HAL
open science

Identification de sources acoustiques, par couplage numérique, appliquée à des pièces complexes de GMP

S Forget, M Schaeffer, N Totaro, J-L Guyader

To cite this version:

S Forget, M Schaeffer, N Totaro, J-L Guyader. Identification de sources acoustiques, par couplage numérique, appliquée à des pièces complexes de GMP. SIA Conference Simulation , SIA Mar 2015, Montigny le Bretonneux France. hal-01282544

HAL Id: hal-01282544

https://hal.science/hal-01282544v1

Submitted on 3 Mar 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Identification de sources acoustiques, par couplage numérique, appliquée à des pièces complexes de GMP

S. Forget[1], M. Schaeffer[1], N. Totaro[2], J-L. Guyader[2]

1: Centre Technique Renault, 1 Allée Cornuel, F-91510 Lardy, France
2: Laboratoire Vibrations Acoustique, 25 bis Avenue Jean Capelle, F-69621 Villeurbanne Cedex, France

Résumé: L'identification des sources vibro-acoustiques sur un GMP (Groupe Moto-Propulseur) reste aujourd'hui un sujet d'actualité pour pouvoir agir sur les causes du bruit. Pour cela, les acousticiens disposent de méthodes expérimentales d'identification et peuvent utiliser des outils de simulation numérique. Le développement de la simulation, dont l'intérêt à long terme est de réduire les prototypes physiques coûteux, passe par une étape indispensable de comparaison entre les essais et les calculs. Seulement, les principales méthodes expérimentales d'identification de sources acoustiques utilisées aujourd'hui en automobile ne sont pas assez précises, notamment en termes de localisation, pour permettre une telle corrélation. C'est dans ce contexte que la méthode présentée ici, nommée M-iPTF pour inverse Patch Transfer Functions with Mixed boundary conditions, a été développée. Grâce à un couplage de données expérimentales et numériques, elle est capable de reconstruire, à partir de mesures acoustiques, le champ de vitesse normale à la surface même de pièces de géométries complexes.

Cet article présente la théorie sur laquelle s'appuie la méthode, en particulier l'application de l'identité de Green sur une cavité fictive entourant la source, sa validation numérique complète et une application expérimentale.

Mots clés: identification de source, reconstruction de champs vibratoires, méthode inverse, inverse Patch Transfer Functions method.

1. Introduction

Il existe aujourd'hui de nombreuses méthodes expérimentales d'identification de sources acoustiques en raison de la diversité des applications [1]. Les deux principales méthodes classiquement utilisées en automobile sont les techniques d'holographie acoustique en champ proche et de formation de voies.

L'holographie acoustique (NAH) [2] s'appuie, dans sa formulation classique, sur la transformée de Fourier 2D de l'équation de Helmholtz et des mesures de pressions réalisées en champ proche avec une antenne de microphones. Elle permet de reconstruire les différents champs sources (pression, vitesse et intensité) mais présente trois inconvénients majeurs: (i) l'identification ne peut se faire que sur des géométries simples (planes, cylindriques ou sphériques), (ii) les mesures doivent être réalisées dans des conditions de champs libre et (iii) en champ proche afin d'éviter les effets de bord.

La formation de voies ou beamforming [3] utilise quant à elle un réseau de microphones placé en champ lointain et applique pour chaque signal un retard dépendant de la position du micro pour déterminer, par addition, la position de la source. Cependant il s'agit là d'une approche purement qualitative et qui présente certaines limitations à basses fréquences.

La méthode présentée ici a été initiée en vue de pouvoir disposer d'une méthode expérimentale d'identification de sources acoustiques servant d'aide à la simulation numérique. L'objectif est de reconstruire, à partir de mesures acoustiques simples, le champ de vitesse vibratoire à la surface même de la source, ceci afin d'être en mesure de pouvoir comparer les essais et les calculs. La méthode M-iPTF est une méthode inverse dont le principe repose sur la définition d'une cavité fictive entourant la source et sur l'utilisation de l'identité de Green. Cette dernière permet de séparer la contribution de la source de celle de son environnement afin de pouvoir, par inversion du problème, caractériser la source à identifier. Grâce à cette propriété également, la méthode est une méthode de séparation qui autorise la réalisation des mesures, uniquement des pressions autour de la source, en milieu non forcément anéchoïque. Enfin, elle nécessite une modélisation numérique, avec un calcul de base modale, ce qui permet de traiter des sources de géométries complexes. Les différents champs (vitesse, pression et intensité) sont ainsi quantifiés sur la géométrie réelle de la source.

2. Principe théorique

2.1 Formulation du problème

Considérons le problème présenté à la Figure 1 où une source vibro-acoustique S de surface Σ rayonne dans un environnement acoustique quelconque composé d'objets et d'une source perturbatrice S'.

