

Imagerie acoustique en soufflerie S2A

Arnaud Ménoret¹, Nathalie Gorilliot², Jean-Luc Adam³

¹Signal Développement, 12 Bld Chasseigne, 86000 Poitiers, a.menoret@signal-developpement.com

²GIE S2A, 2 Av Volta, 78180 Montigny Le Bretonneux, nathalie.gorilliot@gies2a.fr

³Renault, TCR AVA 1 63, 1 Av du Golf, 78288 Guyancourt Cedex, jean-luc.adam@renault.com

Lors de la conception d'un véhicule automobile, les constructeurs cherchent à réduire le bruit rayonné vers l'extérieur mais aussi à maîtriser le confort acoustique dans l'habitacle. Cet article décrit les algorithmes optimisés de localisation de sources aéroacoustiques qui ont été mis en place dans la soufflerie S2A pour le traitement simultané de deux antennes acoustiques. Ceux-ci permettent de caractériser les sources de bruit rayonnant vers l'extérieur du véhicule mais aussi l'impact de ces sources vers l'intérieur de l'habitacle. L'algorithme CLEAN de localisation des sources de bruit extérieures est d'abord explicité. Cette méthode, issue de la radiotélescopia, consiste à estimer pas à pas la distribution des sources, en "nettoyant" de manière itérative une cartographie obtenue à l'aide de la méthode de formation de voie classique (CBF). Il améliore nettement la dynamique des cartographies, la plage fréquentielle d'analyse et donne accès aux caractéristiques spatiales et spectrales de chaque source localisée. A partir de cette liste de sources, il est possible d'évaluer le bruit rayonné par une zone précise du véhicule. La méthode MALIS (*Méthode Acoustique pour la Localisation par Imagerie Sélective*) de localisation des sources de bruit rayonnant vers l'intérieur et développée en partenariat avec RENAULT est ensuite détaillée. Elle repose sur le traitement simultané de la distribution de sources aéroacoustiques autour du véhicule et des fonctions de transfert qui définissent la transmission acoustique entre ces sources et des points récepteurs situés à l'intérieur de l'habitacle. Enfin, les résultats obtenus avec ces algorithmes sur des véhicules placés dans la soufflerie S2A seront présentés sous forme de cartographies 3D extérieures et intérieures.

1 Introduction

Les techniques d'imagerie acoustique ont initialement été développées pour le domaine aéronautique. Le secteur automobile a ensuite hérité de ces méthodes permettant de localiser les sources de bruit à l'extérieur du véhicule. Les bruits de roulement et de motorisation ayant été réduits, les bruits d'origine aérodynamique jouent un rôle de plus en plus prépondérant. Encore difficile à modéliser, ce type de source nécessite une caractérisation expérimentale par le biais de campagnes d'essais en soufflerie.

Pour répondre aux particularités de la mesure en soufflerie ainsi qu'aux exigences du secteur automobile, l'algorithme de base de formation de voies (CBF pour *Conventional BeamForming*) a dû être adapté. La présence de sources images générées par le plancher réfléchissant et le décalage spatial des sources induit par l'écoulement sont ainsi des perturbations qu'il a fallu prendre en compte dans les formulations de la formation de voies. Dans un souci de fiabilité des résultats, l'utilisation d'un algorithme optimisé de type CLEAN [1] s'est également avérée nécessaire. Avec cette méthode la dynamique des cartographies et la précision de localisation ont été grandement améliorées. Enfin, pour la conception d'un véhicule automobile, le constructeur ne s'intéresse pas seulement aux sources rayonnant vers l'extérieur mais également aux sources participant activement au bruit à l'intérieur de l'habitacle. La méthode MALIS a été développée en collaboration avec Renault pour localiser ce type de source.

2 Localisation de sources de bruit d'origine aérodynamique

2.1 Méthode de formation de voies

En imagerie acoustique, le terme formation de voies désigne un processus permettant à partir d'une mesure d'antenne, i.e. un réseau de microphones, de connaître le niveau d'émission sonore d'un point de focalisation choisi.

La formation de voies consiste dans le domaine temporel à pondérer et à retarder les différents signaux microphoniques avec un retard correspondant à la distance de marche entre le point de focalisation et le microphone.

Ces signaux sont ensuite sommés pour donner la réponse de l'antenne. Cette sommation des signaux par le jeu des interférences permet d'obtenir un lobe de directivité présentant un maximum dans la direction de la source. Une normalisation adéquate permet de lier ce maximum à la puissance de la source placée au point de focalisation. L'intérêt d'une antenne est alors de pouvoir "écouter" dans différentes directions en introduisant analogiquement ou numériquement des retards sur les signaux.

