

Evaluation Auditive de Sons Rayonnés par une Plaque Vibrante à l'Intérieur d'une Cavité Amortie : Ajustement du Pas Fréquentiel du Calcul Vibro-acoustique

Arnaud Trollé, Catherine Marquis-Favre, Nacer Hamzaoui, Delphine Bard

▶ **To cite this version:**

Arnaud Trollé, Catherine Marquis-Favre, Nacer Hamzaoui, Delphine Bard. Evaluation Auditive de Sons Rayonnés par une Plaque Vibrante à l'Intérieur d'une Cavité Amortie : Ajustement du Pas Fréquentiel du Calcul Vibro-acoustique. 10ème Congrès Français d'Acoustique, Apr 2010, Lyon, France. hal-00538356

HAL Id: hal-00538356
https://hal.science/hal-00538356

Submitted on 22 Nov 2010

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

10ème **C**ongrès **F**rançais d'**A**coustique

Lyon, 12-16 Avril 2010

Évaluation Auditive de Sons Rayonnés par une Plaque Vibrante à l'Intérieur d'une Cavité Amortie : Ajustement du Pas Fréquentiel du Calcul Vibro-acoustique

Arnaud Trollé[1], Catherine Marquis-Favre[2], Nacer Hamzaoui[3], Delphine Bard[1]

[1] Division of Engineering Acoustics, Lund University, John Ericssons väg 1, SE-22100 Lund, arnaud_trolle@yahoo.fr, Delphine.Bard@acoustics.lth.se

[2] Département Génie Civil et Bâtiment, École Nationale des Travaux Publics de l'État, Rue Maurice Audin, F-69518 Vaulx-En-Velin Cedex, Catherine.MARQUIS@entpe.fr

[3] Laboratoire Vibrations Acoustique, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Bâtiment St. Exupéry, 25 Bis Avenue Jean Capelle, F-69621 Villeurbanne Cedex, Nacer.Hamzaoui@insa-lyon.fr

La problématique d'ajustement des efforts de calcul vibro-acoustique se pose lorsque que l'on souhaite mener à partir de simulations vibro-acoustiques une étude paramétrique sur un système physique qui prenne en compte les aspects qualitatifs des sons rayonnés ; il est nécessaire de définir les paramètres de simulation de telle manière à i) réduire ces efforts de calcul, et ii) répondre aux contraintes perceptives. Précédemment, nous avons abordé l'ajustement des efforts de calcul dans le cadre de l'évaluation des effets de la variation de paramètres structuraux d'un système plaque-cavité (absorption de la cavité, épaisseur et conditions de serrage de la plaque) sur la perception des sons rayonnés à l'intérieur de la cavité. Considérant des sons stationnaires, l'ajustement a porté sur un premier paramètre de calcul fréquentiel important, la fréquence maximale. Nous procédons maintenant à l'ajustement d'un second paramètre de calcul important, le pas fréquentiel, en travaillant à partir des sons réels filtrés passe-bas à 2500 Hz (la fréquence maximale ajustée). La définition du pas fréquentiel lors de simulations vibro-acoustiques influe sur l'enveloppe spectrale des sons synthétisés ; aussi, nous procédons à une modification de l'enveloppe spectrale des sons réels de façon à simuler l'enveloppe de spectres des sons synthétisés qui seraient calculés avec un pas fréquentiel donné. Alors, le processus d'ajustement consiste à déterminer un pas fréquentiel pour lequel les tendances qualitatives issues de l'évaluation auditive du corpus des sons réels modifiés restent analogues à celles issues de l'évaluation auditive des sons réels originaux. Notamment, relativement au classement des stimuli selon la préférence, nous cherchons à ce que i) les premières places restent inchangées (i.e. les liens précédemment établis avec le design structural du système plaque-cavité soient respectés), et ii) la qualité d'ajustement du modèle de préférence, basé sur les valeurs de la même métrique, ne soit pas détériorée.

1 Introduction

Dans divers secteurs industriels (automobile, électroménager, etc.), de plus en plus de manufacturiers cherchent à améliorer la qualité sonore de leur produit. À cet effet, ils planifient une étude qualitative des sons émis par leur produit, dès le stade de sa conception. La problématique consiste généralement à déterminer un design structural du produit qui permette d'améliorer sa qualité sonore. Les investigations recourent typiquement à des évaluations auditives basées sur des méthodes psychométriques pour mesurer la qualité sonore de plusieurs modèles du produit différant structurellement. L'adoption d'une telle démarche s'est montrée efficace pour améliorer le confort acoustique d'un produit (e.g. [1]).

