Apport de la perception sonore pour l'analyse du rayonnement acoustique à l'intérieur d'une cavité

NACER HAMZAOU^{1,a}, ARNAUD TROLLÉ² ET CATHERINE MARQUIS-FAVRE²

¹ INSA-Lyon, Laboratoire Vibrations Acoustique, Bâtiment St. Exupéry, 25bis avenue Jean Capelle, 69621 Villeurbanne Cedex, France

² École Nationale des Travaux Publics de l'État, Département Génie Civil et Bâtiment URA CNRS 1652, rue Maurice Audin, 69518 Vaulx-en-Velin Cedex, France

Reçu le 15 juin 2009, accepté le 9 décembre 2009

Résumé – L'amélioration de la qualité sonore d'un produit dès le stade de la conception est une préoccupation des industriels de divers secteurs. Cette conception se faisant à partir d'outils basés sur des méthodes numériques du type élément-finis, éléments de frontières ou sur des méthodes semi-analytiques, il est important que leurs prédictions intègrent la qualité sonore attendue. L'objectif de cet article est de montrer l'intérêt et l'apport d'une démarche perceptive au service de l'interprétation et l'exploitation physique. Il s'agit plus spécifiquement d'évaluer perceptivement la pertinence de certains paramètres structuraux et paramètres d'analyse, afin d'affiner la prédiction sonore. Le système étudié est une plaque vibrante couplée à une cavité, dans laquelle nous mesurons des pressions acoustiques, en tenant compte de variations liées à l'épaisseur de la plaque, aux conditions de serrage aux bords de cette même plaque et à l'absorption de la cavité. La fréquence maximale d'analyse est aussi étudiée subjectivement, en utilisant des tests de dissemblance et de préférence fondés sur la méthode de comparaison par paires.

Mots clés : Rayonnement acoustique / perception sonore / modélisations / mesures / couplage fluide-structure

Abstract – Benefit of sound perception for the analysis of acoustic radiation inside a cavity. The sound quality improvement of a product at stage of its design is a concern of many firms. This design being made starting from tools based on numerical methods such as FEM, BEM or on semi-analytical methods, it is important that their predictions integrate the sound quality expected. The objective of this paper is to show the interest and the benefit of a perceptive step to the vibroacoustic system improvement. Specifically it is more a question of evaluating, through sound perception, the relevance of certain structural parameters and parameters of analysis, in order to refine the sound prediction. The studied system is a vibrating plate coupled to a cavity, in which acoustic pressures are measured, by taking into account variations related to the plate thickness, to the conditions of tightening at the edges of the plate and to the cavity sound absorption. The maximum frequency of analysis is also subjectively studied, by using listening tests of dissimilarity and preference based on the method of pair comparison.

Key words: Acoustic radiation / sound perception / modelling / measurements / fluid-structure interaction

1 Introduction

La qualité sonore est un attribut global que les industriels souhaitent prédire au stade de la conception d'un produit. L'influence d'un paramètre (dimensions, rigidité, masse, conditions aux limites, amortissement, absorption, ...) sur le comportement acoustique d'une structure vibrante peut être bien décrit par une approche physique

basée sur un critère de niveau sonore usuellement utilisé. La combinaison de plusieurs paramètres rend difficile la prédiction sonore à travers les niveaux de pression acoustique; une démarche basée sur la perception sonore peut apporter des éclaircissements particulièrement utiles afin de dresser des recommandations à même d'améliorer la qualité sonore des systèmes vibro-acoustiques dès l'étape de leur conception.

Plusieurs chercheurs se sont intéressés à évaluer l'influence de la variation de paramètres physiques de divers

