

Psychomécanique appliquée aux Trains à Grande Vitesse

Emmanuelle Guibert, Dominique Habault
CNRS

Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique
31 chemin Joseph Aiguier
13402 Marseille CEDEX 20
E-mail : guibert@lma-cnrs-mrs.fr
E-mail : habault@lma-cnrs-mrs.fr

Pierre-Etienne Gautier, Franck Poisson
SNCF

Direction de l'Innovation et de la Recherche
45 rue de Londres
72379 Paris CEDEX 08
E-mail : pierre-etienne.gautier@sncf.fr
E-mail : franck.poisson@sncf.fr

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 ce type d'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 par exemple d'un habitacle de véhicule.

Le but d'une telle analyse est de cibler les éléments de la structure responsables des attributs perceptifs du son. Cela peut être d'une grande aide pour le design sonore ou encore lorsque l'on cherche à simplifier un modèle numérique.

Dans notre étude, 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 obtenus avec 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 psychoacoustical tests.

Une modélisation vibroacoustique d'un système complexe ne s'avère très coûteuse en temps de calcul. Pour le réduire, on peut limiter le nombre de paramètres pris en compte, la complexité de la méthode ou encore la précision du résultat. Si l'on s'intéresse à un signal acoustique, la perception auditive peut être utile pour indiquer ces limitations. Cela nécessite donc une analyse perceptive des résultats, c'est-à-dire comprendre en quoi la modification d'un paramètre de modélisation change la sensation auditive. Ce type d'analyse est appelé analyse psychomécanique car elle établit les liens entre les propriétés mécaniques d'un système et la perception du son rayonné. Cela peut aussi être utile pour un designer sonore car les paramètres ou les éléments d'un système vibrant qui ont le plus ou peu d'influence sur la perception sont alors mis en exergue.

Notre étude se concentre ici 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.

Cet article est décomposé 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.

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 utilisée ici est une adaptation de la méthode présentée dans Habault et al. (2003). L'équation du déplacement de la plaque s'exprime sous une forme variationnelle faisant un bilan énergétique du système complet (fluide – plaque – cavité). Ceci permet alors de décomposer le mouvement de la plaque sous la forme d'une somme de modes dits «de résonance».

La pression acoustique est ensuite déterminée par l'intégrale de Kirchhoff-Helmholtz qui relie pression et déplacement. Cette intégrale fait intervenir la fonction de Green de la cavité ; nous avons fait le choix d'utiliser une méthode d'images pour la formuler. Le code de calcul correspondant à cette théorie a été intitulé CaPriCe (Calcul de pression à l'intérieur d'une cavité).

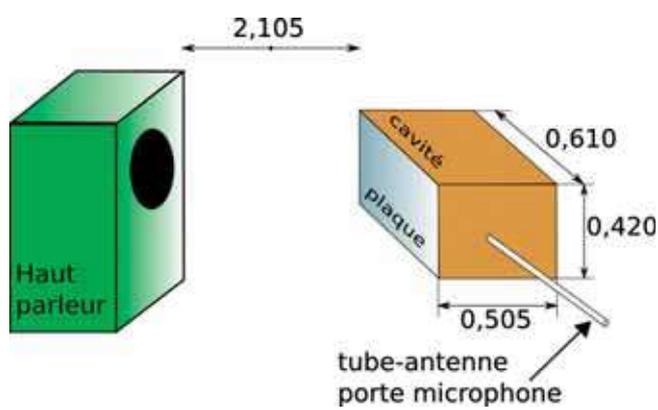


Fig 1 : Schéma et photographie de l'expérience réalisée sur le système plaque/cavité (en chambre sourde). Les dimensions indiquées sont en mètres

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. Le matériau sandwich est constitué de trois couches : deux plaques de médium d'épaisseurs différentes enserrant une couche d'élastomère. Une étude préliminaire a montré l'efficacité d'un tel dispositif dont les vibrations sont négligeables par rapport à celle de la plaque vibrante. Les conditions aux limites d'encastrement de la plaque sont réalisées en la serrant 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 l'expérience et avec une méthode développée au Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique, utilisant des éléments finis et de frontière. On peut remarquer que la même tendance est obtenue avec ces trois méthodes. 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 artéfacts 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 artéfacts peuvent être supprimés en ajoutant un nombre suffisant d'images au détriment du temps de calcul.

