

# HUITIEME COLLOQUE SUR LE TRAITEMENT DU SIGNAL ET SES APPLICATIONS

NICE du 1<sup>er</sup> au 5 JUIN 1981

Recherche par la méthode CEPSTRE de la fréquence fondamentale d'une  
Onde harmonique entachée d'effet DOPPLER : Application à l'estimation  
de paramètres sur le bruit rayonné par les véhicules routiers.

N. GACHE \* B. ESCUDIE \* G. PACHIAUDI \*\* J.C. BALLUET \*\*\*

\* Laboratoire Traitement du Signal I.C.P.I. 25 rue du Plat 69288 LYON CEDEX 1  
\*\* IRT - CERNE 109 avenue Salvador Allende BP 75 69672 BRON CEDEX  
\*\*\* CEPHAG INP Grenoble B.P. 46 38402 ST MARTIN D'HERES

## RESUME

Dans les études de bruit rayonné par les véhicules routiers en vue de leur identification le traitement des signaux doit fournir l'information "vitesse de rotation" du moteur, ou "fréquence fondamentale". Parmi divers procédés possibles, l'emploi de la méthode CEPSTRE, appliquée à la Représentation conjointe en temps et fréquence, possède certains avantages. Le procédé permet d'extraire la période fondamentale d'un signal comportant de nombreuses composantes harmoniques, tout en mettant en évidence l'effet DOPPLER dû au mouvement de la source. Il apparaît que les composantes harmoniques de rang impair, tant par leur nombre que par leur puissance relative par rapport aux parasites, déterminent le succès du procédé. Le rapport (signal/parasite) pour ces composantes de rang impair est le paramètre déterminant quant à l'utilisation de la méthode.

L'étude de divers véhicules isolés équipés de moteur à essence ou DIESEL circulant sur route, permet de vérifier le bien fondé du procédé en présence de divers parasites stationnaires ou non, tel le bruit de roulement.

## SUMMARY

Noise emitted by road vehicles can be used to identify and classify them. Signal processing of such noises estimates the engine firing rate. Among many methods the CEPSTRUM one and the time and frequency representation display the fundamental frequency  $f_c$ , even if the radiated wave is a multiharmonic one, which is modulated by the DOPPLER effect. Odd harmonic components of the radiated wave transmit the useful information for the CEPSTRUM receiver. The "signal to noise" ratio is the main parameter in such a detection.

Many vehicles with DIESEL engine, or classical one, have been studied under natural conditions in presence of various noises, mainly the tire noise.



Introduction

Dans les études statistiques de circulation routière, il faut déterminer en un point donné le nombre de véhicules passant à dates connues et pendant des durées prédéterminées. En outre il importe de connaître le type de véhicule (lourd, léger, deux-roues,...) ainsi que certaines de ses caractéristiques longueur, paramètre du moteur, de la transmission,... Concuremment avec des procédés optiques et mécaniques le traitement des signaux acoustiques rayonnés par les véhicules apporte des informations fondamentales dans une telle recherche [1].

Dans cette perspective, la connaissance de la fréquence des explosions dans un cylindre  $f_c$  et celle dans le moteur  $f_e$ , permet d'envisager l'identification de N nombre de cylindres.

1) Situation pratique ; signaux acoustiques émis par le véhicule :

Le moteur à explosions (DIESEL ou non, 4 ou 2 cylindres) possède un fonctionnement périodique caractérisé par :

- $f_c$  fréquence d'explosion dans un cylindre
- $f_e$  fréquence d'explosion dans le moteur

à N cylindres

Soit n le nombre de tours par minute, on a pour un moteur à 4 temps :

$$n = 120 f_c, \quad f_e = N f_c \quad (1)$$

Ce phénomène périodique d'explosions excite les structures mécaniques qui rayonnent des signaux harmoniques de fréquence  $\nu_R = R f_c$  correspondant à leur mode de vibrations. Les signaux sont modulés en amplitude et fréquence par divers effets :

- le véhicule rayonne avec un gain complexe  $h(\nu, \alpha)$  ; l'angle  $\alpha$  varie au cours du temps selon la position relative du véhicule et du capteur (figure 1)

- le mouvement du véhicule crée une modulation de fréquence par effet DOPPLER [1] (figure 2) :

$$\nu'_R = \nu_R \frac{1}{1 + \frac{\nu E}{c_0 \sqrt{E^2 + d^2/\nu^2}}} \quad (2)$$

- la distance variable  $r(t)$  et la présence d'écoulements turbulents et cisailés autour du véhicule modulent l'amplitude du signal reçu [1].

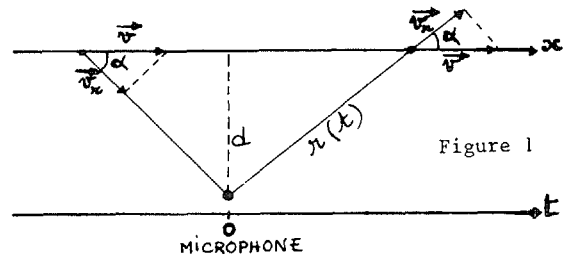


Figure 1

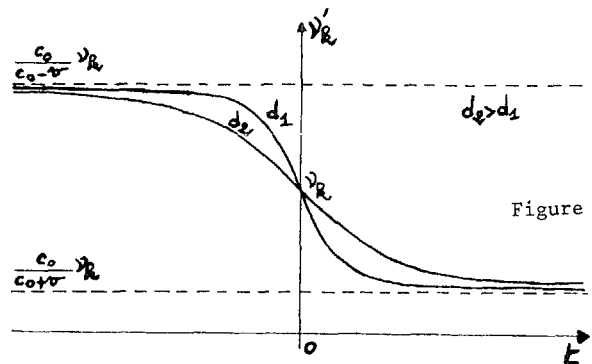


Figure 2

Le signal émis, stationnaire dans le référentiel du véhicule devient donc non stationnaire dans celui du capteur. Il n'en reste pas moins un signal muni d'une représentation harmonique [2]. En tant que tel la représentation adaptée doit tenir compte du caractère harmonique de l'émission [1].

