

## Optimisation acoustique de paroi par algorithme génétique et influence de l'habillage par une couche poreuse

Nicolas DAUCHEZ<sup>1</sup>, Olivier DOUTRES<sup>2</sup>, Jean-Michel GENEVAUX<sup>2</sup>, Jean-Christophe LE ROUX<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Supméca, 3, rue Fernand Hainaut, F-93407 Saint Ouen cedex, nicolas.dauchez@supmeca.fr

<sup>2</sup>Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine, Av. O. Messiaen F-72085 Le Mans cedex 9

<sup>3</sup>Centre de Transfert de Technologie du Mans, 20, rue Thalès de Milet F-72000 Le Mans, jcleroux@cttm-lemans.com

L'amélioration du confort acoustique dans les habitacles passe en particulier par l'optimisation de la transparence acoustique de parois simple ou double au moyen de matériaux viscoélastiques et poreux. Une méthode d'optimisation de paroi basée sur un algorithme génétique couplé à un calcul par matrices de transfert est présentée. Cette technique permet une exploitation efficace des itérations précédentes sans coût de calcul supplémentaire. Les résultats obtenus pour une simple et une double paroi sont analysés. Dans un deuxième temps, l'influence d'un habillage poreux est présentée en fonction de la nature du squelette : mousse polymère ou fibreux. On montre, à l'aide du concept d'impédance de transfert, que l'isolation acoustique d'une paroi peut être dégradée dans une bande de fréquence où le squelette est fortement sollicité. L'accent est finalement mis sur les conditions de couplage entre couches.

## 1 Introduction

La réduction des nuisances sonores dans le domaine des transports passe par un compromis faisant intervenir les propriétés des matériaux, la masse et l'encombrement. L'objectif de cet article est de présenter une méthode d'optimisation de complexes multicouches pour les problèmes d'absorption et d'isolation acoustiques. Cette méthode est basée sur l'utilisation d'un outil de prédiction analytique, de type matrice de transfert, associé à un algorithme évolutionnaire [1,2]. Son efficacité sera illustrée pour deux applications. Enfin l'influence d'un habillage poreux est présentée en fonction de la nature du squelette : mousse polymère ou fibreux.

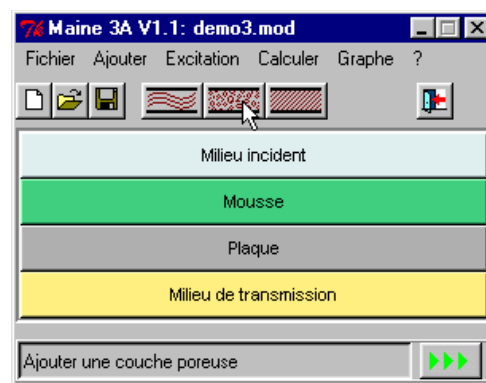


Figure 1 : Interface graphique du logiciel MAINE 3A

## 2 Méthode d'optimisation

### 2.1 Modélisation par la méthode des matrices de transfert : logiciel MAINE 3A

MAINE 3A est un logiciel de prédiction des propriétés acoustiques de complexes multicouches incluant des matériaux absorbants [3,4]. Ce logiciel modélise chaque couche, supposée de dimensions latérales infinies, par une matrice de transfert, ce qui autorise des temps de calcul très courts. Les milieux disponibles sont de type plaque, solide viscoélastique, fluide, poreux à squelette déformable ou non. Les excitations sont de type onde plane ou champ diffus.

A partir de la description de chaque couche, il est possible de calculer l'impédance, le coefficient de réflexion, le coefficient d'absorption, ou, l'indice d'affaiblissement, d'un complexe multicouche entre deux milieux fluides ou sur fond rigide.

Trois types de milieux sont modélisés :

- élastique : plaque mince, solide viscoélastique,
- fluide : liquide, gaz,
- poreux : milieu diphasique à porosité ouverte, à squelette indéformable ou viscoélastique.

