

Application de la distribution de pseudo Wigner-Ville lissée réallouée à la détection de cliquetis

Application of the Reallocated Smoothed Pseudo Wigner-Ville Distribution to Knock Detection

par Olivier BOUBAL et Jacques OKSMAN

SUPÉLEC, Service des Mesures
Plateau de Moulon, 91190 GIF-SUR-YVETTE
<Prenom.Nom>@supelec.fr

résumé et mots clés

Estimer l'énergie du cliquetis a toujours été un enjeu important pour les constructeurs automobile. Le renforcement des normes antipollution contraint à détecter l'apparition du cliquetis de plus en plus tôt afin de se placer dans des conditions optimales de fonctionnement du moteur. Les effets du cliquetis sont directement visibles sur le signal de pression issu de la chambre de combustion à travers les oscillations caractéristiques des fréquences propres de la cavité. C'est pourquoi ce signal sert généralement de référence à l'estimation de l'énergie du cliquetis. L'utilisation de techniques temps-fréquence et de traitements d'image a permis d'améliorer grandement l'estimation et la détection du cliquetis. Cependant les images sont parfois peu lisibles et les traitements nécessaires à l'extraction de l'information pertinente sont souvent complexes. Nous proposons ici d'utiliser une méthode de réallocation de la distribution de Wigner-Ville associée à une technique d'étiquetage. La mise en œuvre d'un tel procédé est simple et il a été appliqué à des données issues d'essais réalisés sur différents moteurs. Les résultats obtenus sont comparés à ceux des méthodes existantes. Ils montrent une amélioration de l'estimation de l'intensité du cliquetis et une meilleure réjection des phénomènes de combustions bruyantes.

Distributions temps-fréquence, réallocation, détection de cliquetis.

abstract and key words

Knock energy estimation has always been essential for car manufacturers. Because of recent anti-pollution norms reinforcement, knock must be detected as soon as possible in order to reach optimal operating points for the engine. Knock effects are directly visible on the pressure signal extracted from the combustion chamber through the oscillations characterizing the cavity resonance frequencies. That is the reason why this signal is usually used as a reference for knock intensity estimation. The use of time-frequency distributions along with image processing has led to a great improvement in knock detection. However, knock images are sometimes poorly readable and difficulties arise in the extraction of relevant information. In this paper, a method using the reallocated smoothed pseudo Wigner-Ville distribution associated to a labeling technique is proposed. The resulting process is easy to implement. It is applied to actual measurements recorded on two different spark ignition engines. Compared to those of existing techniques, the present results show a better knock intensity estimation. An improvement in the separation of knock from noisy combustions is also observed.

Time-frequency distributions, reallocation, knock detection.

1. introduction

Le soucis actuel du contrôle de la pollution atmosphérique des véhicules et les crises successives du pétrole ont poussé les constructeurs à améliorer les performances du moteur automobile. Pour cela, ils ont augmenté le taux de compression, le remplissage des cylindres et l'avance à l'allumage [1]. Les carburants ont été modifiés afin de réduire leur indice d'octane et leur teneur en plomb. Ces modifications favorisent l'apparition d'un phénomène appelé cliquetis dans certaines conditions de fonctionnement. Outre l'aspect désagréable pour les passagers de ses effets sonores, il augmente la consommation du véhicule et peut endommager gravement certains organes mécaniques de la chambre de combustion [2].

Il est maintenant généralement admis que le cliquetis se manifeste par l'apparition d'autoinflammations dans les gaz frais en fin de combustion [3]. Ces autoinflammations provoquent une montée rapide de la pression qui peut dans certains cas dégénérer en onde de choc, déclenchant alors des ondes stationnaires accordées sur les fréquences de résonance de la chambre [4].

Afin d'éviter d'atteindre des points de fonctionnement du moteur entraînant l'apparition de ce phénomène, il existe des techniques d'asservissement de l'allumage composées d'un système de détection et d'une stratégie de correction de l'avance à l'allumage. Cette stratégie de correction repose sur des cartographies d'avances établies lors de calibrations moteur spécifiques au cliquetis. Il est indispensable que la détection de cliquetis, et par là son estimation, soient les plus fiables possibles lors de ces calibrations.

La pression chambre constitue, à l'heure actuelle, le moyen le plus sûr pour accéder à l'information cliquetis. Les traitements mis en œuvre pour estimer l'intensité du cliquetis à partir de

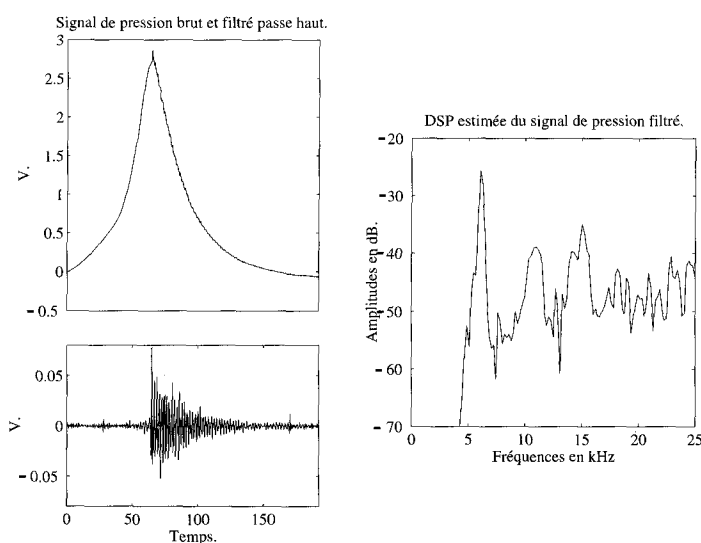


Figure 1. – Pression chambre comportant un fort cliquetis – Signal brut, signal filtré et estimation de sa densité spectrale de puissance.

cette grandeur sont nombreux. Les méthodes temporelles prônent l'utilisation des maximums des dérivées premières ou troisièmes du signal de pression brut [5], alors que des méthodes fréquentielles utilisent l'énergie présente dans certaines bandes de fréquences situées généralement au-delà de 5 kHz [6].

Cependant, la non-stationnarité du signal et la présence de bruits parasites tels que les mouvements de soupapes [7] ont conduit à l'utilisation de nombreuses techniques temps-fréquence [8, 9]. Nous proposons ici l'application d'une technique récemment redécouverte, la réallocation, à la détection du cliquetis. Cette technique permet de simplifier le traitement d'image suivant la transformation temps-fréquence d'un signal de cliquetis. L'estimation de l'énergie du cliquetis est alors plus fiable et le choix du seuil de détection plus simple que pour des méthodes existantes.

2. méthodes classiques d'obtention du cliquetis à l'aide de transformations temps-fréquence non paramétriques

2.1. estimation de l'énergie du cliquetis

Le cliquetis, ou plus exactement les effets de l'onde de choc du cliquetis dans la chambre de combustion, se manifeste sur le signal de pression par une augmentation rapide de la pression, suivie par des oscillations très nettes sur des signaux de pression comportant un cliquetis fort. Ce sont ces oscillations qui sont caractéristiques de la présence et de l'intensité du cliquetis. Elles sont le reflet de la géométrie de la chambre et se situent au-delà de 5 kHz pour des moteurs classiques [10]. Le signal de pression, une fois acquis, est généralement filtré passe-haut pour ne conserver que la partie du signal associée aux résonances de la cavité (figure 1). Il est clair, à ce stade de l'étude du signal, qu'un calcul de l'énergie présente dans des bandes représentatives des résonances et de leurs harmoniques, pourrait suffire pour estimer l'énergie du cliquetis.

