

# Méthode de séparation de sources pour la mesure du bruit de combustion et de l'atténuation de structure

**Fabrice Gautier et Shanjin Wang**  
Renault  
Service NVH GMP  
CTR A03 3 37  
67 rue des Bons Raisins  
92500 Rueil-Malmaison  
E-mail : fabrice.gautier@renault.com  
E-mail : shanjin.wang@renault.com

## Résumé

Jusqu'à maintenant, les méthodes connues pour séparer le bruit de combustion et les bruits mécaniques des moteurs à combustion interne sont en général complexes et difficiles à mettre en oeuvre. Cet article présente une nouvelle méthode simple et rapide dans son utilisation. Elle est basée sur le filtrage de Wiener et a été mise au point chez Renault en collaboration avec un laboratoire extérieur. Quelques applications concrètes de cette nouvelle méthode sont présentées dans cet article. Cette méthode permet d'extraire le bruit de combustion en temporel dans un signal de bruit mesuré. Le résultat obtenu est cohérent avec le ressenti subjectif. Cette méthode permet aussi de déterminer le transfert ou l'atténuation de structure moteur entre la chambre de combustion et le point de mesure, et donc de quantifier la contribution de chaque poste de combustion sur le bruit mesuré.

## Abstract

The assessment and ranking of noise sources in Diesel engines is of major concern in the car industry. This is all the more true as the engine emission standards are more and more stringent, so that it is necessary to conciliate conflicting design modifications in order to reduce noise radiation on the one hand and engine emission on the other hand. In this context, there is a need for a fast and reliable method for separating the main engine noise sources (combustion noise and mechanical noise) from in operation measurements. This paper introduces such a method. It is based on advanced signal processing tools which explicitly take into consideration the non-stationary structure of the engine noise signals so as to design a cyclic Wiener filter to achieve separation. This results in a set of separated waveforms from which noise levels and frequency spectra relating to combustion noise and mechanical noise can easily be computed. It also allows the computation of the structural loss between the combustion chamber and the measurement points, and therefore the assessment of the contribution of each cylinder to the overall radiated noise. The proposed method has the advantage of requiring few instrumentation and of implying a low-complexity experimental protocol as compared to other existing solutions. Its application to some actual examples is illustrated.

**L**a maîtrise du bruit de combustion des moteurs Diesel est aujourd'hui en enjeu important chez les constructeurs automobiles, alors même que les contraintes imposées aux metteurs au point deviennent de plus en plus exigeantes (sévérisation des normes de dépollution) et rendent le réglage du bruit à la source de plus en plus difficile. L'amélioration de la part du bruit rayonné due à la combustion réside alors dans l'amélioration de l'atténuation de structure, la capacité du moteur à « contenir » le bruit généré dans la chambre de combustion.

Le progrès dans ce domaine passe par la mesure du bruit de combustion et de l'atténuation de structure. C'est une opération difficile, en raison du fait que le bruit rayonné par un moteur est la résultante d'un ensemble de bruits de sources diverses, dont la combustion fait partie. La mesure directe n'est pas possible, il est donc nécessaire de séparer le bruit de combustion des autres bruits, que nous regrouperons ici sous le terme « bruits mécaniques ». L'équation de base de la séparation est alors :

$$\text{Bruit Total} = \text{Bruit de Combustion} + \text{Bruits Mécaniques} \quad (1)$$

De plus, le lien entre bruit de combustion et atténuation de structure est établi par :

$$\text{Bruit de Combustion} = \text{Pression Cylindre} - \text{AS} \quad (2)$$

Avec AS : l'atténuation de structure

Deux approches sont alors possibles :

**Une première méthode** consiste à construire un modèle d'évolution des bruits mécaniques en fonction du régime et de la charge, défini à partir de la connaissance physique que l'on a du système. Un exemple simple, issu de [1], consiste à écrire :

$$\text{Bruits Mécaniques} = a. \text{Regime} + b. \text{Couple}^2 \quad (3)$$

Avec a et b les coefficients du modèle à identifier.