Pendant une durée d'observation  $\Delta$  relativement courte par rapport à la durée de l'enregistrement (T) (passage du véhicule) on admet :

$$S(t) = A(t) \cos \phi(t) \quad (3)$$

$$t_P - \frac{\Delta}{2} \leq t \leq t_P + \frac{\Delta}{2} \quad \left\{ \begin{array}{l} A(t) \approx A(t_P) \\ \nu_R(t) \approx \nu_R(t_P) \end{array} \right.$$

Sur la durée  $\Delta$  centrée à la date t, en utilisant la Représentation conjointe  $p(t, \nu)$  on cherche à extraire les paramètres  $f_c$  et  $f_e$  [1]

$$f_e = N f_c$$

$f_e$  étant connu par mesure directe de la raie la plus puissante,  $f_c$  fournit donc :  $N = f_e / f_c$  ce qui permet un premier tri des véhicules [1]. La figure 3 illustre cette représentation pour un véhicule CITROEN Ami 3 à 60 km/h.

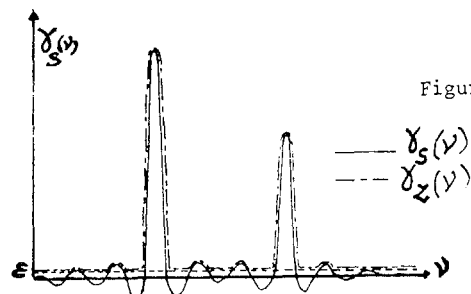


Figure 4

Recherche par la méthode CEPSTRE de la fréquence fondamentale d'une Onde harmonique entachée d'effet DOPPLER : Application à l'estimation de paramètres sur le bruit rayonné par les véhicules routiers.

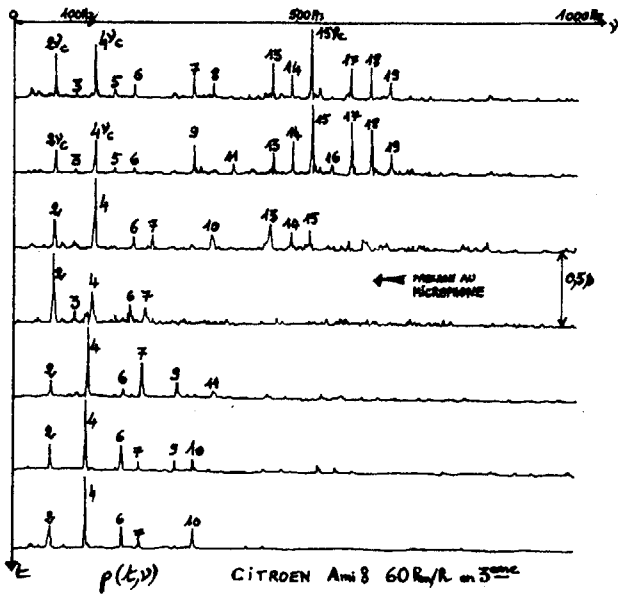


Figure 3

2) CEPSTRE énergétique : intérêt du procédé dans le cas présent :

a) CEPSTRE énergétique :

Les signaux dont on dispose sont du type :

$$S(t) = \sum_{R=1}^M A_R(t) \cos(2\pi\nu_R t + \varphi_R), -\frac{T}{2} \leq t \leq \frac{T}{2}$$

Ils sont d'énergie finie et on calcule :

$$\Gamma_S(\tau) = \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} S(t) S(t-\tau) dt \Leftrightarrow \gamma_S(\nu) = |A(\nu)|^2 \quad (4)$$

Pour une tranche d'observation  $\Pi_{\Delta}(u-t) S(u)$  de durée  $\Delta$ , à la date  $t$ , on calcule la représentation énergétique conjointe  $p(t, \nu)$  :

$$p(t, \nu) = \left| \int_{t-\frac{\Delta}{2}}^{t+\frac{\Delta}{2}} S(u) e^{-2i\pi\nu u} du \right|^2 \quad (5)$$

On définit le CEPSTRE énergétique par

[3] [4] :

$$C(\tau) \stackrel{\tau}{\Leftrightarrow} \text{Log } \gamma_S(\nu) = 2 \text{Log } |A(\nu)| \quad (6)$$

$$C(t, \tau) \stackrel{\tau}{\Leftrightarrow} \text{Log } p(t, \nu) = \text{Log} \left| \int_{t-\frac{\Delta}{2}}^{t+\frac{\Delta}{2}} S(u) e^{-2i\pi\nu u} du \right|^2 \quad (7)$$

La quantité  $C(t, \tau)$  sera appelée CEPSTRE EVOLUTIF ou CEPSTRE bitemporal.

