

Identification de sources acoustiques sur un moteur essence par méthodes de cohérences

Quentin Leclère,
Céline Sandier,
Bernard Laulagnet
Laboratoire Vibrations Acoustique
INSA Lyon
20, avenue A. Einstein
69621 Villeurbanne CEDEX
E-mail : quentin.leclere@insa-lyon.fr

Laurent Polac
Renault
Direction de la Mécanique
67, rue des Bons Raisins
92500 Reuil-malmaison
E-mail : laurent.polac@renault.com

Résumé

L'objet de cette communication est d'illustrer l'applicabilité de certaines méthodes dites «de cohérences» au diagnostic vibro-acoustique d'un moteur d'automobile. Après un rappel des outils d'analyse spectrale existants dans la bibliographie, nous présenterons une méthodologie originale permettant d'optimiser le diagnostic lorsque l'objet étudié a un comportement vibro-acoustique complexe d'un point de vue statistique. Le potentiel et l'efficacité de cette approche seront ensuite illustrés par deux applications expérimentales : l'analyse vibro-acoustique d'un moteur essence à l'arrêt sollicité par une source maîtrisée puis l'analyse du même moteur en fonctionnement.

Abstract

The object of this communication is to illustrate the applicability of coherence methods to the vibroacoustic diagnosis of a gasoline engine. Methods of partial, multiple or virtual coherences are useful tools based on traditional approaches of signal processing and are known and applied since several decades. We will first of all present a methodology based on coherence approaches, using several original indicators and tools to optimize the diagnosis. The potential and the effectiveness of this approach will be then illustrated by an experimental application: the vibroacoustic analysis of a gasoline engine.

L'identification des principales sources acoustiques sur une machine bruyante est un problème récurrent pour les industriels. Les solutions généralement employées pour caractériser expérimentalement les sources sont de type imagerie acoustique donc basées sur des mesures d'antennerie [1,2] (grilles de microphones).

Ces méthodes se heurtent à des limites basses et hautes fréquences liées respectivement à la longueur d'onde acoustique et à l'espacement des microphones de l'antenne. Il existe également une technique basée sur des mesures d'intensité [3], mais cette approche reste assez artisanale et requiert la présence d'un opérateur au voisinage de la source (ce qui, pour des raisons de sécurité, est proscrit dans le cas des applications moteurs thermiques).

On se propose ici d'utiliser des méthodes alternatives basées sur les propriétés statistiques des signaux. Les méthodes de cohérences partielles, multiples [4] ou encore virtuelles [5] sont des outils basés sur des approches classiques de traitement du signal et sont connues et appliquées depuis plusieurs dizaines d'années. Cependant, les besoins de ce type d'approche en matériel et en puissance de calcul sont importants, c'est pourquoi leur mise en œuvre est restée anecdotique et est encore actuellement sous-employée dans l'industrie. Parmi les différentes techniques proposées dans la bibliographie, nous nous focaliserons plus particulièrement sur l'analyse spectrale conditionnée (ASC) et sur l'analyse spectrale en composantes principales (ACP).

La méthode d'analyse conditionnée a été développée par Bendat et Piersol [4] dès la fin des années 1970. Le principe est de considérer la fonction de cohérence entre une réponse et une source comme le taux d'énergie de la réponse due à la source considérée. On peut séparer un spectre S_{xx} de réponse en deux parties : la partie cohérente avec la source ($S_{xx} \cdot \gamma_{xy}$) et la partie résiduelle non due à la source ($S_{xx} \cdot (1 - \gamma_{xy})$), γ_{xy} représentant la cohérence entre la voie réponse x et la source y . On peut obtenir des expressions équivalentes pour les interspectres entre la voie x et une troisième voie z , et l'on peut ainsi supprimer d'une matrice interspectrale complète l'énergie cohérente avec une excitation. On rappelle que la matrice interspectrale d'un ensemble de signaux est constituée des autospectres sur sa diagonale et des interspectres entre les différents signaux en dehors de sa diagonale. La matrice interspectrale dite «résiduelle» obtenue après conditionnement conserve les propriétés d'une matrice interspectrale, elle est représentative du système étudié pour lequel on aurait «débranché» la référence utilisée pour le conditionnement. Il va de soi que l'observation d'une telle matrice résiduelle a du sens essentiellement si la référence est représentative d'une source interne au système étudié.

