



**HAL**  
open science

## Analyse vibratoire, approche cyclostationnaire et déterministe

Frédéric Bonnardot, Mohamed El Badaoui, François Guillet

► **To cite this version:**

Frédéric Bonnardot, Mohamed El Badaoui, François Guillet. Analyse vibratoire, approche cyclostationnaire et déterministe. CNR'IUT 2002, May 2002, le Creusot, France. pp.0. hal-00552909

**HAL Id: hal-00552909**

**<https://hal.science/hal-00552909v1>**

Submitted on 1 Dec 2020

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## **Analyse vibratoire : Approche cyclostationnaire et déterministe**

---

***Auteur(s) : F. BONNARDOT, M. EL BADAoui, F. GUILLET***

*Adresse auteur(s) :*

*Nom du laboratoire, de l'I.U.T : Laboratoire d'Analyse des Signaux et des Processus Industriels (LASPI) – IUT Génie Industriel et Maintenance (GIM)*

*Adresse : 20 Avenue de Paris*

*Code Postal et Ville : 42 334 Roanne Cedex*

*E-mail : [frederic.bonnardot@univ-st-etienne.fr](mailto:frederic.bonnardot@univ-st-etienne.fr), [badaoui@univ-st-etienne.fr](mailto:badaoui@univ-st-etienne.fr)*

---

*Résumé : Les techniques d'acquisition synchrones permettent d'exploiter les propriétés de cyclostationnarité des signaux. Nous montrons dans ce papier un exemple d'application sur des signaux issus d'engrenages.*

*Liste de mots clés : Cyclostationnarité, Echantillonnage angulaire, Analyse vibratoire, Spectre de Wigner Ville, Moyenne Synchrone.*

---

### **Introduction**

L'échantillonnage angulaire permet d'exploiter les propriétés de cyclostationnarité des signaux résultant du caractère cyclique des phénomènes mécaniques. Cette technique qui peut sembler parfois contraignante dans les applications industrielles mérite d'être étudiée car très souvent, on dispose au niveau des machines des capteurs de position destinés à l'asservissement. D'un point de vue plus fondamental, cette technique nous a permis de mieux comprendre les propriétés liées à la cyclostationnarité des signaux. Nous montrons sur un exemple concret de signaux d'engrenage à quoi correspond la moyenne synchrone (qui n'est autre que la cyclostationnarité à l'ordre un). Nous insistons sur l'importance du retranchement de cette moyenne pour l'utilisation des propriétés de cyclostationnarité aux ordres supérieurs.

## **1. De l'analyse vibratoire temporelle à l'analyse vibratoire angulaire**

### **1.1 Limites de l'échantillonnage temporel**

Souvent, dans l'industrie, les signaux issus d'engrenages ou de machines tournantes sont acquis sous échantillonnage temporel. L'échantillonnage temporel présente quelques inconvénients :

- Tout d'abord, les accélérations engendrées par les machines tournantes et donc les méthodes de diagnostic sont sensibles à la vitesse de rotation. Si la vitesse du moteur évolue (changement de la charge modifiant le glissement, ...), la fréquence des informations relatives au moteur changera également.

- Par ailleurs, pour exploiter la répétition des phénomènes électromécaniques, il est intéressant de faire des moyennes d'ensemble en considérant un tour comme une réalisation d'un processus stochastique (El Badaoui, 1999). Pour faire de telles statistiques il est nécessaire que les signaux soient synchronisés et que la vitesse soit stable. S'il y a des fluctuations de vitesse, le nombre d'échantillons par tour ne sera pas forcément constant.

### **1.2 L'échantillonnage angulaire**

Dans le cadre de l'échantillonnage angulaire, le système d'acquisition va non pas prélever des échantillons à pas temporel constant mais à pas angulaire constant. Ainsi, le nombre d'échantillons correspondant à un tour sera constant et il sera possible de calculer des moyennes d'ensemble sans problème. Il sera possible de localiser les défauts si on dispose d'un signal de top tour (référence 0°). L'échantillonnage angulaire constitue ainsi une solution complémentaire à l'échantillonnage temporel pour lequel de nombreuses méthodes de diagnostic existent déjà.

### **1.3 Une méthode d'échantillonnage angulaire**

Un codeur optique fournit un signal d'échantillonnage avec N créneaux par tour, ce signal donne une information sur la position du moteur (cf. figure 1). Il va permettre d'échantillonner le signal (un point par front montant).

Comme la présence d'un codeur optique sur les machines industrielles n'est pas courante, le laboratoire recherche des méthodes d'échantillonnage angulaire a posteriori permettant d'estimer le signal échantillonné

angulairement à partir de signaux échantillonnés temporellement.

