

## UTILISATION DE LA REPRESENTATION DE WIGNER-VILLE COMME OUTIL DE DIAGNOSTIC DES DEFAUTS DE FONCTIONNEMENT DE MOTEURS THERMIQUES

Monique Chiollaz, Patrick Flandrin, Nicole Gache

Laboratoire de Traitement du Signal (UA 346 CNRS)  
ICPI 25 rue du Plat 69288 Lyon Cedex 02

### Résumé

L'amélioration de la qualité de production des moteurs thermiques nécessite une automatisation de la détection de défauts éventuels et donc un outil de diagnostic adapté.

Un cycle moteur se présentant comme la succession temporelle d'évènements de signature spectrale différente, une approche possible est de classifier et détecter les défauts dans le plan temps-fréquence. On choisit d'utiliser comme outil de base la distribution de Wigner-Ville pour ses bonnes propriétés théoriques tant en analyse (localisation temporelle et fréquentielle précises) qu'en décision (possibilité de détection optimale).

Dans un premier temps, on montre comment une distribution de Wigner-Ville convenablement lissée permet de caractériser la signature temps-fréquence d'un défaut.

Dans un deuxième temps, on élabore à partir d'un ensemble de moteurs déclarés sains une référence temps-fréquence, la détection de défauts se faisant par comparaison de l'image temps-fréquence du moteur étudié avec cette référence.

La méthode proposée permet un apprentissage de la signature des défauts par une analyse fine, et une détection efficace par une comparaison temps-fréquence locale.

### 1) Introduction

Cet article est relatif à une étude de faisabilité réalisée pour la société Renault Véhicules Industriels en vue d'une détection automatique de défauts de fonctionnement de moteurs thermiques. Les moteurs testés sont des moteurs diesel, 6 cylindres en ligne, tournant à une vitesse stabilisée de 1000 Tr/mn. Le diagnostic est basé sur l'analyse de signaux vibratoires issus de capteurs accélérométriques placés sur les culasses et les cylindres des différents moteurs.

Un cycle moteur (correspondant à deux tours de rotation) comprend une succession d'évènements (distribution) dans chacun des six cylindres : injection, combustion, fermeture et ouverture des soupapes d'admission et d'échappement. Chaque évènement produit un choc qui se traduit par un signal vibratoire de type impulsif.

### Summary

Improving the production quality of engines requires an automation of fault detection and therefore specialized diagnosis tools.

An engine cycle being a temporal succession of events with different frequency structures, a possible approach is to formulate the detection and classification problem directly in the time-frequency plane. Theoretical requirements related to analysis (precise localization in both time and frequency) and decision (optimality) suggest to use the Wigner-Ville distribution as basic tool.

In a first step, we show how a characteristic time-frequency pattern can be associated to a given defect.

In a second step, a detection procedure is proposed, which compares the time-frequency pattern of a tested engine to that of a reference, obtained as an ensemble average built on engines without defect.

This method allows both to learn the pattern to be detected, and an efficient detection by a local comparison with a reference.

Un mauvais réglage de la distribution entraîne une baisse du rendement du moteur, et peut même conduire à la dégradation de celui-ci. La détection de ces défauts de fonctionnement peut se faire par l'analyse de la signature vibratoire d'un cycle du moteur à tester. Ces défauts se traduisent dans certains cas par un décalage temporel des chocs relatifs à certains évènements. Un mauvais réglage peut entraîner aussi une augmentation de l'amplitude de certains chocs et une modification de leur contenu spectral.

La société RVI a mis en place un outil de diagnostic permettant de détecter la plupart des défauts, par un traitement approprié sur le signal temporel [1]. Cette analyse est réalisée dans plusieurs bandes de fréquence. Etant donnée la nature fortement non-stationnaire des signaux vibratoires étudiés, il est alors paru intéressant d'opérer cette détection directement dans le plan temps-fréquence. Pour ce



faire, il s'agit tout d'abord de choisir une représentation temps-fréquence adaptée au problème posé et aux signaux considérés.

## 2) Choix d'une représentation temps-fréquence

La figure 1 représente un des signaux vibratoires enregistrés. Sur cet exemple le signal est filtré entre 4 et 8 kHz. Il est issu d'un capteur accélérométrique placé sur la culasse au niveau du cylindre 5. On observe sur un cycle moteur (de durée 120 ms) une succession de signaux impulsifs correspondant aux différentes combustions, ouvertures et fermetures de soupapes de chaque cylindre.

Pour détecter toute avance ou retard d'un des événements du cycle, la représentation temps-fréquence choisie devra posséder la propriété d'une localisation temporelle précise. Il devra en être de même dans le domaine fréquentiel, pour détecter le changement de signature spectrale d'un événement.

