



**HAL**  
open science

## Étude perceptive du rayonnement acoustique de structures

Florence Demirdjian, Dominique Habault, Sabine Meunier, Georges Canevet

► **To cite this version:**

Florence Demirdjian, Dominique Habault, Sabine Meunier, Georges Canevet. Étude perceptive du rayonnement acoustique de structures. 17e Congrès Français de Mécanique, 2005, Troyes, France. hal-04270506

**HAL Id: hal-04270506**

**<https://hal.science/hal-04270506>**

Submitted on 4 Nov 2023

**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.

# Etude perceptive du rayonnement acoustique de structures

Florence Demirdjian, Dominique Habault, Sabine Meunier, Georges Canévet,

Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique, CNRS  
31, chemin Joseph-Aiguier  
13402 Marseille Cedex 20

## Résumé :

*Le travail présenté aborde un problème de rayonnement de structure par une double approche vibroacoustique et psychoacoustique ; une approche actuellement qualifiée de psychomécanique. Le but est d'établir des corrélations entre les paramètres mécaniques et/ou géométriques d'une structure qui vibre, les paramètres acoustiques de son rayonnement et les paramètres auditifs ou psychoacoustiques des sons perçus. Trois études sont décrites, qui portent sur des sons de synthèse correspondant à des réponses transitoires de plaques couplées à un fluide. La méthode utilisée est basée sur le calcul des modes de résonance du système couplé fluide/plaque. Tout d'abord, une étude qualitative sur l'effet de la variation de l'amortissement de la structure est présentée. Puis, on montre dans quelle mesure une plaque d'épaisseur variable peut être modélisée par une autre d'épaisseur constante, avec la contrainte que la perception du rayonnement sonore demeure approximativement la même dans les deux cas. Enfin, nous testons la validité du modèle par une comparaison objective et perceptive de sons de plaques enregistrés et synthétisés, en vue notamment de déterminer le nombre de modes à prendre en compte pour la synthèse.*

## Abstract :

*The acoustical radiation of a vibrating structure is examined, using a combination of vibroacoustic and psychoacoustic techniques, a so-called psychomechanical approach. The aim is to describe the links that relate the mechanical and/or geometrical parameters of a vibrating structure to the acoustic field generated by this vibration and to the auditory and perceptual aspects of the resulting sound. Three studies are described, concerning synthesized sounds corresponding to transient responses of a plate coupled with a fluid. The method used for predicting these responses and their associated sound fields is based on the calculation of the resonance modes of the coupled system fluid/plate. We first present the results of an experiment showing the effect of structural damping on the pleasantness of the radiated sounds. Next, it is shown that the problem of a variable-thickness plate can be modelled by an "equivalent" plate with a constant thickness, equivalent in the sense that the acoustic signals produced sound similar in both cases. Finally, we test the validity of our model by comparing its output to experimental recordings of the acoustic pressure produced by a real plate struck with a hammer. This comparison helps deciding how many modes have to be taken into account for the calculations, an important issue in such problems in terms of calculation time.*

**Mots clefs : Vibroacoustique ; Perception auditive ; Psychomécanique.**

## 1 Introduction

Les notions de qualité acoustique des produits manufacturés, et d'environnement sonore en général, ont pris un essor important dans les deux dernières décennies. Cela a entraîné un regain d'intérêt pour les études perceptives, et non plus simplement physiques, des signaux rayonnés par les structures vibrantes. Ces études ont majoritairement été menées au départ par les spécialistes de la psychoacoustique. Le but était d'analyser les attributs auditifs des sons rayonnés, et surtout de décrire les relations entre ces attributs et les caractéristiques physiques des signaux, en vue d'une éventuelle amélioration de la qualité. Cette spécialisation des recherches de psychoacoustique, visant à établir le lien entre caractéristiques mécaniques et qualité sonore au sens large a donné naissance à ce que l'on appelle aujourd'hui la psychomécanique. Jusqu'à présent, les travaux ont principalement porté sur le rayonnement de barres ou de plaques, mises en vibration par divers types de forces extérieures. La littérature spécialisée ne comporte encore que peu de contributions. On en trouvera un bilan relativement complet dans les articles de McAdams et al. [5] et de Canévet et al. [1]. Les plus récentes sont de Houix [3], qui a étudié la possibilité de reconnaître une source sonore en se basant uniquement sur les sons qu'elle émet, de Faure [2], sur les qualités d'absorption de plaques dans le domaine de l'isolation acoustique,