En se calquant sur cette démarche, des travaux académiques se sont intéressés à évaluer l'influence de la variation de paramètres physiques de divers systèmes vibro-acoustiques simples sur la perception des sons qu'ils génèrent. Au rang des systèmes étudiés, figurent notamment la barre [2], la plaque seule baffl ée [3, 5, 4, 6], et la plaque couplée à une cavité parallélépipédique [7, 8]. Leur comportement vibro-acoustique étant bien connu et maîtrisé, les auteurs ont pu — en couplant vibro-acoustique et psychoacoustique — examiner précisément les relations entre des paramètres physiques des systèmes et les attributs auditifs des sons générés. Leurs résultats se sont avérés utiles afin de dresser des recommandations à même d'améliorer la qualité sonore des systèmes vibro-acoustiques dès l'étape de leur conception, alors que ces systèmes constituent les éléments de base des structures que l'on retrouve dans les domaines des transports et du bâtiment.

Par ailleurs, à l'étape de la conception, la priorité est fréquemment donnée — pour des raisons de flexibilité et de coût — aux simulations vibro-acoustiques pour mener l'étude paramétrique sur le système physique. Aussi, une nouvelle problématique se pose lorsque

l'on souhaite conduire une étude de qualité sonore à partir de sons synthétisés : comment définir les paramètres de simulation en conséquence ? Les exigences peuvent varier suivant l'approche de la qualité sonore qui est adoptée, avec toutefois une contrainte pratique invariante : le caractère raisonnable des efforts de calcul vibro-acoustique engendrés. Au minimum, on devra procéder à une définition des paramètres de simulation telle que l'on puisse établir à partir de l'évaluation de sons synthétisés des recommandations relatives au design structural du système fidèles à celles qui seraient établies à partir de l'évaluation de sons réels.

Pour le cas académique d'une plaque couplée à une cavité amortie, ces travaux abordent la problématique d'ajustement des efforts de calcul vibro-acoustique vis-à-vis d'une étude de qualité sonore recourant à l'utilisation de sons synthétisés, suivant l'approche mentionnée au paragraphe précédent.

Nous considérons une source mécanique stationnaire avec un spectre large bande de type bruit rose ; ce spectre se rapproche de celui de sources de bruit environnemental. Dans le cas d'excitations stationnaires, la réponse vibro-acoustique d'un système est fréquemment calculée dans le domaine fréquentiel. À cet effet, le recours à des méthodes numériques d'éléments finis (FEM) ou d'éléments de frontière (BEM) est courant. Dans le cadre d'utilisation de méthodes de calcul fréquentiel, les efforts de calcul vibro-acoustique apparaissent comme intimement liés aux valeurs prises par deux paramètres de calcul importants : la fréquence maximale et le pas fréquentiel. D'un point de vue perceptif, la définition de la fréquence maximale détermine l'étendue du contenu fréquentiel des sons synthétisés ; la définition du pas fréquentiel influe sur leur enveloppe spectrale. Notre objectif est de déterminer des valeurs appropriées pour ces deux paramètres, pour lesquelles les tendances qualitatives dressées à partir de l'évaluation auditive respectivement de sons synthétisés et de sons réels restent analogues.

Une première étape a consisté à établir des tendances qualitatives de référence, à partir de l'évaluation auditive de sons réels. Pour former le corpus de sons réels, une expérimentation sur un banc d'essai plaque-cavité a été menée ; les sons réels correspondent au son rayonné par la plaque vibrante à l'intérieur de la cavité, enregistré dans différentes configurations structurales du système expérimental. Les paramètres structuraux variables du système plaque-cavité étaient : les propriétés en absorption de la cavité, l'épaisseur et les conditions de serrage de la plaque. L'évaluation auditive, fondée sur la méthode de comparaison par paires, demande à prononcer des jugements de dissimilarité et de préférence. Il a été ainsi possible d'extraire des tendances qualitatives, i.e. des informations sur la manière dont les variations structurales influencent la perception auditive et sur les configurations structurales préférées par les auditeurs.

Puis, dans une seconde étape, il a été procédé à l'ajustement de la fréquence maximale. À cet effet, nous nous sommes proposés de travailler à partir des sons réels, plutôt qu'à partir de sons synthétisés, et ce afin de s'affranchir d'autres approximations telles que celles liées à la modélisation du système.