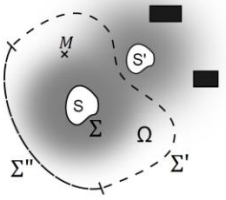


Figure 1 : Définition de la cavité acoustique Ω et de ses frontières : la surface source Σ, la surface virtuelle Σ' et la surface rigide Σ''

Afin d'isoler théoriquement la source S de son environnement non contrôlé, une surface virtuelle Σ' est définie. Il faut bien comprendre que cette surface Σ' n'a aucune signification physique particulière. Dans le cas de la Figure 1, la source est placée à proximité d'une surface réelle rigide Σ''.
L'ensemble des surfaces Σ, Σ' et Σ'' définit alors un volume virtuel fermé Ω sur lequel l'identité de Green peut être appliquée. Cette dernière permet de passer d'un problème volumique à un problème de frontières connaissant les conditions aux limites sur celles-ci. Dans sa forme générale elle s'écrit :

$$\iiint_{\Omega}[\Phi\Delta\Psi - \Psi\Delta\Phi]d\Omega = \iint_{\Gamma}[\Phi\frac{\partial\Psi}{\partial n} - \Psi\frac{\partial\Phi}{\partial n}]d\Gamma \quad [1]$$

Dans l'équation [2], les fonctions Φ et Ψ de l'équation [1] sont remplacées par les fonctions $p(M)$ et $\phi_n(M)$ qui correspondent respectivement à la pression en un point M de la cavité et aux déformées modales en pression de celle-ci :

$$\begin{aligned}&\iiint_{\Omega}[\phi_n(M)\Delta p(M) - p(M)\Delta\phi_n(M)]d\Omega = \\ &\iint_{\Sigma}\left[\phi_n(Q)\frac{\partial p(Q)}{\partial n} - p(Q)\frac{\partial\phi_n(Q)}{\partial n}\right]d\Sigma + \\ &\iint_{\Sigma'}\left[\phi_n(Q')\frac{\partial p(Q')}{\partial n} - p(Q')\frac{\partial\phi_n(Q')}{\partial n}\right]d\Sigma' + \\ &\iint_{\Sigma''}[\phi_n(Q'')\frac{\partial p(Q'')}{\partial n} - p(Q'')\frac{\partial\phi_n(Q'')}{\partial n}]d\Sigma''\end{aligned} \quad [2]$$

Ce choix est arbitraire, pourvu que les fonctions soient deux fois dérivables. La pression $p(M)$ est régie par l'équation de Helmholtz - Kirchhoff :

$$\Delta p(M) + k^{*2}p(M) = 0 \quad \forall M \in \Omega \quad [3]$$

où $k^* = \omega/c^* = k(1+\mathrm{i}\eta)^{-1}$ est le nombre d'onde complexe avec η le facteur d'amortissement, ω la pulsation angulaire et c le vitesse du son dans le milieu considéré.

Et les déformées modales respectent la relation suivante:

$$\Delta\phi_n(M) + k_n^2\phi_n(M) = 0 \quad \forall M \in \Omega \quad [4]$$

avec k_n le nombre d'onde à la pulsation propre ω_n.

Dans l'équation [2] les conditions aux limites du problème sont données par la relation d'Euler :

$$\frac{\partial p(Q)}{\partial n} = -\mathrm{i}\omega\rho_0 V_N(Q) \quad \forall Q \in \Sigma \quad [5]$$

$$\frac{\partial p(Q')}{\partial n} = -\mathrm{i}\omega\rho_0 V_N(Q') \quad \forall Q' \in \Sigma' \quad [6]$$

$$\frac{\partial p(Q'')}{\partial n} = 0 \quad \forall Q'' \in \Sigma'' \quad [7]$$

où V_N est la vitesse normale sortante à la surface considérée.

Il convient ensuite de choisir les conditions aux limites de la cavité virtuelle. En effet, celle-ci n'ayant pas de signification physique particulière, un choix arbitraire est admissible. Lors des premiers développements de la méthode iPTF, les conditions aux limites de la cavité étaient choisies homogènes, avec l'ensemble des parois satisfaisant la condition de Neumann Homogène [4,5,6], ce qui nécessitait la mesure co-localisée de la pression et de la vitesse particulaire d'air. Pour l'évolution M-iPTF de la méthode, présentée ici, les conditions aux limites de la cavité sont choisies mixtes avec les surfaces source Σ et rigide Σ'' respectant la condition de Neumann homogène tandis que la surface virtuelle Σ' s'appuie sur une condition de type Dirichlet homogène :