et de Stoelinga et al. [6] sur les signaux sonores de rebonds de balles de différents diamètres sur des plaques de différentes épaisseurs.

Les études présentées ici concernent la perception du rayonnement de transitoires de plaques rectangulaires excitées par une force de courte durée. Les travaux que nous menons ont un objectif la mise en relation des caractéristiques perceptives des signaux avec leurs caractéristiques physiques et les caractéristiques mécaniques et géométriques des structures. Nous décrivons d'abord succinctement (§ 2) la méthode de calcul du champ de pression rayonné par une plaque mince couplée à un fluide ; cette méthode est basée sur le calcul des modes de résonance du système couplé plaque/fluide. Ensuite nous décrivons trois exemples d'études perceptives (§ 3). La première est une étude qualitative de l'effet de l'amortissement structurel sur le rayonnement et sur l'agrément que peuvent produire les sons correspondants. La seconde examine la possibilité de simplifier la modélisation d'une plaque d'épaisseur variable en introduisant la notion de plaque équivalente d'épaisseur constante. Enfin, la dernière étude teste la validité de notre modèle théorique par comparaison objective et perceptive de signaux réels enregistrés et des résultats du modèle.

## 2 Rayonnement acoustique d'une plaque mince couplée à un fluide

La méthode utilisée pour calculer les signaux sonores rayonnés par une plaque mince couplée à un fluide est succinctement présentée; elle est basée sur le calcul des modes de résonance du système couplé plaque/fluide. Cette méthode est présentée en détail dans Habault et Filippi [4]. Les caractéristiques des signaux étudiés sont également définies.

**Développement théorique.** On considère une plaque mince, bafflée, élastique, immergée dans un fluide supposé parfait et excitée par une force de durée finie. Le problème de rayonnement, exprimé dans le domaine temporel, possède deux inconnues : le déplacement en tout point  $M$  de la plaque  $U(M,t)$  et la pression rayonnée par la plaque en tout point  $Q$  du fluide  $P(Q,t)$  ;  $t$  représente le temps. Les données d'entrée du problème sont les caractéristiques du fluide (densité  $\rho_f$  et célérité  $C_f$ ), celles de la plaque (densité  $\rho_p$ , module d'Young, coefficient de Poisson et dimensions) et l'excitation  $F(M,t)$ . Le système d'équations comprend entre autres l'équation de propagation des ondes dans un fluide, l'équation des plaques pour le déplacement et les conditions de continuité des accélérations à l'interface fluide/plaque.

Dans une première étape, pour le cas particulier d'une plaque bafflée, le champ de pression est exprimé en fonction de l'accélération sur la surface de la plaque, par la formule de Rayleigh-Kirchhoff (1) :

$$P(Q,t) = \frac{\rho_f}{\pi} \int_{\Sigma} \ddot{U}(M,t-R(M,Q)/c_f) \frac{1}{R(M,Q)} d\sigma(M) \quad (1)$$

Dans cette intégrale,  $\ddot{U}$  est la dérivée seconde du déplacement  $U$  par rapport au temps,  $\Sigma$  représente la surface de la plaque et  $d\sigma$  est l'élément d'intégration. L'expression (1) du champ de pression permet d'avoir un nouveau système d'équations dont la seule inconnue est le déplacement  $U(M,t)$ .