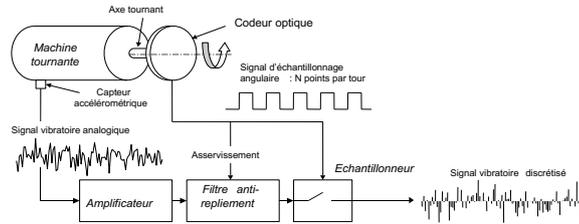
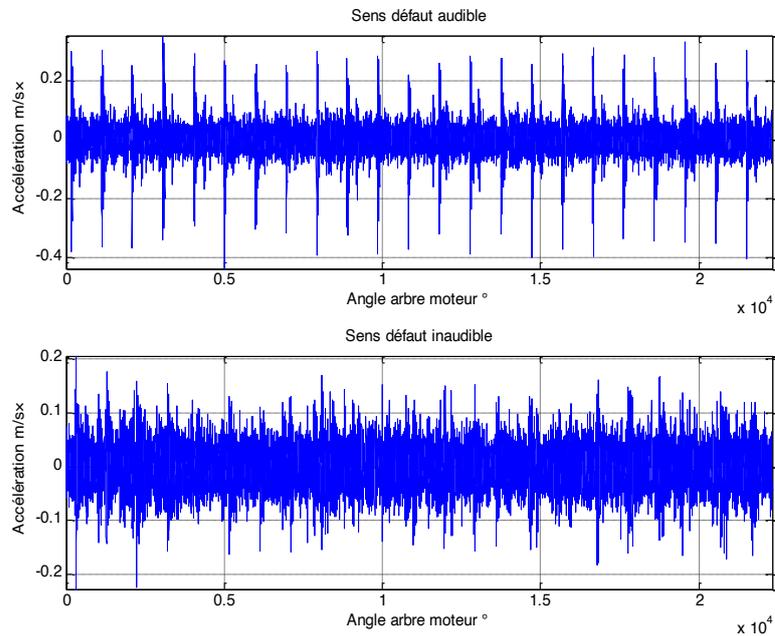


Figure 1. *Système d'acquisition angulaire*

## 2. Apport de l'échantillonnage angulaire en analyse vibratoire

### 2.1 Statistiques synchrones et cyclostationnarité

La figure n°2 présente un signal issu d'un réducteur comportant un défaut enregistré selon deux configurations du réducteur.



## Figure n°2. Réducteur avec un défaut – échantillonnage angulaire

Sur le signal *défait audible*, il apparaît un motif qui correspond au défaut. Dans l'autre cas, le motif est noyé dans du bruit. La période du motif  $\theta_{motif}$  correspond à la période de rotation du 2<sup>ème</sup> arbre du réducteur. Afin d'exploiter cette périodicité, le signal va être écrit sous la forme :  
 $s(\theta) = p(\theta) + cs(\theta) + b(\theta)$  (1)

avec  $s(\theta)$  le signal vibratoire issu du réducteur,  $p(\theta)$  un signal déterministe de période  $\theta_{motif}$  appelé moyenne synchrone,  $cs(\theta)$  un signal cyclostationnaire à un ordre supérieur ou égal à 2,  $b(\theta)$  le reste du signal que l'on considérera comme un bruit indépendant de  $p(\theta)$  et de  $cs(\theta)$ .

La cyclostationnarité est une extension de la stationnarité qui va permettre dans le cas de machines tournantes de prendre en compte le caractère cyclique des propriétés statistiques des signaux. Un processus stochastique  $s(\theta)$  est cyclostationnaire à l'ordre  $n$  si ces  $n$  premiers moments sont périodiques.

### 2.2 Estimation de la moyenne synchrone

Les calculs développés ce placent dans le cadre des calculs numériques.

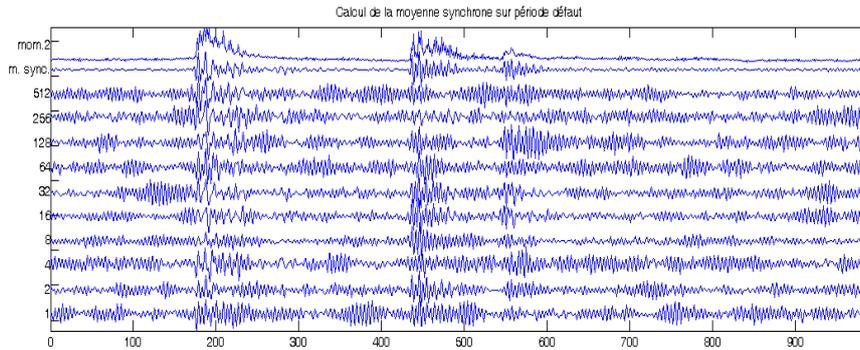
Il est possible d'estimer la moyenne synchrone par :

$$\hat{p}(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} s(\theta + k \cdot \theta_{motif}) \quad (2)$$

Cette estimation suppose que les signaux sont cycloergodiques c'est à dire que l'on peut remplacer la moyenne statistique par une moyenne sur les signaux  $s(\theta)$ .