La distribution de Wigner-Ville possède ces propriétés. Pour un signal réel  $S(t)$ , cette représentation temps-fréquence a l'expression suivante [2] [3] :

$$\rho_S^0(t, \nu) = \int_{\mathbb{R}} S\left(t + \frac{\tau}{2}\right) S\left(t - \frac{\tau}{2}\right) e^{-2i\nu\tau} d\tau$$

$\rho_S^0$  a même support en temps et en fréquence que le signal  $S(t)$ . Elle assure donc une localisation précise en temps et en fréquence des composantes du signal. La structure bilinéaire de la distribution de Wigner-Ville introduit cependant des termes d'interférences entre composantes dans le plan temps-fréquence, termes qu'il est possible de réduire en utilisant la version lissée [3] :

$$\rho_S(t, \nu) = \int_{\mathbb{R}} H\left(\frac{\tau}{2}\right) \int_{\mathbb{R}} G(u - t) S\left(t + \frac{\tau}{2}\right) S\left(t - \frac{\tau}{2}\right) e^{-2i\nu\tau} du d\tau$$

On considère  $s(t)$  réel.

$H(\tau)$  opère un lissage fréquentiel et  $G(t)$  un lissage temporel. En effet  $\rho_S(t, \nu)$  peut s'écrire sous la forme suivante [si  $G(t)$  est paire] :

$$\rho_S(t, \nu) = \left[ \left[ G(t') * \rho_S^0(t', \nu') \right] (t) * h(2\nu') \right] (\nu)$$

avec  $h(\nu) \Leftrightarrow H(\tau)$ .

La résolution temporelle est fixée par la fenêtre de lissage en temps  $G(t)$ , la résolution fréquentielle par la fenêtre d'analyse  $H(\tau)$ .

On peut donc choisir de façon indépendante ces deux résolutions.

De plus, ces deux fenêtres limitent dans chacun des deux domaines les interférences entre composantes.

Considérons deux composantes aux dates  $t_1$  et  $t_2$ . La fenêtre d'analyse  $H(\tau)$  permettra de diminuer l'amplitude des termes d'interférence si sa largeur équivalente  $\Delta_H$  est inférieure à l'écart entre les deux dates  $t_1$  et  $t_2$ .

De même, considérons deux composantes à une même date, de fréquence  $\nu_1$  et  $\nu_2$ . La fenêtre de lissage temporel  $G(t)$  permettra de diminuer l'amplitude des termes d'interférences entre ces deux composantes si sa largeur équivalente est supérieure à  $1/|\nu_2 - \nu_1|$ .

Un autre résultat remarquable justifie l'emploi de la distribution de Wigner-Ville pour comparer des signatures temps-fréquence en vue de la détection de défauts. On peut montrer [4] que le récepteur optimal au sens du maximum de vraisemblance en vue de la détection d'un signal dans une observation bruitée peut être formulé en terme de corrélation dans le plan temps-fréquence. La corrélation s'effectue entre la distribution de Wigner-Ville de l'observation et celle du signal de référence.

## 3) Choix des paramètres d'analyse

Un cycle moteur correspond à  $720^\circ$  de rotation du moteur (durée de 120 ms à 1000tr/mn). La tolérance admise en fabrication au niveau du réglage de la distribution est de  $3^\circ$ . On se fixe donc une résolution de cet ordre. Pour les essais que nous avons traités, la fenêtre de lissage  $G(t)$  était de type rectangulaire de largeur  $\Delta G$  égale à  $2^{\cdot 7}$ . La fenêtre d'analyse  $H(t)$  était de type Kaiser-Bessel de largeur  $\Delta H$  égale à  $38^\circ$ . La résolution fréquentielle est alors de l'ordre de 160 Hz. Les signaux analysés occupent une bande spectrale de 10 kHz. On réalise au préalable un filtrage passe haut à 2 kHz permettant d'éliminer les composantes basses fréquences de forte amplitude dues à la combustion. Deux exemples des images temps-fréquence ainsi obtenues, correspondant à la moitié d'un cycle moteur ( $360^\circ$ ) sont représentés figure 2. Ces images sont codées sur huit niveaux de gris représentés par des caractères alphanumériques, en échelle logarithmique. La dynamique choisie est de 25 dB. Elle permet de visualiser la signature temps-fréquence de tous les événements du cycle.

## 4) Détection des défauts

Les signaux mis à notre disposition provenaient de 10 moteurs déclarés sans défauts et de 5 moteurs comportant des défauts de réglage.

