{SD}^{(j)}$ sont les carrés moyens respectivement associés aux sources de variabilité D , S et SD .

Annexe E

Évaluation du niveau réel de la mesure de dissimilarité par l'intermédiaire de la méthode des intervalles successifs

L'évaluation *a posteriori* du niveau réel de la mesure fournie par l'échelle de dissimilarité à 7 catégories est réalisée dans le but d'apprécier le degré de violation de l'hypothèse de données du niveau d'intervalles présumée par INDSCAL, utilisé pour traiter les données de dissimilarité (Cf. section 6.1.4.2.a).

Rappelons que la procédure adoptée permet seulement de juger si les sujets ont globalement considéré cette échelle de catégories comme une échelle métrique du niveau d'intervalles. Cette procédure, qui repose sur la méthode des intervalles successifs [Edw52], est détaillée ci-après. Nous commencerons par rappeler dans une première section la loi du jugement catégoriel de Thurstone, sur laquelle repose la méthode des intervalles successifs ; puis, dans une seconde section, nous décrirons la construction du continuum subjectif des dissimilarités par la méthode des intervalles successifs et spécifierons l'indicateur formé afin d'évaluer le niveau réel de la mesure ; enfin, dans une dernière section, nous exposerons la procédure suivie pour apprécier la qualité d'ajustement aux données de dissimilarité de la méthode des intervalles successifs.

E.1 Les bases théoriques : la loi du jugement catégoriel de Thurstone

La loi du jugement catégoriel de Thurstone pose les bases théoriques pour la construction d'un continuum psychologique de l'attribut étudié à partir de jugements catégoriels. Pour différentes présentations d'un même stimulus S_j à un sujet, le modèle du jugement catégoriel spécifie que [Bon86] :

- i) le continuum subjectif est divisé en un nombre fini de catégories ordonnées,
- ii) la limite d'une catégorie g de l'échelle se distribue normalement avec une moyenne t_g et un écart-type σ_g ,

- iii) le sujet juge que le stimulus S_j est en-dessous d'une limite donnée uniquement si la valeur subjective s_j de ce stimulus est inférieure à celle de la limite.

La loi du jugement catégoriel peut alors s'écrire, en appliquant des hypothèses analogues à celles du cas V de la loi du jugement comparatif (Cf. section 2.2.2.2) :

$$t_g - s_j = z_{jg} \quad (\text{E.1})$$

où t_g est la valeur moyenne de la limite de la $g^{\text{ième}}$ catégorie, s_j est la valeur subjective du stimulus S_j , z_{jg} est le score centré réduit correspondant à la fréquence avec laquelle le stimulus S_j est placé en-dessous de la limite g .

E.2 Application de la méthode des intervalles successifs aux jugements de dissimilarité

A partir de jugements catégoriels prononcés sur différents stimuli S_j selon un attribut donné s , la méthode des intervalles successifs, introduite par Edwards [Edw52], vise à construire un *continuum psychologique* de l'attribut s et à déterminer pour chacun des stimuli S_j sa valeur d'échelle sur le continuum défini. Le coeur de la méthode réside dans la détermination des bornes des intervalles sous-tendant le continuum subjectif; la largeur des intervalles correspond à la largeur des catégories, telle que réellement perçue par les sujets. Ici, dans le cadre du test de dissimilarité, les stimuli S_j sont les paires de sons et non les sons eux-mêmes, l'attribut s étudié est la dissimilarité entre les deux sons d'une paire, évaluée sur l'échelle à 7 catégories (allant de "0" à "6").

E.2.1 Construction du continuum subjectif des dissimilarités

Intrinsèquement, la méthode des intervalles successifs permet d'évaluer les bornes des intervalles sous-tendant le continuum subjectif des dissimilarités, excepté la borne inférieure de l'intervalle correspondant à la première catégorie (i.e. "0") et la borne supérieure de l'intervalle correspondant à la dernière catégorie (i.e. "6"), i.e. la méthode permet d'estimer les bornes supérieures des intervalles correspondant aux catégories "0", "1", "2", "3", "4" et "5", et donc la largeur des intervalles correspondant aux catégories "1", "2", "3", "4" et "5".

Dans un premier temps, à partir de la fréquence des réponses dans chacune des 7 catégories observée pour chaque paire de sons, la matrice $\mathbf{P}^{(c)}$ des proportions cumulées est calculée¹ :

¹De par les restrictions intrinsèques à la méthode évoquées ci-avant, les paires de sons pour lesquelles plus de 50% des jugements de dissimilarité tombent dans la première ou la dernière catégorie sont écartées de l'analyse car les valeurs de dissimilarité sur le continuum psychologique ne peuvent être calculées pour ces paires; le nombre de paires prises en compte dans l'analyse est noté n .

$$\mathbf{P}^{(c)} = \begin{bmatrix} p_{11}^{(c)} & p_{12}^{(c)} & \cdots & p_{1g}^{(c)} & \cdots & p_{17}^{(c)} \\ p_{21}^{(c)} & p_{22}^{(c)} & \cdots & p_{2g}^{(c)} & \cdots & p_{27}^{(c)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \cdots & \vdots \\ p_{j1}^{(c)} & p_{j2}^{(c)} & \cdots & p_{jg}^{(c)} & \cdots & p_{j7}^{(c)} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{n1}^{(c)} & p_{n2}^{(c)} & \cdots & p_{ng}^{(c)} & \cdots & p_{n7}^{(c)} \end{bmatrix}$$

où $p_{jg}^{(c)}$ est la proportion des sujets ayant rangé le stimulus S_j dans les catégories inférieures ou égales à la $g^{\text{ième}}$ catégorie, définie par :

$$p_{jg}^{(c)} = \sum_{i=1}^g \frac{N_{ji}}{N_f} \quad (\text{E.2})$$

où N_{ji} est le nombre de sujets ayant placé le stimulus S_j dans la $i^{\text{ième}}$ catégorie ($i \leq g$) et N_f le nombre total de sujets dont les réponses ont été jugées fiables (Cf. section 6.1.4.1). Pour les catégories $g = 1$ à 6 (i.e. “0” à “5”), les proportions cumulées $p_{jg}^{(c)}$ sont ensuite transformées en scores centrés réduits z_{jg} en suivant la loi normale centrée-réduite $\mathcal{N}(0, 1)^2$. Les valeurs de z_{jg} représentent les distances, en unité d'écart-réduit, entre les valeurs subjectives moyennes des stimuli et les bornes supérieures des intervalles [Bon86]; en d'autres termes, chaque valeur de z_{jg} correspond à une estimation de la borne supérieure de l'intervalle correspondant à la catégorie g , fournie par le stimulus S_j . Aussi, la meilleure estimation de la borne supérieure de l'intervalle correspondant à la catégorie g est donnée par la moyenne des scores z_{jg} calculés pour les différents stimuli S_j :

$$t_g = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n z_{jg} \quad (\text{E.3})$$

où t_g correspond à la borne supérieure de l'intervalle correspondant à la catégorie g et n est le nombre de paires de stimuli prises en compte dans l'analyse.

Les largeurs l_g des intervalles successifs sont alors données par :

$$l_g = t_g - t_{g-1}, \quad g \in [2, 6] \quad (\text{E.4})$$

Pour un stimulus S_j , la valeur subjective de la dissimilarité s_j est obtenue en déterminant, par interpolation linéaire, la médiane de la distribution des proportions cumulées $p_{jg}^{(c)}$ des jugements sur le continuum psychologique [Edw52] :

$$s_j = t_g + (0.5 - p_{jg}^{(c)}) \times \frac{t_{g+1} - t_g}{p_{jg+1}^{(c)} - p_{jg}^{(c)}}, \quad \text{avec } p_{jg+1}^{(c)} > 0.5 \geq p_{jg}^{(c)} \quad (\text{E.5})$$

²De même que pour la construction de l'échelle de préférence suivant la loi du jugement comparatif (Cf. section 2.2.2.4), les valeurs de proportions égales à 0 ou 1 sont remplacées respectivement par $\frac{1}{2N_f}$ et $1 - \frac{1}{2N_f}$ où N_f est le nombre total de sujets dont les réponses ont été jugées cohérentes et prises en compte dans l'analyse.

E.2.2 Définition d'un indicateur du niveau réel de la mesure

Les largeurs des intervalles sous-tendant le continuum subjectif des dissimilarités construit par la méthode des intervalles successifs représentent les largeurs “vraies” des catégories, telles qu’elles sont réellement perçues par les sujets. On cherche à évaluer le degré de similitude entre les largeurs “vraies” des intervalles ; cette évaluation est permise par la confrontation des valeurs “vraies” des bornes supérieures des catégories, telles qu’elles sont réellement interprétées par les sujets, et leurs valeurs “ciblées”, telles qu’elles devraient être interprétées par les sujets dans l’hypothèse d’une échelle du niveau d’intervalles.

Les valeurs “vraies” des bornes supérieures des catégories sont obtenues en suivant la procédure de calcul présentée dans la section précédente. Dans l’hypothèse d’une échelle du niveau d’intervalles, l’échelle à catégories désigne à proprement parler un continuum psychologique à intervalles apparemment égaux. En considérant que les labels des catégories de l’échelle de réponse représentent les valeurs centrales des intervalles, la distance qui sépare les valeurs centrales de deux intervalles successifs est égale à 1, i.e. la largeur de chaque intervalle, correspondant à la largeur “ciblée” pour chaque catégorie, est égale à 1. Les valeurs “ciblées” des bornes supérieures des catégories “0”, “1”, “2”, “3”, “4” et “5” sont alors respectivement égales à 0.5, 1.5, 2.5, 3.5, 4.5 et 5.5 (Cf. tableau E.1).

Catégorie de l'échelle de réponse	0	1	2	3	4	5	6
Numéro g de la catégorie	1	2	3	4	5	6	7
Valeurs “vraies” des bornes supérieures des catégories sur le continuum subjectif	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6	
Largeurs “vraies” des catégories sur le continuum subjectif		l_2	l_3	l_4	l_5	l_6	
Largeurs “ciblées” des catégories sur le continuum subjectif		1	1	1	1	1	
Valeurs “ciblées” des bornes supérieures des catégories sur le continuum subjectif	0.5	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	

TAB. E.1 – Tableau des correspondances entre le continuum psychologique construit par la méthode des intervalles successifs et le continuum subjectif “ciblé”, découlant de l’hypothèse d’une échelle à catégories du niveau d’intervalles.

Aussi, dans la pratique, le calcul du coefficient de corrélation linéaire r_{bornes}^2 entre les valeurs “ciblées” et “vraies” des bornes supérieures des catégories permet de fournir une indication sur le degré de similitude entre les largeurs “vraies” des catégories [Fau03]. La valeur de r_{bornes}^2 permet ainsi d’apprécier le niveau réel de la mesure de dissimilarité ; dans l’idéal, si l’échelle de catégories a été parfaitement perçue par l’ensemble des sujets comme une échelle du niveau d’intervalles, alors la valeur de r_{bornes}^2 est égale à 1.

E.3 Évaluation de la qualité d'ajustement aux données de dissimilarité de la méthode des intervalles successifs

La pertinence de l'indicateur r_{bornes}^2 pour estimer le niveau réel de la mesure dépend étroitement de la qualité d'ajustement aux données de dissimilarité de la méthode des intervalles successifs. La procédure d'évaluation de la qualité d'ajustement consiste à confronter les proportions cumulées "observées" $p_{jg}^{(c)}$ à des proportions cumulées "théoriques" $\tilde{p}_{jg}^{(c)}$ reconstruites à partir des valeurs de dissimilarité calculées sur le continuum psychologique [Edw52].

Tout d'abord, des scores centrés réduits "théoriques" \tilde{z}_{jg} sont calculés par soustraction des valeurs de dissimilarité s_j sur le continuum aux bornes supérieures t_g des intervalles, puis reportés dans une matrice, désignée $\tilde{\mathbf{Z}}$:

$$\tilde{\mathbf{Z}} = \begin{bmatrix} \tilde{z}_{11} & \tilde{z}_{12} & \dots & \tilde{z}_{1g} & \dots & \tilde{z}_{16} \\ \tilde{z}_{21} & \tilde{z}_{22} & \dots & \tilde{z}_{2g} & \dots & \tilde{z}_{26} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \dots & \vdots \\ \tilde{z}_{j1} & \tilde{z}_{j2} & \dots & \tilde{z}_{jg} & \dots & \tilde{z}_{j6} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{z}_{n1} & \tilde{z}_{n2} & \dots & \tilde{z}_{ng} & \dots & \tilde{z}_{n6} \end{bmatrix}$$

où les éléments \tilde{z}_{jg} sont donnés par :

$$\tilde{z}_{jg} = t_g - s_j, \quad j \in [1, n], \quad g \in [1, 6] \quad (\text{E.6})$$

où s_j est la valeur de dissimilarité calculée sur le continuum psychologique pour le stimulus S_j et t_g est la borne supérieure de l'intervalle correspondant à la catégorie g .

Ensuite, les éléments $\tilde{p}_{jg}^{(c)}$ de la matrice $\tilde{\mathbf{P}}^{(c)}$ de proportions cumulées "théoriques" sont calculés en utilisant la fonction de répartition de la loi normale centrée-réduite $\mathcal{N}(0, 1)$. Les proportions cumulées "théoriques" $\tilde{p}_{jg}^{(c)}$ de la matrice $\tilde{\mathbf{P}}^{(c)}$ et les proportions cumulées "observées" $p_{jg}^{(c)}$ placées dans les six premières colonnes de la matrice $\mathbf{P}^{(c)}$ sont portées à la comparaison³. La valeur du coefficient de corrélation r_{valid}^2 entre les deux séries de proportions cumulées donne une mesure de la qualité d'ajustement aux données de dissimilarité de la méthode des intervalles successifs. Ainsi, plus la valeur de r_{valid}^2 sera proche de 1, plus l'indicateur r_{bornes}^2 sera pertinent pour évaluer à propos le niveau réel de la mesure de dissimilarité.

³En fait, seules les entrées *indépendantes* des matrices $\mathbf{P}^{(c)}$ et $\tilde{\mathbf{P}}^{(c)}$ sont alors portées à la comparaison ; pour $\mathbf{P}^{(c)}$, les éléments rangés dans la 7^{ème} colonne ne constituent pas des entrées indépendantes car ils "doivent" être tous égaux à 1 [Edw52].

Annexe F

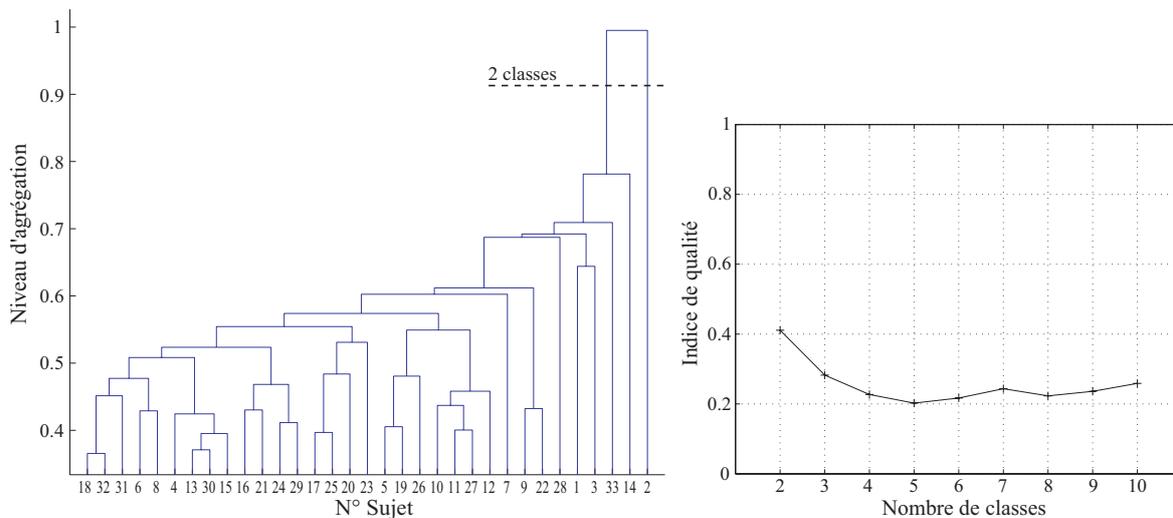
Compléments sur l'établissement des tendances qualitatives originales relatives à l'influence de la variation de paramètres structuraux d'un système plaque-cavité

F.1 Analyse en clusters des sujets

F.1.1 Jugements de dissimilarité

La figure [F.1](#) présente les résultats de la Classification Ascendante Hiérarchique appliquée sur la matrice de dissemblances entre sujets \mathbf{D}_1 . La partition en 2 classes se démarque des autres partitions de par son indice de qualité plus élevé. Pour cette partition, l'une des deux classes est composée d'un seul sujet, i.e. le sujet n°2; on peut considérer ce sujet comme un "outlier". Ces résultats montrent qu'il n'existe pas de sous-groupes de sujets avec des logiques clairement différentes.

Pour l'établissement des tendances qualitatives originales (Cf. section [6.2.2](#)), les jugements de dissimilarité prononcés par le sujet n°2 seront écartés de l'analyse.

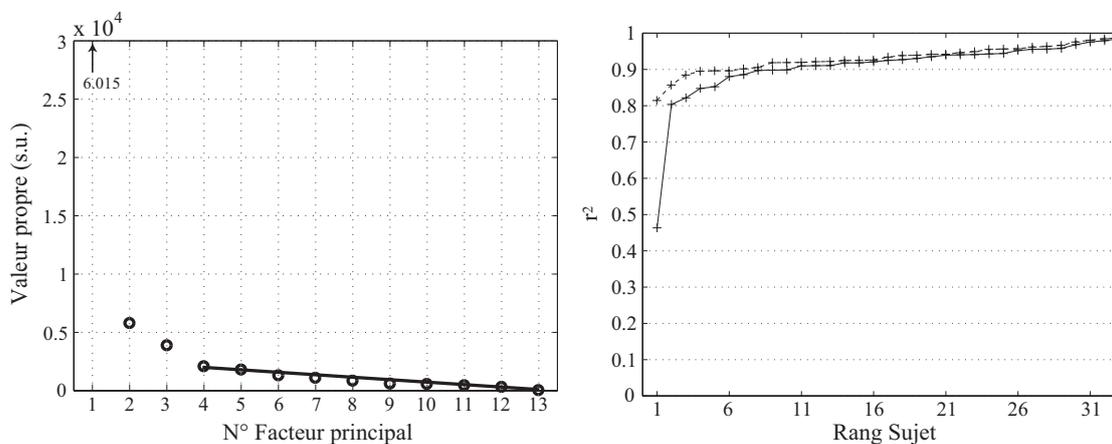


(a) Dendrogramme des sujets.

(b) Valeurs de l'indice de qualité exprimées en fonction du nombre de classes.

FIG. F.1 – Classification Ascendante Hiérarchique réalisée à partir de la matrice de dissimilarités \mathbf{D}_1 .

F.1.2 Jugements de préférence



(a) Diagramme des valeurs propres exprimées en fonction du numéro du facteur principal associé.

(b) Valeurs du coefficient de corrélation r (élevé au carré) entre les projections des stimuli sur le vecteur sujet et les scores primaires initialement calculés, pour les différents sujets. — : espace 4D, -- : espace 5D.

FIG. F.2 – Étude de la dimensionnalité de l'espace perceptif de préférence dressé via MDPREF à partir des réponses de tous les sujets. On opte pour une dimensionnalité égale à 5.

F.2 Établissement des tendances qualitatives

F.2.1 Espace perceptif de dissimilarité

F.2.1.1 Évaluation du niveau réel de la mesure de dissimilarité

Les valeurs de l'indicateur r_{bornes}^2 du niveau de la mesure et de l'indicateur r_{valid}^2 de la qualité d'ajustement aux données de la méthode des intervalles successifs (Cf. annexe E) sont reportées dans le tableau F.1.

r_{bornes}^2	r_{valid}^2
0.997 ($p < .001$)	0.980 ($p < .001$)

TAB. F.1 – Indicateur r_{bornes}^2 du niveau de la mesure et indicateur r_{valid}^2 de la qualité d'ajustement aux données de la méthode des intervalles successifs.

La valeur élevée de l'indicateur r_{valid}^2 autorise à utiliser r_{bornes}^2 comme un indicateur pertinent du niveau réel de la mesure. Aussi, la valeur élevée de r_{bornes}^2 montre que les sujets ont globalement perçu l'échelle de catégories comme une échelle métrique, i.e. comme une échelle à intervalles apparemment égaux. Ainsi, sous INDSCAL, l'analyse multidimensionnelle sera menée dans des conditions relativement proches des conditions initiales d'utilisation du modèle (données en entrée du niveau d'intervalles).

F.2.1.2 Détermination de la dimensionnalité

Le tracé de la proportion cumulée de variance expliquée par INDSCAL en fonction du nombre de dimensions est présenté sur la figure F.3. On peut observer que la proportion varie “doucement” en fonction du nombre de dimensions ; un coude, peu prononcé, apparaît sur la courbe entre les dimensionnalités égales à 2 et 3 ; ainsi, la dimensionnalité de l'espace perceptif de dissimilarité est vraisemblablement égale à 2 ou 3. La taille importante des ellipses de confiance à 95% calculées sur les positions des stimuli dans l'espace à 3 dimensions (Cf. figure F.4) donne à penser que la solution INDSCAL est relativement instable pour cette dimensionnalité. Aussi, une dimensionnalité égale à 2 est finalement retenue.

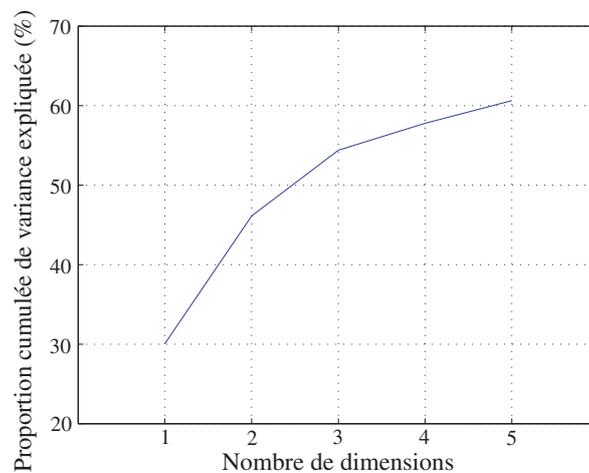
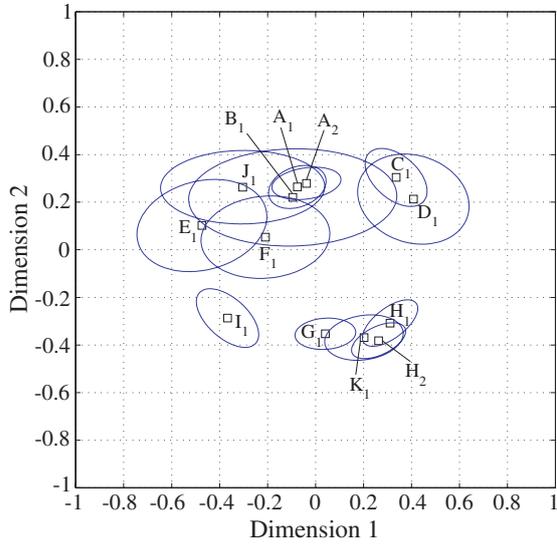
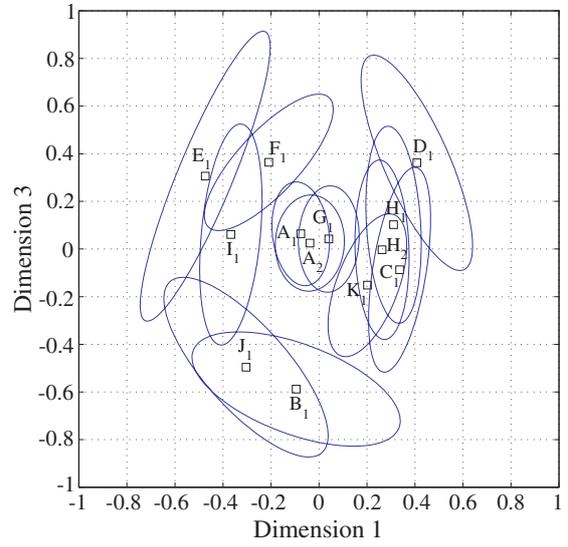


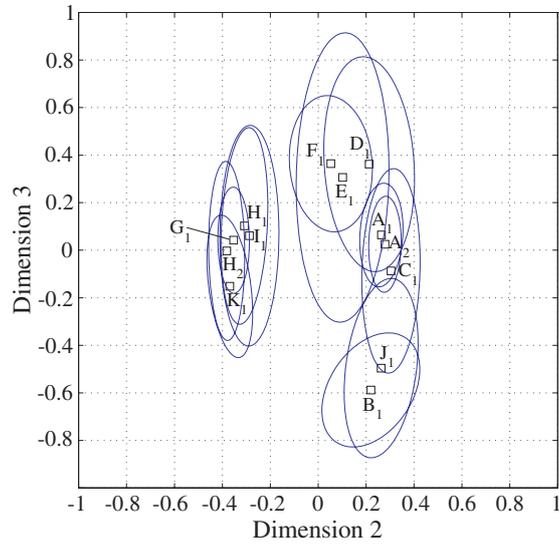
FIG. F.3 – Proportion cumulée de variance expliquée en fonction du nombre de dimensions.



(a) Dimensions 1-2.



(b) Dimensions 1-3.



(c) Dimensions 2-3.

FIG. F.4 – Espace perceptif de dissimilarité 3D des stimuli, dans leur ellipsoïde de confiance à 95%.

F.2.1.3 Analyse psychoacoustique

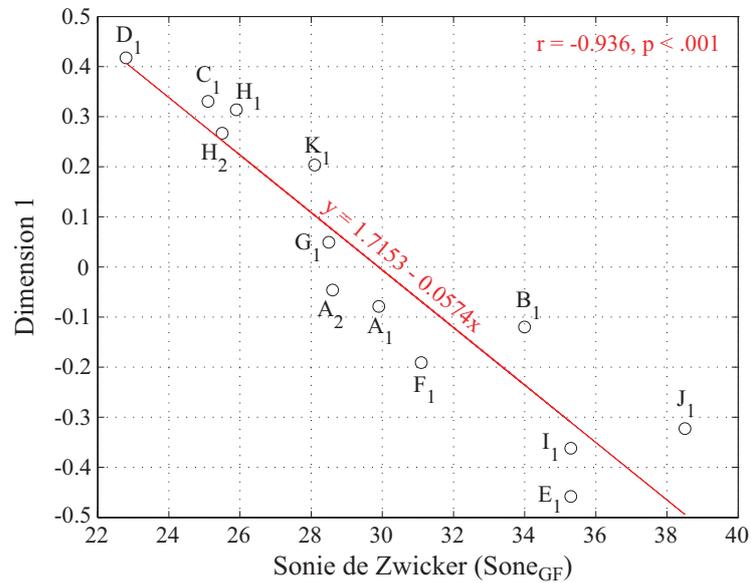


FIG. F.5 – Diagramme des coordonnées des stimuli le long de la dimension 1 de l'espace perceptif de dissimilarité exprimées en fonction des valeurs de la sone de Zwicker. — : droite de régression.

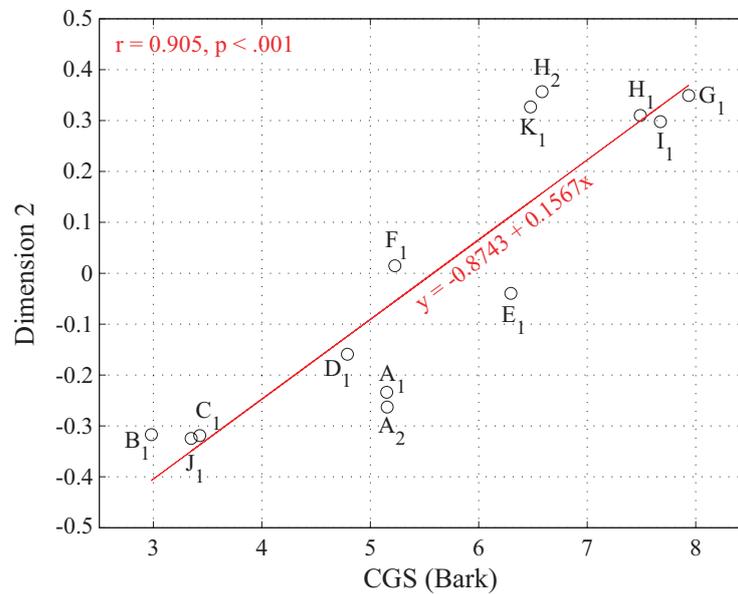
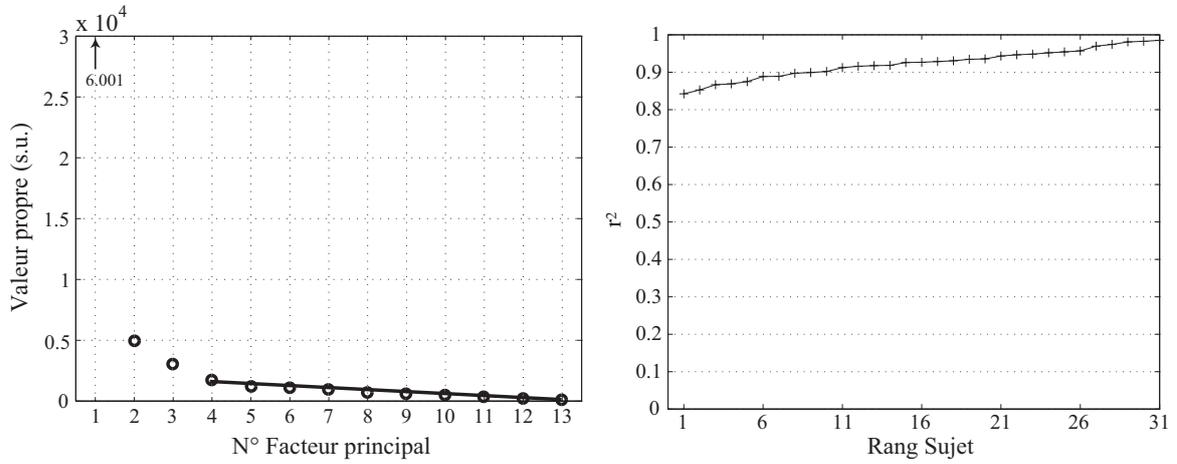


FIG. F.6 – Diagramme des coordonnées des stimuli le long de la dimension 2 de l'espace perceptif de dissimilarité exprimées en fonction des valeurs du Centre de Gravité Spectral. — : droite de régression.

F.2.2 Espace perceptif de préférence



(a) Diagramme des valeurs propres exprimées en fonction du numéro du facteur principal associé.

(b) Valeurs du coefficient de corrélation r (élevé au carré) entre les projections des stimuli sur le vecteur sujet 4D et les scores primaires initialement calculés, pour les différents sujets.

FIG. F.7 – Détermination de la dimensionnalité de l'espace perceptif de préférence. Une dimensionnalité égale à 4 apparaît appropriée.

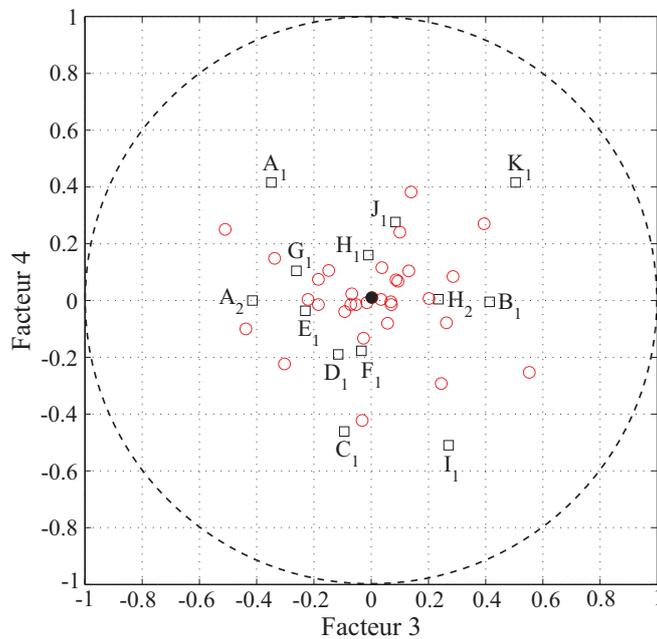


FIG. F.8 – Plan factoriel 3-4 de l'espace perceptif de préférence. \square : stimuli, \circ : extrémités des vecteurs sujets, \bullet : extrémité du vecteur sujet "moyen".

F.2.3 Valeurs de mérite

F.2.3.1 Qualité d'ajustement des modèles de mesure unidimensionnelle aux données de préférence

Le tracé des proportions “théoriques” en fonction des proportions “observées”, réalisé pour les modèles de Thurstone (*cas V*) et de Bradley-Terry, est présenté sur la figure F.9.

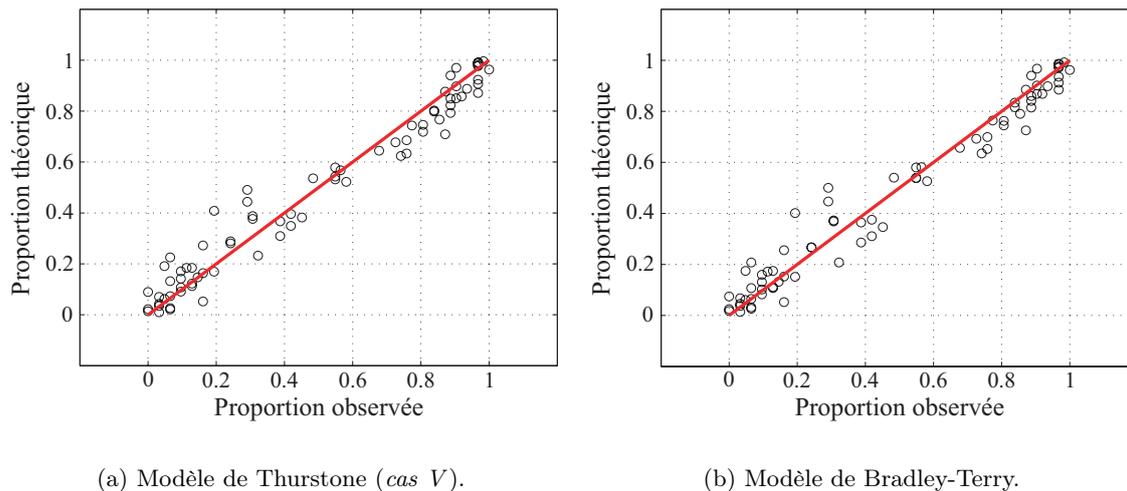


FIG. F.9 – Proportions “théoriques” *vs* proportions “observées”.

Pour les deux modèles de mesure, la faible dispersion du nuage de points indique une bonne qualité d'ajustement du modèle aux données expérimentales ; en outre, le coefficient de corrélation r^2 entre les deux séries de proportions est égal à 0.96 pour les deux modèles ; la qualité d'ajustement que ces deux modèles affichent est équivalente. Nous décidons d'utiliser le modèle de Thurstone (*cas V*) pour établir le classement des stimuli selon leur valeur de mérite.

F.2.3.2 Construction du modèle prédictif de la préférence

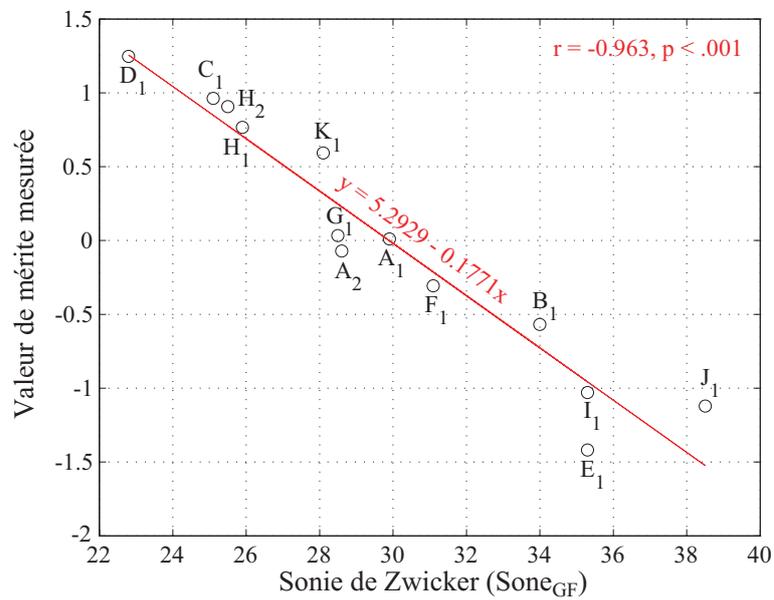


FIG. F.10 – Diagramme des valeurs de mérite mesurées des stimuli exprimées en fonction des valeurs de la sonie de Zwicker. — : droite de régression.

