

# Etude unidimensionnelle d'une cellule hybride pour absorption et isolation simultanée

## Manuel Melon

CNAM  
292, rue Saint Martin  
75141 Paris CEDEX 3  
E-mail : manuel.melon@cnam.fr

## Philippe Herzog

LMA-CNRS  
31, chemin Joseph Aiguier  
13402 Marseille CEDEX  
E-mail : herzog@lma.cnrs-mrs.fr

## Azzedine Sittel

CSTB  
24, rue Joseph Fourier  
38400 Saint Martin d'Hères  
E-mail : azzedine.sittel@cstb.fr

## Marie-Annick Galland

École Centrale de Lyon  
69134 Ecully CEDEX  
E-mail : marie-annick.galland@ec-lyon.fr

## Résumé

Les matériaux absorbants hybrides actifs/passifs permettent d'obtenir de bonnes performances d'absorption sur une large plage fréquentielle. L'étape suivante consiste à réaliser des matériaux assurant à la fois une bonne absorption et un bon isolement acoustique. Ces matériaux trouveraient des applications potentielles dans les domaines du bâtiment ou encore de l'industrie du transport. Dans ce but, un prototype hybride actif/passif composé d'un haut-parleur de faible épaisseur (2,6 cm) placé à l'arrière d'une couche poreuse a été étudié. Ce système est testé en incidence normale dans un tube de 7 cm de diamètre. Les matrices de diffusion des constituants sont calculées analytiquement (le modèle choisi pour la couche poreuse est celui de Johnson-Allard développé pour les matériaux à structure rigide), puis leurs mesures sont réalisées. Les résultats montrent un bon accord avec les valeurs théoriques. Le modèle étant alors validé tant en absorption qu'en transmission, des simulations des comportements passifs et actifs du système complet sont alors effectuées. Puis, des mesures de ce même système complet sont réalisées dans le tube avec ou sans haut-parleur en fonctionnement. Finalement, des simulations du contrôle obtenu par un système hybride double (système à deux haut-parleurs) sont conduites afin d'aider à la conception de cellules hybrides 3D.

Les matériaux de construction possèdent généralement de mauvaises propriétés d'absorption et d'isolement aux très basses fréquences. Ainsi, la qualité sonore du champ émis par une source acoustique est fortement dégradée par les réflexions sur les parois du local. De même, les locaux attenants subissent un niveau de bruit de fond accru lorsque la source est en fonctionnement. Une des solutions permettant d'éviter l'utilisation de fortes épaisseurs de matériaux absorbants consiste à réaliser des systèmes hybrides où les hautes fréquences sont traitées classiquement et les basses fréquences par un système actif [1]. Le projet PARABAS a pour but d'étudier la faisabilité de cellules hybrides à contrôle décentralisé (coopération de cellules indépendantes) permettant d'obtenir simultanément de bonnes performances en absorption et en isolement. L'étude unidimensionnelle présentée ici s'inscrit dans le cadre de ce projet. Son principal intérêt est la possibilité d'obtenir des formules analytiques simples permettant de dégager les grandes tendances conduisant à la conception de prototypes qui pourront être testés expérimentalement ou par méthodes numériques. En effet, la lourdeur des calculs par éléments finis sur un système 3D complexe ne permet pas d'obtenir de tels renseignements rapidement. Par contre, une fois les principes généraux de conception des cellules obtenus, l'approche numérique 3D permet de mieux rendre compte du comportement final d'un prototype.

Dans ce document, le formalisme des matrices de diffusion est employé pour modéliser le comportement de sous-systèmes passifs ou actifs simples. Les matrices obtenues sont ensuite utilisées pour prédire le comportement de systèmes hybrides plus complexes. Dans une première partie, un système simple composé d'un haut-parleur et d'une couche

poreuse séparés par une lame d'air est modélisé. Les prédictions obtenues sont alors validées par des résultats expérimentaux. Enfin, le fonctionnement d'une cellule hybride à deux acteurs est simulé afin d'obtenir des pistes pour la conception de prototypes 3D.