Si cette méthode paraît attrayante pour distinguer un cycle fortement cliqueté d'un cycle non cliqueté, elle devient inopérante en présence de cliquetis naissant. Il est en effet impossible de faire la différence, à l'œil nu, sur le signal brut ou sur le signal filtré entre un cycle cliqueté faiblement et un cycle non cliqueté (figure 2). En effet, à partir d'un certain seuil énergétique du cliquetis, le signal caractéristique de celui-ci est noyé dans le bruit et la détection devient alors impossible. De plus, la présence, sur certains

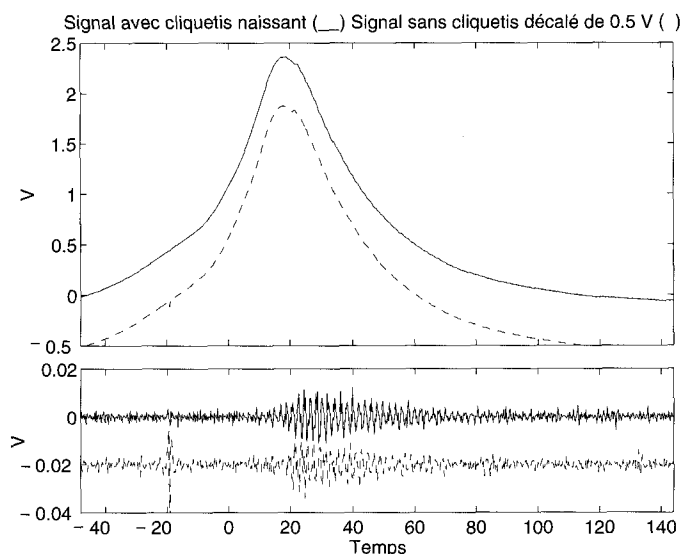


Figure 2. – Difficulté de distinguer visuellement ou énergétiquement un cycle cliqueté faiblement d'un cycle non cliqueté.

moteurs, de chocs mécaniques parasites ne permettent plus d'utiliser des filtrages simples, même pour une estimation en ligne. C'est pourquoi, de nombreux travaux font état de l'application de techniques temps-fréquence à l'estimation du signal de cliquetis.

Ces techniques transforment un signal unidimensionnel $x_R(t)$ en une représentation bidimensionnelle fonction du temps et de la fréquence notée RTF(t, ω). Parmi les différentes représentations possibles, le spectrogramme est celle qui fut utilisée le plus tôt et qui reste, encore aujourd'hui, l'une des plus utilisées. Cependant, le spectrogramme présente l'inconvénient d'être un estimateur biaisé de la fréquence instantanée et il rend inévitable un compromis entre résolution fréquentielle et temporelle (inégalité de Gabor-Heisenberg). Afin de pallier ces inconvénients, de nombreuses distributions temps-fréquence bilinéaires ont vu le jour (Wigner-Ville, Margenau-Hill, Choi-Williams) ainsi que leurs versions lissées toutes développées en vue de réduire les termes d'interférences. L'application de ces distributions au signal de pression chambre pour l'estimation de l'énergie du cliquetis montre que la transformée de pseudo Wigner-Ville lissée est la mieux adaptée [11].

La transformée de pseudo Wigner-Ville lissée [12] est une variante de la transformée de Wigner-Ville classique. Elle utilise les propriétés du signal analytique $x(t)$ associé au signal réel $x_R(t)$ et de deux fenêtres dites de lissage $\mathcal{F}(\omega)$ et $g(t)$, la première opérant un lissage fréquentiel et la seconde agissant temporellement. Ainsi, la transformée de Wigner-Ville lissée (SPWVD) s'écrit :

$$\tilde{W}(t, \omega) = \int g(u) du \int \mathcal{F}(\Omega) W(t - u, \omega - \Omega) \frac{d\Omega}{2\pi} \quad (1)$$

$$W(t, \omega) = \int x(t + \frac{\tau}{2}) x^*(t - \frac{\tau}{2}) e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (2)$$

$x^*(t)$ étant le signal complexe conjugué de $x(t)$. En injectant (2) dans (1), il vient finalement :

$$\tilde{W}(t, \omega) = \int g(u) du \int x(t - u + \frac{\tau}{2}) x^*(t - u - \frac{\tau}{2}) f(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (3)$$

où $f(t)$ est la transformée de Fourier inverse de $\mathcal{F}(\omega)$. Les bornes d'intégration n'ont pas été mentionnées dans les équations précédentes puisqu'elles dépendent des signaux considérés. De manière générale, l'intégration se fera sur \mathbb{R} .

Minimiser les termes d'interférences conduit à choisir des fenêtres de lissage qui dépendent du type de signal analysé. Le signal de pression comportant des résonances très marquées, le rectangle de lissage temps-fréquence devra englober des échantillons peu nombreux sur l'axe fréquentiel (fenêtre \mathcal{F} courte) et nombreux sur l'axe temporel (fenêtre g étalée) afin d'estimer au mieux ces résonances. La transformée de Fourier inverse de \mathcal{F} sera donc, elle aussi, étalée en temps.

La représentation temps-fréquence d'un signal cliqueté (figure 3) montre, à la fois le caractère non-stationnaire du signal, ainsi que les dépendances très nettes des résonances avec le temps.

En effet, la valeur de ces fréquences varie avec la géométrie de la chambre qui se modifie en fonction de la position du piston. Ainsi, si l'on veut extraire toute l'énergie du cliquetis, il faudra utiliser des filtres passe-bandes relativement larges autour de chaque fréquence de résonance. Ceci se fera au détriment du rapport signal sur bruit. En reprenant le signal de la figure 3, on voit très bien que pour conserver toute l'énergie contenue dans la seconde résonance, il faudra filtrer entre 10 et 13 kHz et retenir ainsi à la fois l'énergie du motif et celle du bruit résiduel présent dans cette bande.

Afin d'extraire l'énergie initiale de l'onde de choc réellement dispersée dans les résonances, deux techniques peuvent être envisagées. Notons qu'elles sont souvent complétées par l'utilisation d'un masque binaire éliminant les chocs parasites et les in-

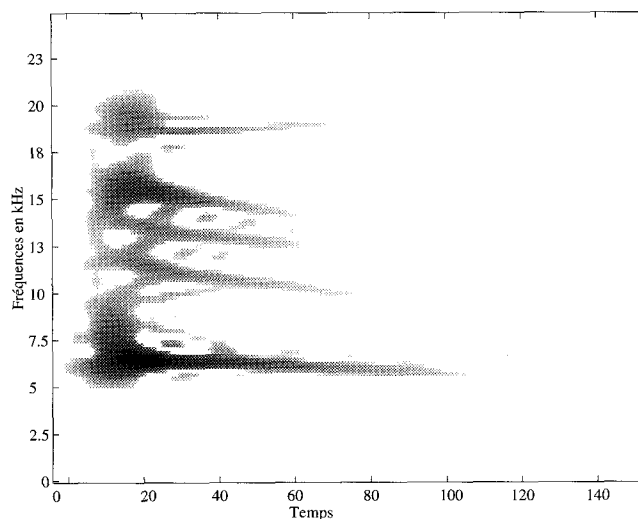


Figure 3. – Représentation temps-fréquence d'un signal cliqueté.

terférences restantes. La première est fondée sur une transformation non linéaire des instants d'échantillonnage qui permet de s'affranchir de la dépendance temporelle des fréquences de résonances [13]. Masquer les zones du plan temps-fréquence ne correspondant pas au cliquetis est alors aisé. Cette transformation nécessite l'estimation des fréquences initiales de résonance et l'identification des paramètres liés au modèle non linéaire ainsi qu'un sur-échantillonnage important du signal de pression. La seconde technique utilise quant à elle, des traitements d'image spécifiques conduisant à une extraction des contours des motifs temps-fréquence principaux [14]. Le masquage est alors d'autant plus délicat que les distributions lissées ont tendance à élargir nettement les motifs dans le plan temps-fréquence.