Ces deux premières étapes sont détaillées dans la référence [9]. Dans une troisième étape, nous procédons maintenant à l'ajustement du pas fréquentiel de calcul, en travaillant à partir des sons réels filtrés passe-bas à 2500 Hz (la fréquence maximale ajustée). Nous procédons à une modification de l'enveloppe spectrale des sons réels de façon à simuler l'enveloppe des spectres des sons synthétisés qui seraient calculés avec un pas fréquentiel donné. Alors, le processus d'ajustement consiste à déterminer un pas fréquentiel pour lequel les tendances qualitatives issues de l'évaluation auditive des sons réels modifiés restent analogues à celles issues de l'évaluation auditive des sons réels originaux.

Dans une première section (Cf. section 2), sera abordée, pour rappel, l'élaboration du corpus de sons réels via l'expérimentation sur le banc d'essai plaque-cavité. Puis, dans une seconde section (Cf. section 3), il sera question de l'ajustement du pas fréquentiel Δf proprement dit ; la mise en oeuvre des tests d'écoute sera abordée dans un premier temps (Cf. section 3.1), puis on procédera à la confrontation des tendances qualitatives (Cf. section 3.2), à la suite de laquelle on pourra statuer quant à l'efficience de l'ajustement réalisé.

2 Élaboration du corpus de sons réels via l'expérimentation

2.1 Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental est détaillé dans la référence [9]. Pour l'essentiel, les dimensions $L_x \times L_y \times L_z$ de la cavité d'air parallélépipédique sont égales à $0.6 \times 0.5 \times 0.7$ m. Cinq faces de la cuve sont constituées de béton d'épaisseur 0.1 m. La face supérieure est composée d'une plaque en acier ; sa surface vibrante est égale à $L_x \times L_y$. La plaque est serrée sur son contour entre deux mors en acier vissés dans la cuve en béton. La plaque est excitée par un pot vibrant.

2.2 Plan expérimental

Trois paramètres structuraux variables sont sélectionnés : l'épaisseur et les conditions de serrage de la plaque, les propriétés en absorption de la cavité. Trois modalités sont assignées à chaque paramètre structural (Cf. table 1). Les modalités pour l'épaisseur de la plaque (α) correspondent à des épaisseurs d'acier communément disponibles dans le commerce. Les modalités pour les propriétés en absorption de la cavité (β) résultent du positionnement (ou non) de matériaux sur la face inférieure de la cavité. Les modalités pour les conditions de serrage de la plaque (γ) correspondent à différentes valeurs fixées du couple de serrage C.

Neuf configurations, impliquant différentes combinaisons des modalités des paramètres, sont définies à l'aide d'une table de Taguchi L_9 [10] (labels "A" à "I" dans la table 2). Deux configurations additionnelles (labels "J" et "K" dans la table 2) sont ajoutées pour disposer d'un nombre plus substantiel de stimuli.

2.3 Mesures acoustiques

Pour chaque configuration (A à K), le son rayonné par la plaque vibrante est enregistré simultanément en

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

Tab. 1: Description des modalités des paramètres structuraux.

Label	Paramètre structural			Stimuli associés
	α	β	γ	
A	1	1	1	A_1, A_2
B	1	2	2	B_1
C	1	3	3	C_1
D	2	3	1	D_1
E	2	1	2	E_1
F	2	2	3	F_1
G	3	2	1	G_1
H	3	3	2	H_1, H_2
I	3	1	3	I_1
J	1	1	3	J_1
K	3	3	3	K_1

Tab. 2: Les différentes configurations du système plaque-cavité et les stimuli associés.

deux points de réception intérieurs à la cavité à l'aide de deux microphones B&K 1/2" omnidirectionnels [9]. Notons qu'un second enregistrement a été réalisé pour les configurations A et H. Des échantillons de 4 secondes sont extraits des séquences sonores enregistrées ; ces échantillons constituent les stimuli présentés lors des tests d'écoute. Tous les échantillons sonores sont corrigés par la fonction de transfert inverse du casque utilisé pour la reproduction sonore. La désignation des stimuli ainsi formés est donnée dans la table 2.

3 Ajustement du pas fréquentiel de calcul Δf

L'ajustement de Δf est réalisé en prenant en compte les résultats de l'ajustement de la fréquence maximale f_{max} des sons [9]. En effet, les stimuli présentés lors des différents tests d'écoute mis en œuvre au travers de la démarche proposée sont par défaut filtrés passe-bas à la fréquence maximale ajustée $f^*_{max} = 2500\,\text{Hz}$.

