

Séparation des composantes compressibles et incompressibles dans un champ de pression pariétale

Separability of the aeroacoustic and aerodynamic components of a wall pressure field

Jérôme I. Mars¹, Jocelyn Guillon¹, Sebastian Miron^{1,2}, Vincent Grulier^{3,1} et Christophe Picard³

¹GIPSA-Lab, Dept. Images-Signal, UMR5216, 961 rue de la houille blanche, Domaine universitaire, BP 46, 38402 Saint Martin d'Heres Cedex 9,
E-mail : prenom.nom@gipsa-lab.inpg.fr

²CRAN - Faculté des sciences et techniques BP 239 - 54506 Vandoeuvre Cedex,
E-mail : Sebastian.Miron@cran.uhp-nancy.fr

³3PSA PEUGEOT CITROËN, Route de Gizy 78943 Vélizy-Villacoublay Cedex,
E-mail : prenom.nom@mpsa.com



Manuscrit reçu le 14 mars 2008

Résumé et mots clés

Dans l'industrie automobile, les recherches actuelles intègrent de plus en plus la notion de confort dans l'habitacle du véhicule. Des études sont ainsi réalisées pour améliorer l'environnement du chauffeur et de ses passagers en limitant notamment les 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 nuisance, nous étudions la séparabilité des composantes d'origine aéroacoustique d'une part et aérodynamique d'autre part, présentes dans un champ de pression pariétale (au contact d'une paroi). Les deux composantes étant enregistrées sur un réseau de capteurs, nous montrons que les méthodes classiques de filtrage de type $FK - 3D$ sont inefficaces dans les basses fréquences pour séparer les deux composantes. Nous proposons donc deux méthodes de filtrage matriciel multicomposante (3D-SVD notamment) permettant d'obtenir une séparabilité de ces deux composantes après une transformation spatiale des données.

Champ acoustique et turbulent, Séparation de champ d'ondes, filtrage SVD-ICA, filtrage 3D-SVD.

Abstract and key words

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. Noise can be classified into three categories. The first concerns noise generated by the engine and the gearbox. The second is the sounds produced by the wheels on the road. The third is related to the aerodynamic noise generated by the airflow. In recent years, several studies have been made to identify and to reduce noise and vibrations associated to the two first categories by including shock absorbers and insulating materials for example.

The most annoying noises for users are aerodynamic noise caused by airflow around the vehicle, visible from 100 km/h and dominant from 130 km/h. This flow generates noise in the cabin in many ways. It causes resonance phenomena

from roof and/or doors [1], [2]. Noise can be produced from outside objects such as wipers, antennas or mirrors. To reduce it, many studies have been proposed as experimental studies [3], [4], digital studies [5] and/or design forms [6]. Noise may come also from an external flow entering directly into the car. Apart from these effects due to the presence of obstacles in the airflow, there is a noise disturbance called aerodynamic noise form [7]. It represents a large part of the total aerodynamic noise. It is produced directly into the car by the fluctuating pressures generated by the boundary layer on the vehicle surface. These pressure fluctuations are transmitted inside the vehicle by different parts radiating in the car. Production of this noise on surfaces has a double origin. On the one hand, the vortex flow near glasses generates excess and depression of local non stationary pressure. This fluctuation is called thereafter aerodynamic component or turbulent field. On the other hand, local pressure fluctuations are spreading as an acoustic field through walls of the vehicle. This excitement is called acoustic component. Both are usually coupled excitations [8]. It is essential to identify and / or to characterize each magnitude.

Recent work has highlighted the involvement of acoustic waves created by turbulent flow. Studies on the identification of these two types of noise are mainly conducted through experimental prototype vehicles wind tunnel [9], [10], [11]. In order to take into account the noise from the design phase of a vehicle, efforts will now focus on modeling the aero acoustics mechanisms noise and its transmission inside the vehicle. The recent work cited above is based either on the pressure field analysis of turbulent component (incompressible field) or on the analysis of far-field acoustic (sound propagation).

In order to describe the noise, this work shows the necessity to explore the sound field near the wall. To do that, with the Aero acoustics Department at PSA Peugeot Citroen, a network of sensors has recorded the two components of aerodynamic and aeroacoustic pressure field on a wall as the glass door or the windshield. This acquisition is close to real experiment included door vehicle with its rear-view mirror.

The purpose of this study is to propose some multidimensional signal processing methods to analyze and separate the two fields. From previous works done in the field [11], we propose some separation filters taking into account the spatial dimension of the fields. After presenting the context of the study, an adaptation of 3D FK filter is first performed to separate each fields. We show that filter is efficient only on high frequencies content.

In order to take advantage of the geometry of the acoustical field, a spatial transformation is applied to the signal. Then to allow multicomponent filter methods based on singular value decomposition [12], we propose this spatial transformation to produce plane wave field. This type of multicomponent filter is typically applied on 2D data. Many applications exist in various topics as biomedical imaging, geophysics, underwater acoustics, remote sensing, etc.. [13], [14], [15], [16].

The principle of this filter is, to find a space in which data are presented in a dimension as low as possible. The SVD is classically used to decompose the initial dataset into two complementary sub-spaces called signal space and noise space. Due to the multidimensionality of data (x , y , and time), in the last part of this article, we show that SVD can be extended to three-dimensional data through of 3D-SVD [17]. These data resorted in cube are obtained after a transformation from an Euclidean coordinates (x , y , time) to polar coordinates (ρ , θ , time). After applying this transformation, the acoustic field is expressed as planes wave while the turbulent wave field has no particular spatial coherency. The effectiveness of this method 3D-SVD will be discussed on the separation of the two fields (aerodynamic and aero acoustic).

Acoustical field, Turbulent wavefield, Wavefield separation, SVD-ICA method, 3D-SVD filtering.

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 perçues dans l'habitacle. Ces nuisances sont généralement classées en trois catégories. La première concerne les bruits générés par le groupe « moteur et boîte de vitesse ». La deuxième est constituée par les bruits de roulement sur la chaussée. La troisième est liée aux bruits d'origine aérodynamique produits par les écoulements d'air. Ces dernières années de nombreuses études ont été réalisées pour identifier et réduire les sources de bruit et de vibration liées aux deux premières catégories par notamment l'utilisation de suspensions actives et de matériaux isolants. Actuellement, les bruits les plus gênants pour le confort des utilisateurs (perceptible dès 100 km/h et dominant à partir de 130 km/h) sont les bruits d'origine aérodynamique causés par l'écoulement de l'air autour du véhicule. Cet écoulement génère du bruit dans l'habitacle de multiples façons [18]. Il provoque des phénomènes de résonance en passant au dessus de cavités (toit ouvrant) ou d'interstices (portières) [1], [2]. Il produit également du bruit en passant sur des objets extérieurs saillants tels que les essuie-glaces, les antennes, les becquets ou les rétroviseurs. Ces derniers ont d'ailleurs fait l'objet de nombreuses études expérimentales [3], [4], numériques [5] et de design de formes [6]. Du bruit peut provenir d'un écoulement externe qui entrerait dans l'habitacle par les joints par exemple. Hormis ces effets dus à la présence d'obstacles dans l'écoulement, il existe un bruit perturbateur d'origine aérodynamique appelé bruit de forme [7] engendré directement dans l'habitacle par les pressions fluctuantes générées par la couche limite à la surface du véhicule. Ces fluctuations de pression se transmettent à l'intérieur du véhicule par excitation des différents panneaux qui rayonnent ensuite dans l'habitacle. Ce bruit représente une grande part du bruit d'origine aérodynamique total.