Dans le domaine fréquentiel, le traitement de formation de voie conduit à l'établissement de différents estimateurs [2].

On cherche à minimiser au sens des moindres carrés l'erreur de reconstruction :

$$\min_{\lambda_F} \| \mathbf{P} - \sigma_F \mathbf{H}_F \|^2 \quad (1)$$

où $\mathbf{P}$ est le vecteur représentant les signaux des N microphones de l'antenne, $\mathbf{H}_F$ est le vecteur représentant les fonctions de transfert entre un point de l'espace noté F et les

N microphones et σ_F est l'amplitude du signal émis par la source de bruit placée au point F .

Cette minimisation conduit à un estimateur d'amplitude noté :

$$\hat{\sigma}_F = \frac{\mathbf{H}_F^H \mathbf{P}}{\|\mathbf{H}_F\|^2} \quad (2)$$

et à un estimateur de direction encore appelé estimateur de cohérence noté :

$$\hat{\gamma}_F = \frac{\|\mathbf{H}_F^H \mathbf{P}\|^2}{\|\mathbf{H}_F\|^2 \|\mathbf{P}\|^2} \quad (3)$$

Cet estimateur varie entre 0 et 1. Il traduit en fait l'adéquation entre les signaux mesurés et les signaux pouvant être reconstruit avec le modèle H_F pour une source placée au point de focalisation F .

Dans le cas de signaux aléatoires, on introduit la matrice interspectrale des signaux microphoniques :

$$\mathbf{\Gamma} = \langle \mathbf{P}^H \mathbf{P} \rangle \quad (4)$$

Les estimateurs de cohérence et d'amplitude s'écrivent alors :

$$\hat{\gamma}_F = \frac{\mathbf{H}_F^H \mathbf{\Gamma} \mathbf{H}_F}{\|\mathbf{H}_F\|^2 \text{Tr}(\mathbf{\Gamma})} \quad \text{et} \quad \hat{\sigma}_F = \frac{\mathbf{H}_F^H \mathbf{\Gamma} \mathbf{H}_F}{\|\mathbf{H}_F\|^4} \quad (5,6)$$

Physiquement, $\hat{\sigma}_F$ indique la quantité d'énergie reçue par l'antenne qui peut être reconstituée à partir du monopôle situé au point de focalisation F .

La formation de voie possède l'avantage majeur de la robustesse, notamment par rapport à des méthodes haute résolution comme Music ou Capon [3]. Cet avantage provient du fait que le filtrage spatial ne dépend pas des données mesurées.

En revanche, ses performances sont parfois trop faibles (figure 1), réduisant considérablement la gamme de fréquence présentant à la fois un lobe principal assez étroit, de faibles lobes secondaires et, l'absence de sources fictives.

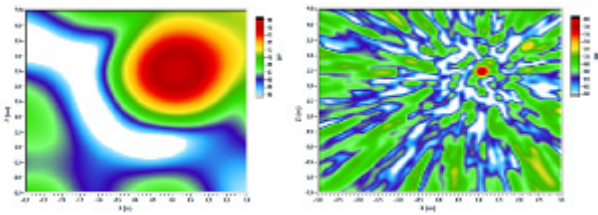


Figure 1 : CBF 160 Hz (à gauche) et 1250 Hz (à droite), source en $X = 1$ m et $Z = 2.5$ m

2.2 Adaptation aux mesures en soufflerie

En espace libre et en l'absence d'écoulement, la pression captée par un microphone situé à la distance r_m d'un monopôle en régime harmonique est donnée par l'équation suivante :

$$p = \frac{1}{r_m} \exp\left(j\omega\left(t - \frac{r_m}{c}\right)\right) \quad (7)$$

où c est la célérité du son et ω la pulsation.

Lorsque la soufflerie est dotée, comme dans la soufflerie S2A, d'un plancher réfléchissant, les sources images doivent être prises en compte et la pression s'écrit alors :

$$p = \frac{1}{r_m} \exp\left(j\omega\left(t - \frac{r_m}{c}\right)\right) + \frac{1}{r'_m} \exp\left(j\omega\left(t - \frac{r'_m}{c}\right)\right) \quad (8)$$

où r'_m est la distance entre la source image et le monopôle.