Plusieurs modèles permettent de décrire les matériaux poreux :

- modèle empirique de Delany et Bazley [3],
- modèle physique de " fluide équivalent " (Johnson-Champoux-Allard [3]) à cinq paramètres: porosité, résistivité, tortuosité, longueurs caractéristiques visqueuse et thermique,
- modèle physique poroélastique (Biot-Allard [3]) : même description des couplages visco-thermiques que pour le modèle de " fluide équivalent " avec prise en compte de la déformation du squelette et du couplage élastique entre les deux phases,
- modèle physique simplifié : réduction à deux paramètres (porosité, résistivité) pour les couplages visco-thermiques dans les modèles de " fluide équivalent " et poroélastique.

Les figures 2 et 3 illustrent deux types de calcul réalisés avec MAINE 3A : il en ressort que l'optimisation en absorption ou en isolation n'est pas triviale en raison de la complexité de ces grandeurs dès lors que plusieurs couches sont juxtaposées.

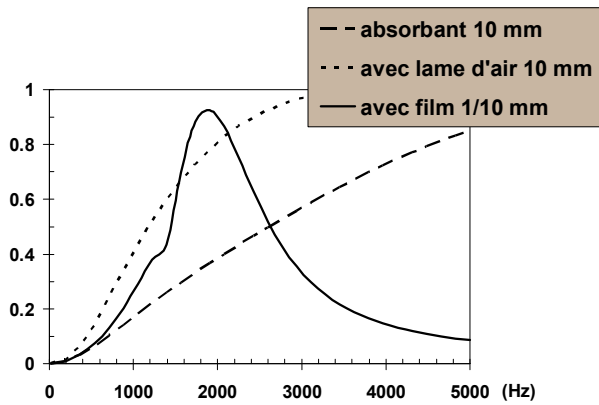


Figure 2 : Coefficient d'absorption d'une couche poreuse sur fond rigide, avec lame d'air et avec film.

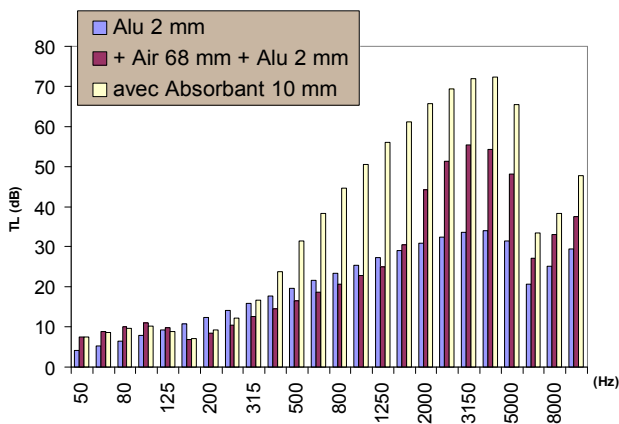


Figure 3 : Indice d'affaiblissement d'une paroi simple, double, double avec matériau absorbant.

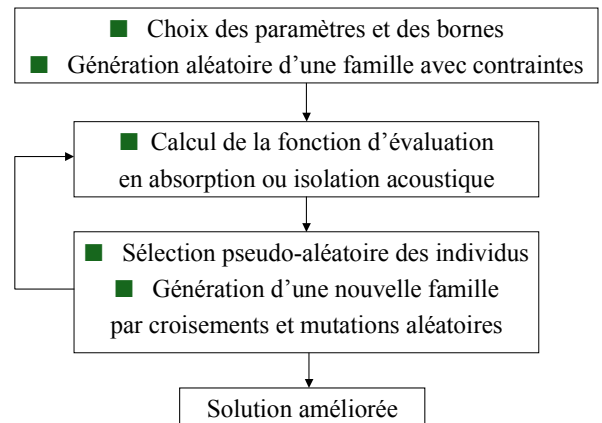
## 2.2 Méthode d'optimisation évolutionnaire

Afin de faciliter l'obtention d'une solution optimale, nous avons développé un algorithme d'optimisation interfacé avec le logiciel MAINE 3A. La méthode retenue est de type évolutionnaire [5] : elle est bien adaptée lorsque l'expression analytique de la fonction dont on recherche un extremum, n'est pas facilement accessible et lorsque l'allure de la fonction n'est pas a priori connue. D'autre part, parmi les méthodes basées sur des tirages aléatoires, elle permet de mettre à profit les résultats des tirages précédents. Une description des différentes méthodes est résumée dans le tableau 1.