La seconde étape consiste à évaluer les fréquences de résonance  $\Omega_n$  et modes de résonance  $w_n(M)$  de la plaque couplée avec le fluide. Dans le cas de l'air, la densité du fluide est très faible par rapport à celle de la plaque ; les modes de résonance peuvent alors être approchés par les modes de résonance de la plaque dans le vide  $w_n^0(M)$ . En revanche, les fréquences de résonance sont différentes de celles de la plaque dans le vide. Elles sont complexes  $\Omega_n = \omega_n + i \tau_n$  en raison du couplage entre la plaque et l'air. Les valeurs de la partie imaginaire sont liées à l'énergie rayonnée par la plaque dans le fluide pour chaque mode. Ainsi, les fréquences de résonance constituent un outil bien adapté pour décrire le comportement temporel du déplacement de la plaque excitée par des forces de durées finies. Bien sûr, le couplage étant faible, cette partie imaginaire, toujours positive, reste petite. On construit ensuite les fonctions  $W_n(M,t)$  définies par l'expression (2) :

$$W_n(M,t) = w_n(M) \exp(-i \omega_n t) \exp(-\tau_n t) \quad (2)$$

Le déplacement  $U(M,t)$  est alors développé en série de ces fonctions  $W_n(M,t)$ . La démonstration de l'expression (3) est présentée en détail par Habault et Filippi [4].

$$U(M,t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \alpha_n W_n(M,t) \quad (3)$$

Les expressions (2) et (3) montrent que le comportement décroissant du déplacement en fonction du temps dépend de la partie imaginaire des fréquences de résonance. On introduit, de plus, un amortissement de la structure,  $\eta$ , à l'aide d'un module d'Young complexe :  $E = E_0(1 - i\eta)$ . Les seules inconnues du problème sont alors les coefficients  $\alpha_n$  de la série. Dans le cas d'une plaque bafflée couplée à un fluide léger, ils peuvent être approchés par une forme explicite, fonction de la transformée de Fourier de l'excitation et de la norme de chaque mode. Une fois ces coefficients déterminés, la pression acoustique est calculée en tout point  $Q$  du fluide à l'aide de l'intégrale de Rayleigh.

**Caractéristiques des signaux.** La plaque étudiée ici est rectangulaire, encadrée sur ses quatre côtés et excitée par une force impulsionnelle décrite par la formule (4) où  $S$  est le point d'excitation sur la plaque,  $Y(t)$  est la fonction d'Heavyside et  $T$  la durée d'impact. Dans les études présentées ici, nous nous sommes intéressés à l'effet de la variation de l'amortissement  $\eta$  du matériau et à la simplification de la modélisation d'une épaisseur variable de plaque. L'amortissement a une influence directe sur le niveau de décroissance des sons dans le temps ; le coefficient de décroissance de chaque composante fréquentielle est proportionnel à la fréquence. L'épaisseur, quant à elle, a une influence directe sur les valeurs des fréquences de résonance de la plaque qui sont les différentes composantes du spectre du signal sonore. Par exemple, une augmentation de 20 % de l'épaisseur de la plaque entraîne une augmentation de 20% des fréquences de résonance et ainsi un décalage du spectre de 20 % vers les hautes fréquences.

$$F(M,t) = (Y(t) - Y(t-T)) \frac{1 - \cos(2\pi t/T)}{T} \quad \text{si } M=S \quad \text{et} \quad F(M,t) = 0 \quad \text{sinon} \quad (4)$$

### 3 Etudes psychomécaniques

Cette partie présente trois exemples d'études psychomécaniques. Après une rapide présentation des protocoles de mesures auditives qui ont été pratiquées (§ 3.1), nous décrivons successivement une étude de l'effet de l'amortissement sur le degré d'agrément des sons produits (§ 3.2), un essai de simplification de notre modèle, où l'on a testé la possibilité de substitution d'une plaque d'épaisseur variable par une plaque « équivalente » d'épaisseur constante (§ 3.3), et enfin un test d'évaluation de validité du modèle par comparaison, objective et subjective, de signaux enregistrés et de signaux calculés (§ 3.4).

