

Diagnostic d'un train d'engrenages par analyse cepstrale synchrone

M. El Badaoui, F. Guillet, N. Nejjar, P. Martini et J. Danière

Laboratoire d'analyse des Signaux et des processus industriels
I.U.T. de Roanne
20, avenue de Paris
42334 Roanne

RÉSUMÉ

Nous exposons dans cet article nos résultats concernant l'acquisition et le traitement de signaux vibratoires issus d'accéléromètres placés sur des réducteurs à engrenages. Nous montrons que l'analyse cepstrale pratiquée sur des signaux obtenus sous échantillonnage angulaire peut constituer un outil de diagnostic simple et efficace.

Nous avons calculé la contribution au cepstre de la modulation due à plusieurs périodes de rotation. Nous montrons que la somme des premiers pics cepstraux associés à chaque période est constante. Ce fait est confirmé par les résultats expérimentaux.

1. Introduction

La surveillance de l'état de santé des machines devient une activité de plus en plus stratégique dans la mesure où l'accent est mis sur la qualité, la sécurité et les nuisances. Dans ce domaine, nous nous intéressons plus particulièrement à la surveillance vibratoire des engrenages à partir de signaux accélérométriques. A peu près toutes les méthodes de traitement du signal connues à ce jour ont été utilisées pour étudier les engrenages [1] [2] [3] [4] [5] et [6]. Parmi elles, nous avons retenu l'analyse cepstrale pour sa simplicité et sa capacité à fournir des informations compactes faciles à interpréter et dont certaines sont indépendantes de l'amplitude des signaux et de la position du capteur.

Cette analyse est pratiquée de préférence sur des signaux acquis sous échantillonnage angulaire, c'est à dire commandé à partir d'un codeur optique incrémental placé sur l'arbre d'entrée du réducteur étudié. Cette procédure permet non seulement une atténuation efficace du bruit par moyennage synchrone, mais elle permet également d'éliminer l'effet des variations de vitesse, effet destructeur pour un cepstre obtenu sous échantillonnage temporel.

Après un bref rappel sur le cepstre d'énergie, nous calculons la contribution à ce dernier de la modulation du signal vibratoire provoquée par la rotation des différents éléments mécaniques. Cela nous permet de montrer que la somme des premiers pics cepstraux associés à chaque période de rotation est une constante égale à 0.5.

Nous présentons ensuite les cepstres obtenus d'une part à partir des signaux acquis au laboratoire sur un système motoréducteur à deux engrènements et d'autre part à partir de signaux fournis par le CETIM(*) concernant un système réducteur à un engrènement. Les résultats expérimentaux

ABSTRACT

In this article we present our work about retrieving and assessing methods for processing vibratory signal data from accelerometer positioned on gear systems. We will show that cepstral analysis of data retrieved through angular sampling method can be an effective tool to assess potential failures or defective parts.

We calculated to what extent cepstrum is modified by variations induced different rotational period. We will show that the cepstral peaks linked with each period is constant a fact which borne out by experimental result.

sont en accord avec nos prévisions théoriques, et permettent d'imaginer un outil de diagnostic simple et efficace pour des systèmes complexes d'engrènement.

2. Le cepstre d'énergie

Le cepstre d'énergie d'un signal $s(t)$ [7] [8] est défini par :

$$\tilde{s} = \text{TF}^{-1}[\text{Ln}|S(v)|] \quad (1)$$

avec $S(v) = \text{TF}[s(t)]$, TF signifiant la Transformée de Fourier.

Le signal d'engrènement est une répétition de chocs, théoriquement identiques, modulés en amplitude à la fréquence de rotation des roues [12]. La contribution d'une roue peut donc être considérée comme la convolution du signal qu'elle émet pendant une période de rotation a , par un peigne de N diracs distants de a , la durée du signal étant comprise entre $(N-1)a$ et Na . Ce peigne noté em_a est appelé terme d'écho multiple :

$$em_a = \sum_{n=0}^{N-1} \delta_{na} \quad (2)$$

Si $e_{\alpha, g} = \delta_0 + g \cdot \delta_{\alpha}$ est le terme d'écho simple de gain g , on sait que son cepstre d'énergie est donné par :

$$\tilde{e}_{\alpha, g} = \sum_{n \in \mathbb{Z}} \frac{(-1)^{n-1}}{2|n|} \cdot g^n \cdot \delta_{n\alpha} \quad (3)$$

S'il s'agit d'un écho distribué selon une distribution d : $e_d = \delta_0 + d$, alors son cepstre est donné par [10] :

(*) CETIM : Centre d'Etudes Techniques des Industries Mécaniques, 52 av. Felix Louat, 60300 Senlis.

$$\tilde{e}_d = \sum_{n \in \mathbb{Z}} \frac{(-1)^{n-1}}{2|n|} \cdot d^{*n} \quad (4)$$

où d^{*n} signifie que la distribution est convoluée n fois par elle-même. Dans tous les cas, le gain de l'écho doit être inférieur ou égal à l'unité.