Le mécanisme de production de ce bruit sur les surfaces est double. D'une part l'écoulement tourbillonnaire proche de la vitre génère par effet de « surpression – dépression » des fluctuations locales de pression instationnaire. Cette excitation est dénommée par la suite excitation aérodynamique ou turbulente. D'autre part, comme l'écoulement génère des fluctuations locales de pression, celles-ci se propagent également sous forme d'onde acoustique jusqu'aux parois du véhicule. Cette excitation est appelée excitation acoustique. Ces deux excitations étant généralement couplées [8], il est capital de les identifier et/ou de connaître l'amplitude de chacune d'elle. Des travaux récents mettent en évidence l'implication des ondes acoustiques créées par l'écoulement turbulent dans la génération du bruit à l'intérieur de l'habitacle. Les études concernant l'identification de ces types de bruit présents dans l'habitacle sont principalement menées par voie expérimentale sur des véhicules prototypes en soufflerie [9], [10], [11]. Dans le but de prendre en compte ces nuisances dès la phase de conception et de dévelop-

pement d'un véhicule, les efforts se portent actuellement 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 cités ci-dessus est axé soit sur l'analyse des champs de pression d'origine turbulente (champ incompressible), soit sur l'analyse du champ lointain acoustique (pression acoustique propagative). Ces travaux montrent que dans le but de décrire correctement le bruit perçu dans l'habitacle, il est nécessaire d'explorer le champ acoustique proche de la paroi.

En collaboration avec le département Aéroacoustique de PSA Peugeot-Citroën, une étude comportant un réseau de capteurs a permis d'enregistrer le mélange des deux contributions (aérodynamique et aéroacoustique) du champ de pression pariétale (pression exercée sur une paroi telle que la vitre, la portière ou le pare-brise d'une voiture). La configuration ainsi recherchée est proche de celle d'une portière de véhicule avec son rétroviseur. L'objectif de cette étude est de proposer des techniques de traitement du signal multicapteurs appropriées pour analyser et séparer les deux champs. En se basant sur les travaux réalisés précédemment dans le domaine [11], nous proposons une étude multicapteur prenant en compte réellement la dimension spatiale des champs enregistrés.

La première partie de cet article est consacrée à la présentation du contexte expérimental et des données. Après avoir exposé le cadre de l'étude, une adaptation 3D du filtrage classique $F - K$ est réalisée. Nous montrons qu'avec cet outil la séparation des deux contributions n'est efficace que dans la gamme des hautes fréquences. La troisième partie est consacrée à l'utilisation des méthodes de filtrage multicapteur basées sur la décomposition en valeurs singulières (Singular Value Decomposition ou SVD) [12]. Pour se faire, une transformation spatiale du champ de pression est exploitée pour permettre cette séparation. Ce type de filtrage est appliqué classiquement et depuis de nombreuses années aux données 2D et 3D en imagerie biomédicale, en géophysique, en acoustique sous-marine, en télédétection, etc. [13], [14], [15], [16].

Le principe de ce filtrage consiste à trouver, à partir d'une image à deux dimensions, un espace dans lequel les sources recherchées sont représentées dans un espace de dimension la plus faible possible. La SVD permet ainsi de décomposer l'ensemble des données initiales en deux sous-espaces complémentaires appelés sous-espace signal et sous-espace bruit. En raison de la multidimensionalité de données acquises lors de l'expérimentation (x , y , et temps), nous montrons dans la dernière partie de cet article que le filtrage par SVD peut être étendu et appliqué à des données à trois dimensions par l'intermédiaire de la 3D-SVD [17]. Ces données 3D ou cubes de données sont obtenues après une transformation des coordonnées euclidiennes initiales (x , y , temps) en coordonnées polaires (ρ , θ , temps) permettant la mise en cohérence d'ondes planes essentiellement liées à la contribution acoustique. Après l'application de cette transformation, le champ acoustique se présentera donc sous forme de fronts d'ondes planes alors que le champ turbulent sera sans

S

cohérence spatiale particulière. L'efficacité de cette méthode 3D-SVD sera ainsi discutée sur l'application de séparation des deux champs aérodynamique et aéroacoustique.

2. Présentation des données

Dans cette partie nous présenterons les données numériques mises à notre disposition pour effectuer l'étude de séparabilité des composantes acoustique (composante d'origine aéroacoustique) et turbulente (composante d'origine aérodynamique) d'un champ de pression pariétale. Les données ont été obtenues par une simulation numérique correspondant à une configuration proche de celle d'un rétroviseur monté sur le coté d'un véhicule soumis à un écoulement d'air à forte vitesse ($V = 40 \text{ m/s}$ soit 140 km/h). Dans les données numériques la source caractérisant le champ acoustique provient de l'estimation expérimentale d'un champ acoustique produit par le rétroviseur d'un véhicule en soufflerie. Ce champ est obtenu au moyen de la technique classique d'antennerie en champ lointain (la mesure étant effectuée hors flux). Pour simuler le champ acoustique (Figure 1), cet enregistrement est associé à un modèle de source dipolaire et ce pour deux raisons :

- a) Du point de vue théorique et expérimental, le champ acoustique lointain provenant d'un demi-cylindre en écoulement, correspond au rayonnement d'un dipôle ;
- b) La formulation d'une source dipolaire laisse apparaître un terme de champ proche qui nous rapproche des conditions expérimentales.

Le champ turbulent est issu d'un calcul par la méthode dite «Large Eddy Simulation» [19]. Cette capacité d'enregistrer séparément les champs acoustique et turbulent, nous permettra de calculer des rapports d'énergie des champs (E_{turb}/E_{acous}) pour qualifier les différentes méthodes de séparation.

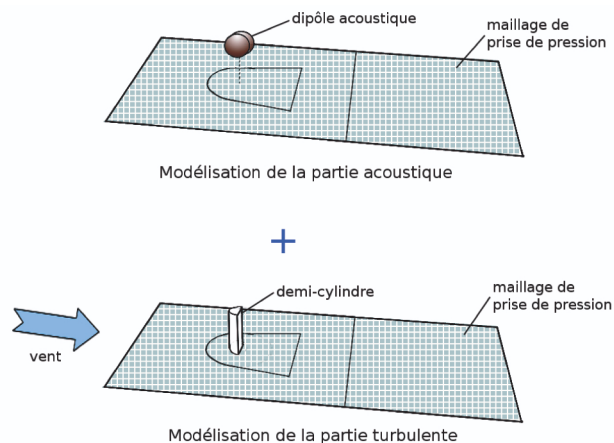


Figure 1. Principe du dispositif de capture du champ acoustique et turbulent.

Les simulations concernent un ensemble de 29 894 capteurs de pression répartis de manière non régulière autour du demi-cylindre (Figure 2). 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, figure 2) mettent en évidence la non-régularité du maillage. L'échantillonnage temporel des signaux reçus sur chaque capteur est réalisé à 10 kHz sur une durée totale de 0.3 secondes. On représente sur la figure 3 les deux composantes du champ de pression pariétale enregistré à un instant donné. La composante acoustique 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, on observe la traînée provoquée par le demi-cylindre en écoulement. Le champ complet étudié (figure 4) résulte de la somme pondérée des deux champs simulés indépendamment.