Ce type d'analyse a déjà été utilisé avec succès dans le cadre d'une étude sur moteur Diesel au ralenti [6], et l'on trouve dans la bibliographie quelques exemples expérimentaux [7, 8]. L'inconvénient principal de cette approche est que l'analyse des résultats devient difficile lorsque les voies sources (dites

de référence) sont partiellement cohérentes entre elles, soit à cause de leur nature déterministe, soit par pollutions mutuelles. Les signaux de références peuvent en effet se polluer mutuellement dans le sens où ce sont rarement des signaux d'excitation purs : en pratique, un signal de référence est issu d'un capteur positionné de manière à maximiser la contribution de la source à caractériser.

La décomposition en composantes principales, également appelée analyse en sources virtuelles, a été proposée par Price et Bernhard en 1986 [5]. L'idée est de dénombrer et d'identifier les phénomènes décorrélés à partir de la matrice interspectrale en faisant sa décomposition propre, le "rang" de la matrice (nombre de valeurs propres non négligeables) correspondant au nombre de phénomènes décorrélés. De nombreux travaux traitent de l'application expérimentale de cette méthode [9, 10].

L'avantage est que l'on identifie facilement le niveau de cohérence entre capteurs de références, ainsi que le nombre de phénomènes décorrélés. L'inconvénient est que les sources virtuelles identifiées ne correspondent pas aux mêmes sources physiques sur toute la bande de fréquences: on associe en effet un numéro à chaque source virtuelle qui correspond à sa place dans la hiérarchie à une fréquence donnée, et la source virtuelle prépondérante ne correspond pas systématiquement à la même source réelle lorsqu'on change de fréquence.

Notion de source : Il est utile à ce stade de revenir au sens du mot «source» que l'on qualifie ici de physique, réelle ou encore virtuelle. On utilise dans ce travail des approches de séparations statistiques, la définition de source au sens statistique se base sur des notions d'indépendance. Une source virtuelle, identifiée par ACP, répond à cette définition. On qualifie une source identifiée sur le moteur (une pièce, un accessoire) de «réelle» par opposition au qualificatif «virtuelle» précédemment défini. Une source est qualifiée de physique si elle découle d'un phénomène physique particulier (choc, combustion, écoulement turbulent ...). Par exemple, un carter du moteur qui rayonne fortement est identifié comme une source «réelle», tandis que physiquement ce n'est qu'un émetteur acoustique sollicité par la distribution ; mais si la distribution est corrélée avec la combustion, ce n'est pas une source indépendante au sens statistique. Ces définitions non exhaustives ne sont également pas universelles, ce sont cependant celles qui sont utilisées dans cette communication.

Méthodologie

Les deux approches évoquées sont complémentaires, c'est pourquoi elles seront toutes deux utilisées pour cette étude. L'analyse conditionnée permet en effet d'analyser dans un premier temps de manière spécifique les différentes sources potentielles sur le moteur. Cependant, étant donné le fort niveau de corrélation entre les références sur ce type de source, la méthode la plus adéquate s'avère être l'analyse en sources virtuelles. L'interprétation des résultats est certes plus ardue que pour l'analyse conditionnée, mais le risque de faire de mauvaises conclusions est moindre. Une méthodologie particulière a été adoptée quant à l'application de cette approche à notre cas. Un certain nombre de capteurs dits de «réponse» sont disposés autour de la source considérée de manière à représenter suffisamment –sur le plan statistique–

le rayonnement acoustique de ladite source. Une analyse en composantes principales est réalisée sur ces capteurs de réponse de manière à identifier les différents phénomènes décorrélés participant au rayonnement. Chaque phénomène identifié sera considéré comme la contribution d'une source virtuelle, la source virtuelle prépondérante correspondant au phénomène le plus énergétique sur les capteurs de réponse. Une deuxième batterie de capteurs dits de «référence» est parallèlement placée au voisinage direct des sources potentielles sur l'objet étudié. Une représentation de la cohérence fonction de la fréquence entre chaque référence et les différentes sources virtuelles identifiées permet alors de déterminer si les sources sont séparables, et le cas échéant de les identifier. Cette représentation, fonction de la fréquence, caractérise chaque source virtuelle, ce que l'on appellera sa «signature».

