

# Séparation des composantes compressible et incompressible d'un champ de pression pariétal

J. GUILLON<sup>1</sup>, S. MIRON<sup>2</sup>, V. GRULIER<sup>13</sup>, C. PICARD<sup>3</sup> et J. I. MARS<sup>1</sup>,

GIPSA-Lab, (DIS), INPG, Rue de la Houille Blanche, BP 46, 38402 Saint Martin d'Hères, France

<sup>2</sup>CRAN - Faculté des sciences et techniques BP 239 - 54506 Vandoeuvre Cedex

<sup>3</sup>PSA PEUGEOT CITROËN, Route de gizey 78943 Vélizy-Villacoublay Cedex

<sup>1</sup>[prenom.nom@gipsa-lab.inpg.fr](mailto:prenom.nom@gipsa-lab.inpg.fr), <sup>2</sup>[Sebastian.Miron@cran.uhp-nancy.fr](mailto:Sebastian.Miron@cran.uhp-nancy.fr), <sup>3</sup>[Nom.prenom@mps.com](mailto:Nom.prenom@mps.com)

**Résumé** – Dans l'industrie automobile, les recherches s'intéressent de plus en plus à l'amélioration du confort pour le chauffeur et les passagers dans l'habitacle d'un véhicule et notamment à la limitation des nuisances sonores dues à l'écoulement de l'air à la surface du véhicule. Dans ce contexte, et dans le but de faciliter l'analyse de ce type de nuisances, nous étudions la séparabilité des deux composantes d'origine aéroacoustique d'une part et aérodynamique d'autre part d'un champ de pression au contact d'une paroi. Les deux composantes étant enregistrées et synthétisées sur un réseau de capteurs, nous montrons que cette séparabilité peut être obtenue par des méthodes de filtrage classique (FK3D) et matriciel multicomposante (3DSVD notamment) après transformation spatiale des données.

**Abstract** – Research in car industry keeps trying to improve comfort in the passenger cells of vehicles by reducing noise pollution induced by wind turbulences in contact with the surface of the vehicle. In this context, the aim of this work is to study the separability of the aeroacoustic and aerodynamic components of a wall pressure field. After data description, we propose a 3D adaptation of FK filtering. Then, in order to take advantage of the geometry of the acoustical field, a spatial transformation is applied to the signal. Thus, multidimensional filters using SVD-ICA (Singular Values Decomposition-Independent Components Analysis) and 3DSVD are carried out. Finally, the study shows the benefits of considering the 3D aspect of the fields, as a 3D filtering method is used to separate acoustic and turbulent fields.

## 1. Introduction

Afin d'améliorer le confort du conducteur et des passagers d'un véhicule, les constructeurs automobiles cherchent à limiter au maximum les nuisances sonores d'origine aérodynamique perçues dans l'habitacle. Actuellement, les études sont principalement menées par voie expérimentale sur des véhicules prototypes en soufflerie. Cependant, dans le but de prendre en compte ces nuisances dès la phase de conception et de développement d'un véhicule, les efforts se portent sur la compréhension et la modélisation des mécanismes de production du bruit aéroacoustique et de sa transmission à l'intérieur du véhicule. L'ensemble des travaux récents est axé soit sur l'analyse des champs de pression d'origine turbulente (champ incompressible) en paroi, soit sur l'analyse du champ lointain acoustique (pression acoustique propagative). Ce travail étudie la séparabilité des deux composantes d'origine aéroacoustique et aérodynamique d'un champ de pression au contact d'une paroi à l'aide de données de synthèse. Nous proposons une étude multicapteur prenant en compte la dimension spatiale du champ. Une adaptation 3D du filtrage F-K est d'abord réalisée puis une transformation spatiale du champ de

pression est ensuite exploitée pour permettre l'utilisation de méthodes de filtrage multicomposante (SVD-ICA et 3D SVD).