Pour traiter un cycle moteur, il faut donc choisir des fenêtres de lissage, calculer la transformée temps-fréquence du signal, modifier la dépendance temporelle des résonances après avoir calculé la transformation non-linéaire des instants d'échantillonnage si nécessaire, définir un masque en fonction du moteur et du point de fonctionnement, extraire les contours et finalement calculer l'énergie restante. Ces méthodes sont complexes et nécessitent l'intervention d'un expert pour définir un certain nombre de paramètres. Elles utilisent, de plus, une distribution temps-fréquence qui engendre des interférences et élargit les motifs bidimensionnels du signal suivant les fenêtres choisies.

2.2. détection

Une fois estimée l'énergie du cliquetis, et ce, quelle que soit la méthode utilisée, il est nécessaire d'établir un critère de décision cliqueté-non cliqueté. De manière générale, il s'agit en fait de choisir un seuil. Tous les cycles dont l'énergie estimée dépassera le seuil choisi seront considérés comme cliquetés.

La figure 4 représente les valeurs d'énergie estimées par un procédé classique qui conserve l'énergie du signal de pression en hautes fréquences. Afin de faire varier le cliquetis, on a fait varier par paliers l'avance à l'allumage, en fonction des numéros de cycles. Le moteur n'a donc pas toujours le même point de fonctionnement. Pour chacune de ces avances, il s'agit alors de décider si un cycle est cliqueté ou non. Les deux hypothèses sont les suivantes :

$$\begin{cases} H_0 & \text{cycle non cliqueté} & \varphi(H_0) = p \\ H_1 & \text{cycle cliqueté} & \varphi(H_1) = 1 - p \end{cases}$$

Supposons que l'énergie estimée du cliquetis \hat{e} suit une loi de mélange du type :

$$\varphi(\hat{e}) = \frac{p}{\mu} e^{-\hat{e}/\mu} + \frac{1-p}{\nu} e^{-\hat{e}/\nu} \quad (4)$$

ce qui est justifié par l'observation des densités de probabilités estimées sur une réalisation.

On peut alors extraire pour chacune de ces avances, les trois paramètres p , μ et ν en maximisant la vraisemblance Λ des

énergies estimées considérées comme indépendantes :

$$\Lambda(\hat{e}) = \prod_{i=1}^N \varphi(\hat{e}_i) \quad (5)$$

où \hat{e}_i représente l'énergie estimée pour le cycle i et N le nombre total de cycles.

On constate sur la figure 5 que jusqu'à l'avance 31° incluse, l'hypothèse de mélange de lois n'est pas valable. Jusqu'à cette avance le cliquetis n'est donc pas détectable (ou pas présent). Connaissant les paramètres des lois de mélanges, on peut alors calculer pour les avances supérieures un seuil de décision sur l'énergie estimée.

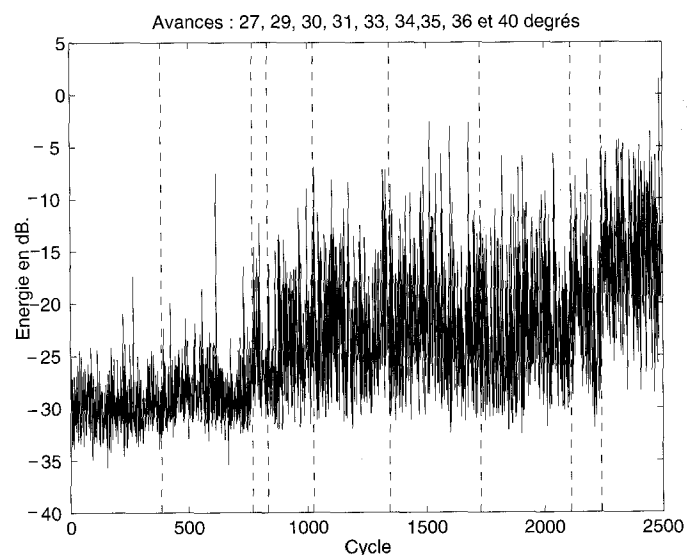


Figure 4. – Energie estimée du cliquetis – chaque tranche représente une avance à l'allumage différente.

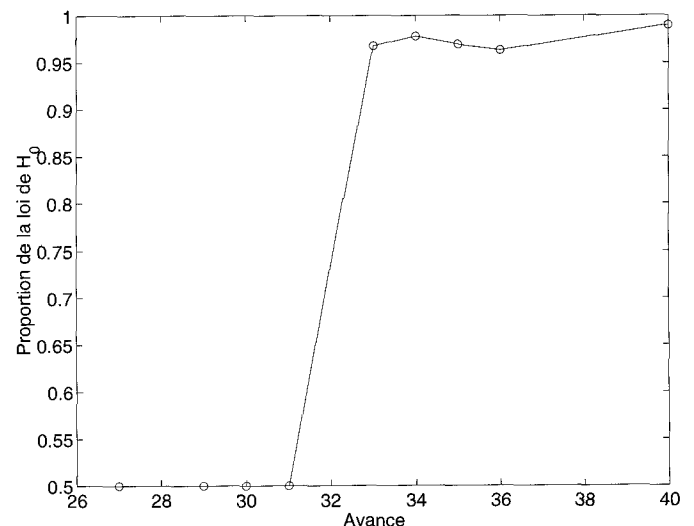


Figure 5. – Proportion estimée des cycles suivant la loi de l'hypothèse H_0 .

Il est important de minimiser le nombre de cycles cliquetés non détectés. Le seuil de détection est alors choisi par un test de type Neyman-Pearson où le taux de non détection $\beta'_0 = 1 - \beta_0$ est fixé. On obtient alors le test suivant :

$$\hat{e} \underset{H_1}{\overset{H_0}{\geq}} - \nu \ln(1 - \beta'_0) \quad (6)$$

Le taux de fausse alarme est donné par :

$$\alpha(\beta'_0) = (1 - \beta'_0)^{\frac{\nu}{\mu}} \quad (7)$$

Le calcul de α pour un β'_0 fixé peut servir d'indicateur de comparaison entre plusieurs procédés d'estimation de l'énergie du cliquetis.

Toutefois, il faut donner un seuil unique de décision quelles que soient les avances. Ce seuil unique, quel qu'il soit, ne sera pas optimal au sens du détecteur choisi, puisque l'énergie moyenne du bruit de combustion et du cliquetis changent en fonction de l'avance à l'allumage. On pourrait choisir pour seuil global, le seuil correspondant à la première avance à l'allumage contenant du cliquetis détectable. Cette valeur, ici -12 dB, est assez proche de celle correspondant à un cliquetis « audible » pour un opérateur humain, c'est-à-dire -15 dB.

