

Psychomécanique appliquée aux Trains à Grande Vitesse

Emmanuelle Guibert⁽¹⁾, Dominique Habault⁽¹⁾, Pierre-Etienne Gautier⁽²⁾ & Franck Poisson⁽²⁾

⁽¹⁾CNRS

Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique
31 chemin Joseph Aiguier 13402 Marseille Cedex 20
guibert@lma.cnrs-mrs.fr

⁽²⁾SNCF

Direction de l'Innovation et de la Recherche
45 rue de Londres 72379 Paris Cedex 08

Résumé :

La psychomécanique est l'étude des interactions entre les paramètres mécaniques d'une structure vibrante, les paramètres acoustiques des signaux rayonnés et leur perception par un auditeur. Nous réalisons cette étude parallèlement sur deux systèmes : une voiture de TGV et sur un système plus académique constitué d'une cavité rigide fermée par une plaque mince vibrante. Ce système peut être représentatif d'un habitacle de véhicule. Nous cherchons alors à évaluer l'influence des paramètres de modélisation sur la perception.

Le comportement vibroacoustique du système plaque/cavité est décrit par une méthode modale analytique et celui du TGV est décrit par une méthode modale expérimentale. Nous présentons ici les résultats de ces deux méthodes ainsi que ceux des premiers tests perceptifs.

Abstract :

Psychomechanics is the discipline that establishes links between the mechanical parameters of a structure, the radiated signal and the perception of a listener. The structures under study are a French High-Speed Train (TGV) and an academic system: a vibrating plate closing a rigid cavity. By analyzing the influence of mechanical parameters on perception, we can simplify modeling using only those with the highest influence.

Both systems are described by a modal analysis: the TGV with an experimental modal analysis and the plate/cavity system by an analytical modal analysis. This paper presents the modal analysis of both systems and the first results of the psychoacoustical tests.

Mots-clefs :

vibroacoustique ; analyse modale ; confort acoustique

1 Introduction

La modélisation vibroacoustique d'un système peut être simplifiée en ne tenant compte que d'un nombre restreint de paramètres (mécaniques, géométriques ou propres à la modélisation). Les aspects perceptifs peuvent être inclus aux critères de choix de cette restriction. Il faut donc identifier au préalable ces paramètres en caractérisant leur influence sur la perception du son rayonné. La discipline s'occupant de trouver les liens entre paramètres mécaniques, acoustiques et perceptifs s'appelle la psychomécanique.

Notre étude se concentre sur deux systèmes : un système couplé composé d'une cavité fermée par une plaque vibrante et une voiture de Train à Grande Vitesse (TGV). Le premier système est utile d'un point de vue académique et peut-être apparenté à un habitacle de véhicule. Ces deux systèmes sont supposés avoir un comportement modal sur notre domaine d'étude. Après avoir modélisé et/ou identifié expérimentalement leurs modes acoustiques et structuraux,

nous pouvons réaliser des tests psychoacoustiques permettant, entre autres, de caractériser l'influence perceptive de ces modes.

Cette communication est décomposée en trois parties. Nous présentons d'abord le système plaque/cavité (théorie, modèle expérimental et comparaisons) puis l'analyse modale effectuée à l'intérieur du TGV. Les premiers résultats de psychoacoustique terminent notre analyse.

2 Le système plaque/cavité

Le système plaque/cavité théorique est composé d'une plaque mince vibrante rectangulaire encastrée, bafflée et fermant une cavité parallélépipédique aux parois rigides. L'air est le fluide à l'intérieur et à l'extérieur de la cavité.

Les inconnues du problème sont le déplacement de la plaque et la pression acoustique à l'intérieur de la cavité. La méthode présentée ici est une adaptation de la méthode présentée dans Habault *et al.* (2003). L'équation du déplacement W de la plaque peut s'exprimer sous une forme variationnelle classique du type :

$$a(W, U) - \rho h \omega^2 \langle W, U \rangle + \omega^2 \rho_0 \beta_\omega(W, U) = \langle f, U \rangle$$

où β_ω , terme dépendant de la pulsation, correspond au terme de couplage entre la plaque, l'air extérieur et l'air contenu dans la cavité. On décompose alors le mouvement de la plaque sous la forme d'une somme de modes de résonance W_n de pulsation ω_n définis par la relation :

$$a(W_n, U) - \rho h \omega^2 \langle W_n, U \rangle + \omega_n^2 \rho_0 \beta_{\omega_n}(W_n, U) = 0$$

Après détermination des modes de résonance et du déplacement de la plaque, la pression acoustique est déterminée par l'intégrale de Kirchhoff-Helmholtz. La fonction de Green de la cavité nécessaire à ce calcul est obtenue par une méthode d'images. Le code de calcul correspondant à cette théorie a été intitulé Caprice (Calcul de pression à l'intérieur d'une cavité).