L'autre paramètre à intégrer dans le calcul des fonctions de transfert est l'incidence de l'écoulement sur la propagation du son. Sous l'hypothèse de l'acoustique géométrique, les effets de la convection et de la couche de cisaillement entre le microphone et la source peuvent être modélisés en introduisant deux termes correcteurs dans l'expression d'origine :

$$p = \frac{A}{r_m} \exp\left(j\omega\left(t - \frac{r_m}{c} + \Delta t\right)\right) \quad (9)$$

Dans cette équation, Δt représente la différence entre le temps d'arrivée du front d'onde avec écoulement et la valeur obtenue sans écoulement, A représente le terme de correction d'amplitude du signal de pression.

2.3 Bruit à l'extérieur d'un véhicule : CLEAN WB

La méthode CLEAN, issue de la radiotélécopie, consiste à estimer pas à pas la distribution des sources, en "nettoyant" de manière itérative une cartographie obtenue à l'aide de la méthode de formation de voie classique (CBF). CLEAN WB (Wideband) [1] est la version large bande de CLEAN. Avec cette méthode, les limitations de la formation de voies peuvent être dépassées (figure 2).

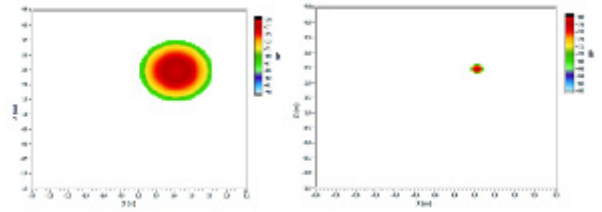


Figure 2 : CLEAN WB 160 Hz (à gauche) et 1250 Hz (à droite), source en $X = 1$ m et $Z = 2.5$ m

L'algorithme CLEAN WB permet d'estimer les caractéristiques d'une distribution discrète de sources. Chacune des sources est caractérisée par sa position et la transformée de Fourier du signal émis. CLEAN WB se distingue des autres algorithmes d'optimisation sur plusieurs points. En premier lieu il n'est pas nécessaire d'effectuer un maillage fin de la zone source pour obtenir une estimation précise de la position des sources. En effet, le maillage initial de la zone sert uniquement pour donner une première estimation de la position des sources, qui est ensuite affinée par optimisation. Il s'agit de plus d'un algorithme itératif, dans lequel la puissance des sources est estimée dans toute la bande d'analyse à chaque itération.

Chaque source n est caractérisée par la transformée de Fourier de son amplitude (notée $S_{n,i}(\omega)$, avec i l'indice de trame temporelle), et sa position x_k . L'algorithme fait intervenir un paramètre numérique, noté ρ , compris entre 0 et 1, qui fixe la vitesse de convergence.

Dans le cadre de la majorité des applications de l'imagerie acoustique, seule l'estimation de la position et de la puissance moyenne des sources est recherchée. Lorsque l'on ne souhaite pas déterminer le signal temporel émis par les sources, l'algorithme CLEAN WB peut être modifié de manière à être appliqué directement à la matrice interspectrale des signaux microphoniques. L'intérêt est

d'une part, un gain de place mémoire, et d'autre part, une réduction du nombre d'opérations à effectuer lorsque la taille des signaux est importante. Le processus itératif peut alors s'écrire de la façon suivante :

1. Initialisation $k = 0$

Création d'une matrice interspectrale « reste » à partir de la matrice interspectrale mesurée :

$$\Gamma_k(\omega) = \Gamma(\omega) \quad (10)$$

2. Tant que Γ_k contient de l'information, répéter :

a. Recherche de la position x_k du maximum de l'estimateur de cohérence, calculé sur toute la bande passante :

$$x_k = \arg_x \max_{\omega} \frac{\mathbf{H}(x, \omega)^H \Gamma_k(\omega) \mathbf{H}(x, \omega)}{\text{Tr}(\Gamma_k(\omega)) \|\mathbf{H}(x, \omega)\|^2} \quad (11)$$

b. Estimation de la puissance de la source :

$$\hat{\sigma}_k(\omega) = \sum_{\omega} \frac{\mathbf{H}(x_k, \omega)^H \Gamma_k(\omega) \mathbf{H}(x_k, \omega)}{\|\mathbf{H}(x_k, \omega)\|^4} \quad (12)$$

c. Enregistrement de la source

d. Nettoyage de la matrice Γ_k :