Type	Méthode	Commentaire
<b>Déterministe</b> Recherche des extrémas	- Calcul direct des extrémas - Point de départ + calcul de gradient	- Calcul des dérivées - Extremum local - Connaissance a priori
<b>Non-déterministe</b> Tirages aléatoires	Série de tirages - Itérations avec méthode du gradient - Itérations autour des meilleures combinaisons <b>- Itérations évolutionnaires</b>	Méthode de réutilisation des résultats précédents plus ou moins évoluée

Tableau 1 : Différentes méthodes d'optimisation.

La démarche appliquée est la suivante :



Dans notre application un gène est un paramètre, par exemple une épaisseur. Un individu est défini en fonction d'un ou plusieurs gènes, selon le nombre de paramètres choisis. Une famille ou une génération est l'ensemble d'individus existants à une itération donnée. La fonction d'évaluation dans notre cas est soit l'absorption soit l'isolation sur une bande de fréquence donnée. Le résultat de cette fonction pour un individu définit son score. La méthode va donc permettre de déterminer la combinaison optimale des gènes, correspondant à l'individu ayant obtenu le meilleur score au bout d'un nombre donné d'itérations.

La programmation de l'algorithme consiste à gérer l'évolution des générations successives, en calculant les scores de chaque individu, en assurant la sélection des meilleurs individus et les croisements adéquats, en introduisant un certain taux de mutation (introduction de nouvelles valeurs de gène inexistantes à la génération antérieure). L'algorithme a été programmé sous SciLAB, (distribution INRIA).

### 3 Application

#### 3.1 Optimisation d'une paroi amortie en isolation

L'objectif est de déterminer les propriétés optimales d'une couche amortissante placée sur une simple paroi dans le but d'améliorer l'isolation acoustique. Les paramètres optimisés sont le module d'Young  $E$  compris en  $1e5$  et  $1e12$  Pa (gène 1), et le facteur de perte  $\eta$  compris entre 0.01 et 2 (gène 2).

Le score correspond à l'indice d'affaiblissement moyen sur une bande de fréquence fixée. Les résultats sont présentés aux figures 4 et 5 : les figures de dessus (a) donnent le score atteint par les différents individus, toute génération confondue, en fonction de la valeur d'un gène. Les figures de dessous donnent l'évolution du score à chaque génération.

Deux optimaux sont trouvés pour le gène 1 : on observe dans un premier temps, un bon score pour un module d'Young compris entre  $1e6$  et  $1e9$  Pa environ, avec un optimal de  $3e7$  Pa (Figure 4 et 5). Dans ce cas, la valeur du facteur d'amortissement a peu d'importance car on travaille en masse. Lorsque que le module d'Young augmente, on dégrade les performances car la fréquence de coïncidence redescend dans la bande utile malgré un bon amortissement (Figure 6).

Un autre optimal, non réalisable en pratique, est trouvé pour un module d'Young et un facteur de perte très grands,  $E=1e12$  Pa et  $\eta=2$  : évolution vers les bornes supérieures. La fréquence de coïncidence descend sous la bande utile : avec un fort amortissement on améliore l'isolation au-dessus de cette fréquence. Si l'on a un module d'Young au contraire très petit, on risque de dégrader l'isolation à cause de résonances dans l'épaisseur de la couche amortissante.