Ainsi, il faut obtenir pour l'estimation de l'énergie un procédé qui permette une bonne séparation entre cycles cliquetés et cycles non cliquetés. Ceci nécessite une réjection importante du bruit de fond et la conservation de toute l'énergie du cliquetis contenue dans les fréquences de résonance. Ainsi, plus un procédé d'estimation conservera les motifs temps-fréquence intacts tout en éliminant le bruit pour des cycles non cliquetés, plus la détection sera aisée et robuste.

Nous proposons donc de mettre en place une méthode capable de pallier les inconvénients des méthodes temps-fréquence classiquement utilisées pour estimer l'énergie du cliquetis, tout en garantissant un choix du seuil plus aisé.

3. réallocation des représentations temps-fréquence de signaux cliquetés

3.1. la transformée de pseudo Wigner-Ville lissée réallouée (MSPWVD)

Définition

Comme nous l'avons vu, le lissage tend à réduire les termes interférentiels alors que les motifs propres sont, eux, étalés. Il

faudrait alors agir sur ces motifs propres afin d'améliorer la lisibilité de l'image. Cette idée vieille d'un peu plus de vingt ans [15], est à la base de la réallocation. Il s'agit en fait de reconcentrer les termes étalés par le lissage en déplaçant les valeurs calculées vers le centre de gravité local des cellules de lissage (figure 6). Il faut donc extraire, dans un premier temps, les coordonnées $\hat{t}(x; t, \omega)$ et $\hat{\omega}(x; t, \omega)$ du centre de gravité de la cellule placée en (t, ω) , puis ajouter la contribution de cette cellule, non pas en (t, ω) , mais en $(\hat{t}, \hat{\omega})$. Les valeurs de \hat{t} et $\hat{\omega}$ sont données par [16] :

$$\hat{t}(x; t, \omega) = t - \frac{\int u g(u) du \int x(t + \frac{\tau}{2}) x^*(t - \frac{\tau}{2}) f(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau}{\tilde{W}(t, \omega)} \quad (8)$$

$$\hat{\omega}(t, \omega) = \omega + j \frac{\int g(u) du \int x(t + \frac{\tau}{2}) x^*(t - \frac{\tau}{2}) \frac{df(\tau)}{d\tau} e^{-j\omega\tau} d\tau}{\tilde{W}(t, \omega)} \quad (9)$$

Il vient alors simplement :

$$\tilde{W}_R(t', \omega') = \iint \delta(t' - \hat{t}(t, \omega)) \delta(\omega' - \hat{\omega}(t, \omega)) \tilde{W}(t, \omega) dt \frac{d\omega}{2\pi} \quad (10)$$

Remarquons que le calcul de la transformée réallouée nécessite le calcul de trois transformées de pseudo Wigner-Ville lissées.

Propriétés

Le but étant avant tout d'estimer l'énergie contenue dans les motifs temps-fréquence du signal, réallouer la représentation de pseudo Wigner-Ville lissée doit donc se faire à énergie constante. Il est alors possible de montrer à cet effet que :

$$\iint \tilde{W}_R(t', \omega') dt' \frac{d\omega'}{2\pi} = \int |x(t)|^2 dt \quad (11)$$

si $\int \int \mathcal{F}(\Omega) g(u) du \frac{d\Omega}{2\pi} = 1$. Ainsi, toute l'énergie du signal sera reconcentrée dans les motifs correspondants aux fréquences de résonance et un masquage éventuel n'éliminera plus que des parasites gênants.

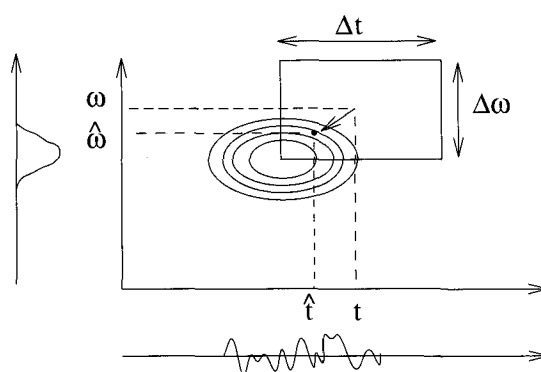


Figure 6. – Schéma de principe de la réallocation.

Toutefois, afin de réaliser des filtres bidimensionnels s'affranchissant au maximum de l'énergie présente entre chaque motif représentatif du cliquetis, la réallocation permet de conserver les pulsations instantanées. En effet, si $x(t) = |x(t)|e^{j\phi(t)}$, alors la pulsation instantanée s'écrit $\omega_i(t) = \frac{d\phi(t)}{dt}$. Or, comme

$$\int \tilde{W}_R(t', \omega') \frac{d\omega'}{2\pi} = \int \tilde{W}(t', \omega) \frac{d\omega}{2\pi} = |x(t')|^2 \quad (12)$$

alors

$$\int \omega' \cdot \tilde{W}_R(t', \omega') \frac{d\omega'}{2\pi} = \int \hat{\omega} \tilde{W}(t', \omega) \frac{d\omega}{2\pi} = \omega_i(t') |x(t')|^2 \quad (13)$$

puisque d'après (9)

$$\int (\omega - \hat{\omega}(t, \omega)) \tilde{W}(t, \omega) \frac{d\omega}{2\pi} = |x(t)|^2 \int \Omega \mathcal{F}(\Omega) \frac{d\Omega}{2\pi} = 0 \quad (14)$$

pour \mathcal{F} paire. Cette seconde propriété assurera l'invariance de la représentation des fréquences de résonance pour cette nouvelle transformation.

Exemple

L'utilisation d'une telle représentation permet de reconcentrer nettement les motifs et ce indépendamment des fenêtres de lissage utilisées [17,18]. Il est important de souligner ce dernier aspect. En effet, dans le cas de signaux réels, les motifs temps-fréquence sont souvent variés et il est difficile, voire impossible, de trouver des fenêtres optimales permettant d'isoler, à la fois des fréquences pures et des impulsions. Le signal synthétique représenté sur la figure 7 est composé d'une fréquence pure à $\nu = 0.1$ et d'un motif à fréquence linéairement décroissante

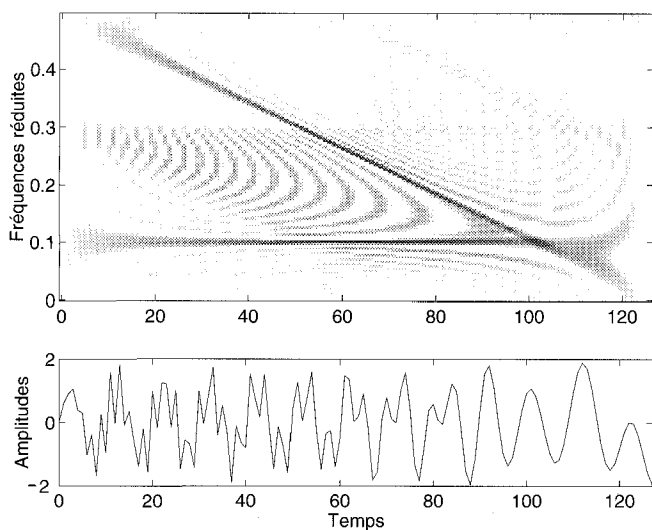


Figure 7. – Signal synthétique comportant une fréquence pure et un signal à fréquence linéairement décroissante – Représentation de sa transformée de Wigner-Ville.