b) Conditions de calcul et signaux traités

Dans le cadre des conditions définies par la relation (3) on peut écrire :

$$S(t) \approx \sum_{R=1}^M A_R \cos 2\pi\nu_R t \quad (8)$$

en admettant que sur la durée  $\Delta$  les phases  $\varphi_R$  sont identiques et constantes. Dans ce cas :

$$\gamma_S(\nu) = \sum_{R=1}^M A_R^2 \left[ \delta(\nu - \nu_R) * \frac{\sin \pi \nu' \Delta}{\pi \nu'} \right]_{(\nu)} = \sum_{R=1}^M A_R^2 \frac{\sin \pi \Delta (\nu - \nu_R)}{\pi (\nu - \nu_R)} + \sum_{R=1}^M A_R^2 \frac{\sin \pi \Delta (\nu + \nu_R)}{\pi (\nu + \nu_R)}$$

Le calcul de la quantité  $\text{Log } \gamma_S(\nu)$  nécessite d'éliminer les valeurs nulles de  $\gamma_S$ . Pour ce faire, on place arbitrairement à la valeur  $\epsilon$  toute valeur  $\gamma_S(\nu) < \epsilon$  :

$$\gamma_S(\nu) \rightarrow \epsilon U(-\gamma_S(\nu) + \epsilon) + \gamma_S(\nu) U(\gamma_S(\nu) - \epsilon) = \gamma_S(\nu)$$

comme la figure 4 le montre.  $\epsilon$  est en général exprimé comme une fraction (%) du maximum de  $\gamma_S(\nu)$ . La définition du seuil  $\epsilon$  sera importante en présence de composantes parasites. La durée  $\Delta$  ou  $T$  d'observation pourra être variable en fonction de la vitesse  $v$  du véhicule et de la distance  $d$  du microphone au véhicule. Elle sera toujours constante dans un essai donné.

L'action de l'opération Log augmente la puissance relative des composantes spectrales de rang  $p$  élevé par rapport aux composantes prépondérantes  $p = 2p + 1, p = 0, 1, 2, \dots$ , sont en général de puissance relative faible car elles sont liées à des défauts de rotation du type "balourd" ou "désalignement" que les constructeurs évitent autant que possible. Les figures 5 et 6 illustrent l'effet de la fonction logarithme dans l'étude du bruit dû à un véhicule PEUGEOT 504 DIESEL à 30 km/h en seconde vitesse.

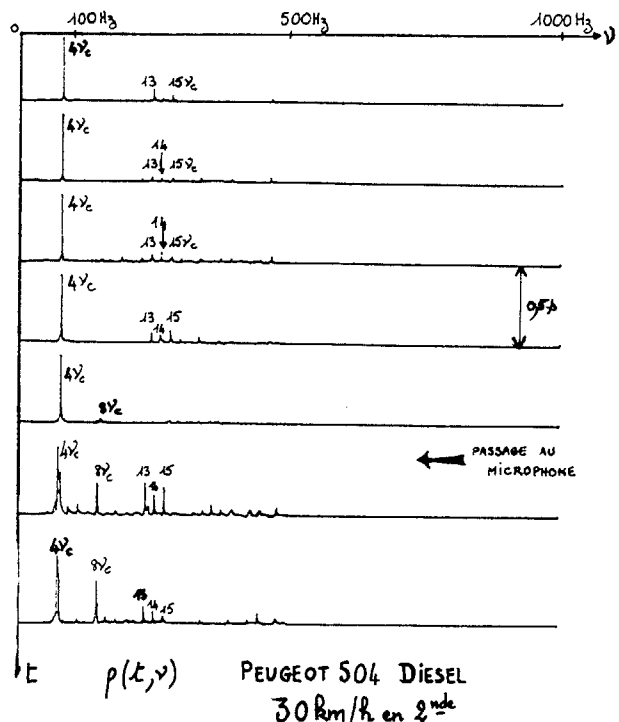


Figure 5



Recherche par la méthode CEPSTRE de la fréquence fondamentale d'une Onde harmonique entachée d'effet DOPPLER : Application à l'estimation de paramètres sur le bruit rayonné par les véhicules routiers.

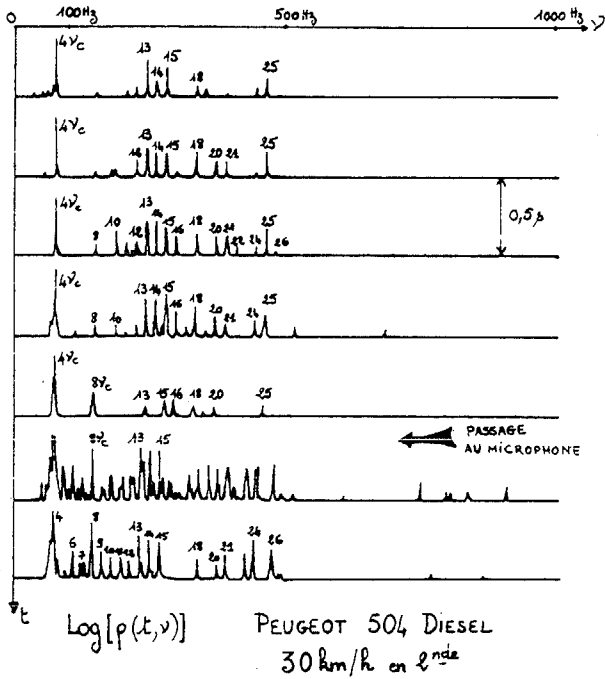


Figure 6

c) Extraction de la période  $T_c = 1/f_c$  par le CEPSTRE énergétique :

Le bruit émis par les véhicules a pour période fondamentale  $T_c$ , période des explosions dans un cylindre. Le signal peut donc s'exprimer comme :

$$S(t) = F(t) * \sum_{-\infty}^{+\infty} \delta(t - nT_c) \quad (9)$$

Le signal effectivement traité est :

$Z(t) = S(t) \cdot W(t)$  où  $W(t)$  est une "fenêtre" limitant la durée du signal.