3.1 Mise en œuvre des tests d'écoute

3.1.1 Stimuli

La référence [11] détaille le procédé utilisé pour former des stimuli filtrés passe-bas à f^*_{max} dont l'enveloppe spectrale calque l'enveloppe de spectres de stimuli synthétisés qui seraient calculés jusqu'à la fréquence maximale ajustée f^*_{max} et avec un pas fréquentiel Δf donné. Dans ce qui suit, nous emploierons souvent l'expression "stimuli filtrés modifiés" pour désigner des stimuli filtrés passe-bas à f^*_{max} dont l'enveloppe spectrale aura été modifiée. Une phase d'expérimentation perceptive préliminaire a permis d'orienter le processus d'ajustement vers 2 valeurs de Δf, potentiellement optimales : $\Delta f_1 = 4\,\text{Hz}$ et $\Delta f_2 = 2\,\text{Hz}$ [11]. Pour chacune, une série de 13 stimuli filtrés modifiés est constituée en utilisant le procédé évoqué ci-avant. Chaque série fait indépendamment l'objet d'un test d'écoute.

3.1.2 Appareillage

Pour chaque test d'écoute, la restitution sonore est assurée via un casque ouvert (Sennheiser HD600 / Sennheiser HD650) et une carte son haute qualité. Le niveau de reproduction moyen est égal à 72 dB(A).

3.1.3 Participants

Trente-quatre sujets (12 femmes et 22 hommes), âgés de 20 à 65 ans, ont participé au test d'écoute portant sur la série de stimuli filtrés modifiés avec $\Delta f_1 = 4\,\text{Hz}$. Ces auditeurs sont des étudiants et personnels de l'ENTPE.

Trente sujets (6 femmes et 24 hommes), âgés de 20 à 60 ans, ont participé au test d'écoute portant sur la série de stimuli filtrés modifiés avec $\Delta f_2 = 2\,\text{Hz}$. Ces auditeurs sont des étudiants et personnels de l'université de Lund.

3.1.4 Procédure de test

La procédure de test est similaire à celle suivie par Faure et Marquis-Favre [5] ; ainsi, seules les caractéristiques-clés sont abordées ici.

Les stimuli sont soumis par paires aux auditeurs à qui il est demandé d'évaluer la dissimilarité entre les 2 stimuli sur une échelle numérique à 7 catégories, allant de "0" (labellisée "très similaires") à "6" (labellisée "très différents") et d'indiquer le stimulus qu'ils préfèrent (choix dichotomique).

3.1.5 Analyses

Analyse des données de dissimilarité L'algorithme d'échelonnement multidimensionnel INDSCAL [12] est utilisé pour construire l'espace perceptif des stimuli à partir des données de dissimilarité collectées. L'espace perceptif montre les distances perceptives existant entre les stimuli. Des ellipsoïdes de confiance à 95% sont calculées sur les positions des stimuli dans l'espace perceptif, en utilisant la technique du bootstrap avec 250 tirages [13].

Les axes de l'espace perceptif se rapportent aux attributs auditifs saillants dont la variation parmi les stimuli a probablement mené les auditeurs à les différencier. Une écoute attentive des stimuli triés suivant leurs coordonnées respectives le long de chaque dimension perceptive permet d'identifier ces attributs auditifs [14]. Puis, une analyse des corrélations entre les valeurs de métriques psychoacoustiques et les coordonnées des stimuli le long de chaque dimension est réalisée afin de corroborer les attributs précédemment révélés.

Analyse des données de préférence Les données de préférence sont traitées en utilisant le *Cas V* de la loi du jugement comparatif de Thurstone afin de produire des valeurs de mérite pour tous les stimuli [15]. Des intervalles de confiance à 95% sont calculés sur ces valeurs de mérite en utilisant la technique du bootstrap avec 250 tirages. Cette analyse permet de dresser un classement des stimuli selon la préférence, utile pour identifier les configurations structurales les plus à même d'améliorer la qualité des sons à l'intérieur de la cavité. Un autre objectif est de fournir un modèle de préférence capable de prédire les valeurs de mérite mesurées. Ce modèle est construit à partir de la régression linéaire entre les valeurs de mérite mesurées et les valeurs de métriques pertinentes.