$\nu(t) = 0.5 - \alpha t$. Sa représentation de Wigner-Ville montre des interférences très marquées alors que sa version lissée (figure 8) met en avant l'élargissement des motifs. Les fenêtres ont été choisies afin d'obtenir une image de la fréquence pure la plus nette possible, rendant ainsi le second motif très peu visible. Un calcul, sur ce signal, de la version réallouée de la distribution temps-fréquence avec les mêmes fenêtres de lissage rend lisible les deux composantes fréquentielles tout en ne conservant que peu d'interférences.

3.2. procédé d'estimation de l'énergie du cliquetis

Les propriétés de la MSPWVD peuvent être utilisées afin d'améliorer l'estimation du signal de cliquetis. En appliquant

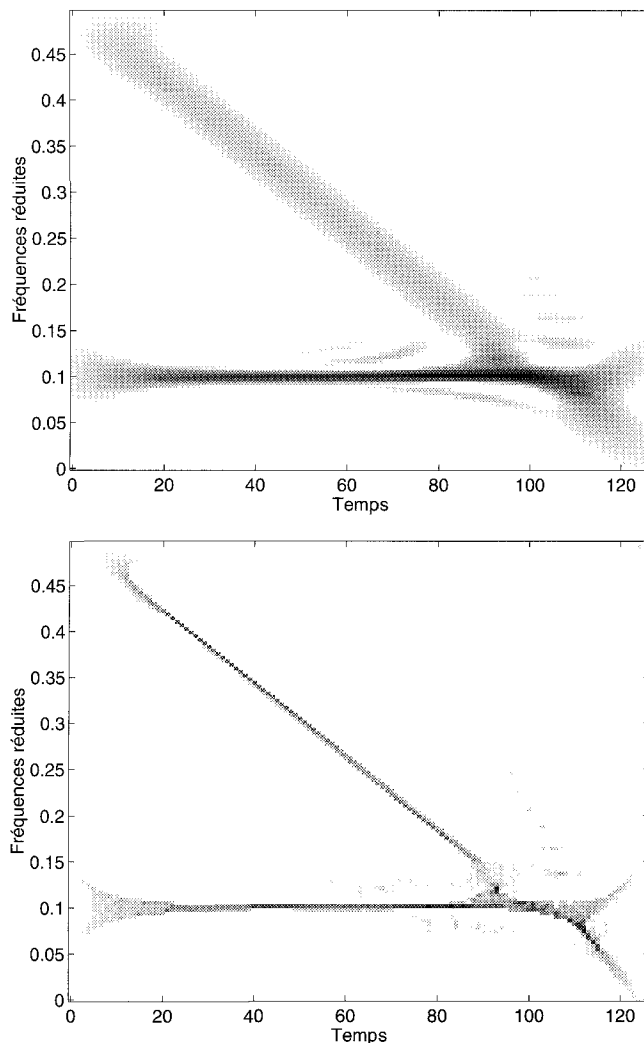


Figure 8. – SPWVD et MSPWVD du signal synthétique – Fenêtres de lissage de tailles identiques.

cette transformation au signal de pression représenté dans la section 2 (figure 3), on observe une concentration des motifs liés aux fréquences de résonance et une diminution des interférences.

Il est d'ores et déjà possible d'éviter, grâce à cette représentation, de masquer les zones interférentielles. Toutefois, si des événements mécaniques parasites perturbent le signal, il devient plus simple de les éliminer étant donnée la clarté des motifs liés à la présence de cliquetis.

L'étape suivante consistait jusqu'à présent à calculer l'énergie concentrée dans les motifs résiduels en utilisant des traitements d'images parfois complexes. L'utilisation de la MSPWVD permet d'éviter ces traitements, accélérant ainsi le temps de traitement par cycle dans un objectif temps-réel.

Pour extraire l'énergie des motifs propres, une simple procédure d'étiquetage peut être mise en œuvre sur une image binarisée. Cet étiquetage aurait pu être réalisé sur chaque niveau de gris de l'image initiale. Pour notre application, un traitement sur une image binaire suffit.

Ce procédé consiste à distinguer les différents amas de points par un double balayage de l'image. Des pixels appartiennent à un même amas s'ils sont dans un même voisinage. Le voisinage choisi est celui correspondant aux huit plus proches voisins d'un pixel. Chaque pixel se voit alors attribuer un numéro correspondant à l'amas auquel il appartient. Il suffit une fois cette opération réalisée de ne conserver que les amas comportant le plus grand nombre de pixels. On associe à chaque amas, une aire équivalente au nombre de pixels composant cet amas.

Avant d'être étiquetée, l'image doit donc être binarisée. Pour cela, l'image initiale est tout d'abord normalisée de telle sorte que son énergie devienne unitaire. Puis, elle est exprimée en décibels. La nouvelle représentation peut donc s'écrire :

$$\tilde{W}_{RL}(t, \omega) = 10 * \log \left(\frac{\tilde{W}_R(t, \omega)}{\iint \tilde{W}_R(t, \omega) dt \frac{d\omega}{2\pi}} \right) \quad (15)$$

Cette procédure permet alors de choisir un seuil de binarisation constant quelle que soit l'énergie du cycle considéré. Le seuil utilisé s'écrit :

$$S = \max_{t, \omega} (\tilde{W}_{RL}(t, \omega)) - s_B \quad (16)$$

où s_B constitue la plage d'amplitudes en dB considérée comme porteuse d'information. Ce seuil est choisi de manière empirique pour tous les cycles d'une même expérience. Ainsi, sur l'image présentée précédemment, une fois normalisée, binarisée et étiquetée, les quatre amas d'aire la plus importante, représentent (figure 10) les contours des motifs propres qu'il faut conserver pour extraire une information quantitative sur l'énergie du cliquetis.

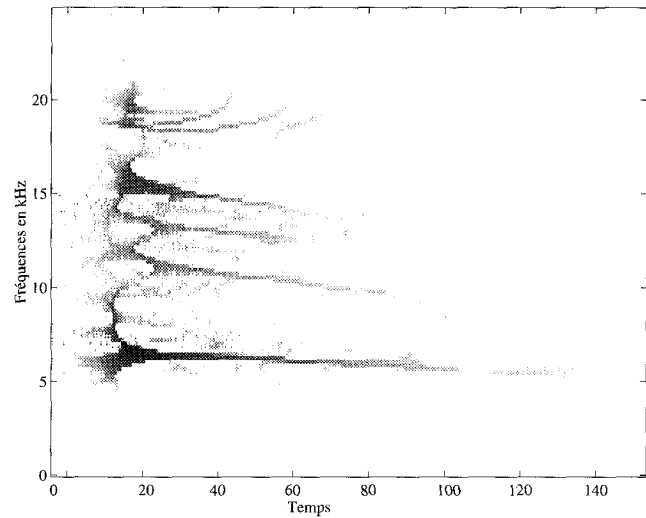


Figure 9. – MSPWVD d'un signal cliqueté.