$$\frac{\partial\phi_n(Q)}{\partial n} = 0 \quad \forall Q \in \Sigma, \Sigma'' \quad [8]$$

$$\phi_n(Q') = 0 \quad \forall Q' \in \Sigma' \quad [9]$$

Ensuite, en décomposant la pression sur la base des modes propres de la cavité et en utilisant leur propriété d'orthogonalité, la pression en tout point M de la cavité peut s'exprimer par :

$$\begin{aligned}p(M) = &\\ \sum_{n=1}^{\infty}\mathrm{i}\rho_0\frac{\phi_n(M)}{[k^{*2} - k_n^2]\Lambda_n}[&\iint_{\Sigma}\omega\phi_n(Q)V_N(Q)d\Sigma \\ &- \iint_{\Sigma'}\omega_n\chi_n(Q')p(Q')d\Sigma']\end{aligned} \quad [10]$$

Où Λ_n représente la norme des modes propres en pression et χ_n les modes propres en vitesse de la cavité, données par la relation d'Euler :

$$\frac{\partial\phi_n(Q')}{\partial n} = -\mathrm{i}\omega_n\rho_0\chi_n(Q') \quad [11]$$

Pour pouvoir être calculé, le problème est ensuite discrétisé en surfaces élémentaires nommées *Patchs* et la base modale de la cavité est tronquée au mode N pour lequel la convergence de la solution doit être assurée :

$$p(M) = \sum_{n=1}^{N} \mathrm{i}\rho_0 \frac{\phi_n(M)}{[k^{*2} - k_n^2]\Lambda_n} [\sum_{j=1}^{N_j} \omega A_j \langle \phi_n \rangle_j \langle V_N \rangle_j - \sum_{k=1}^{N_k} \omega_n A_k \langle \chi_n \rangle_k \langle p \rangle_k] \quad [12]$$

Les indices j et k représentent respectivement un patch appartenant à la surface source Σ et à la surface virtuelle Σ'. L'opérateur $\langle \mathrm{X} \rangle_S$ représente la moyenne spatiale de la variable X sur la surface S et A_S l'aire de cette surface.

Dans l'équation [12], la surface rigide n'intervient plus dans le calcul, elle est en effet déjà prise en compte à travers la condition aux limites, choisie rigide, de la cavité.

En considérant le calcul de la pression en plusieurs points dans la cavité, l'équation [12] peut se mettre sous une forme matricielle :

$$\mathbf{p}_i = \mathbf{Z}_{ij}\mathbf{V}_j - \mathbf{Y}_{ik}\mathbf{p}_k \quad [13]$$

Avec :

$$\mathbf{Z}_{ij} = \sum_{n=1}^{N} \mathrm{i}\omega\rho_0 \frac{(\phi_n)_i \langle \phi_n \rangle_j A_j}{[k^{*2} - k_n^2]\Lambda_n} \quad et$$
$$\mathbf{Y}_{ik} = \sum_{n=1}^{N} \mathrm{i}\omega_n\rho_0 \frac{(\phi_n)_i \langle \chi_n \rangle_k A_k}{[k^{*2} - k_n^2]\Lambda_n} \quad [14]$$

Où l'indice i est relatif à un point pris dans la cavité.

L'équation [13] traduit le calcul du rayonnement de la source et de son environnement en tout point de la cavité. En l'inversant, le champ de vitesse source peut être calculé:

$$\mathbf{V}_j = \mathbf{Z}_{ij}^{-1}(\mathbf{p}_i + \mathbf{Y}_{ik}\mathbf{p}_k) \quad [15]$$

Finalement, à partir de l'équation [15] il est possible de retrouver le champ de vitesse source à partir de mesures de pression uniquement sur la surface virtuelle et dans la cavité (vecteurs $\mathbf{p}_k$ et $\mathbf{p}_i$), et du calcul des déformées modales en pression et en vitesse de la cavité (matrices $\mathbf{Z}_{ij}$ et $\mathbf{Y}_{ik}$). Les matrices $\mathbf{Z}_{ij}$ et $\mathbf{Y}_{ik}$ sont calculées par simulation numérique, ce qui permet d'utiliser une cavité virtuelle à géométrie complexe.

Une fois le champ de vitesse calculé, la source est complètement caractérisée. Il est en effet possible de remonter au champ de pression source en utilisant l'équation [13], et de calculer les intensités locales en multipliant les champs de pression et de vitesse :

$$\mathbf{p}_j = \mathbf{Z}_{jj}\mathbf{V}_j - \mathbf{Y}_{jk}\mathbf{p}_k \quad [16]$$

$$\mathbf{I}_j = \frac{1}{2}\Re(\mathbf{p}_j \circ \mathbf{V}_j^*) \quad [17]$$

Où $\Re(\blacksquare)$ et $\blacksquare^*$ représentent respectivement la partie réelle et le complexe conjugué d'un nombre complexe. $\circ$ désigne le produit d'Hadamard.