3.2 Confrontation des tendances qualitatives

L'ajustement de Δf, tout comme précédemment l'ajustement de f_{max}, est réalisé avec l'objectif de préserver en premier lieu les tendances qualitatives originales[1] afférentes aux valeurs de mérite [9].

Aussi, lors de la confrontation des tendances qualitatives approximées[2] et originales afférentes aux valeurs de mérite, nous souhaitons remplir les deux critères suivants afin de décréter leur "bonne adéquation" :

i) Les premières places du classement de préférence (les sons préférés, i.e. les configurations structurales du système plaque-cavité préférées) sont inchangées.
ii) La métrique sur laquelle se base le modèle de préférence reste la même et la qualité d'ajustement du modèle de régression linéaire n'est pas détériorée.

Ci-après, la confrontation des tendances qualitatives commence par la comparaison entre les espaces perceptifs (Cf. section 3.2.1), et se poursuit avec la comparaison entre les valeurs de mérite (Cf. section 3.2.2), qui nous intéresse plus particulièrement eu égard des éléments mentionnés ci-avant.

3.2.1 Espaces perceptifs

Pour chacune des deux séries de stimuli filtrés modifiés, les données de dissimilarité ont été échelonnées dans un espace perceptif à deux dimensions.

[1]Dressées à partir de l'évaluation auditive des sons réels originaux, i.e. non filtrés passe-bas et non modifiés.

[2]Dressées à partir de l'évaluation auditive des sons réels filtrés modifiés.

La figure 1 porte à la comparaison l'espace perceptif des stimuli filtrés modifiés avec $\Delta f_1 = 4$ Hz (tracé en traits pleins) et l'espace perceptif des stimuli originaux (tracé en traits pointillés). De même, la figure 2 porte à la comparaison l'espace perceptif des stimuli filtrés modifiés avec $\Delta f_2 = 2$ Hz (tracé en traits pleins) et l'espace perceptif des stimuli originaux (tracé en traits pointillés). Cette dernière comparaison implique au préalable, pour l'espace approximé, une rotation à 90° dans le sens des aiguilles d'une montre puis une symétrie par rapport à l'axe horizontal.

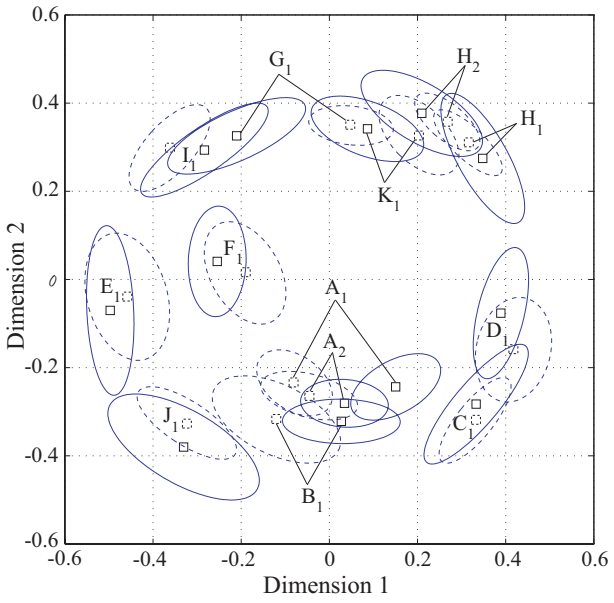


FIG. 1: Espace perceptif de dissimilarité 2D des stimuli, dans leur ellipse de confiance à 95%. En traits pleins : configuration approximée obtenue pour les stimuli filtrés modifiés avec $\Delta f_1 = 4$ Hz, en traits pointillés : configuration originale.

L'adéquation entre l'espace des stimuli filtrés modifiés avec $\Delta f_1 = 4$ Hz et l'espace original s'avère satisfaisante ($r = 0.911$, $p < .001$ entre les dimensions 1 des espaces original et approximé ; $r = 0.992$, $p < .001$ entre les dimensions 2). Toutefois, on peut noter que les positions approximée et originale des stimuli A_1 et G_1 apparaissent différentes au vu de l'absence de chevauchement de leurs ellipses de confiance à 95 % respectives.

L'adéquation entre l'espace des stimuli filtrés modifiés avec $\Delta f_2 = 2$ Hz et l'espace original peut apparaître également comme satisfaisante ($r = 0.969$, $p < .001$ entre la dimension 1 de l'espace original et la dimension 2 de l'espace approximé ; $r = 0.985$, $p < .001$ entre la dimension 2 de l'espace original et la dimension 1 de l'espace approximé). Un bémol cependant : les ellipses de confiance calculées sur les positions des stimuli filtrés modifiés sont substantielles.