Mise en œuvre expérimentale

17 microphones ont été positionnés sur un dôme de mesure autour du moteur (cf. fig. 1) de manière à représenter le bruit global moteur. 15 autres voies ont été allouées à des signaux dits de référence, capteurs placés "au voisinage" de différentes sources physiques (alternateur, pression cylindre...).



Fig. 1 : Le moteur étudié et le dôme de mesures microphoniques

Contribution des sources virtuelles au niveau, total 98.9 dB(A)

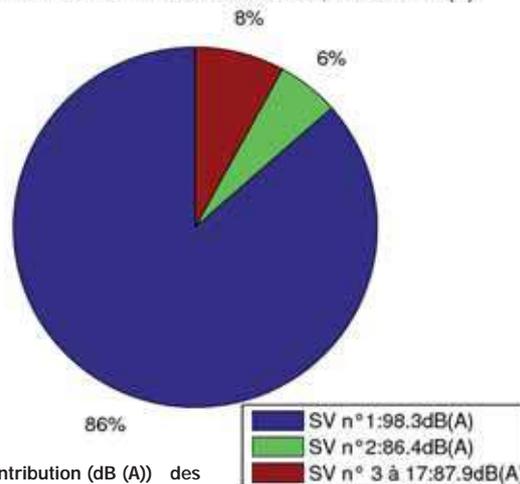


Fig. 2 : Contribution (dB (A)) des sources virtuelles 1 et 2 au bruit global du moteur à 4000tr/mn pleine charge en troisième.

L'analyse en composantes principales des capteurs de réponse a permis de déterminer que la source virtuelle prépondérante participait très majoritairement au bruit moteur pour l'ensemble de la plage de fréquence étudiée (0-6kHz) : les contributions des sources virtuelles 1 et 2 au bruit moyenné sur les capteurs de réponse sont présentées sur la figure 2. L'analyse de la signature de la source prépondérante paraît alors suffisante et permet d'identifier, lorsque c'est possible, les sources réelles en cause.

Illustration académique sur le moteur à l'arrêt

Une expérience académique a été réalisée dans le but d'illustrer les outils présentés dans la partie précédente. Un pot vibrant a été positionné verticalement au niveau du carter d'huile, de manière à utiliser le moteur comme un radiateur acoustique. Le dôme de mesure de 17 microphones a permis d'enregistrer le bruit généré par ce dispositif. Dans le but d'introduire une seconde source, le contact moteur a été établi, ce qui génère un bruit parasite au niveau du boîtier papillon. Le signal envoyé au pot vibrant a été enregistré comme une première référence, et un signal de tension capté au niveau du boîtier papillon a été considéré représentatif du bruit parasite. Sur la figure 3 est représentée la densité spectrale du bruit moteur (moyenne des spectres des 17 microphones), et le même spectre conditionné en cascade par le signal envoyé au pot vibrant puis par le signal "boîtier papillon". Dans une plage allant de 1 à 8 kHz, le conditionnement par le signal pot vibrant permet de faire chuter le niveau de 20 à 25 dB excepté sur les harmoniques du bruit parasite, qui sont elles-mêmes complètement atténuées par un conditionnement additionnel par le signal boîtier papillon. En basses fréquences, particulièrement en dessous de 500 Hz, les conditionnements par les deux références sont sans effets, la source prépondérante étant le bruit de fond (bruits des systèmes d'éclairage et de ventilation) dont le spectre est tracé en vert.

