

# Environnement vibratoire des infrastructures de tramways

Michel Villot,  
Philippe Jean,  
Cathy Guigou-Carter,  
Département Acoustique et Eclairage,  
CSTB,  
24, rue Joseph Fourier,  
38400 Saint Martin d'Hères,  
tél. : 04 76 76 25 25,  
fax : 04 76 44 20 46,  
e-mail : mvillot@cstb.fr

Cet article synthétise une étude concernant l'environnement vibratoire des infrastructures de tramways effectuée récemment dans le cadre du programme PREDIT. L'étude s'est appuyée à la fois sur des mesures vibratoires effectuées sur différents sites (et différents types de véhicules) et sur deux modèles de calcul : un modèle éléments finis 2D sol/structures et un modèle analytique 3D de sol multicouche sans structure. Parmi les résultats présentés, il est montré en particulier que les spectres vibratoires au sol, à proximité des voies varient beaucoup en fonction du type de véhicule et de la vitesse de ce dernier, que les atténuations des niveaux vibratoires avec la distance dépendent beaucoup de la bande de fréquence considérée et que des mesures sur site de caractérisation de sol sont recommandées dans une étude d'impact. Dans une dernière partie, le problème complexe des structures réceptrices est posé.

This paper summarizes a study on the vibration impact of tramway infrastructures, recently performed in the frame of the PREDIT program. The work is based on both measurements performed at different sites (with different types of vehicles) and on two calculation models: a 2D finite element soil/structure model and a 3D analytical multilayered soil model. Among the results presented, it is mainly shown that the vibration level spectra at the ground surface close to the tracks greatly depend on the type of vehicles and their speed, that the vibration attenuation (versus distance) greatly depends on the frequency band considered and that in situ measurements for soil characterization are recommended in vibration impact studies. The last section of the paper deals with the complex problem of the receiving structures.



et article synthétise une étude concernant l'environnement vibratoire des infrastructures de tramways effectuée en 2000-2001, en relation avec la SEMALY\* ; cette étude a été faite dans le cadre du programme PREDIT\* à la demande de la Direction des transports terrestres du ministère des transports [1]. L'étude s'est appuyée à la fois sur des mesures vibratoires effectuées sur différents sites (et différents types de véhicules) et sur deux modèles de calcul relativement simples :

- un modèle de calcul 2D sol/structures (logiciel CSTB MEFISSTO [2]), fondé sur une approche éléments finis (FEM) pour les structures et éléments finis de frontière (BEM) pour les sols et qui permet de modéliser des structures enterrées dans les sols multicouches infinis,
- un modèle de calcul 3D de sol multicouche sans structure (logiciel CSTB CASC.sol), basé sur une approche par ondes et couches infinies, beaucoup plus simple et rapide que MEFISSTO et permettant d'accéder directement aux longueurs d'onde des ondes vibratoires dans les sols et donc d'identifier

les types d'onde et de mieux comprendre les phénomènes physiques en présence.

L'étude a été limitée aux voies courantes rectilignes avec pose classique ; les autres types de pose (STEDEF, dalle flottante..) ainsi que les voies avec courbes prononcées n'ont pas été étudiées.

Cet article est divisé en 3 parties : la première (section 2) est relative à la source vibratoire, la partie suivante (section 3) est relative à la propagation des vibrations à distance dans le sol et une dernière partie (section 4) pose le problème des structures réceptrices (bâtiments où se trouvent les riverains).

