

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

Quentin Leclère¹, Céline Sandier¹, Bernard Laulagnet¹ & Laurent Polac²

1 : Laboratoire Vibrations Acoustique INSA Lyon F-69621
20 av. A. Einstein 69621 Villeurbanne cedex

2 : RENAULT (Direction de la Mécanique)
67 rue des Bons Raisins 92500 Rueil Malmaison

quentin.leclere@insa-lyon.fr

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 existant 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.

Mots-clefs : moteur, identification, cohérence

1 Introduction

Les méthodes de cohérences partielles, multiples ou encore virtuelles sont des outils basés sur des approches classiques de traitement du signal et sont connus et appliqués 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 arrêterons plus particulièrement sur l'analyse spectrale conditionnée (ASC) et l'analyse spectrale en composantes principales (ACP).

La méthode d'analyse conditionnée a été développée par Bendat et Piersol [1] dès la fin des années 70. Le principe est de considérer la cohérence entre une réponse et une excitation comme le taux d'énergie de la réponse due à l'excitation considérée. On peut séparer un spectre S_{xx} de réponse en deux parties : la partie cohérente avec la référence ($S_{xx} \cdot \gamma_{xy}$) et la partie résiduelle non due à la référence ($S_{xx} \cdot (1 - \gamma_{xy})$), γ_{xy} représentant la cohérence entre la voie réponse x et la référence y . On peut également 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 l'une des références. La matrice interspectrale dite « résiduelle » ainsi obtenue 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 dans le cadre d'une étude sur moteur Diesel au ralenti [3]. L'inconvénient principal de cette approche est que l'analyse des résultats devient difficile lorsque les voies dites de référence sont partiellement cohérentes entre elles, soit par pollutions mutuelles, soit à cause de leur nature déterministe.

L'analyse en composantes principales, également appelée décomposition en sources virtuelles, a été proposée par Price et Bernhard en 1986 [2]. L'idée est de dénombrer et d'identifier les phénomènes décorrelés présents dans la matrice interspectrale à partir d'une décomposition propre de cette matrice, le "rang" de la matrice (nombre de valeurs propres non négligeables) correspondant au nombre de phénomènes décorrelés. De plus amples détails sont également donnés dans la référence [3]. L'avantage de cette méthode est que l'on identifie facilement le niveau de cohérence entre capteurs de références, ainsi que le nombre de phénomènes décorrelés. L'inconvénient est que les sources virtuelles identifiées ne correspondent pas aux mêmes sources physiques à chaque fréquence : La source virtuelle n°1 correspond en effet à la source prépondérante, qui peut différer suivant la fréquence.

Notion de source : Il est utile à ce stade de revenir au sens du mot « source » que l'on peut qualifier 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 terme « virtuelle ». 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 ce travail.

2 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 bien 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 correctement –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 décorrelés 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 dire si les sources sont séparables, et le cas échéant de les identifier. Cette représentation, fonction de la fréquence, caractérise chaque source virtuelle, et constitue en quelque sorte sa « signature ».

17 microphones ont été positionnés sur un dôme de mesure autour du moteur (cf. fig 1, à gauche) 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...). 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 moyen observé sur les capteurs de réponse sont présentées sur la figure 1 (à droite). 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.

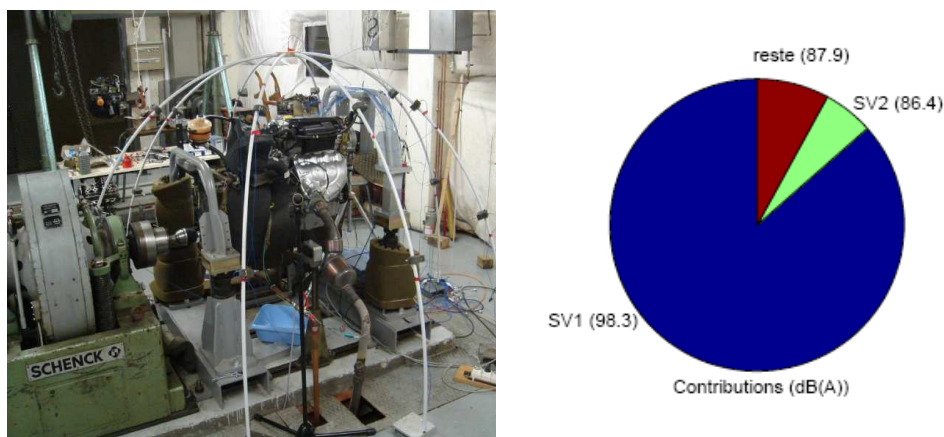


FIG. 1 – A gauche : le moteur étudié et le dôme de mesure microphonique. A droite : contribution (dB(A)) des sources virtuelles 1 et 2 au bruit global du moteur à 4000tr/mn pleine charge en troisième.

3 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 2 a été représenté la densité spectrale du bruit moteur total, (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 8kHz, 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 500Hz, les conditionnements par les deux références sont sans effet, la source prépondérante étant le bruit de fond (bruits des systèmes d'éclairage et de ventilation) dont le spectre est tracé en vert. Une analyse en sources virtuelles permet d'extraire un diagramme signature de la source virtuelle prépondérante (cf. figure 3). 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 la source prépondérante entre 500Hz et 5kHz qui est le pot vibrant, excepté sur deux harmoniques à 1 et 2 kHz où la source prépondérante est le boîtier

papillon. 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.