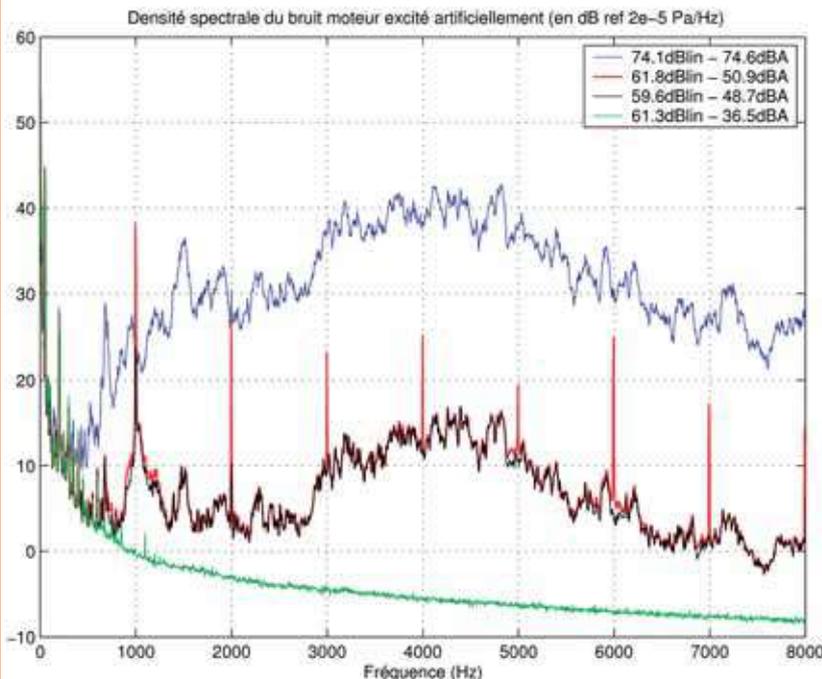


Fig. 3 : Conditionnement du bruit émis par le moteur excité artificiellement par le signal alimentant le pot vibrant et par le signal boîtier papillon (contact moteur établi). En bleu : spectre de bruit total. En rouge : spectre conditionné par le signal du pot vibrant. En noir : spectre conditionné par le signal pot et le signal boîtier papillon. En vert : bruit de fond

Une analyse en sources virtuelles permet d'extraire un diagramme signature de la source virtuelle prépondérante (cf. figure 4). En bleu est tracé le bruit global, en vert le bruit de fond, en rouge la contribution de la source virtuelle prépondérante et en noir la contribution des autres sources virtuelles, au nombre de 16 (l'analyse est faite sur les 17 microphones, on extrait donc au total 17 sources virtuelles). Sur le diagramme sont représentées les cohérences des deux références avec la source virtuelle prépondérante. On identifie facilement le pot vibrant comme étant la source prépondérante entre 500 Hz et 5 kHz, excepté sur deux harmoniques à 1 et 2 kHz pour lesquelles la source prépondérante est le boîtier papillon.

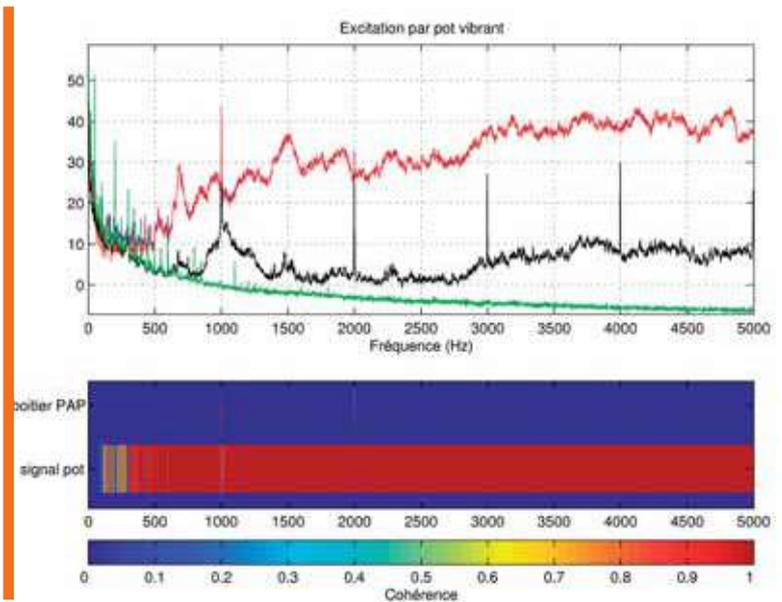


Fig. 4 : Signature du moteur - excitation artificielle, contact moteur (présence du bruit boîtier papillon). En bleu : spectre de bruit total. En rouge : contribution de la source virtuelle prépondérante. En noir : contribution des autres sources virtuelles. En vert : bruit de fond.

On constate qu'en basses fréquences, la source prépondérante n'est représentée par aucune des deux références ; lorsqu'on compare le bruit total avec le bruit de fond, on constate que la source prépondérante n'est autre que le bruit résiduel enregistré par les microphones lorsque le contact n'est pas établi et le pot vibrant non alimenté.