$Z(\nu)$  s'écrit alors :

$$Z(\nu) = \left[ f(\nu) \cdot \frac{1}{T_c} \sum_{-\infty}^{+\infty} \delta(\nu - \frac{n}{T_c}) \right] * w(\nu)$$

soit :

$$Z(\nu) = \frac{1}{T_c} \sum_{-\infty}^{+\infty} f(\frac{n}{T_c}) w(\nu - \frac{n}{T_c})$$

Compte-tenu du fait que  $w(\nu)$  est à support faible par rapport à la bande spectrale du signal, et que  $w(\nu - \frac{n}{T_c})$  et  $w(\nu - \frac{n+1}{T_c})$  se recouvrent peu, on peut écrire

$$|Z(\nu)|^2 \approx \frac{1}{T_c^2} \sum_{-\infty}^{+\infty} |f(\frac{n}{T_c})|^2 |w(\nu - \frac{n}{T_c})|^2 \quad (\text{figure 7})(10)$$

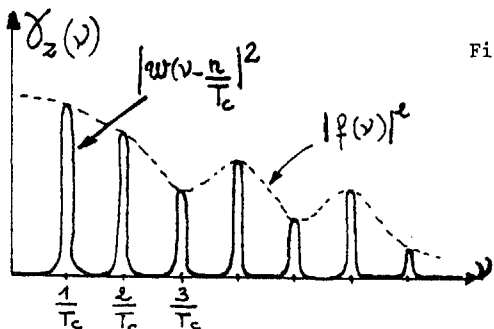


Figure 7

Tenant compte du seuil  $\epsilon$  choisi, le terme  $\text{Log } |Z(\nu)|^2$  peut s'écrire (figure 8)

$$\text{Log } |Z(\nu)|^2 = \sum_{-\infty}^{+\infty} |R(\nu)|^2 \delta(\nu - \frac{n}{T_c}) * g(\nu), \quad \epsilon \leq 10^{-4} \chi_n$$

où  $g(\nu)$  est à support faible devant  $1/T_c$ .

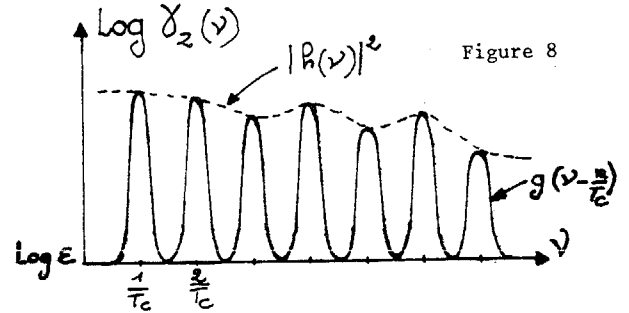


Figure 8

Le calcul de la Transformée de Fourier de  $\nu$  vers  $\tau$  de  $\text{Log } |Z(\nu)|^2$  conduit au CEPSTRE énergétique : (figure 9)

$$C_2(\tau) = \left[ \Gamma_H(\tau) * \sum_{-\infty}^{+\infty} \delta(\tau - nT_c) \right] \cdot G(\tau)$$

Cette grandeur est une somme de translatées possédant une période  $T_c$ . La pondération  $G(\tau)$  est une fonction de support de l'ordre de  $\Delta$ , durée du signal traité.

$G(\tau)$  peut-être une fonction décroissante mais le plus souvent  $G(\tau)$  est à variation lente autour de l'origine.

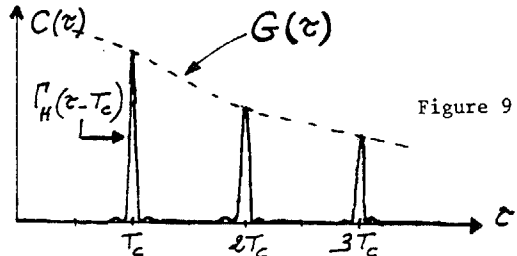


Figure 9

En étudiant le cas idéal d'un "peigne" de raies d'amplitudes  $A$ , de période  $T$ , on montre que le cepstre correspondant  $C(\tau)$  est un "peigne" de raies aux dates  $nT$  dont les amplitudes sont proportionnelles à  $1/n$  [3].

3) Essais systématiques sur les signaux périodiques

a) Type de signaux traités et influence des harmoniques impairs

Les signaux sont du type décrit à la relation (8). Ils comportent des harmoniques de rang pair et impair. Afin de rendre compte des signaux dus aux véhicules, nous avons d'abord traité le cas suivant :

$$A_1 = 0 \quad A_2 = 1 \quad A_3 = 10^{-2} \quad A_4 = 0,5 \quad A_8 = 0,2$$

$$f_c = 5,9 \text{ Hz} \quad n = 708 \text{ trs/mm}$$

La figure 10 montre  $S(t)$  et  $C(\tau)$  calculés

Recherche par la méthode CEPSTRE de la fréquence fondamentale d'une Onde harmonique entachée d'effet DOPPLER : Application à l'estimation de paramètres sur le bruit rayonné par les véhicules routiers.

pour une durée  $\Delta = 1,25 \text{ s}$ .  $C(\tau)$  est une fonction périodique de période  $T_c = 1/f_c$

Le taux d'harmonique 3 étant de 1% avec un seuil  $\epsilon = 10^{-5}$  en l'absence de bruit. Ceci montre tout l'intérêt des composantes de rang impair pour l'estimation de  $T_c$  sur  $C(\tau)$ .