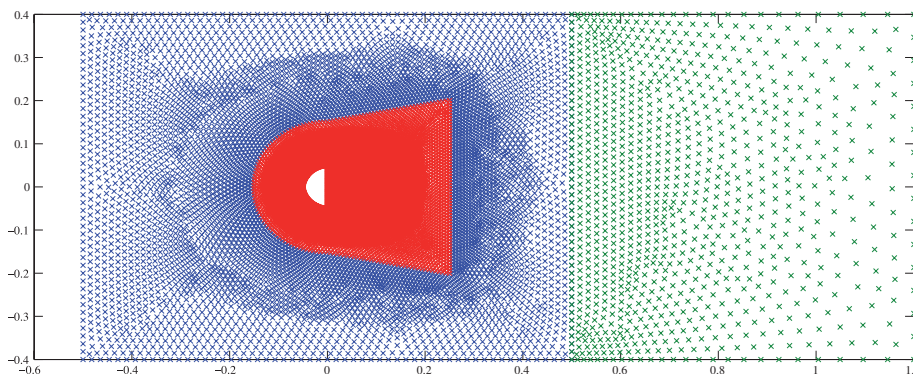


Figure 2. Réseau de capteurs autour du demi-cylindre (vue de dessus, échelle métrique).

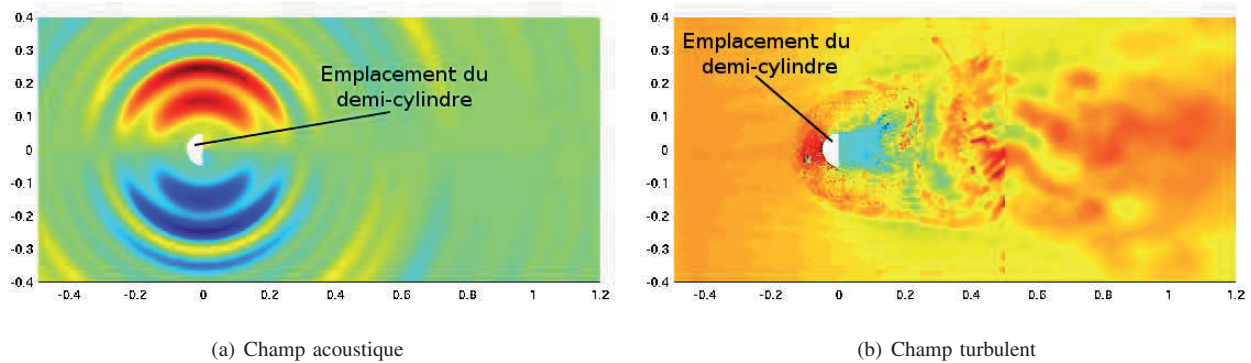


Figure 3. Distribution spatiale des deux champs à un instant donné.

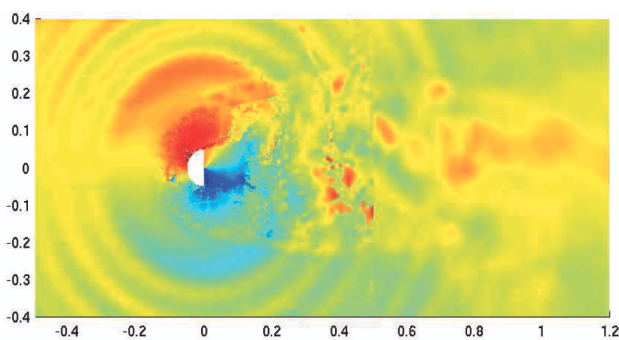


Figure 4. Champ complet (somme pondérée des champs acoustique et turbulent (échelle métrique)).

Une rapide étude basée sur un capteur de pression témoin pris dans une zone d'énergie importante pour les deux champs (zone rouge de la figure 2) permet d'affirmer que les spectres des signaux acoustique et turbulent occupent les mêmes gammes de fréquences et ne sont donc pas directement séparables par un simple filtrage fréquentiel. Par ailleurs, nous avons constaté en visualisant les spectrogrammes de chacun des champs que, les signaux ne sont pas séparables dans le domaine temps-fréquence. À la suite de ces pré-études, il apparaît donc que l'analyse d'un seul capteur (en temps ou en temps-fréquence) ne permet de séparer les deux champs. Notre étude s'est donc portée sur le comportement physique 3D des deux champs (en temps et en espace). Sachant que les champs acoustique et turbulent se propagent respectivement à une vitesse de 340 m/s et de 24 m/s, nous avons mis en place des techniques multicapteurs tenant compte d'une part de cette propriété physique importante et d'autre part de la géométrie particulière de l'acquisition.

3. Étude multicapteur

Une étude récente [20] montre que le champ acoustique est détectable dans l'espace K_x - K_y - f . Cet espace correspond à l'ap-

plication de la transformée de Fourier sur les trois axes du champ de pression pariétale permettant d'exprimer le signal initial $s(x,y,t)$ en un signal complexe dépendant des nombres d'onde en x et y (respectivement fréquences spatiales K_x , K_y) et de la fréquence temporelle f .

En s'appuyant sur cette étude et à partir de l'ensemble des capteurs sélectionnés selon un maillage approximativement régulier (figure 5), nous avons montré deux tendances particulières à chacun des deux champs dans ce plan K_x - K_y .

La figure 6 montre le champ global de pression pariétale dans le plan K_x - K_y respectivement à la fréquence 16Hz et 250Hz. L'étude du champ acoustique seul, pour les différents plans K_x - K_y pris à chaque fréquence, montre la présence de deux motifs ponctuels (liés aux deux phases du dipôle) restant globalement constants et centrés autour de la position $K_x = K_y = 0$, même lorsque la fréquence d'analyse f augmente (Figure 6a et b). Par contre, pour le champ turbulent seul, le motif spectral unique observé est moins focalisé pour les basses fréquences. De plus ce motif est positionné autour de $K_x = K_y = 0$ pour ces mêmes basses fréquences (figure 6a), et surtout se déplace vers les K_x négatifs lorsque les fréquences augmentent (figure 6B). Cette analyse nous a permis d'affirmer qu'une séparation par masque dans le domaine K_x - K_y ne sera efficace que pour des fréquences supérieures à 250 Hz. Récemment nous avons pu améliorer (abaisser) la limite de séparabilité fréquentielle entre champs acoustique et turbulent à partir de l'utilisation de la décomposition empirique modale effectuée sur des corrélogrammes spatiaux [21].

Des conclusions similaires ont été obtenues par une étude espace-nombre d'onde du champ complet enregistré en un seul temps, ou il n'a été possible de séparer les deux contributions énergétiques que dans les hautes fréquences. Nous voyons que l'analyse espace-nombre d'onde du signal $s(x,y=0)$, à la fréquence $f = 16$ Hz) ne montre pas une séparabilité des motifs liés aux deux champs (figure 7a). À partir de l'analyse du même champ complet effectuée à une fréquence supérieure ($f = 250$ Hz), nous observons une séparation des motifs liés aux deux champs acoustique et turbulent (figure 7b). Ceci nous a permis d'affirmer que l'énergie acoustique s'atténue pour des distances supérieures à 0.3 mètres.