À l'instar de l'espace original, l'une des dimensions perceptives des espaces approximés est reliée à la sonie ($r = -0.828$, $p = 0.001$ entre la dimension 1 de l'espace des stimuli filtrés modifiés avec $\Delta f_1 = 4$ Hz et la sonie de Zwicker, $r = -0.875$, $p < 0.001$ entre la dimension 2 de l'espace des stimuli filtrés modifiés avec $\Delta f_2 = 2$ Hz et la sonie de Zwicker) ; l'autre dimension perceptive est reliée à la balance spectrale ($r = 0.905$, $p < .001$ entre la

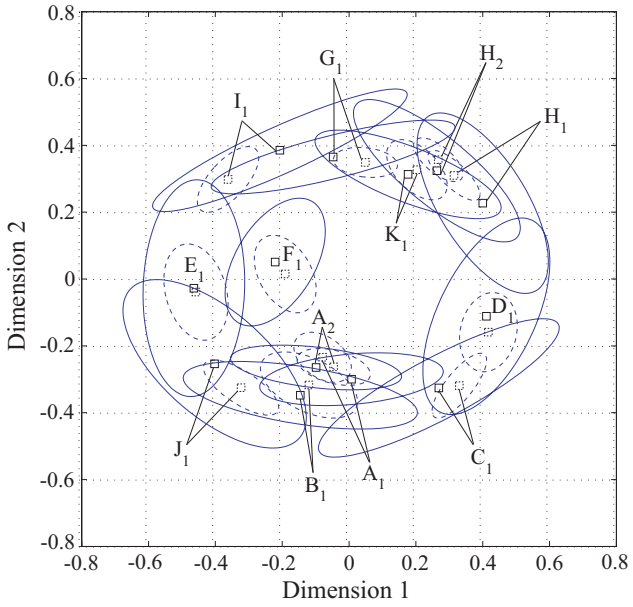


FIG. 2: Espace perceptif de dissimilarité 2D des stimuli, dans leur ellipse de confiance à 95%. En traits pleins : configuration approximée obtenue pour les stimuli filtrés modifiés avec $\Delta f_2 = 2$ Hz, en traits pointillés : configuration originale.

dimension 2 de l'espace des stimuli filtrés modifiés avec $\Delta f_1 = 4$ Hz et le Centre de Gravité Spectral, $r = 0.902$, $p < 0.001$ entre la dimension 1 de l'espace des stimuli filtrés modifiés avec $\Delta f_2 = 2$ Hz et le CGS). Concernant l'espace des stimuli filtrés modifiés avec $\Delta f_2 = 2$ Hz, notons que l'analyse psychoacoustique des dimensions perceptives est teintée d'incertitude en raison de la taille importante des ellipses de confiance.

3.2.2 Valeurs de mérite

Les figures 3 et 4 montrent les valeurs de mérite mesurées des stimuli filtrés modifiés respectivement avec $\Delta f_1 = 4$ Hz et $\Delta f_2 = 2$ Hz (en gris), classées par ordre croissant. Les valeurs de mérite mesurées des stimuli originaux sont également reportées sur les figures 3 et 4 (en rouge).

Les valeurs de mérite mesurées des stimuli filtrés modifiés avec $\Delta f_1 = 4$ Hz et $\Delta f_2 = 2$ Hz sont corrélées avec les valeurs de mérite des stimuli originaux (respectivement $r = 0.918$, $p < .001$ et $r = 0.911$, $p < .001$).

Au travers des deux classements approximés, on n'observe pas de modification significative de rang d'un stimulus par rapport au classement original[3]. Notamment, le groupe des configurations structurales avec les plus fortes propriétés en absorption de la cavité, en tête du classement original, est conservé, i.e. le premier critère de préservation des tendances qualitatives relatives aux valeurs de mérite est rempli.

En outre, la table 3 affiche la qualité d'ajustement (exprimée en termes de proportion de variance expliquée, i.e. r^2) du modèle de préférence original et

[3]Pour juger d'une telle modification, on procède indépendamment à l'étude des intervalles de confiance à 95% calculés sur les valeurs de mérite originales et à l'étude des intervalles de confiance à 95% calculés sur les valeurs de mérite approximées.