## Système hybride simple

### Modélisation

Un système hybride simple (figure 1) est réalisé à l'aide d'un haut-parleur Aura de diamètre deux pouces séparé d'un matériau fibreux de 2 cm d'épaisseur par une lame d'air de 3,7 cm. Les matrices de diffusion des différents sous-systèmes sont définies comme suit :

$$\begin{Bmatrix} p_1 \\ p_2^+ \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11}^l & D_{12}^l \\ D_{21}^l & D_{22}^l \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} p_1^+ \\ p_2^- \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} p_i \\ p_i^+ \end{Bmatrix}, \quad (1)$$

$$\begin{Bmatrix} p_2^- \\ p_3^+ \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11}^a & D_{12}^a \\ D_{21}^a & D_{22}^a \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} p_2^+ \\ p_3^- \end{Bmatrix}, \quad (2)$$

$$\begin{Bmatrix} p_3^- \\ p_4^+ \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11}^p & D_{12}^p \\ D_{21}^p & D_{22}^p \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} p_3^+ \\ p_4^- \end{Bmatrix}, \quad (3)$$

où  $D^l$ ,  $D^a$  et  $D^p$  sont les matrices de transferts, respectivement, du haut-parleur, de la lame d'air et de la couche poreuse tandis que  $p_{-z}$  et  $p_{+z}$  sont les pressions générées par le haut-parleur.

La modélisation du haut-parleur Aura s'effectue à l'aide des équations de couplage de la conversion électrodynamique. Les rétrécissements et élargissements de section à l'arrière du haut-parleur sont pris en compte par les équations de conservation du débit et de la pression. L'expression des éléments de  $D^d$  est donnée dans [2]. On y trouve également une comparaison entre les valeurs théoriques et expérimentales des différents coefficients de  $D^d$  et des pressions générées montrant un très bon accord.

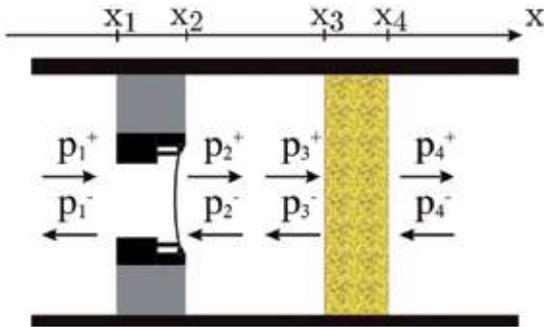


Fig. 1 : Vue en coupe du système hybride simple

La lame d'air d'épaisseur  $l_a$  est modélisée par la matrice suivante :

$$D^a = \begin{bmatrix} 0 & e^{-jk_l a} \\ e^{-jk_l a} & 0 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

tandis que la couche poreuse d'épaisseur  $l_p$  est modélisée par :

$$D_{11}^p = D_{22}^p = \frac{j \sin k_m l_p \left( \frac{z_m}{\Phi} - \frac{\Phi}{z_m} \right)}{2 \cos k_m l_p + j \sin k_m l_p \left( \frac{z_m}{\Phi} + \frac{\Phi}{z_m} \right)}$$

$$D_{12}^p = D_{21}^p = \frac{2}{2 \cos k_m l_p + j \sin k_m l_p \left( \frac{z_m}{\Phi} + \frac{\Phi}{z_m} \right)} \quad (5)$$

où  $k_m$  et  $z_m$  sont respectivement le nombre d'onde et l'impédance caractéristique réduite du matériau poreux à structure rigide, tandis que  $\Phi$  est la porosité du matériau fibreux. Les expressions de  $k_m$  et de  $z_m$  peuvent être obtenues à l'aide la théorie de Johnson-Allard [3].

**Mesure**

La mesure des matrices de diffusion a été effectuée sur un banc 1D adapté des travaux de M. Åbom [4] (figure 2). Le diamètre intérieur du tube mesure 7 cm. Pour les éléments passifs, deux séries de mesures (sur les huit microphones) sont réalisées sous deux conditions différentes (haut-parleurs aux extrémités en fonctionnement alternés). Pour les éléments actifs, une troisième série de mesures vient compléter les deux premières (élément actif sous tension et haut-parleurs aux extrémités éteints).