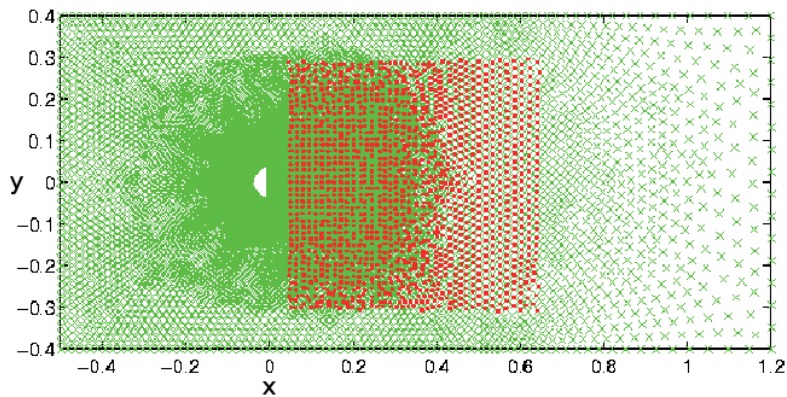
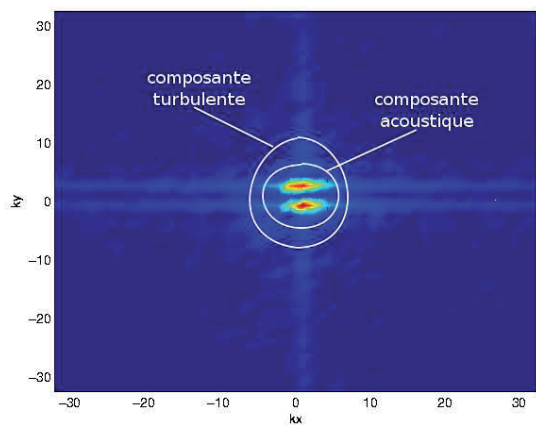
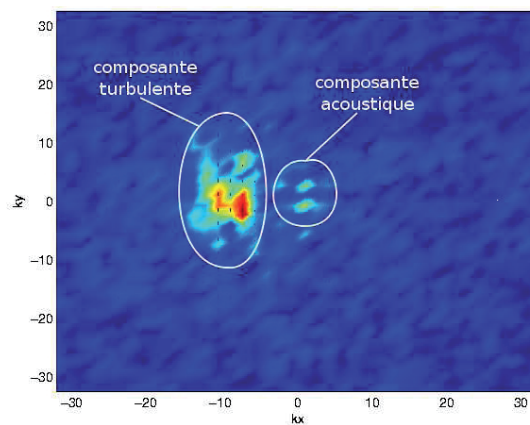


Figure 5. Illustration du réseau d'acquisition complet (vert) et maillage retenu (rouge) pour le filtrage dans le domaine K_x-K_y-f (échelle métrique).

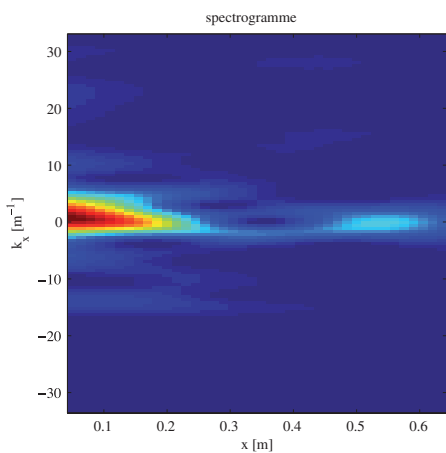


(a) Fréquence d'analyse : 16 Hz

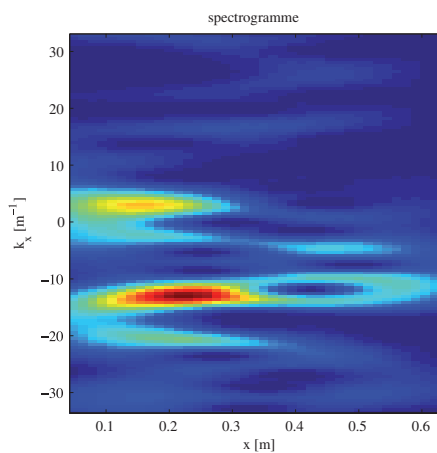


(b) Fréquence d'analyse : 250 Hz

Figure 6. Visualisation K_x-K_y du champ complet à deux fréquences d'analyse. (L'échelle d'amplitude est de couleur rouge pour les valeurs maximales et bleu pour les valeurs minimales).



(a) Analyse pour $(x, y = 0, f = 16 \text{ Hz})$



(b) Analyse pour $(x, y = 0, f = 250 \text{ Hz})$

Figure 7. Analyse Espace-Nombre d'onde du champ complet à deux fréquences particulières (L'échelle d'amplitude est de couleur rouge pour les valeurs maximales et bleu pour les valeurs minimales).

4. Présentation des traitements 3D

4.1 Transformation polaire

Après ces analyses du champ complet dans les domaines fréquentiel et espace-nombre d'onde montrant une séparation possible des deux champs uniquement dans le domaine des hautes fréquences, nous présentons maintenant les résultats obtenus par des méthodes de séparation tenant compte des caractéristiques spatiales du champ acoustique. Se basant sur le fait que la géométrie du champ acoustique est parfaitement circulaire (figure 3a), nous allons appliquer une transformation spatiale réversible de façon à obtenir des fronts d'ondes plans et non plus circulaires pour ce champ acoustique. Cette transformation va nous permettre d'appliquer efficacement les méthodes basées sur le filtrage de type SVD qui privilégient les cohérences spatiales planes. La transformation appliquée est un passage des coordonnées euclidiennes (x, y, t) en coordonnées polaires (ρ, θ, t) (figure 8). Le maillage retenu est présenté à la figure 9. La visualisation dans le plan ρ, θ (ρ , la distance du capteur au demi-cylindre et θ l'angle entre le capteur et l'axe y du plan cartésien) fait bien apparaître les formes désirées car l'on passe de fronts d'ondes circulaires à des fronts d'ondes plans pour le champ acoustique (figure 10). Par contre, l'allure du champ turbulent dans le plan $\rho-\theta$ après transformation, ne permet pas d'identifier des fronts d'ondes plans pour cette composante (figure 11) car cette transformation entraîne une perte de cohérence spatiale du champ turbulent. Les outils de séparation proposés privilégiant les cohérences spatiales planes, permettront donc de séparer les deux champs et auront pour effet de débrui-

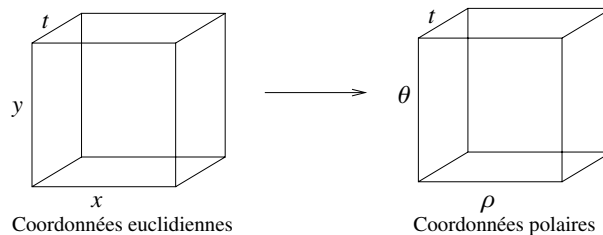


Figure 8. Transformation du cube de données de coordonnées (x, y, t) en coordonnées (ρ, θ, t) .