## La source vibratoire

La source a été modélisée de manière simplifiée par une force (inconnue) appliquée à une plateforme en béton (figure 1) de

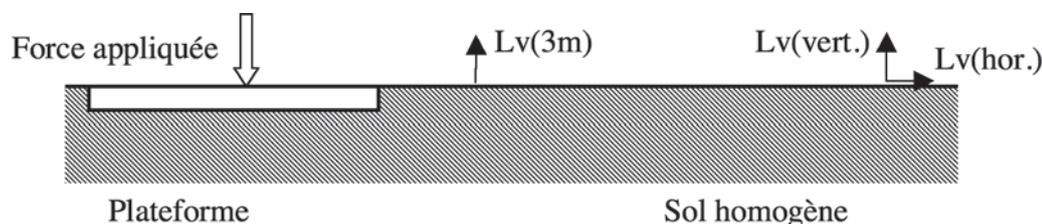


Fig. 1 : Configuration de base (logiciel MEFISSTO)

manière à avoir un champ vibratoire réaliste à proximité des voies. Tous les niveaux vibratoires calculés par le modèle (ici le logiciel MEFISSTO) ont été référencés au niveau vibratoire vertical en surface du sol à 3m du rail extérieur, ce niveau étant généralement mesuré ; ainsi, lorsque ce dernier est connu, des niveaux absolus peuvent être estimés par le modèle. Pour une pose de voie classique (avec un rail en bon état), ce niveau à 3m dépend principalement du type de véhicule, de la vitesse de passage du tram et du terrain si le comportement de ce dernier s'écarte beaucoup de celui d'un sol moyen. Des données existantes et les campagnes de mesures effectuées dans le cadre de cette étude sur des sites sans particularité au niveau du sol, ont montré que les spectres vibratoires à 3m de véhicules de différents types roulant à vitesses comparables sont très différents en niveau et en contenu fréquentiel : la figure 2 montre l'exemple des trams de Grenoble et de Strasbourg qui ont un comportement basses fréquences très différents. De plus, pour un type de véhicule donné, ces spectres varient en fonction de la vitesse de passage avec des variations qui dépendent des bandes de fréquences considérées.

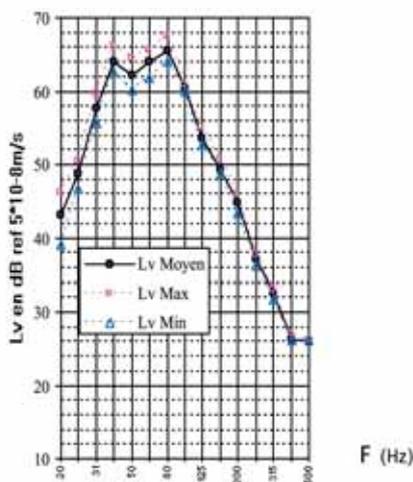


Fig. 2a : Niveaux vibratoires à 3m ; tramway de Grenoble (40 km/h), pose classique

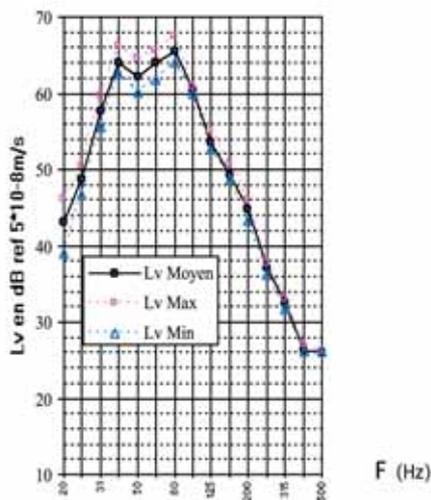


Fig. 2b : Niveaux vibratoires à 3m ; tramway de Strasbourg (35 km/h), pose classique