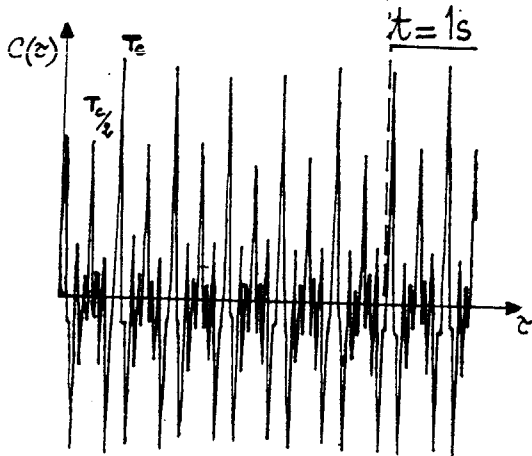
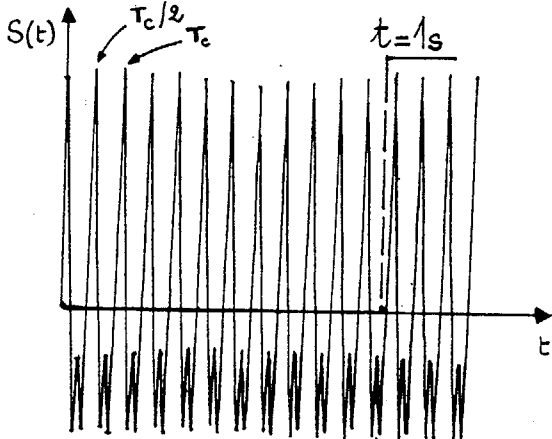


Figure 10

Tenant compte des données recueillies sur les bruits de véhicules, on cherche à déterminer quel est le taux d'harmonique impair minimal permettant la mise en évidence de  $T_c$  sur  $C(\tau)$ .  
 Pour  $A_3 = 5 \times 10^{-5}$  lorsque l'harmonique de rang pair d'amplitude maximale est tel que  $A = 1$  ( $\epsilon = 10^{-5}$ ) on estime encore  $T_c$  convenablement par rapport à  $T_c/2$  (figure 11).

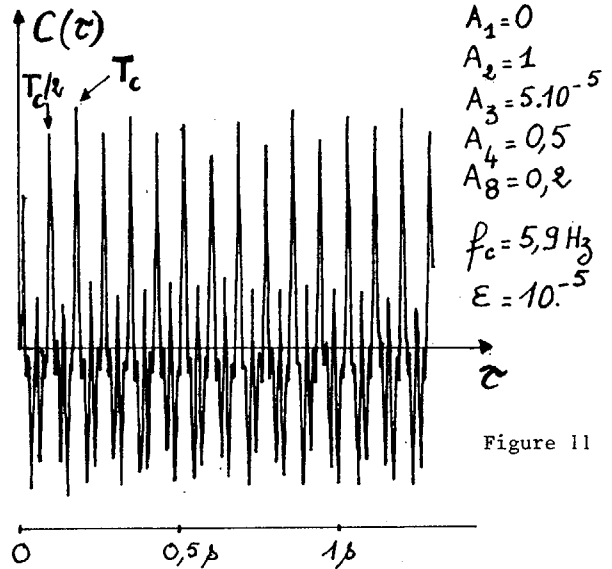


Figure 11

b) Influence du rang et du nombre des harmoniques impairs

Pour les véhicules à 2 cylindres, il existe une ambiguïté entre  $C(T_c)$  et  $C(T_c/2)$ , car on observe principalement des composantes harmoniques de fréquences  $\nu_{2p} = 2p f_c$ ,  $p = 1, 2, \dots$ . De même pour les véhicules à quatre cylindres, on observe une confusion possible entre  $C(T_c)$  et  $C(3T_c/4)$  car il y a prépondérance des harmoniques de fréquence  $\nu_{4p} = 4p f_c$ .

Compte-tenu de ces remarques, on étudie des signaux synthétiques formés d'harmoniques de rang pair  $\nu_{2p} = 2p f_c$ , et d'une ou plusieurs composantes harmoniques de rang impair  $\nu_{2p+1} = (2p+1) f_c$ ,  $p \leq 11$ .

On définit le facteur de contraste réduit

$$E_1 = \frac{C(T_c) - C(T_c/2)}{C(T_c)} \quad E_2 = \frac{C(T_c) - C(3T_c/4)}{C(T_c)}$$

Les figures 10 et 12 illustrent ces 2 cas pour  $\Delta = 1,25 \text{ s}$   $\epsilon = 10^{-5}$

Les résultats indiquent que  $E_1$  et  $E_2$  ne dépendent pas du rang  $2p + 1$  de l'harmonique impair considéré.

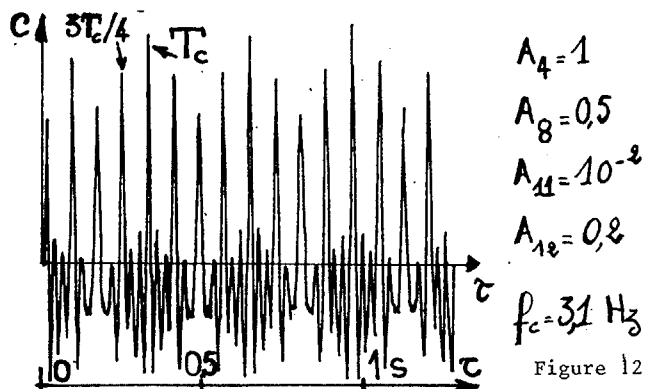


Figure 12



Recherche par la méthode CEPSTRE de la fréquence fondamentale d'une Onde harmonique entachée d'effet DOPPLER : Application à l'estimation de paramètres sur le bruit rayonné par les véhicules routiers.