## 2. Présentation des données

Nous présenterons les données numériques ou l'ondelette source du champ acoustique provient de l'estimation expérimentale du champ acoustique produit par le rétroviseur d'un véhicule en soufflerie et obtenue au moyen de la technique classique d'antennerie en champ lointain (la mesure étant effectuée hors flux). Pour simuler le champ acoustique, cet enregistrement est associé à un modèle de source dipolaire. Le champ turbulent est issu d'un calcul par méthode « Large Eddy Simulation » [6]. Les simulations concernent un ensemble de 29894 capteurs de pression répartis de manière non régulière autour du demi-cylindre (fig. 1). La densité du maillage est très inégale selon que l'on se trouve près ou loin du demi-cylindre; ceci explique la perte sensible de résolution spatiale, notamment pour le champ turbulent, sur la zone la plus en aval du demi-cylindre. Les différentes zones (de couleur rouge, bleue et verte) mettent en évidence la non-régularité du maillage. L'échantillonnage temporel des

signaux de chaque capteur est réalisé à 10 kHz et concerne une durée totale de 0.3 secondes.

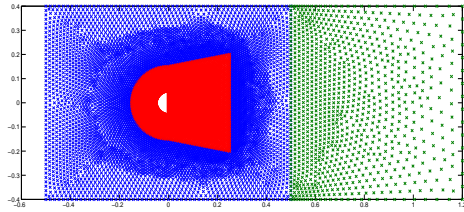


FIG. 1 : Réseau de capteurs

On représente les deux composantes du champ pariétal à un instant donné. La composante acoustique (fig. 2) montre que l'on retrouve les caractéristiques d'un dipôle acoustique (même signal dont les directions et les phases sont opposées). Dans le champ turbulent (fig. 3), on observe la traînée provoquée par le demi-cylindre en écoulement. Le champ étudié (fig. 4) résulte d'une somme des deux champs simulés indépendamment

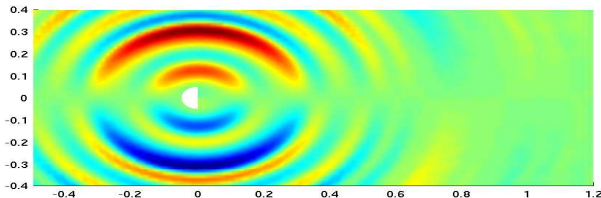


FIG. 2 : Champ acoustique (2D) à un instant donné

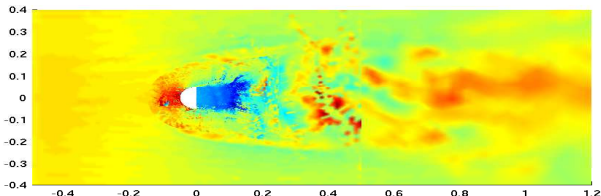


FIG. 3 : Champ turbulent (2D) au même instant

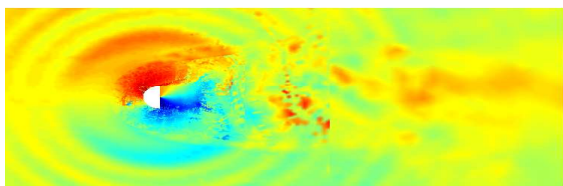


FIG. 4 : Champ complet (somme pondérée des champs acoustique et turbulent).

### 3. Etude multicapteur

Les résultats des méthodes de séparation des champs acoustique et turbulent tenant compte des caractéristiques fréquentielles sont présentés. Une étude récente [1] montre que le champ acoustique est détectable dans l'espace  $Kx-Ky-f$  (TF selon les trois axes  $x, y$  et temps). En s'appuyant sur cette étude, nous avons montré deux tendances particulières à chacun des champs dans ce plan calculé à partir de l'ensemble des capteurs. Le champ acoustique présente deux motifs ponctuelles (liés aux deux phases du dipôle) restant globalement constants et centrés autour de  $Kx=Ky=0$  même lorsque la fréquence d'analyse  $f$  varie

(figure 5a et b). Par contre, le motif observé pour le champ turbulent, est moins localisé et se déplace vers les  $Kx$  négatifs lorsque les fréquences augmentent (fig. 5b). Ceci permet une séparation par masque dans le domaine  $Kx-Ky$  efficace pour des fréquences supérieures à 250 Hz.