On voit alors ici la nécessité, pour avoir des données d'entrée correctes dans une étude d'impact vibratoire, de disposer pour le type de véhicule choisi, soit de résultats de mesures de spectres vibratoires en surface du sol obtenues dans des conditions bien définies (à partir d'une norme de mesure qu'il reste à définir), soit d'un modèle de source complet, prenant en compte les caractéristiques dynamiques du véhicule, un spectre type de rugosité roue-rail (amplitude des déformations en fonction de leur longueur d'onde), les caractéristiques dynamiques du rail et de sa semelle cannelée et l'impédance d'entrée de l'ensemble plateforme/sol. De tels modèles existent dans la littérature et mériteraient d'être testés dans le cas des tramways (avec le problème d'avoir les données d'entrée nécessaires, en particulier celles relatives au véhicule considéré) ; cette étude particulière sur les modèles de source n'a pas été faite car elle sortait du cadre de notre travail. Notons enfin que pour un même type de véhicule, les spectres vibratoires générés par les véhicules d'un parc donné varient beaucoup ; une campagne de mesure à Grenoble a montré que l'écart type du parc de la SEMITAG\* était de l'ordre de 2,5 dB sur toute la gamme de fréquence considérée, correspondant à des écarts extrêmes de 10 dB entre certaines rames. Cette dispersion doit être prise en compte dans une étude d'impact, par exemple en prenant une marge de 3 dB par rapport à des niveaux moyens ; toutefois il ne faut pas tomber dans l'extrême et dimensionner une infrastructure à partir des niveaux les plus mauvais, générés par quelques rames en mauvais état ; dans une bonne gestion d'un parc de véhicule, ces rames doivent être identifiées, retirées de la circulation et remises en état.

### Propagation

La question de l'importance de la nature du sol sur la propagation des vibrations et plus particulièrement leur atténuation en fonction de la distance a été bien entendu au cœur de l'étude.

Tout d'abord, une étude paramétrique en utilisant le logiciel MEFISSTO avec des sols homogènes ou multicouches de différentes caractéristiques mécaniques a été effectuée et nous a donné un certain nombre de réponses. Il a été montré en particulier que les atténuations des niveaux vibratoires en fonction de la distance ne peuvent être simplifiés à une valeur unique en dB/m mais dépendent de la bande de fréquence considérée ; la figure 3 montre pour un sol moyen, qu'il y a un facteur 2.5 entre l'atténuation en dB/m à l'octave 31Hz et celle à l'octave 125 Hz ; cela entraîne des différences

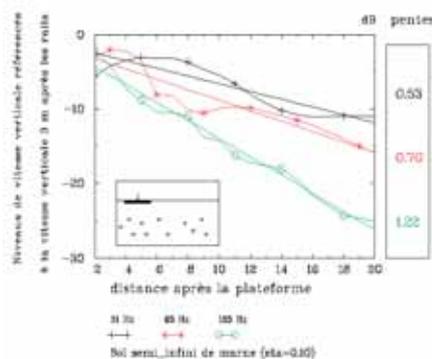


Fig. 3 : Niveaux vibratoires en fonction de la distance (la pente moyenne des courbes est donnée en dB/m)

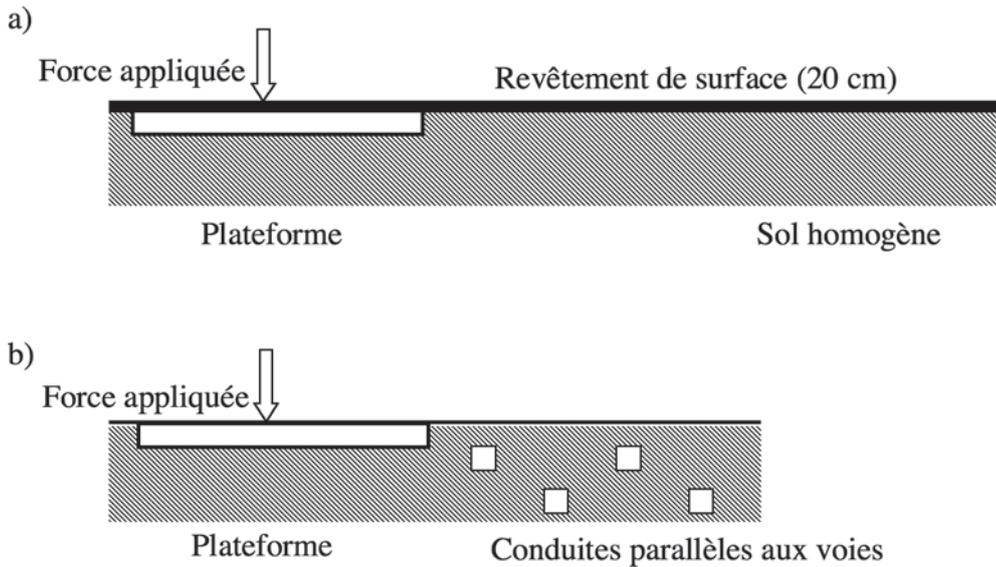


Fig. 4 : Configurations particulières (logiciel MEFISSTO)