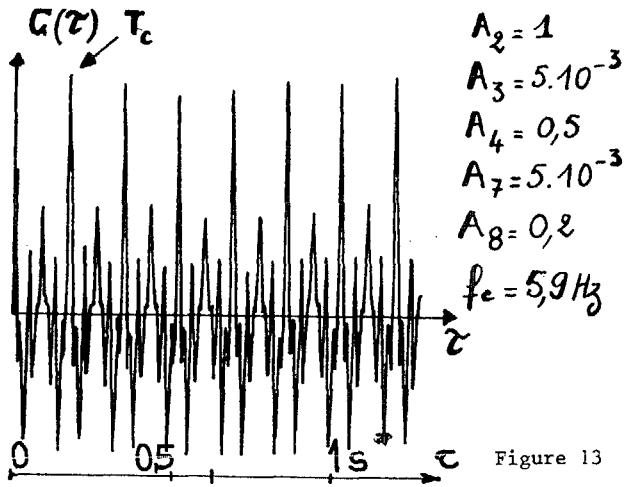


Figure 13

La figure 13 est relative au cas de 2 harmoniques impaires de rang 3 et 7  $f_c$ . En comparant ce résultat avec celui de la figure 10, on constate qu'il est préférable du point de vue du contraste E, d'observer deux composantes harmoniques impaires d'amplitude A, qu'une seule harmonique d'amplitude 2A.

c) Choix du seuil E et de la durée d'observation

Le choix du seuil E est lié à l'élimination des composantes spectrales parasites du bruit de roulement. En première approximation ces composantes sont dans la bande (500-1 500 Hz) [5]. E doit rester faible pour ne pas éliminer des composantes utiles de rang impair. On a donc calculé les écarts  $E_1$  ou  $E_2$  en fonction de E. La figure 14 montre le résultat dans le cas d'un véhicule Ami 8 à :

$$E_{opt} \approx 3 \cdot 10^{-2}$$

Pour  $E < E_{opt}$  l'effet des parasites est prépondérant et pour  $E > E_{opt}$  on élimine des composantes spectrales harmoniques utiles.

La durée  $\Delta$  d'observation est choisie compte tenu de :

- au passage au microphone on recueille des signaux parasites notamment liés au roulement du véhicule,
- à cet instant l'effet DOPPLER possède sa variation maximale d'après la relation (2), et des modulations d'amplitude apparaissent dues au défilement relatif du véhicule devant le micro. En conséquence, on calculera  $C_\Delta(t, \tau) : 0,25 \leq \Delta \leq 0,5 \Delta$  à des dates antérieures ou postérieures à la date  $t = 0$  de passage au microphone.

4) Résultats obtenus sur divers types de véhicules :

a) Cas des véhicules à 2 cylindres et refroidissement aérien :

Ce type de véhicule émet un signal périodique avec un nombre élevé de composantes harmoniques impaires : [1]  $\nu_{2p+1} = (2p+1) f_c \leq 12 f_c$   
 Ceci est dû au moteur "flat twin" et au refroidis-

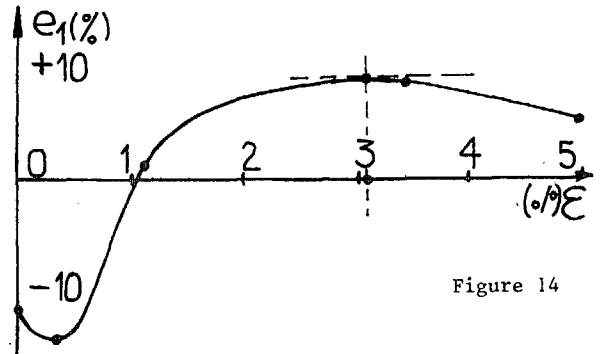


Figure 14

sement aérien. Ces composantes sont prépondérantes dans la gamme 400-800 Hz avant le passage du véhicule du microphone (fig. 15). Le nombre des composantes de nombre impair et leur puissance grande par rapport au bruit de roulement explique les résultats obtenus (fig. 16). En effet à la date  $t_3$  on a :  $\frac{P(t_3, 13 f_c)}{P_R(t_3, \nu_m)} \approx 10$  (fig. 15)

où  $P_R(t_3, \nu_m)$  est la composante maximale du bruit de roulement [5]. D'autres essais sur un véhicule VISA 4CV (N = 2 refroidi par air) n'ont pas permis d'extraire  $T_c$  sous les conditions :  $V = 60 \text{ km/h}$ , 4ème vitesse,  $n \approx 2800 \text{ t/mn}$ . Un tel essai n'est pas concluant vu l'existence d'un fort vent sur le site. Ceci suggère que les études soient conduites à vent faible ( $v_{vent} \leq 5 \text{ m/sec}$ ) et en avantageant le support spectrale contenant l'information utile.