Annexe G

Quelques éléments complémentaires sur l'analyse auditive réalisée sous dBsonic

L'analyse auditive proposée sous dBsonic © Cortex Instruments - 01dB Metravib Technologies repose principalement sur l'approche de Terhardt du traitement de l'information auditive par les systèmes auditif et cognitif humains^{1,2} [Hei88, Ter87, Ter92].

G.1 Le spectrogramme auditif

Le spectrogramme auditif (ASP) est une représentation temps-fréquence auditivement adéquate des signaux. L'ASP d'un son est calculé par application sur le signal temporel d'une Transformée de Fourier à Court Terme — *Short-Time Fourier Transform* en anglais (STFT) — modifiée [Cor04]. Contrairement à une STFT classique [OSB99], pour cette transformée modifiée, l'échelle fréquentielle est non linéaire (exprimée en Barks); la largeur de bande d'analyse fréquentielle est non constante, et ce en adéquation avec la sélectivité fréquentielle de l'oreille humaine. Les valeurs utilisées pour les deux principaux paramètres de calcul sont :

- Pas fréquentiel : 0.05 Bark³,
- Période d'échantillonnage (espace temporel entre deux trames spectrales) : 1 ms⁴.

Un exemple d'ASP est présenté sur la figure G.1.

Le spectre auditif d'un stimulus, à partir duquel est calculée la métrique CGS (Cf. section 6.2.2.1), correspond à la moyenne des 4000 trames spectrales de l'ASP calculées sur les 4 secondes de signal.

¹E. Terhardt. Psychophysics of audio signal processing and the role of pitch in speech. In M. E. H. Schouten, éditeur, *The Psychophysics of Speech Perception*, pages 271-283. M. Nijhoff Publ., Dordrecht, Netherlands, 1987 (cité dans [Cor04]).

²E. Terhardt. Akustische Kommunikation. Grundlagen mit Hörbeispielen. Springer Verlag, Berlin - Heidelberg, Germany, 1998 (cité dans [Cor04]).

³Cette valeur correspond à la résolution fréquentielle de l'oreille [Cor04].

⁴Cette valeur correspond à la résolution temporelle de l'oreille [Cor04].

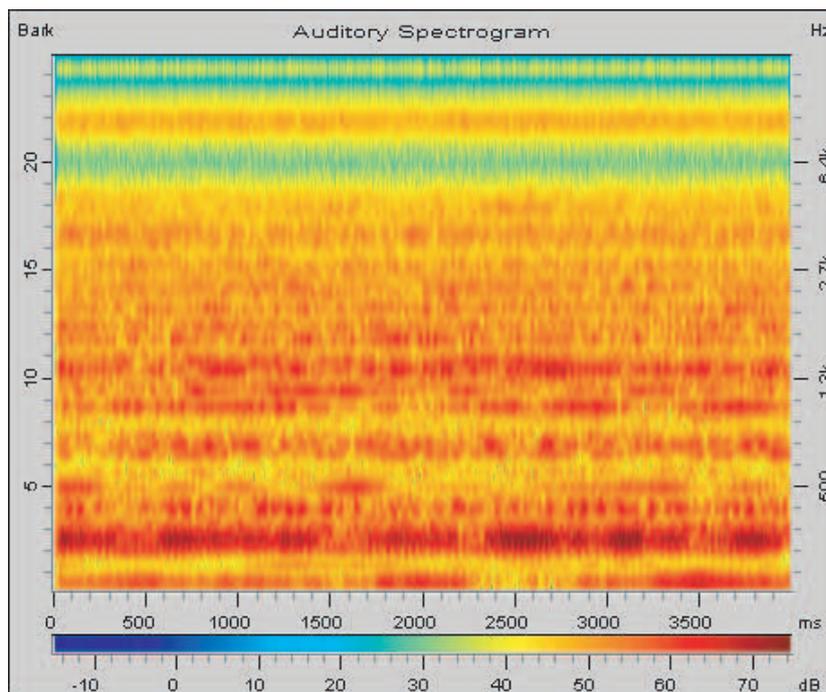


FIG. G.1 – Exemple d'ASP calculé sous dB Sonic.

G.2 Le diagramme de contours auditifs

Le diagramme de contours auditifs, aussi appelé *maxigramme*, est la représentation graphique du profil temporel des *partiels* d'un son — *Part-Tone-Time-Pattern* (PTTP) en anglais [Hei88]. La base psychophysique du PTTP est le modèle de perception des hauteurs spectrales proposé par Terhardt. Dans ce modèle, les hauteurs spectrales jouent le rôle de contours auditifs. Au sein du PTTP, le *partiel* est l'équivalent physique du percept de hauteur spectrale. Dans la pratique, les partiels sont extraits de l'ASP par un algorithme de détection de pic ; pour plus de précisions sur le paramétrage de la procédure d'extraction, on pourra se reporter à la référence [Cor04].

Un exemple de maxigramme est présenté sur la figure G.2.

G.3 Le diagramme *Frequency Tracks*

Le diagramme *Frequency Tracks* — on se propose de traduire *Frequency Tracks* en français par *Pistes Fréquentielles* — d'un stimulus est déterminé à partir de son maxigramme : les pistes fréquentielles (dont l'amplitude est exprimée en dB), qui représentent les composantes tonales auditivement pertinentes du stimulus, sont formées par connexion des éléments de contour fréquentiel, et ce suivant des critères qui reposent sur les principes de la théorie *Gestalt*. La *Gestalt* est, au sens large, une théorie des formes et des organisations ; ses principes, énoncés initialement dans le cadre de la perception visuelle puis transposés au domaine de la perception

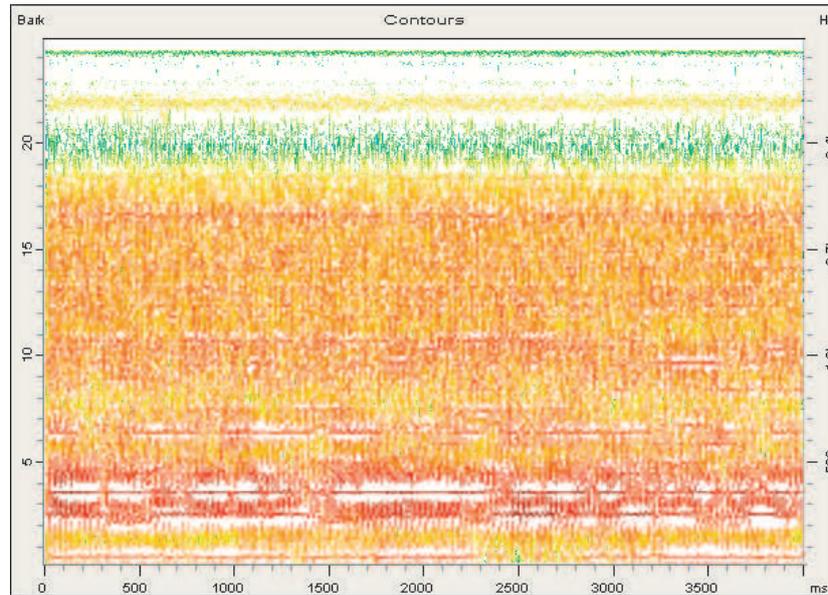


FIG. G.2 – Exemple de maxigramme calculé sous dBsonic.

auditive, sont précisés dans la référence [Par07]. Aussi, en dehors des composantes tonales auditivement pertinentes, le reste de l'information contenue dans les sons, assimilé à du bruit, est éliminé de la représentation graphique.

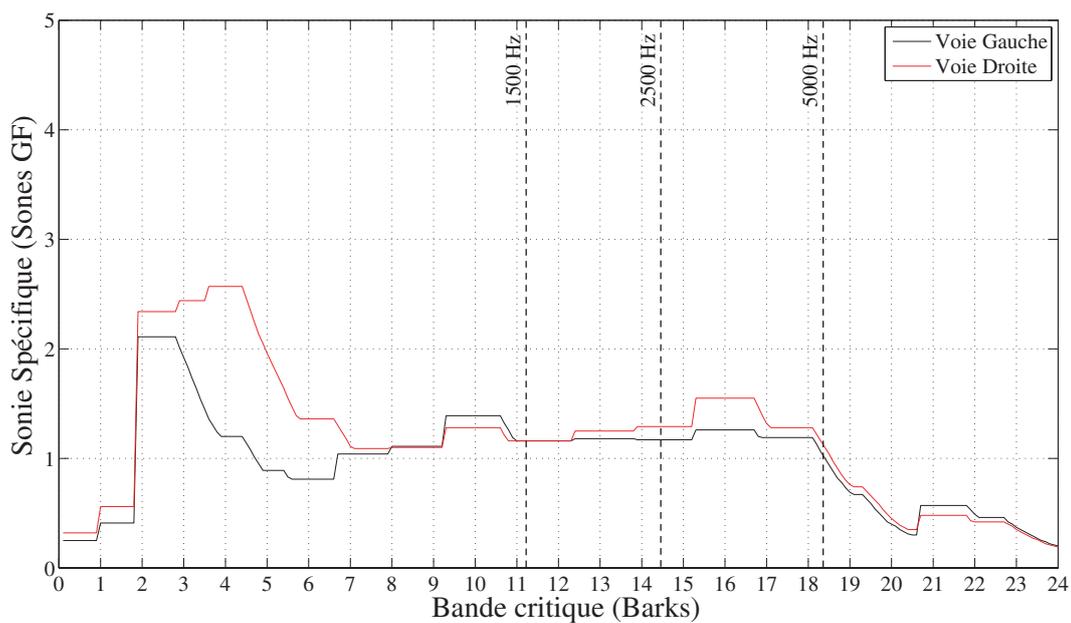
Dans la pratique, les valeurs utilisées pour les deux principaux critères de connexion sont les suivantes :

- Intervalle de recherche en fréquence : 0.15 Bark. Ce critère représente l'espacement fréquentiel maximal entre éléments de contour fréquentiel voisins en-deçà duquel ceux-ci peuvent être connectés.
- Intervalle de recherche en niveau : 10 dB. Pour des éléments de contour fréquentiel tombant dans l'intervalle de recherche en fréquence, ce critère représente la différence de niveau de pression maximale en-deçà de laquelle ceux-ci sont connectés.

Annexe H

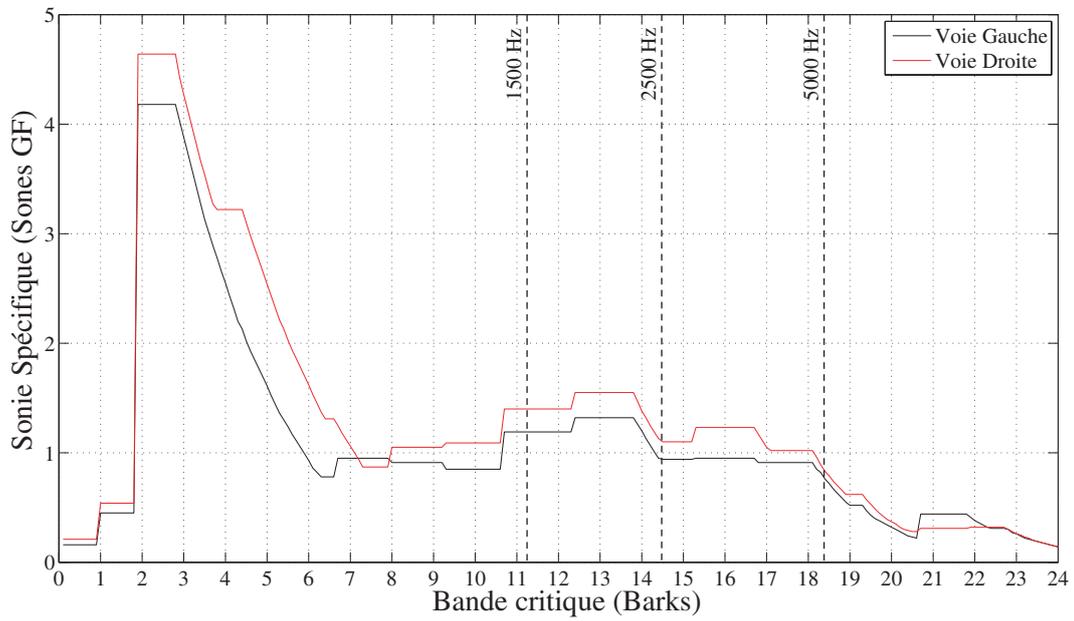
Compléments relatifs à l'ajustement de la fréquence de coupure des sons

H.1 Patterns de sonie des sons réels originaux

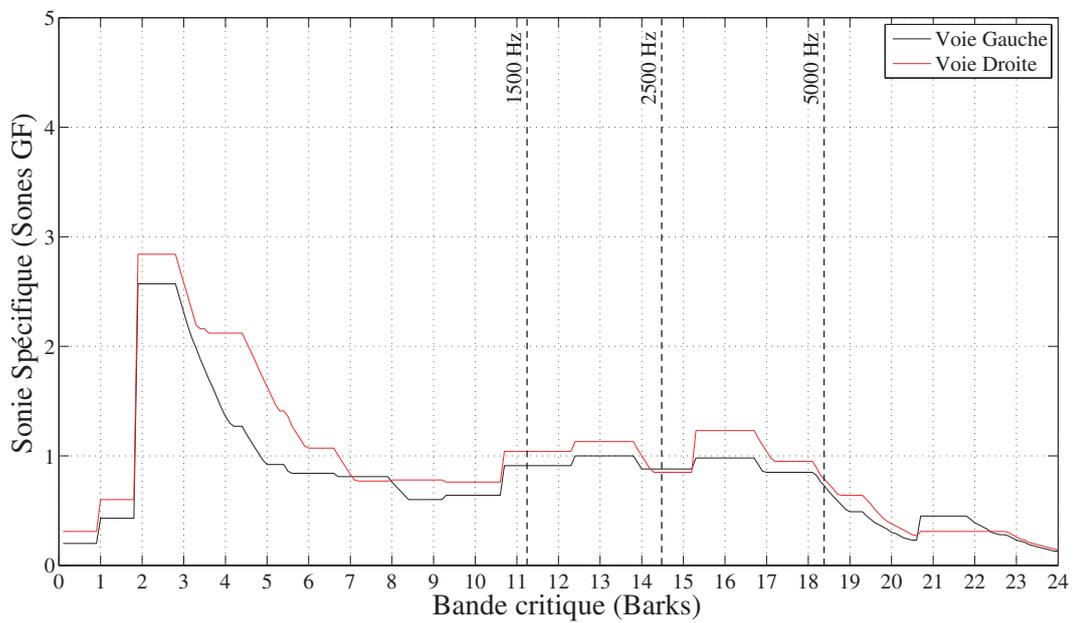


(a) Stimulus A_1 .

FIG. H.1 – Patterns de sonie calculés pour les différents stimuli originaux à l'aide du logiciel dB Sonic © Cortex Instruments - 01dB Metravib Technologies.

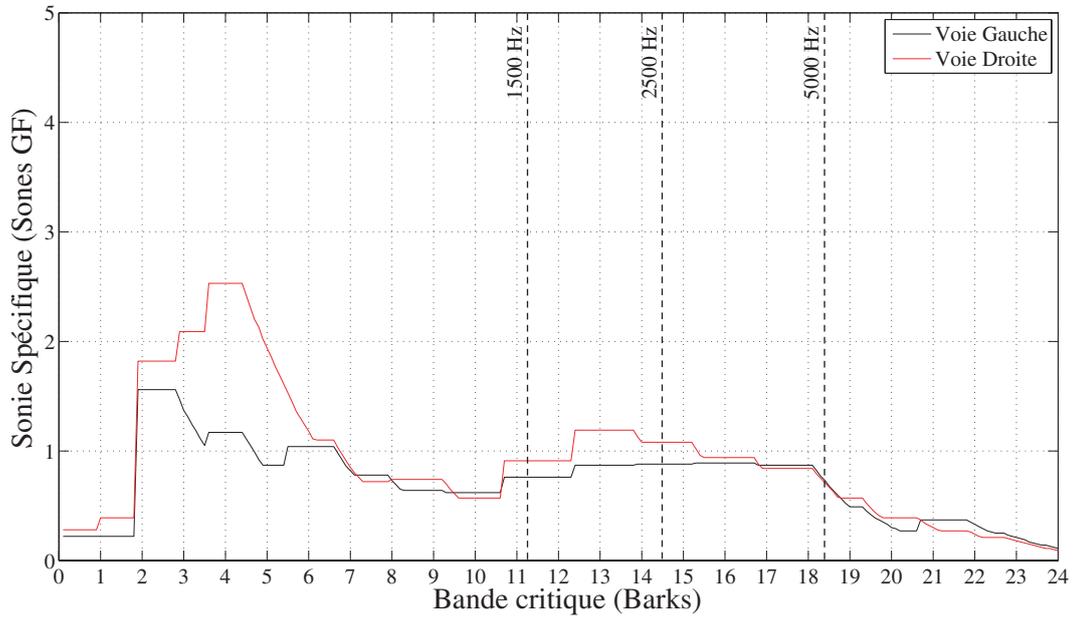


(b) Stimulus B_1 .

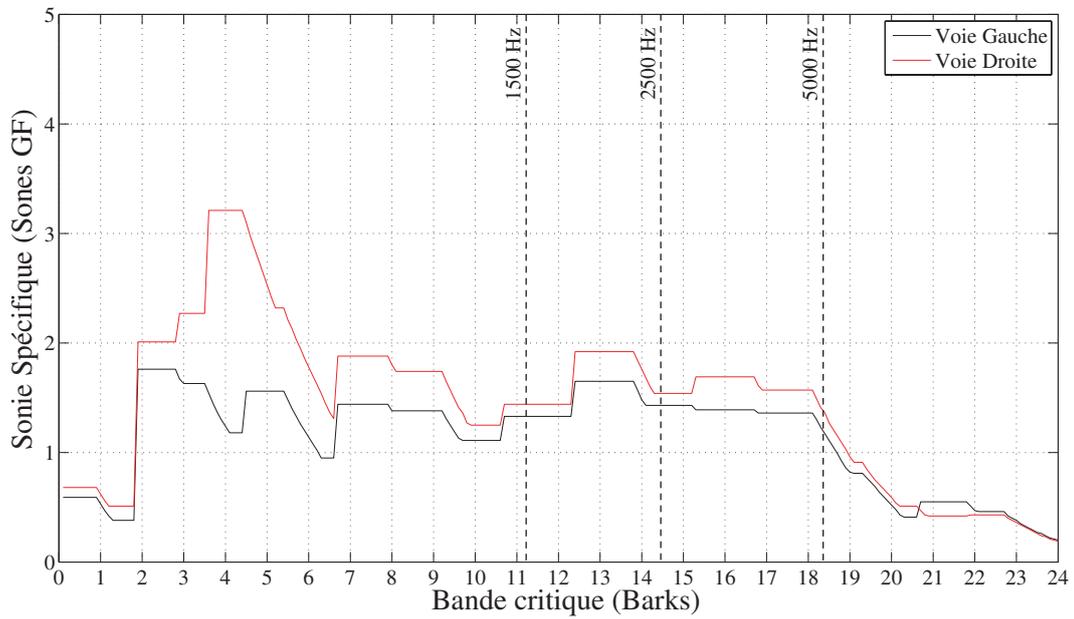


(c) Stimulus C_1 .

FIG. H.1 – Patterns de sonie calculés pour les différents stimuli originaux à l'aide du logiciel dB Sonic © Cortex Instruments - 01dB Metravib Technologies. (suite)

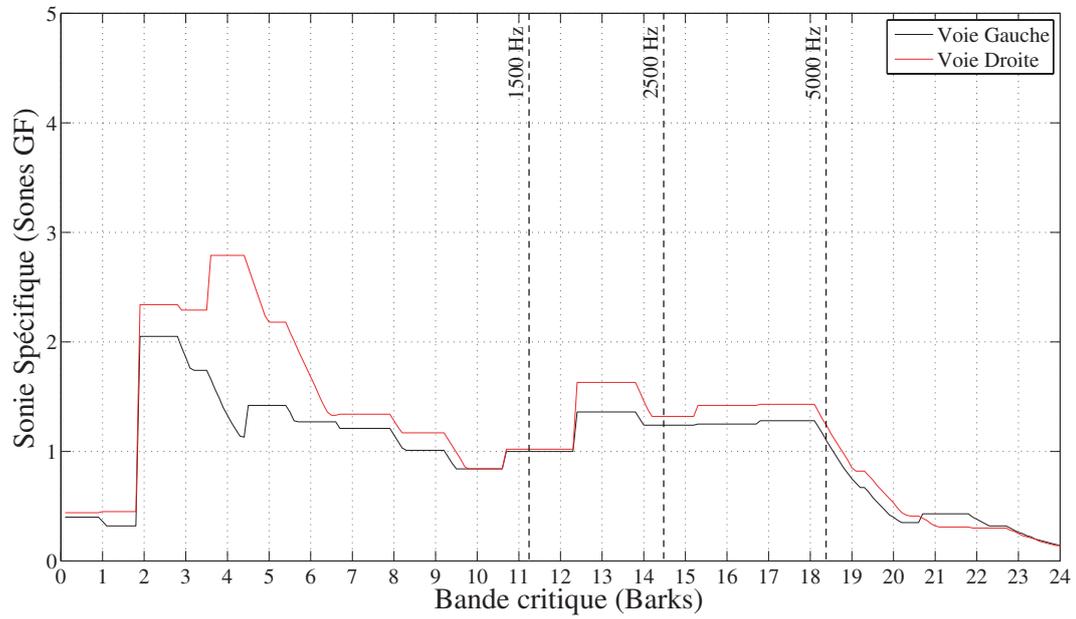


(d) Stimulus D_1 .

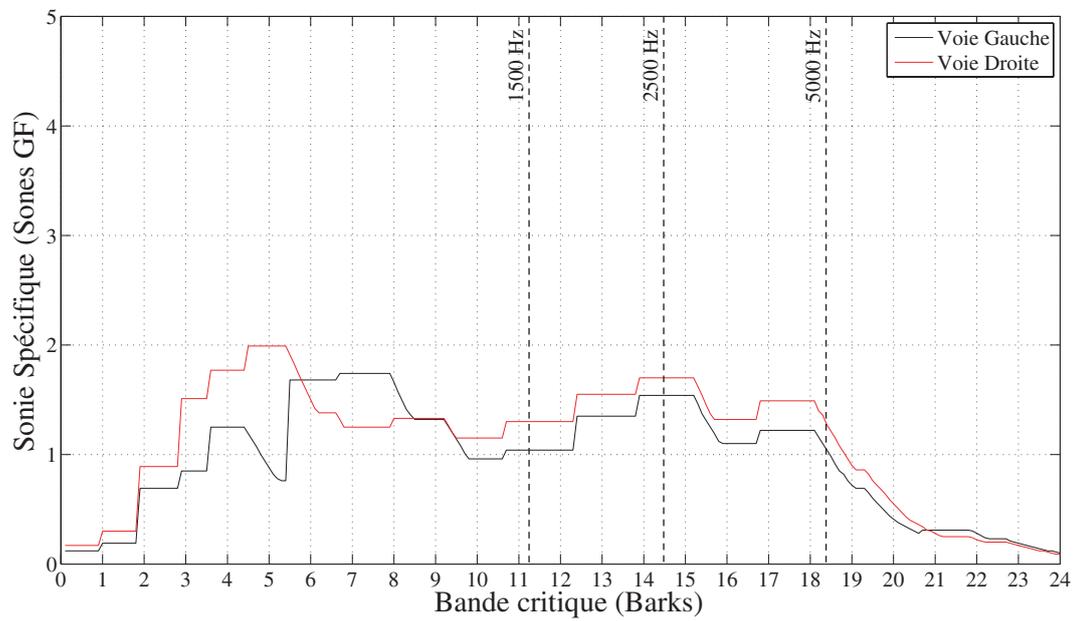


(e) Stimulus E_1 .

FIG. H.1 – Patterns de sonie calculés pour les différents stimuli originaux à l'aide du logiciel dBSONIC © Cortex Instruments - 01dB Metravib Technologies. (suite)

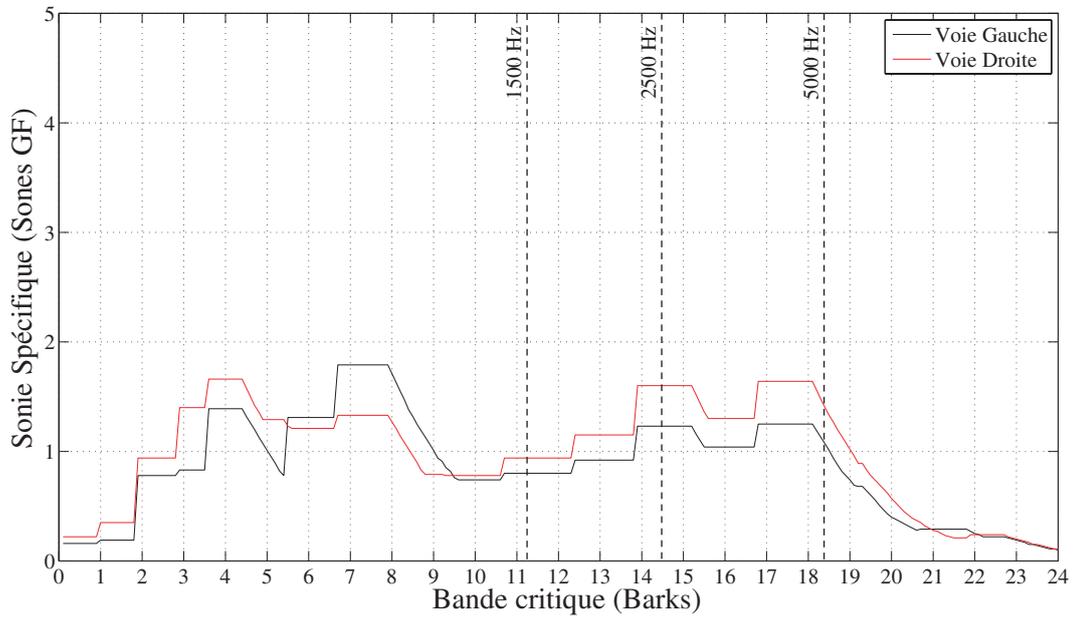


(f) Stimulus F_1 .

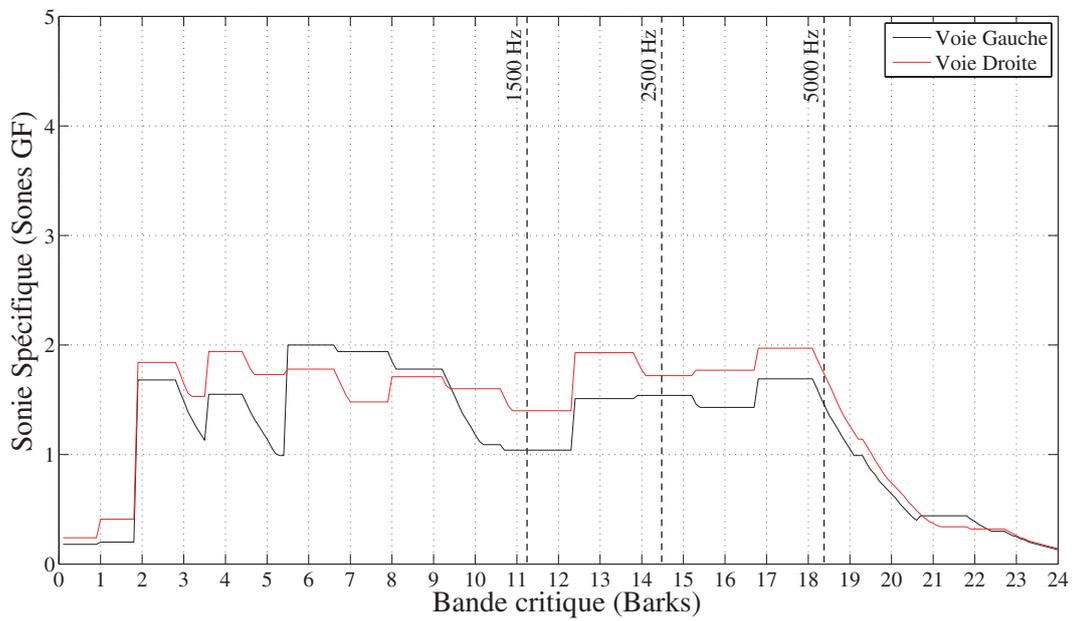


(g) Stimulus G_1 .

FIG. H.1 – Patterns de sonie calculés pour les différents stimuli originaux à l'aide du logiciel dB Sonic © Cortex Instruments - 01dB Metravib Technologies. (suite)

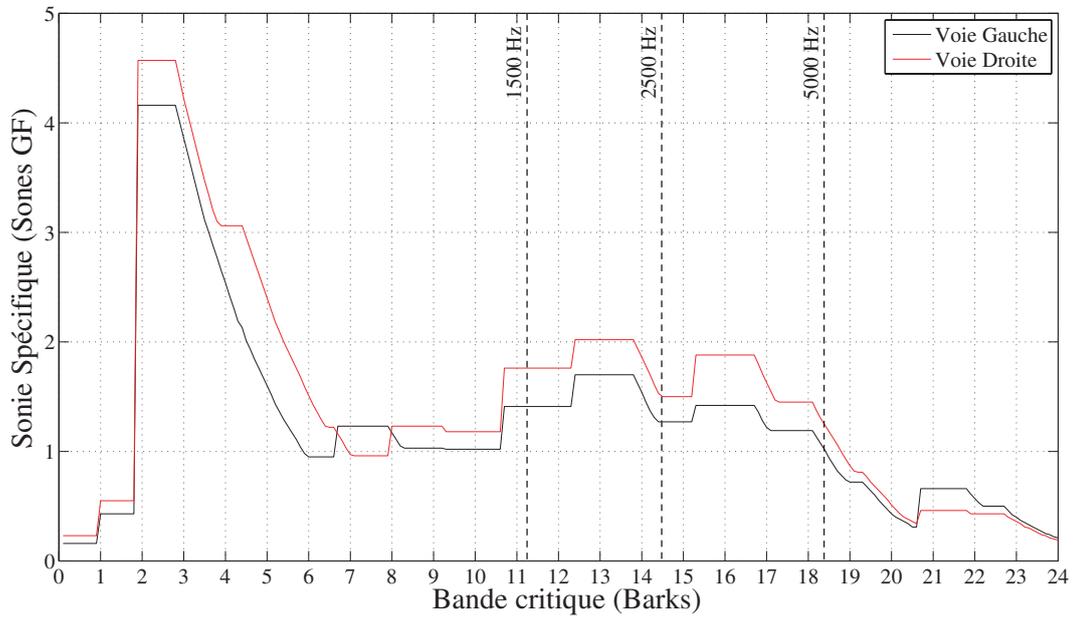


(h) Stimulus H_1 .

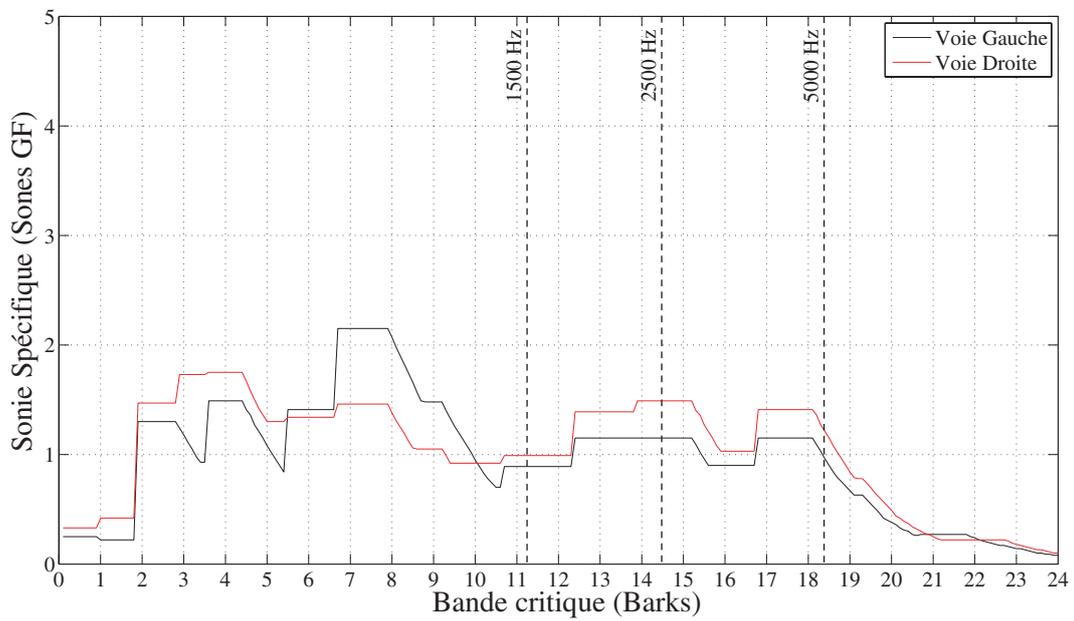


(i) Stimulus I_1 .

FIG. H.1 – Patterns de sonie calculés pour les différents stimuli originaux à l'aide du logiciel dBSONIC © Cortex Instruments - 01dB Metravib Technologies. (suite)

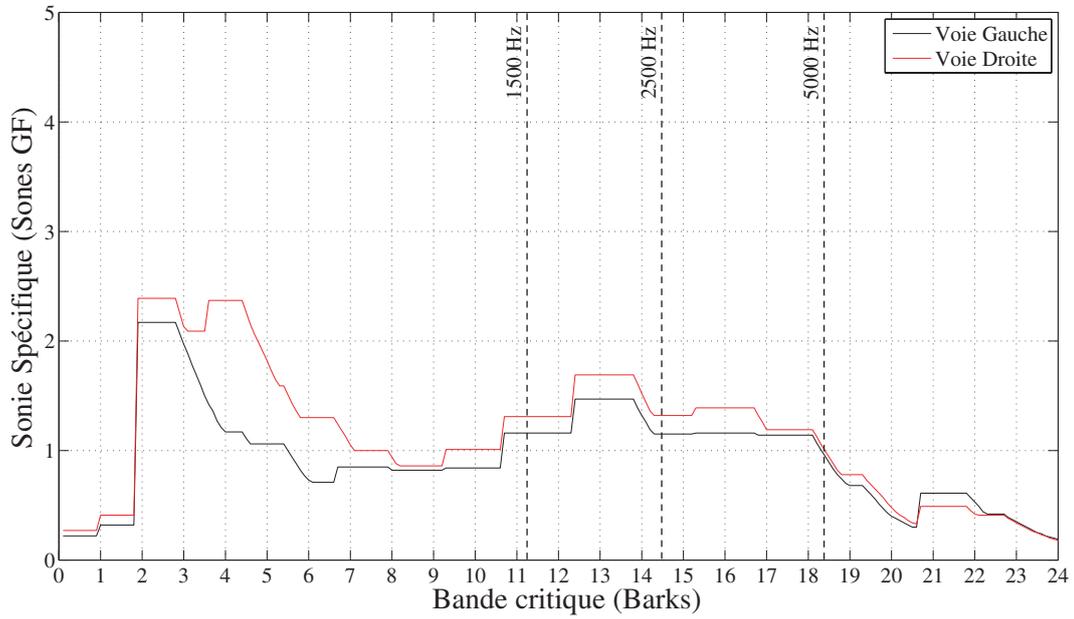


(j) Stimulus J_1 .

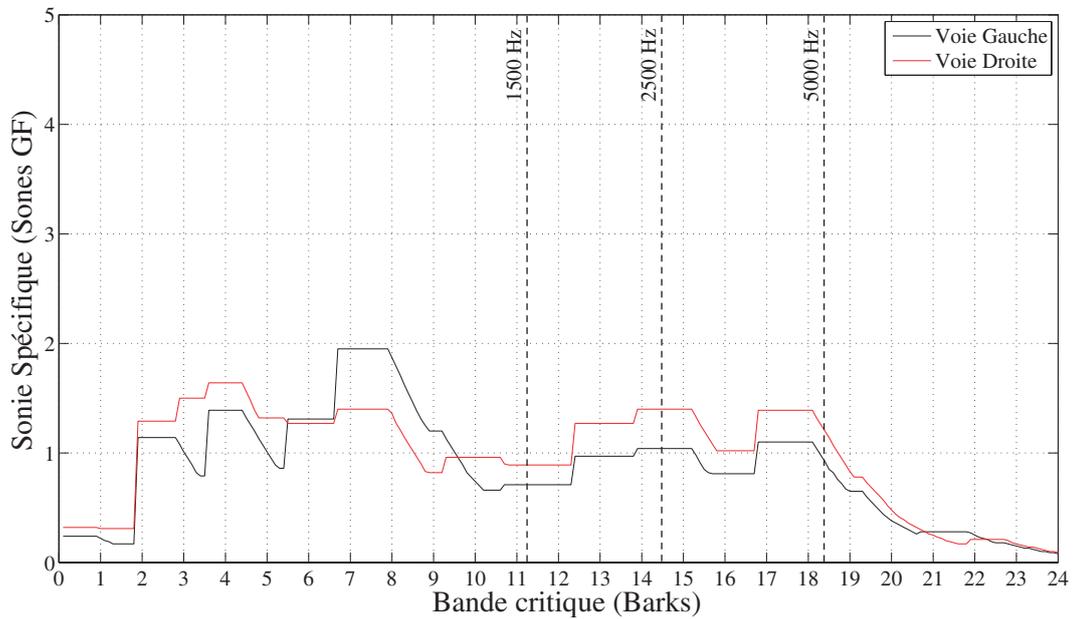


(k) Stimulus K_1 .