^a Auteur pour correspondance :
nacer.hamzaoui@insa-lyon.fr

Nomenclature

A_i :	amplitude des fréquences f_i du spectre (en Pa)
C :	couple de serrage relevé sur la clé dynamométrique (en N.m)
CGS :	Centre de Gravité Spectral (en Hz ou en Barks)
f_i :	fréquences du spectre (en Hz ou en Barks)
$f_{\max}$:	fréquence maximale d'analyse ou fréquence de coupure (en Hz)
L_x, L_y, L_z :	dimensions intérieures de la cavité (en m)
r^2 :	qualité d'ajustement, exprimée en termes de proportion de variance expliquée (s.u.)
α :	épaisseur de la plaque
β :	absorption de la cavité
γ :	conditions de serrage de la plaque

systèmes vibro-acoustiques simples sur la perception des sons qu'ils génèrent. Pour une plaque simplement bafflée, sous excitation mécanique impulsionnelle [1, 2], ou excitation stationnaire [3, 4], les résultats concernent les attributs de timbre, de hauteur tonale et de sonie utilisés par les auditeurs, et l'influence des paramètres structuraux (amortissement, épaisseur, conditions aux limites) sur la perception sonore. Pour une plaque couplée à une cavité, la référence [5] étudie l'influence du couple point d'impact-point d'écoute et du coefficient de réflexion sur la perception sonore. Dans la référence [6] sont examinées les relations entre les propriétés acoustiques de différents matériaux absorbants couvrant successivement l'une des parois rigides d'une chambre réverbérante et les attributs auditifs des bruits à large bande émis par une plaque vibrante et enregistrés à l'intérieur de la chambre.

L'étude présentée dans cet article est issue des travaux de thèse de Trollé [7], et concerne un système constitué d'une plaque vibrante couplée à cavité, dans laquelle nous mesurons des pressions acoustiques, en tenant compte de variations liées à l'épaisseur de la plaque, aux conditions de serrage aux bords de cette même plaque et à l'absorption de la cavité. La fréquence maximale d'analyse est aussi étudiée subjectivement, en utilisant des tests de dissimilitude et de préférence basés sur la méthode de comparaison par paires. L'objectif principal de cet article est de montrer la démarche perceptive abordée, et l'apport d'une analyse complémentaire à la physique du problème.

2 Dispositif et mesures expérimentales

Dans cette section, nous présentons le dispositif expérimental retenu, une cavité en cuve de béton de dimensions intérieures : $(L_x; L_y; L_z) = (0,6; 0,5; 0,7)$.

Une plaque en acier de dimensions $(L_x; L_y)$ est posée sur la face supérieure de la cuve et maintenue en place par des mors en acier vissés sur le bâti de la cuve à l'aide d'une clé dynamométrique (cf. Fig. 1).

L'excitation mécanique ponctuelle avec un spectre de bruit rose [0–20 kHz] est appliquée à l'aide d'un pot vibrant placé en un point qui répond à un compromis entre une forte densité modale dans le domaine [0–2000 Hz] et une forte puissance acoustique rayonnée.

Les mesures acoustiques sont réalisées via deux microphones placés à l'intérieur de la cuve.

Fig. 1. Photo du dispositif expérimental.

Nous avons sélectionné trois paramètres structuraux déjà identifiés comme prééminents d'un point de vue perceptif. Deux premiers paramètres concernent la plaque en acier ; il s'agit de son épaisseur et de ses conditions de serrage. Nous adjoignons à ces deux premiers paramètres les propriétés en absorption de la cavité dont les effets sur la perception auditive ont été montrés comme importants au travers des études traitant d'une plaque couplée à une cavité. L'association de ces trois paramètres que nous proposons n'a encore pas été étudiée. Pour chaque paramètre structural, trois modalités sont définies pour permettre l'évaluation des effets de sa variation :

- **Facteur α : Épaisseur de la plaque en acier :**
 - Modalité 1 : 1,5 mm
 - Modalité 2 : 2 mm
 - Modalité 3 : 3 mm.
- **Facteur β : Absorption de la cavité :**
 - Modalité 1 : aucune couche absorbante (faible absorption)
 - Modalité 2 : moquette 5 mm d'épaisseur (moyenne absorption)
 - Modalité 3 : mousse 2 cm d'épaisseur (forte absorption).
- **Facteur γ : Conditions de serrage de la plaque :**
 - Modalité 1 : faibles ($C = 20$ N.m)

Tableau 1. Plan d'expériences.

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

- Modalité 2 : moyennes ($C = 50$ N.m)
- Modalité 3 : fortes ($C = 80$ N.m).