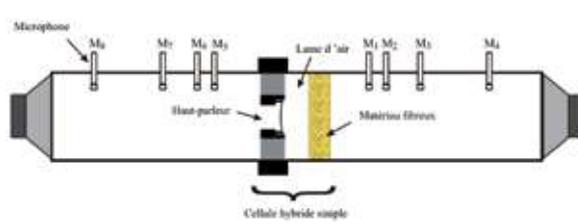


Fig. 2 : Banc de mesure 1D

Une couche de matériau poreux simple a tout d'abord été caractérisée sur le banc de mesure 1D. L'échantillon mesuré est constitué de deux disques de matériau fibreux (mélange de fibres dont certaines sont issues du recyclage) de 10 mm d'épaisseur. Les coefficients de transmission (noir) et de réflexion (violet) sont représentés sur la figure 3. On remarque que ces coefficients sont à peu près constants sur la bande 50-2 000 Hz. Cependant, une résonance gênante est observée autour de 200 Hz. Afin de limiter les mouvements de la structure du poreux, les deux couches fibreuses sont placées entre deux plaques de tôle perforée que l'on peut observer sur la figure 4 (page suivante). Les résultats (courbes bleue et cyan) fournis sur la figure 3 montrent que la résonance est légèrement atténuée et décalée vers 550 Hz (raidissement de la structure). L'atténuation obtenue n'étant pas satisfaisante, une troisième plaque de tôle perforée est ajoutée entre les deux couches fibreuses. Cette fois-ci la résonance est largement atténuée (courbes rouge et verte). Apparaissent toutefois quelques oscillations dues à la plus grande complexité du système ainsi qu'une chute des coefficients de transmission et d'absorption au-dessous de 400 Hz. Ces premiers résultats montrent que la structure du matériau choisi ne reste pas rigide, son comportement ne pourra donc pas être prédit correctement par un modèle de type «fluide équivalent». Nous utiliserons donc les valeurs mesurées de la matrice de diffusion de la couche poreuse pour prédire le comportement de la cellule hybride.

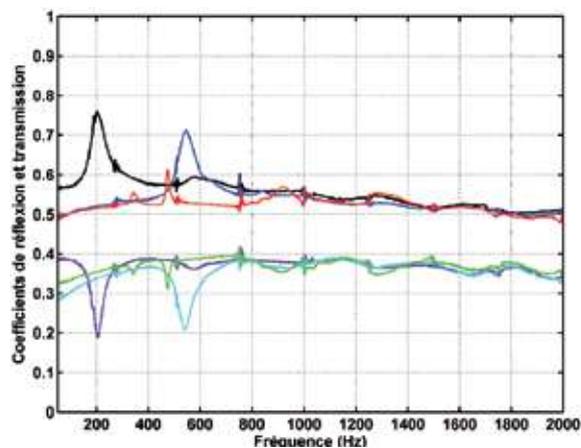


Fig. 3 : Coefficients de réflexion et de transmission de deux couches de matériau fibreux. Matériau seul, noir : transmission, violet : réflexion. 2 couches entre 2 plaques perforées, bleu : transmission, cyan : réflexion. 2 couches et 3 plaques perforées, rouge : transmission, vert : réflexion.

Une cellule hybride est réalisée conformément au schéma représenté sur la figure 1 (page précédente). Dans la configuration étudiée, une couche d'air de 3,7 cm d'épaisseur est délimitée par le haut-parleur Aura et un matériau absorbant constitué de deux couches de fibreux et de trois grilles.

**Comportement passif**

La cellule hybride est tout d'abord caractérisée de façon passive avec le haut-parleur en court circuit (condition très proche de celle observée sur un amplificateur audio classique). Les résultats sont présentés sur la figure 5. Une modélisation de la cellule hybride a également été effectuée à partir des expressions théoriques gouvernant les comportements de la couche d'air et du haut-parleur. La matrice de diffusion globale est calculée de la façon suivante : les matrices de diffusion des sous-éléments sont transformées en matrices de transfert, puis leur produit est calculé, enfin la matrice de transfert globale est transformée en matrice de diffusion. L'accord théorie-modélisation est satisfaisant. On remarque toutefois que les coefficients de transmission sont mieux modélisés que les coefficients de réflexions. Ce comportement avait déjà été observé pour le haut-parleur seul [2].