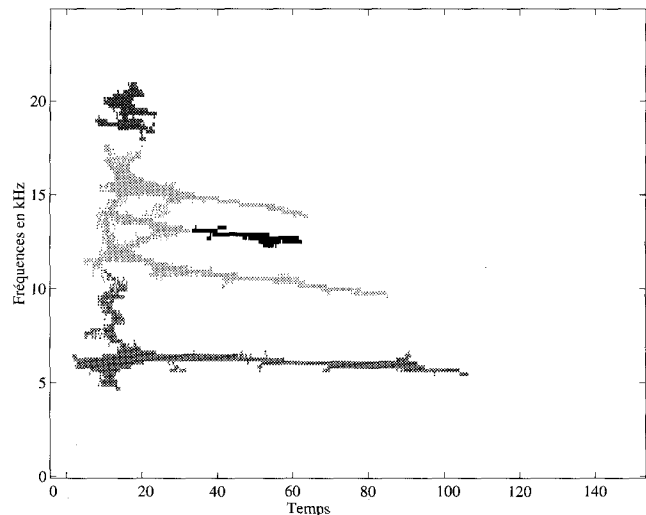


Figure 10. – Représentation des quatre plus gros amas extraits par étiquetage de la MSPWVD d'un signal de pression cliqueté.

4. résultats expérimentaux

Des essais sur banc moteur ont été entrepris afin de valider les résultats établis sur quelques cycles bien marqués. Deux campagnes distinctes ont permis d'enregistrer des signaux de pression chambre sur un moteur monocylindre fonctionnant à 2000 tr.min^{-1} et un moteur multicylindre fonctionnant à 2000 tr.min^{-1} et à 4500 tr.min^{-1} .

Pour chacun des cycles acquis, divers traitements sont mis en œuvre. Deux méthodes énergétiques simples permettent d'avoir

une idée rapide des valeurs d'énergie du cliquetis. La première, notée E_{PH} (énergie passe-haut), consiste à prendre l'énergie du signal de pression située au delà d'une certaine fréquence pour une fenêtre temporelle spécifique. La seconde, notée E_{PB} (énergie passe-bande), ne prend en compte qu'une bande centrée autour de la fréquence de résonance de la chambre de combustion.

Un traitement temps-fréquence extrayant les contours des motifs d'une représentation SPWVD a été implanté. L'énergie associée sera notée E_C (énergie contour). De même, le procédé présenté plus haut et comportant le calcul de la MSPWVD et un étiquetage associé a été effectué. L'énergie des quatre plus gros amas est finalement sommée pour donner une valeur notée E_R (énergie réallouée). Chacune des énergies présentées plus haut est calculée pour tous les points de fonctionnement. Il est alors possible de comparer chacun des traitements. Outre la corrélation évidente qui doit apparaître entre eux, il est intéressant d'extraire pour chacun de ces traitements une valeur permettant de les classer en fonction de leurs performances intrinsèques à séparer le bruit de fond du cliquetis. C'est pourquoi, nous définissons ici un pseudo rapport signal sur bruit. C'est le rapport entre la moyenne des n cycles dans lesquels l'énergie estimée du cliquetis est la plus grande pour une avance à l'allumage α , et la moyenne des énergies enregistrées pour une avance β très inférieure à l'avance à cliquetis audible. Notons que ce rapport permet seulement de comparer les traitements entre eux, voire des capteurs entre eux, mais en aucun cas deux enregistrements ou deux moteurs entre eux. Pour notre application, nous prendrons comme définition de ce pseudo rapport signal sur bruit :

$$r_{SN} = \frac{\overline{m}_\alpha^n}{\overline{m}_\beta} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{k=N_\alpha-n+1}^{N_\alpha} E_{X,\alpha}^S(k)}{\frac{1}{N_\beta} \sum_{k=1}^{N_\beta} E_{X,\beta}(k)} \quad (17)$$

où $E_{X,\alpha}^S$ représente le vecteur des énergies de cliquetis classées par ordre d'énergies croissantes pour l'avance à l'allumage α , X remplaçant l'indice PH , C , PB ou R . $E_{X,\beta}$ représente le vecteur des énergies de cliquetis pour l'avance à l'allumage β , N_α et N_β , le nombre de cycles pour chacune de ces avances. On choisit n de l'ordre de 1% du nombre total de cycles. Les figures présentant les résultats associés aux différents essais, sont toutes construites sur le même principe. L'énergie associée à l'un des traitements y est représentée en ordonnée en fonction de l'énergie réallouée, en abscisse. Chaque croix représente un cycle moteur. En trait plein figure aussi la fonction identité qui permet de positionner la courbe de corrélation des deux énergies par rapport à une estimation de référence.

Par exemple (figure 11), pour le point de fonctionnement correspondant au moteur multicylindre à $2000 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$, l'énergie contour présente une très bonne corrélation avec l'énergie réallouée alors que l'énergie passe-bande (figure 12) montre une disparité importante avec la référence notamment pour certains cycles fortement cliquetés. Cette observation confirme que

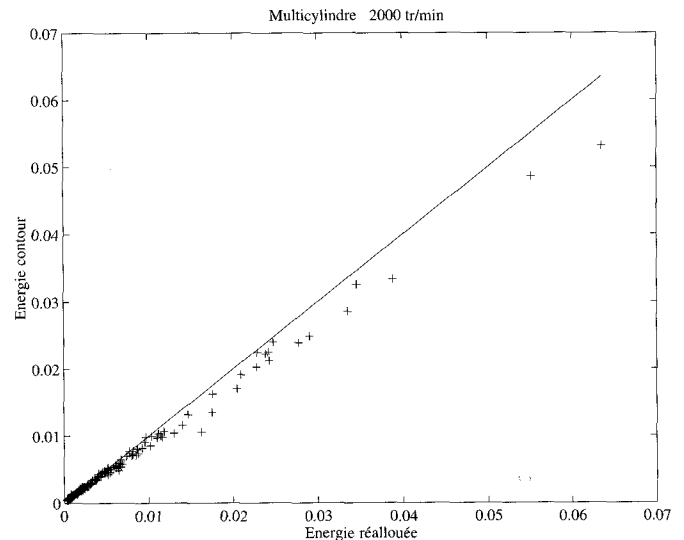


Figure 11. – Comparaison cycle à cycle de l'estimation de l'énergie du cliquetis obtenue par réallocation avec celle obtenue par extraction des contours de l'image temps-fréquence — En trait plein, la fonction identité.

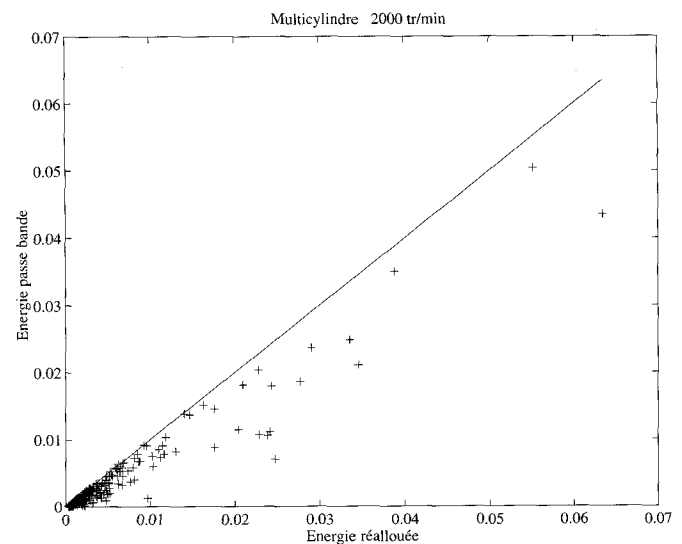


Figure 12. – Comparaison cycle à cycle de l'estimation de l'énergie du cliquetis obtenue par réallocation avec celle obtenue par filtrage passe-bande 5-7 kHz — En trait plein, la fonction identité.

l'utilisation de filtres passe-hauts est préférable à celle d'un filtre passe-bande centré autour de la fréquence fondamentale de résonance de la cavité [19].