La combinaison des équations (1), (2) et (3) permet d'écrire :

$$\text{Bruit Total} = \text{Pression Cylindre} - \text{AS} + a.\text{Regime} + b.\text{Couple}^2 \quad (4)$$

Pour  $n$  points de fonctionnements mesurés, balayant plusieurs cas de régime, charge et pression cylindre, on peut écrire  $n$  fois l'équation 4 constituant ainsi un système linéaire surdimensionné dont les inconnues sont AS,  $a$  et  $b$ . Sa résolution pour chaque tiers d'octave est alors possible par régression multi variables (moindres carrés). La connaissance du terme d'atténuation de structure (AS) permet alors de reconstruire le bruit de combustion grâce à l'équation (2).

Simple en apparence par leur définition, ces méthodes présentent une difficulté majeure : la dépendance de la solution vis-à-vis de la modélisation des bruits mécaniques, qui, aussi fine soit elle, ne permet pas de rendre compte de particularités telles que des résonances ou émergences de bruit liées à certains composants du GMP qui peuvent apparaître à certains points de fonctionnement. L'identification des coefficients du modèle peut alors être perturbée, la régression minimisant l'écart entre le modèle et la mesure.

La qualité des résultats dépend alors des précautions prises dans la résolution du système, en particulier le tri des cas de fonctionnements qui nécessite une analyse au cas par cas, allongeant et complexifiant d'autant le processus.

**La deuxième approche** repose sur le traitement du signal et la notion de cohérence. Diverses méthodes existent, comme l'analyse spectrale en composantes principales ou encore l'analyse spectrale conditionnée. Une nouvelle méthode, également basée sur le traitement du signal et permettant la séparation du bruit de combustion sur moteur Diesel, a été développée chez Renault, en partenariat avec l'Université de Technologie de Compiègne : le filtrage de Wiener synchrone.

## Le filtrage de Wiener synchrone

### Principe du filtrage de Wiener

La technique décrite ci-dessous repose sur le filtre de Wiener dont la théorie a été développée dans le cadre des signaux stationnaires par N. Wiener en 1950 [2]. Elle a été utilisée avec succès dans de nombreux domaines, comme par exemple le débruitage de signaux en échographie médicale [3]. La problématique est la suivante : soit  $y(n)$  un signal mesuré et pollué par le bruit  $b(n)$ ,  $x(n)$  le signal que l'on désire extraire, et  $r(n)$  une référence sur  $x(n)$ , totalement décorrélée avec le bruit  $b(n)$ .

$$y(n) = x(n) + b(n) \quad (5)$$

Il s'agit alors de trouver le filtre  $h$  qui, appliqué à la référence  $r(n)$ , fournit une estimation  $\hat{x}(n)$  de la partie à extraire  $x(n)$  qui approche au mieux le signal  $y(n)$ . En d'autres termes, le filtre permet de minimiser la part de  $y(n)$  « non cohérente » avec la référence  $r(n)$ .

$$\hat{x}(n) = \sum_{\tau} h(\tau)r(n-\tau) \quad (6)$$

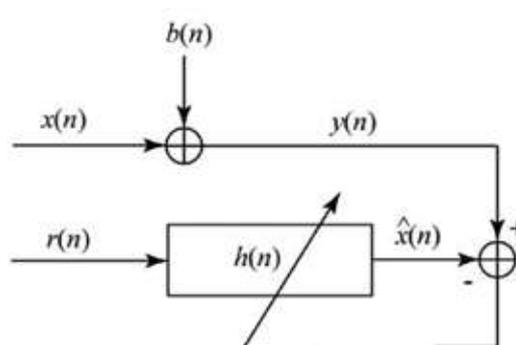


Fig. 1 : Principe du filtre de Wiener

Le filtre solution, qui est équivalent à une minimisation au sens des moindres carrés de l'écart entre  $y(n)$  et  $\hat{x}(n)$ , est le filtre de Wiener. Dans le domaine fréquentiel, ce filtre s'écrit :

$$H(f) = \frac{S_{yr}(f)}{S_{rr}(f)} \quad (7)$$

avec  $S_{rr}$  : densité spectrale de puissance de  $r$   
 $S_{yr}$  : densité interspectrale entre  $y$  et  $r$

### Application à la séparation du bruit de combustion sur moteur

Le filtre de Wiener ainsi défini est particulièrement bien adapté à la problématique de la séparation du bruit de combustion sur moteur. En effet :

- L'analogie entre l'équation (1) et l'équation (5) est évidente :
  - le bruit de combustion est analogue à  $x(n)$
  - les bruits mécaniques sont analogues à  $b(n)$ .
  - Une référence du bruit de combustion existe et est aisément mesurable sur moteur : la pression cylindre.
  - Cette référence est décorrélée des bruits mécaniques.
- Il est à noter qu'un signal vibratoire mesuré sur la culasse ou le carter-cylindre ne respecterait pas cette exigence de décorrélation.