#### 3.1 Protocoles de mesures auditives.

**Les tests auditifs.** Deux types de tests ont été utilisés pour notre étude : des tests de dissemblances entre sons et des tests d'estimation d'agrément. Les tests se sont déroulés en cabine audiométrique ; l'écoute se faisait au casque, en condition dite diotique (mêmes signaux émis sur les deux oreilles simultanément). Les mesures de dissemblance ont toujours pour but d'évaluer la proximité auditive de sons différents. Nous avons mesuré ces dissemblances entre les sons par une méthode de comparaison par paires. Les paires de sons sont présentées de façon aléatoire. Après chaque présentation les sujets doivent quantifier les dissemblances en localisant un curseur placé sur une droite disposée sur un écran. Les deux extrémités de cette droite sont nommées « très semblables » et « très dissemblables » et les valeurs des jugements associées sont respectivement 0 et 6. Les mesures d'agrément visent généralement à porter un jugement sur la qualité d'un signal à caractère musical. Pour ce test d'estimation directe d'agrément, les sons sont présentés les uns après les autres aux sujets, dans un ordre aléatoire. Ils sont émis à un niveau qui leur assure une sonie (intensité subjective) équivalente. Les sujets doivent à chaque présentation donner une estimation de l'agrément en associant au son un nombre proportionnel à l'agrément ressenti. Plus le son paraît agréable, plus le nombre doit être grand.

**Grandeurs perceptives** Parmi les nombreux attributs perceptifs des sons tests, ceux qui se sont révélés pertinents pour nos mesures étaient les hauteurs tonale et fondamentale et le timbre.

La hauteur tonale est l'attribut qui correspond à la fréquence du signal pour un son pur. Mais elle est plus imprécise et difficile à définir pour un son complexe harmonique ou inharmonique, comme dans le cas d'une plaque vibrante. De plus, la hauteur tonale d'un son est bi-dimensionnelle : une dimension grave-aiguë et une dimension sur laquelle deux sons purs ont la même hauteur tonale lorsque leurs fréquences sont en rapport

de deux. La hauteur tonale d'un son complexe peut être celle de sa fréquence fondamentale : c'est la hauteur fondamentale.

Le timbre est l'attribut qui nous permet de distinguer deux sons ayant la même hauteur tonale, la même sonie et la même durée. Une des grandeurs physiques qui le caractérise est le centre de gravité spectral. Plus le centre de gravité spectral est élevé plus le son paraît brillant, plus il est bas plus le son paraît mât.

### 3.2 Etude qualitative sur l'effet de la variation d'amortissement

L'amortissement de la structure  $\eta$  est pris en compte dans la partie complexe du module d'Young. Pour en étudier l'effet sur la qualité sonore du rayonnement, nous avons choisi le cas d'une plaque en acier de dimension  $35 \times 50 \times 0,5$  cm, excitée par une force transitoire (définie selon la relation 4) de durée  $T=0,1$  ms. Le calcul de la réponse a été effectué sur 70 modes, si bien que les signaux ont de l'énergie jusqu'à 7000 Hz environ. Les différentes valeurs choisies pour  $\eta$  varient de  $10^{-4}$  à  $10^{-2}$ . Nous avons donc ainsi synthétisé 9 sons qui, suivant la valeur de  $\eta$ , avaient un caractère plus ou moins brillant ou étouffé. Chacun des sons produit effectivement une impression plus ou moins agréable, qui influence le jugement que l'on peut porter sur la qualité de la structure vibrante. Afin d'évaluer cette qualité, on a procédé à des tests d'estimation d'agrément. La figure (1) présente la moyenne géométrique des estimations des 23 sujets. On peut observer que ces sujets se sont répartis en deux groupes, ayant deux appréciations opposées des sons tests. Le premier groupe (12 sujets) préférait les sons les plus amortis : les sujets évaluaient en fait la qualité de la structure à travers le signal rayonné ; plus le son était amorti, plus la structure paraissait rigide, gage de qualité, et plus le signal était jugé agréable. Ce groupe était essentiellement constitué de mécaniciens. Le second groupe (11 sujets) préférait les sons les moins amortis : les sujets se basaient alors davantage sur le caractère musical des signaux sonores ; plus les signaux étaient riches, longs, plus ils paraissaient intéressants, plus ils étaient agréables. Ce groupe était essentiellement constitué de musiciens.