$$\Gamma_{k+1} = \Gamma_k - \rho \mathbf{R}(x_k) \Gamma_k - \rho \Gamma_k \mathbf{R}(x_k) + \rho^2 \mathbf{R}(x_k) \Gamma_k \mathbf{R}(x_k)$$

$$\text{avec : } \mathbf{R}(x_k) = \frac{\mathbf{H}(x_k) \mathbf{H}(x_k)^H}{\|\mathbf{H}(x_k)\|^2} \quad (13)$$

e. $k = k + 1$

3. Somme des sources localisées en chaque point focal pour obtenir la cartographie de puissance finale.

2.4 Bruit à l'intérieur d'un véhicule : MALIS

Les techniques d'imagerie acoustique présentées précédemment permettent de caractériser les sources de bruit rayonnant vers l'extérieur du véhicule. Pour déterminer l'impact de ces sources dans l'habitacle, une approche développée par Signal Développement en partenariat avec Renault [4] consiste à réaliser une mesure simultanée du champ acoustique extérieur, à l'aide d'une antenne microphonique, et intérieur à l'aide de microphones de pression.

A partir de ces données, on cherche non seulement à caractériser la distribution de sources aéroacoustiques autour du véhicule, mais également les fonctions de transfert (FRF, *Frequency Response Functions*) qui caractérisent la transmission acoustique entre ces sources et des points récepteurs situés à l'intérieur de l'habitacle (figure 3). Cette méthode a été baptisée MALIS (*Méthode Acoustique pour la Localisation par Imagerie Sélective*).

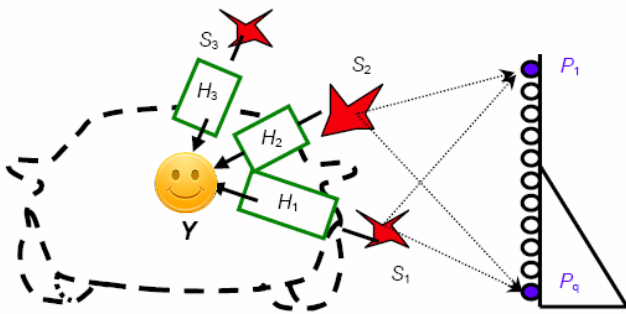


Figure 3 : sources localisées par l'antenne microphonique (P_i) et entendues par le passager (Y)

Le principe de base de la méthode MALIS est le suivant. La formation de voies classique permet d'évaluer la puissance des sources aéroacoustiques extérieures $S(F_i)$, F_i désignant le point de focalisation. Cependant, la contribution réelle de $S(F_i)$ au bruit intérieur mesuré $y(t)$ dépend de la fonction de transfert $h_{int}(F_i)$ qui représente le filtrage de la source par la structure et l'habitacle du véhicule jusqu'aux oreilles du passager. En supposant que les sources de bruit sont décorrélées spatialement, la puissance sur le microphone intérieur en fonction des FRF $h_{int}(F_i)$ et de la puissance émise par les sources extérieures $\langle s(F_i)s(F_i)^* \rangle$ s'écrit :

$$\langle yy^* \rangle = \sum_i \tau(F_i) = \sum_i |h(F_i)|^2 \langle s(F_i)s(F_i)^* \rangle \quad (14)$$

où $\tau(F_i)$ est la contribution en puissance de la source $S(F_i)$ au bruit intérieur, appelée contribution intérieure.

En notant $\Gamma = \langle PP^H \rangle$ la matrice interspectrale des microphones de l'antenne, et $C = \langle yP^H \rangle$ le vecteur des interspectres entre le microphone intérieur et les microphones de l'antenne, on en déduit l'expression de l'estimateur de la contribution intérieure :

$$\hat{\tau}(F_i) = |h_{int}(F_i)|^2 \langle s(F_i)s(F_i)^* \rangle = \frac{|\mathbf{H}(F_i)^H \mathbf{C}|^2}{\mathbf{H}(F_i)^H \Gamma \mathbf{H}(F_i)} \quad (15)$$

En réalité, l'estimation de la contribution intérieure est biaisée par la présence des lobes secondaires générés par la réponse de l'antenne dans le calcul de $\langle s(F_i)s(F_i)^* \rangle$ par formation de voies. La méthode MALIS utilise donc le même procédé de nettoyage que l'algorithme CLEAN. La source dominante étant correctement estimée, celle-ci est sauvegardée et est soustraite à la cartographie "reste" à chaque itération.