Une difficulté majeure se pose : l'estimation correcte du filtre de Wiener défini dans (7) nécessite de s'appuyer sur des signaux stationnaires, dont les propriétés statistiques (moyenne, variance...) sont indépendantes de la fenêtre temporelle choisie. Ce n'est pas le cas pour des signaux mesurés sur moteur, qui subissent de fortes non stationnarités, liées à la nature « impulsive » du bruit de combustion ou des chocs mécaniques.

Ce problème peut être résolu en se plaçant dans le cadre des signaux cyclostationnaires, qui se caractérisent par des propriétés statistiques périodiques. La cyclostationnarité [4] est une propriété fondamentale des moteurs à combustion interne et des machines tournantes

en général : les combustions, chocs mécaniques... se répètent suivant une période égale à la durée d'un cycle moteur, soit  $720^\circ$  vilebrequin (2 tours) dans le cas des moteurs Diesel 4 temps.

La cyclostationnarité permet alors de construire des estimateurs « cycliques » du filtre de Wiener, en découpant les signaux en fenêtres angulaires contenant les portions à séparer. Ainsi pour la séparation du bruit de combustion sur un moteur Diesel à 4 cylindres, l'estimation du filtre de Wiener se fait sur des quarts de cycles, phasés avec la partie compression/détente du signal de pression cylindre pris comme référence.

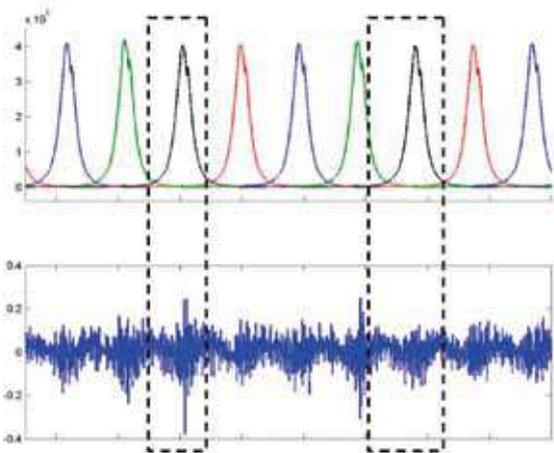


Fig. 2 : Découpage des portions de cycle en phase avec la combustion correspondante

Les portions de cycle ainsi extraites sont utilisées pour construire les estimateurs du filtre de Wiener comme défini dans l'équation (7). En appliquant le filtre au signal de référence, il est possible d'obtenir un signal séparé, représentatif du bruit de combustion [5].

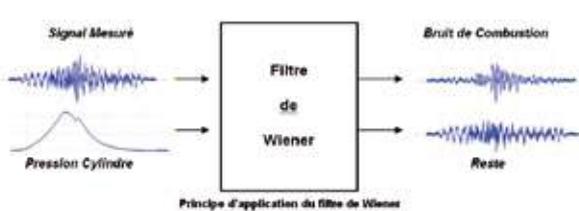


Fig. 3 : Principe d'application du filtre de Wiener

### Application : séparation du bruit de combustion sur moteur dCi

Les exemples qui suivent sont issus de mesures réalisées sur un moteur dCi, monté sur chariot autonome, en fonctionnement à vide.

#### Modification du bruit de combustion par changement de réglage d'injection

En fonctionnement au ralenti, une modification du bruit de combustion a été appliquée en coupant l'injection pilote. On a réalisé une séparation de la combustion dans les deux cas (standard et modifié) sur un signal mesuré par

un microphone placé en face de la distribution du moteur. Le signal de référence utilisé est la pression cylindre du cylindre 4 (proche de la distribution). Les deux figures suivantes présentent les résultats de la séparation sur le motif temporel mesuré par le micro lors d'une combustion du cylindre 4.