FIG. H.1 – Patterns de sonie calculés pour les différents stimuli originaux à l'aide du logiciel dB Sonic © Cortex Instruments - 01dB Metravib Technologies. (suite)



(l) Stimulus A_2 .



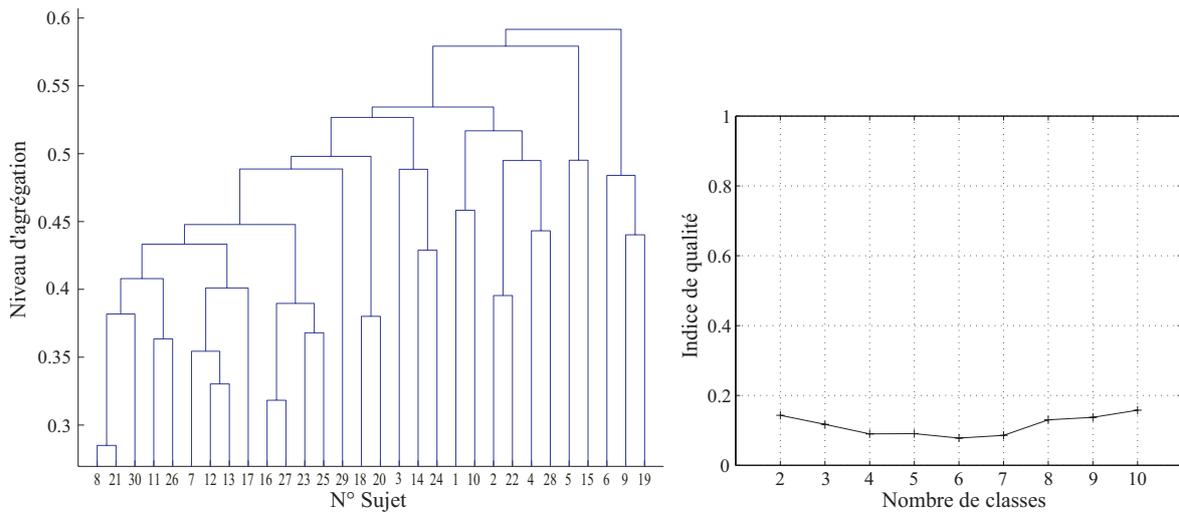
(m) Stimulus H_2 .

FIG. H.1 – Patterns de sonie calculés pour les différents stimuli originaux à l'aide du logiciel dBSONIC © Cortex Instruments - 01dB Metravib Technologies. (suite et fin)

H.2 Résultats complémentaires relatifs à l'analyse des données issues de l'évaluation auditive des stimuli filtrés passe-bas à $f_{max}^* = 2500$ Hz

H.2.1 Analyse en clusters des sujets

H.2.1.1 Jugements de dissimilarité

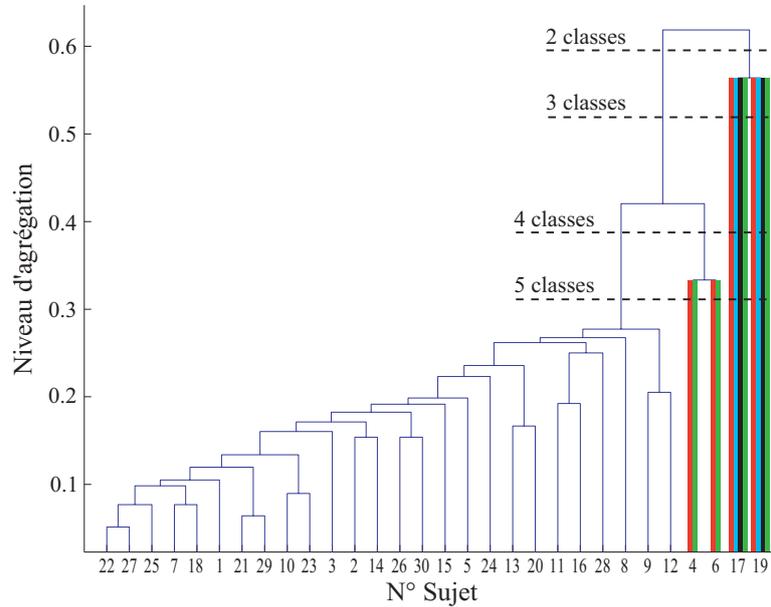


(a) Dendrogramme des sujets.

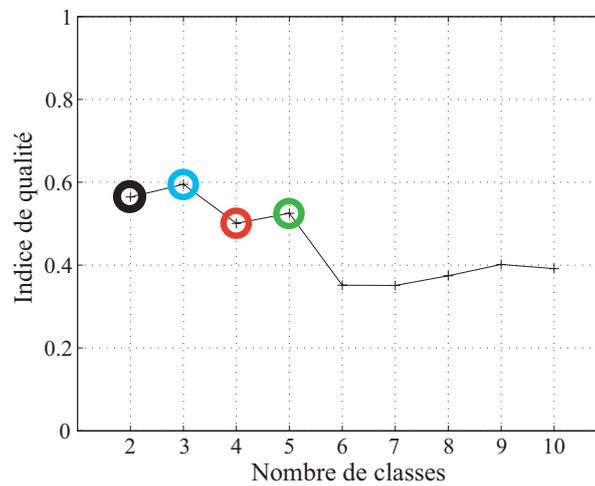
(b) Valeurs de l'indice de qualité exprimées en fonction du nombre de classes.

FIG. H.2 – Résultats de la Classification Ascendante Hiérarchique réalisée à partir de la matrice de dissemblances \mathbf{D}_1 . Ces résultats ne révèlent pas de sujets “outliers” ou de sous-groupes de sujets.

H.2.1.2 Jugements de préférence

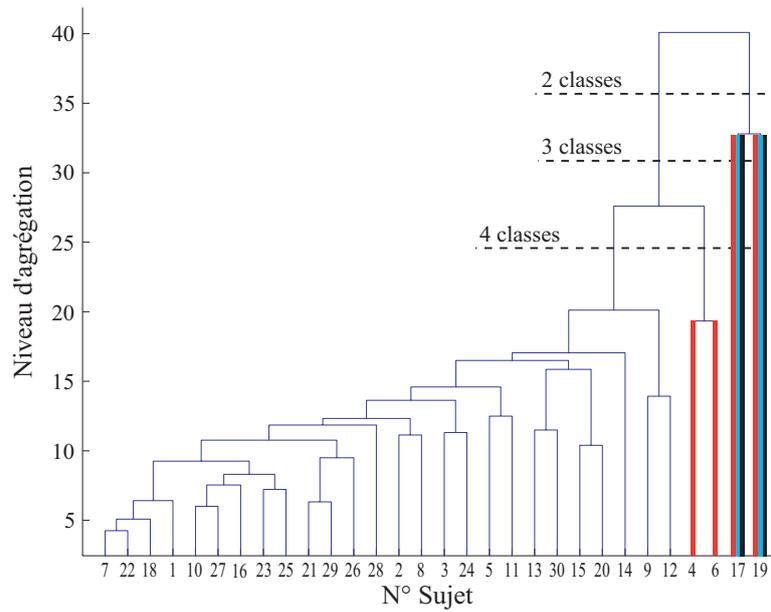


(a) Dendrogramme des sujets. Pour chaque partition pertinente, les sujets jugés comme étant des "outliers" sont surlignés. Les couleurs de surlignage respectent les couleurs utilisées ci-dessous pour repérer les différentes partitions pertinentes.

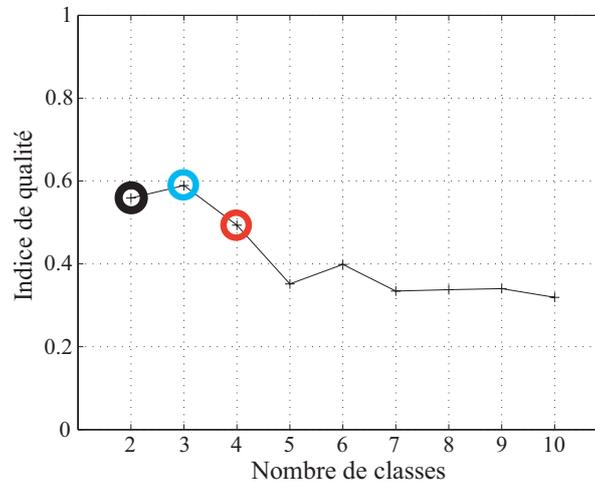


(b) Valeurs de l'indice de qualité exprimées en fonction du nombre de classes. Les partitions jugées comme pertinentes sont repérées par un cercle coloré.

FIG. H.3 – Résultats de la Classification Ascendante Hiérarchique appliquée sur la matrice de dissemblances \mathbf{D}_2 .



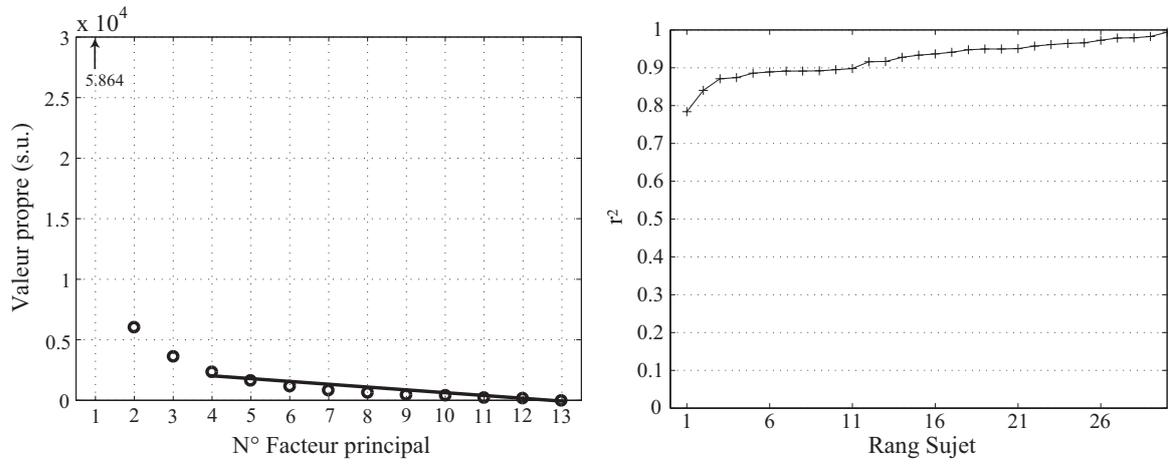
(a) Dendrogramme des sujets. Pour chaque partition pertinente, les sujets jugés comme étant des "outliers" sont surlignés. Les couleurs de surlignage respectent les couleurs utilisées ci-dessous pour repérer les différentes partitions pertinentes.



(b) Valeurs de l'indice de qualité exprimées en fonction du nombre de classes. Les partitions jugées comme pertinentes sont repérées par un cercle coloré.

FIG. H.4 – Résultats de la Classification Ascendante Hiérarchique appliquée sur la matrice de dissemblances \mathbf{D}_3 .

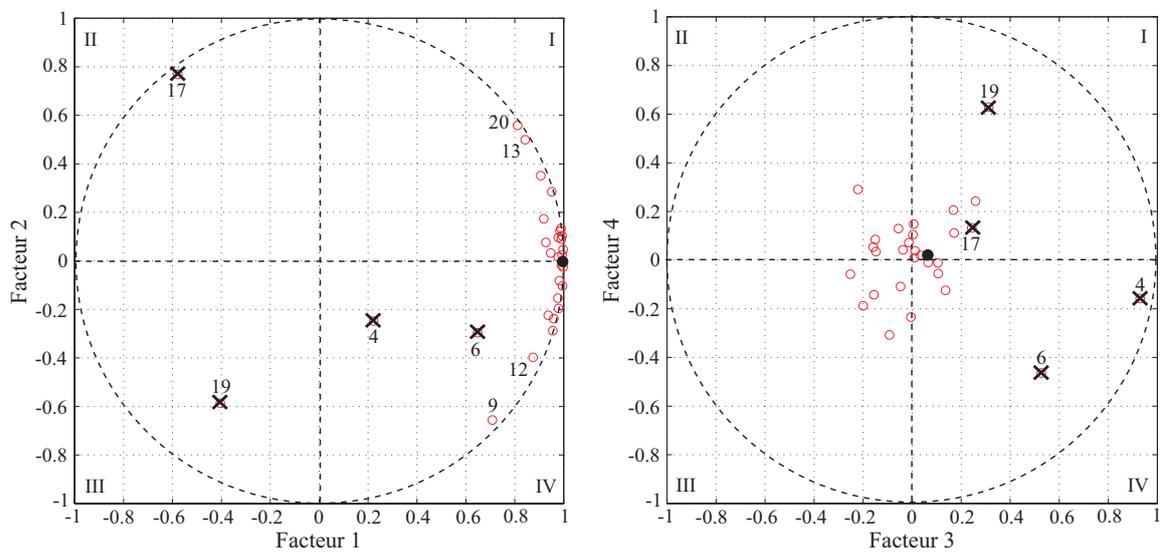
H.2. Résultats complémentaires relatifs à l'analyse des données issues de l'évaluation auditive des stimuli filtrés passe-bas à $f_{max}^* = 2500$ Hz



(a) Diagramme des valeurs propres exprimées en fonction du numéro du facteur principal associé.

(b) Valeurs du coefficient de corrélation r (élevé au carré) entre les projections des stimuli sur le vecteur sujet 4D et les scores primaires initialement calculés, pour les différents sujets.

FIG. H.5 – Etude de la dimensionnalité de l'espace perceptif de préférence dressé via MDPREF à partir des réponses de tous les sujets. On opte pour une dimensionnalité égale à 4.



(a) Plan factoriel 1–2.

(b) Plan factoriel 3–4.

FIG. H.6 – Bilan des différences inter-individuelles à partir de l'espace perceptif de préférence 4D dressé via MDPREF sur la base des réponses de tous les sujets. \circ : extrémités des vecteurs sujets, \bullet : extrémité du vecteur sujet "moyen". \times : sujets finalement considérés comme des "outliers" après recouplement avec les résultats des deux CAH.

H.2.2 Établissement des tendances qualitatives approximées

H.2.2.1 Espace perceptif de dissimilarité

H.2.2.1.a Évaluation du niveau réel de la mesure de dissimilarité

r_{bornes}^2	r_{valid}^2
0.996 ($p < .001$)	0.977 ($p < .001$)

TAB. H.1 – Indicateur r_{bornes}^2 du niveau de la mesure et indicateur r_{valid}^2 de la qualité d'ajustement aux données de la méthode des intervalles successifs. Sur la base des valeurs élevées des deux indicateurs, proches de 1, on peut avancer que les sujets ont relativement bien perçu globalement l'échelle de catégories comme une échelle métrique du niveau d'intervalles.

H.2.2.1.b Détermination de la dimensionnalité

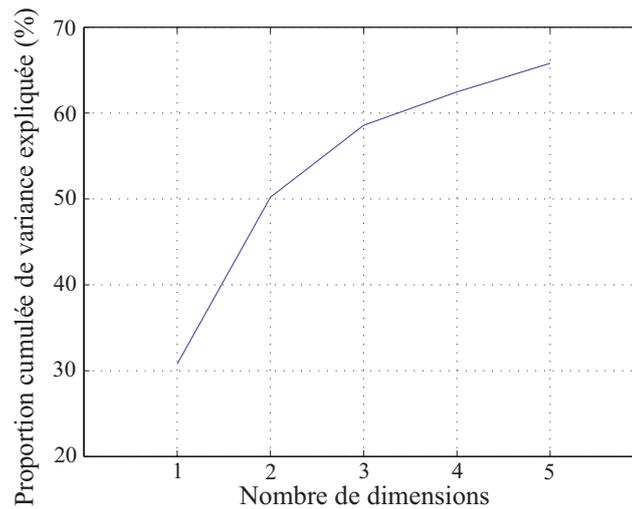


FIG. H.7 – Proportion cumulée de variance expliquée par le modèle INDSCAL en fonction du nombre de dimensions. On opte pour une dimensionnalité de l'espace égale à 2.

H.2.2.1.c Analyse psychoacoustique

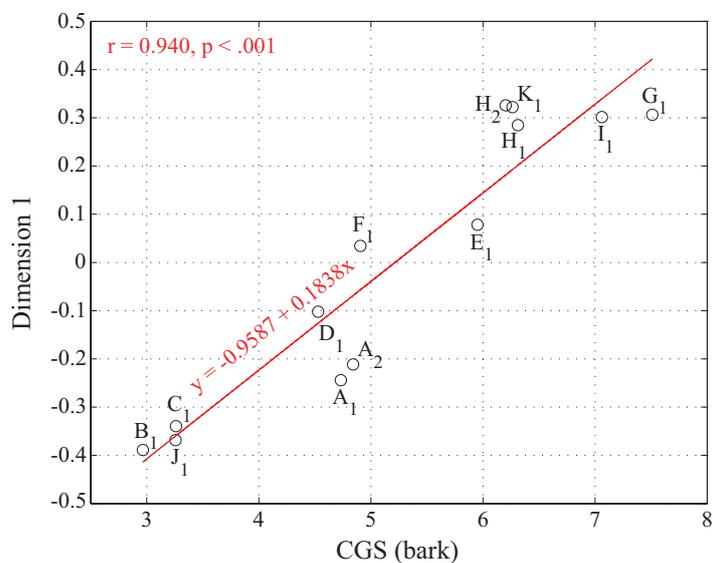


FIG. H.8 – Diagramme des coordonnées des stimuli filtrés passe-bas à f_{max}^* le long de la dimension 1 de l'espace perceptif de dissimilarité approximé exprimées en fonction des valeurs du CGS calculées sur ces stimuli. — : droite de régression.

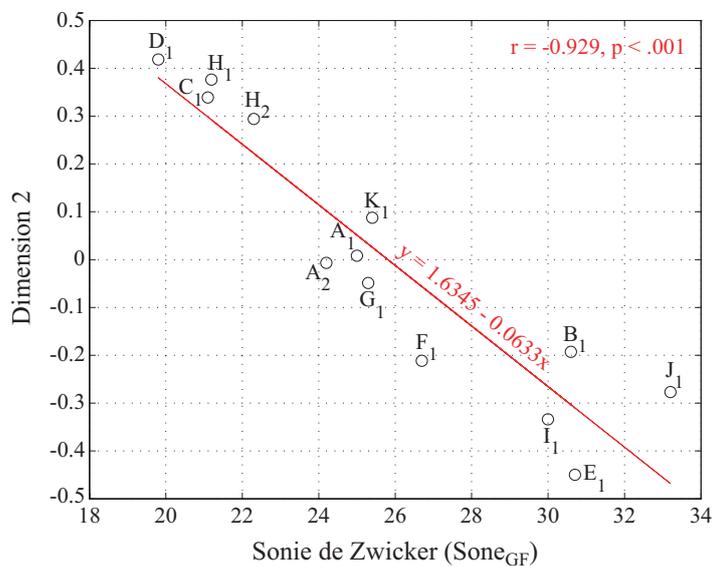
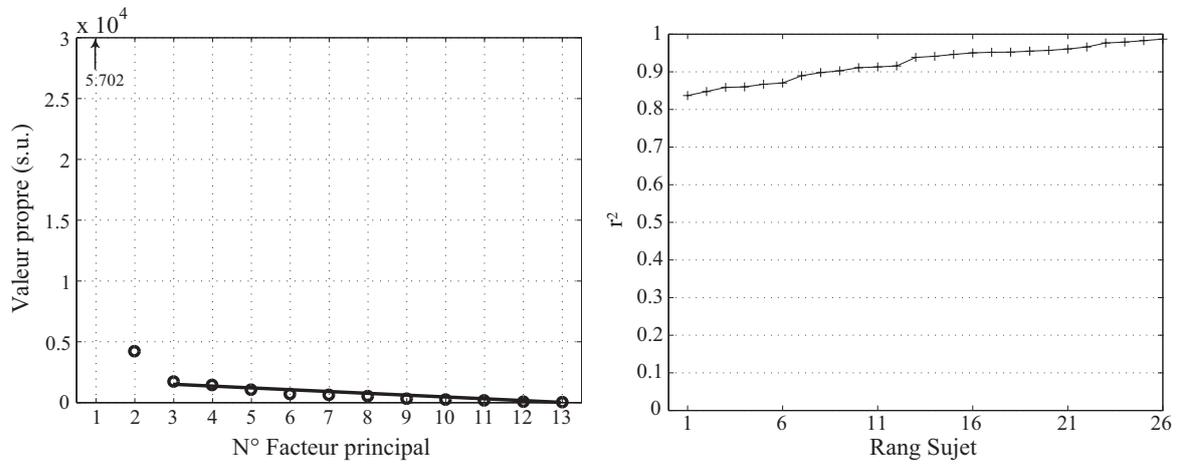


FIG. H.9 – Diagramme des coordonnées des stimuli filtrés passe-bas à f_{max}^* le long de la dimension 2 de l'espace perceptif de dissimilarité approximé exprimées en fonction des valeurs de la sonie de Zwicker calculées sur ces stimuli. — : droite de régression.

H.2.2.2 Espace perceptif de préférence



(a) Diagramme des valeurs propres exprimées en fonction du numéro du facteur principal associé.

(b) Valeurs du coefficient de corrélation r (élevé au carré) entre les projections des stimuli sur le vecteur sujet 3D et les scores primaires initialement calculés, pour les différents sujets.

FIG. H.10 – Détermination de la dimensionnalité de l'espace perceptif de préférence. Une dimensionnalité égale à 3 apparaît appropriée.

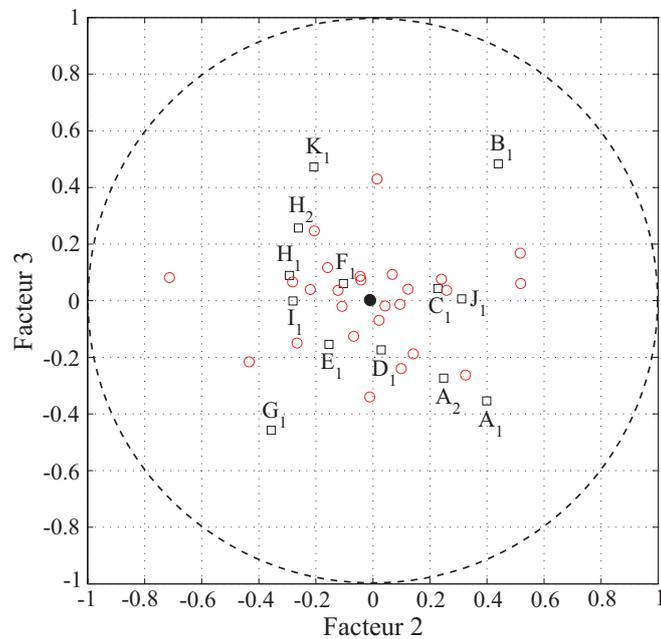


FIG. H.11 – Plan factoriel 2-3 de l'espace perceptif de préférence approximé. \square : stimuli, \circ : extrémités des vecteurs sujets, \bullet : extrémité du vecteur sujet "moyen".

H.2.2.3 Valeurs de mérite

H.2.2.3.a Qualité d'ajustement du modèle de Thurstone (Cas V) aux données de préférence

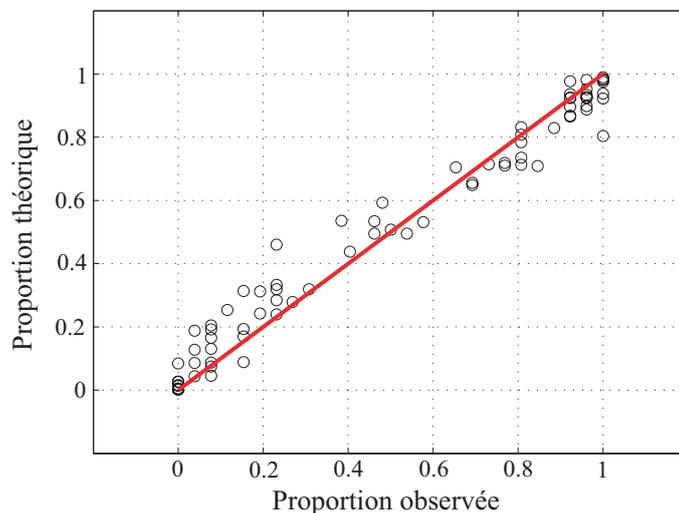


FIG. H.12 – Proportions “théoriques” *vs* proportions “observées” pour le modèle de Thurstone (*cas V*). Le coefficient de corrélation r^2 entre les deux séries de proportions est égal à 0.973 ($p < .001$).

H.2.2.3.b Construction du modèle de préférence

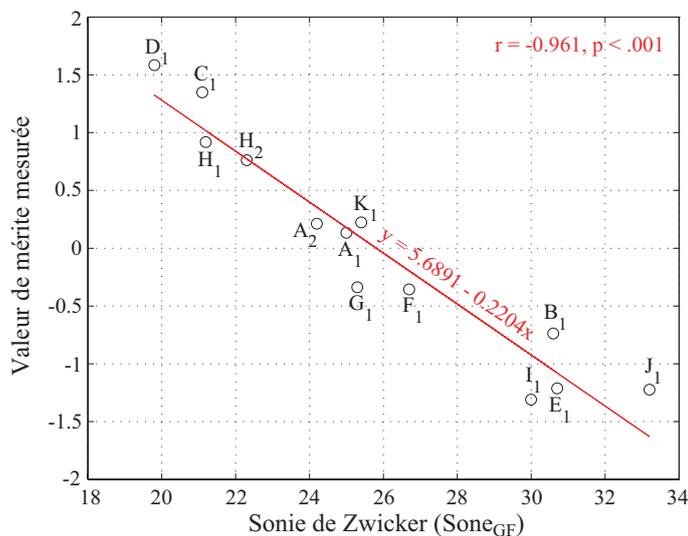
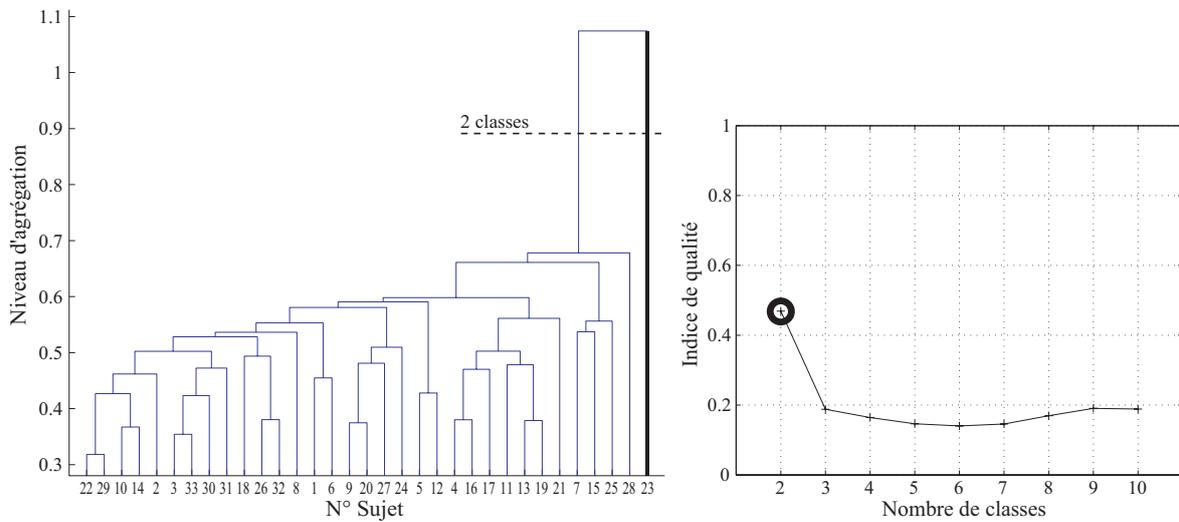


FIG. H.13 – Diagramme des valeurs de mérite mesurées des stimuli filtrés passe-bas à f_{max}^* exprimées en fonction des valeurs de la sonie de Zwicker calculées sur ces stimuli. — : droite de régression.

H.3 Résultats de l'analyse des données issues de l'évaluation auditive des stimuli filtrés passe-bas à $f_{max} = 5000$ Hz

H.3.1 Analyse en clusters des sujets

H.3.1.1 Jugements de dissimilarité

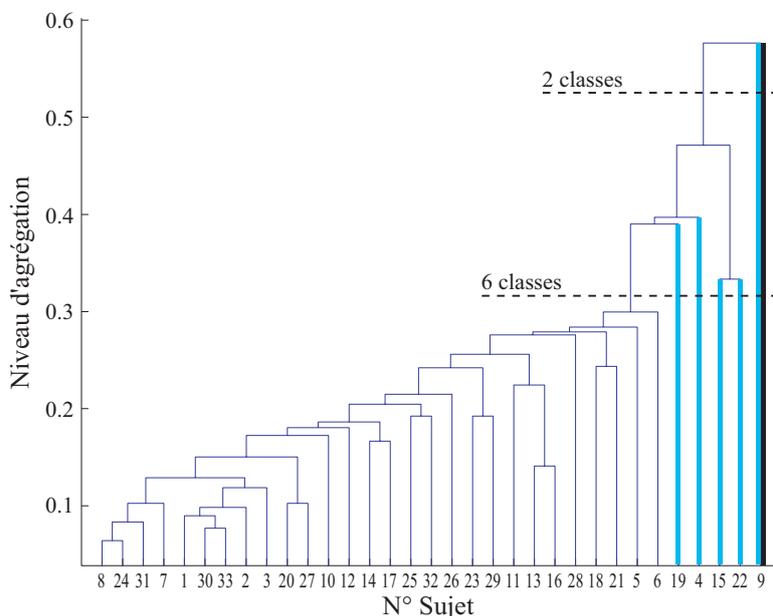


(a) Dendrogramme des sujets. Le sujet jugé comme étant un "outliers" est surligné. La couleur de surlignage respecte la couleur utilisée ci-dessous pour repérer la partition pertinente.

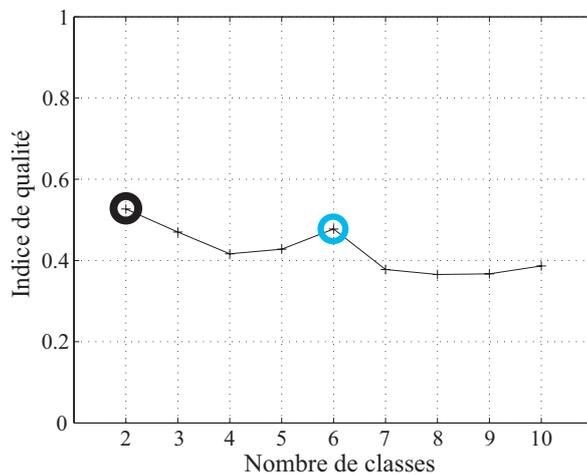
(b) Valeurs de l'indice de qualité exprimées en fonction du nombre de classes. La partition jugée comme pertinente est repérée par un cercle coloré.

FIG. H.14 – Résultats de la Classification Ascendante Hiérarchique réalisée à partir de la matrice de dissemblances \mathbf{D}_1 . Le sujet n°23 est considéré comme un sujet "oulier", dont les réponses de dissimilarité ne sont pas prises en compte.

H.3.1.2 Jugements de préférence

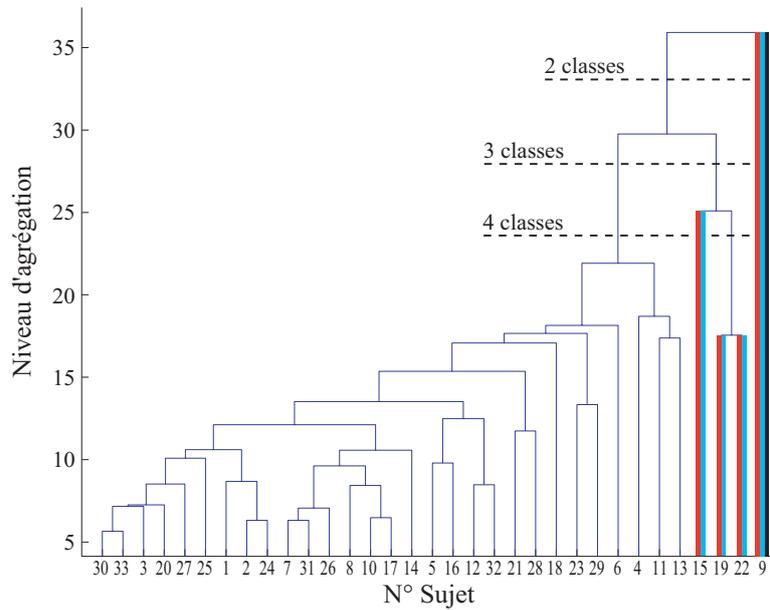


(a) Dendrogramme des sujets. Pour chaque partition pertinente, les sujets jugés comme étant des "outliers" sont surlignés. Les couleurs de surlignage respectent les couleurs utilisées ci-dessous pour repérer les différentes partitions pertinentes.

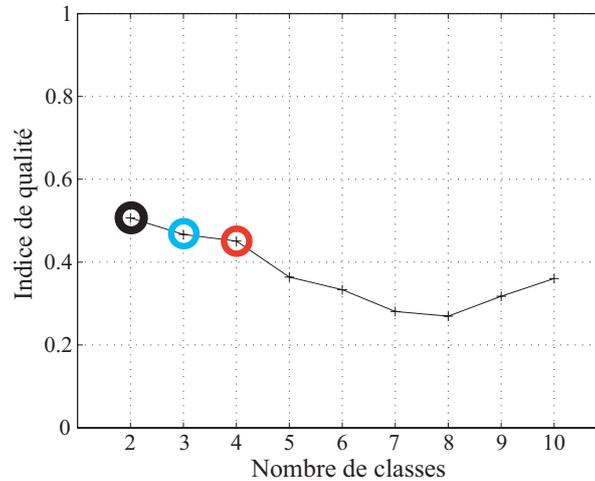


(b) Valeurs de l'indice de qualité exprimées en fonction du nombre de classes. Les partitions jugées comme pertinentes sont repérées par un cercle coloré.

FIG. H.15 – Résultats de la Classification Ascendante Hiérarchique appliquée sur la matrice de dissemblances \mathbf{D}_2 .

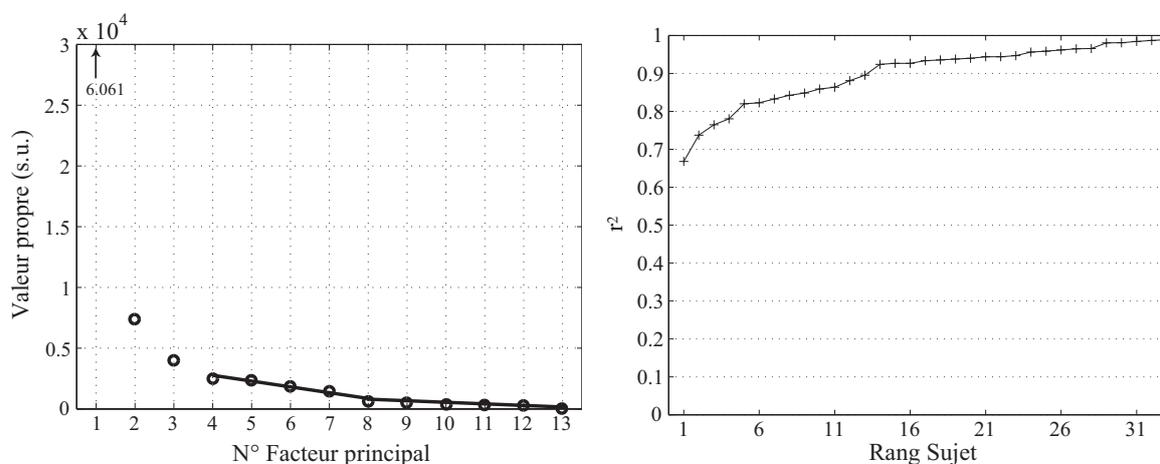


(a) Dendrogramme des sujets. Pour chaque partition pertinente, les sujets jugés comme étant des "outliers" sont surlignés. Les couleurs de surlignage respectent les couleurs utilisées ci-dessous pour repérer les différentes partitions pertinentes.



(b) Valeurs de l'indice de qualité exprimées en fonction du nombre de classes. Les partitions jugées comme pertinentes sont repérées par un cercle coloré.