3 Usage des plans d'expériences factoriels fractionnaires

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

Dans le cadre de cette étude expérimentale, on cherchera plutôt à retenir un nombre réduit de combinaisons entre les modalités des facteurs, permettant néanmoins une évaluation des effets des variations structurales sur la perception auditive. À cette fin, les plans d'expériences factoriels fractionnaires [8] sont particulièrement utiles ; pour 3 facteurs à 3 modalités, nous adoptons la table standard de Taguchi L9 (3^4), qui permet de définir 9 premières configurations structurales du système plaque-cavité (cf. Tab. 1, configurations A à I).

Deux configurations complémentaires (cf. Tab. 1, configurations J et K) sont ajoutées pour disposer au final d'un plus grand nombre de stimuli.

4 Analyse physique des mesures acoustiques

Pour chaque configuration (A à K), nous avons mesuré la vitesse quadratique moyenne de la plaque vibrante et le niveau de pression acoustique aux deux points dans la cavité. Les comparaisons entre les différents spectres acoustiques ont permis de formuler les analyses physiques suivantes :

- (1) La présence de la couche de mousse sur le fond de la cuve introduit des effets de masse ajoutée et d'amortissement équivalents, qui se traduisent par un décalage des fréquences propres de la cavité vers les basses

fréquences et une diminution des amplitudes à ces fréquences (cf. Fig. 2).

- (2) L'augmentation de l'épaisseur de la plaque introduit un décalage des fréquences propres de la plaque vers les hautes fréquences, avec une nette diminution globale des amplitudes (cf. Fig. 3).
- (3) La variation des conditions de serrage introduit également un décalage des fréquences propres de la plaque, vers les hautes fréquences lorsque l'on augmente le couple de serrage aux bords de la plaque vibrante. L'influence sur les amplitudes ne paraît pas très nette sur les spectres de niveau de pression acoustique (cf. Fig. 4).

En considérant l'ensemble des variations paramétriques appliquées, la variation de l'épaisseur de la plaque paraît physiquement, au regard des spectres de niveau de pression acoustique, la plus prépondérante ; mais l'écoute des sons enregistrés ne paraît pas suivre ce constat. Il apparaît clairement que le niveau sonore n'est pas le seul critère de discrimination entre les échantillons sonores issus des 11 configurations étudiées. Une analyse de la perception sonore est donc nécessaire pour évaluer la pertinence des variations et extraire le ou les paramètres prépondérants.

5 Analyse perceptive des mesures acoustiques

À partir des sons issus des 11 configurations précédemment présentées, nous cherchons à dresser des tendances qualitatives relatives à l'influence de la variation des paramètres structuraux sur la perception des sons rayonnés à l'intérieur de la cavité.

Le protocole de test d'écoute utilisé repose sur la méthode de comparaison par paires, et permet l'évaluation de la dissemblance et de la préférence pour chaque paire de sons jouée ; l'interface utilisée est présentée sur la figure 5.

Trente-trois sujets (12 femmes et 21 hommes), âgés de 20 à 55 ans, ont participé au test d'écoute.

5.1 Résultats du test de dissemblance

L'analyse des réponses au test de dissemblance, qui consiste à mesurer la dissimilarité (distance) entre 2 stimuli, a permis de dresser un espace perceptif à deux dimensions (cf. Fig. 6).

La première dimension semble reliée à la fois aux propriétés en absorption de la cavité (en premier plan) et aux conditions de serrage de la plaque (en arrière plan). La seconde dimension perceptive apparaît contrôlée par l'épaisseur de la plaque.

L'analyse perceptive révèle que la première dimension perceptive est liée à la sonie des sons ($r^2 = 0,88$ entre dimension 1 et sonie de Zwicker) ; la seconde se rapporte à la balance spectrale des stimuli. Cette dernière peut se décrire par le Centre de Gravité Spectral (1),

Fig. 2. Spectre de niveau de pression acoustique au point intérieur de la cavité. — : pas de couche de matériau absorbant (stimulus I) ; — : une couche de mousse réticulée (stimulus K) ; A : mode couplé contrôlé par la cavité ; S : mode couplé contrôlé par la plaque.