Fig. 3 : Bruit de combustion « standard »

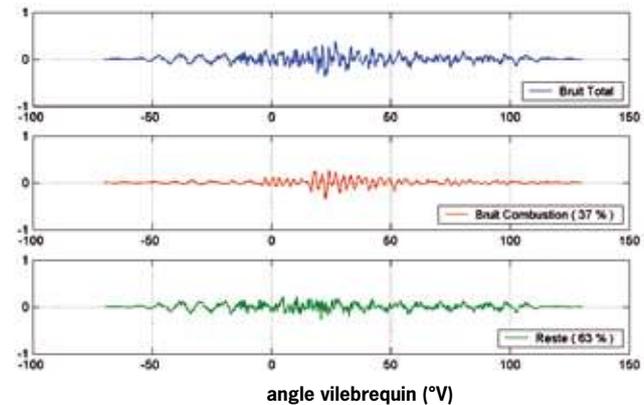
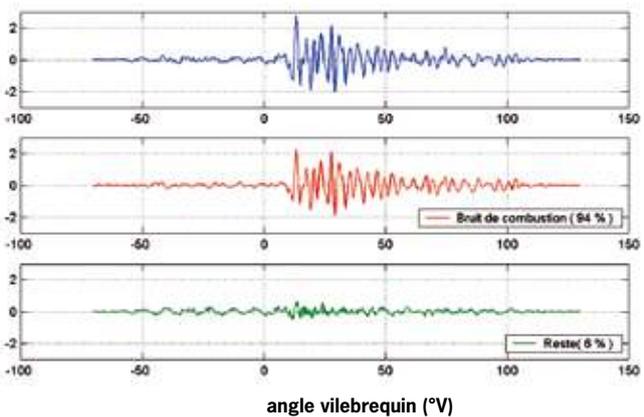


Fig. 4 : Bruit de combustion « modifié »



L'analyse des courbes ci-dessus montre que la séparation par filtrage de Wiener synchrone :

- Quantifie de manière robuste la part de l'énergie due à la combustion dans le signal total. Dans l'exemple, en condition de réglage standard, cette part s'élève à 37%, en condition modifiée, on atteint 94%.

- Conserve des niveaux de bruits mécaniques (reste de la séparation) similaires entre les deux configurations, ce qui apporte un élément de validation supplémentaire de la méthode.

#### Analyse du bruit de combustion poste à poste

Il est possible de réaliser la séparation du bruit de combustion en utilisant séquentiellement chacune des 4 pressions cylindres. En recombinaison des « quart de cycles » séparés, il est possible de reconstituer le bruit de combustion sur un cycle moteur complet. On peut ainsi étudier les écarts de bruit générés entre un cylindre et un autre.

Ci-dessous, le résultat de la séparation est représenté sur un cycle (720°) à l'aide d'une transformation angle-fréquence (basée sur transformation de Wigner Ville) appliquée sur le signal mesuré et sur le signal bruit de combustion séparé.  
L'angle 0°V estphasé avec le cylindre 1 (proche du volant moteur).

Fig. 5 : Bruit total Micro 1m face distribution - Transformée Angle-Fréquence

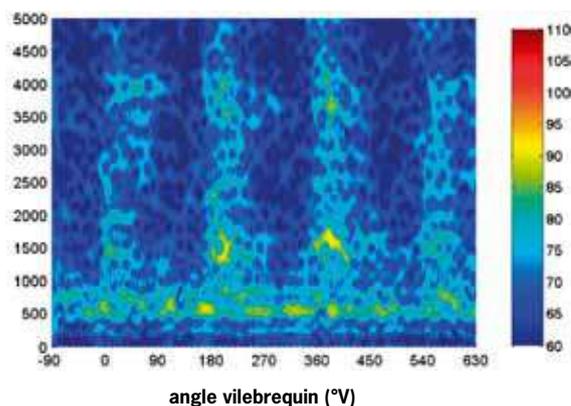
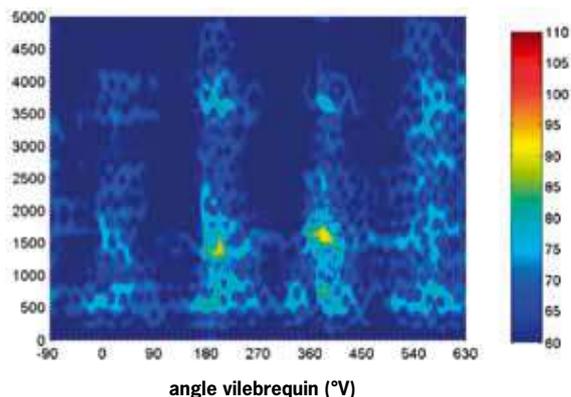