Les résultats associés aux autres points d'essais sont relativement similaires. Toutefois, il faut noter que l'énergie contour présente une meilleure corrélation visuelle à l'énergie réallouée que l'énergie passe-haut. Ceci est dû au fait que l'extraction des plus gros contours élimine l'énergie contenue dans les interférences alors que l'utilisation de la MSPWVD permet justement de ramener cette énergie à sa place dans les motifs propres. Ce phénomène est d'autant plus visible que les motifs sont nets et donc que le cliquetis est fort.

De plus, en observant de plus près les courbes de corrélation pour les énergies des cycles non cliquetés, le bruit de fond apparaît plus important pour l'énergie passe-haut que pour l'énergie contour. La figure 13 montre un exemple de bruit de fond important pour l'énergie passe-haut dans le cas du moteur monocylindre.

Les tableaux 1, 2 et 3 présentent quelques résultats numériques associés à ces courbes de corrélation pour tous les points de fonctionnement. Seules les valeurs associées à l'énergie passe-bande n'ont pas été indiquées étant donnée la trop faible corrélation existant entre cette méthode d'estimation et les autres. Pour chaque énergie calculée, nous présentons trois valeurs la caractérisant, soit dans l'absolu, soit par rapport à l'énergie réallouée. Ces critères auraient très bien pu être calculés en prenant comme référence l'énergie contour. L'interprétation des valeurs obtenues aurait été différente mais pas la conclusion.

Le premier indicateur, noté p' , permet de représenter la corrélation entre deux traitements différents. Si p est le coefficient de la meilleure droite au sens des moindres carrés passant par les points des courbes de corrélation, alors $p' = |1 - p|^{-1}$. Ainsi,

Tableau 1. – Multicylindre – 2 000 tr.min⁻¹ – X représente le type d'énergie considéré (Contour, Passe-Haut ou Réallouée) – indicateurs de qualité : p' , \bar{m}_β et $r_{SN}(E_X)/r_{SN}(E_R)$.

X	p'	$\bar{m}_\beta \cdot 10^3$	$\frac{r_{SN}(E_X)}{r_{SN}(E_R)}$
C	7.64	1.10	0.79
PH	55.3	1.20	0.85
R	∞	1.00	1

Tableau 2. – Multicylindre – 4 500 tr.min⁻¹ – X représente le type d'énergie considéré (Contour, Passe-Haut ou Réallouée) – indicateurs de qualité : p' , \bar{m}_β et $r_{SN}(E_X)/r_{SN}(E_R)$.

X	p'	$\bar{m}_\beta \cdot 10^3$	$\frac{r_{SN}(E_X)}{r_{SN}(E_R)}$
C	7.75	2.80	0.91
PH	51.2	3.20	0.92
R	∞	2.7	1

Tableau 3. – Monocylindre – 2 000 tr.min⁻¹ – X représente le type d'énergie considéré (Contour, Passe-Haut ou Réallouée) – indicateurs de qualité : p' , \bar{m}_β et $r_{SN}(E_X)/r_{SN}(E_R)$.

X	p'	$\bar{m}_\beta \cdot 10^3$	$\frac{r_{SN}(E_X)}{r_{SN}(E_R)}$
C	3.44	0.74	0.85
PH	266	1.2	0.74
R	∞	0.6	1

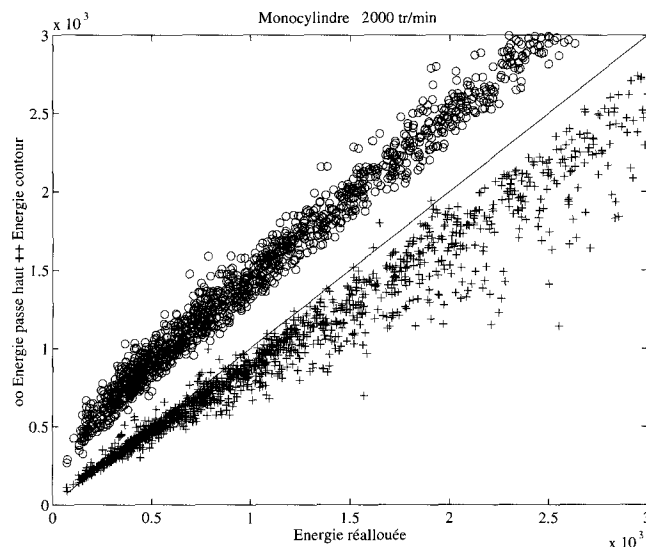


Figure 13. – Observation des courbes de corrélation entre l'estimation de l'énergie du cliquetis obtenue par réallocation et celle obtenue par filtrage passe-haut (o) et par extraction des contours (+) pour des cycles non cliquetés – En trait plein, la fonction identité.

plus p' sera grand, meilleure sera la corrélation. Ce coefficient n'est pas, en soi, un indicateur sur la qualité d'estimation de l'énergie du cliquetis; il permet simplement de positionner à la fois une méthode par rapport aux autres et de rejeter celles qui s'éloigneraient par trop de la fonction identité. Le second critère correspond au bruit de fond moyen \bar{m}_β . Plus cette valeur est faible, plus le procédé a la capacité de mieux rejeter le bruit de fond et donc d'estimer correctement le cliquetis naissant. Le dernier indicateur $r_{SN}(E_X)/r_{SN}(E_R)$ correspond au rapport entre le rapport signal sur bruit associé à l'énergie contour ou l'énergie passe-haut et le rapport signal sur bruit associé à l'énergie réallouée. Cet indicateur permet de positionner une méthode par rapport à une autre.

Les valeurs de p' obtenues montrent que, contrairement aux premières remarques, c'est l'énergie passe-haut qui est plus fortement corrélée à l'énergie réallouée. La comparaison des figures 11 et 13 montre bien ce paradoxe. On peut en conclure que l'énergie contour est plus adaptée à l'estimation des cliquetis faibles alors que l'énergie passe-haut constitue un bon indicateur de cliquetis fort.

Le bruit de fond moyen est toujours plus faible sur les valeurs d'énergie réallouée prouvant ainsi que le procédé associé intègre peu le bruit dû à la combustion. En revanche, on obtient (troisième critère) un pouvoir séparateur meilleur en utilisant le procédé de réallocation.

La figure 14 appuie cette dernière conclusion puisqu'elle montre que pour un taux de bonne détection fixé, l'énergie réallouée permet d'obtenir un taux de fausse alarme plus faible pour toutes les avances considérées.