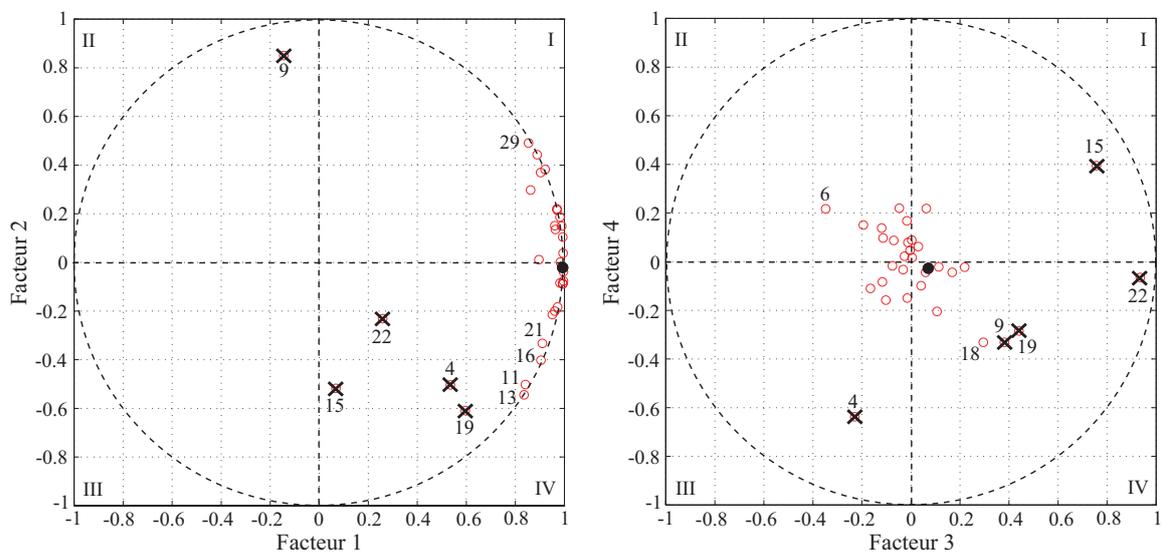
FIG. H.16 – Résultats de la Classification Ascendante Hiérarchique appliquée sur la matrice de dissemblances \mathbf{D}_3 .



(a) Diagramme des valeurs propres exprimées en fonction du numéro du facteur principal associé.

(b) Valeurs du coefficient de corrélation r (élevé au carré) entre les projections des stimuli sur le vecteur sujet 4D et les scores primaires initialement calculés, pour les différents sujets.

FIG. H.17 – Etude de la dimensionnalité de l'espace perceptif de préférence dressé via MD-PREF à partir des réponses de tous les sujets. Sur la figure (a), la droite est sectionnée en deux parties avec deux pentes distinctes (la rupture de pente intervient pour le facteur 8). Dans ce cas particulier, selon la méthode du *scree test*, la règle est d'ignorer la partie basse de la droite [Cat66]. La dimensionnalité appropriée peut être estimée par le numéro du facteur dont la valeur propre associée se situe à l'extrémité de la partie haute de la droite, i.e. la dimensionnalité appropriée est ici égale à 4.



(a) Plan factoriel 1-2.

(b) Plan factoriel 3-4.

FIG. H.18 – Bilan des différences inter-individuelles à partir de l'espace perceptif de préférence 4D dressé via MDPREF sur la base des réponses de tous les sujets. \circ : extrémités des vecteurs sujets, \bullet : extrémité du vecteur sujet "moyen". \times : sujets finalement considérés comme des "outliers" après recouplement avec les résultats des deux CAH.

H.3.2 Établissement des tendances qualitatives approximées

H.3.2.1 Espace perceptif de dissimilarité

H.3.2.1.a Évaluation du niveau réel de la mesure de dissimilarité

r_{bornes}^2	r_{valid}^2
0.998 ($p < .001$)	0.978 ($p < .001$)

TAB. H.2 – Indicateur r_{bornes}^2 du niveau de la mesure et indicateur r_{valid}^2 de la qualité d'ajustement aux données de la méthode des intervalles successifs. Sur la base des valeurs élevées des deux indicateurs, proches de 1, on peut avancer que les sujets ont relativement bien perçu globalement l'échelle de catégories comme une échelle métrique du niveau d'intervalles.

H.3.2.1.b Détermination de la dimensionnalité

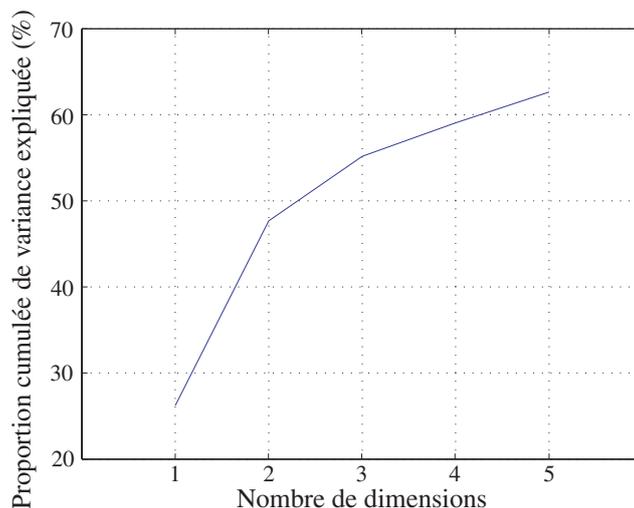


FIG. H.19 – Proportion cumulée de variance expliquée par le modèle INDSCAL en fonction du nombre de dimensions. On opte pour une dimensionnalité de l'espace égale à 2. Les proportions de variance expliquées par les facteurs 1 et 2 sont respectivement égales à 26% et 22%.

H.3.2.1.c Analyse psychoacoustique

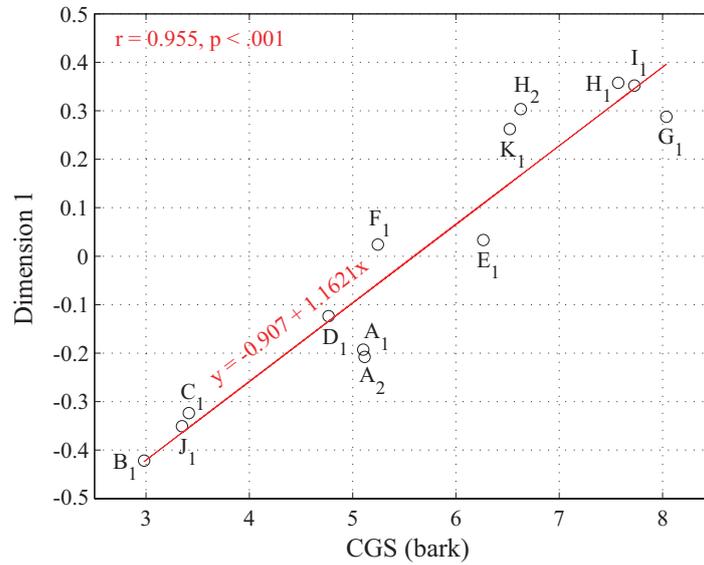


FIG. H.20 – Diagramme des coordonnées des stimuli filtrés passe-bas à 5000 Hz le long de la dimension 1 de l'espace perceptif de dissimilarité approximé exprimées en fonction des valeurs du CGS calculées sur ces stimuli. — : droite de régression.

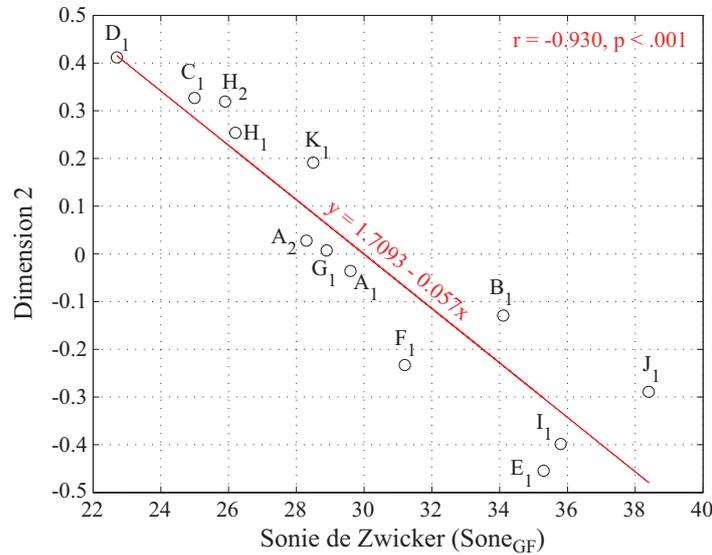


FIG. H.21 – Diagramme des coordonnées des stimuli filtrés passe-bas à 5000 Hz le long de la dimension 2 de l'espace perceptif de dissimilarité approximé exprimées en fonction des valeurs de la sonie de Zwicker calculées sur ces stimuli. — : droite de régression.

H.3.2.1.d Confrontation des espaces approximé et original

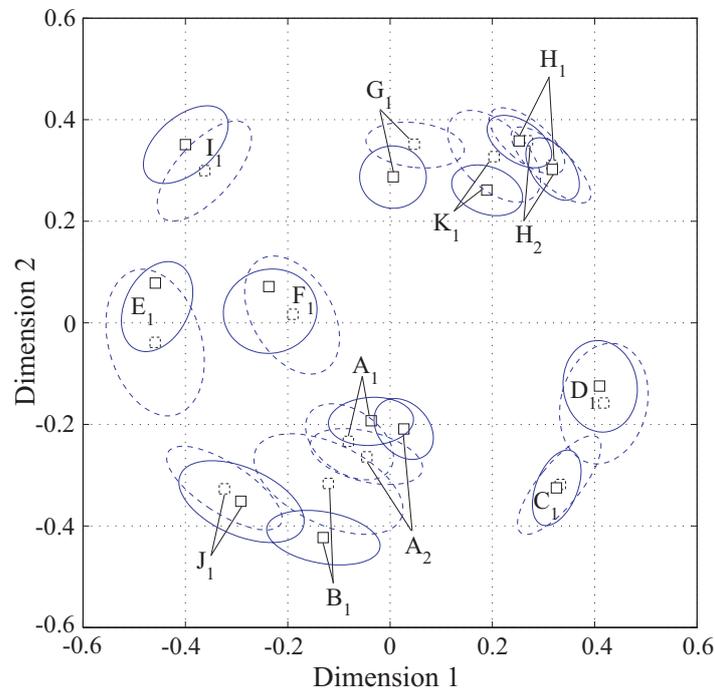
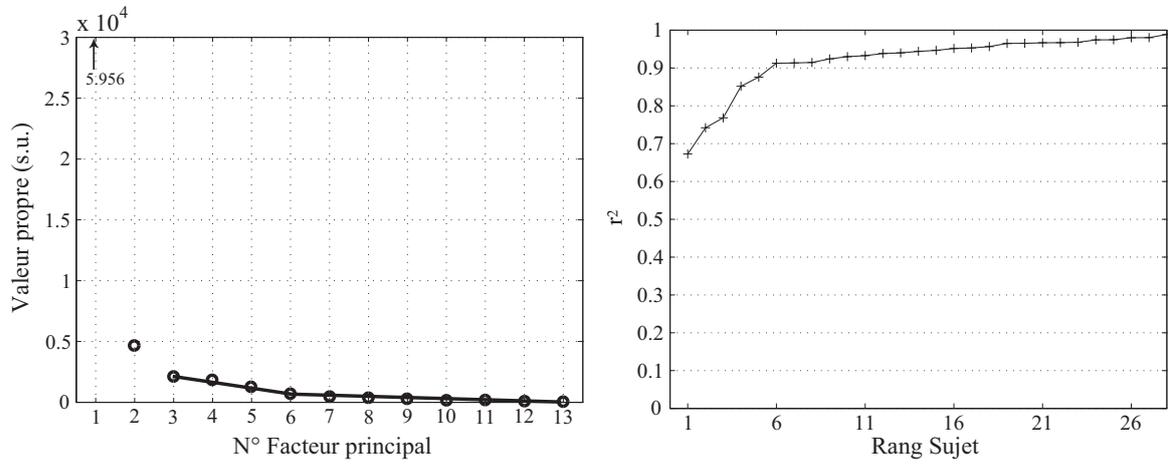


FIG. H.22 – Espace perceptif de dissimilarité 2D des stimuli, dans leur ellipse de confiance à 95%. En traits pleins : configuration approximée obtenue pour un filtrage passe-bas à 5000 Hz, en traits pointillés : configuration originale. L'espace approximé a été ajusté à l'espace original en appliquant une rotation à 90° dans le sens des aiguilles d'une montre puis une symétrie horizontale. L'adéquation entre les deux espaces est bonne : $r = 0.981$, $p < .001$ entre la dimension 1 de l'espace approximé et la dimension 2 de l'espace original, $r = 0.990$, $p < .001$ entre la dimension 2 de l'espace approximé et la dimension 1 de l'espace original.

H.3.2.2 Espace perceptif de préférence

H.3.2.2.a Détermination de la dimensionnalité



(a) Diagramme des valeurs propres exprimées en fonction du numéro du facteur principal associé.

(b) Valeurs du coefficient de corrélation r (élevé au carré) entre les projections des stimuli sur le vecteur sujet 3D et les scores primaires initialement calculés, pour les différents sujets.

FIG. H.23 – Détermination de la dimensionnalité de l'espace perceptif de préférence. Une dimensionnalité égale à 3 apparaît appropriée. Les proportions d'inertie expliquées par les facteurs 1, 2 et 3 sont respectivement égales à 83%, 7% et 3.%

H.3.2.2.b Confrontation des espaces approximé et original

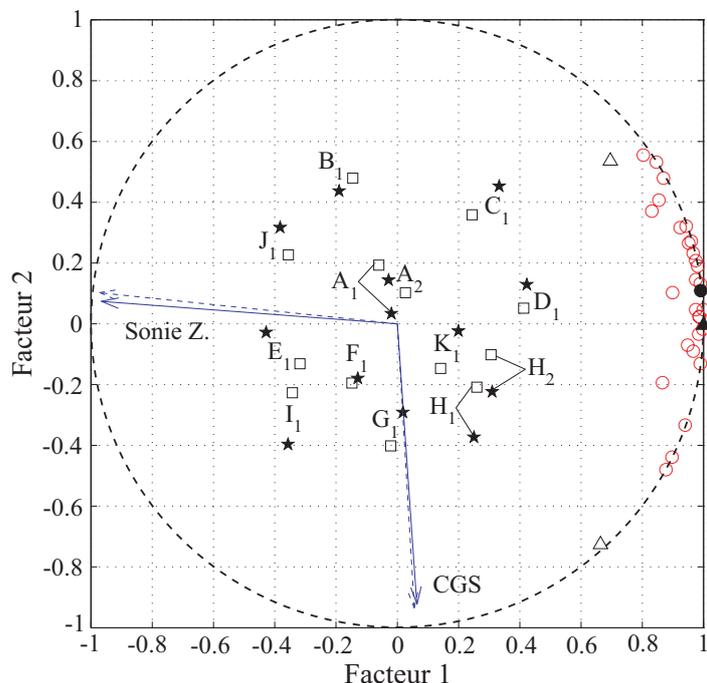


FIG. H.24 – Plan factoriel 1-2 de l'espace perceptif de préférence. □ : stimuli filtrés passe-bas à 5000 Hz, ○ : extrémités des vecteurs sujets approximés, ● : extrémité du vecteur sujet “moyen” approximé, → : vecteurs métriques approximés, ★ : stimuli originaux, △ : extrémités des vecteurs sujets délimitant le faisceau original de vecteurs sujets, ▲ : extrémité du vecteur sujet “moyen” original, --→ : vecteurs métriques originaux. L'adéquation entre les configurations de stimuli est satisfaisante : après ajustement, $r = 0.988$, $p < .001$ entre les coordonnées des stimuli originaux et filtrés le long de l'axe 1, $r = 0.916$, $p < .001$ entre leurs coordonnées le long de l'axe 2. La qualité de représentation des vecteurs métriques approximés dans l'espace approximé est satisfaisante : respectivement $r = 0.984$, $p < .001$ et $r = 0.925$, $p < .001$ pour la sonie de Zwicker et le CGS.

H.3.2.3 Valeurs de mérite

H.3.2.3.a Qualité d'ajustement du modèle de Thurstone (Cas V) aux données de préférence

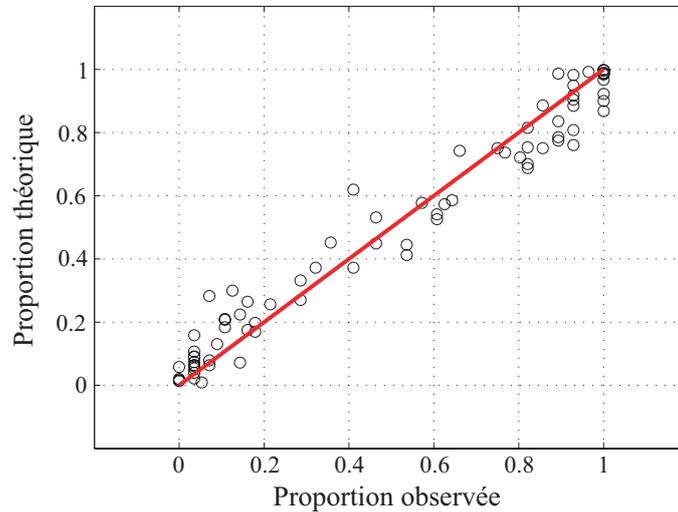


FIG. H.25 – Proportions “théoriques” *vs* proportions “observées” pour le modèle de Thurstone (*cas V*). Le coefficient de corrélation r^2 entre les deux séries de proportions est égal à 0.965 ($p < .001$).

H.3.2.3.b Construction du modèle de préférence

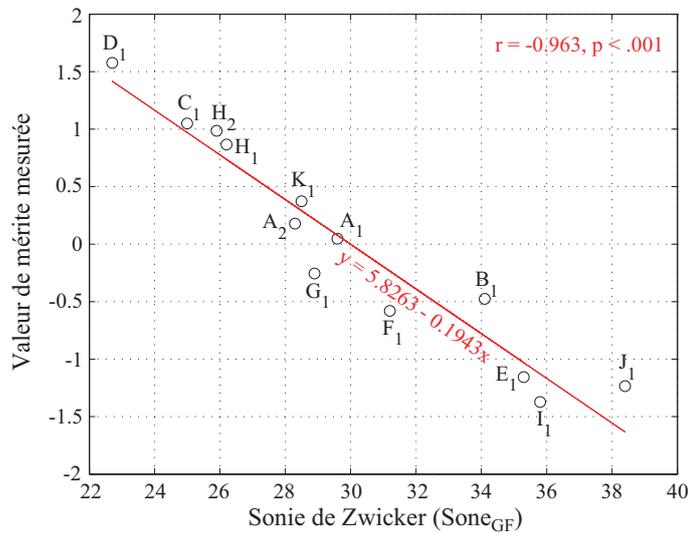


FIG. H.26 – Diagramme des valeurs de mérite mesurées des stimuli filtrés passe-bas à 5000 Hz exprimées en fonction des valeurs de la sonie de Zwicker calculées sur ces stimuli. — : droite de régression.

H.3.2.3.c Confrontation des valeurs de mérite approximées et originales

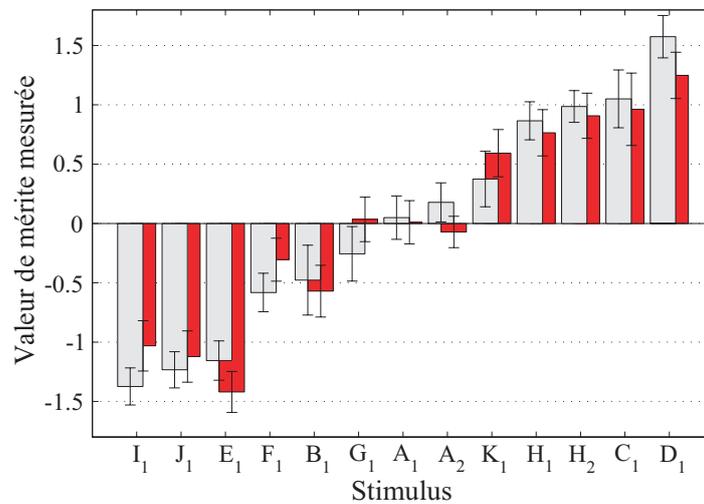


FIG. H.27 – Comparaison des valeurs de mérite mesurées obtenues par les stimuli originaux et filtrés passe-bas à 5000 Hz. En gris : valeurs de mérite mesurées approximées, en rouge : valeurs de mérite mesurées originales, I : intervalle de confiance à 95%. Les deux séries de valeurs de mérite mesurées sont fortement corrélées : $r = 0.973$, $p < .001$.

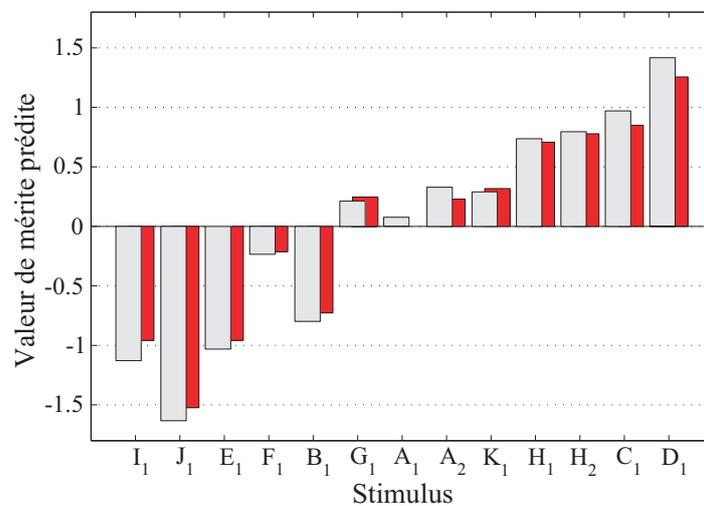
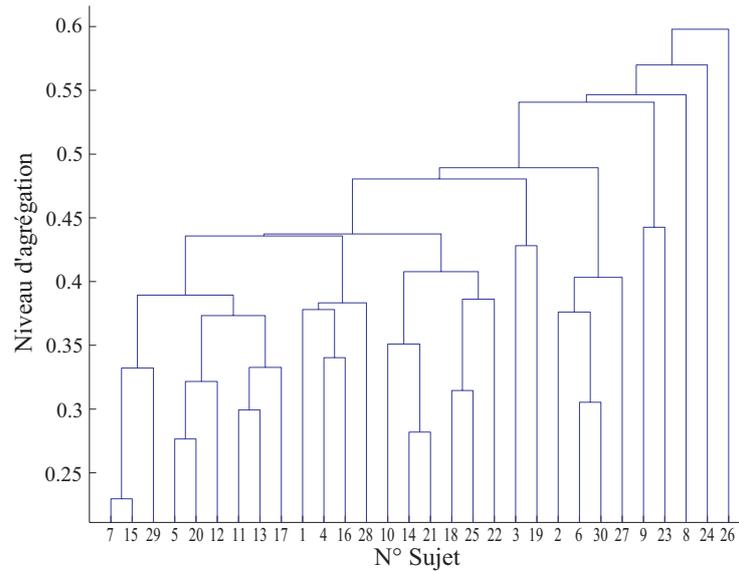


FIG. H.28 – Comparaison des valeurs de mérite prédites obtenues par les stimuli originaux et filtrés passe-bas à 5000 Hz. En gris : valeurs de mérite prédites approximées, en rouge : valeurs de mérite prédites originales.

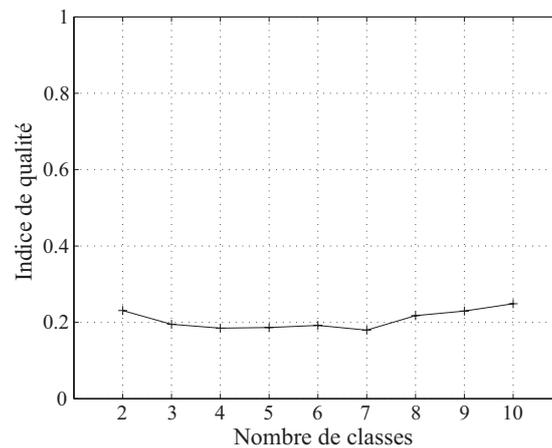
H.4 Résultats de l'analyse des données issues de l'évaluation auditive des stimuli filtrés passe-bas à $f_{max} = 1500$ Hz

H.4.1 Analyse en clusters des sujets

H.4.1.1 Jugements de dissimilarité



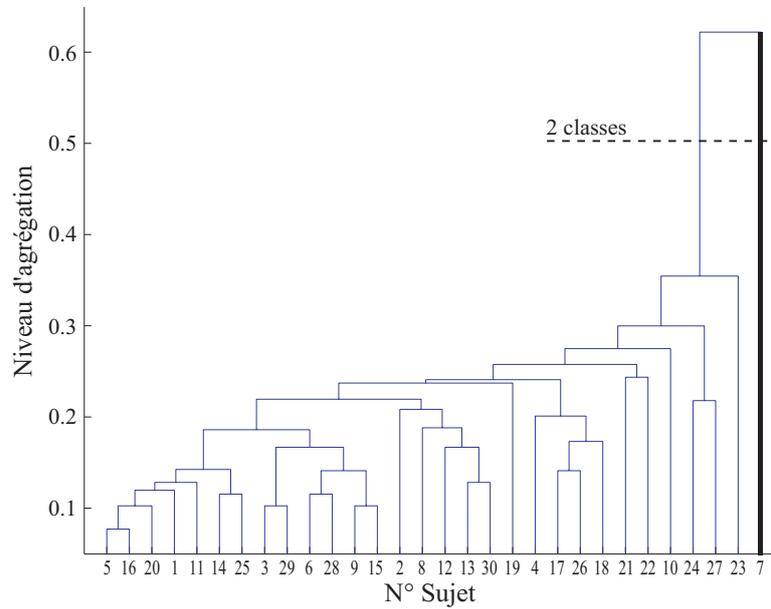
(a) Dendrogramme des sujets.



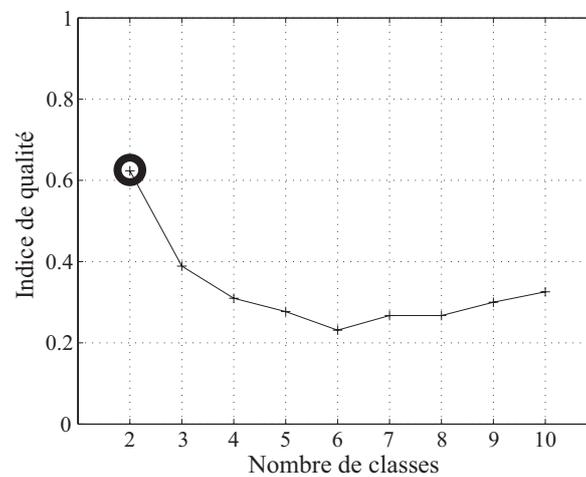
(b) Valeurs de l'indice de qualité exprimées en fonction du nombre de classes.

FIG. H.29 – Résultats de la Classification Ascendante Hiérarchique réalisée à partir de la matrice de dissimilarités \mathbf{D}_1 . Ces résultats ne révèlent pas de sujets “outliers” ou de sous-groupes de sujets.

H.4.1.2 Jugements de préférence

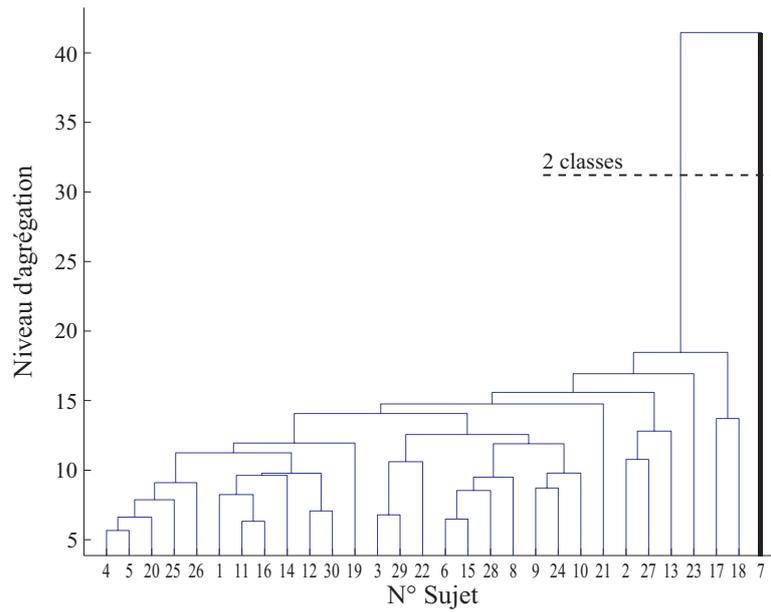


(a) Dendrogramme des sujets. Le sujet jugé comme étant un "outlier" est surligné. La couleur de surlignage respecte la couleur utilisée ci-dessous pour repérer la partition pertinente.

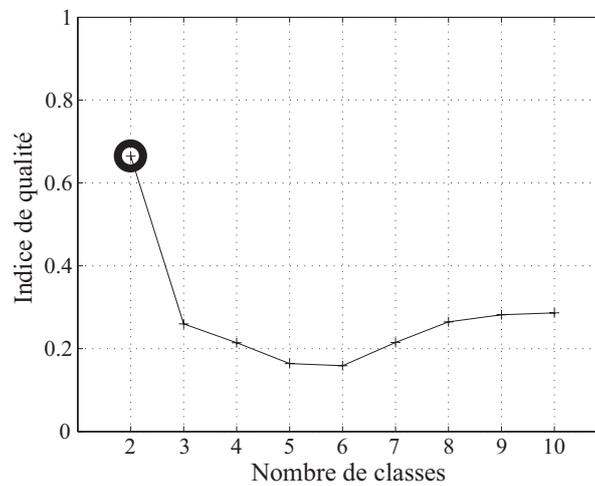


(b) Valeurs de l'indice de qualité exprimées en fonction du nombre de classes. La partition jugée comme pertinente est repérée par un cercle coloré.

FIG. H.30 – Résultats de la Classification Ascendante Hiérarchique appliquée sur la matrice de dissemblances D_2 .



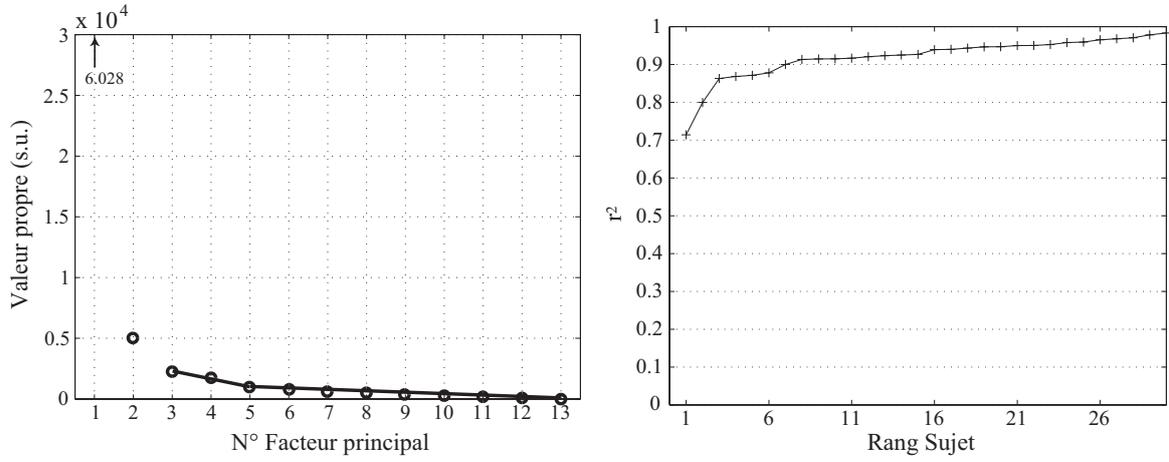
(a) Dendrogramme des sujets. Le sujet jugé comme étant un "outlier" est surligné. La couleur de surlignage respecte la couleur utilisée ci-dessous pour repérer la partition pertinente.



(b) Valeurs de l'indice de qualité exprimées en fonction du nombre de classes. La partition jugée comme pertinente est repérée par un cercle coloré.

FIG. H.31 – Résultats de la Classification Ascendante Hiérarchique appliquée sur la matrice de dissemblances \mathbf{D}_3 .

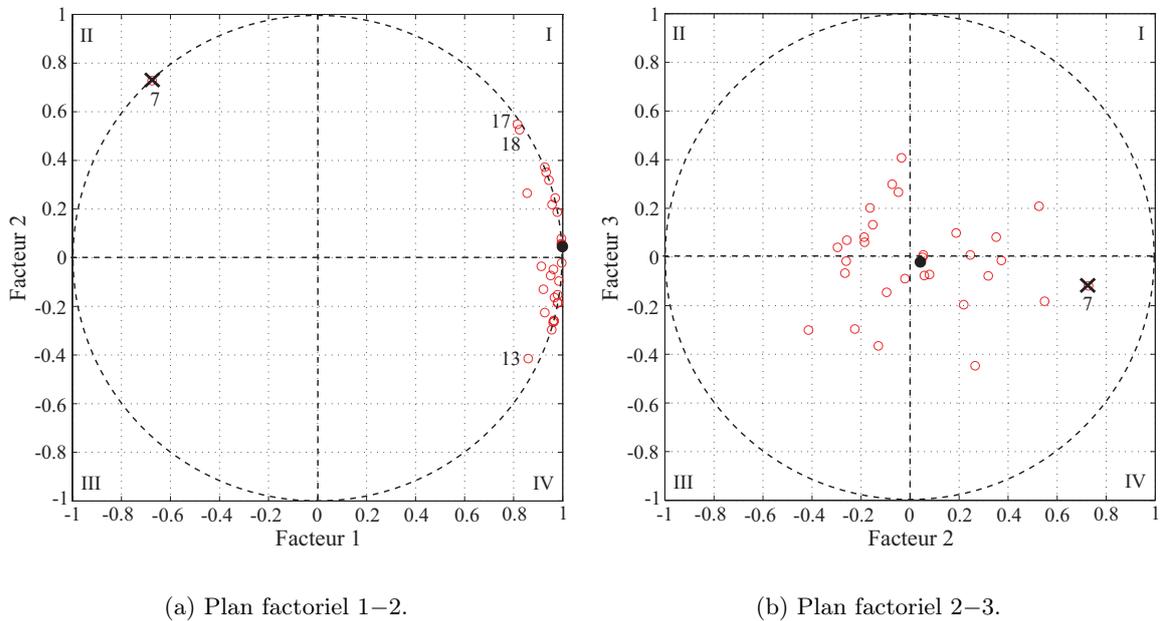
H.4. Résultats de l'analyse des données issues de l'évaluation auditive des stimuli filtrés passe-bas à $f_{max} = 1500$ Hz



(a) Diagramme des valeurs propres exprimées en fonction du numéro du facteur principal associé.

(b) Valeurs du coefficient de corrélation r (élevé au carré) entre les projections des stimuli sur le vecteur sujet 3D et les scores primaires initialement calculés, pour les différents sujets.

FIG. H.32 – Etude de la dimensionnalité de l'espace perceptif de préférence dressé via MDPREF à partir des réponses de tous les sujets. On opte pour une dimensionnalité égale à 3.



(a) Plan factoriel 1–2.

(b) Plan factoriel 2–3.

FIG. H.33 – Bilan des différences inter-individuelles à partir de l'espace perceptif de préférence 3D dressé via MDPREF sur la base des réponses de tous les sujets. \circ : extrémités des vecteurs sujets, \bullet : extrémité du vecteur sujet "moyen". \times : sujets finalement considérés comme des "outliers" après recouplement avec les résultats des deux CAH.

H.4.2 Établissement des tendances qualitatives approximées

H.4.2.1 Espace perceptif de dissimilarité

H.4.2.1.a Évaluation du niveau réel de la mesure de dissimilarité

r_{bornes}^2	r_{valid}^2
0.998 ($p < .001$)	0.980 ($p < .001$)

TAB. H.3 – Indicateur r_{bornes}^2 du niveau de la mesure et indicateur r_{valid}^2 de la qualité d'ajustement aux données de la méthode des intervalles successifs. Sur la base des valeurs élevées des deux indicateurs, proches de 1, on peut avancer que les sujets ont relativement bien perçu globalement l'échelle de catégories comme une échelle métrique du niveau d'intervalles.

H.4.2.1.b Détermination de la dimensionnalité

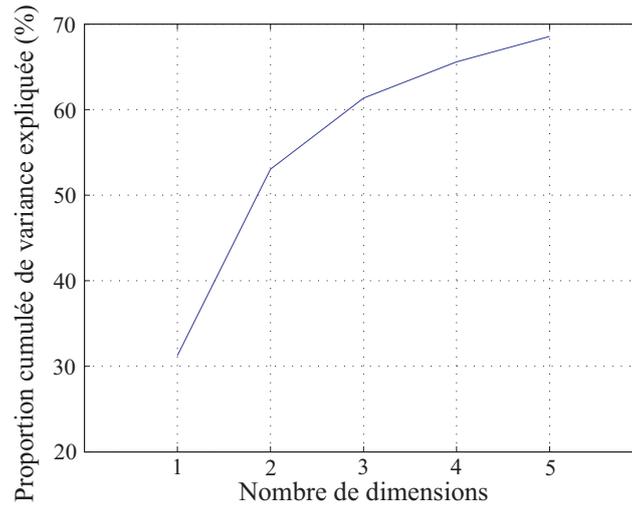


FIG. H.34 – Proportion cumulée de variance expliquée par le modèle INDSCAL en fonction du nombre de dimensions. On opte pour une dimensionnalité de l'espace égale à 2. Les proportions de variance expliquées par les facteurs 1 et 2 sont respectivement égales à 31% et 22%.