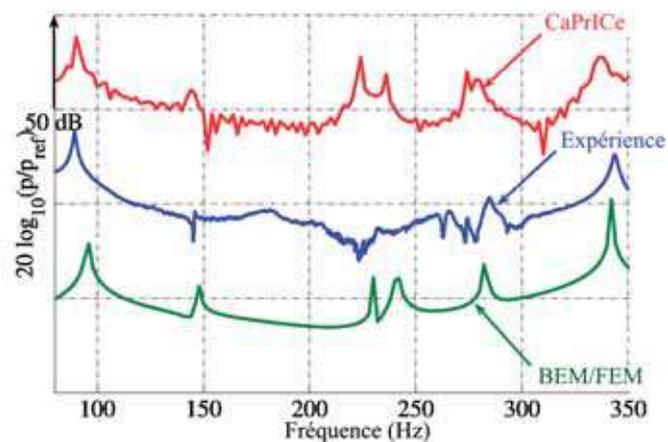


Fig. 2 : Spectres de pression obtenus avec Caprice, avec une méthode couplée BEM/FEM et avec l'expérience. Pour une meilleure comparaison visuelle, les courbes sont volontairement espacées de 50 dB en ordonnée

L'étude d'une voiture de TGV en basses fréquences

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 opérationnelle c'est-à-dire en condition de roulement et sans connaissance *a priori* des sources excitatrices. Les modes déterminés, dans la bande 0-200 Hz, 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 monoaxiaux et un accéléromètre triaxial. Les photographies de la figure 3 montrent le positionnement de quelques-uns de ces capteurs.



a)



b)

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)

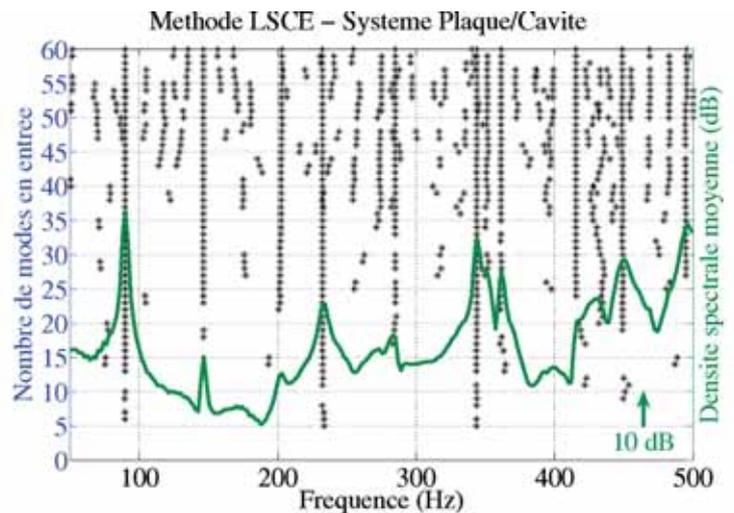
Les trois méthodes d'analyse modale employées sont : la méthode LSCE (Least Square Complex Exponential), un modèle AR (Auto-Régressif) et la méthode SSI (Stochastic Subspace Identification). Nous avons décidé d'utiliser plusieurs méthodes classiques afin de recouper les résultats obtenus. L'implémentation 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 structure étudiée. La méthode LSCE repose sur l'intercorrélacion des signaux qui peut s'écrire sous la forme d'une somme d'exponentielles pondérées dont l'argument contient les informations modales

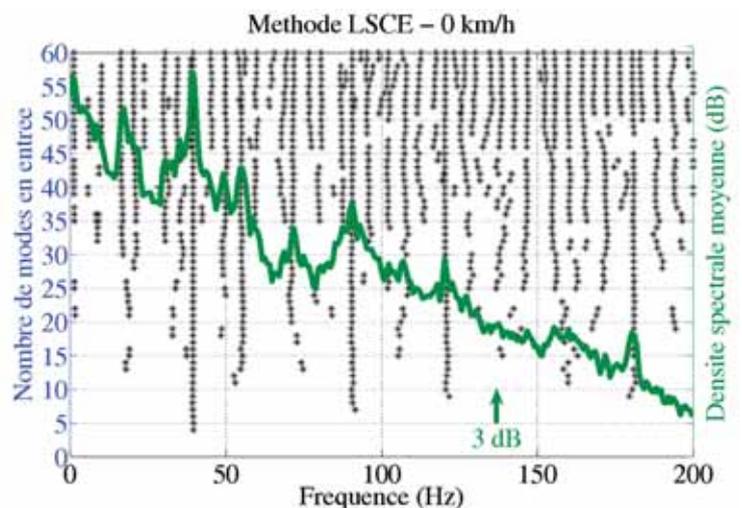
(amortissements et fréquences). Le modèle AR utilise le même type d'hypothèse mais pour les fonctions d'autocorrélation. La méthode SSI utilise une formulation matricielle itérative (dite représentation d'état) du système qui relie chaque échantillon à son prédécesseur. Les matrices de cette formulation contiennent les informations modales.