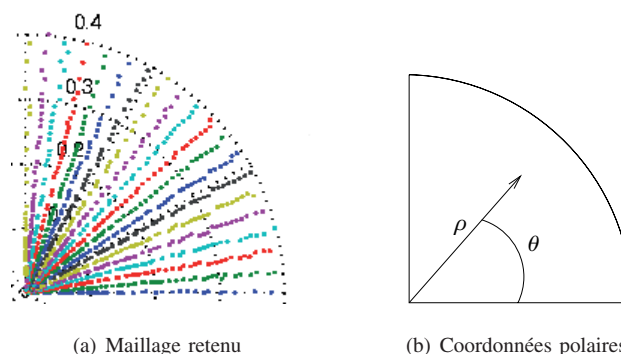
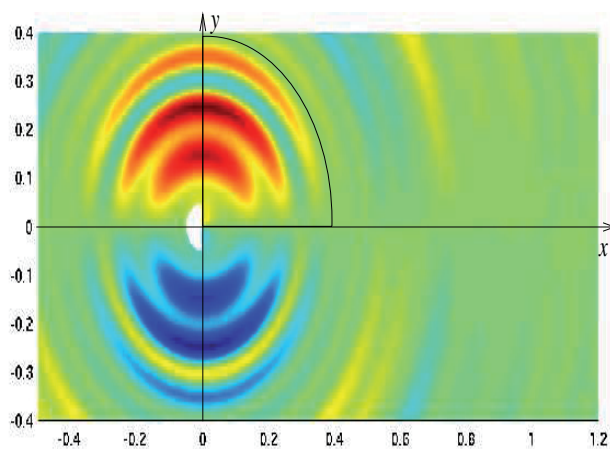
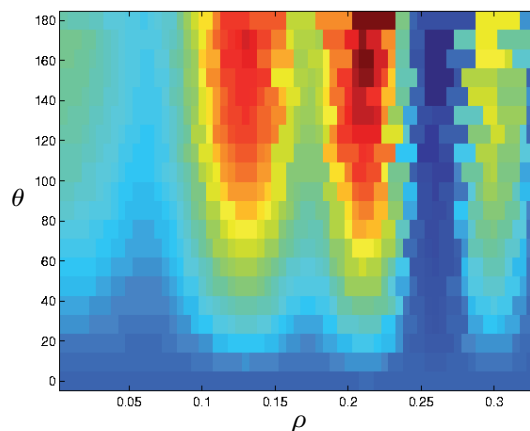


Figure 9. Maillage retenu pour le passage de coordonnées euclidiennes en coordonnées polaires.

ter le champ acoustique (le « bruit » étant le champ turbulent). La transformation polaire permettra de comparer et d'évaluer les différentes méthodes de séparation de source (SVD-ICA, 3D-SVD) appliquées à l'ensemble des données. Les résultats seront dorénavant présentés dans cet espace polaire.

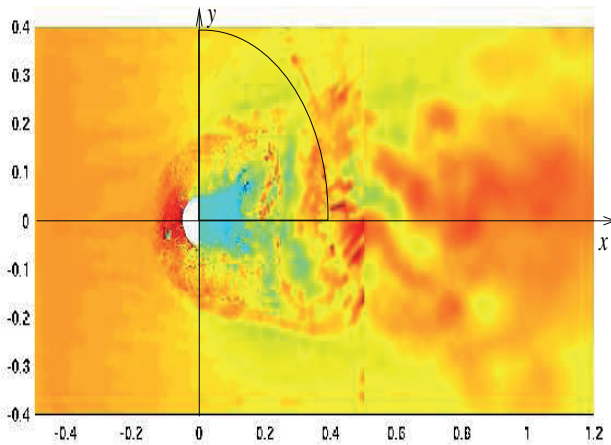


(a) Coordonnées cartésiennes : fronts d'ondes circulaires

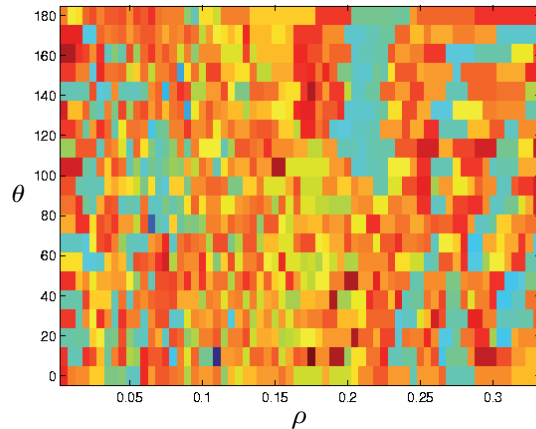


(b) Coordonnées polaires : Fronts d'ondes plans (issus du quart de disque)

Figure 10. Visualisation des fronts d'ondes du champ acoustique présenté en un temps donné.



(a) Coordonnées cartésiennes



(b) Coordonnées polaires : Fronts d'ondes planes (issus du quart de disque)

Figure 11. Visualisation des fronts d'ondes du champ turbulent en un temps donné.

4.2 Séparation par SVD-ICA

Après transformation polaire, les signaux sont représentés par un ensemble de matrices $\underline{\underline{w}}$ de dimension (θ, ρ) indicées par la troisième dimension temporelle. La décomposition en valeurs singulières de chaque matrice $\underline{\underline{w}}$ correspond à une factorisation de cette matrice en un produit de matrices orthogonales $\underline{\underline{u}}, \underline{\underline{v}}$, et d'une matrice diagonale $\underline{\underline{\lambda}}$ décrit par :

$$\underline{\underline{w}} = \underline{\underline{u}} \cdot \underline{\underline{\lambda}} \cdot \underline{\underline{v}}^T = \sum_{k=1}^N \lambda_k \cdot \underline{\underline{u}}_k \cdot \underline{\underline{v}}_k^T$$

avec

- $\underline{\underline{u}}$ une matrice unitaire de dimension (θ, θ) ;
- $\underline{\underline{v}}$ une matrice unitaire de dimension (ρ, ρ) ;
- $\underline{\underline{\lambda}}$ une matrice pseudo-diagonale de dimension (θ, ρ) dont seuls les éléments diagonaux peuvent être non-nuls (valeurs singulières ordonnées: $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_N \geq 0$, et avec $N = \min(\theta, \rho)$).

Les colonnes de $\underline{\underline{u}}$ (respectivement $\underline{\underline{v}}$) sont appelées les vecteurs singuliers gauches (respectivement droits) et forment une base orthonormale. Le rang p (avec $p \leq N$) de la matrice $\underline{\underline{w}}$ est donné par le nombre de valeurs singulières non nulles. Le produit $\underline{\underline{u}}_k \cdot \underline{\underline{v}}_k^T$ est une matrice de rang unitaire de dimension (θ, ρ) appelée la k^{ieme} image singulière ou section singulière de la matrice de données $\underline{\underline{w}}$. La SVD décompose donc la matrice $\underline{\underline{w}}$ en une somme pondérée de matrice de rang unitaire de même dimension.

Pour effectuer la réduction d'espace, le sous-espace signal correspond à la somme des P premières sections singulières et le sous-espace bruit à la somme des N-P sections singulières. Les données de départ se décomposent donc en :

$$\underline{\underline{w}} = \underline{\underline{w}}^{signal} + \underline{\underline{w}}^{bruit} = \sum_{k=1}^P \lambda_k \cdot \underline{\underline{u}}_k \cdot \underline{\underline{v}}_k^T + \sum_{k=P+1}^N \lambda_k \cdot \underline{\underline{u}}_k \cdot \underline{\underline{v}}_k^T$$

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. En utilisant la méthode JADE (Joint Approximate Diagonalization of Eigenmatrices [22]), ce calcul consiste à trouver une matrice orthogonale de rotation $\underline{\underline{B}}$ pour laquelle les composantes $\underline{\underline{w}} = \underline{\underline{v}} \cdot \underline{\underline{B}}$ sont 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 [23], [24]. En appliquant cette SVD individuellement sur chacune des matrices temporelles, on montre que le sous-espace signal construit avec la première valeur singulière correspond à peu près au champ acoustique. Pour améliorer la qualité de la séparation, nous nous sommes attachés à utiliser une technique 3D prenant en compte spécifiquement l'ensemble des dimensions spatiale et temporelle.