H.4.2.1.c Analyse psychoacoustique

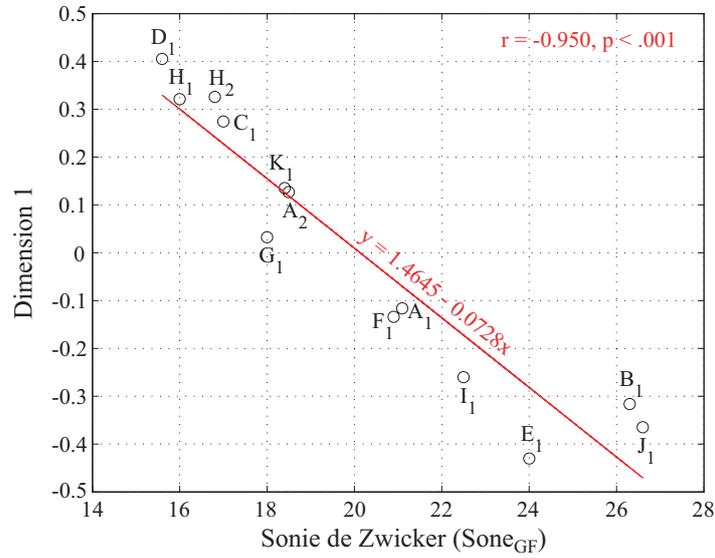


FIG. H.35 – Diagramme des coordonnées des stimuli filtrés passe-bas à 1500 Hz le long de la dimension 1 de l'espace perceptif de dissimilarité approximé exprimées en fonction des valeurs de la sonie de Zwicker calculées sur ces stimuli. — : droite de régression.

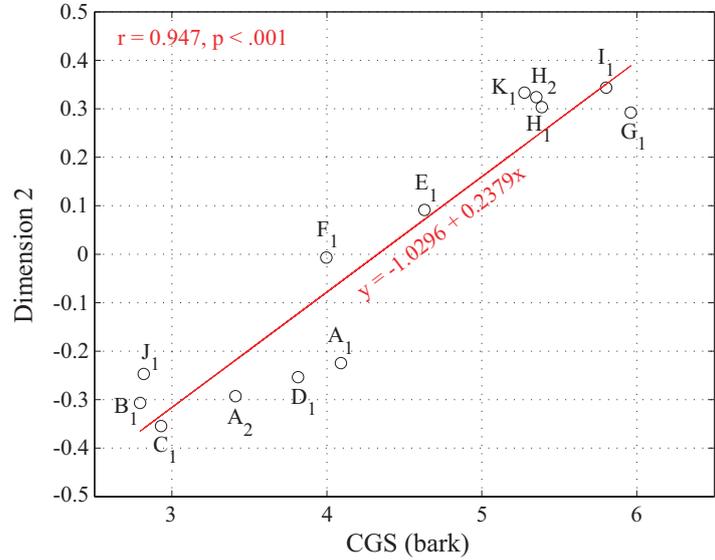


FIG. H.36 – Diagramme des coordonnées des stimuli filtrés passe-bas à 1500 Hz le long de la dimension 2 de l'espace perceptif de dissimilarité approximé exprimées en fonction des valeurs du CGS calculées sur ces stimuli. — : droite de régression.

H.4.2.1.d Confrontation des espaces approximé et original

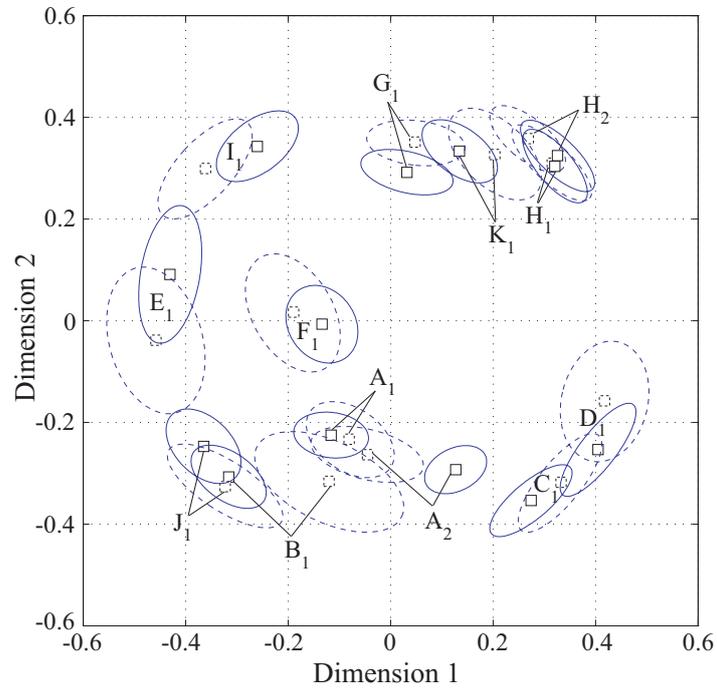
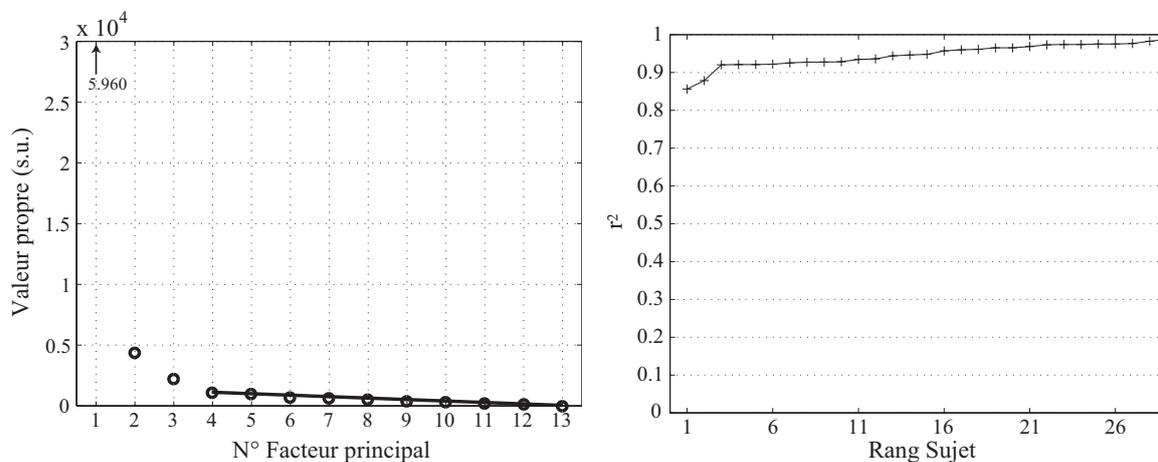


FIG. H.37 – Espace perceptif de dissimilarité 2D des stimuli, dans leur ellipse de confiance à 95%. En traits pleins : configuration approximée obtenue pour un filtrage passe-bas à 1500 Hz, en traits pointillés : configuration originale. Aucune transformation n'a été nécessaire pour ajuster l'espace approximé à l'espace original. L'adéquation entre les deux espaces est satisfaisante : $r = 0.951$, $p < .001$ entre les dimensions 1, $r = 0.979$, $p < .001$ entre les dimensions 2. Toutefois, les positions approximée et originale des stimuli A_2 et B_1 se révèlent ici être différentes, au vu du non-chevauchement de leurs ellipses de confiance à 95% respectives.

H.4.2.2 Espace perceptif de préférence

H.4.2.2.a Détermination de la dimensionnalité



(a) Diagramme des valeurs propres exprimées en fonction du numéro du facteur principal associé.

(b) Valeurs du coefficient de corrélation r (élevé au carré) entre les projections des stimuli sur le vecteur sujet 4D et les scores primaires initialement calculés, pour les différents sujets.

FIG. H.38 – Détermination de la dimensionnalité de l'espace perceptif de préférence. Une dimensionnalité égale à 4 apparaît appropriée. Les proportions d'inertie expliquées par les facteurs 1, 2, 3 et 4 sont respectivement égales à 84%, 6%, 3% et 2%.

H.4.2.2.b Confrontation des espaces approximé et original

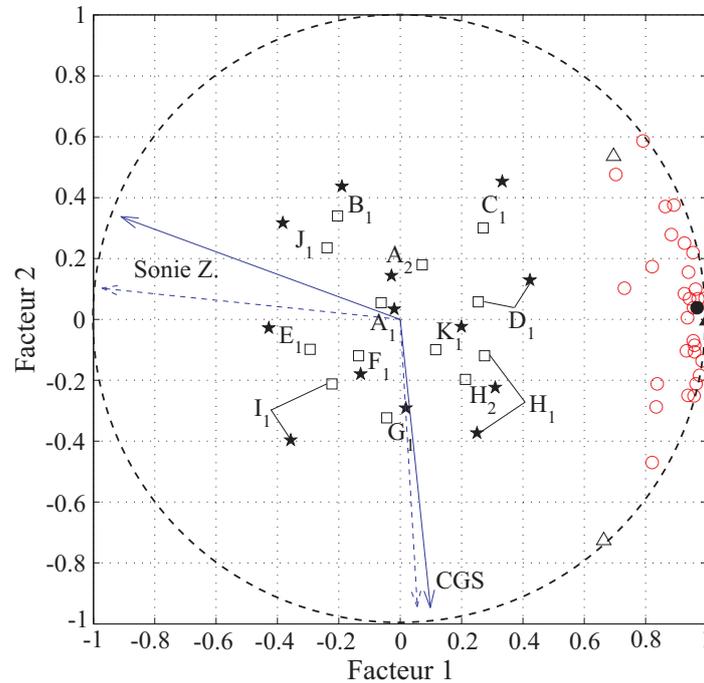


FIG. H.39 – Plan factoriel 1-2 de l'espace perceptif de préférence. \square : stimuli filtrés passe-bas à 1500 Hz, \circ : extrémités des vecteurs sujets approximés, \bullet : extrémité du vecteur sujet “moyen” approximé, \rightarrow : vecteurs métriques approximés, \star : stimuli originaux, \triangle : extrémités des vecteurs sujets délimitant le faisceau original de vecteurs sujets, \blacktriangle : extrémité du vecteur sujet “moyen” original, $--\rightarrow$: vecteurs métriques originaux. L'adéquation entre les configurations de stimuli est satisfaisante : après ajustement, $r = 0.966$, $p < .001$ entre les coordonnées des stimuli originaux et filtrés le long de l'axe 1, $r = 0.939$, $p < .001$ entre leurs coordonnées le long de l'axe 2. La qualité de représentation des vecteurs métriques approximés dans l'espace approximé est satisfaisante : respectivement $r = 0.988$, $p < .001$ et $r = 0.984$, $p < .001$ pour la sonie de Zwicker et le CGS. On peut observer que la direction du vecteur approximé associé à la sonie de Zwicker diffère de celle du vecteur original. Aussi, l'éloignement de ce vecteur de l'axe 1 peut indiquer que la sonie n'est plus assurément l'attribut auditif auquel se rapporte le facteur de consensus.

H.4.2.3 Valeurs de mérite

H.4.2.3.a Qualité d'ajustement du modèle de Thurstone (Cas V) aux données de préférence

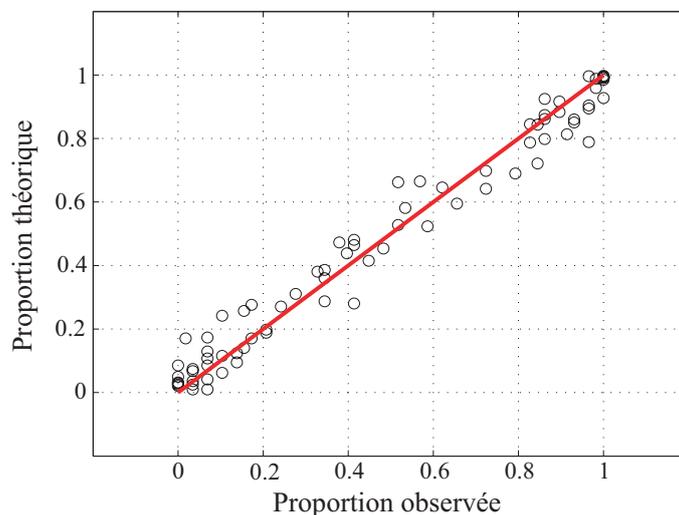


FIG. H.40 – Proportions “théoriques” *vs* proportions “observées” pour le modèle de Thurstone (*cas V*). Le coefficient de corrélation r^2 entre les deux séries de proportions est égal à 0.974 ($p < .001$).

H.4.2.3.b Construction du modèle de préférence

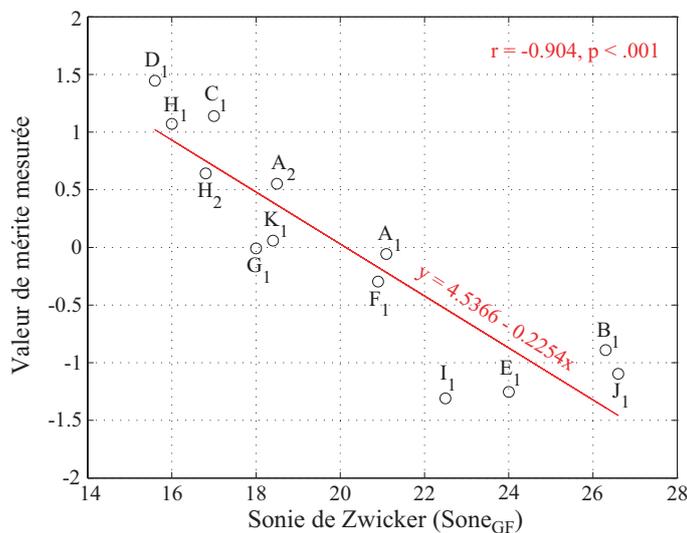


FIG. H.41 – Diagramme des valeurs de mérite mesurées des stimuli filtrés passe-bas à 1500 Hz exprimées en fonction des valeurs de la sonie de Zwicker calculées sur ces stimuli. — : droite de régression.

H.4.2.3.c Confrontation des valeurs de mérite approximées et originales

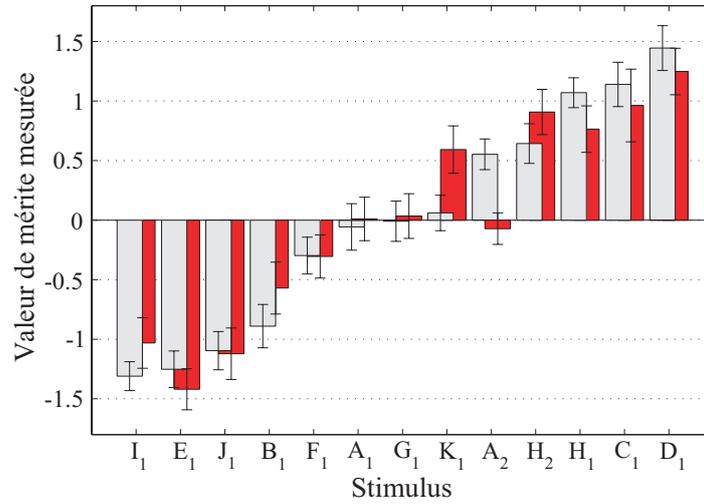


FIG. H.42 – Comparaison des valeurs de mérite mesurées obtenues par les stimuli originaux et filtrés passe-bas à 1500 Hz. En gris : valeurs de mérite mesurées approximées, en rouge : valeurs de mérite mesurées originales, I : intervalle de confiance à 95%. Les deux séries de valeurs de mérite mesurées sont corrélées : $r = 0.946$, $p < .001$. Néanmoins, les rangs des stimuli A_2 et K_1 dans le classement approximé (respectivement 5^{ème} et 6^{ème}) sont significativement différents de ceux qu'ils occupaient dans le classement original (respectivement 8^{ème} et 5^{ème}).

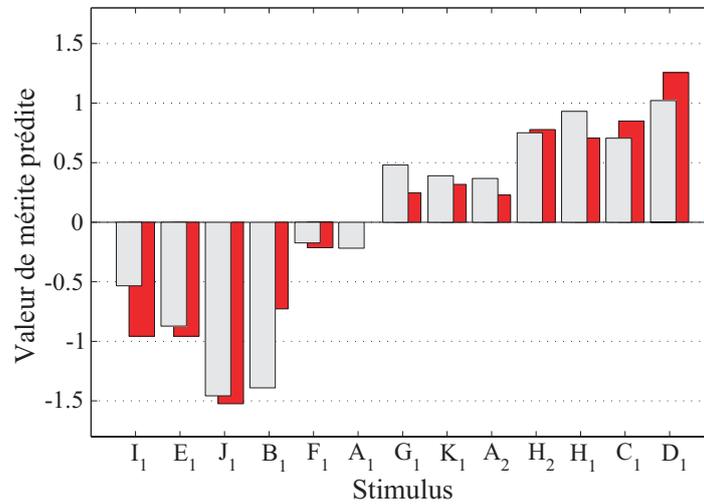


FIG. H.43 – Comparaison des valeurs de mérite prédites obtenues par les stimuli originaux et filtrés passe-bas à 1500 Hz. En gris : valeurs de mérite prédites approximées, en rouge : valeurs de mérite prédites originales.

H.5 Compléments relatifs à la recherche d'un lien entre f_{max}^* et les caractéristiques globales des sons originaux

H.5.1 lien entre f_{max}^* et la conservation des niveaux de pression acoustique globaux des stimuli originaux ?

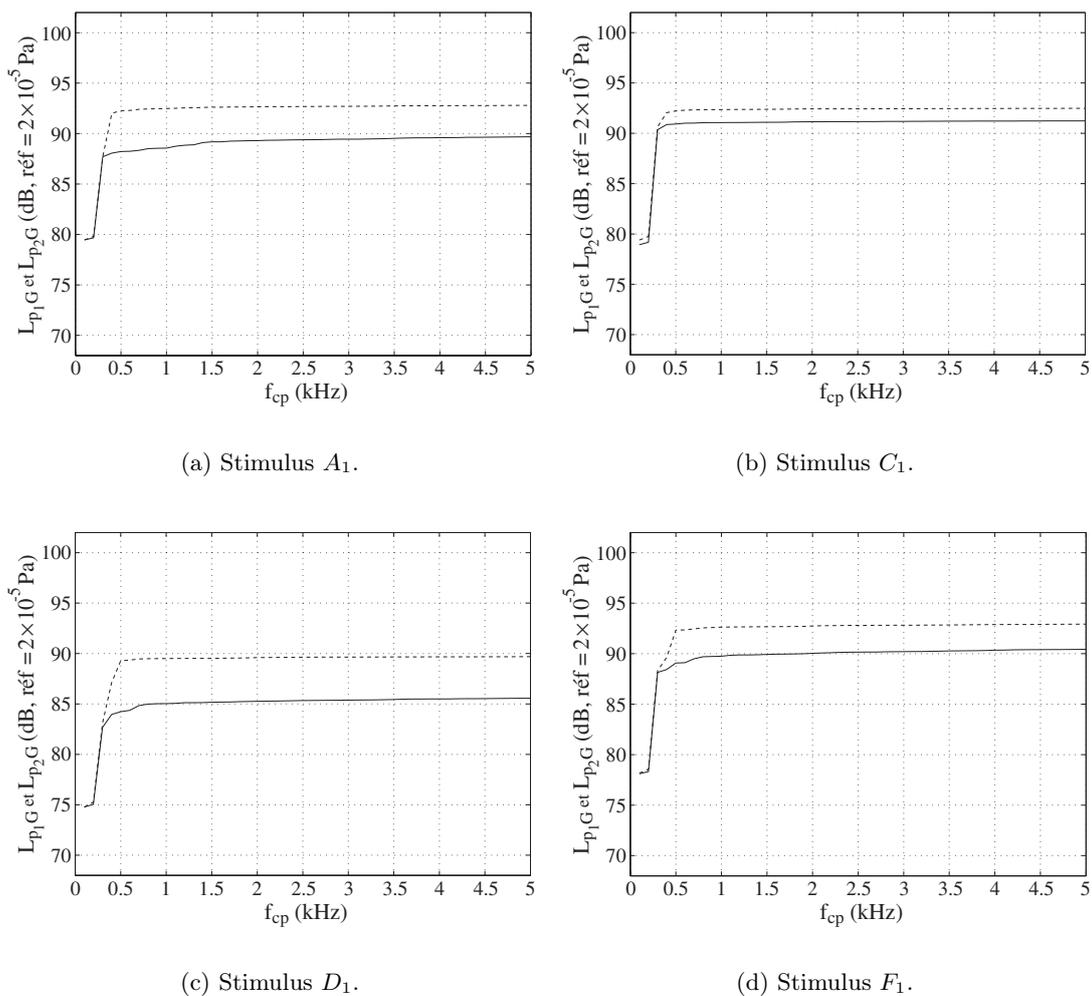
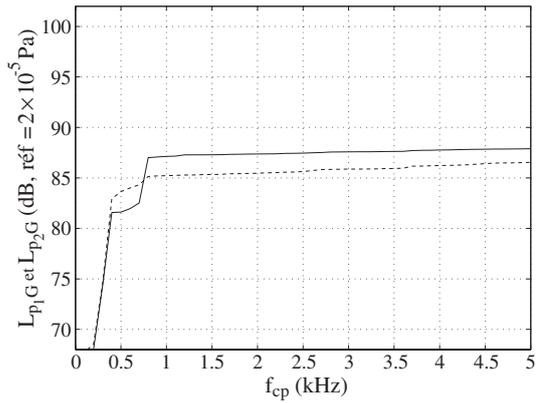
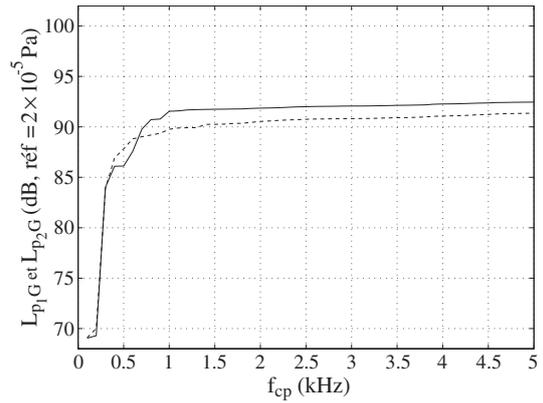


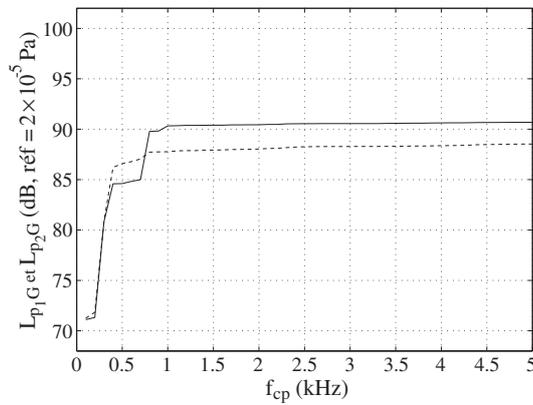
FIG. H.44 – Courbes d'évolution des niveaux de pression acoustique globaux L_{p_1G} et L_{p_2G} en fonction de la fréquence de coupure f_{cp} des spectres de niveau de pression acoustique $L_{p_1}(f)$ et $L_{p_2}(f)$. — : L_{p_1G} , - - : L_{p_2G} .



(e) Stimulus H_1 .



(f) Stimulus I_1 .



(g) Stimulus K_1 .

FIG. H.44 – 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} . (suite et fin)

H.5.2 Lien entre f_{max}^* et la conservation des niveaux de vitesse quadratique moyenne globaux de la plaque ?

La figure H.45 présente, pour chaque configuration de plaque, la courbe d'évolution du niveau de vitesse quadratique moyenne global L_{vG} en fonction de la fréquence de coupure f_{cp} du spectre de niveau de vitesse quadratique moyenne $L_v(f)$, f_{cp} variant entre 100 et 5000 Hz. Le spectre $L_v(f)$ a été défini dans la section 4.3.4.1.a (Cf. expression (4.1)).

Dans la pratique, le calcul de L_{vG} est réalisé tous les $\Delta f_{cp} = 100$ Hz ; pour chaque configuration de plaque, il est calculé à chaque incrément de f_{cp} comme suit :

$$L_{vG} = 10 \times \log_{10} \left(\sum_{k=1}^{n_{f_{cp}}} 10^{\frac{L_{v,k}}{10}} \right) \quad (\text{H.1})$$

où $n_{f_{cp}}$ est le nombre de points FFT compris dans le domaine $[0, f_{cp}]$ Hz ; $L_{v,k}$ est le niveau de vitesse quadratique moyenne (exprimé en dB), calculé au point FFT d'indice k .

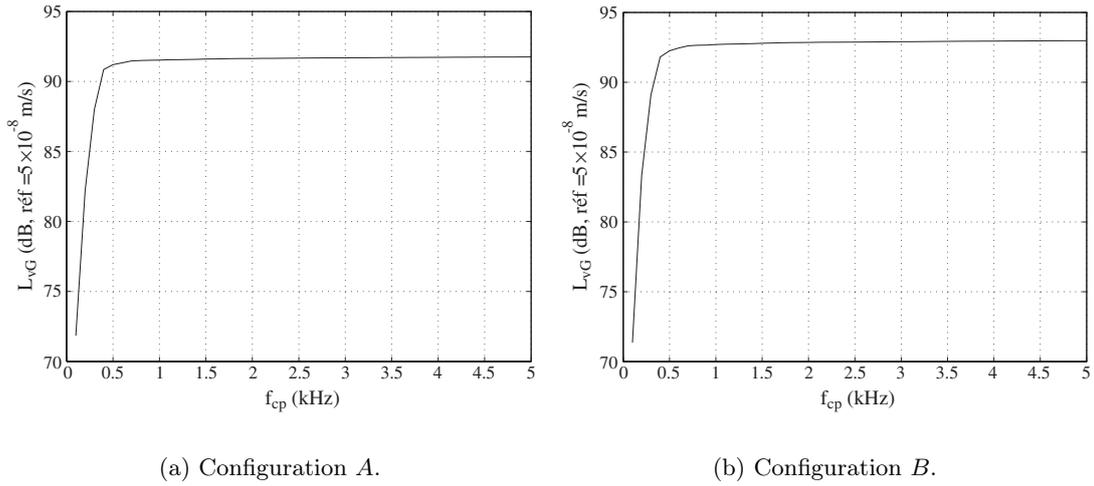
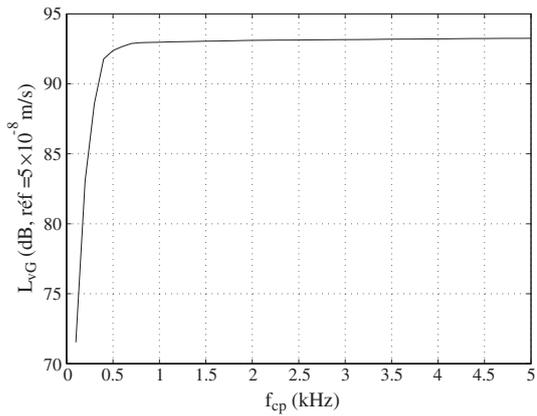


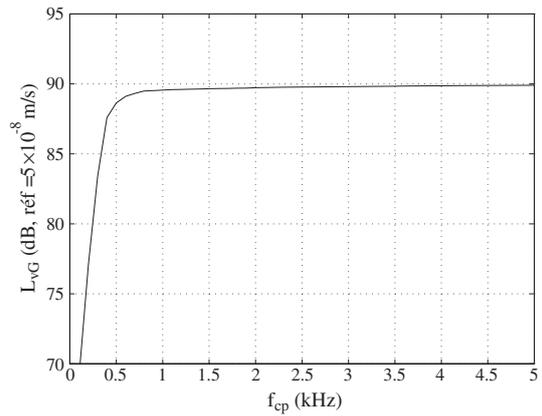
FIG. H.45 – Courbes d'évolution du niveau de vitesse quadratique moyenne global L_{vG} en fonction de la fréquence de coupure f_{cp} du spectre de niveau de vitesse quadratique moyenne $L_v(f)$, pour les différentes configurations de plaque.

Globalement, on peut remarquer que, quelque soit la configuration de plaque, le niveau de vitesse quadratique moyenne global n'évolue plus au-delà d'une fréquence de coupure f_{cp} située très en-deçà de 2500 Hz, i.e. située entre 700 et 1300 Hz selon la configuration de plaque.

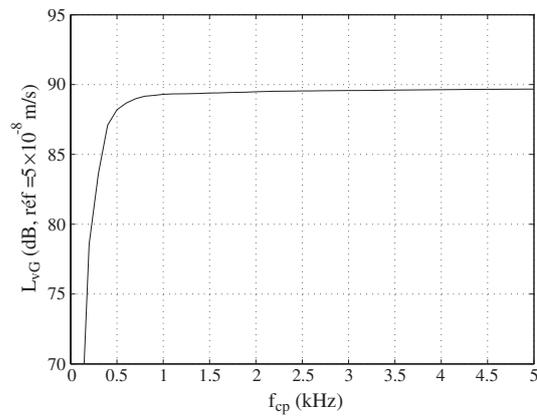
Ainsi, du fait de l'éloignement important entre f_{max}^* et la fréquence de coupure maximale à partir de laquelle l'ensemble des niveaux de vitesse quadratique moyenne globaux est conservé, i.e. 1300 Hz, on ne peut vraiment établir un lien de causalité entre la conservation des tendances qualitatives et la conservation de l'énergie vibratoire de la plaque pour ses différentes configurations.



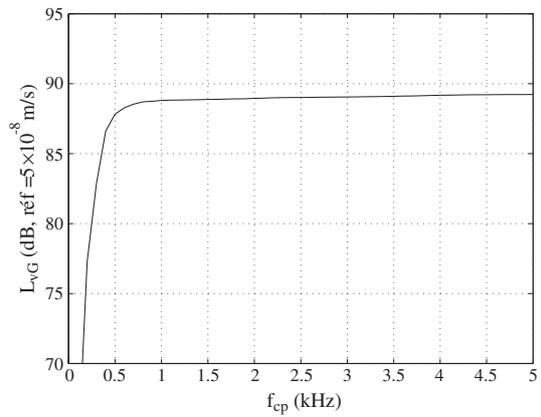
(c) Configuration C.



(d) Configuration D.

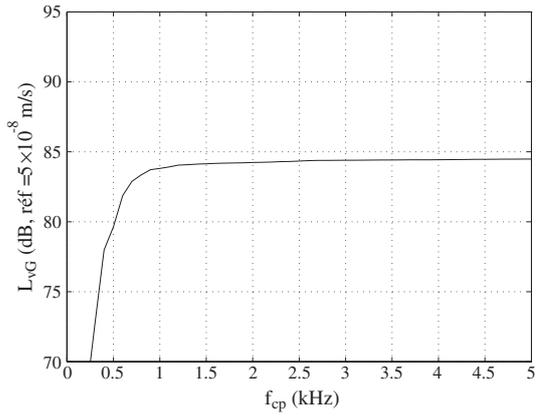


(e) Configuration E.

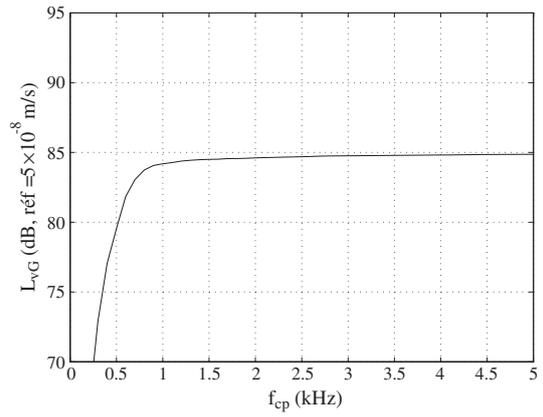


(f) Configuration F.

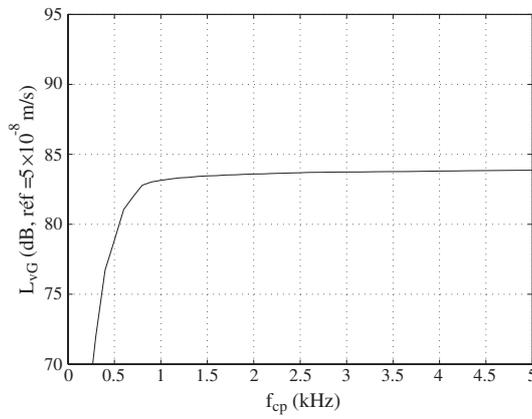
FIG. H.45 – Courbes d'évolution du niveau de vitesse quadratique moyenne global L_{vG} en fonction de la fréquence de coupure f_{cp} du spectre de niveau de vitesse quadratique moyenne $L_v(f)$, pour les différentes configurations de plaque. (suite)



(g) Configuration G.



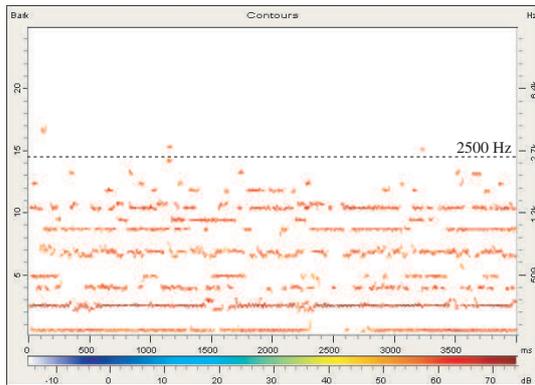
(h) Configuration H.



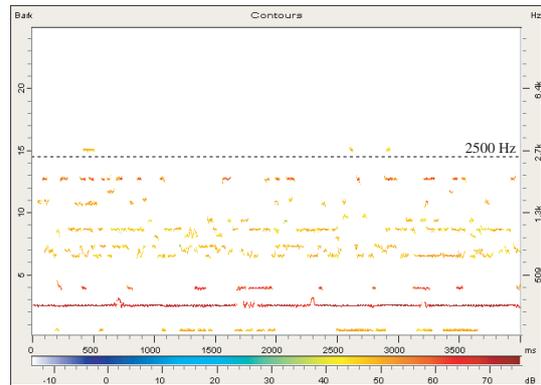
(i) Configuration I.

FIG. H.45 – Courbes d'évolution du niveau de vitesse quadratique moyenne global L_{vG} en fonction de la fréquence de coupure f_{cp} du spectre de niveau de vitesse quadratique moyenne $L_v(f)$, pour les différentes configurations de plaque. (*suite et fin*)

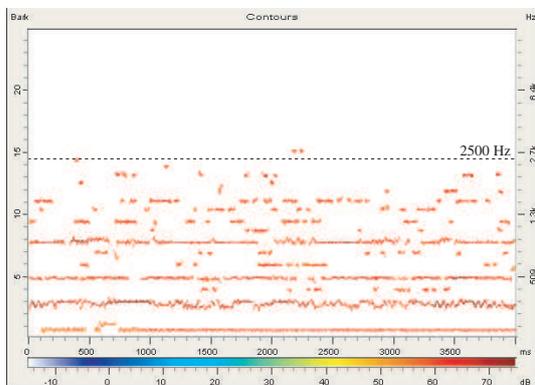
H.6 Compléments relatifs à la recherche d'un lien entre f_{max}^* et des caractéristiques fréquentielles des sons originaux



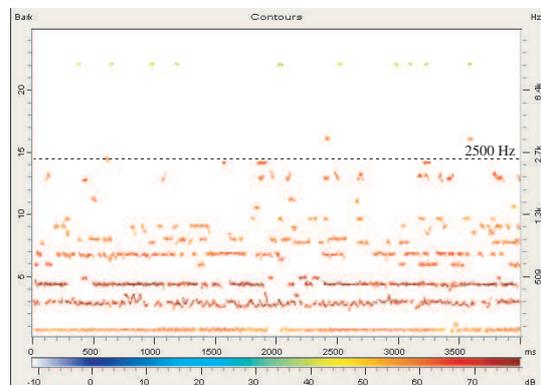
(a) Stimulus A_1 (voie gauche).



(b) Stimulus B_1 (voie gauche).



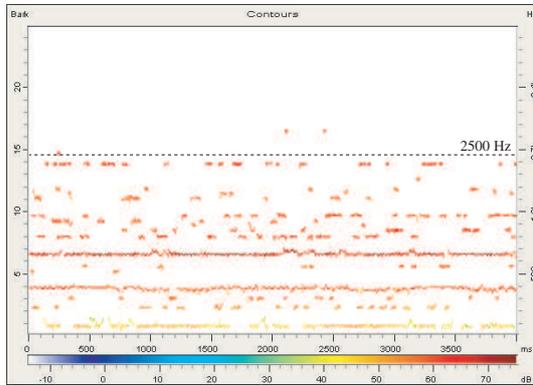
(c) Stimulus E_1 (voie gauche).