Des indicateurs globaux comme la puissance acoustique rayonnée ou le facteur de rayonnement peuvent également être calculés.

Par rapport à la méthode iPTF « classique », la différence principale vient du type de données à mesurer. En effet, dans le cas classique, la pression et la vitesse des particules d'air doivent être mesurées sur la surface virtuelle alors que pour la méthode présentée ici, seules des mesures de pressions sont nécessaires, ce qui simplifie grandement son application.

2.2 Régularisation du problème

L'équation [15] peut se mettre sous la forme d'un système linéaire $\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$:

$$\mathbf{Z}_{ij}\mathbf{V}_j = (\mathbf{p}_i + \mathbf{Y}_{ik}\mathbf{p}_k) \quad [18]$$

Un tel système est bien conditionné lorsque les trois conditions d'existence, d'unicité et de stabilité de la solution sont assurées. Dans le cas contraire le problème est dit mal posé et nécessite d'être régularisé afin qu'une solution optimale, proche de la solution théorique, puisse être obtenue.

La méthode M-iPTF, comme toutes les méthodes inverses en acoustique, repose sur un problème mal posé notamment lié à la mesure (problème en général sous déterminé, bruit et erreurs de mesure) et à la discrétisation même du problème (troncature modale, limite fréquentielle liée à la taille des patchs…). Ces différents facteurs font que la solution n'est ni unique ni stable et qu'une régularisation du problème est nécessaire.

Il existe dans la littérature différentes méthodes de régularisation disponibles [7,8], la plus connue et utilisée ici étant la régularisation de Tikhonov. Elle introduit un paramètre β qui permet d'agir sur le compromis entre l'erreur de mesures et l'erreur de régularisation. Le choix du paramètre β optimal peut être déterminé selon différentes méthodes, la

minimisation de la fonction GCV (Generalized Cross Validation) est utilisée ici [6].

3. Validation numérique

Une validation purement numérique de la méthode a été menée afin d'en valider la théorie. Pour cela trois calculs ont été réalisés (Figure 2) :

- Un calcul purement vibratoire de réponse en fréquence sous Nastran servant de conditions aux limites au calcul acoustique. Il permet d'obtenir les vitesses normales de référence ($\mathbf{V}_{j\,REF}$) qui seront comparées à celles identifiées par la méthode M-iPTF.
- Un calcul de rayonnement acoustique avec Actran sur la plage [200Hz - 2500Hz]. Il permet de calculer les pressions sur la surface virtuelle $\mathbf{p}_k$ et dans la cavité $\mathbf{p}_i$.
- Une extraction modale de la cavité jusqu'à 6400Hz sous Actran pour le calcul des matrices $\mathbf{Z}_{ij}$ et $\mathbf{Y}_{ik}$.

La source est un carter d'huile bafflé, excité par un bruit blanc, rayonnant en champ libre semi infini. La surface fictive a été prise rectangulaire (Figure 3(b)) pour en simplifier la modélisation de la cavité (Figure 3(c)). Les points de la cavité, pour la construction du vecteur $\mathbf{p}_i$, ont été choisis aléatoirement dans celle-ci (Figure 3(d)).

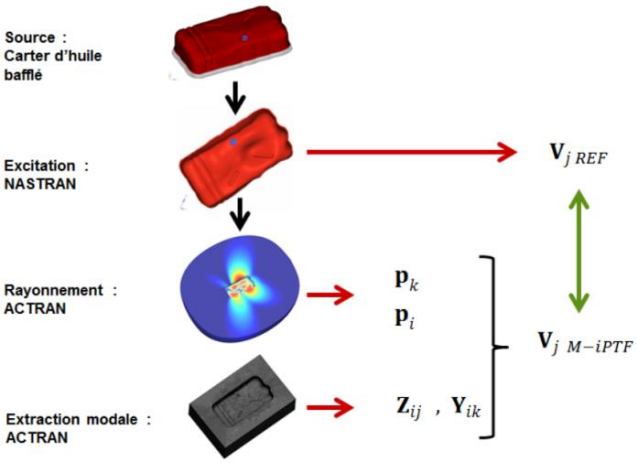
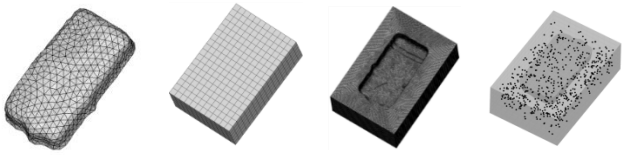


Figure 2 : Schéma de validation numérique de la méthode M-iPTF

Comme mentionné précédemment, il existe un certain nombre de facteurs influençant le processus d'inversion. Dans le cadre d'une première validation de la méthode, ces paramètres ont été choisis optimaux.