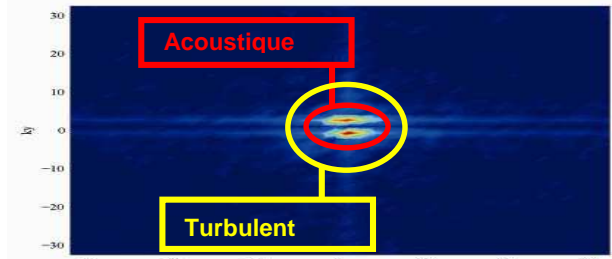


FIG. 5a : Visualisation  $Kx-Ky$  du champ complet à **16 Hz**

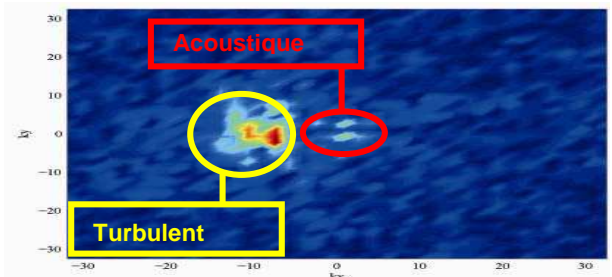


FIG. 5b : Visualisation  $Kx-Ky$  du champ complet à **250 Hz**

Une approche temps-fréquence, sur un seul capteur permet de discriminer les deux contributions énergétiques avec des conclusions similaires à l'étude en  $Kx-Ky-f$ . L'analyse temps-fréquence du signal  $p(x, y=0, f=16\text{Hz})$  ne nous permet pas de séparer les deux contributions (fig. 6A), celle effectuée à  $f=250\text{ Hz}$  permet de les séparer et d'affirmer que l'énergie acoustique s'atténue pour des distances supérieures à 3 mètres. (fig. 6B)

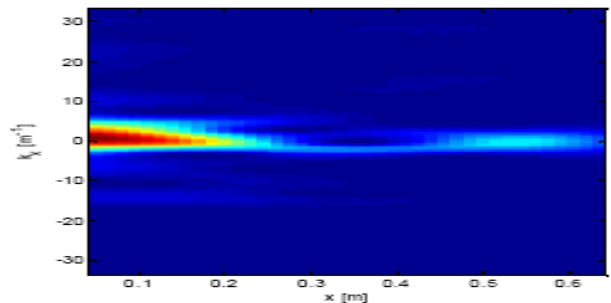


FIG. 6A : Analyse Espace-nombre d'onde ( $x,y=0, f=16\text{Hz}$ )

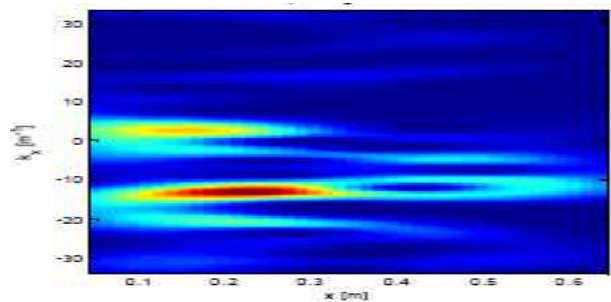


FIG. 6B: Analyse Espace-nombre d'onde ( $x,y=0, f=250\text{ Hz}$ )

Après cette analyse fréquentielle et temps-fréquence, permettant de séparer les deux champs dans le domaine des hautes fréquences, nous présentons maintenant les résultats obtenus par des méthodes de séparation des champs acoustique et turbulent en tenant compte de leurs caractéristiques spatiales. En utilisant les propriétés spatiales du champ acoustique à géométrie circulaire (fig. 2), nous appliquons une transformation spatiale réversible (passage de  $x, y$  en coordonnées polaires,  $\theta$  et  $\rho$ ) pour obtenir des fronts d'ondes non plus circulaires (fig. 7) mais plans afin de pouvoir utiliser des méthodes basées sur le filtrage matriciel de type SVD. Cette transformation entraîne une perte de cohérence spatiale du champ turbulent (fig. 8) et permet ainsi une séparation des deux champs équivalent à un débruitage du champ acoustique (le "bruit" étant le champ turbulent).