Fig. 3. Spectre de niveau de pression acoustique au point intérieur de la cavité. — : épaisseur plaque 1,5 mm (stimulus C) ; — : épaisseur plaque 3 mm (stimulus K) ; A : mode couplé contrôlé par la cavité ; S : mode couplé contrôlé par la plaque.

qui représente la moyenne des fréquences du spectre f_i pondérées par leur amplitude A_i .

$$CGS = \frac{\sum_i A_i f_i}{\sum_i A_i} \quad (1)$$

Pour différencier les stimuli, les auditeurs n'utilisent effectivement pas que le niveau sonore ; la balance spectrale

des stimuli a un effet important dans la perception auditive.

5.2 Résultats du test de préférence

L'analyse des réponses au test de préférence a permis de dresser un classement de préférence des 11 échantillons sonores suivant leur valeur de mérite (cf. Fig. 7).

Fig. 4. Spectre de niveau de pression acoustique au point intérieur de la cavité. ____ : $C = 50$ N.m (stimulus H); — : $C = 80$ N.m (stimulus K); A : mode couplé contrôlé par la cavité; S : mode couplé contrôlé par la plaque.

Fig. 5. Interface utilisée pour le test de dissemblance et de préférence.

L'absorption de la cavité influence au premier plan le classement de la préférence; les configurations impliquant de fortes propriétés en absorption de la cavité occupent les premières places du classement (C, D, H et K). La frontière entre le groupe de tête et intermédiaire est nette; un modèle de régression linéaire à un seul paramètre, basé sur les seules valeurs de la sonie de Zwicker, suffit pour prédire les valeurs de mérite ($r^2 = 0,93$). La relation entre les propriétés en absorption de la cavité et la sonie, bien connue dans le domaine de l'acoustique des salles, est clairement mise en évidence. Les conditions de serrage influencent au second plan le classement de préférence.

Cette première analyse perceptive montre bien sa complémentarité par rapport à une approche purement physique, et identifie les métriques reliant l'agrément sonore et les paramètres structuraux les plus pertinents. Ce

Fig. 6. Espace perceptif de dissemblance 2D des stimuli.

type d'approche peut être très intéressant à appliquer sur des échantillons sonores issus de calculs vibro-acoustiques.

Dans la suite, nous appliquons ce type d'approche pour ajuster deux paramètres importants à définir dans le cas d'une approche par modélisation : la fréquence maximale et le pas fréquentiel d'analyse.

6 Ajustement de la fréquence de coupure par la perception sonore

Pour ce type de problématique liée à une plaque rayonnant à l'intérieur d'une cavité, une approche théorique

Fig. 7. Valeurs de mérite calculées pour les stimuli.

(comme la FEM/BEM par exemple) dépend de certains paramètres inhérents au calcul vibro-acoustique, qui influent considérablement sur les ressources informatiques (temps de calculs, etc.) et sur la précision des résultats obtenus. La fréquence maximale d'analyse (ou fréquence de coupure) est un paramètre primordial qui caractérise l'échantillonnage utilisé pour un calcul dans le domaine temporel, et la limite supérieure du domaine fréquentiel d'étude pour un calcul en fréquentiel. Nous proposons donc son ajustement à partir d'une approche perceptive appliquée aux échantillons sonores des 11 précédentes configurations.

Nous cherchons donc à déterminer la fréquence de coupure ajustée des sons qui permet de conserver les tendances qualitatives déjà trouvées (cf. Sect. 5). À partir des 11 échantillons sonores dont le contenu fréquentiel est étendu sur l'intervalle $[0, 22\,050 \text{ Hz}]$, nous appliquons un filtre passe-bas avec 3 fréquences de coupure : 5000 Hz, 2500 Hz et 1500 Hz. Ces sons filtrés sont soumis à l'évaluation auditive par un jury d'auditeurs en utilisant un protocole de test identique à celui utilisé précédemment. Les résultats obtenus pour le test de dissemblance et pour le test de préférence ont permis d'extraire la fréquence de coupure pour laquelle les tendances qualitatives approximées (espace perceptif et valeurs de mérite) se sont révélées en bonne adéquation avec les tendances originales ; il s'agit de $f_{\max} = 2500 \text{ Hz}$.

Le tableau 2 montre les rangs des stimuli au sein du classement de préférence original et des classements de préférence approximés établis pour les différentes valeurs de fréquence de coupure testées.