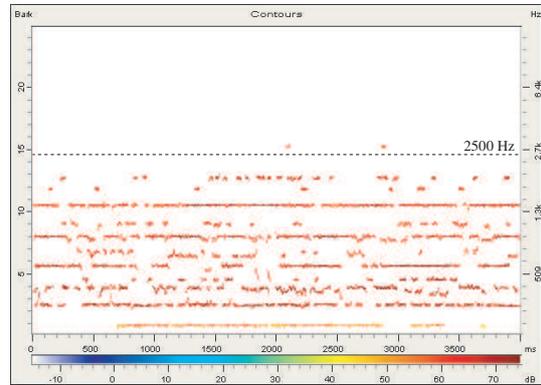
(d) Stimulus F_1 (voie droite).

FIG. H.46 – Diagrammes *Frequency Tracks* calculés pour différents stimuli originaux.

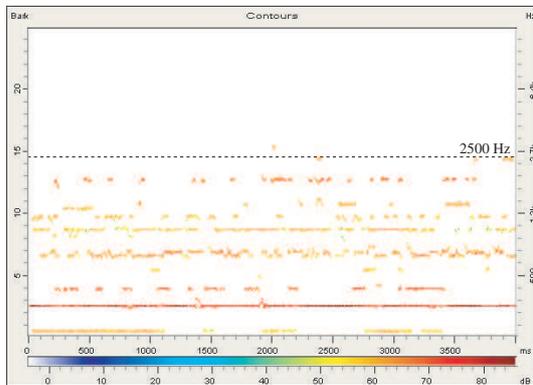
H.6. Compléments relatifs à la recherche d'un lien entre f_{max}^* et des caractéristiques fréquentielles des sons originaux



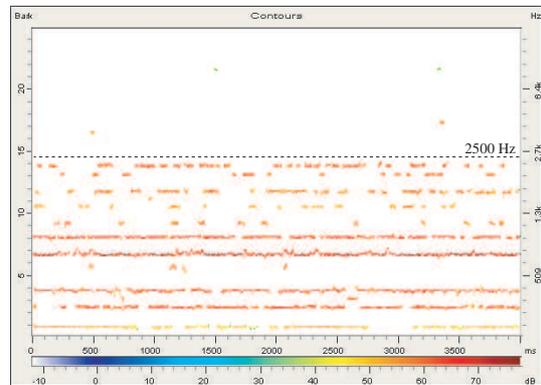
(e) Stimulus G_1 (voie gauche).



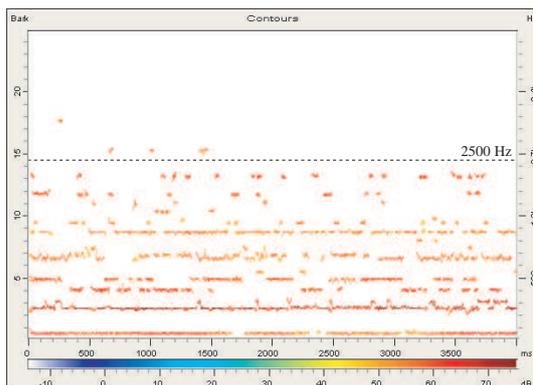
(f) Stimulus I_1 (voie droite).



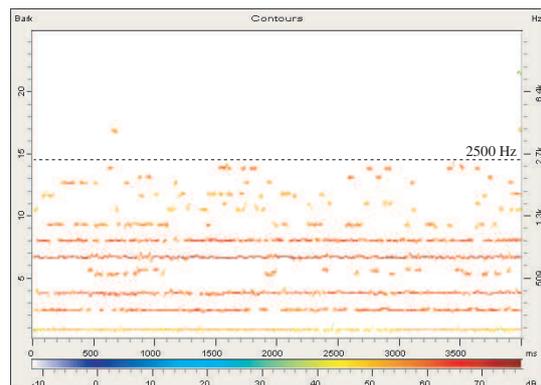
(g) Stimulus J_1 (voie gauche).



(h) Stimulus K_1 (voie gauche).



(i) Stimulus A_2 (voie gauche).



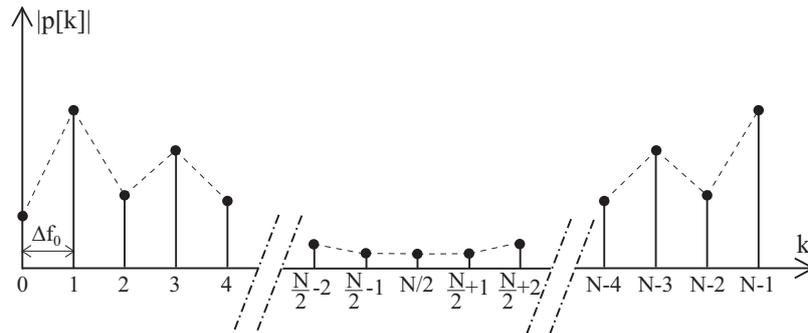
(j) Stimulus H_2 (voie gauche).

FIG. H.46 – Diagrammes *Frequency Tracks* calculés pour différents stimuli originaux. (suite et fin)

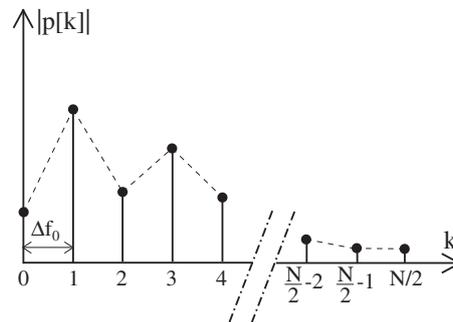
Annexe I

Compléments relatifs à l'ajustement du pas fréquentiel des sons

I.1 Compléments relatifs au procédé de formation des stimuli filtrés modifiés

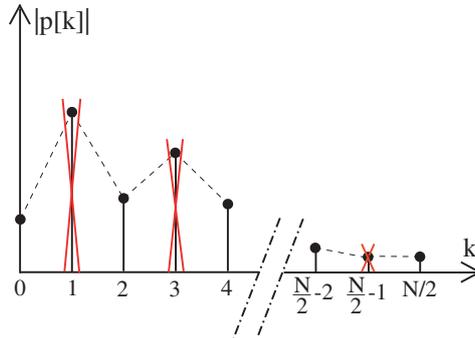


(a) Spectre d'amplitude sur $[0, F_s[$ avec $\Delta f_0 = 0.25$ Hz.

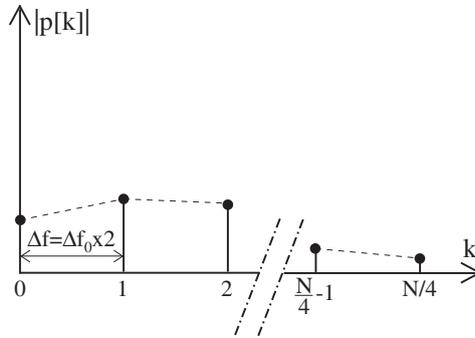


(b) Spectre d'amplitude sur $[0, \frac{F_s}{2}]$
avec $\Delta f_0 = 0.25$ Hz.

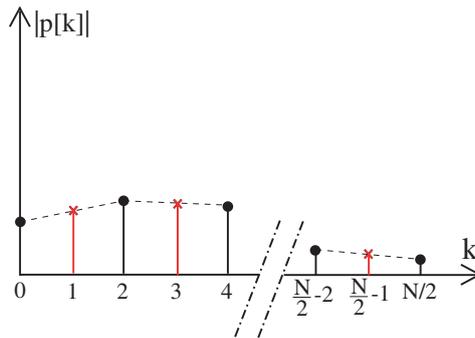
FIG. I.1 – Illustration des étapes sous-jacentes à la modification de l'enveloppe d'un spectre d'amplitude d'un stimulus filtré passe-bas à f_{max}^* (encadrées en traits pointillés sur la figure 8.2(b)). On considère R , le taux de "décimation"/"interpolation", égal à 2. L'enveloppe d'un spectre d'amplitude d'un stimulus synthétisé calculé avec un pas fréquentiel $\Delta f = 0.5$ Hz est ainsi simulée.



(c) “Décimation” du spectre d’amplitude avec un taux $R = 2$.

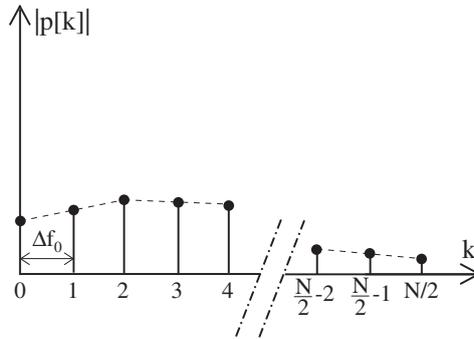


(d) Spectre d’amplitude obtenu sur $[0, \frac{F_s}{2}]$ avec $\Delta f = \Delta f_0 \times 2 = 0.5$ Hz.

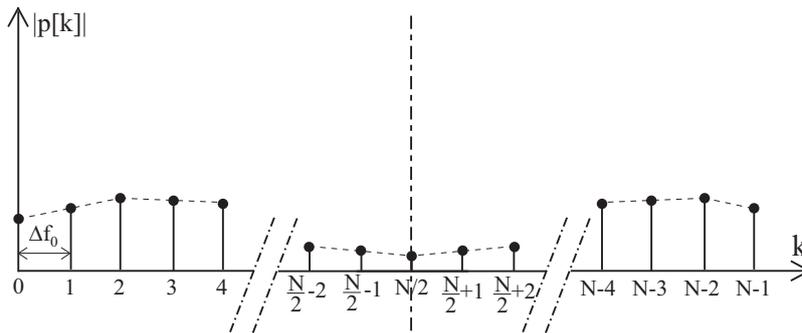


(e) “Interpolation” du spectre d’amplitude avec un taux $R = 2$.

FIG. I.1 – 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)). On considère R , le taux de “décimation”/“interpolation”, égal à 2. L’enveloppe d’un spectre d’amplitude d’un stimulus synthétisé calculé avec un pas fréquentiel $\Delta f = 0.5$ Hz est ainsi simulée. (suite)



(f) Spectre d'amplitude obtenu sur $[0, \frac{F_s}{2}]$ avec $\Delta f_0 = 0.25$ Hz.



(g) Reconstruction du spectre d'amplitude sur $[0, F_s]$ avec $\Delta f_0 = 0.25$ Hz par adjonction symétrique (i.e. on opère une symétrie des valeurs de l'intervalle $[0, \frac{F_s}{2}]$ par rapport à l'axe vertical passant par l'abscisse $\frac{F_s}{2}$).

FIG. I.1 – 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)). On considère R , le taux de "décimation"/"interpolation", égal à 2. L'enveloppe d'un spectre d'amplitude d'un stimulus synthétisé calculé avec un pas fréquentiel $\Delta f = 0.5$ Hz est ainsi simulée. (*suite et fin*)

I.2 Résultats complémentaires relatifs aux expériences de discrimination

	A_1						B_1						C_1						D_1					
n°1	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1
	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1
n°2	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	0	1	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1
	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1	1
n°3	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	0	1
	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0	1
n°4	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1
	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1
n°5	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1
	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1
n°6	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1
	0	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1
n°7	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1
	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1
n°8	0	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1
	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1
n°9	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1
	0	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1
n°10	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	0	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
n°11	0	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1
	0	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1

(a) Stimuli A_1 à D_1 .

TAB. I.1 – Réponses des sujets aux expériences de discrimination. “1” : son perçu différent du son de référence, “0” : son perçu identique au son de référence, en caractères gras : les réponses incohérentes.

Suj.	E_1						F_1						G_1						H_1					
	1	2	4	8	10	12	1	2	4	8	10	12	1	2	4	8	10	12	1	2	4	8	10	12
n°1	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1
	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1
n°2	0	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1
	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1
n°3	0	1	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1
	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1
n°4	0	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1
	0	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1
n°5	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1
	0	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1
n°6	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1
	0	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1
n°7	0	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1
	0	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1
n°8	0	1	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1
	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1
n°9	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1
	0	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1
n°10	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1
	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1
n°11	0	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1
	0	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1

(b) Stimuli E_1 à H_1 .

TAB. I.1 – Réponses des sujets aux expériences de discrimination. “1” : son perçu différent du son de référence, “0” : son perçu identique au son de référence, en caractères gras : les réponses incohérentes. (suite)

Suj.	I_1						J_1						K_1						A_2					
	1	2	4	8	10	12	1	2	4	8	10	12	1	2	4	8	10	12	1	2	4	8	10	12
n°1	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1
	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1
n°2	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1
	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1
n°3	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1
	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1
n°4	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1
	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1
n°5	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1
	0	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1
n°6	0	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1
	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1
n°7	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1
	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1
n°8	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1
	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1
n°9	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1
	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1
n°10	0	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1
	0	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1
n°11	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1
	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1

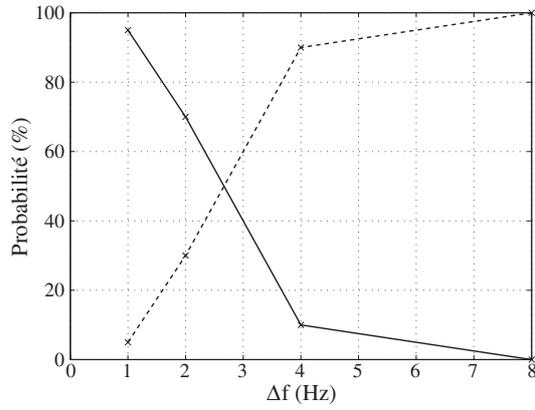
(c) Stimuli I_1 à K_1 et A_2 .

TAB. I.1 – Réponses des sujets aux expériences de discrimination. “1” : son perçu différent du son de référence, “0” : son perçu identique au son de référence, en caractères gras : les réponses incohérentes. (suite)

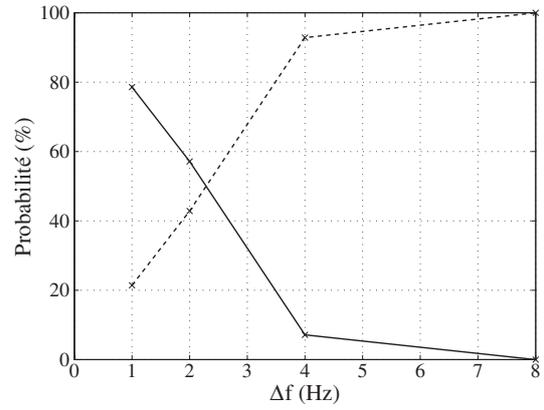
	H_2					
Suj.	1	2	4	8	10	12
n°1	0	0	0	1	1	1
	0	0	0	1	1	1
n°2	0	0	0	1	1	1
	0	0	0	1	1	1
n°3	1	0	0	1	1	1
	0	0	0	1	1	1
n°4	0	0	0	1	1	1
	0	0	0	1	1	1
n°5	0	0	0	1	1	1
	0	0	0	1	1	1
n°6	0	0	0	1	1	1
	0	0	1	1	1	1
n°7	0	0	1	1	1	1
	0	0	0	1	1	1
n°8	0	0	1	1	1	1
	0	0	0	1	1	1
n°9	0	0	0	1	1	1
	0	0	0	1	1	1
n°10	0	1	1	1	1	1
	0	1	1	1	1	1
n°11	0	0	0	1	1	1
	0	0	0	1	1	1

(d) Stimulus H_2 .

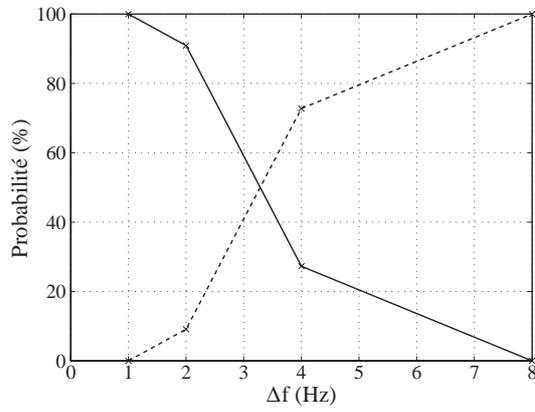
TAB. I.1 – Réponses des sujets aux expériences de discrimination. “1” : son perçu différent du son de référence, “0” : son perçu identique au son de référence, en caractères gras : les réponses incohérentes. (*suite et fin*)



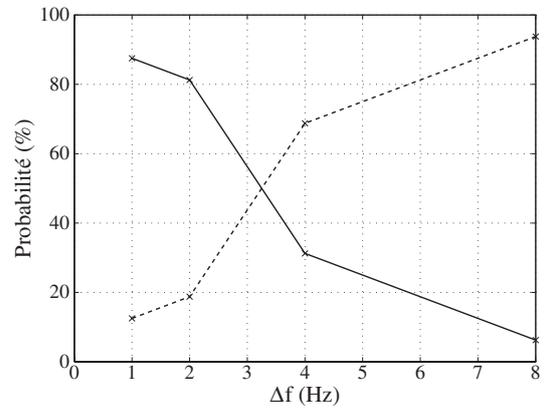
(a) Stimulus A_1 .



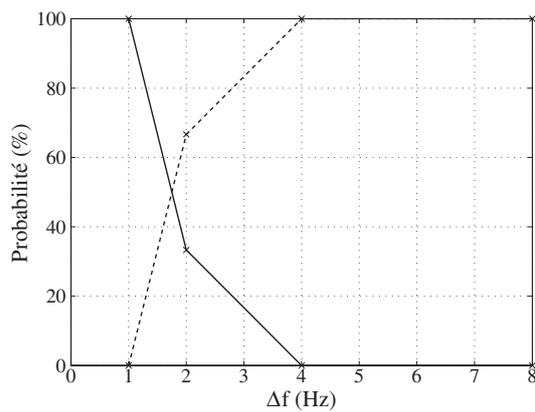
(b) Stimulus B_1 .



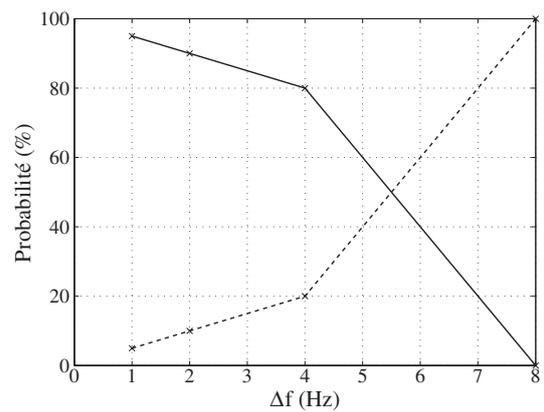
(c) Stimulus C_1 .



(d) Stimulus D_1 .

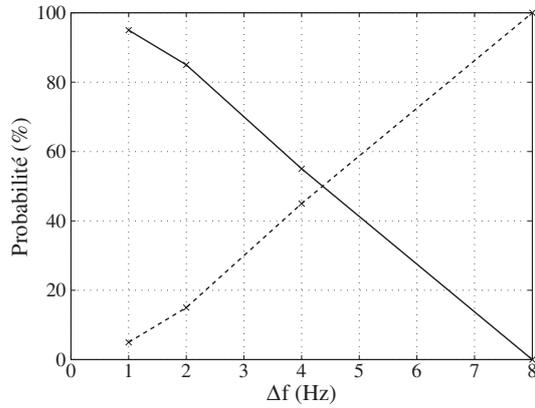


(e) Stimulus E_1 .

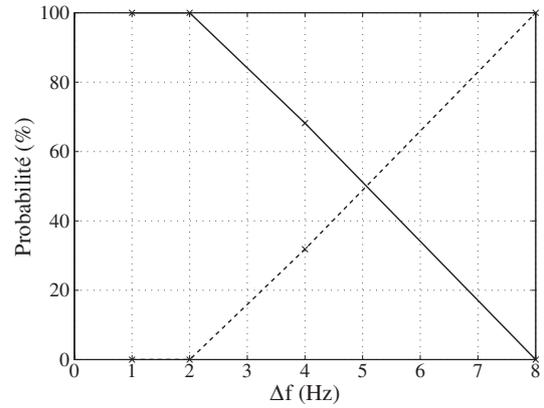


(f) Stimulus F_1 .

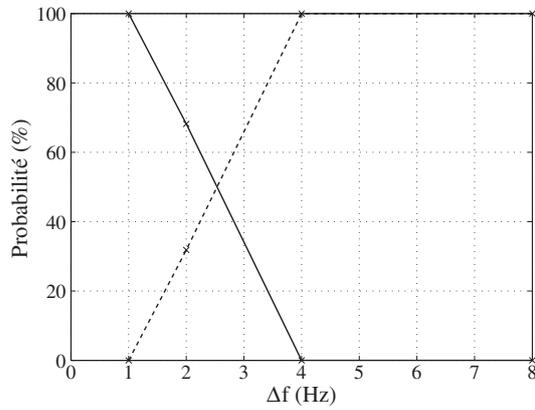
FIG. I.2 – Détermination graphique du P.E.S pour les différents stimuli. —x— : $p_i(S)$, --x-- : $p_i(D)$.



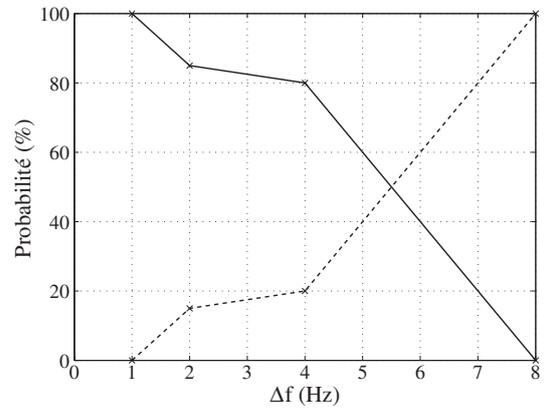
(g) Stimulus G_1 .



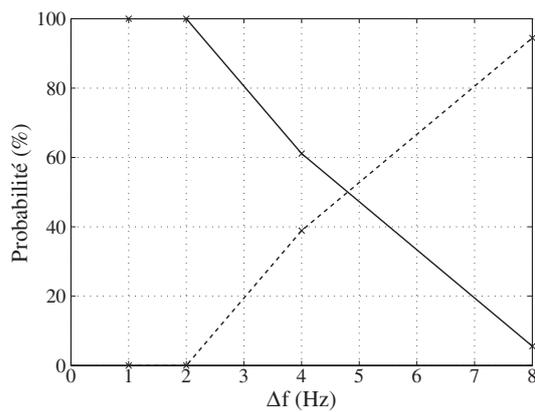
(h) Stimulus H_1 .



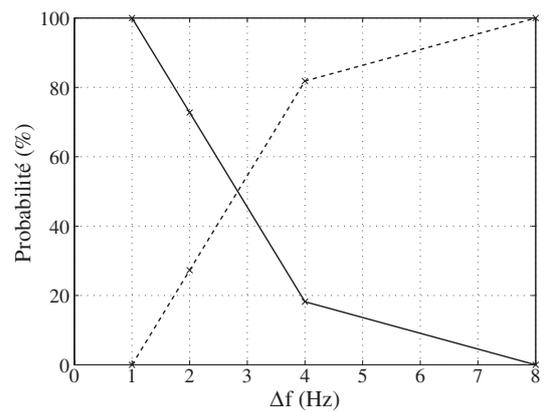
(i) Stimulus I_1 .



(j) Stimulus J_1 .

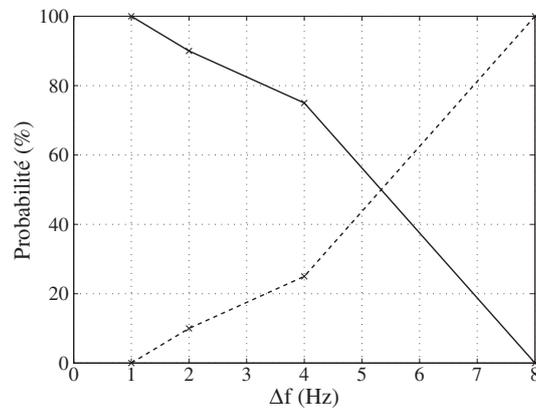


(k) Stimulus K_1 .



(l) Stimulus A_2 .

FIG. I.2 – Détermination graphique du P.E.S pour les différents stimuli. —x— : $p_i(S)$, --x-- : $p_i(D)$. (suite)



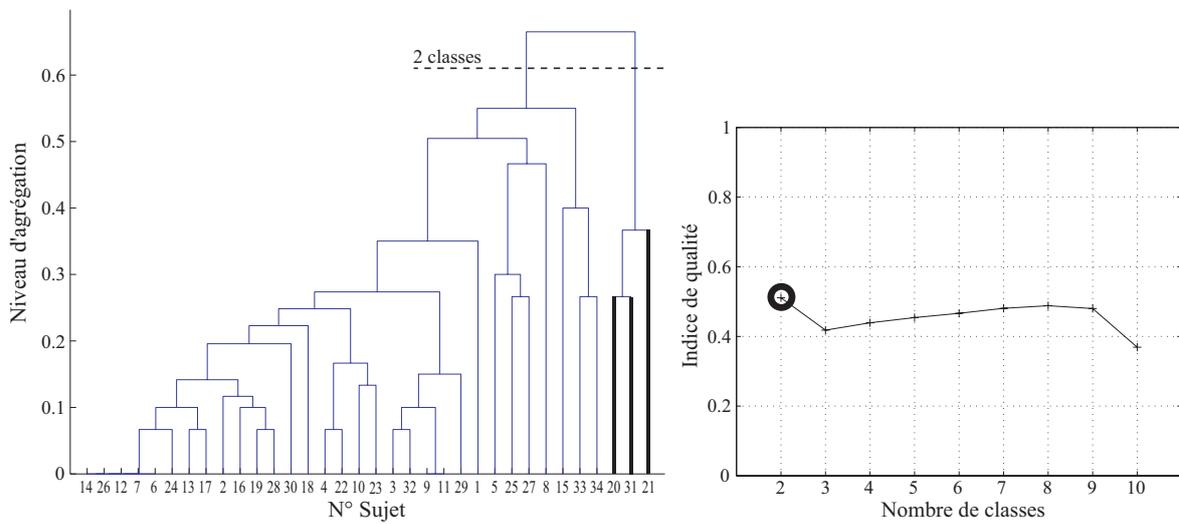
(m) Stimulus H_2 .

FIG. I.2 – Détermination graphique du P.E.S pour les différents stimuli. —x— : $p_i(S)$, --x-- : $p_i(D)$. (suite et fin)

I.3 Résultats complémentaires relatifs à l'appréciation des approximations dues à l'usage des différents pas fréquentsiels via l'évaluation auditive d'un corpus partiel de stimuli

I.3.1 Analyse en clusters des sujets

I.3.1.1 Corpus de stimuli filtrés modifiés formés pour $\Delta f_1 = 2$ Hz

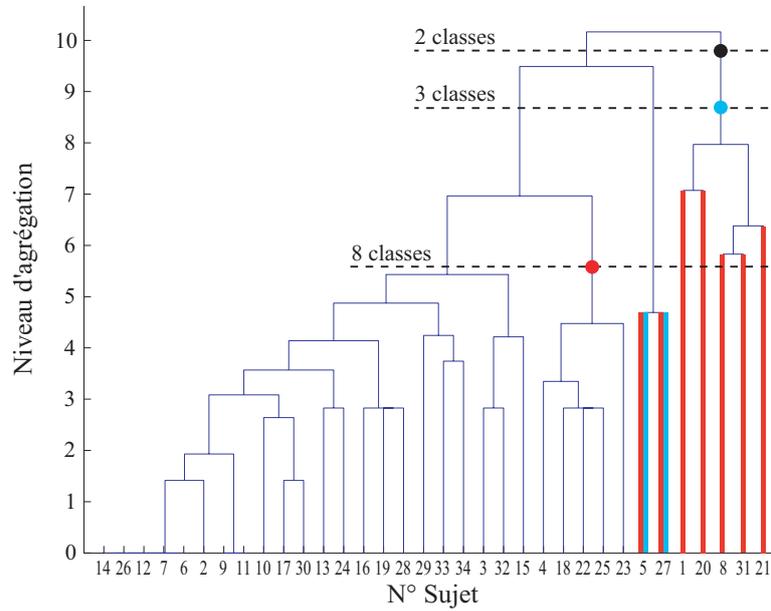


(a) Dendrogramme des sujets. Les sujets jugés comme étant des "outliers" sont surlignés. La couleur de surlignage respecte la couleur utilisée ci-contre pour repérer la partition pertinente.

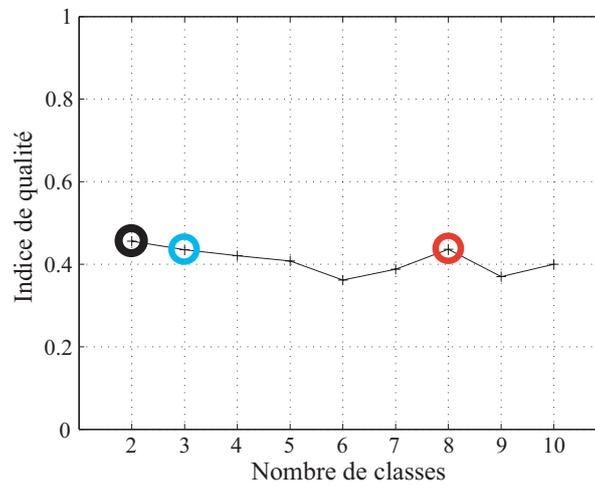
(b) Valeurs de l'indice de qualité exprimées en fonction du nombre de classes. La partition jugée comme pertinente est repérée par un cercle coloré.

FIG. I.3 – Résultats de la Classification Ascendante Hiérarchique appliquée sur la matrice de dissemblances \mathbf{D}_2 .

I.3. Résultats complémentaires relatifs à l'appréciation des approximations dues à l'usage des différents pas fréquentiels via l'évaluation auditive d'un corpus partiel de stimuli

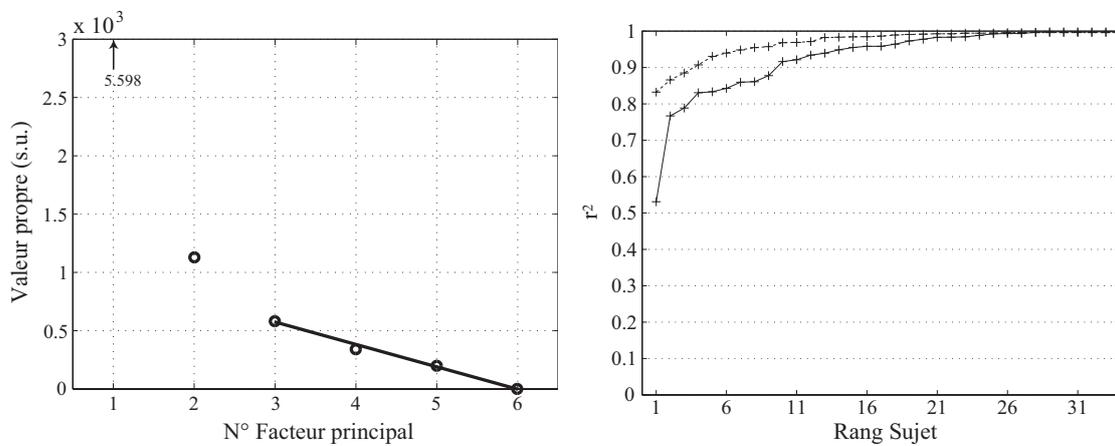


(a) Dendrogramme des sujets. Pour chaque partition pertinente, les sujets jugés comme étant des "outliers" sont surlignés ; les sous-groupes de sujets secondaires sont repérés par un point. Les couleurs de surlignage et de point respectent les couleurs utilisées ci-dessous pour repérer les différentes partitions pertinentes.



(b) Valeurs de l'indice de qualité exprimées en fonction du nombre de classes. Les partitions jugées comme pertinentes sont repérées par un cercle coloré.

FIG. I.4 – Résultats de la Classification Ascendante Hiérarchique appliquée sur la matrice de dissemblances \mathbf{D}_3 .



(a) Diagramme des valeurs propres exprimées en fonction du numéro du facteur principal associé.

(b) Valeurs du coefficient de corrélation r (élevé au carré) entre les projections des stimuli sur le vecteur sujet et les scores primaires initialement calculés, pour les différents sujets. — : espace 3D, - - : espace 4D.

FIG. I.5 – Etude de la dimensionnalité de l'espace perceptif de préférence dressé via MDPREF à partir des réponses de tous les sujets. En dépit du *scree test*, qui indique une dimensionnalité optimale égale à 3, on opte plutôt pour une dimensionnalité égale à 4, pour laquelle on obtient des qualités de représentation des vecteurs sujets dans l'espace substantiellement plus élevées.

I.3. Résultats complémentaires relatifs à l'appréciation des approximations dues à l'usage des différents pas fréquentiels via l'évaluation auditive d'un corpus partiel de stimuli

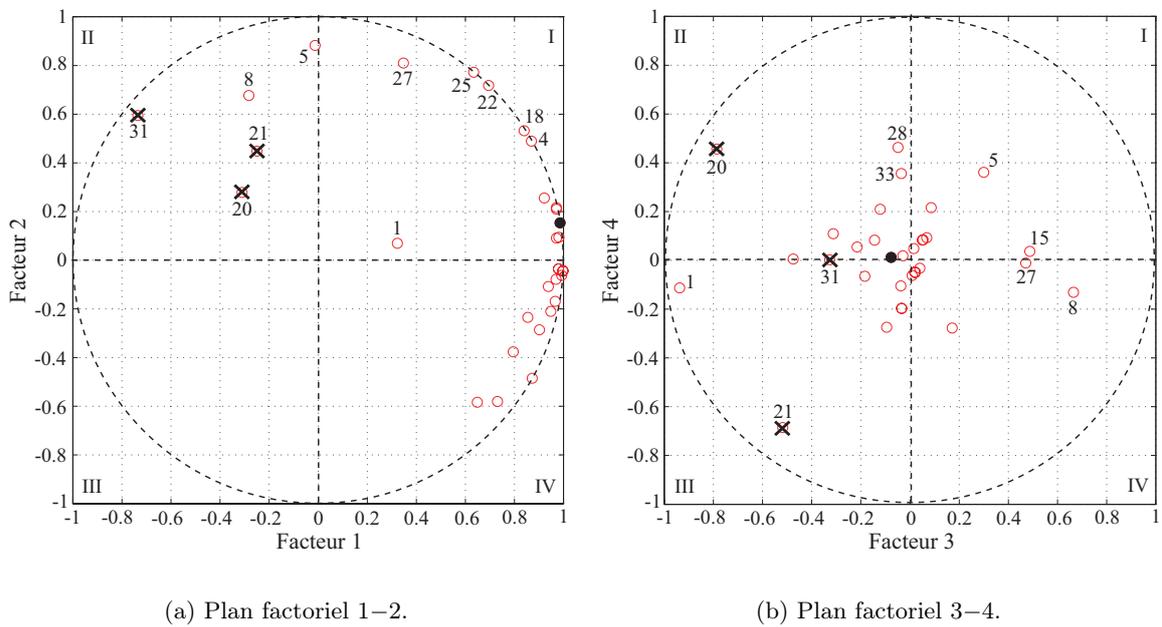
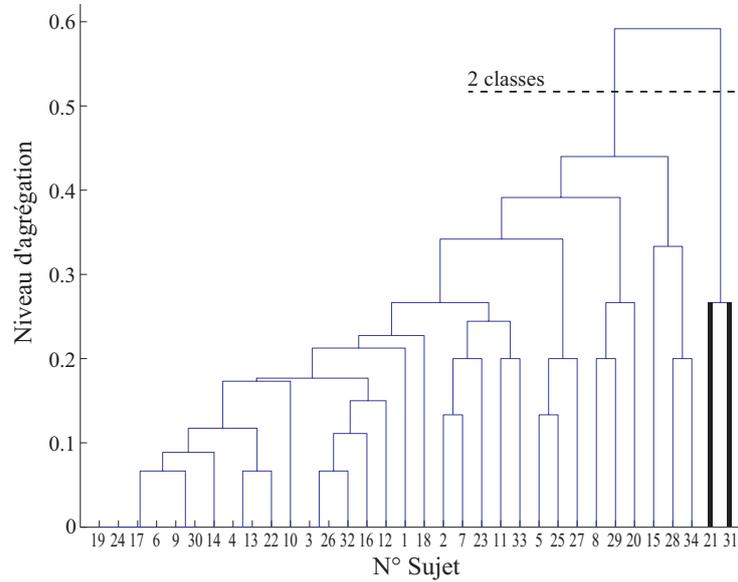
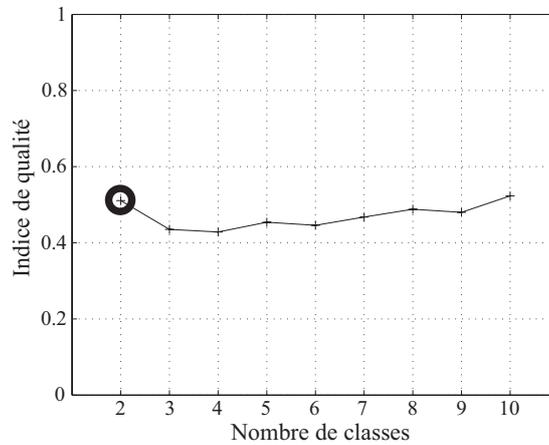


FIG. I.6 – Bilan des différences inter-individuelles à partir de l'espace perceptif de préférence 4D dressé via MDPREF sur la base des réponses de tous les sujets. \circ : extrémités des vecteurs sujets, \bullet : extrémité du vecteur sujet "moyen". \times : sujets finalement non retenus pour l'établissement des tendances qualitatives relatives aux valeurs de mérite, après recouplement avec les résultats des deux CAH.