d'atténuation importantes suivant le type de tram, compte tenu de la diversité du contenu fréquentiel des niveaux vibratoires générés par des véhicules différents comme cela est montré section 2.

Les cas particuliers de sol avec revêtement de surface (chaussée par exemple) ou avec hétérogénéité de type structure enterrée (conduite enterrée parallèle aux voies par exemple) ont également été considérés à partir de configurations très simplifiées modélisées avec le logiciel MEFISSTO de façon à donner quelques tendances : un revêtement d'une vingtaine de cm, deux fois plus dense et plus rigide que le sol moyen en dessous (figure 4a) ne modifie pas sensiblement les niveaux vibratoires générés à différentes distances des voies ; il ne semble donc pas qu'un revêtement mince modifie significativement la propagation à distance. Quant aux hétérogénéités (conduites vides ou pleines parallèles aux voies comme le montre la figure 4b), mis à part quelques effets particuliers à courte distance, elles ont pour effet une atténuation plus importante des vibrations en fonction de la distance, en particulier aux moyennes fréquences (octave 63 Hz et au delà). Notons que si ces hétérogénéités ne sont pas prises en compte, les niveaux vibratoires sont surestimés et correspondent alors à un résultat donné avec une marge de sécurité.

La propagation dans le cas de sols stratifiés sans la présence de structure a été étudiée plus en détail au moyen du logiciel multicouche CASC.sol qui donne directement accès aux longueurs d'onde. La figure 5 montre, pour un sol avec excitation linéique en surface, les spectres en nombre d'onde (inverse de la longueur d'onde à une constante près) à la fréquence de 63 Hz, obtenus en surface et à 3m de profondeur dans les deux cas suivants : un sol homogène moyen de type limon et le même sol avec une couche plus dure à 3m de profondeur. Deux modes de propagation principaux peuvent être identifiés correspondant aux maxima du spectre : l'onde de Rayleigh du sol homogène, dominante en surface, même en présence d'une couche plus rigide en profondeur et un

mode généré par la couche plus dure, dominant à 3m de profondeur mais d'une dizaine de dB en dessous du niveau de l'onde de Rayleigh en surface. Cet exemple particulier montre bien que l'énergie est localisée au voisinage de la surface du sol, que les niveaux vibratoires sont atténués en profondeur, même dans le cas de sols stratifiés, et que des modes de couches peuvent présenter une amplification en profondeur mais leur niveau vibratoire est souvent bien inférieur à l'onde de Rayleigh en surface. Il semble donc que dans bien des cas, des simplifications sur la structure du sol puissent être faites sans modifier de façon sensible les ondes de surface, dominantes dans la propagation des vibrations générées par les trams.