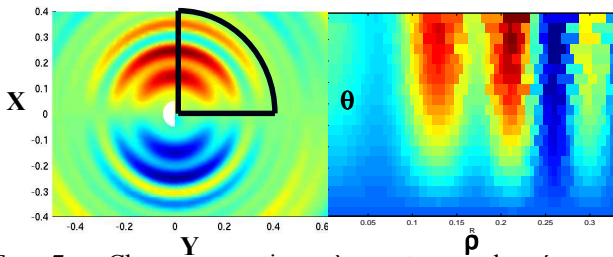


FIG. 7 : Champ acoustique à un temps donné avant (gauche) et après transformation (droite).

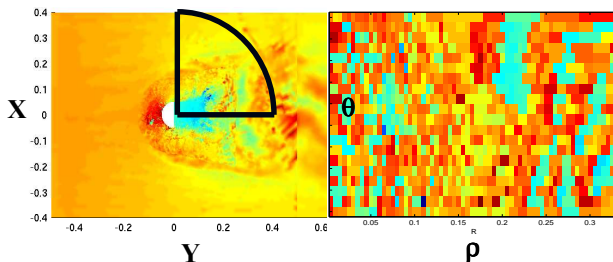


FIG. 8 : Champ turbulent à un temps donné avant (gauche) et après transformation (droite).

La transformation appliquée permettra de comparer et d'évaluer les différentes méthodes de séparation de source (SVD-ICA, 3D-SVD) appliquées à l'ensemble des données qui se présentent sous forme d'un cube à trois dimensions ( $\theta, \rho$  et temps, fig. 9).

## 4. Présentation des traitements 3D

### 4.1 SVD-ICA classique

Les signaux après transformation polaire sont représentés par un ensemble de matrices  $\underline{w}$  de dimension  $\rho, \theta$  (la troisième dimension étant le temps). La décomposition en valeurs singulières (SVD) de chaque matrice  $\underline{w}$  est une factorisation en un produit de matrices orthogonales  $\underline{u}$  et  $\underline{v}$  et une matrice diagonale  $\underline{\lambda}$  décrite par :  $\underline{w} = \underline{u} \underline{\lambda} \underline{v}^T = \sum_{k=1}^N \lambda_k \underline{u}_k \underline{v}_k^T$  avec  $\underline{u}$ , une matrice orthogonale de dimension  $(\rho, \theta)$ ,  $\underline{v}$  une matrice orthogonale de dimension  $(\theta, \rho)$ ,  $\underline{\lambda}$  est une matrice diagonale. Pour

effectuer la réduction d'espace, le sous-espace signal correspond à la somme des  $P$  premières sections singulières et le sous-espace bruit par des  $N-P$  sections singulières. Les données de départ se décomposent donc en :  $\underline{w} = \underline{w}^{sig} + \underline{w}^{bruit} = \sum_{k=1}^P \lambda_k \underline{u}_k \underline{v}_k^T + \sum_{j=P+1}^N \lambda_j \underline{u}_j \underline{v}_j^T$ .

Il n'y a aucune raison physique pour que les ondes aient des vecteurs de propagation orthogonaux. Aussi, la condition d'orthogonalité engendrée par la SVD force les ondelettes normalisées à être un mélange des ondes source et peut impliquer des erreurs dans les sous-espaces estimés. Exploitant le concept de l'analyse en composante indépendante (ICA), nous calculons une autre matrice d'ondelette normalisée statistiquement indépendantes à l'ordre quatre. Ceci a pour conséquence de « relâcher » la contrainte non-physique d'orthogonalité pour les vecteurs de propagation et d'améliorer la qualité des sous-espaces estimés [7,8].

On montre ainsi que le sous-espace signal correspond au champ acoustique, et le sous-espace bruit au champ turbulent. Afin de déterminer la manière la plus adaptée d'utiliser le filtrage, nous l'avons testé dans tous les plans possibles du cube de données. Les meilleurs résultats ont été obtenus pour un filtrage sur les plans  $(\rho, \theta)$  à chaque instant, et en ne conservant que la première valeur singulière pour reconstruire le sous-espace signal.