4.3 Séparation par 3D-SVD

Pour utiliser la cohérence du champ acoustique dans les trois dimensions, nous proposons une utilisation de la 3D-SVD qui est une extension de la SVD adaptée aux cubes de données 3D. Cet outil, introduit en traitement d'image par De Lathauwer [17] est utilisé par Le Bihan *et al.* [25], [26], [27] dans un cadre de séparation de sources polarisées et acoustiques. Il permet une analyse en éléments singuliers d'un volume de données tridimensionnelles. Cette 3D-SVD peut être vu comme une version trimodale de la décomposition en valeurs singulières. En effet, un tableau trimodal, $\underline{\underline{\underline{A}}}$ de dimension (N_1, N_2, N_3) se décompose comme :

$$\underline{\underline{A}} = \underline{\underline{C}} \times_1 \underline{\underline{U}}_1 \times_2 \underline{\underline{U}}_2 \times_3 \underline{\underline{U}}_3$$

Avec $\underline{\underline{C}}$ le tableau « noyau » de dimension (N_1, N_2, N_3) comportant les valeurs singulières trimodales. Les matrices $\underline{\underline{U}}_i$ contiennent les vecteurs singuliers dans les trois directions. Ces matrices singulières décrivent l'espace vectoriel trimodal (en terme de base orthonormée) suivant chacun des modes. Le produit noté \times_1 indique une multiplication d'un tableau suivant son $i^{\text{ème}}$ mode (ou produit i – modal) par une matrice suivant les colonnes [28]. On définit le produit i – modal ($i = 1, 2, 3$) d'un tableau $\underline{\underline{B}}$ de taille (N_1, N_2, N_3) et d'une matrice $\underline{\underline{V}}$ de taille (N_i, N_i) par :

$$(\underline{\underline{B}} \times_1 \underline{\underline{V}})_{lmn} = \sum_{i=1}^N b_{lmn} \cdot v_{li}$$

Le calcul de la SVD se fera à l'aide matrices « dépliantes » obtenues à partir du tableau 3D original (le terme « matrice dépliant » est proposé par De Lathauwer dans ses premiers travaux). Ces matrices sont les trois façons de déplier un tableau par tranches successives suivant les trois directions [17]. L'intérêt de cette méthode est que la décomposition en valeurs singulières classique (SVD) de chacune des trois matrices dépliantes donne directement les matrices $\underline{\underline{U}}_i$ décrivant l'espace trimodal.

Le tableau des valeurs singulières est obtenu par la formule inverse suivante :

$$\underline{\underline{C}} = \underline{\underline{A}} \times_1 \underline{\underline{U}}_1^T \times_2 \underline{\underline{U}}_2^T \times_3 \underline{\underline{U}}_3^T$$

Ce tableau équivalent à une matrice pseudo-diagonale ne possède pas la propriété d'hyper-orthogonalité [17]. Il a toutefois la propriété d'orthogonalité entre les tranches du tableau dans les trois directions. L'information énergétique est retrouvée par l'application d'une norme au sens de Frobenius sur chacune des directions du tableau. Ainsi pour un tableau de dimension 3, l'étude de la décroissance des valeurs propres classiquement adoptée pour tronquer l'espace initial en un espace signal et un espace bruit, se fait par l'étude des courbes de norme des tranches de $\underline{\underline{C}}$ dans les trois directions. Cette troncature se fait au regard des courbes des valeurs propres trimodales, on parle ainsi de troncature de rang (r_1, r_2, r_3) du tableau de données $\underline{\underline{A}}$. Ainsi la détermination des i – rangs du sous-espace pour chacun des trois modes se fait la même façon qu'en 2D.

Le processus de séparation est identique à celui de la SVD classique. Pour cela une 3D-SVD du tableau de données est d'abord effectué. Ensuite, une troncature de rang des matrices de vecteurs propres $\underline{\underline{U}}_i$ est effectuée puis le sous-espace signal est défini par :

$$\underline{\underline{A}}^{signal} = \underline{\underline{C}}^{signal} \times_1 \underline{\underline{U}}_{1,signal} \underline{\underline{U}}_{1,signal}^T \times_2 \underline{\underline{U}}_{2,signal} \underline{\underline{U}}_{2,signal}^T \times_3 \underline{\underline{U}}_{3,signal} \underline{\underline{U}}_{3,signal}^T$$

où les matrices $\underline{\underline{U}}_{i,signal}$ sont les troncatures de rang r_i des matrices propres des i – modes. Le sous espace bruit est obtenu classiquement par soustraction : $\underline{\underline{A}}^{bruit} = \underline{\underline{A}} - \underline{\underline{A}}^{signal}$. Comme dans le cas à 2D, l'orthogonalité entre les deux sous-espaces est la clé de la séparation résultant de la décorrélation à l'ordre 2 entre la partie signal et la partie bruit. La prise en compte ici du troisième mode (le temps) est discriminante. L'application de la 3D-SVD sur le cube de données $(\rho, \theta, \text{temps})$ présenté à la figure 12, nous permet d'obtenir une séparation effective entre champs turbulent et acoustique.

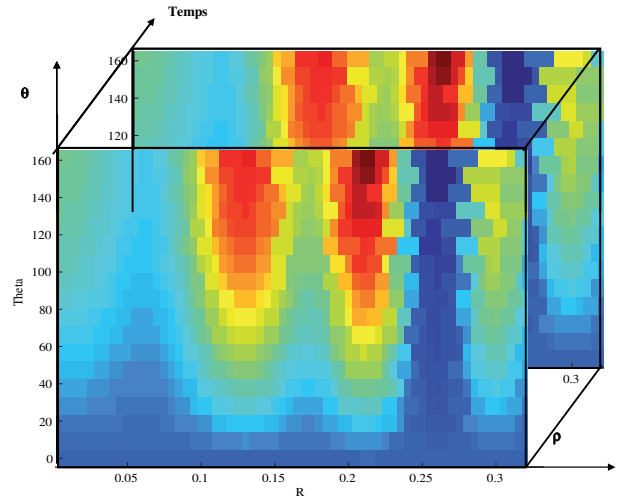


Figure 12. Champ acoustique présenté en structure 3D $(\theta, \rho, \text{temps})$.

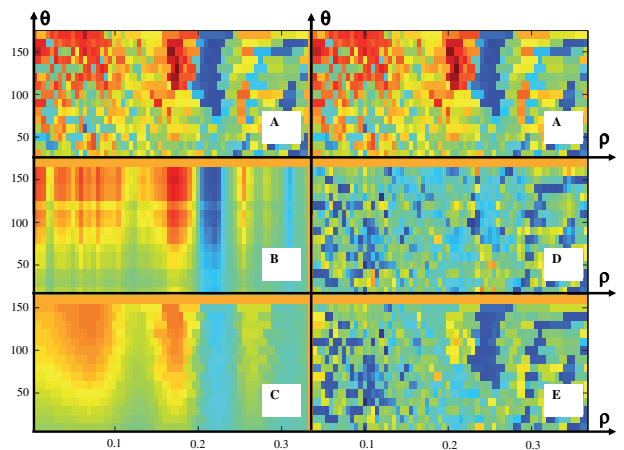


Figure 13. Résultat de la 3D-SVD à un instant temporel (amplitude positive en rouge et négative en bleu)
 A : mélange des deux champs acoustique et turbulent ;
 B : champ acoustique estimé ;
 C : champ acoustique de référence ;
 D : champ turbulent estimé ;
 E : champ acoustique de référence.

Tableau 1. Valeurs des coefficients de corrélation entre les signaux d'origine et les signaux filtrés en fonction de la méthode de filtrage et du rapport d'énergie entre les deux champs originaux (E_{turb}/E_{acous}).