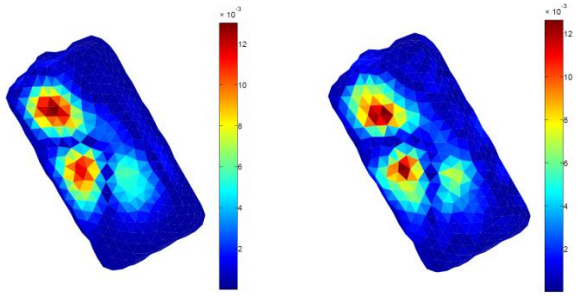
L'ensemble des trois calculs réalisés permet ainsi selon l'équation [15] d'identifier le vecteur $\mathbf{V}_j$ des vitesses sources sur le modèle de patchs choisi (Figure 3(a)). Pour pouvoir valider la méthode, les vitesses en sortie du calcul Nastran, prises comme référence, sont également moyennées sur ce même modèle de patchs.



(a) (b) (c) (d)

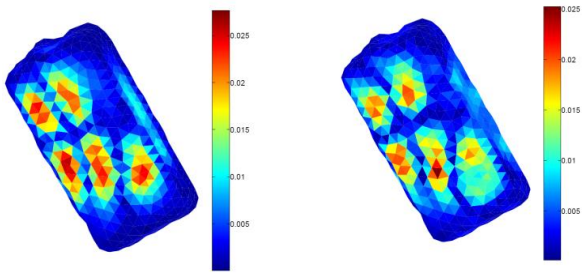
Figure 3 : Modèle de patchs (a) de la source, (b) de la surface virtuelle, (c) modèle EF de la cavité et (d) points aléatoires choisis dans la cavité

Les Figures 4,5 et 6 présentent les cartographies des champs de vitesse obtenus en sortie du calcul de référence Nastran et celles identifiées par la méthode M-iPTF régularisée par Tikhonov (GCV), respectivement à 700Hz, 1300Hz et 1850Hz. Leur comparaison montre alors que la méthode M-iPTF est capable de reconstruire précisément, à la fois en localisation et en amplitude, les champs de vitesses de la source sur sa géométrie même.



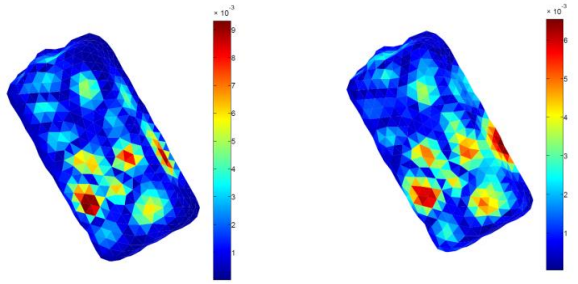
(a) 700Hz : V REF (b) 700Hz : V M-iPTF

Figure 4 : Comparaison des champs de vitesse (m/s) de référence (a) et identifiés (b) par la méthode M-iPTF à 700Hz



(a) 1300Hz : V REF (b) 1300Hz : V M-iPTF

Figure 5 : Comparaison des champs de vitesse (m/s) de référence (a) et identifiés (b) par la méthode M-iPTF à 1300Hz



(a) 1850Hz : V REF (b) 1850Hz : V M-iPTF

Figure 6 : Comparaison des champs de vitesse (m/s) de référence (a) et identifiés (b) par la méthode M-iPTF à 1850Hz

Pour avoir une évaluation objective de la qualité de reconstruction en fonction de la fréquence sur la plage de calcul 200 – 2500Hz, le critère *RVAC* (*Response Vector Assurance Criteria)* est ici utilisé :

$$RVAC(\omega) = S \times \sqrt{\frac{|\mathbf{V}_{id}(\omega)^H \mathbf{V}_{ref}(\omega)|^2}{(\mathbf{V}_{id}(\omega)^H \mathbf{V}_{id}(\omega))(\mathbf{V}_{ref}(\omega)^H \mathbf{V}_{ref}(\omega))}}$$

Avec $S = sign(\Re(\mathbf{V}_{id}(\omega)^H \mathbf{V}_{ref}(\omega)))$

Il s'agit d'un critère montrant le degré de linéarité entre deux vecteurs, utilisé ici entre les vitesses de référence $\mathbf{V}_{ref}$ et celles identifiées $\mathbf{V}_{id}$ par la méthode M-iPTF (Figure 7). Il permet ainsi, globalement, de vérifier la bonne localisation sur cartographies sur toute la plage de calcul. Sa valeur est comprise entre -1 et 1, 1 étant une corrélation parfaite, 0 une absence de corrélation et -1 une parfaite corrélation mais en opposition de phase. Il est généralement admis qu'une corrélation reste suffisante pour un critère supérieur à 0.75. Sur l'ensemble de la plage de calcul, le critère reste supérieur à 0.8 (Figure 7), ce qui permet de valider complètement, pour cette première approche numérique, la théorie de la méthode M-iPTF.