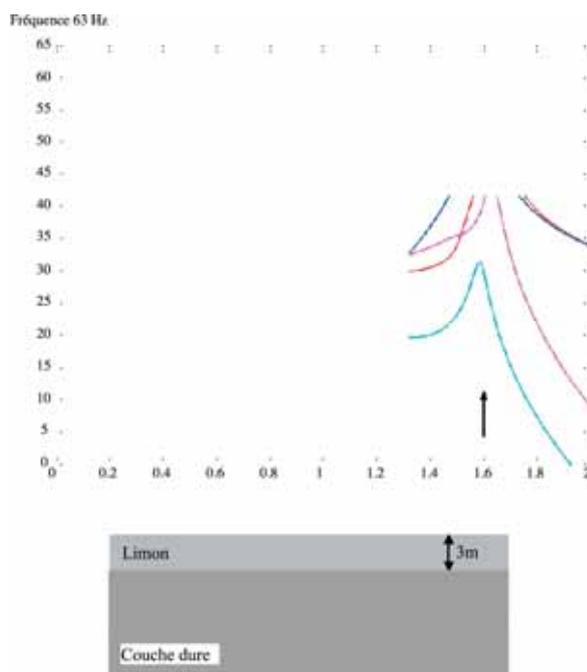


Fig. 5 : Spectres en nombre d'onde (fréquence 63 Hz) de la vitesse vibratoire en surface et à 3m de profondeur (logiciel CASC.sol)

Se pose alors le problème de la connaissance des caractéristiques dynamiques des sols, et cela pour chaque couche si un modèle bi ou tri couche est nécessaire. Si une coupe géologique du site existe, des données dynamiques (principalement module d'Young, coefficient de Poisson et facteur de perte énergétique) peuvent être trouvées dans la littérature. Toutefois les validations expérimentales effectuées au cours de cette étude sur un certain nombre de sites nous montrent que les données trouvées dans la littérature sont souvent assez éloignées de la réalité : dans un site testé, les vitesses de propagation mesurée étaient deux fois plus faibles que les vitesses de propagation calculées à partir de données de la littérature. Il faut donc être très prudent dans l'utilisation de ces données et des mesures sur site sont recommandées pour caler un modèle de sol.

Dans cette étude, deux types de mesures vibratoires en surface ont été utilisés pour caractériser les sols ; toutes deux utilisent une source vibratoire artificielle (choc d'une masse sur une petite dalle en béton posée sur le sol) et peuvent donc être effectuées en phase en conception de l'infrastructure :

- une simple mesure de décroissance de niveaux vibratoires en fonction de la distance qui renseigne sur les atténuations mais ne permet pas de séparer les deux caractéristiques dynamiques du sol que sont le facteur de pertes et la vitesse de propagation (qui est elle-même fonction du module d'Young et de la masse volumique) ; l'atténuation en dB/m dépend en effet du facteur de pertes mais aussi du nombre de longueurs d'ondes comprises dans la distance considérée.
- une mesure inter spectrale à partir de deux capteurs (méthode SASW : « Spectral Analysis of Surface Waves » [3]) qui permet d'estimer les vitesses de propagation en surface à partir des différences de phase des signaux mesurés.

De telles mesures de caractérisation de sol ont été effectuées sur trois sites (un site à Grenoble et deux sites à Lyon) de façon à caler les modèles de sols simplifiés correspondants ; le logiciel CASC.sol a été utilisé pour cette validation car il permet une excitation réaliste de type ligne de source décorrélée. Les atténuations calculées par le modèle à différentes distances sont, pour les trois sites testés, très voisines des atténuations directement mesurées sur site avec source réelle (le tramway), validant ainsi le modèle et la démarche.

### Le problème des structures réceptrices : perspectives

Si l'on veut connaître le bruit solidien rayonné chez le riverain, deux questions doivent être posées au niveau des structures réceptrices :

- comment vibrent les composants de bâtiment enterrés, en contact avec un sol mis en vibration?
- comment les vibrations sont-elles transmises dans le bâtiment puis rayonnées sous forme de bruit solidien ?

On pourrait penser que l'approche 2D FEM/BEM qui prend en compte sol et structures donne des ordres de grandeur corrects des niveaux vibratoires des structures réceptrices dans le cas de long bâtiments parallèles à des voies ferrées en surface et donc répond à la question a) ; notre expérience montre qu'il n'en est rien, et que plusieurs raisons peuvent

être proposées : en particulier le modèle 2D ne considère que les ondes de surface en incidence normale sur les parois et les contacts entre sol et structures enterrées sont supposés parfaits dans le modèle. Le CSTB travaille actuellement sur ce sujet, à la fois à partir de modèles académiques (parois et poteaux infinis enterrés dans des sols homogènes) en comparant les impédances d'onde des éléments [4] et également à partir d'une modélisation sol/structure par éléments finis 2D 1/2 (la configuration étudiée est alors infinie dans la troisième dimension, celle parallèle aux voies mais avec une excitation de type sources ponctuelles alignées plus proche de la réalité) ; cette dernière approche, étudiée actuellement dans le cadre d'un contrat ADEME, permet en particulier de prendre en compte les ondes de surface en incidence oblique de manière moins « lourde » qu'une modélisation 3D.