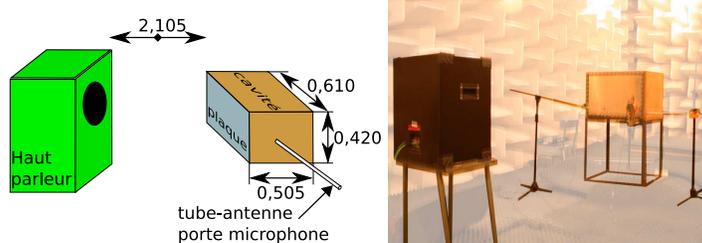


FIG. 1 – Schéma et photographie de l'expérience réalisée sur le système plaque/cavité (en chambre sourde). Les dimensions indiquées sont en mètres.

En considérant les résultats obtenus pour la plaque dans l'air sans et avec la cavité, nous pouvons voir l'influence de la cavité, notamment sur les fréquences des modes de résonance. Comme on le retrouve souvent dans la bibliographie - par exemple Dowell *et al.* (1977) - le premier mode de la plaque est le mode principalement influencé par la cavité car c'est un mode de « déplacement de volume ». Cependant l'influence de la cavité sur la première fréquence de plaque n'est sensible que pour un coefficient de réflexion b des parois supérieur à 0,5 (2% de variation pour $b = 0,5$ et 6% de variation pour $b = 1$).

Afin de confronter les résultats obtenus avec l'expérience, nous avons construit une cavité à cinq parois rigides en matériau sandwich et fermée par une plaque mince en aluminium. Les

conditions aux limites d'encastrement sont réalisées en enserrant la plaque entre deux mâchoires dont une est solidaire de la cavité. L'excitation est un bruit blanc produit par un haut-parleur faisant face à la plaque vibrante (cf. figure 1). La pression est alors mesurée à l'intérieur de la cavité.

La figure 2 présente les spectres de pression obtenus avec Caprice, avec une méthode couplée BEM/FEM développée au LMA et avec l'expérimentation. On peut remarquer que la tendance globale est respectée. Cependant, la première fréquence de résonance expérimentale de la plaque ne semble pas aussi élevée qu'on pourrait l'espérer par les calculs. Ce phénomène peut s'expliquer par les fuites acoustiques provoquées par les conditions aux limites expérimentales de la plaque. Aussi, la méthode de calcul de la fonction de Green pour un coefficient de réflexion proche de 1 produit des artefacts numériques en basses fréquences. En effet, la mesure au Tube de Kundt du coefficient de réflexion des parois de la cavité expérimentale est de 0,98. Ces artefacts peuvent être supprimés en ajoutant un nombre suffisant d'images au détriment du temps de calcul. D'autres validations sont en cours afin de mieux surmonter ces problèmes numériques.

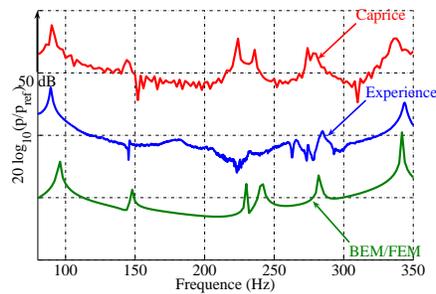


FIG. 2 – Spectres de pression obtenus avec Caprice, avec une méthode couplée BEM/FEM et avec l'expérimentation.