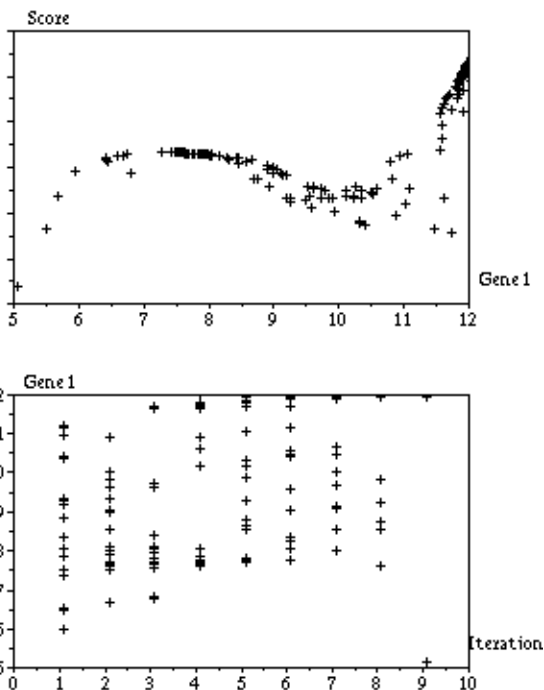


Figure 4 : a) Isolation en fonction du log du module d'Young ; b) Evolution du log du module d'Young au cours des itérations.

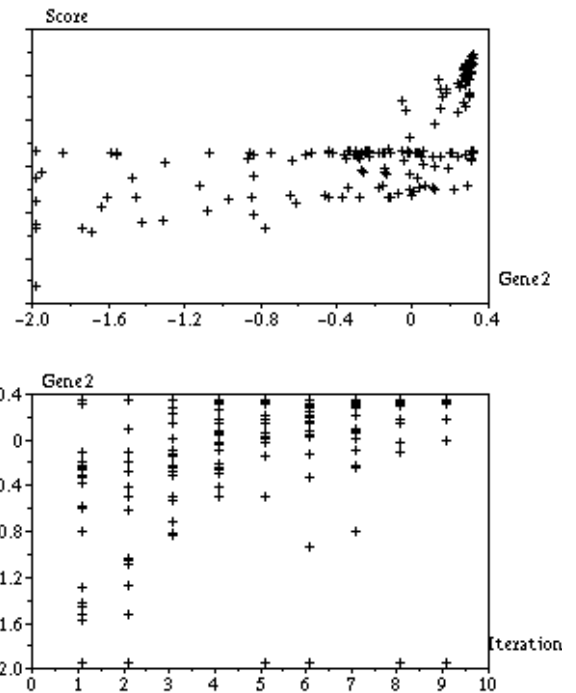


Figure 5 : a) Isolation en fonction du log du facteur de perte; b) Evolution du log du facteur de perte au cours des itérations.

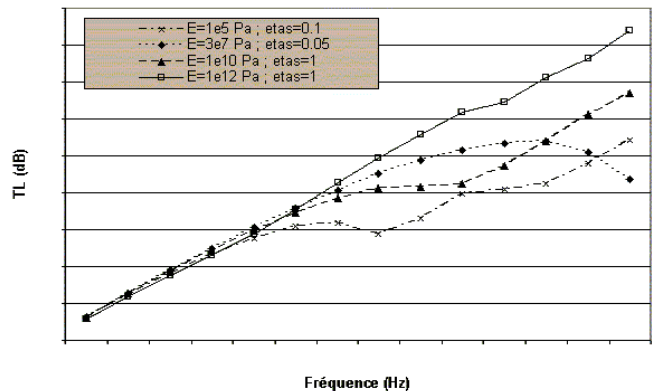


Figure 6 : Isolation en fonction de la fréquence pour plusieurs couches amortissantes de module d'Young et de facteur d'amortissement différents, appliquée sur une paroi simple.

#### 3.2 Optimisation d'une double paroi avec absorbant

L'objectif est de déterminer les propriétés optimales d'un matériau absorbant acoustique placé au sein d'une double paroi. Les paramètres optimisés sont : l'épaisseur (gène 1), la résistivité au passage de l'air variant entre  $1e3$  et  $1e6.2$   $Nsm^{-4}$  (gène 2), et le module d'Young qu'on fait varier entre  $1e4$  et  $1e7$  Pa (gène 3).