Application au moteur en fonctionnement

Analyse des sources

La première étape de la méthodologie consiste en l'analyse des différentes sources potentielles sur l'objet étudié.

Un certain nombre de signaux de référence ont été inspectés, et les signaux les plus représentatifs de la source ont été conservés. Il s'agissait en fait de maximiser la cohérence multiple entre les capteurs de réponse et les capteurs de référence, de manière à prendre en compte un maximum d'énergie sur l'analyse du bruit total.

Analyse des signatures

Les diagrammes de signatures sont ensuite analysés en fonction de la fréquence. Un exemple est donné en figure 5 : le spectre du bruit total est affiché en bleu, la contribution de la source virtuelle prépondérante en rouge et la contribution des autres sources virtuelles en noir. On constate que sur les principales émergences, la source virtuelle prépondérante participe très majoritairement au

bruit. La signature de la source virtuelle prépondérante est donnée entre 2 et 4 kHz. Le bleu correspond à une faible cohérence entre la référence et la source virtuelle, le rouge une forte cohérence.

On identifie par exemple sans difficulté la courroie comme source du bruit sur les émergences à 2150 et 3230 Hz, tandis qu'à 2400 Hz la source est vraisemblablement identifiée comme étant le support de coiffe. Les difficultés interviennent dans l'analyse lorsque les différentes références sont trop corrélées entre elles, ce qui est le cas en basse fréquence, en-dessous de la 20^e harmonique de rotation pour le moteur essence étudié (200 Hz au ralenti, 1 400 Hz à 4 000 tr/mn).