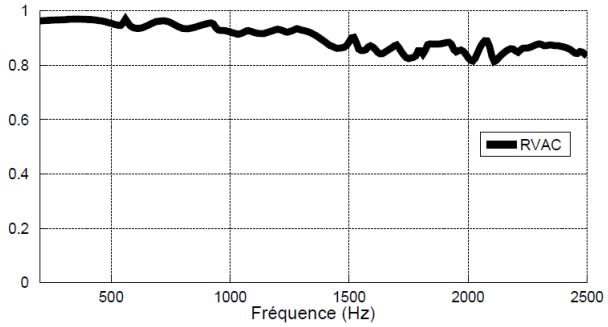


Figure 7 : Critère RVAC calculé entre les vitesses de référence et celles identifiées par la méthode M-iPTF

4. Validation expérimentale

L'expérience numérique précédente a été reproduite sur un carter d'huile réel bafflé (Figure 8(a)), mise en vibration sous un bruit blanc à l'aide d'un pot vibrant (Figure 8(b)).

(a) Carter d'huile bafflé (b) Pot vibrant

Figure 8 : Système d'étude : un carte d'huile bafflé (a) est excité par un pot vibrant (b)

Les mesures ont été réalisées au moyen d'un robot 3 axes et d'une antenne de microphones 6x2. La surface fictive est à nouveau choisie rectangulaire par simplification (Figure 9 (b)), définissant ainsi le volume virtuel modélisé par éléments finis Figure 9 (c). Le vecteur $\mathbf{p}_k$, qui correspond en théorie à un moyennage spatial des pressions sur chaque patch de la surface fictive (Equation [15]), est approximé expérimentalement par une seule mesure de pression faite en leurs centres. Les points de la cavité ont été mesurés aléatoirement dans celle-ci (Figure 9(e)). La base modale de la cavité est extraite jusqu'à 8500Hz avec Actran. Enfin, le modèle de patchs source ayant servi à l'identification est présenté Figure 9(a).

Afin de disposer d'un outil de validation de la méthode, des mesures considérées comme de référence ont été réalisées à l'aide d'une sonde pU sur une surface rectangulaire la proche possible du carter d'huile (Figure 9 (d)).

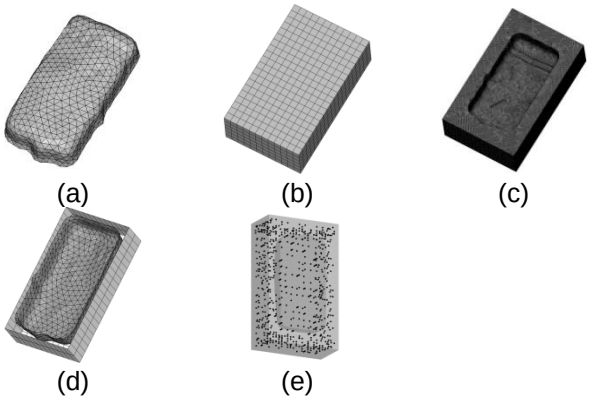
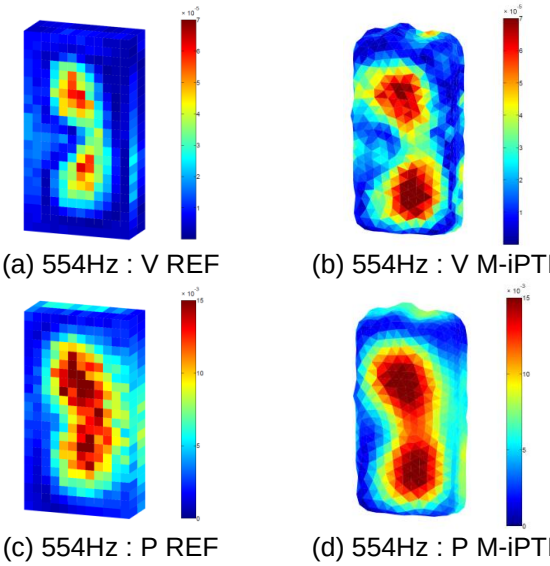