3 L'étude d'une voiture de TGV

Pour un TGV, la modélisation analytique est évidemment plus complexe que pour le système plaque/cavité. Nous avons donc décidé de caractériser le TGV expérimentalement grâce à une analyse modale en condition de roulement et sans connaissance a priori des sources excitatrices. Les modes déterminés sont alors uniquement les modes excités lorsque le train roule. Outre la disponibilité d'un TGV vide de voyageur, une des difficultés expérimentales est d'instrumenter la voiture avec un nombre suffisant de capteurs acoustiques et vibratoires. Les signaux doivent être synchrones et enregistrés sur un système d'acquisition portatif. Nous avons donc fait le choix de limiter le nombre de capteurs : sept microphones ICP, quatre accéléromètres mono-axiaux et un accéléromètre triaxial. Les photographies de la figure 3 montrent le positionnement de quelques-uns de ces capteurs.

Les trois méthodes d'analyse modale employées sont : la méthode LSCE (Least Square Complex Exponential), un modèle AR (Auto-Regressif) et la méthode SSI (Stochastic Subspace Identification). Nous avons décidé d'utiliser plusieurs méthodes classiques afin de recouper les résultats obtenus. L'implémentation de ces méthodes a été réalisée selon les théories exposées par Mohanty *et al.* (2004) pour la méthode LSCE, par Gautier (2006) pour le modèle AR et par Peeters *et al.* (1999) pour la méthode SSI.

Chacune de ces méthodes utilise les signaux temporels enregistrés sur ou à l'intérieur de la

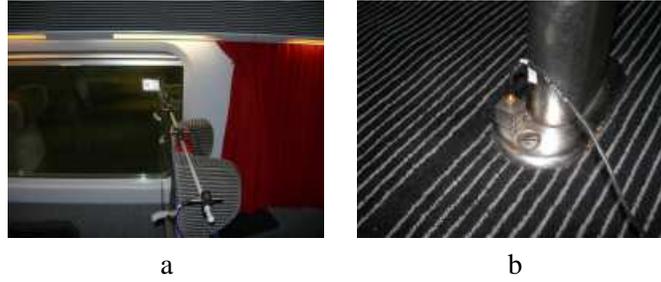


FIG. 3 – Positionnement de quelques capteurs à l'intérieur d'une voiture de TGV pour l'analyse modale en condition de roulement (a : microphones placés au niveau d'un siège et accéléromètre sur la fenêtre, b : accéléromètre triaxe au pied d'une table)

structure étudiée. La méthode LSCE utilise l'hypothèse que la fonction d'intercorrélation R_{ij} entre deux signaux y_i et y_j est de la forme :

$$R_{ij}(\Delta t) = \sum_{r=1}^{2N} C_r^{ij} e^{s_r \Delta t}$$

où $s_r = -\omega_r \xi_r \pm \omega_r \sqrt{1 - \xi_r^2}$ avec ω_r et ξ_r , la pulsation modale et l'amortissement modal du r^e mode et C_r^{ij} un coefficient de pondération. N est le nombre de modes désiré et Δt la période d'échantillonnage des signaux.

En général, le signal y_j est appelé signal de référence et il est préférable que son comportement soit le plus proche de celui de la source. Le modèle AR utilise le même type d'hypothèse mais seulement pour les fonctions d'autocorrélation. La méthode SSI utilise une représentation d'état discrétisée du système ; les valeurs propres de la matrice d'état sont les mêmes exponentielles complexes utilisées pour la méthode LSCE.

Ces trois algorithmes prennent en entrée, entre autres, le nombre N voulu de modes. Il est donc nécessaire de réitérer chaque algorithme en augmentant la valeur de N afin de distinguer les modes « stables » d'une itération à l'autre. C'est le rôle des diagrammes dit de stabilisation présentés sur la figure 4. Pour chaque nombre N de modes (en ordonnée), on place sur ce diagramme un point correspondant à une fréquence modale (en abscisse) seulement si on retrouve cette fréquence modale pour le nombre $N+1$.

Nous ne présenterons ici seulement les résultats de la méthode LSCE car ils sont comparables aux résultats des autres méthodes.