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 et non créés par des artefacts numériques. 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.

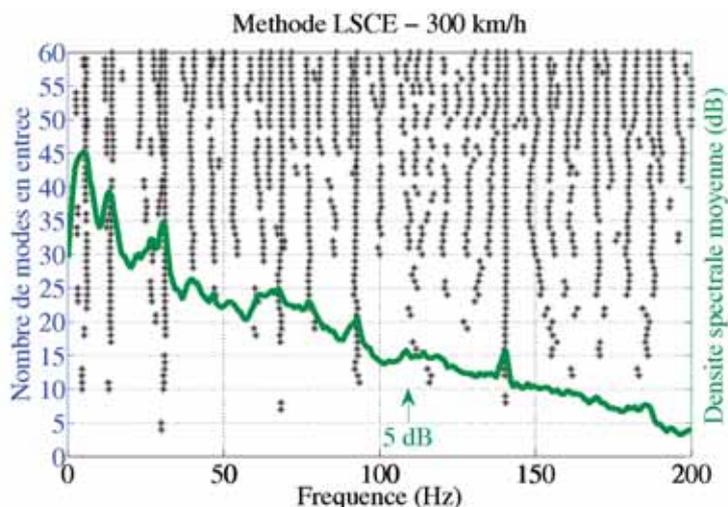
Après identification des principaux modes acoustiques, nous avons réutilisé la méthode LSCE pour resynthétiser les sons. Pour cela, nous resynthétisons en premier les intercorrélacions, puis les spectres que nous dotons ensuite d'une phase aléatoire. Par transformée de Fourier inverse, on obtient alors un signal temporel.



a : système plaque/cavité



b : train à l'arrêt



c : train à 300 km/h

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 (page 11) 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 (page 11), 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 entre les roues et le rail. L'algorithme LSCE permet cependant de détecter des raies autres que celles qui correspondent 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.

Une première étude perceptive sur le système plaque/cavité

Les tests perceptifs utilisés dans cette étude sont des tests de dissimilarité : pour un ensemble de stimuli, un auditeur doit quantifier la dissimilarité entre chaque son. Plus précisément, les stimuli sont présentés par paire. Le jugement se fait alors en donnant une note sur une échelle continue dont une extrémité correspond à des sons jugés semblables et l'autre à des sons jugés très dissemblables (cf. figure 5). Une analyse statistique des résultats permet alors de placer des points, un point représentant un son, dans un espace, appelé «espace perceptif». Dans ce dernier, plus la distance entre deux points est grande, plus les sons correspondants seront dissemblables. Aucune indication n'étant donnée aux auditeurs, le but

de cette représentation est de déterminer à quel paramètre est reliée chaque dimension de l'espace obtenu. Nous obtenons ainsi les critères perceptifs auxquels ont été sensibles les auditeurs et nous pouvons alors remonter aux paramètres de la modélisation ou de la structure correspondants.

Un premier test a été réalisé. Il correspond à la comparaison 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 Caprice 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. Tous les sons ont été égalisés en sonie. Cette analyse a permis de mettre en avant les paramètres auxquels l'oreille est sensible pour ce type de signaux.

L'espace perceptif obtenu est un espace à trois dimensions. La figure 6-a présente la projection de cet espace dans le plan 1^{ère}-2^e dimension.