La question b) est elle aussi complexe pour deux raisons :

- plusieurs types d'ondes participent à la transmission des vibrations dans les structures : les ondes de flexion avec déplacement perpendiculaire aux parois mais aussi les ondes avec déplacement dans le plan des parois ou dans l'axe des poteaux
- plusieurs composants de bâtiment participent à la transmission entre les structures réceptrices enterrées, généralement non habitées, et les parois des locaux habités, généralement au dessus du sol ; la figure 6 en donne un exemple simplifié.

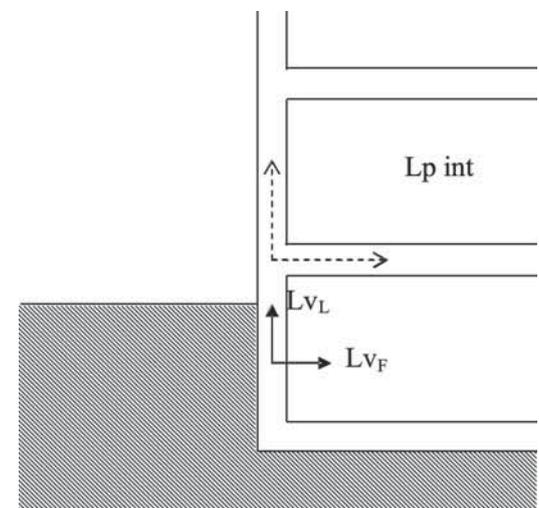


Fig. 6 : Coupe type d'un bâtiment avec un niveau de sous-sol ;  
LvL : niveau de vibration dans le plan de la paroi  
LvF : niveau de vibration en flexion  
Lp int : niveau sonore chez le riverain

Le CSTB met au point actuellement une approche mixte analytique par ondes et énergétique qui semble prometteuse, dans laquelle sont estimés les transferts d'énergie vibratoire entre composants et l'énergie moyenne des parois en flexion à partir de laquelle une puissance acoustique de bruit solidien rayonnée est calculée.

Seule une bonne connaissance de toute la chaîne Source - Propagation solidienne - Interaction sol/bâtiment - Propagation structurale - Rayonnement permettra d'établir, comme pour

le bruit aérien des transports, des règles du jeu satisfaisantes (aucune règle n'existe actuellement en France) entre l'émetteur de vibration (l'infrastructure de transport ferroviaire) et le concepteur de bâtiment.

[4] Villot M. and Chanut J. , "Vibration energy analysis of ground/structure interaction in terms of wave type", *Journal of Sound and Vibration* (2000) 231(3), 711-719

## Références bibliographiques

[1] Rapport final CSTB ER 712 99 0013 « Elaboration d'un outil d'aide à la décision pour la gestion de l'environnement vibratoire des infrastructures de tramway » pour la Direction des Transports Terrestres, Septembre 2001

[2] Jean P. , "Boundary and finite elements for 2D soil-structure interaction problems", *Acta Acustica* 2001, Volume 87 pp 56-66

[3] Stokoe, K.H. et al, "Characterisation of geotechnical sites by Spectral Analysis of Surface Waves (SASW)", *Geophysical Characterisation of sites*, ISSMFE : TC10, edited by R.D.Woods, 1994 (Oxford & IBH Publishing Co).