Pour un capteur donné, on constate qu'il existe des différences notables entre les images temps-fréquence des moteurs déclarés sans défaut. Ces différences s'observent surtout, pour un motif donné, dans le domaine fréquentiel.

On est donc conduit à construire une image temps-fréquence de référence, représentative des moteurs sains.

Pour cela, on prend la valeur moyenne des représentations temps-fréquence des moteurs sains, et ceci pour chacun des capteurs :

$$\mu(t, v) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \rho_{Si}(t, v)$$

Dans un premier temps, nous nous sommes limités à effectuer cette moyenne sur 4 moteurs (N=4), représentatifs de l'ensemble. En comparant cette image référence (figure 2a) à l'image temps-fréquence d'un moteur à tester (figure 2b), on détecte plusieurs changements de signature, soit des décalages temporels (exprimés ici en °) soit des changements de fréquence à l'intérieur d'un motif :

- avance de l'ordre de 15° du motif situé à 36° ;
- retard de l'ordre de 20° du motif situé à 270° ;
- avance de 5° et signature plus basse fréquence du motif se situant à 110°.

**5) Ebauche d'un procédé automatique de détection**

Dans un premier temps, par souci de simplicité, le procédé envisagé a été basé sur les images codées C(t, v). Il compare l'écart δ(t, v) entre l'image référence et l'image temps-fréquence du moteur à tester à un seuil, ceci en tout point du plan temps-fréquence. Le seuil choisi est une image notée ε(t, v), représentative de la dispersion des moteurs déclarés sans défauts autour de l'image référence. Ces deux images sont définies de la façon suivante :

$$\delta(t, v) = |C_{\mu}(t, v) - C_{\rho_D}(t, v)|$$

avec ρ<sub>D</sub> représentation temps-fréquence du moteur à tester, et :

$$\varepsilon(t, v) = \text{Max}_{i=1, N} |C_{\mu}(t, v) - C_{\rho_{Si}}(t, v)|$$

avec ρ<sub>Si</sub> représentation temps-fréquence des moteurs sains constituant la référence.

Si δ(t, v) ≤ ε(t, v) on associe 0 au point considéré, si δ(t, v) ≥ ε(t, v) on associe à ce point la valeur codée δ-ε.

Deux exemples de l'image résultante sont donnés figure 3, pour l'étude d'une zone dans le plan temps-fréquence se situant entre 0 et 100°.

La figure 3a) correspond à un moteur présentant un défaut dans la zone considérée, la figure 3b) à un moteur sans défaut dans cette zone.

On peut ensuite réaliser un histogramme des niveaux de gris et prendre une décision sur la présence ou non d'un défaut dans la zone du plan temps-fréquence étudiée.

**6) Conclusion**

Les résultats que nous avons présentés montrent l'intérêt de l'utilisation de la représentation temps-fréquence de Wigner-Ville pour détecter des modifications éventuelles de signatures dans le plan temps-fréquence. Il reste à parfaire le procédé automatique de détection. Ce procédé devrait permettre par apprentissage d'associer une signature temps-fréquence à des défauts non encore répertoriés, se traduisant sur le moteur par une usure à plus long terme.

**Références**

- [1] R. Chambaty, "Signature vibratoire et diagnostic des défaillances des moteurs diesel équipant les véhicules industriels", Mémoire d'ingénieur CNAM réalisé pour RVI, 1986.
- [2] T.A.C.M. Claasen, W.F.G. Mecklenbrauker, "The Wigner Distribution. A tool for Time-Frequency Signal Analysis", Philips J. Res., 35 (3), pp. 217-250, 1980.
- [3] P. Flandrin, B. Escudié, "Principe et Mise en Oeuvre de l'Analyse Temps-Fréquence par Transformation de Wigner-Ville", Traitement du Signal, 2 (2), pp. 143-151, 1985.
- [4] P. Flandrin, "Détection Optimale dans le Plan Temps-Fréquence", 11ème Coll. GRETSI, Nice, 1987.
- [5] C. Morel, "Utilisation de la représentation de Wigner-Ville comme outil de diagnostic des défauts des moteurs thermiques", TFE ICPI, 1986.

**Remerciements**

Les auteurs remercient la société R.V.I. pour leur avoir confié cette étude. Ils remercient également Monsieur Cyril Morel pour qui cette étude a fait l'objet de son travail de fin d'année à l'ICPI [5].