Fig. 4 : Gauche : Couche de poreux dans son porte échantillon. Droite : grille limitant les vibrations du squelette du poreux

**Comportement actif**

Les pressions rayonnées de part et d'autre de la cellule hybride par le haut-parleur Aura ont également été mesurées et comparées aux prédictions théoriques (toujours avec la matrice de diffusion expérimentale pour la couche poreuse). Pour obtenir les expressions des pressions émises par la cellule hybride, on utilise les matrices de diffusion  $D^l$ ,  $D^a$  et  $D^p$  en conditions anéchoïques ( $p^+_1=p^-_4=0$ ) :

$$\begin{cases} p^-_1 = D'_{12}p^-_2 + p^-_i \\ p^+_2 = D_{22}p^-_2 + p^+_i \\ p^-_2 = e^{-jk_1l_a} p^-_3 \\ p^+_3 = e^{-jk_1l_a} p^+_2 \\ p^-_3 = D^p_{11}p^+_3 \\ p^+_4 = D^p_{21}p^+_3 \end{cases} \quad (6)$$

En résolvant le système d'équations (6), on obtient les expressions des pressions  $p^-_c$  et  $p^+_c$  générées par la cellule hybride :

$$\begin{cases} p^-_c = p^-_1 = p^-_i + \frac{D'_{12}D^p_{11}}{e^{2jk_1l_a} - D'_{22}D^p_{11}} p^+_i \\ p^+_c = p^+_4 = \frac{D^p_{21}e^{2jk_1l_a}}{e^{2jk_1l_a} - D'_{22}D^p_{11}} p^+_i \end{cases} \quad (7)$$

La figure 6 représente une comparaison des pressions («théoriques» et mesurées) rayonnées par la cellule hybride pour une tension d'alimentation de 1 V. L'accord théorie expérience est correct, les écarts les plus importants étant observés autour de la fréquence de résonance de l'équipage mobile.

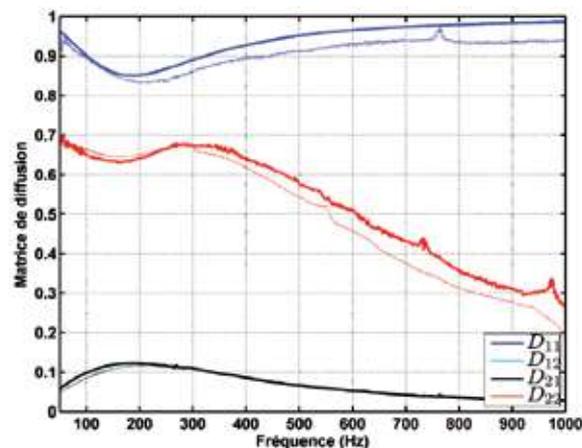


Fig. 5: Matrice de diffusion de la cellule hybride en circuit ouvert.  $D_{11}$  : rouge,  $D_{22}$  : bleu,  $D_{12}$  : cyan et  $D_{21}$  : noir. Mesure : pointillés, «modélisation» : trait plein

**Simulations de contrôle**

Des simulations de contrôle pour un système hybride simple tel que celui représenté sur la figure 1 ont montré que lorsque l'absorption est maximale l'isolement est dégradé et inversement [2]. Toutefois, dans des conditions d'absorption parfaite, la pression acoustique transmise à l'arrière de la cellule n'est jamais supérieure à celle qu'il y aurait en l'absence de cellule. Ce résultat nous invite à traiter simultanément la transmission et l'absorption en utilisant une cellule hybride possédant deux acteurs. Cette cellule est représentée sur la figure 7. Dans la configuration testée, les épaisseurs des deux lames d'air et de la couche poreuse sont égales à 2 cm. Les deux haut-parleurs, disposés tête-bêche, sont de type Aura 2 pouces. Le diamètre du tube de test mesure 7 cm. La couche poreuse est simulée à l'aide d'un modèle «fluide équivalent» de Johnson-Allard dont les paramètres d'entrée sont donnés dans le tableau 1.