## Glossaire des abréviations

**ADEME** : Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie

**SEMINTAG** : Société d'Economie Mixte des Transports de l'Agglomération Grenobloise.

**SEMALY** : Société d'Economie Mixte de l'Agglomération Lyonnaise  
**pose STEDEF** : pose de voie directement sur béton mise au point par la Société d'Etudes Ferroviaires

**PREDIT** : Programme national de Recherche et D'Innovation dans les Transports terrestres

## Dijon à l'heure des matériaux pour l'acoustique

Au début de cette année, l'Ecole supérieure d'ingénieurs de recherche en matériaux (ESIREM, Dijon), en collaboration avec Dijon Promotion et le Pôle Automobile Bourgogne, organisait un colloque intitulé «Matériaux : quelles solutions pour l'acoustique». Cette journée a constitué une occasion pour les élèves ingénieurs d'appréhender la «transversalité» de la problématique des matériaux pour l'acoustique.

Les interventions n'ont pas manqué de refléter la diversité des applications de la science des matériaux en acoustique : Jacques Beaumont (Institut national de recherche sur les transports et leur sécurité) a présenté les enjeux matériaux relatifs à la protection contre le bruit routier ; Jean-Christophe Leroux (Centre de transfert de technologie du Mans) s'est quant à lui concentré sur les applications usuelles et la mesure des performances des matériaux acoustiques ; Jérôme Tran Van (Saint-Gobain) est intervenu sur l'intérêt de la caractérisation des matériaux pour leur utilisation en acoustique ; Jacques Roland (Centre scientifique et technique du bâtiment) a proposé un tour d'horizon des matériaux nouveaux en acoustique du bâtiment ; Jean-Marie Reveillé (Renault) a dressé un inventaire détaillé du large éventail de traitements acoustiques mis en œuvre au sein d'un véhicule automobile ; poursuivant sur ce thème de l'acoustique automobile, Hervé Durand (Plasto Automobile) a présenté une solution innovante de feuilles adhésives d'étanchéité de portières, et Arnaud Duval (Faurecia) a proposé une communication sur un nouveau concept acoustique offrant un compromis intéressant entre les impératifs de réduction du poids des véhicules et d'isoperformance acoustique ; enfin, Emmanuel Drevon (Hurel Hispano) s'est exprimé sur l'enjeu des nacelles de moteurs en acoustique aéronautique.

L'ESIREM forme des ingénieurs généralistes et polyvalents en physique et chimie des matériaux, avec notamment une spécialisation en «Génie des matériaux - Méthodes avancées de contrôle et de caractérisation des matériaux ». Le domaine des matériaux pour l'acoustique nécessitant de plus en plus de mener des recherches sous l'angle de la caractérisation des matériaux – cela vaut notamment pour l'étude de l'influence des procédés de fabrication sur la variation des caractéristiques, l'effet de la gravité sur le tassement du liant, le vieillissement des produits ... –, il est plutôt de bon augure de voir une telle formation d'ingénieurs en matériaux s'intéresser à la problématique des matériaux pour l'acoustique.

A l'heure actuelle, au sein de l'Université de Bourgogne, la recherche universitaire en acoustique est menée au Laboratoire de recherche en mécanique et acoustique (LRMA) de l'Institut supérieur de l'automobile et des transports (ISAT, Nevers). Le groupe vibroacoustique du LRMA, sous la direction du Professeur Claude Lesueur, constitue une plateforme de recherche et de transfert de technologies en direction notamment des entreprises du secteur de l'industrie des transports et de la mécanique.

Après ce colloque de l'ESIREM sur les matériaux utilisés en acoustique, on ne peut s'empêcher d'imaginer les bénéfices pour la recherche appliquée que rapporterait un futur rapprochement entre l'ISAT et l'ESIREM autour de ce lien fédérateur de l'acoustique.

Contact :  
ESIREM, Aile des Sciences de l'Ingénieur,  
9, avenue Alain Savary,  
BP 47870, 21078 Dijon CEDEX,  
Tél. : 03 80 39 60 09,  
Fax : 03 80 39 60 07