L'algorithme converge moins franchement à cause de la dépendance mutuelle des gènes 1 et 2. Cependant après quelques itérations les tendances sont nettes : l'optimal est trouvé pour une épaisseur maximale, une résistivité comprise entre  $1e5$  et  $2.5e5$   $Nsm^{-4}$  et un module d'Young minimal (Figures 7, 8, 9). Ces tendances sont confirmées par plusieurs calculs successifs et peuvent être affinées à partir du calcul des indices d'affaiblissement en fonction de la fréquence.

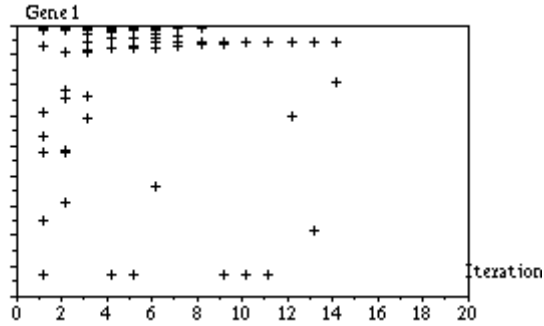
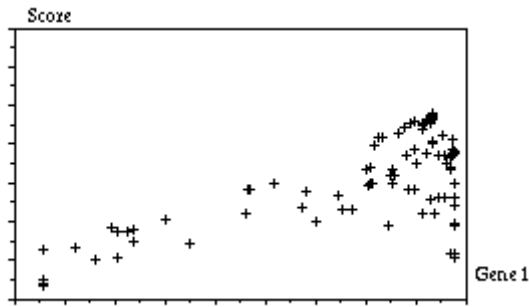


Figure 7 : a) Isolation en fonction de l'épaisseur de l'absorbant; b) Convergence de la population en fonction des itérations.

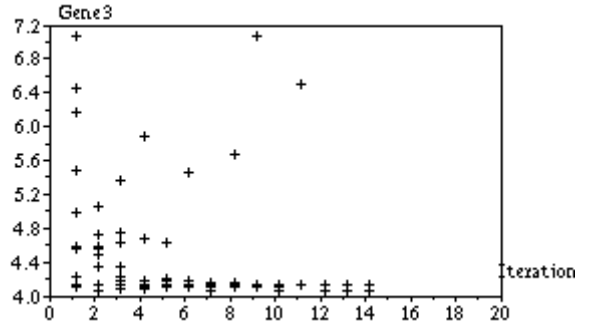
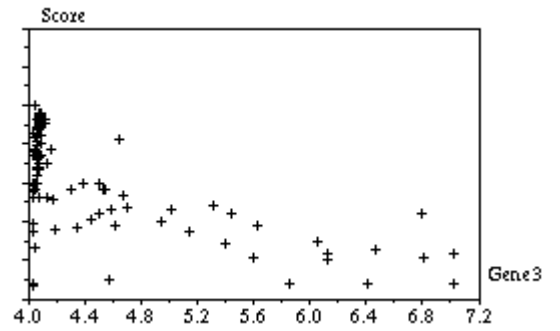


Figure 9 : a) Isolation en fonction du module d'Young de l'absorbant (abscisse: log du module d'Young en Pa); b) Convergence de la population en fonction des itérations.

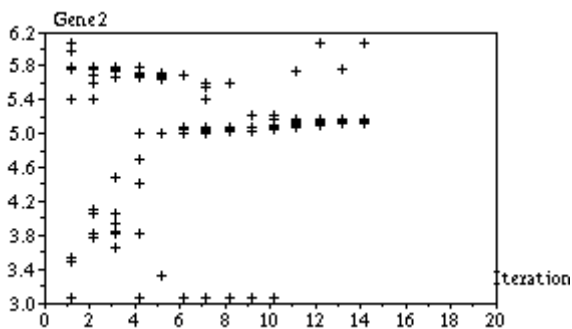
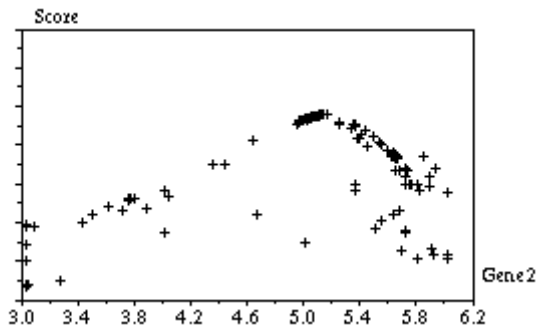