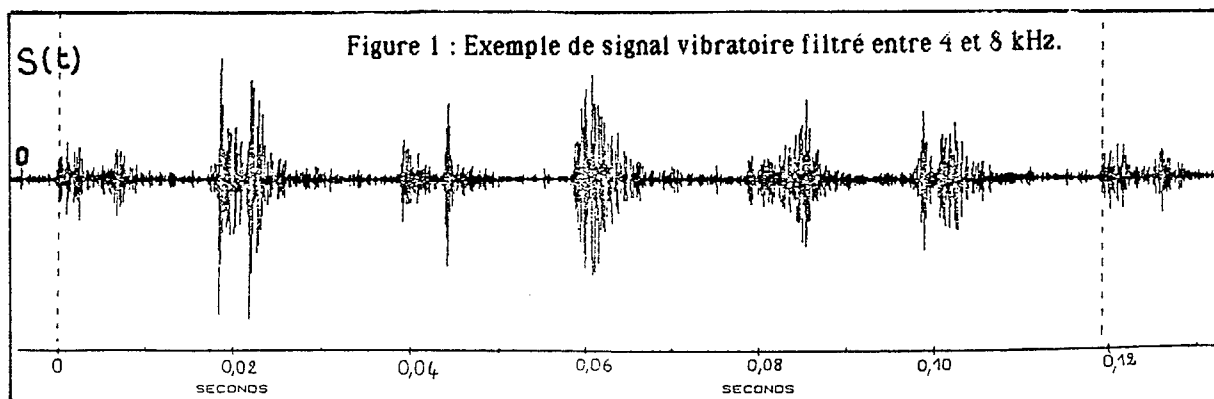


Figure 1 : Exemple de signal vibratoire filtré entre 4 et 8 kHz.

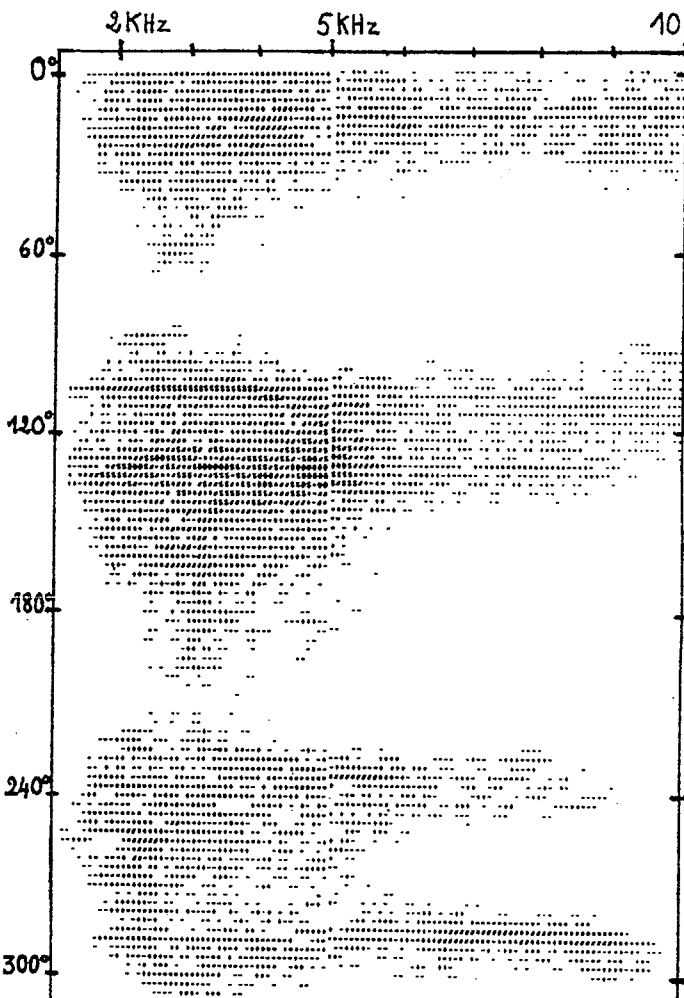


Figure 2b : Image temps-fréquence d'un moteur à tester (moteur 1D).