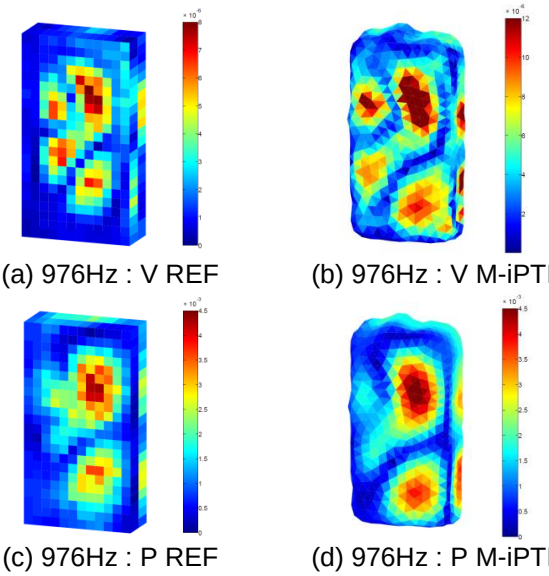
Figure 9 : Modèle de patch (a) de la source, (b) de la surface virtuelle, (c) modèle EF de la cavité, (d) surface des mesures de référence et (e) points mesurés dans la cavité



(a) 554Hz : V REF (b) 554Hz : V M-iPTF

(c) 554Hz : P REF (d) 554Hz : P M-iPTF

Figure 10 : Comparaison des champs de vitesse (m/s) et pression (Pa) de référence ((a)-(c)) et identifiés ((b)-(d)) par la méthode M-iPTF à 554Hz

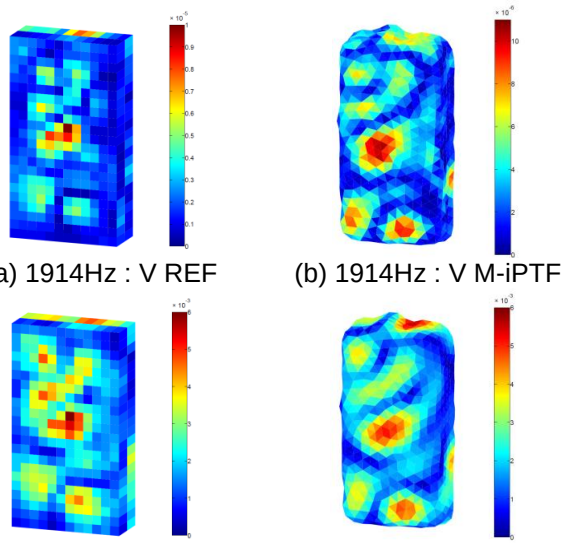


(a) 976Hz : V REF (b) 976Hz : V M-iPTF

(c) 976Hz : P REF (d) 976Hz : P M-iPTF

Figure 11 : Comparaison des champs de vitesse (m/s) et pression (Pa) de référence ((a)-(c)) et identifiés ((b)-(d)) par la méthode M-iPTF à 976Hz

Les Figures 10, 11 et 12 montrent la comparaison des cartographies des champs de vitesse et de pression mesurés par la sonde pU (référence) et celles obtenues par identification avec la méthode M-iPTF respectivement à 554Hz, 976Hz et 1914Hz. En comparant ces cartographies, on pourrait noter un léger décalage spatial entre la référence et l'identification. En réalité cela provient de la surface de référence qui ne correspond pas exactement à la surface de la source. De la même manière, les pressions et vitesses de référence sont légèrement plus faibles que celles identifiées, la surface de référence étant quelque peu éloignée de la surface source. Cette différence d'amplitude est à nouveau mise en évidence en traçant les vitesses et pressions quadratiques moyennes Figures 13 et 14.



(a) 1914Hz : V REF (b) 1914Hz : V M-iPTF

(c) 1914Hz : P REF (d) 1914Hz : P M-iPTF

Figure 12 : Comparaison des champs de vitesse (m/s) et pression (Pa) de référence ((a)-(c)) et identifiés ((b)-(d)) par la méthode M-iPTF à 1914Hz

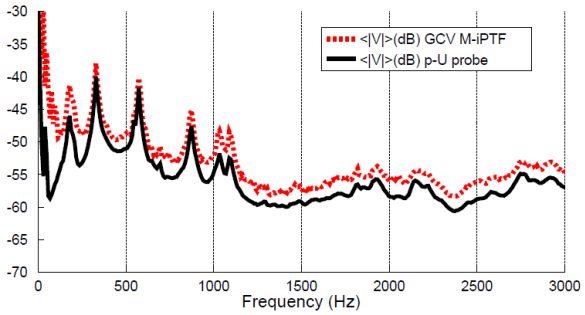


Figure 13 : Vitesse quadratique moyenne (ref dB = 1m/s)