$\sigma$	$\Phi$	$\infty$	$\Lambda$	$\Lambda'$
20 600 N.m <sup>4</sup> /s	0,99	1,01	45 _ $\eta$	138 _ $\eta$

Tabl. 1: Paramètres de la couche poreuse

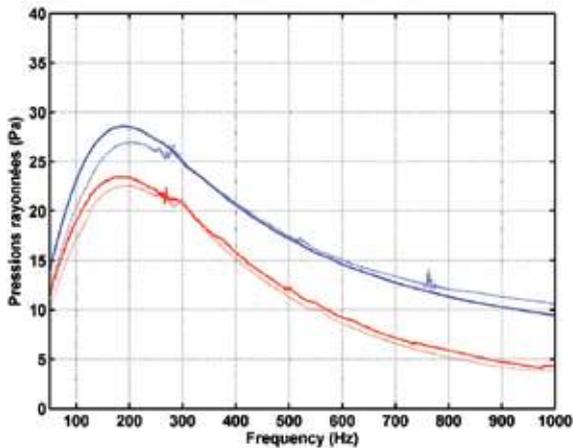


Fig. 6 : Pressions rayonnées par la cellule hybride pour une tension de 1 V. p+c: rouge ; p-c: bleu. Mesure : pointillés, «modélisation» : trait plein.

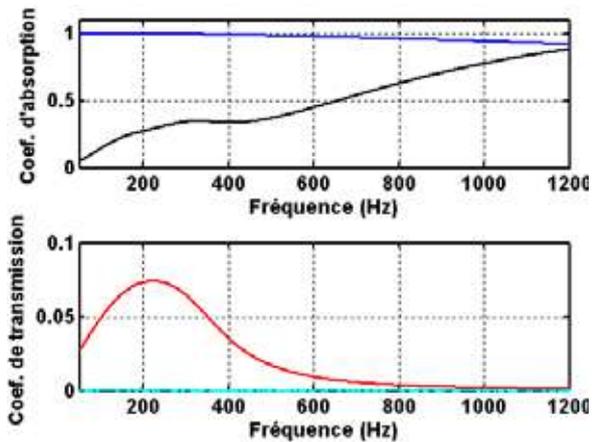


Fig. 8: Coefficient d'absorption (sans contrôle : noir, avec contrôle bleu) et module du coefficient de transmission (sans contrôle : rouge, avec contrôle cyan) de la cellule hybride double

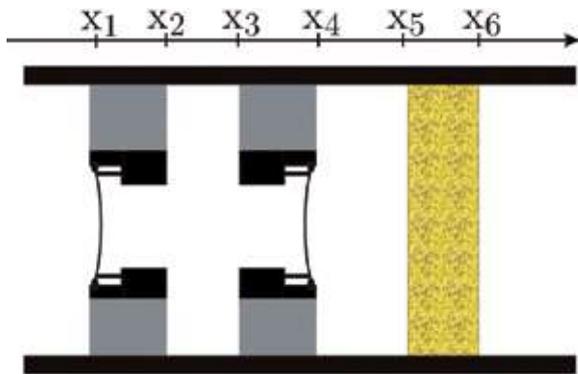


Fig. 7 : Vue en coupe du système hybride double

La résistance au passage de l'air  $\sigma$  a été choisie afin d'obtenir un produit :  $\sigma l_p \approx \rho_0 c$

Rappelons que cette condition permet d'obtenir, en basse fréquence, une absorption optimale pour une annulation de pression à l'arrière de la couche poreuse.

Des simulations de contrôle pour la cellule hybride double sont réalisées. Les calculs sont réalisés en combinant les matrices élémentaires  $D^l$ ,  $D^a$  et  $D^p$ . Deux microphones d'erreur omnidirectionnels sont placés en  $x_1$  et  $x_5$ <sup>1</sup>. Les résultats obtenus sont présentés sur la figure 8. Lorsque le contrôle fonctionne, l'absorption et l'isolement sont optimaux. On notera toutefois une légère chute de l'absorption à partir de 500 Hz due au déphasage entre les ondes aller et retour dans la couche poreuse.