Fig. 6 : Bruit de combustion Micro 1m face distribution - Transformée Angle-Fréquence



Ces deux visualisations permettent de faire les observations suivantes :

- Sur le bruit total, on visualise des différences poste à poste assez peu marquées. En revanche, la visualisation du bruit de combustion montre clairement une prédominance du niveau des combustions des cylindres 3 et 4 (respectivement aux angles 120 et 360 °) par rapport à celle des postes 1 et 2 (respectivement aux angles 0 et 540 °), en particulier vers 1500 Hz. Ceci s'explique par la proximité de ces deux cylindres avec la position du microphone étudié.
- Les niveaux constatés vers 500 Hz sur le bruit total (jusqu'à 90dB) ne sont pas dus à la combustion, dont les niveaux ne dépassent pas 80dB à cette fréquence.

### Estimation de l'atténuation de structure

La connaissance simultanée de la pression cylindre et du bruit de combustion rayonné estimé par filtrage de Wiener permet d'obtenir une estimation de l'atténuation

de structure (voir équation 2). L'outil permet ainsi de quantifier le changement d'atténuation apporté par des modifications réalisées sur la structure.

Dans l'exemple qui suit, on compare l'atténuation de structure obtenue pour le micro 1m face distribution dans les deux configurations d'essais suivantes :

- Configuration moteur d'origine.
- Ajout d'un masquage sur le carter d'huile.

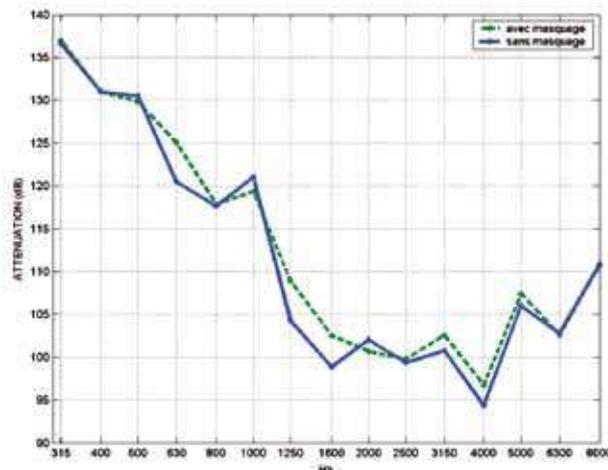


Fig. 7 : Impact du masquage du carter d'huile sur l'atténuation de structure à 1m face distribution

Cette technique permet de quantifier l'impact du masquage du carter d'huile sur l'atténuation de structure, à savoir :

- 5 dB sur le tiers d'octave 630 Hz
- 4 dB sur les tiers d'octave 1250 et 1600 Hz

### Conclusion

La méthode de filtrage de Wiener synchrone qui fait l'objet de cette étude est utilisée avec succès pour la séparation du bruit de combustion et la mesure de l'atténuation de structure. Les exemples d'utilisation de cette méthode montrent l'étendue de ses capacités :

- quantification précise du bruit de combustion dans le bruit rayonné,
- mise en évidence d'écarts de bruit entre les cylindres d'un même moteur,
- estimation de l'atténuation de structure du moteur.

### Références bibliographiques

[ 1 ] I. Hirano, M. Kondo, Y Uraki, Y Asahara - Using multiple regression analysis to estimate the contribution of engine-radiated noise components. JSAE Review 20 (1999) pp 363-368

[ 2 ] N. Wiener - Extrapolation, interpolation and smoothing of stationary time series. The technology press of the Massachusetts Institute of Technology, New York: John Wiley & Sons, Inc., 1950

[ 3 ] J. Max & J.L. Lacoume - Méthodes et techniques de traitement du signal, 5th edition, Dunod, 2000

[ 4 ] J. Antoni - Apport de l'échantillonnage angulaire et de la cyclostationnarité au diagnostic par analyse vibratoire des moteurs thermiques. Thèse, Institut National Polytechnique de Grenoble, Grenoble, 2000

[ 5 ] C. Renard, L. Polac, J.C. Pascal, S. Sahraoui - Extraction of vibration sources in Diesel engines. Proceedings of 11th International Congress on Sound and Vibrations - ICSV11, July 5-8 (2004), St Petersburg