Figure 8 : a) Isolation en fonction de la résistivité de l'absorbant (abscisse: log de la résistivité en  $\text{Nsm}^{-4}$ ); b) Convergence de la population en fonction des itérations.

#### 4 Influence d'une couche poreuse sur le rayonnement d'une paroi

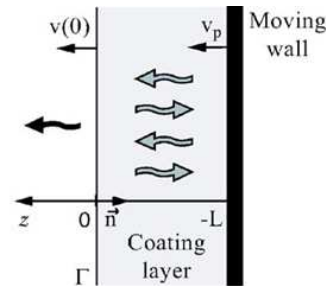


Figure 10 : Couche poreuse couplée à une paroi mobile [6].

Dans cette partie, nous focalisons sur le comportement d'une couche poreuse sur le rayonnement d'une paroi [6], configuration élémentaire dans un problème d'isolation acoustique.

Un modèle simple permet de décrire la couche poreuse par le modèle de Biot unidimensionnel basé sur la propagation des deux ondes longitudinales dans l'épaisseur de la couche poreuse. L'influence de cette couche sur le rayonnement de la paroi est prise en compte à l'aide de l'impédance de transfert

$$Z_T = \frac{p(0)}{v_p - v(0)}, \quad (1)$$

avec  $v_p$  la vitesse de la paroi,  $v(0)$  et  $p(0)$  respectivement la vitesse et la pression à la surface du matériau poreux (figure 10). Cette impédance diffère de l'impédance de surface  $Z_s$  qui peut être mesurée dans un tube de Kundt.

La figure 11 montre une augmentation du facteur de rayonnement autour de la résonance du squelette dans l'épaisseur de la couche. Celle-ci n'est pas observée si l'on utilise l'impédance de surface  $Z_S$  au lieu de l'impédance de transfert dans l'expression du facteur de rayonnement

$$\sigma_R = \frac{W_{rad}}{W_{vib}} = \left| \frac{Z_T}{Z_T + Z_0} \right|^2, \quad (2)$$

avec  $W_{rad}$  la puissance rayonnée,  $W_{vib}$  la puissance vibratoire et  $Z_0$  l'impédance caractéristique de l'air.

Ces résultats ont été validés expérimentalement pour une mousse polymère et pour un matériau fibreux [6].

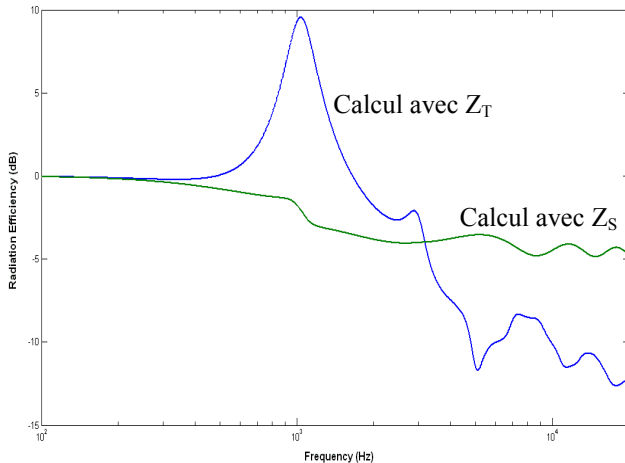


Figure 11 : Facteur de rayonnement d'une paroi couverte d'une couche poreuse.