b) Véhicules à 4 cylindres à moteur DIESEL ou essence

La figure 17 présente  $C(t, \tau)$  pour un véhicule 504 familiale (Essence) à 60 km/h en 3ème vitesse. A la date  $t_2$  le pic d'abscisse  $\tau_2 = 43,8 \text{ ms}$  correspond à  $T_c$ , période fondamentale, mesurée à l'aide de la composante  $f_e = 4 \nu_c$ . Le pic d'abscisse  $\tau_2$  est maximal et difficile à détecter car :  $\frac{C(3T_c/4)}{C(T_c)} = 0,8$ ,  $\frac{C(T_c/2)}{C(T_c)} = 0,7$

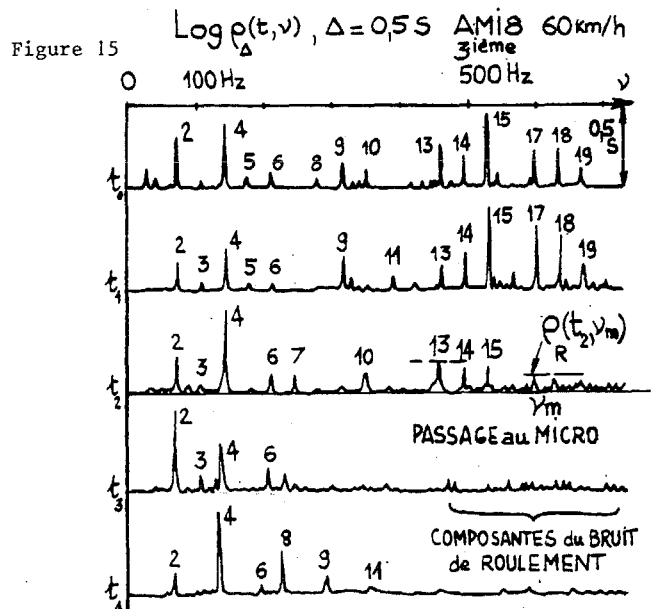
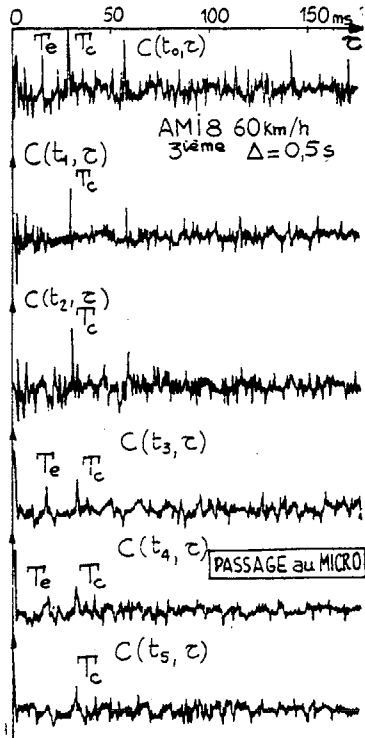


Figure 15

Recherche par la méthode CEPSTRE de la fréquence fondamentale d'une Onde harmonique entachée d'effet DOPPLER : Application à l'estimation de paramètres sur le bruit rayonné par les véhicules routiers.

Figure 16



La tranche  $t_3$  fait nettement apparaître la confusion entre deux pics dont l'un seul correspond à  $T_c$ . La tranche  $t_5$  montre que la détection de  $T_c$  n'est pas possible vu les valeurs de  $C(T_c/2)$  et  $C(3T_c/4)$ . Pour la tranche  $t_6$  le contraste est suffisant pour permettre une éventuelle détection. Tout ceci montre que même à vitesse de rotation relativement élevée  $n \approx 2600$  t/mn les effets dus aux harmoniques de rang pair et aux composantes du bruit de roulement peuvent compromettre la détection de  $T_c$ .

Les figures 18 et 19 représentent  $C(t, \tau)$  pour le même véhicule à moteur DIESEL. Ce moteur émet (fig. 5,6) :

- un grand nombre de raies harmoniques  $V_{sp} = (2p+1)f_c \approx 25f_c$
- des composantes persistantes au cours du passage devant le microphone.

Ce fait distingue ce moteur des moteurs bicylindres refroidis par air, dont les composantes de rang élevé disparaissent après le passage au microphone. Dans les deux cas (fig. 18, 19) l'estimation de  $T_c$  se fait sans ambiguïté. On veut obtenir  $T_c(t)$  compte tenu de l'effet DOPPLER, malgré la faiblesse de  $n \approx 2050$  t/mn, soit  $V = 60$  km/h en 4ème vitesse. Pour le même rapport de boîte à vitesse plus élevée il apparaît des difficultés dues aux composantes périodiques du bruit de roulement liées à la vitesse  $V$  [5]. Dans de tels cas il faudrait avantager les zones spectrales contenant les composantes de rang impair :  $2p+1 \leq 25$  Il faut alors rejeter les composantes de fréquence supérieur à 600 Hz par exemple.