3 Application en soufflerie S2A

3.1 Dispositif de mesure



Figure 4 : antennes acoustiques latérale et verticale dans la soufflerie S2A

La soufflerie S2A située à Montigny-Le-Bretonneux s'est dotée d'un système d'imagerie acoustique performant pour répondre aux besoins des constructeurs automobiles. La veine d'essais de section 24 m² et de longueur 14 m permet de tester des véhicules autant du point de vue

aérodynamique que du point de vue acoustique jusqu'à des vitesses de 240 km/h. Le système d'imagerie est composé de deux antennes latérale et verticale respectivement de 64 et 88 microphones. Ces antennes ont des envergures de 2 m x 4 m et 4 m x 4 m (figure 4).

L'acquisition est assurée par des cartes PXI de National Instruments pilotées par le logiciel SD-Daq (logiciel d'acquisition développé par Signal Développement). Cette chaîne assure le conditionnement et l'acquisition simultanée sur 24 bits des 160 signaux jusqu'à une fréquence d'échantillonnage de 100 kHz. Le logiciel SD-Daq permet également la localisation de sources de bruit en temps réel ainsi que l'écoute au point focalisé.

3.2 Outils d'analyse

Le traitement des données est assuré par le logiciel SD-Image (logiciel d'imagerie acoustique développé par Signal Développement) couplé à un cluster de 4 ordinateurs quadri-cœurs. Parmi les nombreuses fonctionnalités disponibles, les traitements CLEAN WB et MALIS permettent de tracer les cartographies de bruit extérieur et intérieur avec une dynamique de plus de 15 dB.

Les figures 5 et 6 fournissent des exemples de résultats obtenus avec CLEAN WB et les deux antennes acoustiques. Les cartographies peuvent être représentées en 2D avec la photographie du véhicule en arrière plan ou bien en 3D sur un maillage du véhicule. Avec ces représentations, la lisibilité des résultats est grandement améliorée.

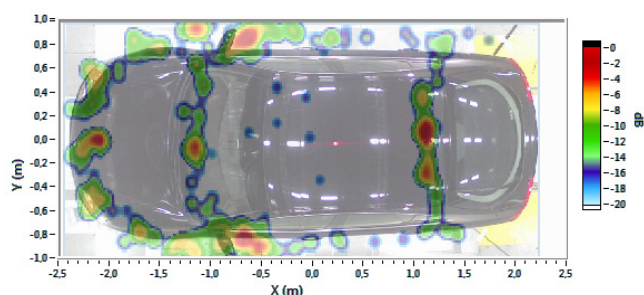


Figure 5 : cartographie extérieure 2D à 1600 Hz avec l'antenne du dessus

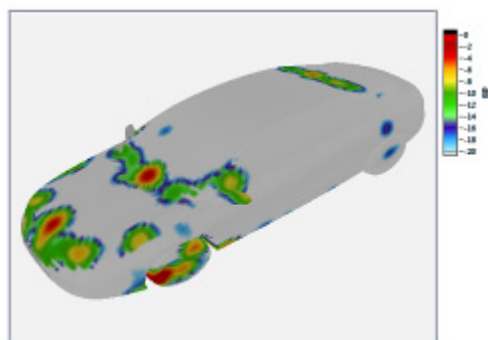


Figure 6 : cartographie extérieure 3D à 1000 Hz avec les deux antennes

Les cartographies présentées en figures 7 à 9 illustrent les performances de la méthode MALIS sur un véhicule utilitaire. La figure 7 présente une cartographie typique du bruit extérieur obtenue à 1000 Hz avec CLEAN WB. Les sources les plus énergétiques sont localisées au niveau de la roue avant, du rétroviseur et des essuie-glaces.

La contribution des sources aéroacoustiques extérieures au niveau de bruit intérieur mesuré à l'emplacement du conducteur est représentée en figure 8. Du point de vue du conducteur, les sources de bruit au niveau des essuie-glaces et de la roue avant ont disparu.

La dernière figure (figure 9) montre l'influence de l'emplacement du point d'écoute, avec le microphone intérieur positionné au niveau de la place passager avant. Dans cette configuration, le rétroviseur avant gauche devient une source secondaire.