Pour des fréquences de coupure égales à 5000 et 2500 Hz, aucune différence significative dans les rangs des stimuli n'apparaît. Cependant, pour une fréquence de coupure égale à 1500 Hz, les stimuli A et K occupent des rangs significativement différents de ceux qu'ils occupaient dans le classement original ; le groupe de tête du classement original est disloqué.

Tableau 2. Comparaison entre le classement de préférence original et les classements de préférence approximés établis pour les différentes valeurs de fréquences de coupure : 5000 Hz, 2500 Hz et 1500 Hz.

Stimulus	Rang original	Rang		
		1500 Hz	2500 Hz	5000 Hz
D	1	1	1	1
C	2	2	3	3
H	3	3	2	2
K	4	6*	4	4
G	5	4	6	6
A	6	5*	5	5
F	7	7	7	8
B	8	8	8	7
I	9	11	11	11
J	10	9	10	10
E	11	10	9	9

* Modification significative du rang au sein du classement.

Tableau 3. Comparaison de la qualité d'ajustement du modèle de régression basé sur les valeurs de la sonie de Zwicker.

$f_{\max}$ (Hz)	r^2
22 500	0,93
5000	0,93
2500	0,92
1500	0,82

Le choix de la fréquence de coupure ajustée à 2500 Hz est confirmé par la qualité de la régression linéaire entre les valeurs de la sonie de Zwicker calculées sur les sons filtrés passe-bas et les valeurs de mérite (cf. Tab. 3).

Nous avons pu noter que la fréquence de coupure de 2500 Hz s'apparentait fortement à la dernière fréquence de coupure qui peut garantir la préservation de la hiérarchie entre les sonies des stimuli étudiés. Elle coïncide aussi avec la borne supérieure du domaine fréquentiel au sein duquel la quasi-totalité de l'énergie acoustique portée par les différents stimuli originaux est incluse.

7 Conclusions

L'apport de la perception sonore au profit de l'analyse physique apparaît clairement à travers les résultats obtenus. L'absorption de la cavité est le paramètre le plus influent sur la qualité sonore des bruits internes, avant les conditions aux limites et l'épaisseur de la plaque vibrante. En termes de préférence, la qualité sonore est régie par la sonie, mais la balance spectrale décrite par le centre de gravité spectral est également utilisée par les auditeurs pour différencier les stimuli étudiés. En ce qui concerne la pertinence des paramètres d'analyse, utilisés comme entrées dans un code de calcul de rayonnement par exemple, nous avons pu ajuster par ce type d'approche la fréquence maximale d'analyse. Dans la thèse de Trollé, un travail similaire est présenté sur l'ajustement du pas fréquentiel d'analyse.

Références

- [1] V. Roussarie, Analyse perceptive de structures vibrantes simulées par modèle physique, Thèse de doctorat, Université du Maine, Le Mans, France, 1999
- [2] G. Canévet, D. Habault, S. Meunier, 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 (2004) 181–193
- [3] J. Faure, C. Marquis-Favre, Perception of sounds radiated from a vibrating plate: comparison of structural parameters influences, In Proc. Joint Congress CFA/DAGA'04 [CDROM], Strasbourg, France, 2004
- [4] N. Hamzaoui, C. Sandier, E. Parizet, P. Wetta, C. Besseyrias, Subjective assessments of the acoustic radiation from steel structures: some effects of a few parametric variations, In Proc. Forum Acusticum 2002 [CDROM], Sevilla, Spain, 2002
- [5] E. Guibert, D. Habault, F. Poisson, P.-E. Gautier, Psychomécanique d'un système plaque-cavité: application à une voiture de TGV, In Proc. CFA'06 [CDROM], Tours, France, 2006
- [6] C. Marquis-Favre, J. Faure, N. Hamzaoui, Auditory evaluation of sounds generated in a cavity covered with absorbing layers, In Proc. 12th International Congress on Sound and Vibration [CDROM], Lisbon, Portugal, 2005
- [7] A. Trollé, N. Hamzaoui, C. Marquis-Favre, Auditory evaluation of sounds radiated from a vibrating plate inside a damped cavity: adjustment of the computational efforts in frequency, In Proc. 19th International Congress on Acoustics [CDROM], Madrid, Spain, 2007
- [8] M. Pillet, Les plans d'expériences par la méthode Taguchi, Les éditions d'Organisation, Paris, France, 1997