Enfin si l'on ajoute une fine lame d'air entre la paroi et le matériau poreux, le couplage paroi-squelette est profondément modifié : la vitesse imposée au squelette devient fonction de la porosité, ce qui réduit l'influence de la résonance du squelette sur le facteur de rayonnement (figure 12). Cet effet sera moins marqué pour les matériaux à squelette souple, pouvant être modélisés à l'aide du modèle « limp » [8,9].

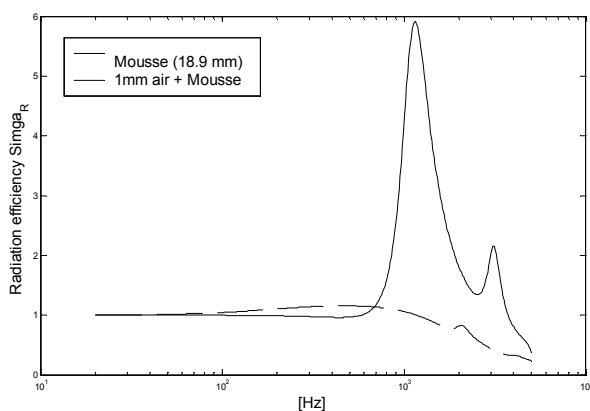


Figure 12 : Facteur de rayonnement d'une paroi couverte d'une couche poreuse avec et sans lame d'air intermédiaire.

## 5 Conclusion

Un algorithme de type évolutionnaire a été utilisé pour optimiser les composants de complexes multicouches en absorption et en isolation acoustiques. Greffé à un logiciel de modélisation par matrice de transfert, cet algorithme a montré son efficacité dans la mesure d'une optimisation limitée à quelques paramètres. Elle offre un complément efficace à une expertise qui saura dégager qualitativement les pistes d'optimisation.

Par ailleurs, il a été montré que l'utilisation d'une couche poreuse sur une paroi mobile peut conduire à une augmentation du facteur de rayonnement de celle-ci dans une zone centrée autour du premier mode du squelette dans l'épaisseur de la couche. Ce phénomène peut aller à l'encontre des propriétés d'insonorisation recherchées pour ce type de matériau. Son influence peut dépendre fortement du type de conditions aux limites.

## Remerciements

Les auteurs remercient la société Dassault Aviation, le CNRS et la Région Pays de la Loire pour leur soutien.

## Références

- [1] Dauchez N., Le Roux J.C., Optimisation de l'acoustique des complexes multicouches par algorithme génétique, 2ème congrès Confort Automobile, Le Mans, 2002
- [2] Tanneau O., Casimir J.B., Lamary P., Optimization of multilayered panels with poroelastic components for an acoustical transmission objective, *J. Acoust. Soc. Am.* 120(3), 1227-1238, 2006
- [3] Allard J.-F., Propagation of sound in porous media: modeling sound absorbing materials, Chapman & Hall, Londres, 1993
- [4] Brouard B., Validation par holographie acoustique de nouveaux modèles pour la propagation des ondes dans les matériaux poreux stratifiés, Thèse de l'Université du Maine, France, 1994
- [5] Goldberg D., Algorithmes génétiques, Addison-Wesley, 1994
- [6] Doutres O., Dauchez N., Génevaux J.-M., Porous layer impedance applied to a moving wall: Application to the radiation of a covered piston, *J. Acoust. Soc. Am.*, 121(1), 206-213, 2007
- [7] Doutres O., Dauchez N., Génevaux J.-M., Acoustic radiation of a vibrating wall covered by a porous layer, 158<sup>th</sup> meeting of the Acoustical Society of America, San Antonio, Texas, 2009
- [8] Doutres O., Dauchez N., Génevaux J.-M., Dazel O., Validity of the limp model for porous materials: A criterion based on the Biot theory, *J. Acoust. Soc. Am.*, 122 (4), 1845-2476, 2007
- [9] Doutres O., Dauchez N., Génevaux J.-M., Dazel O., A frequency independent criterion for describing sound absorbing materials by a limp frame model, *Acta Ac. united with Acustica*, 95(1), 178-181, 2009