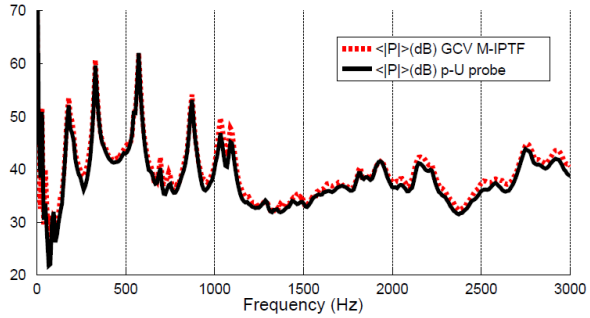


Figure 14 : Pression quadratique moyenne (ref dB = 2e-5 Pa)

Enfin la puissance rayonnée par le carter est tracée Figure 15. La conservation de cette dernière, non

affectée par la surface prise en compte, permet de valider définitivement la méthode sur une application expérimentale.

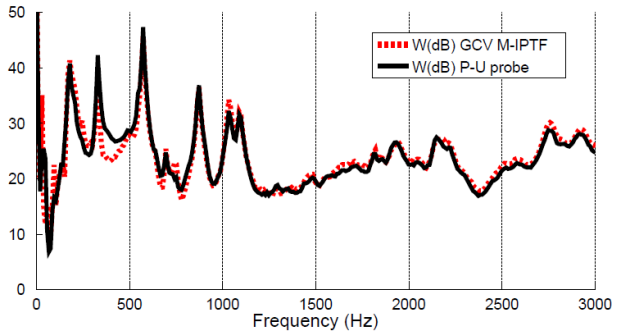


Figure 15 : Puissance acoustique rayonnée (ref dB = 10e-12W)

5. Conclusions

La méthode M-iPTF est une méthode expérimentale d'identification de sources acoustiques dont la particularité est de reposer sur des mesures acoustiques et une modélisation numérique. Ce couplage permet notamment, par rapport aux méthodes d'identification classiques, d'apporter de la précision dans la localisation des sources sur des géométries complexes. La méthode offre ainsi une meilleure compréhension et discrimination des sources acoustiques et permettrait surtout d'aider la simulation numérique avec une corrélation possible entre les essais et les calculs. L'intérêt est d'autant plus grand avec l'arrivée en automobile des nouvelles pièces de type hybrides par exemple.

Un autre point important est le fait que la méthode M-iPTF ne repose que sur des mesures de pressions, une solution technologique fiable et de moindre coût, pouvant être acquises en environnement non anéchoïque. Le process de mesures s'en trouve ainsi simplifié.

6. Remerciements

Ce travail a été réalisé au sein du Labex CeLya de l'Université de Lyon, géré par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR-10-LABX-0060/ ANR-11-IDEX-0007).

7. Références

[1] Jeroen Lanslots, Filip Deblauwe, et Karl Janssens: "*Selecting sound source localization techniques for industrial applications*", Sound and Vibration, 44(6), 6, 2010.

[2] Maynard, Julian D and Williams, Earl G and Lee, Y: "*Nearfield acoustic holography: I. Theory of generalized holography and the development of NAH*", The Journal of the Acoustical Society of America, 78(4), 1395--1413, Acoustical Society of America, 1985.

[3] Billingsley, J and Kinns, R: "*The acoustic telescope*", Journal of Sound and Vibration, 48(4), 485--510, Elsevier, 1976.

[4] Aucejo Mathieu, Totaro Nicolas and Guyader J-L: "*Identification of source velocities on 3D structures in non-anechoic environments: Theoretical background and experimental validation of the inverse patch transfer functions method*", Journal of Sound and Vibration, 329(18), 3691--3708, Elsevier, 2010.

[5] D. Vigoureux, N.Totaro, J. Lagneaux and J.L. Guyader: "*Inverse Patch Transfer Functions Method as a Tool for Source Field Identification* ", Journal of Vibration and Acoustics, 137(2), 12, The American Society of Mechanical Engineers, and 2015.

[6] N. Totaro, D. Vigoureux, Q. Leclère, J. Lagneaux and J.L. Guyader: "*Sound fields separation and reconstruction of irregularly shaped sources*", Journal of Sound and Vibration, 336(0), 62 - 81, Elsevier, 2015.

[7] Q. Leclère: "*Acoustic imaging using under-determined inverse approaches: Frequency limitations and optimal regularization* ", Journal of Sound and Vibration, 321(3–5), 605 - 619, Elsevier, 2009.

[8] Y. Kim and P.A. Nelson: "*Optimal regularization for acoustic source reconstruction by inverse methods* ", Journal of Sound and Vibration, 275, 463 - 487, Elsevier, 2004.