	$R = 1$	$R = 1$	$R = 10$	$R = 10$
Séparation par	Signal Acoustique	Signal Turbulent	Signal Acoustique	Signal Turbulent
K_x-K_y-f	0,787	0,922	0,223	0,968
SVD-ICA	0,825	0,962	0,194	0,974
3D-SVD	0,991	0,848	0,082	0,828

Nous présentons à un instant donné, un mélange des champs (figure 13A) et les résultats obtenus après séparation. On montre que le champ acoustique estimé (figure 13-B) est relativement proche du champ acoustique de référence (figure 13-C). Il en est de même pour le champ turbulent estimé (figure 13-D) qui est comparable au champ turbulent de référence (figure 13-E). Les mêmes observations ont été obtenues pour une analyse faite à un autre incrément temporel (figure 14). En effet, les estimations des champs acoustique et turbulent (figure 14 A et C) obtenues par 3D-SVD sont très proches des champs acoustique et turbulent de référence (figure 14 B et D).

Lorsque les champs acoustique et turbulent sont de puissance comparable, la 3D-SVD permet de les séparer. Pour quantifier cette séparation, des coefficients de corrélation (tab. 1) sont calculés comme mesure de la qualité de la séparation, pour différents niveaux d'énergie des champs (E_{turb}/E_{acous}).

Les méthodes que nous avons mises en œuvre estiment les allures respectives des champs correctement lorsque les puissances des signaux originaux sont semblables. Dans le cas du rapport $R = 1$, le filtrage dans le domaine K_x-K_y-f s'il est simple à mettre en œuvre, donne des résultats moins bons que les autres méthodes. De plus, nous avons vu qu'il inflige une forte perte énergétique pour le champ acoustique puisque le filtrage ne concerne que les fréquences supérieures à 250 Hz. Pour ce même rapport, le filtrage SVD-ICA donne des résultats meilleurs pour la reconstruction du champ acoustique et turbulent. Le filtrage par 3D-SVD quand à lui, permet d'obtenir des résultats très intéressants pour la caractérisation du champ acoustique. En effet, la qualité des résultats de l'estimation du champ acoustique est meilleure que celle obtenue par la SVD-ICA en raison de l'utilisation conjointe des trois dimensions de l'espace. Nous voyons par ces résultats (figures 13 et 14) que la prise en compte de la dimension spatiale pour l'estimation du champ acoustique est primordiale. Dans le cas d'un rapport 10 entre énergie du champ turbulent et énergie du champ acoustique, le champ turbulent est relativement bien caractérisé et les trois méthodes semblent donner des résultats équivalents. Par contre la caractérisation du champ acoustique semble être de moindre qualité.

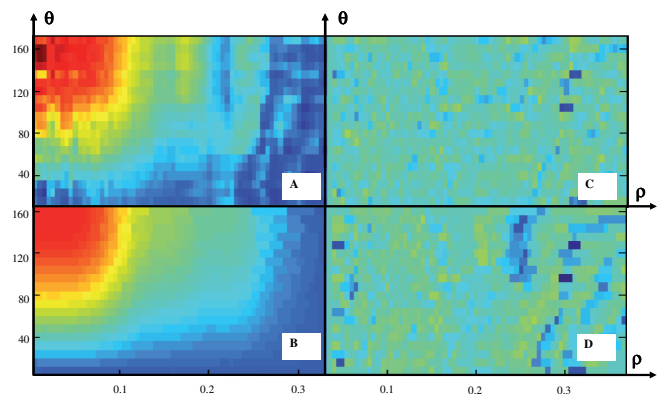


Figure 14. Résultat de la 3D-SVD à un autre instant temporel (amplitude positive en rouge et négative en bleu)

- A : champ acoustique estimé ;
- B : champ acoustique de référence ;
- C : champ turbulent estimé ;
- D : champ acoustique de référence.

5. Conclusions

Le confort du chauffeur et des passagers dans l'habitacle d'un véhicule est sensiblement limité par les nuisances sonores dues à l'écoulement de l'air à la surface du véhicule. Dans un cadre de recherche visant à limiter les nuisances sonores d'origine aérodynamique dans l'habitacle, cette étude s'est intéressée à la séparabilité d'un champ de pression acoustique (champ de pression compressible) d'un champ de pression turbulent (champ de pression incompressible). Après une description du dispositif et des données, une étude monocapteur nous a renseigné sur le caractère inséparable de ces deux champs dans les domaines fréquentiel et espace nombre d'onde. Dans le but de profiter des caractéristiques spatiales des deux champs, nous nous sommes intéressés à une étude multicapteur. Une adaptation 3D du filtrage dans le domaine K_x-K_y-f nous a permis de reconstruire l'allure des signaux lorsque leur contribution énergétique est approximativement équivalente dans le mélange. Des outils tels

que la TF3D ou le filtrage dans le plan espace-nombre d'onde permettent de séparer les deux composantes dans le domaine haute fréquence uniquement (> 250 Hz). Afin de profiter des caractéristiques spatiales du champ acoustique et dans le but d'améliorer la reconstruction des allures des signaux, nous avons proposé une transformation spatiale des données nous permettant d'appliquer plus efficacement le filtrage multidimensionnel SVD-ICA (cette méthode améliorant effectivement l'estimation des allures respectives des deux champs). En tenant compte la cohérence 3D des signaux, nous avons mis en œuvre un filtrage par 3D-SVD. Cette méthode améliore sensiblement l'estimation de l'allure du champ acoustique dans le cas où les deux champs ont des puissances comparables.

En perspective, il serait intéressant d'aborder l'intégration de l'information multicomposante dans l'analyse pour la mesure de l'effort pariétal total (turbulent + acoustique). On dispose actuellement de sondes permettant d'enregistrer conjointement la vitesse particulière acoustique et la pression en un point, et cet apport d'information pourrait permettre un traitement plus efficace des signaux pour comprendre notamment la réponse vibratoire des surfaces de contact (vitre etc.)