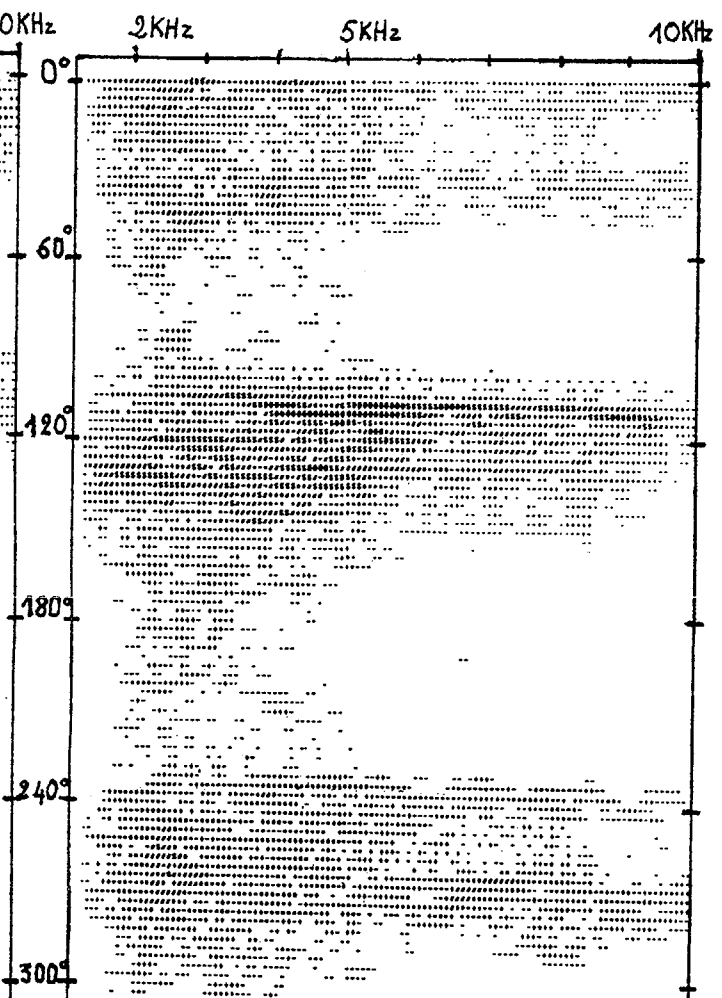


Figure 2a : Image temps-fréquence de référence.

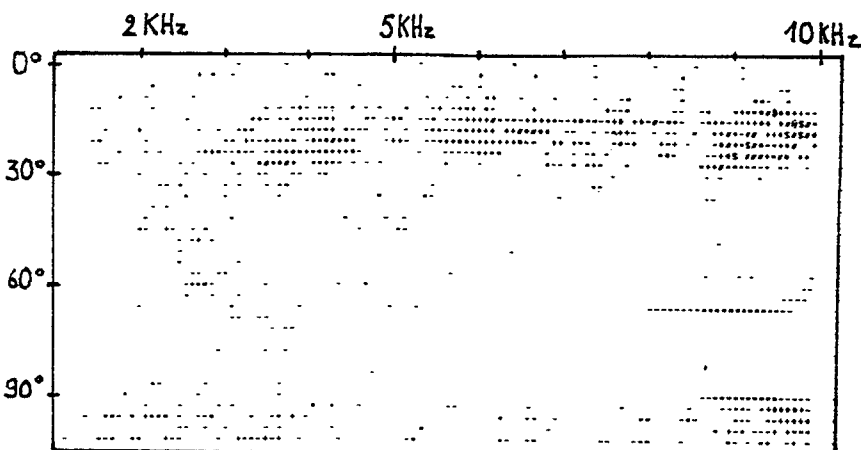
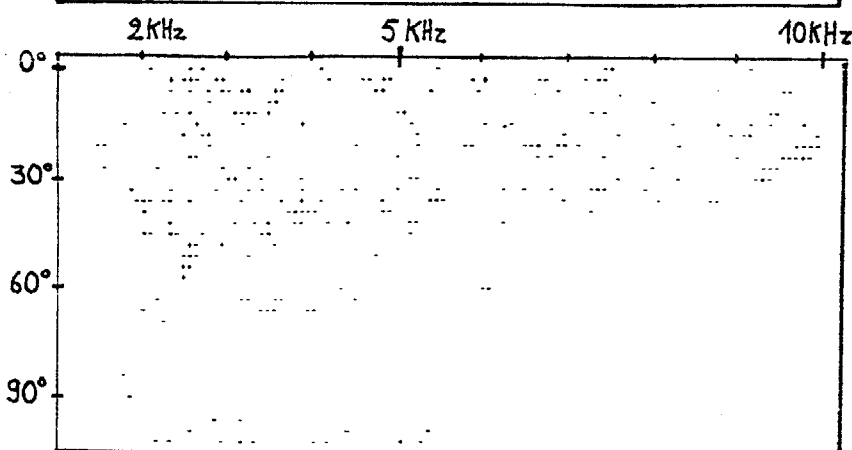


Figure 3 :

Image  $\delta(t, v) - \epsilon(t, v)$  après seuillage.

a. moteur 1D.



b. moteur 2D sans défaut dans la zone étudiée.