Lorsque l'on s'intéresse à la disposition des points selon l'axe de la première dimension, on se rend compte que 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,



Fig. 5 : Interface de réponse de l'auditeur lors du test de dissimilarité. La dissimilarité entre deux stimuli est quantifiée à l'aide d'un ascenseur allant de «très semblable» à «très dissemblable»

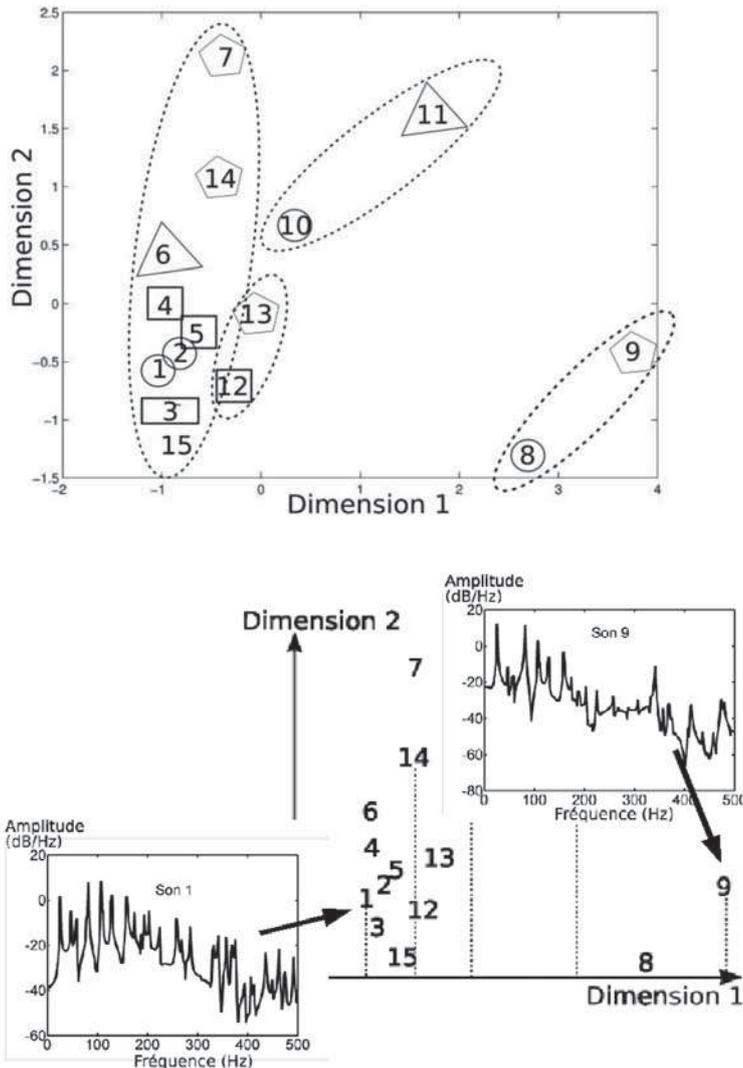


Fig. 6 : Les deux premières dimensions de l'espace perceptif obtenu avec le test de dissemblance. Les stimuli sont notés de 1 à 15. Sur le graphique a, les stimuli contenus dans la même ellipse correspondent aux sons avec le même couple (point d'impact/point d'écoute). Les stimuli avec la même forme géométrique correspondent aux sons produits avec le même coefficient de réflexion (pas de forme : 0 ; rectangle : 0,1 ; cercle : 0,3 ; carré : 0,5 ; triangle : 0,7 ; pentagone : 0,9). Les stimuli dans une même ellipse, avec la même forme, correspondent à différents nombre d'images dans le calcul de la fonction de Green. Sur le graphique b, le spectre des signaux 1 et 9 est affiché afin de mieux comprendre le caractère tonal/bruité de la première dimension.

moins il y a de modes excités, plus le signal a un caractère tonal. La figure 6-b présente les spectres correspondants aux points les plus extrêmes de la première dimension. Ces deux graphiques montrent que la densité modale du son 1 est en effet plus importante que celle du son 9.

Pour la deuxième dimension, 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.

La troisième dimension fut la dimension la plus difficile à déterminer. Contrairement aux deux dimensions précédentes,

elle est reliée à l'évolution temporelle des signaux qui est plus ou moins modulée.

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. En effet, on peut voir par exemple sur la figure 6-a que la distance entre les stimuli 4 et 5 est faible ($b = 0,5$) contrairement à la distance entre les stimuli 7 et 14 ($b = 0,9$).

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.

Actuellement, un test perceptif de dissemblance est mené sur des sons (entre 0 et 200 Hz) enregistrés à l'intérieur d'un TGV Duplex (2 niveaux) et d'un TGV Réseau (1 niveau). Les premiers résultats montrent l'influence de l'excitation due au contact roue-rail et de la présence de très basses fréquences. Pour le système plaque/cavité, les prochains tests psychoacoustiques détermineront l'influence du revêtement de la cavité ou du matériau de la plaque 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 bibliographiques

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