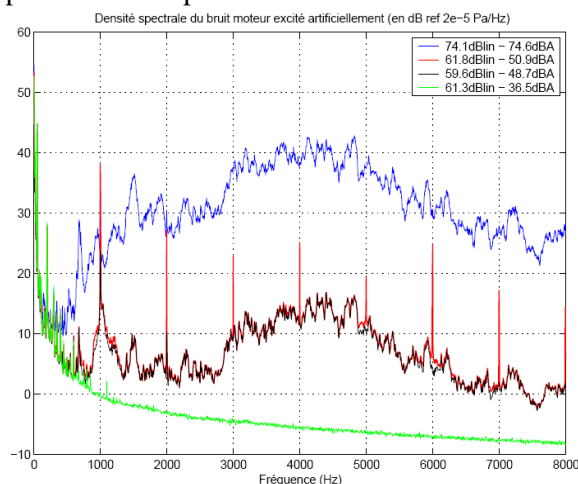


FIG. 2 – Conditionnement du bruit émis par le moteur excité artificiellement par le signal alimentant le pot vibrant et par le signal boîtier papillon (contact moteur établi). En bleu : spectre de bruit total. En rouge : spectre conditionné par le signal du pot vibrant. En noir : spectre conditionné par le signal pot et le signal boîtier papillon. En vert : bruit de fond.

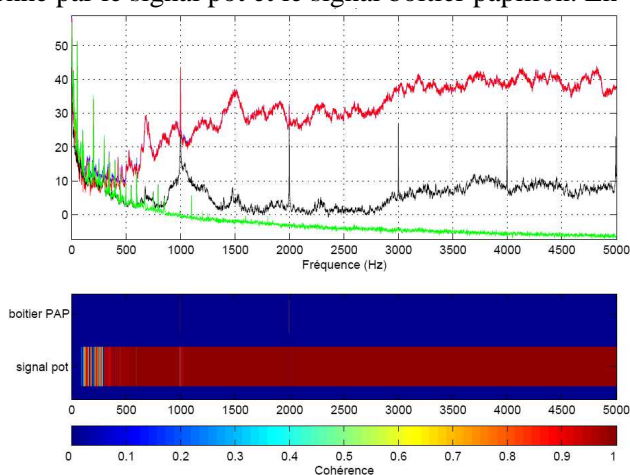


FIG. 3 – signature du moteur - excitation artificielle, contact moteur (présence du bruit boîtier pap). En bleu : spectre de bruit total. En rouge : contribution de la source virtuelle prépondérante. En noir : contribution des autres sources virtuelles. En vert : bruit de fond.

4 Application au moteur en fonctionnement

4.1 analyse des sources

La première étape de l'application 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.

4.2 analyse des signatures

Les diagrammes de signatures sont ensuite analysés en fonction de la fréquence. Un tel résultat est présenté sur la figure 4 : 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 4kHz. 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 l'émergence à 2150 et 3230Hz, 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^{ème} harmonique de rotation pour le moteur essence étudié (200Hz au ralenti, 1400Hz à 4000tr/mn).

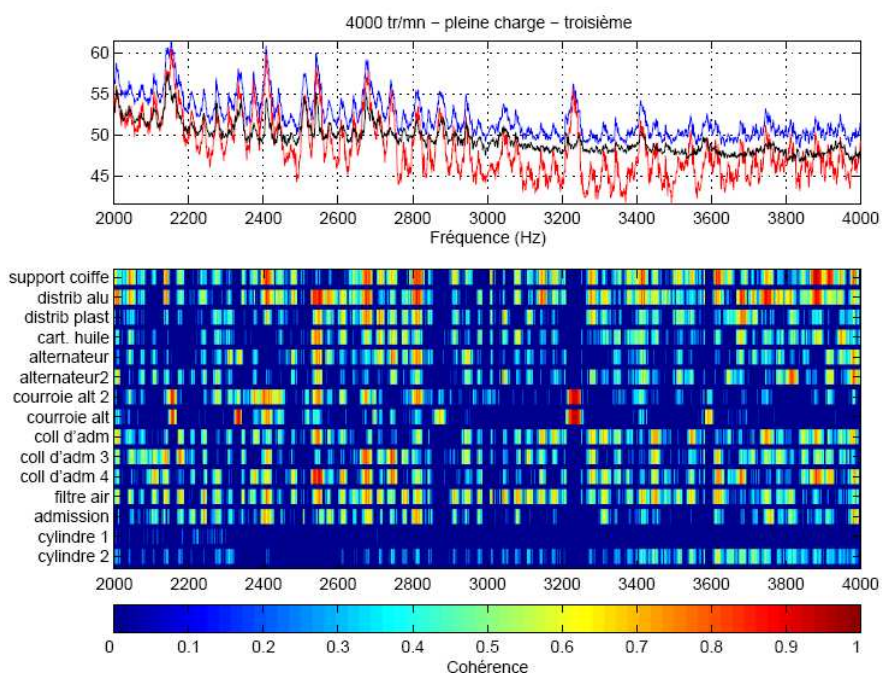


FIG. 4– signature du moteur en fonctionnement, 4000tr/mn pleine charge, 3^{ème} dans la bande 2kHz – 4kHz

4 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.

Références

- [1] J.S. BENDAT and A.G. PIERSOL. Engineering applications of correlation and spectral analysis. Wiley-Interscience, New York, 1980.
- [2] S.M. PRICE and R.J. BERNHARD. Virtual coherence : A digital signal processing technique for incoherent source identification. In Proceedings of IMAC 4, Schenectady, NY, USA, 1986.
- [3] Q. LECLERE, C. PEZERAT, B. LAULAGNET, and 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** :779–798, 2005.