Références

- [1] D. RICOT, *Simulation numérique d'un écoulement affleurant une cavité par la méthode Boltzmann sur réseau et application au toit ouvrant de véhicules automobiles*, PhD thesis, École Centrale de Lyon, 2002.
- [2] J. MILBANK and S. WATKINS, Tonal noise from small cavities on motor vehicles and a case study of a whistling mirror, *Proc. 7th International Congress on Sound and Vibration, Garmisch-Partenkirchen, Germany*, 2000.
- [3] G.S. KIM, H.K. PARK, S.G. JUNG, and K.D. IH, Development of acoustic holography and its application in hyundai aeroacoustic wind tunnel, *Society of Automotive Engineers International Noise and Vibrations Conference and Exposition, Grand Traverse, MI, USA*, (Paper 1497), 2001.
- [4] V. LINET, J.J. LASSERRE, C. VARTANIAN, et J.C. BOUEILH, Exploitation des mesures piv pour l'aérodynamique et l'aéroacoustique automobile, *Proc. 8^{me} Congrès Francophone de Vélocimétrie Laser*, 2002.
- [5] S. OGAWA and T. KAMIOKA, Review of aerodynamic noise prediction using cfd, *Society of Automotive Engineers International Congress and Exposition*, Detroit, MI, USA, pages Paper 1999-01-1126, 1999.
- [6] W. WEI and R. WALKER, Optimization of mirror angle for front window buffeting and wind noise using experimental methods, *Society of Automotive Engineers International Congress and Exposition*, Saint Charles, IL, USA, pages Paper 2007-01-2401, 2007.
- [7] J.Y. HER, M. LIAN, J.J. LEE, and J. MOORE, Experimental assessment of wind noise contributors to interior noise, *Society of Automotive Engineers International Congress and Exposition*, page Paper 971922, 1997.
- [8] P.G. BREMMER and J.F. WILBY, Aero-vibro-acoustics : Problem and statement and methods for simulation-based design solution, *23th American Institute of Aerodynamics and Astronautics Conference, Breckenridge, Co, USA, June 2002*, page 2251, 2005.
- [9] P. IBARS, *Contribution des petits nombres d'onde en champ pariétal de pression dans une couche limite turbulente bidimensionnelle, Comparaison de différentes techniques expérimentales*, PhD thesis, École Centrale de Lyon, 1990.
- [10] B.M. ABRAHAM and W.L. KEITH, Direct measurement of turbulent boundary layer wall pressure wavenumber-frequency spectra, *Journal of Fluid Engineering*, 120: 29-39, 1998.
- [11] B. ARGUILLAT, *Étude expérimentale et numérique de champs de pression pariétale dans l'espace des nombres d'ondes, avec application aux vitrages automobiles*, PhD thesis, 2006.
- [12] G.H. GOLUB and C.F. VAN LOAN, *Matrix computation*, 3rd Ed, Johns Hopkins, 1996.
- [13] D.P. BERRAR, W. DUBITZKY, and M. GRANZOW, *A Practical Approach to Micro-array Data Analysis*, Springer ed., 2003.
- [14] R. DE FRANCO and G. MUSACHIO, Polarization filter with singular value decomposition, *Geophysics*, 66(3): 932-938, 2001.
- [15] V.C. KLEMA and A.J. LAUB, The singular value decomposition : its computation and some applications, *IEEE. Trans on Auto. Control*, 25(2): 164-176, 1980.
- [16] T.B. NIELSEN and E.K. WESTWOOD, Extraction of acoustic normal mode depth functions using vertical line array data, *JASA*, 111(2): 748-756, 2002.
- [17] L. DE LATHAUWER, *Signal processing based on multilinear algebra*, PhD thesis, Leuven Katholic University, 1997.
- [18] J.R. CALLISTER and A.R. GEORGE, *Wind Noise*, In *Aerodynamics of Road Vehicles*, 4th Edition, Edited by Wolf Heinrich Hucho (Society of Automotive Engineers International), 1995.
- [19] F. PERROT, *Calcul du rayonnement acoustique d'écoulements turbulents basé sur des analogies acoustiques aux simulations aérodynamiques stationnaires*, PhD thesis, École Centrale de Lyon, 2004.
- [20] B. ARGUILLAT and D. RICOT, Measurement of the wavenumber-frequency spectrum of wall pressure fluctuations under turbulent flows, *26th American Institute of Aerodynamics and Astronautics Conference*, Monterey, Ca, USA, pages 1-18, 2005.
- [21] V. GRULIER, S. DEBERT, J.I. MARS and M. PACHEBAT, Acoustic and turbulent wavenumbers separation in wall pressure array signals using emd in spatial domain, *International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, ICASSP*, pages 1-4 Avril, Las Vegas, 2008.
- [22] J. F. CARDOSO and A. SOULOUMIAC, Blind beamforming for non-gaussian signals, *IEE Proc.-F*, 140(6): 362-370, 1995.
- [23] V. VRABIE, N. LE BIHAN and J.I. MARS, 3d-svd and partial ica for 3d arrays sensors, *72nd Meeting of Society of Exploration geophysicists, Salt Lake City, Expanded Abstract*, 2002.
- [24] V. VRABIE, J.I. MARS and J.L. LACOUME, Modified singular value decomposition by means of independent component analysis. *Signal Processing*, 84(3): 645-652, 2004.
- [25] N. LE BIHAN, *Traitement algébrique des signaux vectoriels. Application en séparation d'ondes sismiques*, PhD thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2001.
- [26] N. LE BIHAN and G. GINOLHAC, Three-mode dataset analysis using higher order subspace method : application to sonar and seismic acoustic signal processing, *Signal Processing*, 84(5) :919-942, 2004.
- [27] 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 by C. H. Chen. CRC Press (Taylor and Francis books), 2006.
- [28] P.M. KROONENBERG, *Three-mode principal component analysis*, DSWO Press, 1983.
- [29] L. ELDEN, *Matrix methods in data mining and Pattern Recognition*, Series fundamentals of algorithms. SIAM, Cambridge University Press, 2007.



Jérôme I. Mars

Jérôme I. Mars est titulaire d'un doctorat de Traitement du Signal de l'Institut National Polytechnique de Grenoble (1988). De 1989 à 1992, il effectue un post-doctorat au Centre des Phénomènes Aléatoires et Géophysiques, Grenoble. De 1992 à 1995, il est chercheur invité au Materials Sciences and Mineral Engineering Dpt de l'Université de Californie, Berkeley. Il est actuellement professeur à Grenoble INP et responsable de l'équipe Signal-Image-Physique du département Images Signal du laboratoire GIPSA-Lab. Ses axes de recherche concernent le traitement du signal et les géosciences, plus particulièrement les méthodes de séparation, les méthodes temps-fréquence et temps-échelle appliquées à des signaux d'acoustique et de sismique. Il est membre IEEE, SEG et EAGE.



Jocelyn Guillon

Jocelyn Guillon est ingénieur de l'Ecole Nationale Supérieure des Ingénieurs Electriciens de Grenoble (INPG). Il a obtenu ce diplôme en 2006 à l'issue de sa dernière année dans l'option Analyse et Traitement des Images et des Signaux.



Vincent Grulier

Vincent Grulier est titulaire d'une Maîtrise de Physique de l'université de Poitiers et du DEA Acoustique Appliquée de l'Université du Maine. En 2005, il obtient le titre de docteur en acoustique appliquée de l'Université du Maine après une thèse sur l'holographie acoustique appliquée aux sources sonores non stationnaires. De 2005 à 2006, il est ingénieur de recherche au département Acoustique du Centre de Transfert de Technologie du Mans (CTTM). De 2006 à 2007, il effectue un stage postdoctoral au service R&D de PSA Peugeot-Citroën à Vélisy en collaboration avec le département Images et Signal du laboratoire GIPSA-LAB de Grenoble portant sur la séparation des contributions acoustiques et turbulentes au champ de pression pariétale en présence d'écoulements fluides, à partir des signaux mesurés par une antenne de capteurs. Actuellement il est ingénieur de recherche CNRS contractuel à Poitiers au Laboratoire d'études aérodynamiques jusqu'en février 2009 sur une thématique de reconstruction par tomographie multi-capteurs pour la visualisation d'écoulements 3D.



Sébastien Miron

Sébastien Miron est né en 1977 à Suceava (Roumanie). Il est ingénieur de l'Université Technique « Gh. Asachi » Iasi, promotion 2001. En 2002 il a obtenu son D.E.A. en « Signal, Image, Parole, Télécommunications » de l'Institut National Polytechnique de Grenoble suivi en 2005 par un diplôme de doctorat INPG en traitement du signal effectué au Laboratoire des Images et des signaux. Depuis 2006 il est maître de conférences à l'Université Henri Poincaré – Nancy 1, et mène ses activités de recherche au sein du Centre de Recherche en Automatique de Nancy (CRAN). Ses domaines d'activités concernent principalement le traitement d'antenne et la séparation de sources appliqués aux signaux multidimensionnels. Ses autres domaines d'intérêt sont les nombres hypercomplexes et l'algèbre multilinéaire.



Christophe Picard

Christophe Picard est Docteur de l'Université de Poitiers en Acoustique et Dynamiques des Écoulements Instationnaires. Il est actuellement Ingénieur de Recherche à la Direction de la Recherche et de l'Innovation Automobile chez PSA PEUGEOT CITROËN. Ses domaines de recherche sont : l'aéroacoustique, le traitement du signal, les méthodes inverses.