Le signal est découpé en  $N$  blocs de  $\theta_{motif}$  échantillons (8 blocs sont affichés en bas de la figure n°3). On obtient ensuite l'estimée de la moyenne synchrone (*m. sync* – figure n°3) en faisant une moyenne d'ensemble sur les blocs. Il est également possible de généraliser ce mode opératoire pour des moments statistiques d'ordres supérieurs, par exemple, la variance synchrone  $v(\theta)$  (*mom. 2* – figure n°3) :

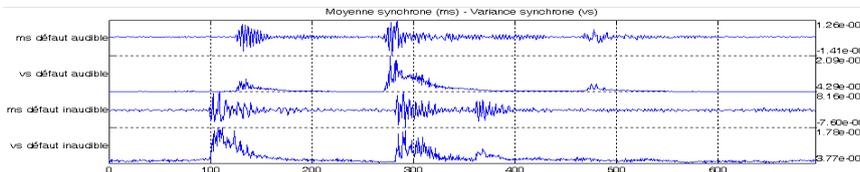
$$\hat{v}(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} [s(\theta + k \cdot \theta_{motif}) - \hat{p}(\theta)]^2 \quad (3)$$



**Figure n°3.** Estimation de la moyenne synchrone avec  $N=723$

On peut constater l'efficacité de la moyenne synchrone pour les deux derniers motifs. La moyenne synchrone est très intéressante pour l'étude des engrenages car elle va permettre d'isoler les motifs périodiques liés à un engrenement ou un arbre prédéfini. Il sera alors possible de faire du diagnostic sur cet élément.

### 2.3 Exploitation de la cyclostationnarité à l'ordre 2



**Figure n°4.** Moyenne et variance synchrone

La cyclostationnarité à l'ordre 2 par rapport à la période  $\theta_{motif}$  implique la périodicité du moment d'ordre 2 :

$$E[(s(\theta_1) - p(\theta_1)) \cdot (s^*(\theta_2) - p^*(\theta_2))] = C_{ss}(\theta_1, \theta_2) = C_{ss}(\theta + \theta_{motif}, \tau + \theta_{motif}) \quad (4)$$

$$\text{avec } \theta_1 = \theta + \frac{\tau}{2} \text{ et } \theta_2 = \theta - \frac{\tau}{2}.$$

Pour mettre en évidence la contribution cyclostationnaire, il suffit de calculer la variance sur l'ensemble des cycles enregistrés. En présence d'un

défaut, l'amplitude de la variance augmente (figure n°4).

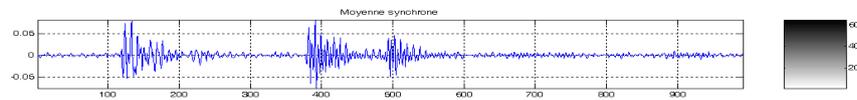
Pour mieux interpréter les effets d'un défaut d'engrenage sur la cyclostationnarité, on peut observer le spectre de Wigner Ville angulaire. Il est important de rappeler lors du calcul de ce spectre qu'il est nécessaire de retrancher la moyenne synchrone à chacun des cycles ; autrement dit de calculer ce spectre sur les résidus :  $r(\theta) = s(\theta) - p(\theta)$ .

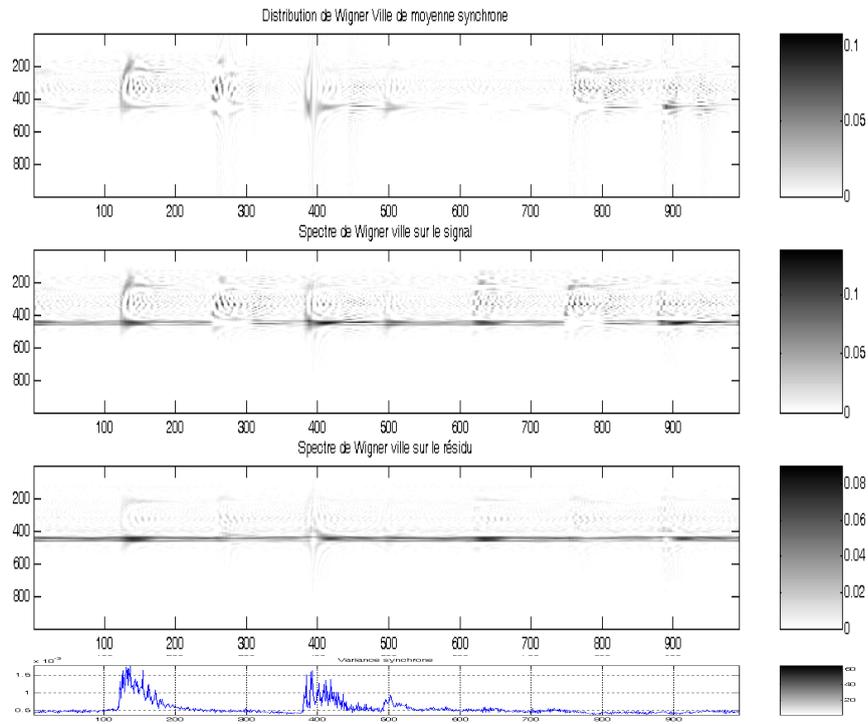
L'estimateur utilisera des moyennes sur plusieurs blocs pour réduire l'influence de  $b(\theta)$ .