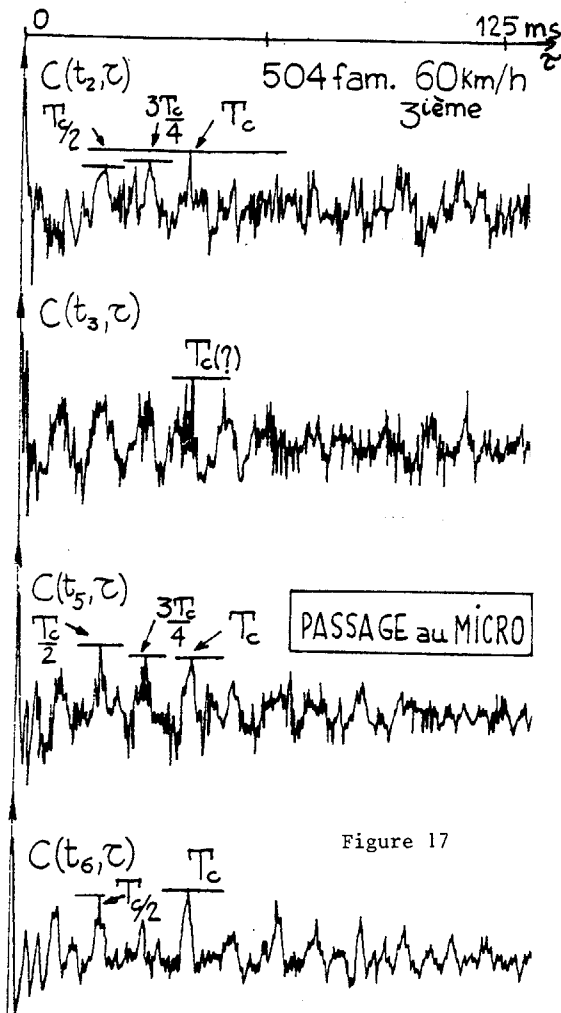


Figure 17

**Conclusion** : Ces résultats montre que l'utilisation du CEPSTRE énergétique, évolutif permet d'extraire la période  $T_c$  d'explosion dans un cylindre. Si la présence de nombreuses composantes de rang impair permet aisément le calcul pour des véhicules bicylindres refroidis à air ou pour des véhicules DIESEL, le procédé est sensible à la présence de parasites. Le bruit de roulement se traduit par des composantes spectrales perturbant le résultat lors du passage au microphone. Il apparaît que cette recherche devra avantager le contraste spectral entre signal et parasites avant le calcul du CEPSTRE.



Recherche par la méthode CEPSTRE de la fréquence fondamentale d'une Onde harmonique entachée d'effet DOPPLER : Application à l'estimation de paramètres sur le bruit rayonné par les véhicules routiers.

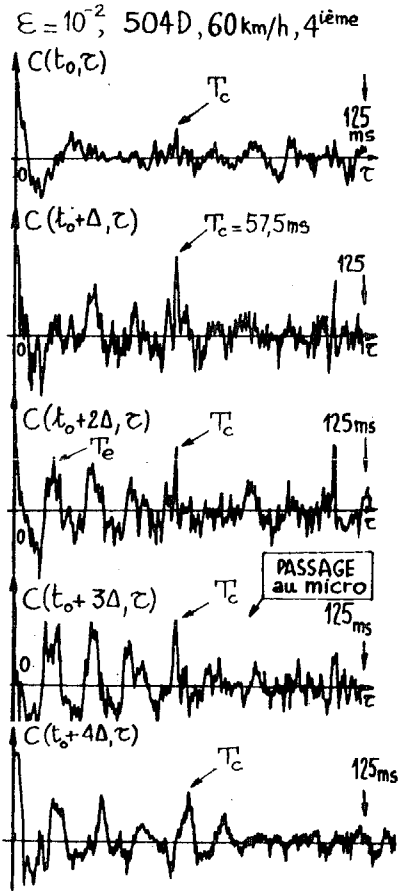


Figure 18

#### Bibliographie

- [1] : B. ESCUDIE, N.GACHE, G. PACHIAUDI : Tentative d'identification des bruiteurs routiers par Traitement du Signal - Annales des Télécommunications T.36n° 5.6 1981
- [2] : A.BLANC LAPIERRE, B.PICINBONO  
Fonctions aléatoires Ch. 7 Masson Ed. 1981
- [3] : J.C.BALLUET : Les Opérateurs Cesp stres. Thèse de Docteur-Ingénieur INP Grenoble 1979
- [4] : J.C.BALLUET, J.L.LACOUME, D.BAUDOIS : Séparation de 2 échos rapprochés par le Cepstre d'énergie Aparâtre Annales Télécommunication 1981
- [5] : International Tire Noise Conference Stockholm 1979  
Rapport STU n°168 1980 - Nat. Swedish Board Techn. Developemnt - p.83.92, 93.109, 111.127, 199.204, 205.214.

[6] : Bibliographie sur le CEPSTRE

OPPENHEIM A.V. SCHAFFER R.W.  
Digital Signal Processing (Prentice-Hall 1975)

KUNT M.

Traitement numérique des signaux\* (ed.Georgi 1980)

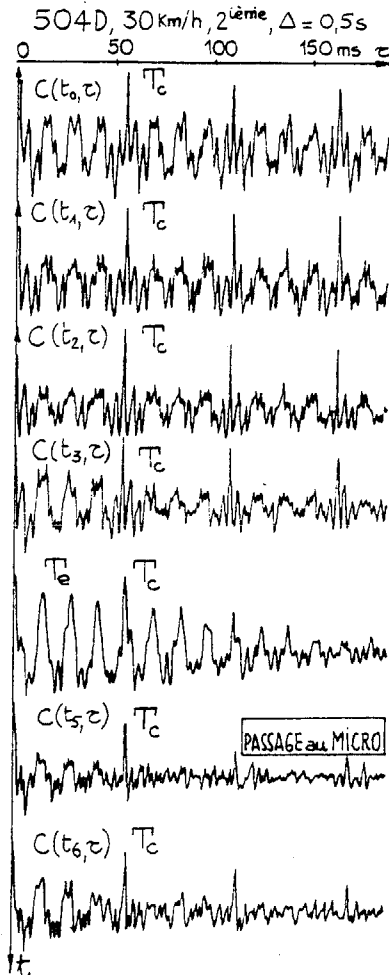


Figure 19