Après identification des principaux modes acoustiques, nous avons réutilisé la méthode LSCE pour resynthétiser les sons. L'idée principale vient de l'approximation :

$$\underbrace{|Y_i(f)|^2}_{\text{que l'on souhaite synthétiser}} \sim \underbrace{\left| \frac{Y_i(f)}{Y_j(f)} \right|^2}_{\text{reconstruit à partir de l'analyse modale}} \times \underbrace{|Y_j(f)|^2}_{\text{signal de référence mesuré}}$$

Le terme $H(f) = \left| \frac{Y_i(f)}{Y_j(f)} \right|^2$ est obtenu avec $H(f) = \frac{S_{i/j}(f)}{S_{j/j}(f)} = \frac{TF(R_{ij})}{TF(R_{jj})}$ avec TF la transformée de Fourier et les R_{ij} obtenues à partir des coefficients et exponentielles identifiées par l'analyse modale. Nous obtenons alors le spectre $Y_i(f)$ que nous dotons d'une phase aléatoire. Le signal temporel resynthétisé approché de $y_i(t)$ est alors obtenu par transformée de Fourier inverse.

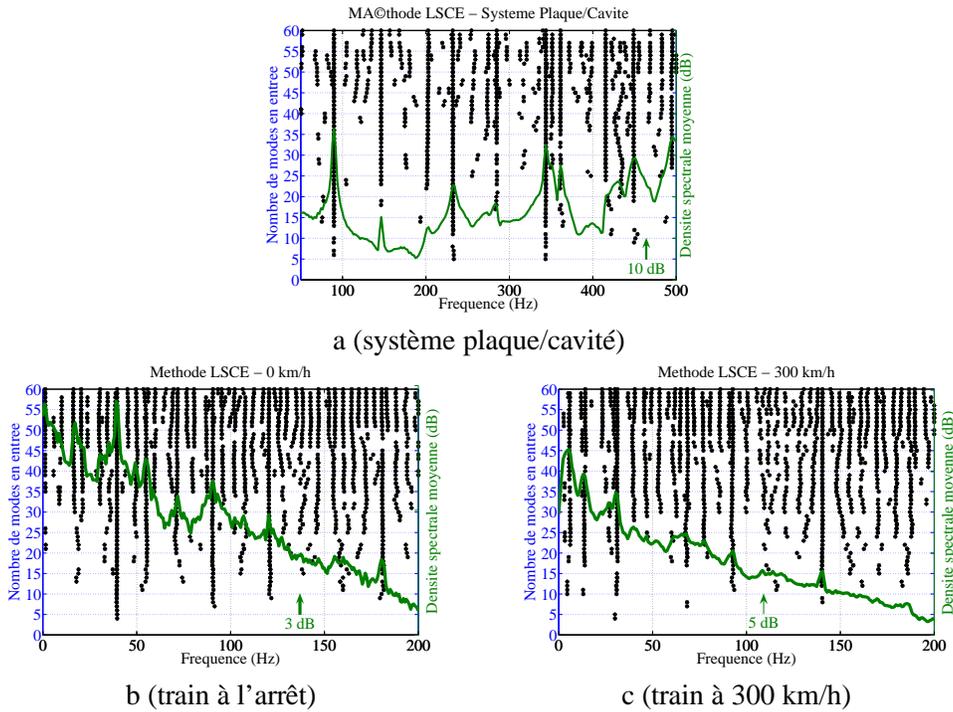


FIG. 4 – Diagrammes de stabilisation. Chaque point correspond à une fréquence modale trouvée pour un nombre de modes N donné en entrée de l'algorithme LSCE. La courbe épaisse correspond à une moyenne des spectres des signaux analysés.

La figure 4 présente les résultats obtenus avec la méthode LSCE sur des signaux de pression. La figure 4-a présente l'analyse modale opérationnelle réalisée sur le système plaque/cavité. Cette analyse avait pour but de valider les algorithmes utilisés. Les modes identifiés par l'analyse correspondent pour la plupart aux modes du système plaque/cavité trouvés par la théorie. Les graphiques b et c présentent les résultats obtenus sur les signaux de pression enregistrés à l'intérieur du TGV. Sur le graphique b, le TGV était à l'arrêt ; les principales sources correspondent aux équipements de confort (ventilation, climatisation, transformateurs, ...). Sur le graphique c, le TGV était en condition de roulement (à 300 km/h) ; les principaux modes identifiés par l'algorithme correspondent en réalité à des excitations harmoniques (à 30 Hz, 90 Hz, 140 Hz) résultant du contact roue-rail. L'algorithme LSCE permet cependant de détecter des raies autres que celles correspondant à des excitations harmoniques connues. Ainsi, nous avons pu déterminer certains modes et alors des signaux de resynthèse. Ces derniers serviront pour des tests psychoacoustiques.