I.3.1.2 Corpus de stimuli filtrés modifiés formés pour $\Delta f_2 = 4$ Hz



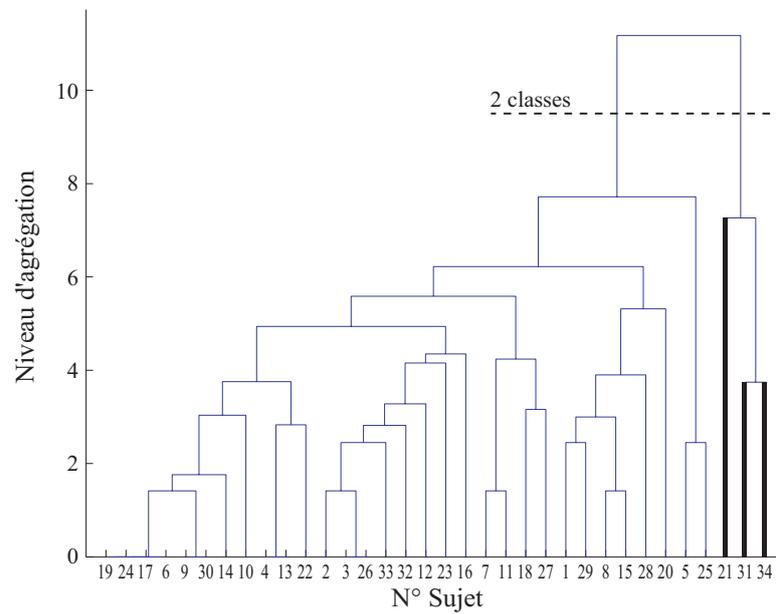
(a) Dendrogramme des sujets. Les sujets jugés comme étant des "outliers" sont surlignés. La couleur de surlignage respecte la couleur utilisée ci-dessous pour repérer la partition pertinente.



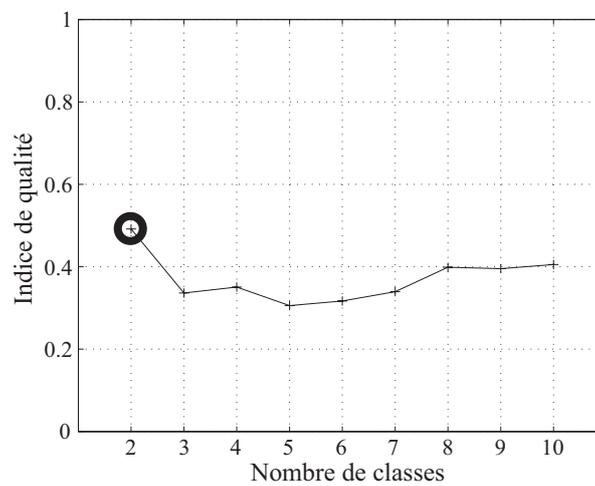
(b) Valeurs de l'indice de qualité exprimées en fonction du nombre de classes. La partition jugée comme pertinente est repérée par un cercle coloré.

FIG. I.7 – Résultats de la Classification Ascendante Hiérarchique appliquée sur la matrice de dissemblances \mathbf{D}_2 .

I.3. Résultats complémentaires relatifs à l'appréciation des approximations dues à l'usage des différents pas fréquentiels via l'évaluation auditive d'un corpus partiel de stimuli

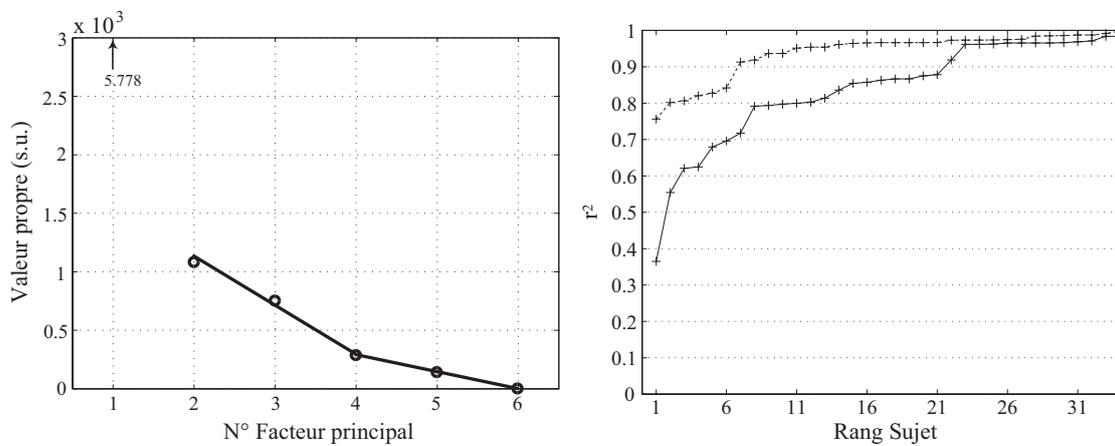


(a) Dendrogramme des sujets. Les sujets jugés comme étant des "outliers" sont surlignés. La couleur de surlignage respecte la couleur utilisée ci-dessous pour repérer la partition pertinente.



(b) Valeurs de l'indice de qualité exprimées en fonction du nombre de classes. La partition jugée comme pertinente est repérée par un cercle coloré.

FIG. I.8 – Résultats de la Classification Ascendante Hiérarchique appliquée sur la matrice de dissemblances \mathbf{D}_3 .



(a) Diagramme des valeurs propres exprimées en fonction du numéro du facteur principal associé.

(b) Valeurs du coefficient de corrélation r (élevé au carré) entre les projections des stimuli sur le vecteur sujet et les scores primaires initialement calculés, pour les différents sujets. — : espace 2D, -- : espace 3D.

FIG. I.9 – Etude de la dimensionnalité de l'espace perceptif de préférence dressé via MDPREF à partir des réponses de tous les sujets. En dépit du *scree test*, qui indique une dimensionnalité optimale égale à 2, on opte plutôt pour une dimensionnalité égale à 3, pour laquelle on obtient des qualités de représentation des vecteurs sujets dans l'espace substantiellement plus élevées.

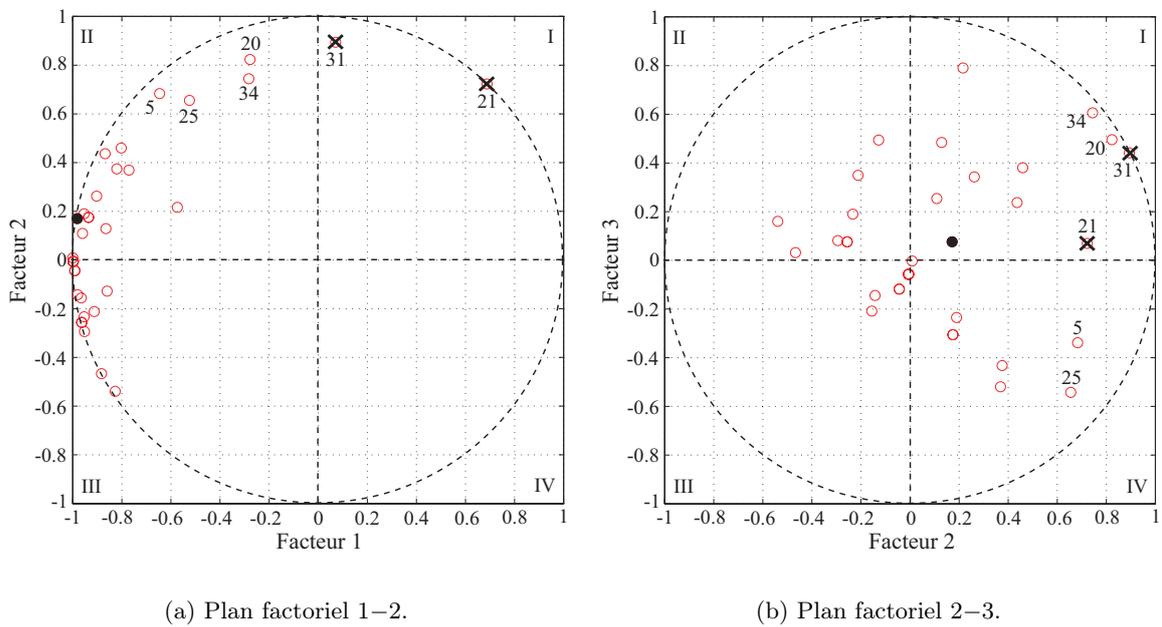
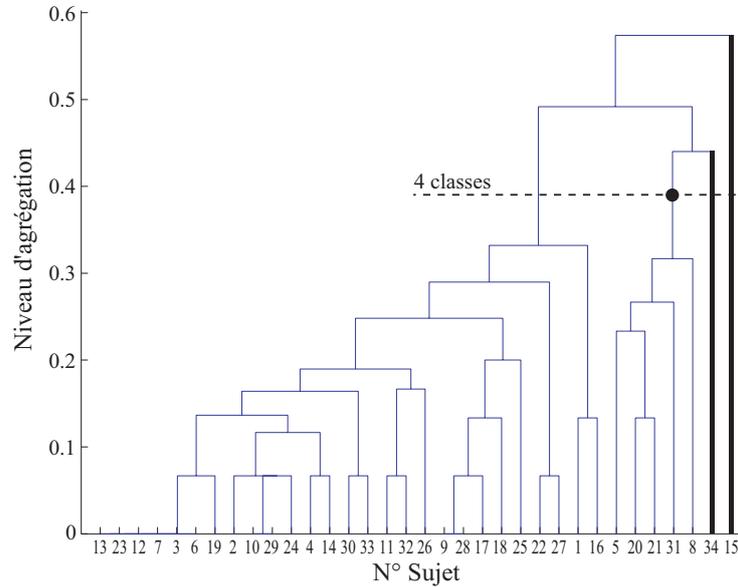
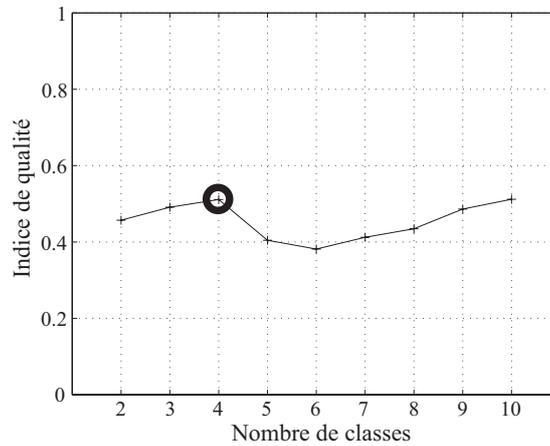


FIG. I.10 – Bilan des différences inter-individuelles à partir de l'espace perceptif de préférence 3D dressé via MDPREF sur la base des réponses de tous les sujets. \circ : extrémités des vecteurs sujets, \bullet : extrémité du vecteur sujet "moyen". \times : sujets finalement non retenus pour l'établissement des tendances qualitatives relatives aux valeurs de mérite, après recouplement avec les résultats des deux CAH.

I.3.1.3 Corpus de stimuli filtrés modifiés formés pour $\Delta f_3 = 5$ Hz



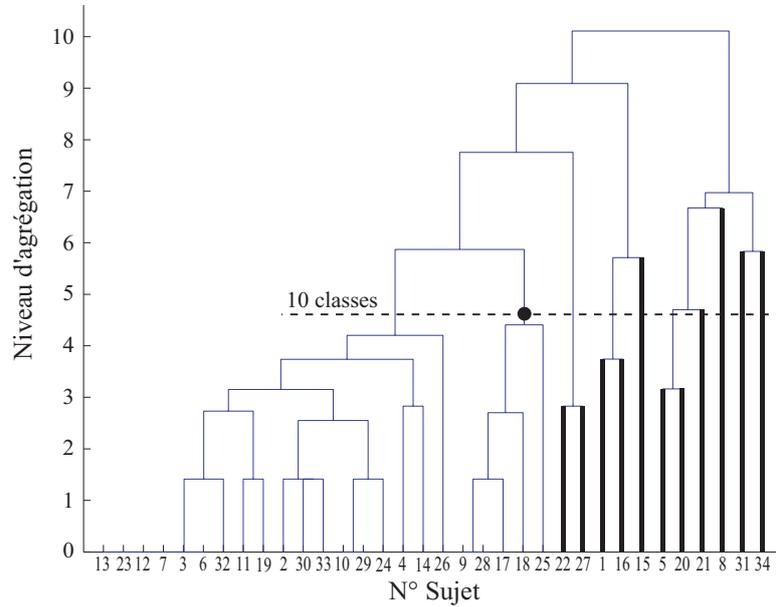
(a) Dendrogramme des sujets. Les sujets jugés comme étant des "outliers" sont surlignés ; les sous-groupes de sujets secondaires sont repérés par un point. La couleur de surlignage et de point respecte la couleur utilisée ci-dessous pour repérer la partition pertinente.



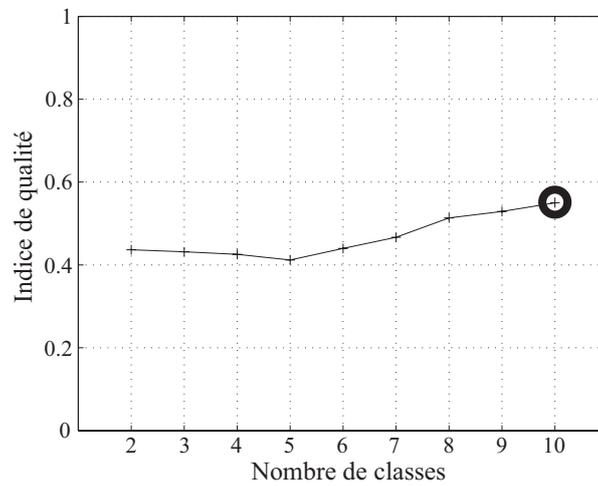
(b) Valeurs de l'indice de qualité exprimées en fonction du nombre de classes. La partition jugée comme pertinente est repérée par un cercle coloré.

FIG. I.11 – Résultats de la Classification Ascendante Hiérarchique appliquée sur la matrice de dissemblances \mathbf{D}_2 .

I.3. Résultats complémentaires relatifs à l'appréciation des approximations dues à l'usage des différents pas fréquentiels via l'évaluation auditive d'un corpus partiel de stimuli

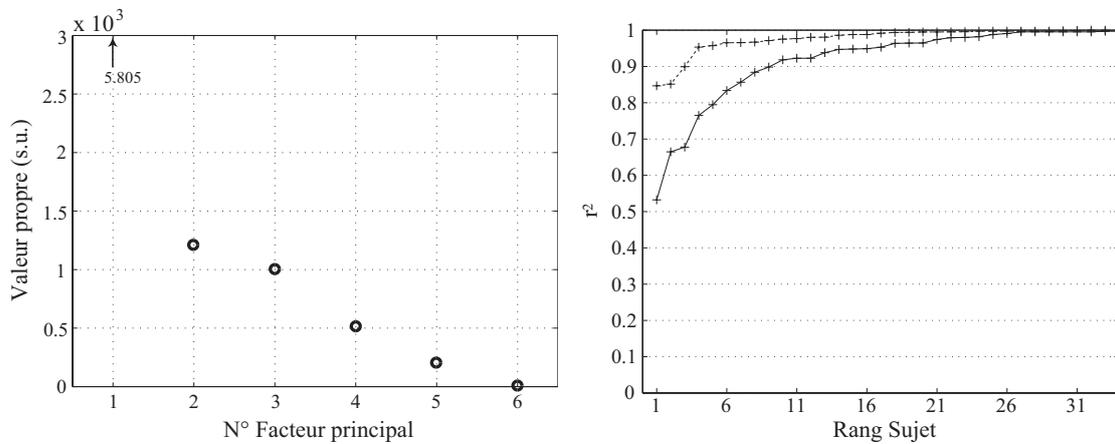


(a) Dendrogramme des sujets. Les sujets jugés comme étant des "outliers" sont surlignés ; les sous-groupes de sujets secondaires sont repérés par un point. La couleur de surlignage et de point respecte la couleur utilisée ci-dessous pour repérer la partition pertinente.



(b) Valeurs de l'indice de qualité exprimées en fonction du nombre de classes. La partition jugée comme pertinente est repérée par un cercle coloré.

FIG. I.12 – Résultats de la Classification Ascendante Hiérarchique appliquée sur la matrice de dissemblances \mathbf{D}_3 .



(a) Diagramme des valeurs propres exprimées en fonction du numéro du facteur principal associé.

(b) Valeurs du coefficient de corrélation r (élevé au carré) entre les projections des stimuli sur le vecteur sujet et les scores primaires initialement calculés, pour les différents sujets. — : espace 3D, - - : espace 4D.

FIG. I.13 – Etude de la dimensionnalité de l'espace perceptif de préférence dressé via MDPREF à partir des réponses de tous les sujets. La méthode du *scree test* est difficilement applicable de par l'allure atypique du diagramme des valeurs propres. Néanmoins, on opte pour une dimensionnalité égale à 4, pour laquelle on obtient des qualités de représentation des vecteurs sujets dans l'espace substantiellement plus élevées que pour une dimensionnalité inférieure, e.g. 3.

I.3. Résultats complémentaires relatifs à l'appréciation des approximations dues à l'usage des différents pas fréquentiels via l'évaluation auditive d'un corpus partiel de stimuli

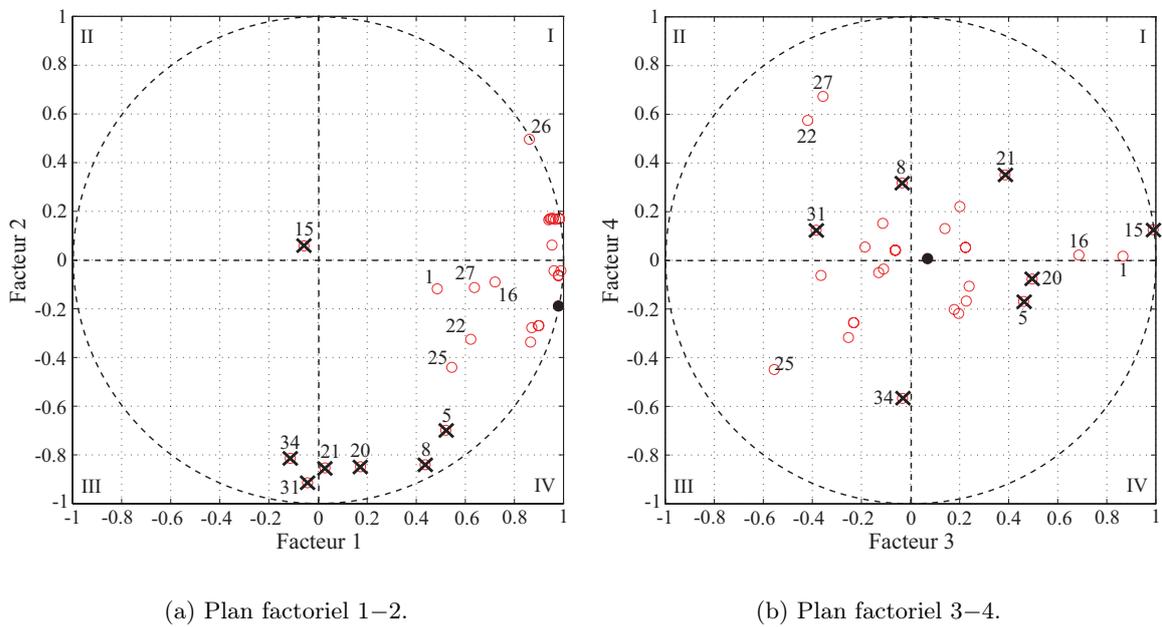
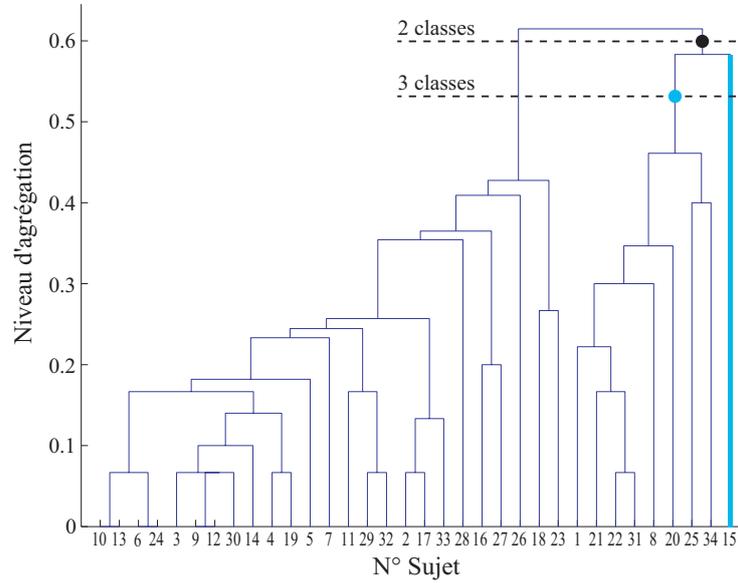
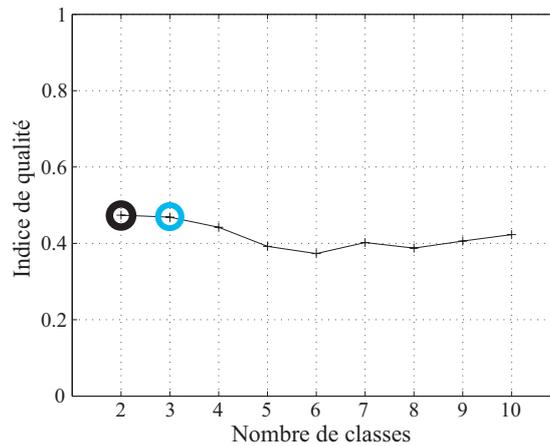


FIG. I.14 – Bilan des différences inter-individuelles à partir de l'espace perceptif de préférence 4D dressé via MDPREF sur la base des réponses de tous les sujets. \circ : extrémités des vecteurs sujets, \bullet : extrémité du vecteur sujet "moyen". \times : sujets finalement non retenus pour l'établissement des tendances qualitatives relatives aux valeurs de mérite, après recouplement avec les résultats des deux CAH.

I.3.1.4 Corpus de stimuli filtrés modifiés formés pour $\Delta f_4 = 10$ Hz



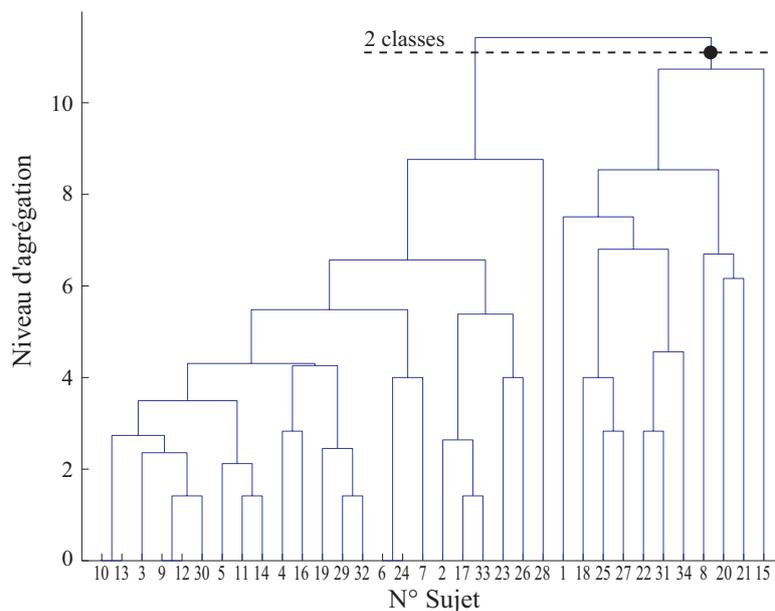
(a) Dendrogramme des sujets. Pour chaque partition pertinente, le cas échéant, les sujets jugés comme étant des “outliers” sont surlignés ; les sous-groupes de sujets secondaires sont repérés par un point. Les couleurs de surlignage et de point respectent les couleurs utilisées ci-dessous pour repérer les différentes partitions pertinentes.



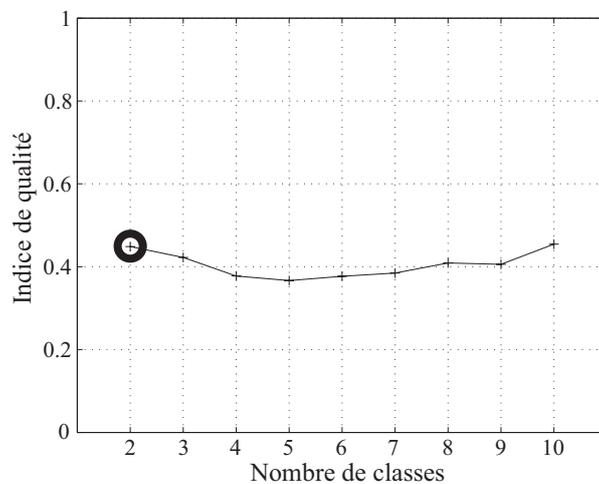
(b) Valeurs de l'indice de qualité exprimées en fonction du nombre de classes. Les partitions jugées comme pertinentes sont repérées par un cercle coloré.

FIG. I.15 – Résultats de la Classification Ascendante Hiérarchique appliquée sur la matrice de dissemblances \mathbf{D}_2 .

I.3. Résultats complémentaires relatifs à l'appréciation des approximations dues à l'usage des différents pas fréquentiels via l'évaluation auditive d'un corpus partiel de stimuli

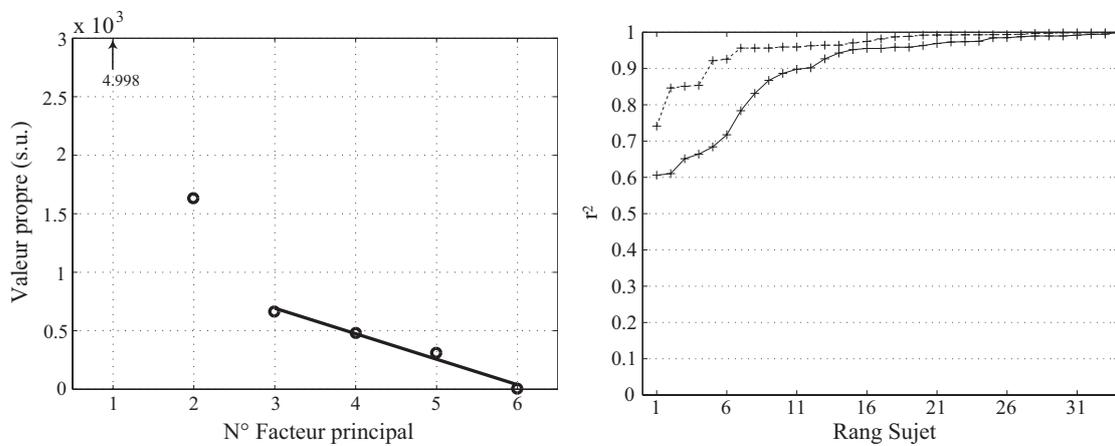


(a) Dendrogramme des sujets. Les sous-groupes de sujets secondaires sont repérés par un point. La couleur de point respecte la couleur utilisée ci-dessous pour repérer la partition pertinente.



(b) Valeurs de l'indice de qualité exprimées en fonction du nombre de classes. La partition jugée comme pertinente est repérée par un cercle coloré.

FIG. I.16 – Résultats de la Classification Ascendante Hiérarchique appliquée sur la matrice de dissemblances \mathbf{D}_3 .



(a) Diagramme des valeurs propres exprimées en fonction du numéro du facteur principal associé.

(b) Valeurs du coefficient de corrélation r (élevé au carré) entre les projections des stimuli sur le vecteur sujet et les scores primaires initialement calculés, pour les différents sujets. — : espace 3D, -- : espace 4D.

FIG. I.17 – Etude de la dimensionnalité de l'espace perceptif de préférence dressé via MDPREF à partir des réponses de tous les sujets. En dépit du *scree test*, qui indique une dimensionnalité optimale égale à 3, on opte plutôt pour une dimensionnalité égale à 4, pour laquelle on obtient des qualités de représentation des vecteurs sujets dans l'espace substantiellement plus élevées.

I.3. Résultats complémentaires relatifs à l'appréciation des approximations dues à l'usage des différents pas fréquentiels via l'évaluation auditive d'un corpus partiel de stimuli

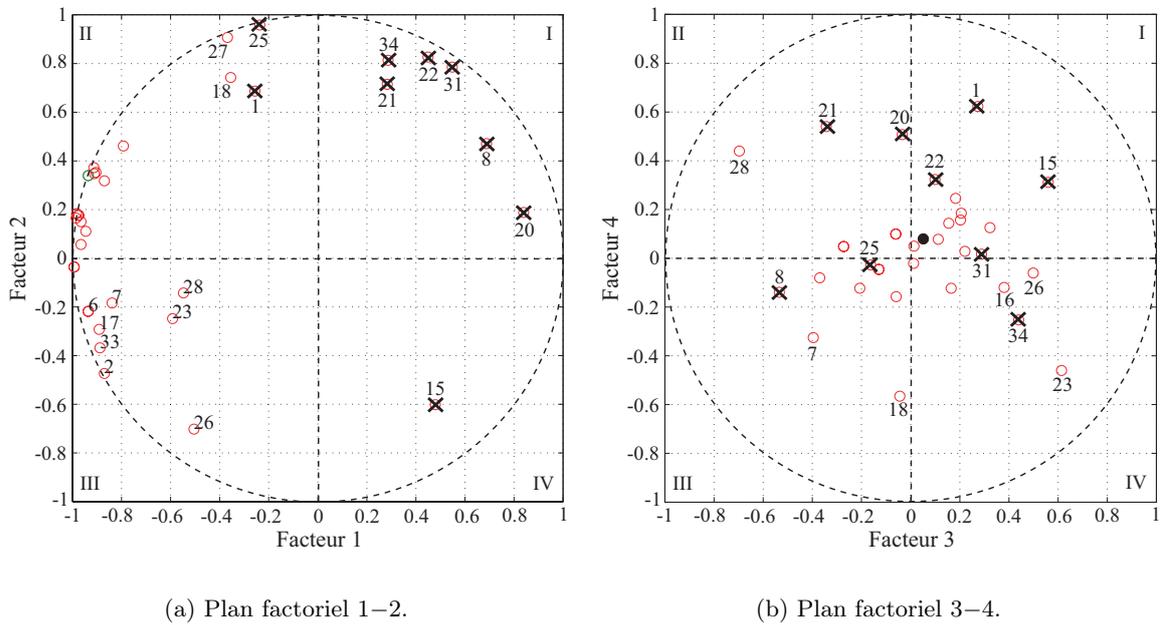


FIG. I.18 – Bilan des différences inter-individuelles à partir de l'espace perceptif de préférence 4D dressé via MDPREF sur la base des réponses de tous les sujets. \circ : extrémités des vecteurs sujets, \bullet : extrémité du vecteur sujet "moyen". \times : sujets finalement non retenus pour l'établissement des tendances qualitatives relatives aux valeurs de mérite, après recouplement avec les résultats des deux CAH.

I.3.2 Confrontation des tendances qualitatives relatives aux valeurs de mérite

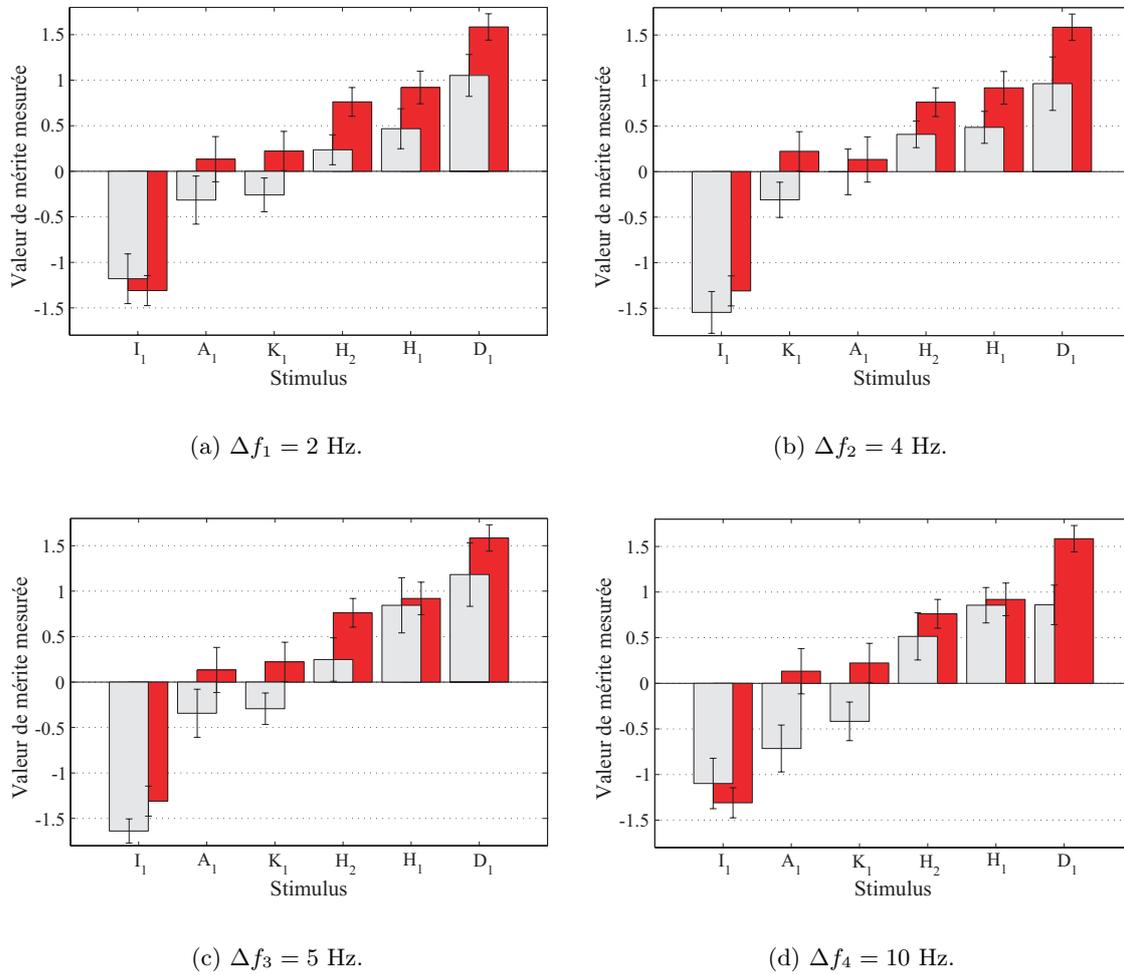


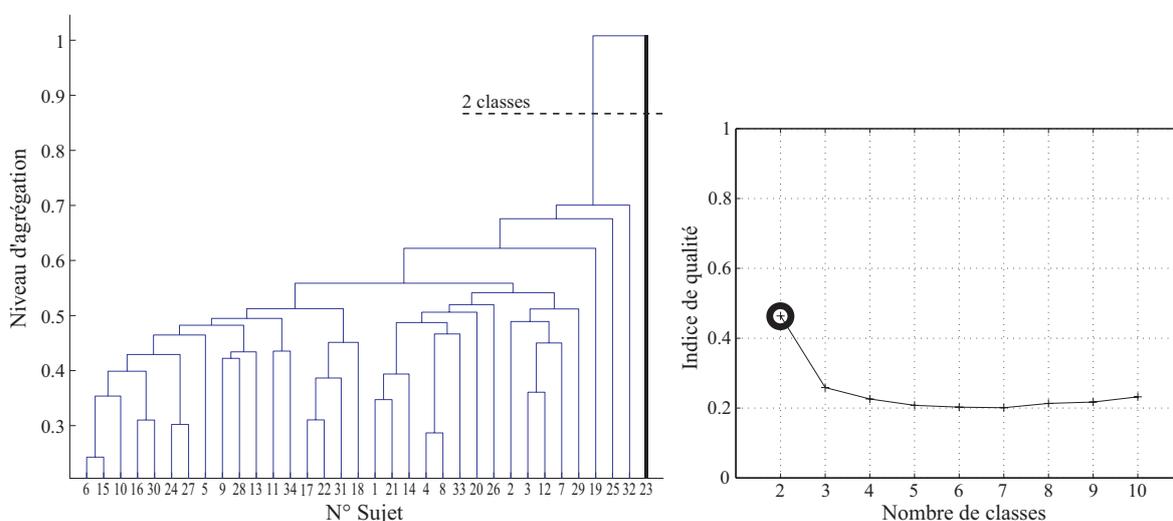
FIG. I.19 – Confrontation des valeurs de mérite mesurées des stimuli filtrés modifiés aux valeurs de mérite mesurées des stimuli filtrés passe-bas à f_{max}^* , pour les différentes valeurs Δf_i ($i = 1$ à 4) du pas fréquentiel. En gris : valeurs de mérite mesurées des stimuli filtrés modifiés, en rouge : valeurs de mérite mesurées des stimuli filtrés passe-bas à f_{max}^* , I : intervalle de confiance à 95%.