$$C_{rr}(\theta, \tau) = r^*\left(\theta - \frac{\tau}{2}\right) \cdot r\left(\theta + \frac{\tau}{2}\right) \quad (5) \quad DWV(\theta, \nu) = TF_{|\tau}(C_{rr}(\theta, \tau)) \quad (6)$$

$$S\hat{W}V(\theta, \nu) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} DWV(\theta + k \cdot \theta_{motif}, \nu) \quad (7)$$

La figure n°5 permet de mettre en évidence l'influence de la moyenne synchrone sur le spectre de Wigner Ville. Elle montre la distribution de Wigner Ville calculée sur la moyenne synchrone (en haut), le spectre de Wigner Ville des résidus  $r(\theta)$  (en bas), et, les effets de la moyenne synchrone dans le calcul du spectre de Wigner Ville (figure du milieu).





**Figure n°5. Spectre de Wigner Ville**

Les excitations résultantes d'un défaut d'engrenage sont quasi périodiques et ne présentent donc que peu d'effet cyclostationnaire à l'ordre supérieur ou égal à 2. Elles entraînent par contre des variations de vitesse de la machine qui induisent des effets cyclostationnaires. Sur la figure 5, le spectre de Wigner Ville sur les résidus met en évidence une fréquence qui n'est autre qu'une résonance de la structure. Cette résonance est quasi-stationnaire dans le domaine temporel et présente dans un repère angulaire lié à la machine des fluctuations ayant des propriétés de cyclostationnarité à un ordre supérieur ou égal à 2. C'est pour cette raison que la résonance apparaît fortement sur le spectre de Wigner Ville.

Cette remarque indique le fait que les phénomènes cyclostationnaires dans un engrenage défectueux (écaillage) résultent non pas des propriétés cyclostationnaires de l'excitation mais plutôt des variations cyclostationnaires de la vitesse engendrée par la présence des défauts.

## **Conclusion**

L'échantillonnage angulaire permet une approche intéressante des signaux à tendance cyclostationnaire dans le domaine temporel. Il permet de mettre en évidence la contribution cyclostationnaire à l'ordre un (moyenne synchrone) et donc améliore grandement l'estimation du spectre de Wigner Ville. En travaillant dans ce domaine angulaire on se heurte cependant à une déformation des phénomènes physiques liés au temps. Ainsi, l'effet des filtres résultant de la réponse impulsionnelle de la structure (liée au temps) est modifié lors du passage au domaine angulaire. Nous poursuivons les travaux sur l'observation conjointe des signaux acquis sous échantillonnage angulaire et temporel et l'apport de chacune des méthodes sur le diagnostic.

Une étude à venir permettra de voir le comportement du spectre de Wigner Ville du résidu ainsi que de la distribution de Wigner Ville vis à vis de différents types de défauts. Il sera alors possible d'évaluer les informations portées par la partie cyclostationnaire à l'ordre 2.

## **Références Bibliographiques**

- Antoni Jérôme (2000) « Apport de l'échantillonnage angulaire et de la cyclostationnarité au diagnostic par analyse vibratoire des moteurs thermiques », thèse de doctorat en Signal Image Parole, INPG, Grenoble.
- Capdessus Cécile (1992) « Aide au diagnostic des machines tournantes par traitement du signal », thèse de doctorat en Signal Image Parole, INPG, Grenoble.
- El Badaoui Mohamed (1999) « Contribution au diagnostic vibratoire des réducteurs complexes à engrenages par l'analyse cepstrale », thèse de doctorat en Traitement du signal, Université Jean Monnet, St Etienne.
- Flandrin Patrick (1993) « Temps-fréquence », Hermes.