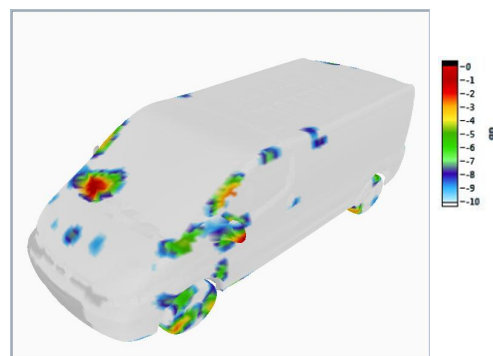


Figure 7 : cartographie extérieure 3D à 1000 Hz avec les deux antennes

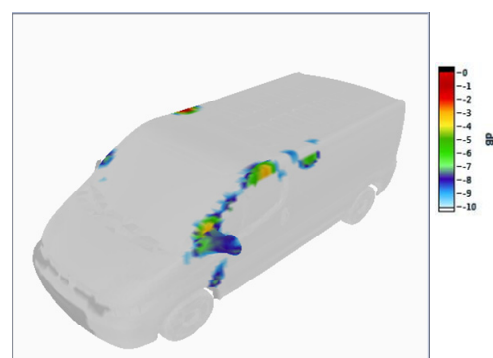


Figure 8 : cartographie intérieure 3D à 1000 Hz avec les deux antennes pour la place conducteur

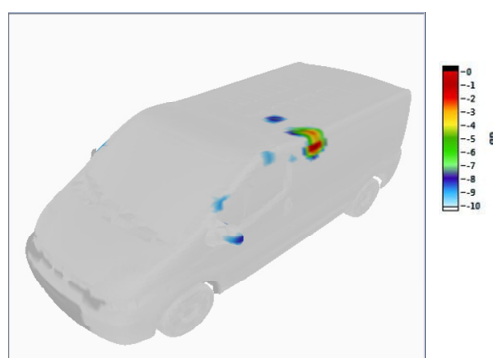


Figure 9 : cartographie intérieure 3D à 1000 Hz avec les deux antennes pour la place passager

Outre ces représentations 2D et 3D des sources localisées, le logiciel d'analyse permet également de comparer sous forme de spectres les niveaux d'émissions de zones précises de la zone focale (figure 10). Grâce aux algorithmes CLEAN WB et MALIS qui donnent accès aux caractéristiques spatiales et spectrales de chaque source localisée, cette information est directement disponible. Ce procédé facilite le travail d'expertise généralement réalisé en aval d'une campagne d'essais.

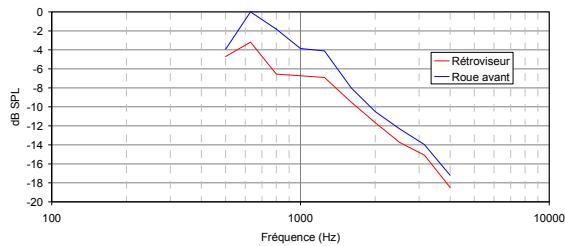


Figure 10 : niveaux de pression à 1 m des sources rétroviseur (en rouge) et roue avant (en bleu)

4 Conclusion

Pour répondre aux besoins des constructeurs, le GIE-S2A s'est doté d'un outil industriel performant d'imagerie acoustique. Celui-ci associe une double antenne acoustique avec des traitements optimisés de localisation de sources.

L'algorithme CLEAN WB fournit la répartition des sources de bruit extérieures en s'affranchissant du biais apporté par la réponse d'antenne dans les algorithmes de base de formation de voies. Répondant à un besoin prioritaire des constructeurs automobiles, la méthode MALIS a quant à elle été développée afin d'estimer les contributions des sources aéroacoustiques extérieures au bruit intérieur.

Autrefois trop coûteux en temps, ces algorithmes d'optimisation peuvent maintenant être utilisés dans un contexte industriel avec les moyens de calcul disponibles. Le travail de l'ingénieur est ainsi facilité par la grande dynamique des cartographies et l'accès aux caractéristiques spatiales et spectrales de chacune des sources localisées.

Références

- [1] Wang Y., Li J., Soica P., Sheplak M., Nishida T., "Wideband RELAX and wideband CLEAN for aeroacoustic imaging", *J. Acoust. Soc. Am.* 115 (2), 757-767 (2004).
- [2] Elias G., "Localisation par antenne focalisée de sources de bruit en vue de leur réduction", *Entretiens Science et Défense, TP ONERA*, 1990-48 (1990).
- [3] Wang Z., Li J., Soica P., Sheplak M., Nishida T., "Robust Capon beamformers for wideband acoustic imaging", *Proceedings of the 9th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference* (2003).
- [4] Adam J.L., Ricot D., Lambourg C., Ménoret A., "Correlated beamforming method for relevant aeroacoustic source identification", *SAE*, 2009-01-2234 (2009).