I.4. Résultats complémentaires relatifs à l'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

I.4 Résultats complémentaires relatifs à l'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

I.4.1 Analyse en clusters des sujets

I.4.1.1 Jugements de dissimilarité

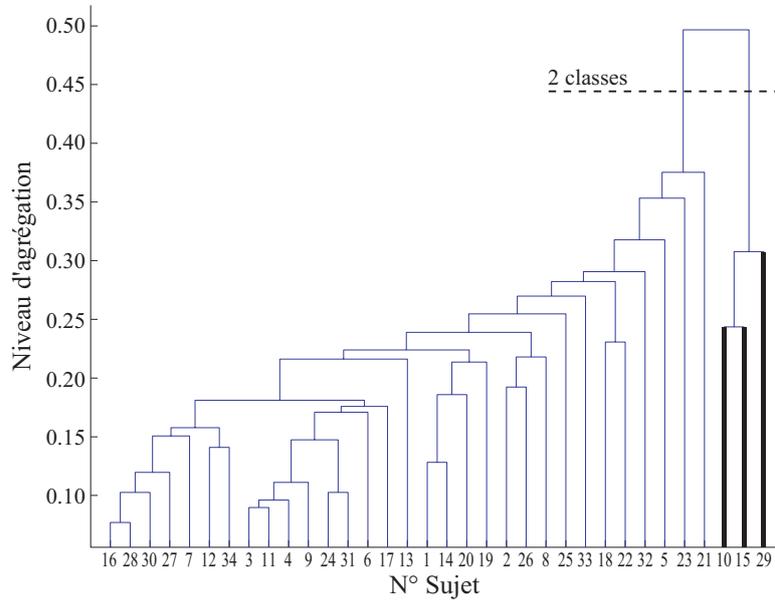


(a) Dendrogramme des sujets. Les sujet jugé comme étant un “outlier” est surligné. La couleur de surlignage respecte la couleur utilisée ci-contre pour repérer la partition pertinente.

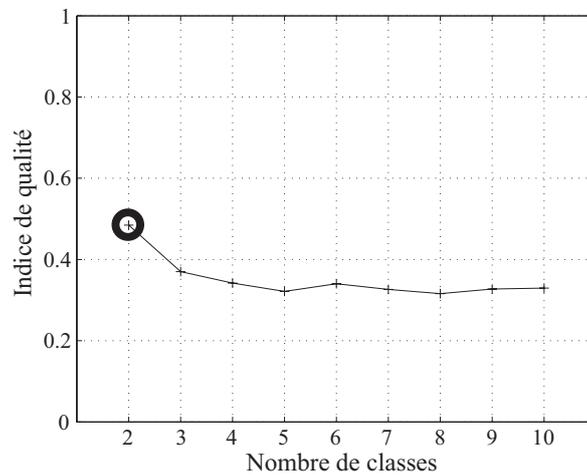
(b) Valeurs de l'indice de qualité exprimées en fonction du nombre de classes. La partition jugée comme pertinente est repérée par un cercle coloré.

FIG. I.20 – Résultats de la Classification Ascendante Hiérarchique réalisée à partir de la matrice de dissemblances \mathbf{D}_1 . Le sujet n°23 est considéré comme un sujet “outlier”, dont les réponses de dissimilarité ne sont pas prises en compte.

I.4.1.2 Jugements de préférence



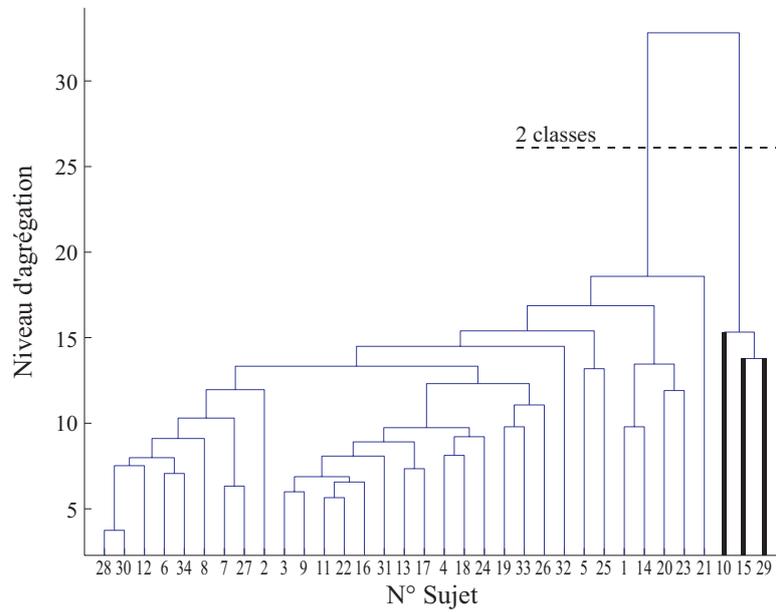
(a) Dendrogramme des sujets. Le sujet jugé comme étant un “outlier” est surligné. La couleur de surlignage respecte la couleur utilisée ci-dessous pour repérer la partition pertinente.



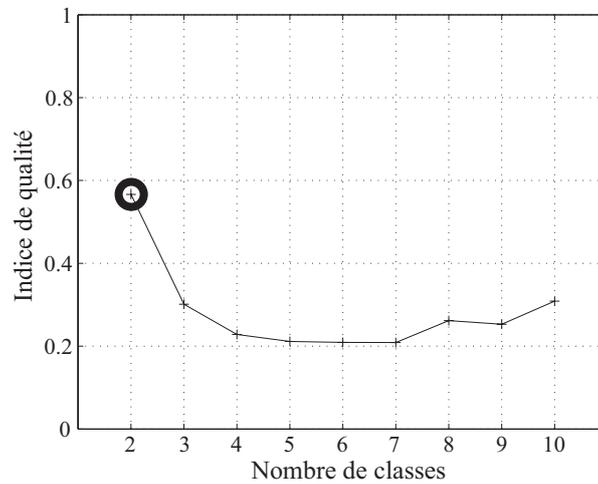
(b) Valeurs de l'indice de qualité exprimées en fonction du nombre de classes. La partition jugée comme pertinente est repérée par un cercle coloré.

FIG. I.21 – Résultats de la Classification Ascendante Hiérarchique appliquée sur la matrice de dissemblances \mathbf{D}_2 .

I.4. Résultats complémentaires relatifs à l'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

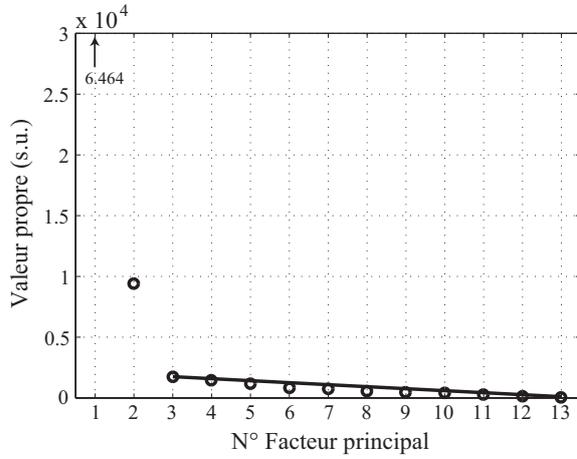


(a) Dendrogramme des sujets. Les sujet jugé comme étant un “outlier” est surligné. La couleur de surlignage respecte la couleur utilisée ci-dessous pour repérer la partition pertinente.

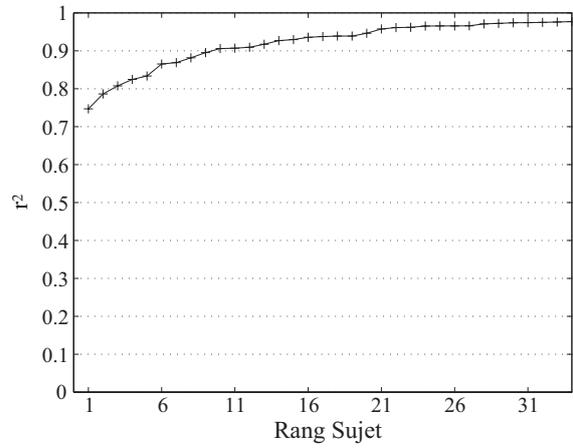


(b) Valeurs de l'indice de qualité exprimées en fonction du nombre de classes. La partition jugée comme pertinente est repérée par un cercle coloré.

FIG. I.22 – Résultats de la Classification Ascendante Hiérarchique appliquée sur la matrice de dissemblances \mathbf{D}_3 .

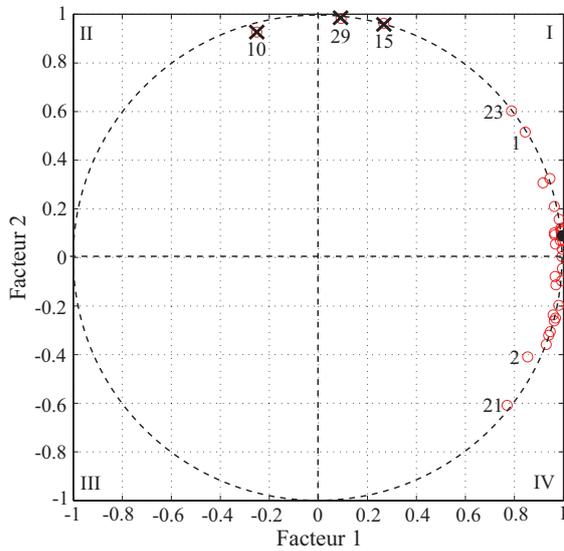


(a) Diagramme des valeurs propres exprimées en fonction du numéro du facteur principal associé.

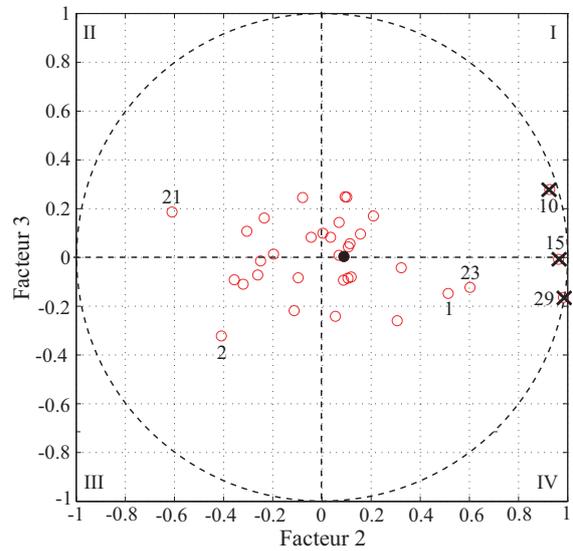


(b) Valeurs du coefficient de corrélation r (élevé au carré) entre les projections des stimuli sur le vecteur sujet 3D et les scores primaires initialement calculés, pour les différents sujets.

FIG. I.23 – Etude de la dimensionnalité de l'espace perceptif de préférence dressé via MDPREF à partir des réponses de tous les sujets. On opte pour une dimensionnalité égale à 3.



(a) Plan factoriel 1-2.



(b) Plan factoriel 2-3.

FIG. I.24 – Bilan des différences inter-individuelles à partir de l'espace perceptif de préférence 3D dressé via MDPREF sur la base des réponses de tous les sujets. \circ : extrémités des vecteurs sujets, \bullet : extrémité du vecteur sujet "moyen". \times : sujets finalement considérés comme des "outliers" après recouplement avec les résultats des deux CAH.

I.4. Résultats complémentaires relatifs à l'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

I.4.2 Établissement des tendances qualitatives approximées

I.4.2.1 Espace perceptif de dissimilarité

I.4.2.1.a Évaluation du niveau réel de la mesure de dissimilarité

r_{bornes}^2	r_{valid}^2
0.999 ($p < .001$)	0.979 ($p < .001$)

TAB. I.2 – Indicateur r_{bornes}^2 du niveau de la mesure et indicateur r_{valid}^2 de la qualité d'ajustement aux données de la méthode des intervalles successifs.

I.4.2.1.b Détermination de la dimensionnalité

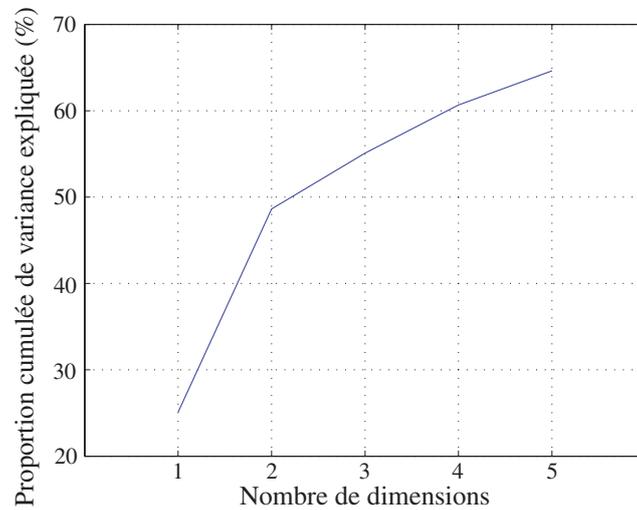


FIG. I.25 – Proportion cumulée de variance expliquée par le modèle INDSCAL en fonction du nombre de dimensions. La dimensionnalité de l'espace est vraisemblablement égale à 2.

I.4.2.1.c Analyse psychoacoustique

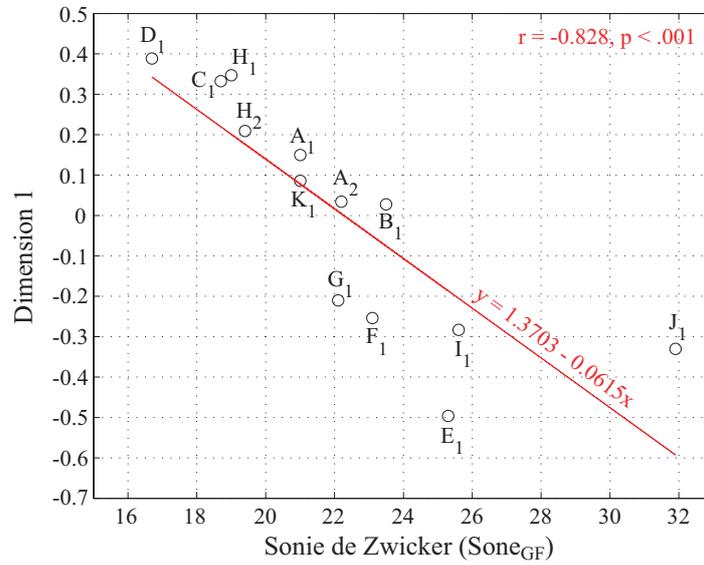


FIG. I.26 – Diagramme des coordonnées des stimuli filtrés modifiés le long de la dimension 1 de l'espace perceptif de dissimilarité approximé exprimées en fonction des valeurs de la sonie de Zwicker calculées sur ces stimuli. — : droite de régression.

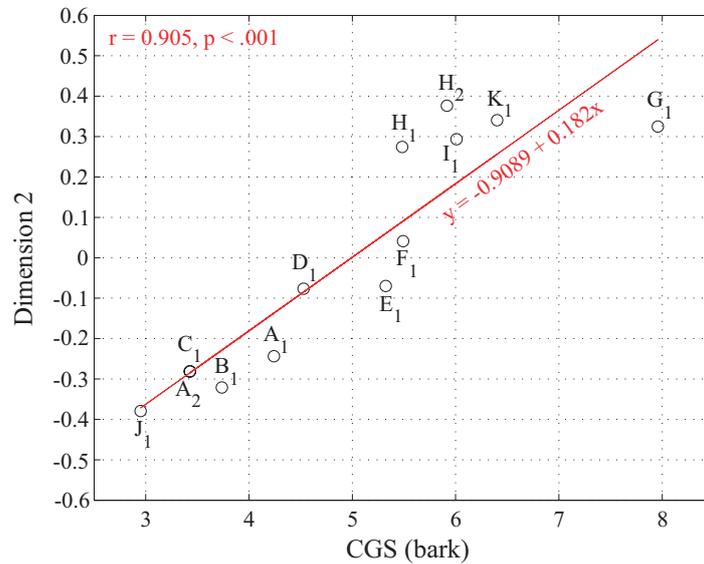


FIG. I.27 – Diagramme des coordonnées des stimuli filtrés modifiés le long de la dimension 2 de l'espace perceptif de dissimilarité approximé exprimées en fonction des valeurs du CGS calculées sur ces stimuli. — : droite de régression.

I.4.2.1.d Confrontation des espaces approximés

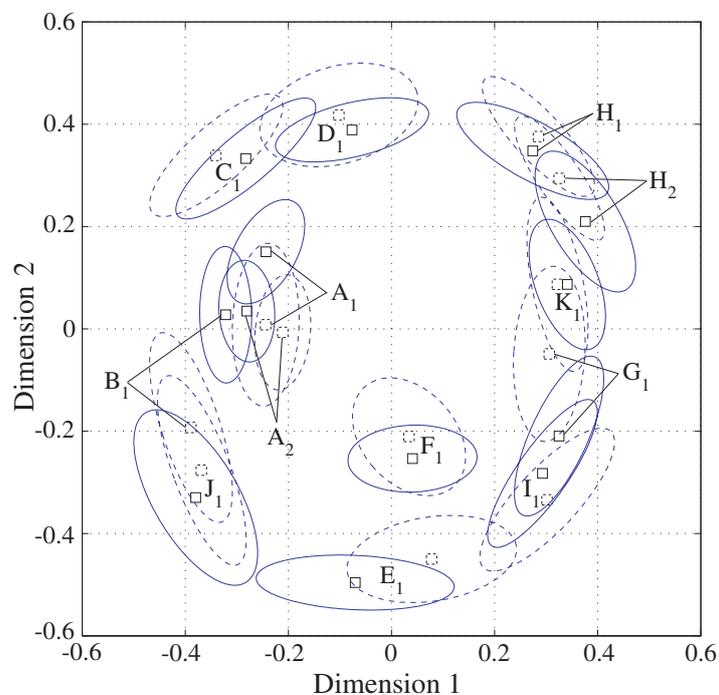
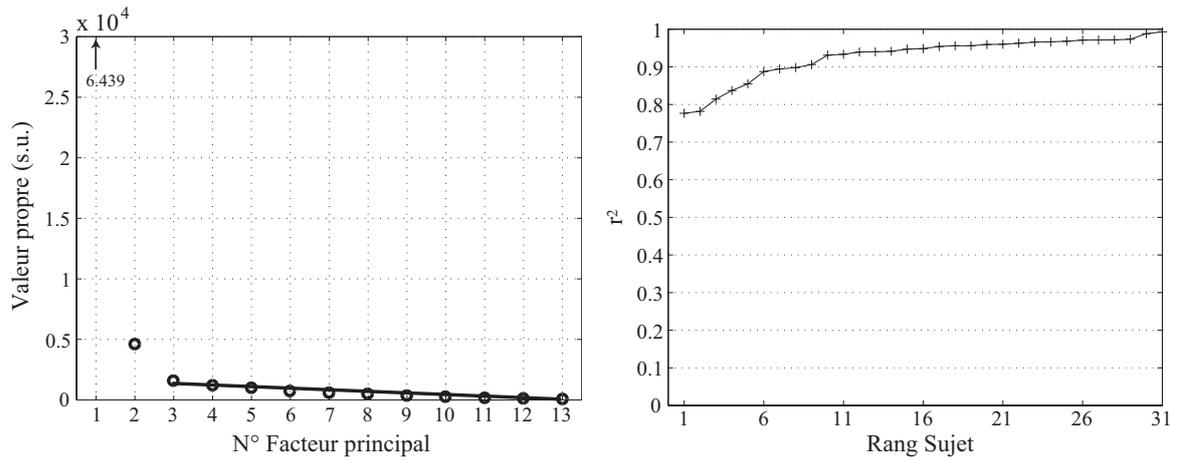


FIG. I.28 – Espace perceptif de dissimilarité 2D des stimuli, dans leur ellipse de confiance à 95%. En traits pleins : configuration approximée obtenue pour les stimuli filtrés modifiés, en traits pointillés : configuration approximée obtenue pour les stimuli filtrés passe-bas à f_{max}^* . Le premier espace approximé a été ajusté au second en appliquant une rotation à 90° dans le sens des aiguilles d'une montre puis une symétrie horizontale. L'adéquation entre les deux espaces est bonne : $r = 0.943$, $p < .001$ entre la dimension 1 de l'espace approximé des stimuli filtrés modifiés et la dimension 2 de l'espace approximé des stimuli filtrés passe-bas à f_{max}^* ; $r = 0.981$, $p < .001$ entre la dimension 2 de l'espace approximé des stimuli filtrés modifiés et la dimension 1 de l'espace approximé des stimuli filtrés passe-bas à f_{max}^* . Toutefois, les deux positions approximées du stimulus B_1 se révèlent ici être différentes, au vu du non-chevauchement de leurs ellipses de confiance respectives.

I.4.2.2 Espace perceptif de préférence

I.4.2.2.a Détermination de la dimensionnalité



(a) Diagramme des valeurs propres exprimées en fonction du numéro du facteur principal associé.

(b) Valeurs du coefficient de corrélation r (élevé au carré) entre les projections des stimuli sur le vecteur sujet 3D et les scores primaires initialement calculés, pour les différents sujets.

FIG. I.29 – Détermination de la dimensionnalité de l'espace perceptif de préférence. Une dimensionnalité égale à 3 apparaît appropriée. Les proportions d'inertie expliquées par les facteurs 1, 2 et 3 sont respectivement égales à 85%, 6% et 2%.

I.4.2.2.b Confrontation des espaces approximés

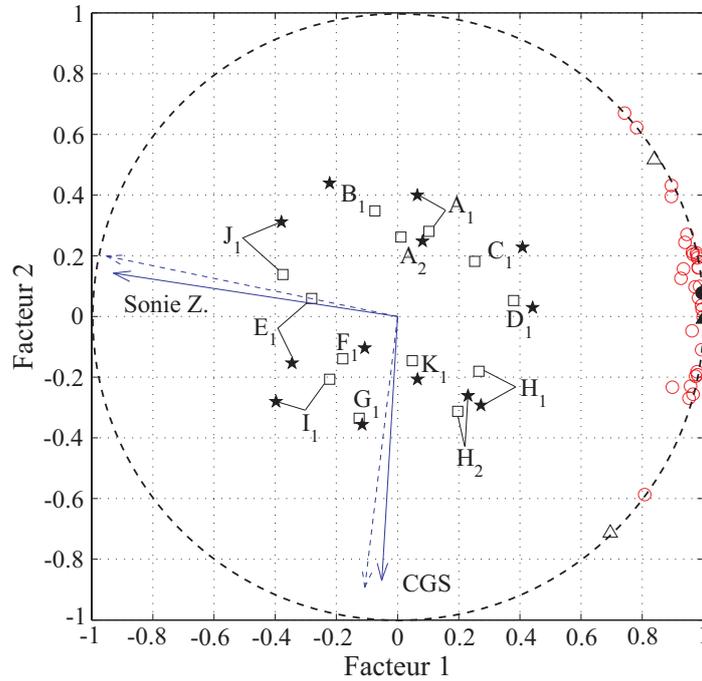


FIG. I.30 – Plan factoriel 1-2 de l'espace perceptif de préférence. \square : stimuli filtrés modifiés, \circ : extrémités des vecteurs sujets approximés obtenus pour une modification avec $\Delta f_p = 4$ Hz, \bullet : extrémité du vecteur sujet “moyen” approximé obtenu pour une modification avec $\Delta f_p = 4$ Hz, \rightarrow : vecteurs métriques approximés obtenus pour une modification avec $\Delta f_p = 4$ Hz, \star : stimuli filtrés passe-bas à f_{max}^* , \triangle : extrémités des vecteurs sujets délimitant le faisceau approximé de vecteurs sujets obtenu pour un filtrage passe-bas à f_{max}^* , \blacktriangle : extrémité du vecteur sujet “moyen” approximé obtenu pour un filtrage passe-bas à f_{max}^* , \dashrightarrow : vecteurs métriques approximés obtenus pour un filtrage passe-bas à f_{max}^* . L'adéquation entre les configurations de stimuli est globalement satisfaisante : après ajustement, $r = 0.962$, $p < .001$ entre les coordonnées des stimuli originaux et filtrés modifiés le long de l'axe 1, $r = 0.944$, $p < .001$ entre leurs coordonnées le long de l'axe 2. Localement, on peut observer pour plusieurs stimuli (notamment E_1 , I_1 et J_1) des écarts entre leurs deux positions approximées.

I.4.2.3 Valeurs de mérite

I.4.2.3.a Qualité d'ajustement du modèle de Thurstone (Cas V) aux données de préférence

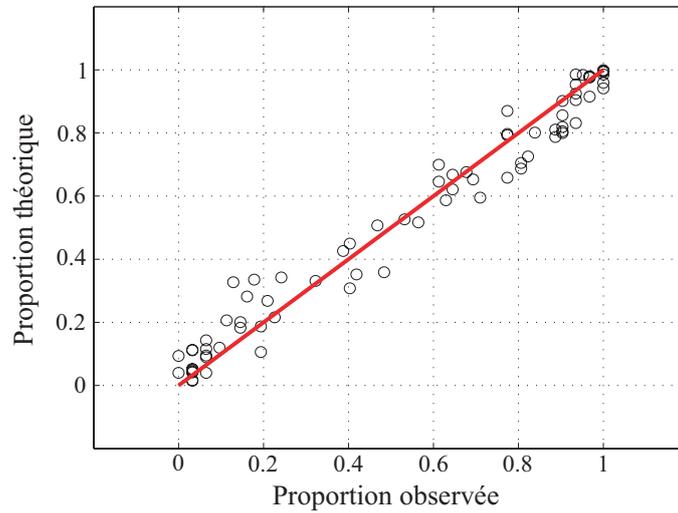


FIG. I.31 – Proportions “théoriques” vs proportions “observées” pour le modèle de Thurstone (*cas V*). Le coefficient de corrélation r^2 entre les deux séries de proportions est égal à 0.972 ($p < .001$).

I.4.2.3.b Construction du modèle de préférence

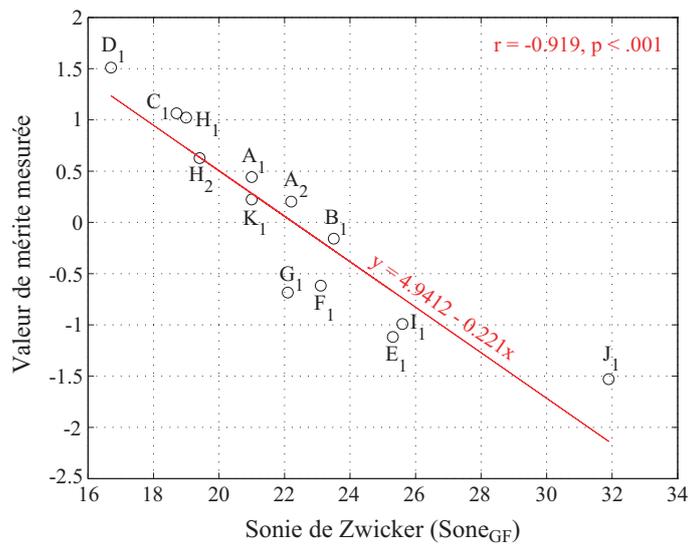


FIG. I.32 – Diagramme des valeurs de mérite mesurées des stimuli filtrés modifiés exprimées en fonction des valeurs de la sonie de Zwicker calculées sur ces stimuli. — : droite de régression.

I.4. Résultats complémentaires relatifs à l'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

I.4.2.3.c Confrontation des valeurs de mérite approximées

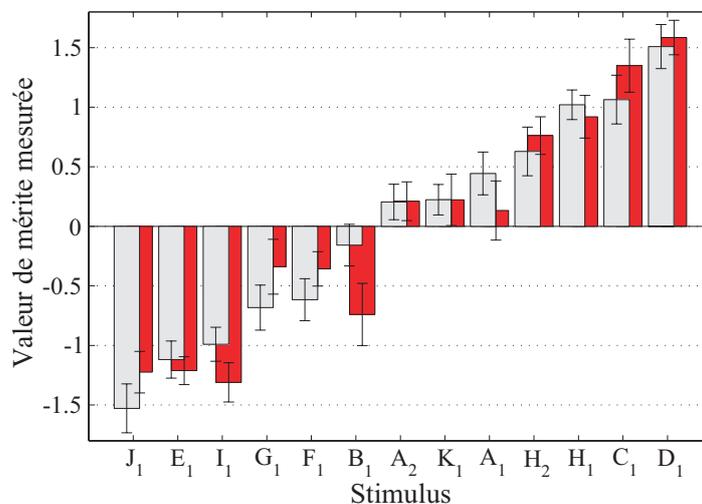


FIG. I.33 – Comparaison des valeurs de mérite mesurées obtenues par les stimuli filtrés modifiés et par les stimuli filtrés passe-bas à f_{max}^* . En gris : valeurs de mérite mesurées obtenues par les stimuli filtrés modifiés, en rouge : valeurs de mérite mesurées obtenues par les stimuli filtrés passe-bas à f_{max}^* , I : intervalle de confiance à 95%. Les deux séries de valeurs de mérite mesurées sont fortement corrélées : $r = 0.958$, $p < .001$.

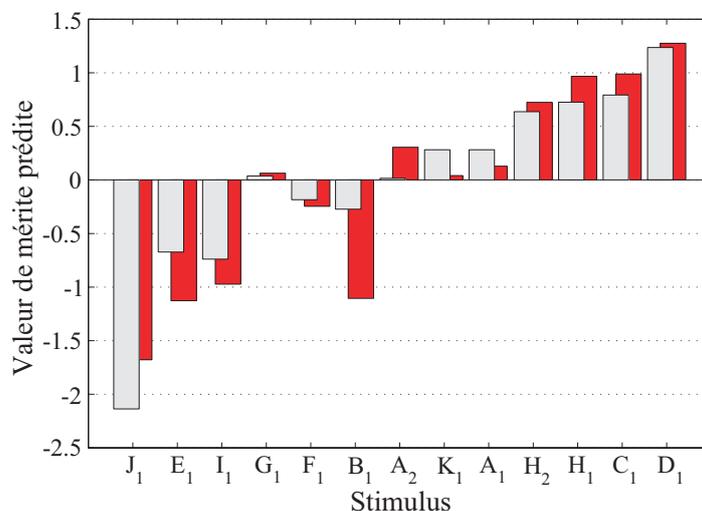


FIG. I.34 – Comparaison des valeurs de mérite prédites obtenues par les stimuli filtrés modifiés et par les stimuli originaux. En gris : valeurs de mérite prédites obtenues par les stimuli filtrés modifiés, en rouge : valeurs de mérite prédites obtenues par les stimuli filtrés passe-bas à f_{max}^* .

Bibliographie

- [AB94] N. Atalla et R. J. Bernhard. Review of numerical solutions for low-frequency structural-acoustic problems. *Applied Acoustics*, 43(3) :271–294, 1994. [4](#), [5](#), [6](#), [8](#), [9](#), [11](#)
- [All93] J.-F. Allard. *Propagation of sound in porous media : Modelling sound absorbing materials*. Elsevier Applied Science, London and New York, 1993. [71](#)
- [Ata01] N. Atalla. *Cours GMC722 : Méthodes numériques en interaction fluide-structure*. Université de Sherbrooke, Sherbrooke, QC, Canada, 2001. [6](#), [7](#)
- [Bon86] C. Bonnet. *Manuel pratique de psychophysique*. Armand Colin, Paris, France, 1986. [107](#), [109](#)
- [Cat66] R. B. Cattell. The scree test for the number of factors. *Multivariate Behavioral Research*, 1 :245–276, 1966. [XVI](#), [145](#)
- [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. [13](#), [18](#)
- [Chi00] O. Chiello. *Application d’une méthode d’éléments finis et d’analyse modale par sous structuration-dynamique à l’étude de l’isolation acoustique en basses fréquences*. PhD thesis, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon (Villeurbanne, France) / Université de Sherbrooke (Sherbrooke, Canada), 2000. [21](#), [22](#), [23](#)
- [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. [31](#)
- [Cor04] Cortex Instruments - 01dB Metravib Technologies. *Manuel d’utilisation de dB Sonic*, 2004. [73](#), [123](#), [124](#)
- [Cra72] A. Craggs. The use of simple three-dimensional acoustic finite elements for determining the natural modes and frequencies of complex shaped enclosures. *Journal of Sound and Vibration*, 23(3) :331–339, 1972. [6](#)

- [CS63] L. H. Chen et D. G. Schweikert. Sound radiation from an arbitrary body. *Journal of Acoustical Society of America*, 35(10) :1626–1632, 1963. [10](#)
- [Dag06] P. Dagnélie. *Statistique théorique et appliquée. 2. Inférence statistique à une et à deux dimensions*. De Boeck Université, Bruxelles, Belgium, 2006. [96](#), [101](#)
- [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. [13](#), [18](#), [53](#)
- [Edw52] A. L. Edwards. The scaling of stimuli by the method of successive intervals. *Journal of Applied Psychology*, 36 :118–122, 1952. [107](#), [108](#), [109](#), [111](#)
- [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. [110](#)
- [Goe04] A. Goepp. Contribution à l'amélioration du confort acoustique d'une salle par la prise en compte des aspects qualitatifs des sons - Relations entre les propriétés acoustiques des matériaux et la perception du son dans une salle. Master's thesis, École Nationale des Travaux Publics de l'État, Vaulx-en-Verin, France, 2004. [71](#), [72](#)
- [Hei88] W. Heinbach. Aurally adequate signal representation : The part-tone-time-pattern. *Acustica*, 67 :113–121, 1988. [123](#), [124](#)
- [How98] D. C. Howell. *Méthodes statistiques en sciences humaines*. Traduit de l'anglais. De Boeck Université, Paris, France, 1998. [96](#), [100](#)
- [ISO01] ISO. *Acoustics - Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes. Part 2 : Transfer-function method. ISO10534*. ISO, Genève, Switzerland, 2001. [69](#)
- [LMSa] LMS International. *SYSNOISE Rev. 5.1 Theoretical manual*. [19](#)
- [LMSb] LMS International. *SYSNOISE Rev. 5.1 Training material*. [19](#)
- [Oln99] X. Olny. *Absorption acoustique des milieux poreux à simple et double porosité : Modélisation et validation expérimentale*. PhD thesis, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Villeurbanne, France, Numéro d'ordre 99 ISAL 0114, 1999. [69](#), [71](#)
- [OSB99] A. V. Oppenheim, R. W. Schaffer, et J. R. Buck. *Discrete-time signal processing*. Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, USA, 1999. [123](#)
- [Par07] R. Parncutt. *Psychoacoustics and music perception [en ligne]*. Disponible sur : <<http://www-gewi.uni-graz.at/staff/parncutt/PSYCHOACOUSTICS.pdf>>, consulté le 12.12.2007. [125](#)

-
- [PB90] 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. [54](#)
- [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. [100](#)
- [Sap90] G. Saporta. *Probabilité, analyse des données et statistique*. Éditions Technip, Paris, France, 1990. [100](#), [103](#)
- [Sch68] H. A. Schenck. Improved integral formulation for acoustic radiation problems. *Journal of the Acoustical Society of America*, 44(1) :41–58, 1968. [10](#)
- [SSRS85] A. F. Seybert, B. Soenarko, F. J. Rizzo, et D. J. Shippy. An advanced computational method for radiation and scattering of acoustic waves in three dimensions. *Journal of the Acoustical Society of America*, 77(2) :362–368, 1985. [10](#)
- [Tea07] APMR’s Team. *Acoustical Porous Material Recipes [en ligne]*. Disponible sur : <<http://apmr.matelys.com>>, consulté le 26.09.2007. [69](#)
- [Ter87] E. Terhardt. Gestalt Principles and music perception. In W. A. Yost et C. S. Watson, éditeurs, *Perception of complex auditory stimuli*, pages 157–166. Erlbaum, Hillsdale, NJ, USA, 1987. [123](#)
- [Ter92] E. Terhardt. From speech to language : On auditory information processing. In M. E. H. Schouten, éditeur, *The auditory processing of speech : From sounds to words*, pages 363–380. Mouton de Gruyter, Berlin, Germany, 1992. [123](#)

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 : 2009-ISAL-0062	
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 HAMZAOUI</p>		
Président du jury :	Étienne PARIZET	
Composition du jury :	Antoine CHAIGNE	Rapporteur
	Nacer HAMZAOUI	Directeur de Thèse
	Catherine MARQUIS-FAVRE	Directrice de Thèse
	Sabine MEUNIER	Membre du jury
	Pascale NEPLE	Invitée
	Reinhard WEBER	Rapporteur