Ces résultats sont donc cohérents avec ce que nous attendions de l'utilisation de la méthode de réallocation (cf. 2.2). L'énergie

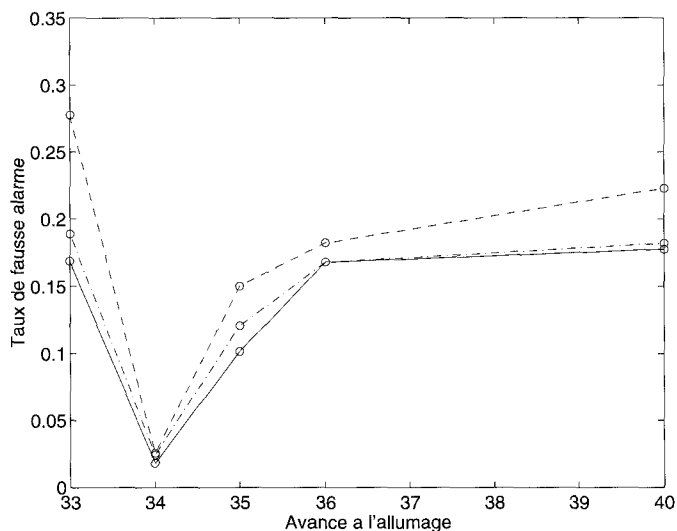


Figure 14. – Taux de fausse alarme pour un taux de non détection fixé et pour chaque avance à l'allumage – énergie réallouée en trait plein, passe-haut en trait pointillé et contour en trait mixte.

réallouée allie, en effet, les avantages de l'énergie contour à faible niveau de cliquetis (bruit de fond moyen peu important), et ceux de l'énergie passe-haut lors de forts niveaux de cliquetis (amélioration sensible du rapport signal sur bruit).

5. conclusion

Nous avons présenté ici l'application d'une technique de réallocation à l'estimation de l'énergie du cliquetis moteur. Les résultats expérimentaux montrent l'avantage d'utiliser un tel procédé afin de séparer plus nettement le cliquetis naissant des combustions bruyantes que par les méthodes utilisées jusqu'à présent.

Transposer ces traitements aux signaux issus d'autres capteurs, notamment non intrusifs, est tout à fait envisageable. Ce type de capteurs intègre, en effet, des bruits mécaniques perturbant le signal de cliquetis et conduisant à des représentations temps-fréquences très riches en parasites. Ces parasites sont souvent localisés en temps et en fréquence. L'utilisation de transformées de pseudo Wigner-Ville lissées conduit à un mélange des motifs propres de ces chocs parasites avec les motifs propres du cliquetis. Réallocation et étiquetage semblent un excellent point de départ pour l'amélioration des traitements associés à ces capteurs.

BIBLIOGRAPHIE

[1] P.M. Najt, "Evaluating Threshold Knock with a Semi-Empirical Model — Initial Results", Proc. of the Int. Conf. of the Society of Automotive Engineers, article 872149, 1987

[2] T.H. Valtadoros, V.W. Wong and J.B. Heywood, "Engine Knock Characteristics at the Audible Level", Proc. of the Int. Conf. of the Society of Automotive Engineers, article 910567, 1991

[3] U. Spicher, H. Kroeger and J. Ganser, "Detection of Knocking Combustion Using Simultaneously High-Speed Schlieren Cinematography and Multi Optical Fiber Techniques", Society of Automotive Engineers Trans., vol. 100, n° 4, pp. 569-588, 1991

[4] T. Priede and R.K. Dutkiewicz, "The Effect of Normal Combustion and Knock on Gasoline Engine Noise", Proc. of the Int. Conf. of the Society of Automotive Engineers, article 891126, 1989

[5] P.V. Puzinauskas, "Examination of Methods Used to Characterize Engine Knock", Proc. of the Int. Conf. of the Society of Automotive Engineers, article 920808, 1992

[6] G. Xiaofeng, R. Stone, C. Hudson and I. Bradbury, "The Detection and Quantification of Knock in Spark Ignition Engines", Proc. of the Int. Conf. of the Society of Automotive Engineers, article 932759, 1993

[7] Mitsubishi Motors, "Influence of Valve Noise on Knock Detection in Spark Ignition Engines", SIA 1988, Note technique, Renault, 1988

[8] H. Kikuchi, M. Nakashizuka, H. Watanabe, S. Watanabe and N. Tomisawa, "Fast Wavelet Transform and Its Application to Detecting Detonation", Ieice Trans. Fundamentals, Vol. E75-A(8), 1992

[9] F. Molinaro, "Caractérisation temps-fréquence et modélisation paramétrique du cliquetis moteur — Application à la détection", Thèse, Institut National Polytechnique de Toulouse, Avril 1992

[10] C.S. Draper, "Pressure Waves Accompanying Detonation in the Internal Combustion Engine", Journal of the Aeronautical Sciences, Vol. 5(6), Avril 1938

[11] J. Vandewalle, R. Boite, M. Moonen and A. Oosterlink, "Time-Frequency Analysis of Knock in Spark Ignition Engines", Signal Processing VI Theories and Applications, Vol. 3, 1992

[12] P. Flandrin, "Temps-Fréquence", Ed. Hermes, *Traité des Nouvelles Technologies*, 1993

[13] D. Koenig, "Application of Time-Frequency Analysis for Optimum Non-Equidistant Sampling of Automotive Signals Captured at Knock", Proc. of the ICASSP, pp. 2746-2749, 1996

[14] O. Guetta, A. Morandat and F. Benghouzi, "Détection du cliquetis par analyse temporelle et distribution de Wigner-Ville au signal de pression", Note technique, Renault, Direction de la Recherche, Septembre 1993

[15] J.B. Allen and L.R. Rabiner, "A unified approach to short-time Fourier analysis and synthesis", Proc. IEEE, vol. 65, 1977, pp. 1558-1566

[16] F. Auger and P. Flandrin, "Improving the Readability of Time-Frequency and Time-Scale Representations by the Reassignment Method", IEEE Trans. on Signal Processing, Vol. 43, 1995, pp 1068-1089

[17] P. Abry, E. Chassande-Mottin et P. Flandrin, "Algorithmes rapides pour la décomposition en ondelettes continue — Application à l'implantation de la réallocation du scalogramme", Quinzième Colloque GRETSI, Septembre 1995, pp 313-316

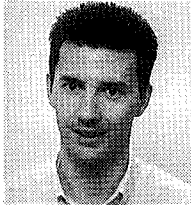
[18] P. Flandrin et E. Chassande-Mottin, "Sur la réallocation des scalogrammes", Quinzième Colloque GRETSI, Septembre 1995, pp 309-312

[19] M. Haghgoie, "Effects of Fuel Octane Number and Inlet Air Temperature on Knock Characteristics of a Single Cylinder Engine", Proc. of the Int. Conf. of the Society of Automotive Engineers, article 902134, 1990

Manuscrit reçu le 13 octobre 1997.

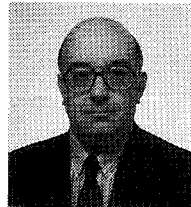
LES AUTEURS

Olivier BOUBAL



Olivier Boubal est né en 1970 à Lyon. Ingénieur de l'École Supérieure d'Électricité (SUPÉLEC) en 1993, il est docteur en traitement du signal de l'Université de Paris XI Orsay depuis 1998. Actuellement enseignant-chercheur au Service des Mesures de Supélec, ses principaux centres d'intérêts concernent les mesures indirectes et l'échantillonnage non uniforme des signaux aléatoires continus.

Jacques OKSMAN



Jacques Oksman, ingénieur Supélec, est professeur à l'École Supérieure d'Électricité, et chef du Service des Mesures. Ses domaines de recherche concernent principalement le traitement du signal appliqué aux problèmes de mesures (méthodes d'estimation précises dans un cadre non linéaire, traitements des signaux à échantillonnage non uniforme).