### 4.2 RESULTATS OBTENUS AVEC LA 3D-SVD

Nous présenterons l'application 3D-SVD aux données pour utiliser la cohérence du champ acoustique dans les trois dimensions. La 3D SVD est une extension de la SVD adaptée aux cubes de données 3D. Cet outil, introduit en traitement d'image par De Lathauwer [2] et utilisé par Le Bihan et al [3,4] dans le cadre de la séparation de sources polarisées, permet une analyse en éléments singuliers d'un volume de données tridimensionnelles.

Pour un tableau 3D, on définit trois produits  $n$ -modaux suivant les trois directions du tableau. Le  $n$ -mode produit suivant la dimension  $n$ , d'un tableau  $\underline{A}$ , par une matrice  $\underline{B}$ , est noté  $\underline{A} \times_n \underline{B}$ . Il existe trois versions possibles ( $n=1,2$  et  $3$ ) pour le produit d'un tableau 3D et d'une matrice. En découpant le tableau 3D par tranches suivant les trois modes du tableau, on obtient trois matrices dites dépliantes (versions matricielles du cube de données). Le cube de données de départ de dimension  $(\theta, \rho$  et temps) (fig. 9 droite) se décompose en  $\underline{C} \times_1 \underline{u}_1 \times_2 \underline{u}_2 \times_3 \underline{u}_3$  où les trois matrices singulières  $\underline{u}_1, \underline{u}_2$  et  $\underline{u}_3$  sont obtenues directement à partir de la décomposition en valeurs singulières classique des matrices dépliantes  $\underline{A}_{(1)}, \underline{A}_{(2)}, \underline{A}_{(3)}$ .  $\underline{C}$  est un tableau, de dimension  $N_x, N_y, N_t$ , contenant l'équivalent des valeurs singulières. Le processus de séparation (projection sur le sous espace signal) est identique à celui obtenu pour la SVD classique.

L'application de la 3D-SVD nous permet d'obtenir une séparation effective entre champs turbulent et acoustique. Nous présentons à un instant donné, un mélange des

sources (fig. 9 gauche) et les résultats de séparation obtenus.

On s'aperçoit que le champ acoustique obtenu après séparation (fig. 10 gauche) est relativement proche du champ acoustique de référence (fig. 11 gauche). Il en est de même pour le champ turbulent estimé (fig. 10 droite) qui est comparable au champ turbulent de référence (fig. 11 droite). Les estimations du champ acoustique obtenues par la 3DSVD sont meilleurs que ceux obtenus par SVD-ICA car, le champ acoustique présente une cohérence 3D plus forte que le champ turbulent.

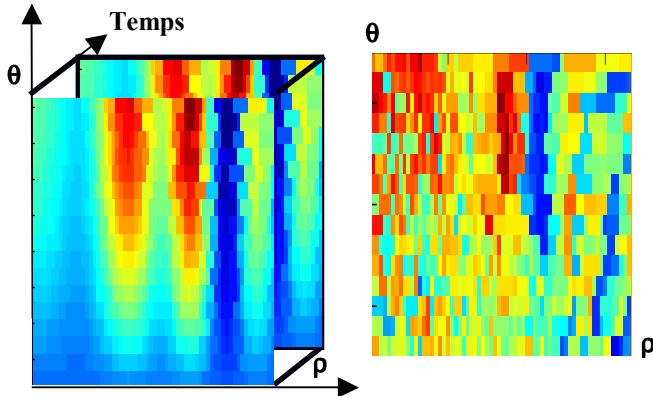


FIG. 9 (droite) Structure 3D ( $\theta$ ,  $\rho$ , temps), (gauche) Mélange des 2 champs à un instant donné

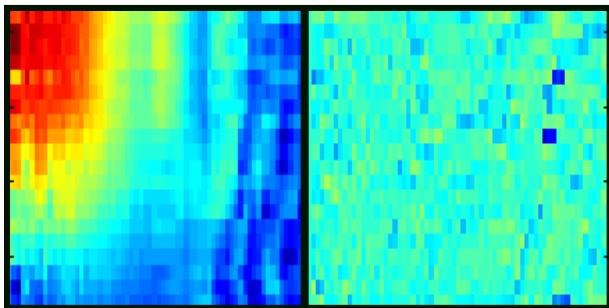


FIG. 10 : Champs acoustique (g) et turbulent (d) estimé après 3DSVD.