4 Une première étude perceptive sur le système plaque/cavité

Un premier test perceptif a été réalisé. Ce test de dissimilarité correspondait à la comparaison par paire de quinze sons correspondant au signal acoustique à l'intérieur du système plaque/cavité dans le cas d'un impact avec un marteau sur la plaque vibrante. Chacun de ces sons a été synthétisé par notre modèle numérique avec plusieurs combinaisons des trois paramètres suivants : la valeur du coefficient de réflexion des parois de la cavité (entre 0 et 1), le nombre de sources images dans le calcul de la fonction de Green et le couple de points : point d'impact sur la plaque / point d'écoute à l'intérieur de la cavité. Seuls les résultats principaux sont présentés ici, Guibert *et al.* (2006) présente cette expérience plus en détail. Cette analyse a

permis de mettre en avant les paramètres auxquels l'oreille est sensible pour ce type de signaux.

En premier lieu, l'oreille est sensible à la quantité de modes excités ou captés au point d'écoute. Ceci est relié au couple point d'impact/point d'écoute. D'un point de vue psychoacoustique, cette sensibilité est reliée au caractère non tonal (bruité) ou tonal des stimuli, moins il y a de modes excités, plus le signal a un caractère tonal.

En deuxième lieu, les auditeurs ont discriminé les stimuli selon la position relative des modes dans le spectre. Cette caractéristique, relative au timbre et plus particulièrement à la brillance des stimuli, est reliée au centre de gravité spectral. Cette analyse montre aussi que pour un couple de point d'impact/point d'écoute donné, plus le coefficient de réflexion est élevé, plus le centre de gravité spectral est bas. L'effet de la cavité est donc perçu par une élévation du niveau des basses fréquences.

Enfin, d'un point de vue numérique, ce type d'analyse indique aussi le nombre minimal de sources images nécessaire au calcul de la fonction de Green à partir duquel la précision ne devient plus perceptible. Comme on peut s'y attendre, la discrimination entre stimuli sur le nombre d'images est d'autant plus grande que le coefficient de réflexion est élevé.

5 Conclusions

Nous venons de voir les étapes d'une étude de psychomécanique. La modélisation vibroacoustique des deux structures en question a été réalisée grâce à une méthode modale analytique pour le système le plus académique et une méthode modale expérimentale pour le système industriel. Chacune de ces deux modélisations permet une resynthèse de signaux correspondant à une modification d'un paramètre physique. Les tests psychoacoustiques montrent alors quelle est son influence sur la perception. La suite de ces travaux est donc la réalisation d'autres tests psychoacoustiques. Pour le système plaque/cavité, ils pourront déterminer l'influence du volume de la cavité et pour le TGV, l'importance perceptive des modes identifiés avec l'analyse modale. Pour la SNCF, la finalité de ces travaux est de quantifier l'impact des principaux choix de conception (matériaux, dimensions) des voitures voyageurs sur le confort acoustique à bord.

Références

- Dowell, E.H., Gorman, G.F., Smith, D.A. 1977 Acoustoelasticity : General theory, acoustic natural modes and forced response to sinusoidal excitation, including comparisons with experiment *J. Sound Vib.* **52(4)** 519-542
- Gautier, P.E. 2006 Vibrations et acoustique. Etude de cas industriels. *Support méthodologique de cours de Centrale Paris (2e année)*
- Guibert, E., Habault, D., Poisson, F., Gautier, P.E. 2006 Psychomechanics of vibrating structures : application to train coaches *Euronoise 2006*
- Habault, D., Filippi, P.J.T. 2003 On the transient response of a fluid-loaded structure represented by a series of resonance modes *J. Sound and Vib.* **259(5)** 1269-1275
- Mohanty, P., Rixen, D.J. 2004 Operational modal analysis in the presence of harmonic excitation *J. Sound and Vib.* **270(1)** 93-109
- Peeters, B., De Roeck, G. 1999 Reference-Based stochastic subspace identification for output-only modal analysis *Mech. Syst. Signal Pr.* **13(6)** 855-878