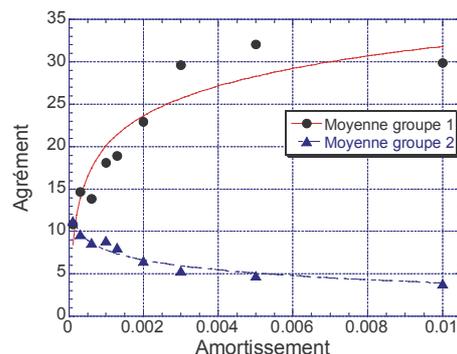


FIG. 1 – Agrément en fonction de l'amortissement.

### 3.3 Simplification de la modélisation du rayonnement d'une plaque d'épaisseur non constante

Nous souhaitons savoir si le rayonnement d'une plaque d'épaisseur variable pouvait être modélisé par celui d'une autre plaque, d'épaisseur constante, pour un résultat perceptif équivalent. L'épaisseur variable est décrite par une fonction  $h(x,y)=h_0(1+f(x,y))$ , où  $h_0=5\text{mm}$  et  $f(x,y)$  caractérise le relief de la plaque. Les dimensions de la plaque et l'excitation sont les mêmes que celles décrites dans le paragraphe 3-2, si bien que les signaux sonores ont les mêmes caractéristiques. Nous présentons les résultats du cas particulier correspondant à la figure 2a. Des tests auditifs ont été menés, où il s'agissait pour les sujets d'évaluer les dissemblances entre un son de la plaque d'épaisseur variable et N autres sons de plaques de différentes épaisseurs constantes. La figure 2b présente la moyenne arithmétique de 16 jugements de dissemblances pour les différentes épaisseurs constantes des plaques de comparaison. Cette courbe moyenne présente un minimum global, pour une épaisseur de 5,2 mm, et un minimum local à 5,1 mm. L'examen des signaux montre que le minimum global de dissemblance (d'ordonnée 1,9) correspond à une concordance des fréquences de résonance pour lesquelles le signal a le plus d'énergie. Autrement dit, le principal critère de similarité auditive est la hauteur tonale correspondant à la composante spectrale la plus intense. Le minimum local correspond à une concordance

des fréquences fondamentales des signaux. Certains sujets ont donc en plus porté attention à cette hauteur fondamentale pour leurs jugements de similarité. La conclusion de cette étude est tout de même qu'un son rayonné par une plaque d'épaisseur variable peut être similaire à celui émis par une plaque d'épaisseur constante, équivalente donc du point de vue perceptif.

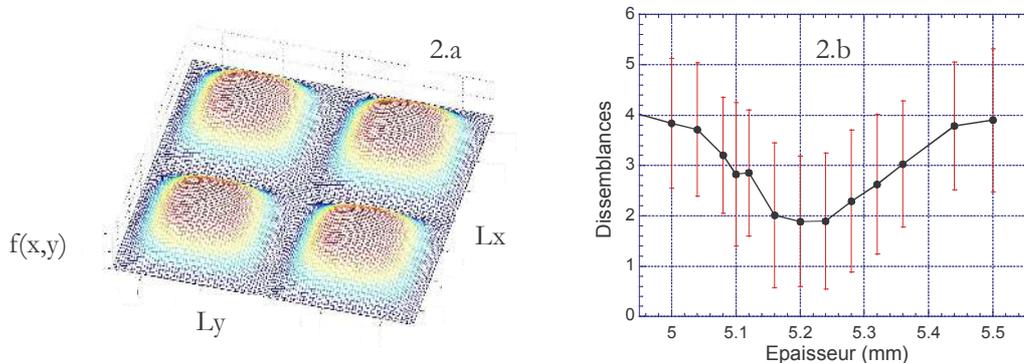


FIG. 2.a – Fonction qui décrit la géométrie d'une plaque d'épaisseur variable. 2.b – Dissemblances en fonction des épaisseurs constantes de plaques.