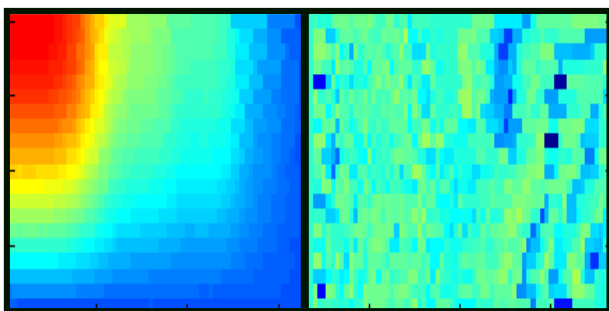


FIG. 11 : Champs acoustique (g) et turbulent (d) de référence

Lorsque les champs sont de puissance comparable, cette méthode permet de retrouver leurs allures respectives. Des coefficients de corrélation seront calculés pour différents niveaux d'énergie des champs ( $R = E_{\text{turb}}/E_{\text{acous}}$ ).

	R = 1	R = 1	R = 10	R = 10
Signal	Acoust.	Turbulent	Acoust	Turbulent
Kx-Ky-f	0.787	0.922	0.223	0.968
SVD-ICA	0.825	0.962	0.194	0.974
3DSVD	0.991	0.848	0.082	0.828

## 5. Conclusion

Le confort du chauffeur et des passagers dans l'habitacle d'un véhicule est notamment limité par les nuisances sonores dues à l'écoulement de l'air à la surface du véhicule. Dans ce contexte, nous avons étudié la séparabilité des deux composantes d'origine aéroacoustique d'une part et aérodynamique d'autre part d'un champ de pression au contact d'une paroi sur des données semi-synthétiques. En haute fréquence uniquement ( $>250\text{Hz}$ ) des outils tels que la TF3D ou le filtrage dans le plan temps-fréquence permettent de séparer les deux composantes mais. A toutes les fréquences, les deux composantes, ont pu être séparées par des méthodes de filtrage matriciel multicomposante (3DSVD notamment) appliquées après transformation spatiale des données.

## Références

- [1] B. Arguillat and D. Ricot, *Measurement of the wavenumber-frequency spectrum of wall pressure fluctuations under turbulent flows*. J. of American Institute of Aerodynamics and Astronautics, 2005
- [2] L. De Lathauwer, *Signal Processing based on multilinear algebra*, Ph.D thesis, Leuven Catholic University, 1997
- [3] N. Le Bihan, V. Vrabie, and J.I. Mars, *Multidimensional seismic data decomposition by higher order SVD and unimodal-ICA*, *Signal and Image Processing for remote sensing*, Ed. Chen., 2006
- [4] N. Le Bihan, *Traitement algébrique des signaux vectoriels. Application en séparation d'ondes sismiques*, Thèse de doctorat, INPG, 2001.
- [5] J.I. Mars, Le Bihan N., and V. Vrabie, *Extensions de la SVD aux données multidimensionnelles ; Applications à la séparation de sources*. (GRETSI), Sept. 2003, Vol I, pp 333-336.
- [6] F. Perrot, *Calcul du rayonnement acoustique d'écoulements turbulents basé sur des analogies acoustiques aux simulations aérodynamiques instationnaires*, Thèse de doctorat, 2004
- [7] V. Vrabie, N. Le Bihan and J.I. Mars, *3DSVD and Partial ICA for 3D arrays sensors*, 72<sup>nd</sup> Meeting of Society of Exploration geophysicists, Salt Lake City, 2002 Expanded Abstract
- [8] V. Vrabie, and J.I. Mars, *SVD-ICA: A New Tool To Enhance the Separation Between Signal and Noise Subspaces*. XI European Signal Processing Conference, Toulouse, pp 79-82, 2002.