On notera également que les tensions de commande des haut-parleurs, inférieures à 25 mV pour une pression incidente de 1 Pa, sont compatibles avec les valeurs que peut supporter un haut-parleur électrodynamique classique. Soulignons toutefois que des valeurs aussi faibles découlent du fait que l'étude est réalisée en guide unidimensionnel.

Le contrôle simultané de la transmission et de l'absorption étant donc possible, intéressons-nous maintenant aux pressions générées par les haut-parleurs de contrôle. Celles-ci sont représentées sur la figure 9. Les courbes noires représentent les pressions générées par les deux haut-parleurs Aura. On remarque qu'en basses fréquences, les deux sources de contrôle doivent générer des pressions plus élevées que la pression incidente (1 Pa), jusqu'à 2,3 Pa pour le haut-parleur de droite et jusqu'à 1,4 Pa pour le haut-parleur de gauche. Une solution pour limiter la contribution demandée aux sources secondaires serait d'utiliser des sources directives. Ainsi, des haut-parleurs parfaitement cardioïdes (courbes rouges) permettraient de limiter fortement la pression générée par le haut-parleur de gauche. Toutefois, de telles sources ne sont pas facilement réalisables en pratique. Observons alors, sur les courbes bleues, le gain sur les pressions rayonnées pour un haut-parleur plus réaliste dont le rayonnement arrière serait moitié de celui avant. Le gain reste significatif malgré un déséquilibre avant-arrière assez modeste.

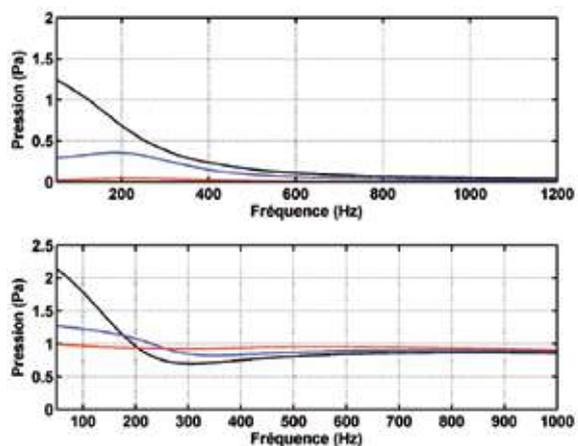


Fig. 9: Modules des pressions rayonnées par les faces avant des haut-parleurs de contrôle (haut-parleur de gauche : haut et haut-parleur de droite : bas). Courbes noires : Aura non modifié, courbes rouges : haut-parleur cardioïde et courbes bleues : haut-parleur hypocarديوïde.

1- En condition non anéchoïque à gauche, le microphone en  $x_1$  devrait être cardioïde

## Conclusion

Le travail présenté dans cet article a permis, dans un premier temps, de montrer qu'il est possible de modéliser analytiquement le comportement d'une cellule hybride simple en configuration unidimensionnelle, et ce avec une précision acceptable. Toutefois, le mouvement d'ensemble de la couche poreuse utilisée ici a dû être limité par des grilles. Néanmoins, les vibrations de structure n'ont pas complètement disparu interdisant alors la modélisation de la couche poreuse par une théorie de type fluide équivalent. Un formalisme de Biot devrait pouvoir prédire correctement le comportement du sandwich couches poreuses/grilles. Cependant, nous avons choisi pour des raisons pratiques d'utiliser la mesure de la matrice de diffusion de ce sous-système pour modéliser les cellules hybrides.

La connaissance des matrices de diffusions de chaque sous-système nous a permis de modéliser le contrôle qui serait obtenu par une cellule hybride double. Il a été montré que la réalisation d'une cellule 1D à deux acteurs contrôlant à la fois la réflexion et la transmission des ondes acoustiques est théoriquement possible. Des pistes concernant le choix de transducteurs ont également été envisagées. Ainsi, des haut-parleurs hypocardioides pourraient être utilisés pour limiter les pressions générées par les sources secondaires.