### 3.4 Comparaisons objective et perceptive de signaux mesurés et synthétisés

Nous nous sommes également intéressés à la validité perceptive de notre modèle, c'est-à-dire de la méthode de développement sur la base des modes de résonance décrite dans la partie 2. Pour cela nous avons mené une étude expérimentale sur les vibrations et le rayonnement d'une plaque de dimensions  $89,4 \times 75,4 \times 0,2$  cm, encadrée dans une paroi rigide séparant deux salles anéchoïques. La plaque était excitée à l'aide d'un marteau à choc. On a effectué des mesures de la fonction d'excitation, de l'accélération sur la plaque et de la pression acoustique rayonnée dans l'une des salles. La tête du marteau étant en caoutchouc, les durées d'impact étaient de l'ordre de 5 ms. Cela produit un spectre d'émission dont l'énergie se trouve concentrée surtout dans les basses fréquences, jusqu'à 1000 Hz environ. Pour la modélisation du rayonnement, le nombre de modes à prendre en compte est l'une des données d'entrée importantes du problème, en termes de temps de calcul. Nous avons donc tenté de déterminer la gamme des fréquences qu'il était souhaitable d'intégrer dans le calcul pour rendre le signal de synthèse raisonnablement similaire du point de vue perceptif. Dans ce but, nous avons effectué un test de dissemblance entre un son enregistré de plaque et ce même son filtré passe-bas aux fréquences qui variaient entre 300 et 8000 Hz. Le son non filtré était aussi comparé à lui-même, ce qui permettait d'avoir un étalonnage du jugement « très semblable ». Ce test a porté sur les 500 premières millisecondes de signal, car c'est cette première partie qui comporte toute la richesse spectrale du transitoire d'excitation. La figure 3a présente les moyennes de 14 jugements de dissemblances en fonction des fréquences de coupure des filtres. Le point isolé en bas à droite du graphique, d'ordonnée 0,6, correspond au jugement de dissemblance du signal non filtré lorsqu'il est comparé à lui-même. Nous observons que le son filtré à 8000 Hz est très semblable au signal non filtré. En revanche, il y a un saut de dissemblance entre les sons filtrés à 8000 et à 4000 Hz. Ceci est dû à la présence dans le spectre de composantes, peu intenses mais audibles, qui produisent une coloration brillante du son. Cette coloration est évidemment supprimée par le filtrage passe-bas à 4000 Hz. Un palier de dissemblances apparaît entre 400 et 1000 Hz. L'énergie d'une composante à 390 Hz masque peut-être celle des composantes situées entre 400 et 1000 Hz, rendant indiscernables les filtres dont les coupures se situent dans cet intervalle. La conclusion de cette étude est que le signal filtré à 8000 Hz est très semblable à celui non filtré, ce qui correspond à une prise en compte pour le calcul d'un minimum de 480 modes pour que le signal sonore de synthèse soit fidèle à celui mesuré. La figure 3b présente une comparaison objective des 60 premières millisecondes de la pression sonore enregistrée à 1 m de la plaque et de celle synthétisée respective. La courbe en ligne continue représente le calcul et celle en tirets la mesure. Le signal de pression mesuré semble avoir des composantes de plus hautes fréquences que le signal calculé. Cette différence peut provenir d'une mauvaise modélisation de l'excitation.