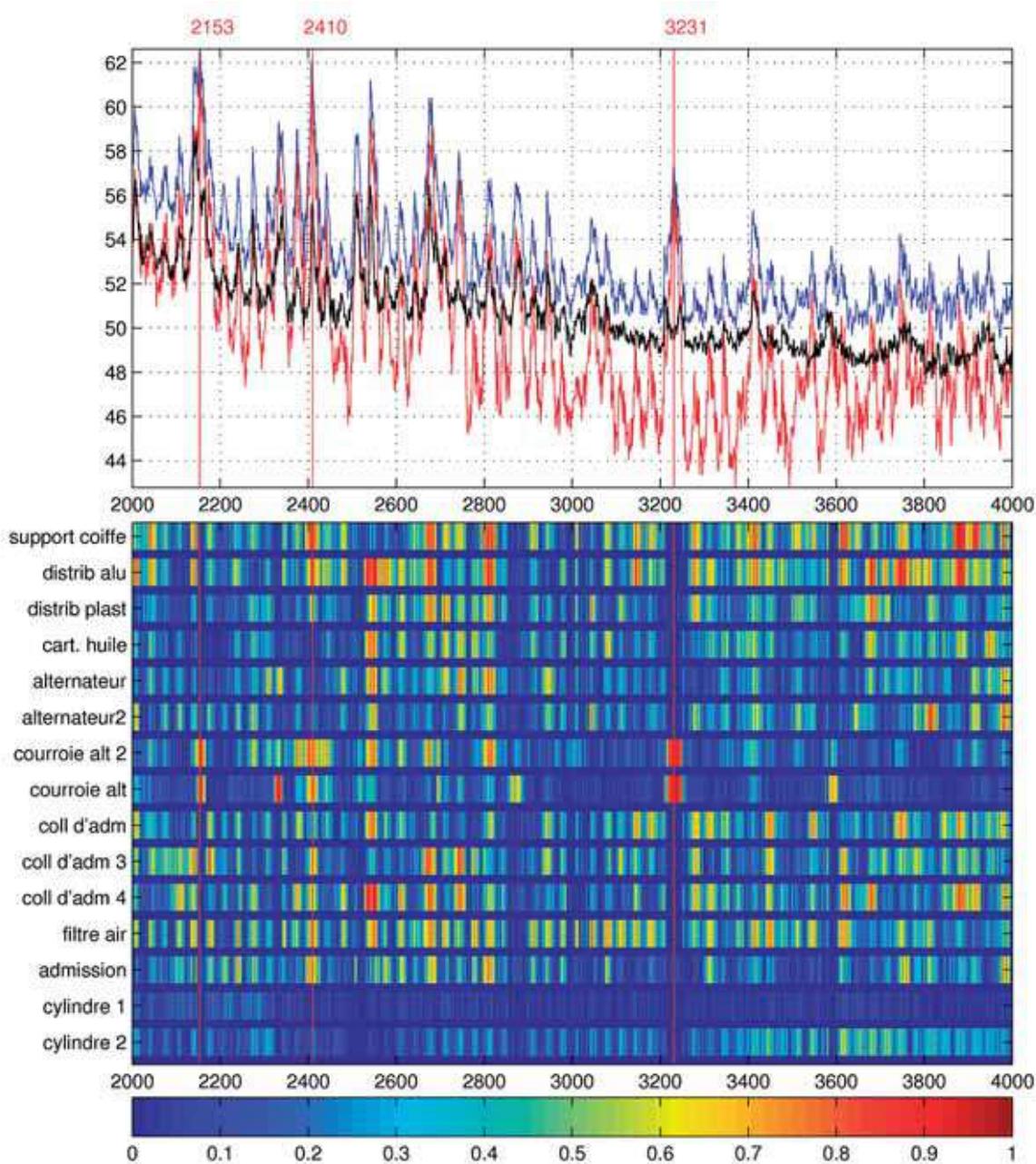


Fig. 5 : Signature du moteur en fonctionnement, 4 000 tr/mn pleine charge, 3^{ème} dans la bande 2kHz/4kHz

Conclusion

La méthodologie d'identification de sources présentée dans cette communication est une alternative aux méthodes de type imagerie acoustique. L'identification ne se fait plus en traitant le problème de façon géométrique en se basant sur la propagation des ondes, mais de manière statistique en exploitant les propriétés des signaux. Les résultats sont cependant conditionnés par les corrélations entre les différentes sources à identifier, une trop forte cohérence entre références empêchant toute séparation des sources associées.

L'application de cette méthode au cas d'un moteur essence a permis d'identifier aisément des sources telles que les courroies, le support de coiffe ou l'alternateur, pour des fréquences supérieures à la vingtième harmonique (200 Hz au ralenti, 1 400 Hz à 4 000 tr/mn). Il a également été établi que les pressions de combustion ne faisaient pas partie des sources prépondérantes, contrairement au cas du moteur Diesel. En revanche, les sources liées aux écoulements turbulents n'ont pas pu être clairement identifiées par manque de capteurs de références.

Références bibliographiques

- [1] J. Billingsley, R. Kinns, The acoustic telescope, *Journal of Sound and Vibration*, 48 (4) : pp. 485-510, 1976
- [2] W.A. Veronesi, J.D. Maynard, Digital holographic reconstruction of sources with arbitrarily shaped surfaces, *Journal of the Acoustical Society of America*, 85 (2) : pp. 588-598, 1989
- [3] F.J. Fahy, *Sound intensity*, London : E and FN SPON, 1995
- [4] J.S. Bendat, A.G. Piersol, *Engineering applications of correlation and spectral analysis*. Wiley-Interscience, New York, 1980
- [5] S.M. Price, R.J. Bernhard, Virtual coherence : A digital signal processing technique for incoherent source identification. In *Proceedings of IMAC 4*, Schenectady, NY, USA, 1986
- [6] Q. Leclere, C. Pezerat, B. Laulagnet, L. Polac, Application of multichannel spectral analysis to identify the source of a noise amplitude modulation in a diesel engine operating at idle, *Applied Acoustics* 66, pp. 779-798, 2005
- [7] C. Giangreco, P.R. Wagstaff, J.C. Henrio, E. Langlois, Use of conditioned spectra to differentiate between flow noise and machinery noise. In *Proceedings of Inter-Noise 95*, Newport Beach, CA, USA, July 1995.
- [8] R.J. Alfredson, The partial coherence technique for source identification on a diesel engine. *Journal of Sound and Vibration*, 55(4) : pp. 487-94, 1977
- [9] D. Otte, P. Sas, P. Van de Ponsele, Noise source identification by use of principal component analysis. In *Proceedings of Inter-Noise 88*, Avignon, France, 1988
- [10] N. Okubo, K. Kumazawa, Application of principal spectrum analysis to identify the vibration sources. In *Proceedings of ISMA 13*, Leuven, Belgium, 1988