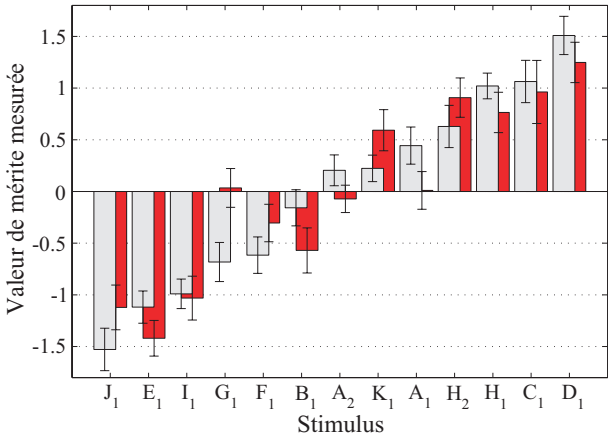


FIG. 3: Confrontation des valeurs de mérite mesurées des stimuli filtrés modifiés avec $\Delta f_1 = 4$ Hz aux valeurs de mérite mesurées des stimuli originaux. En gris : valeurs de mérite mesurées des stimuli filtrés modifiés, en rouge : valeurs de mérite mesurées des stimuli originaux, I : intervalle de confiance à 95%.

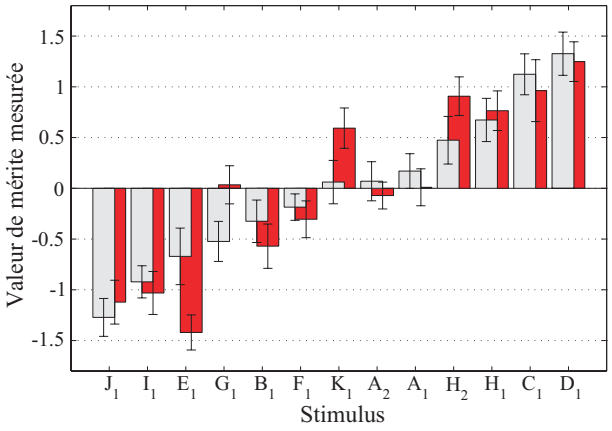


FIG. 4: Confrontation des valeurs de mérite mesurées des stimuli filtrés modifiés avec $\Delta f_2 = 2$ Hz aux valeurs de mérite mesurées des stimuli originaux. En gris : valeurs de mérite mesurées des stimuli filtrés modifiés, en rouge : valeurs de mérite mesurées des stimuli originaux, I : intervalle de confiance à 95%.

des modèles de préférence approximés. Les modèles approximés sont construits à partir de la régression linéaire entre les valeurs de la sonie de Zwicker (la métrique utilisée pour la construction du modèle original) calculées sur les sons filtrés modifiés correspondants et les valeurs de mérite de ces mêmes sons. La qualité d'ajustement des modèles de préférence approximés est inférieure à celle du modèle original ; la qualité d'ajustement est plus faible pour $\Delta f_2 = 2$ Hz. Au final, que ce soit pour l'une ou l'autre des valeurs de Δf testées, on ne peut arguer que le second critère de préservation des tendances qualitatives relatives aux valeurs de mérite est ici pleinement satisfait.

4 Conclusion

En travaillant à partir des sons réels filtrés passe-bas à 2500 Hz (la fréquence maximale ajustée), le processus d'ajustement du pas fréquentiel Δf a consisté à

Δf (Hz)	Qualité d'ajustement	
	r^2	p
0.25[†]	0.93	$< .001$
4	0.84	$< .001$
2	0.71	$< .001$

[†]valeur de référence.

TAB. 3: Comparaison de la qualité d'ajustement, en termes de proportion de variance expliquée, du modèle de préférence original et des modèles de préférence approximés construits pour les deux valeurs de Δf testées.

déterminer une valeur pour laquelle les tendances qualitatives approximées relatives aux valeurs de mérite — issues de l'évaluation auditive d'un corpus de sons réels filtrés et modifiés — restent analogues aux originales. Deux valeurs pré-selectionnées du pas fréquentiel Δf ont été testées : $\Delta f_1 = 4\,\text{Hz}$ et $\Delta f_2 = 2\,\text{Hz}$. Deux tests d'écoute ont été indépendamment réalisés.