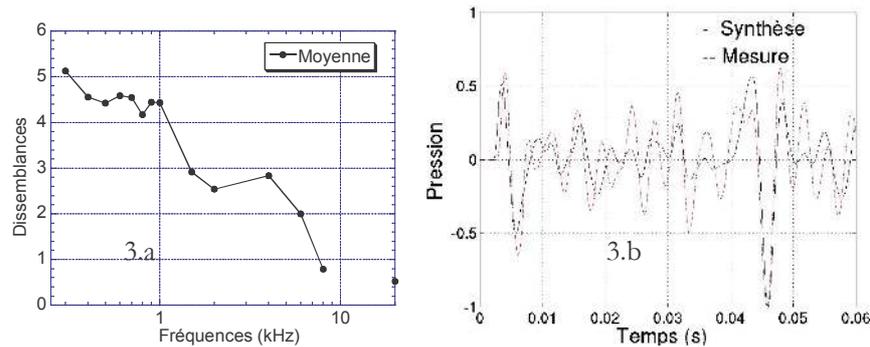


FIG. 3.a - Dissemblances en fonction des fréquences de coupure des filtres et des nombres de modes.  
3.b - Champ de pression enregistré et synthétisé sur 60 ms.

## 4 Conclusion

La demande industrielle actuelle incite à compléter les études traditionnelles de mécanique et de vibroacoustique des sources sonores par une évaluation qualitative du son rayonné. Une discipline s'est récemment développée pour répondre à cette demande. Cette discipline (la psychomécanique), qui associe les méthodes de la vibroacoustique et de la psychoacoustique, se propose de procéder à un examen complet des fonctions de transfert, depuis les paramètres mécaniques de la structure vibrante jusqu'aux attributs perceptifs des sons, en passant par les caractéristiques de rayonnement et de propagation acoustiques.

Le présent travail est un exemple de réalisation de telles études psychomécaniques. Nous avons examiné trois questions concernant le rayonnement de plaques couplées à un fluide. La première aborde le rôle de l'amortissement sur la qualité apparente des structures, évaluée à partir des sons émis. Il apparaît que les auditeurs sont capables de faire une association entre son et structure, et d'apprécier de ce fait la qualité de cette dernière. La seconde question concerne la possibilité de simplifier les modèles de calculs vibroacoustiques : peut-on approcher la mise en équation d'une plaque de forme complexe par celle d'une plaque plus simple, qui serait « équivalente » en termes de rayonnement sonore ? La réponse est positive, si l'on se base sur les attributs de hauteur (tonale ou fondamentale) des sons. La troisième question est liée à la validité du modèle que nous utilisons, et en particulier au nombre de modes à prendre en compte pour obtenir une simulation acceptable des sons rayonnés. Cette validité a été testée par comparaison de rayonnements de plaques réels et simulés. Les résultats ont montré que, sur notre exemple, 480 modes sont nécessaires pour que le signal sonore de synthèse soit fidèle à celui mesuré. Plus généralement, notre but est d'identifier les caractéristiques temporelles et fréquentielles essentielles à prendre en compte pour la simulation. Nos travaux actuels prolongent ces études pour le cas plus complexe de rayonnement de plaques couplées à une cavité.

## Références

- [1] 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* **90** (2004), 181-193.
- [2] Faure J., Influence des paramètres structuraux d'une plaque rayonnante sur la perception sonore, thèse Université Claude-Bernard Lyon, INSA de Lyon (2003).
- [3] Houix O., Catégorisation auditive de sources sonores, thèse Université du Maine (2003).
- [4] Habault D., Filippi P. On the transient response of a fluid-loaded structure represented by a series of resonance modes, *Journal of Sound and Vibration* **259** (2003), 1269-1275.
- [5] McAdams S., Chaigne A., Roussarie V. The psychomechanics of simulated sound sources : Material properties of impacted bars, *J. Acoust. Soc. Am.* **115** (2004), 1306-1320.
- [6] Stoelinga C., Peeters B., Lopez I. The bouncing of balls : influences of spectral and temporal variation on perception, Actes du congrès d'acoustique CFADAGA'04, Strasbourg, mars 2004, ISBN 2-9521105-1-4.