Bien entendu, ces conclusions ont été établies en incidence normale et pour des ondes planes. Elles devront être vérifiées en trois dimensions pour des champs acoustiques plus complexes. L'étude tridimensionnelle devra également tenir compte de la complexité du champ proche rayonné par les haut-parleurs. Pour cela, une étude par éléments finis de frontière pourrait vérifier les conclusions esquissées par ce travail.

## Remerciements

Ce travail a été soutenu par l'Agence Nationale de la Recherche par l'intermédiaire du projet PARABAS (ANR-06-BLAN-0081). Les auteurs remercient Gérard Dejardin pour la réalisation des pièces mécaniques du banc de mesure une dimension du CNAM.

## Références bibliographiques

- [1] Furstoss M., Thenail D., Galland M.-A., «Surface impedance control for sound absorption: direct and hybrid passive/active strategies», *J. Sound Vib.* 203(2), 219-236 (1997).
- [2] Melon M., Sitel, A., Galland M.-A., Herzog P., «Measurement of a loudspeaker transfer matrix for hybrid active/passive absorbers», *Active 2009*, Ottawa.
- [3] Allard J.F. *Propagation of Sound in Porous Media: Modelling Sound Absorbing materials*, Elsevier, (1993).
- [4] Åbom M., «Measurement of the scattering matrix of acoustical two-ports», *Mech. Syst. Sig. Proc.* 5(2), 89-104 (1991)

LE CIDB ORGANISE LES 15-16-17 DÉCEMBRE 2010 AU CONSEIL ECONOMIQUE, SOCIAL ET ENVIRONNEMENTAL\*, SOUS LE HAUT PATRONAGE DU MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE, DE L'ÉNERGIE, DU DÉVELOPPEMENT DURABLE ET DE LA MER, LES 6<sup>ES</sup> ASSISES NATIONALES DE LA QUALITÉ DE L'ENVIRONNEMENT SONORE.

Après plus de trente ans d'existence, la Mission bruit et le CIDB ont décidé de consacrer ces Assises à un bilan de ces trois décennies de politiques de lutte contre le bruit et d'esquisser les voies à défricher pour les années à venir.

- la voie économique : évaluer de façon sérieuse et approfondie le véritable coût social du bruit, et le coût de ne rien faire ; explorer de nouvelles générations d'instruments financiers : quotas et redevances, par exemple,

- la voie de la recherche : que peut-on raisonnablement attendre de la technique ? de quels matériaux, produits pourra-t-on bénéficier dans les années à venir ?

- la voie de la sociologie : quels sont les changements prévisibles de la société, comment favoriser telle ou telle évolution ?

- la voie du dialogue : comment promouvoir le mieux vivre ensemble, la concertation Il faut créer du lien social plutôt que de l'intolérance, de l'incompréhension, du rejet,

- la voie de la combinaison de la problématique bruit avec d'autres approches : isolation thermique, zones calmes, exposition aux multi nuisances...

- la voie culturelle par la mise en valeur de l'environnement sonore, des paysages sonores, qui viendra compléter le volet défense et protection des citoyens confrontés aux nuisances sonores,

- la voie pédagogique par l'initiation à l'écoute, à la découverte de la dimension sonore de notre environnement. Plutôt que d'interdire il faut changer l'image, les représentations mentales, les faire évoluer.

Ces 6<sup>èmes</sup> Assises nationales doivent constituer un moment fort, partagé, montrant tous les progrès accomplis mais aussi les attentes qu'il reste à satisfaire. Des correspondants européens nous ont fait savoir que ce besoin de bilan se manifeste dans plusieurs pays de l'Union et nous inscrirons donc nos réflexions dans ce cadre élargi.

Le pré-programme de cette manifestation sera consultable sur le site du CIDB : [bruit.fr](http://bruit.fr)

Si vous souhaitez soumettre un thème d'atelier ou d'intervention, adressez un mail à : [debonnet-lambert@cidb.org](mailto:debonnet-lambert@cidb.org)

\* sous réserve de confirmation