La confrontation des deux classements de préférence approximés au classement original a montré que i) le premier critère de conservation des tendances qualitatives relatives aux valeurs de mérite — la préservation des premières places du classement de préférence — était satisfait, ii) le second critère de conservation des tendances qualitatives relatives aux valeurs de mérite — la préservation de la qualité d'ajustement du modèle de préférence basé sur la sonie de Zwicker — n'était cependant pas vérifié de manière satisfaisante. En outre, on aura pu remarquer que, dans leur ensemble, les tendances qualitatives dressées à partir de l'évaluation auditive des sons filtrés modifiés avec $\Delta f_2 = 2\,\text{Hz}$ étaient moins similaires aux tendances qualitatives originales que ne l'étaient les tendances qualitatives dressées à partir de l'évaluation auditive des sons filtrés modifiés avec $\Delta f_1 = 4\,\text{Hz}$. Ces résultats peuvent paraître surprenants puisque Δf_2 est plus proche du pas fréquentiel du spectre des sons originaux, i.e. 0.25 Hz. Les deux tests d'écoute sont réalisés dans les mêmes conditions, excepté que le panel d'auditeurs change d'un test d'écoute à l'autre ; ce changement a pu compromettre l'issue du processus d'ajustement, mais rien n'est moins sûr en l'absence d'investigation complémentaire.

En l'état, il est à retenir qu'un pas fréquentiel Δf égal à 4 Hz serait suffisant pour faire émerger les configurations structurales préférées et permettrait de réduire considérablement les temps de calcul (nombre de points de calcul divisé par 8, par rapport à un pas fréquentiel original égal à 0.25 Hz).

Références

[1] Widmann U., "Three application examples for sound quality design using psychoacoustic tools", *Acta Acustica united with Acoustica* 83, 819-826 (1997).

[2] McAdams S., Chaigne A., Roussarie V., "The psychomenachics of simulated sound sources : Material properties of impacted bars", *Journal of the Acoustical Society of America* 115, 1306-2130 (2004).

[3] Canévet G., Habault D., Meunier S., Demirdjian F., "Auditory perception of sounds radiated by a fluid-loaded vibrating plate excited by a transient point force", *Acta Acustica united with Acustica* 90, 181-193 (2004).

[4] Hamzaoui N., Sandier C., Parizet E., Wetta P., Besseyrias C., "Subjective assessments of the acoustic radiation from steel structures : some effects of a few parametric variations", *Proceedings of Forum Acusticum*, Séville, Espagne, Septembre 2002, ISBN : 84-87985-06-8.

[5] Faure J., Marquis-Favre C., "Perceptual assessment of the influence of structural parameters for a radiating plate", *Acta Acustica united with Acustica* 91, 77-90 (2005).

[6] Meunier S., Habault D., Canévet G., "Auditory evaluation of sound signals radiated by a vibrating surface", *Journal of Sound and Vibration* 247, 897-915 (2001).

[7] Marquis-Favre C., Faure J., Hamzaoui N., "Auditory evaluation of sounds generated in a cavity covered with absorbing layers", *Proceedings of the 12th International Congress on Sound and Vibration*, Lisbonne, Portugal, Juillet 2005.

[8] Guibert E., Habault D., Poisson F., Gautier P.-E., "Psychomécanique d'un système plaque/cavité : application à une voiture de TGV", *Actes du CFA '06*, Tours, France, Avril 2006.

[9] Trollé A., Marquis-Favre C., Hamzaoui N., "Auditory evaluation of sounds radiated from a vibrating plate inside a damped cavity", *Acta Acustica united with Acustica* 95(2), 343-355 (2009).

[10] Pillet M., "Les plans d'expériences par la méthode Taguchi", Les éditions d'Organisation, Paris, 1997.

[11] Trollé A., "Évaluation auditive de sons rayonnés par une plaque vibrante à l'intérieur d'une cavité amortie : ajustement des efforts de calcul vibro-acoustique", Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, N° d'ordre 2009-ISAL-0062, 2009.

[12] Carroll J. D., Chang J. J., "Analysis of individual differencies in multidimensional scaling via an n-way generalization of "eckart-young" decomposition", *Psychometrika* 35(3), 283-319 (1970).

[13] Weinberg S. L., Carroll J. D., Cohen H. S., "Confidence regions for Indscal using the Jacknife and Bootstrap techniques", *Psychometrika* 49, 475-491 (1984).

[14] Susini P., McAdams S., Winsberg S., "A multidimensional technique for sound quality assessment", *Acta Acustica united with Acustica* 85, 649-654 (1999).

[15] Thurstone L. L., "A law of comparative judgment", *Psychological Review* 34, 273-86 (1927).