2.1 Cepstre d'énergie d'écho multiple

Comme $TF[em_a] = \frac{1 - e^{-2\pi i v N a}}{1 - e^{-2\pi i v a}}$ et que

$TF[e_{\alpha, g}] = 1 + g \cdot e^{-2\pi i v \alpha}$ en vertu de l'équation (1) on a :

$$\begin{aligned} \tilde{em}_a &= \tilde{e}_{Na, -1} - \tilde{e}_{a, -1} \text{ c'est à dire} \\ \tilde{em}_a &= - \sum_{n \in \mathbb{Z}} \frac{1}{2|n|} \delta_{nNa} + \sum_{n \in \mathbb{Z}} \frac{1}{2|n|} \delta_{na} \quad (5) \end{aligned}$$

Seuls les pics positifs nous intéressent ici car les pics négatifs sont soumis au repliement.

La figure 1 représente le cepstre d'énergie d'un écho multiple (pas de 47), on retrouve le jeu de pics positif décroissant (pas de 47) et un jeu de pics négatif croissant (pas de 10) dû au repliement du cepstre.

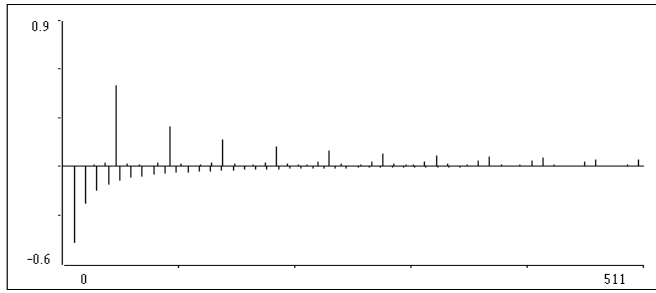


Figure 1 : 512 premiers points du cepstre d'énergie d'un écho multiple de 22 échantillons au pas de 47, calculé sur 1024 échantillons.

Dans notre cas nous avons la contribution de plusieurs cepstres d'écho multiple correspondant aux différentes périodes de rotation des organes tournants.

2.2 Cepstre d'énergie d'une combinaison de M termes d'échos multiples

Soit $d_{em} = \sum_{i=1}^M p_i \cdot em_{a_i}$, une telle

combinaison où les p_i sont les poids vérifiant $\sum_{i=1}^M p_i = 1$.

On a alors :

$$\begin{aligned} TF[d_{em}] &= \sum_{i=1}^M p_i \frac{1 - e^{-2\pi i v N a_i}}{1 - e^{-2\pi i v a_i}} = \\ &= \frac{\sum_{k=1}^M [p_k \cdot (1 - e^{-2\pi i v N a_k}) \cdot \prod_{i \neq k} (1 - e^{-2\pi i v a_i})]}{\prod_{i=1}^M (1 - e^{-2\pi i v a_i})} \quad (6) \end{aligned}$$

Le numérateur est de la forme $1 - D(v)$, avec $D(v) = \sum_j c_j e^{-2\pi i v d_j}$, correspondant à la TF d'un écho

distribué selon d où $d = \sum_j c_j \delta_{d_j}$ et $\sum_j c_j = 1$. Le cepstre

de la combinaison linéaire s'écrira donc :

$$\tilde{clem} = - \sum_{n \in \mathbb{Z}} \frac{1}{2|n|} d^{*n} + \sum_{i=1}^M [\sum_{n \in \mathbb{Z}} \frac{1}{2|n|} \delta_{na_i}] \quad (7)$$

On y retrouve les M peignes positifs décroissants au pas a_i , caractéristiques des M échos multiples, mais altérés par le cepstre de l'écho distribué. On ne retiendra que les M premiers décalages a_i de la distribution d , qui sont les seuls capables d'altérer les M peignes positifs :

$d = \sum_{i=1}^M (1 - p_i) \delta_{a_i} + \dots$. Cette modification n'est simple à calculer que pour $n = 1$:

$$\begin{aligned} clem(\tilde{n} = 1) &= - \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=1}^M (1 - p_i) \cdot \delta_{a_i} \\ &+ \sum_{i=1}^M \frac{1}{2} \cdot \delta_{a_i} = \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=1}^M p_i \cdot \delta_{a_i} \quad (8) \end{aligned}$$

On constate donc que la somme des premiers pics des M cepstres d'écho multiple est constante, égale à 0.5, et que l'amplitude de ces premiers pics correspond à la moitié des poids de la combinaison. Ce résultat peut être exploité pour réaliser le suivi de l'état d'un système complexe d'engrenages en cours de fonctionnement : si une roue développe un défaut, la modulation due à sa rotation s'accroît, donc le premier pic du cepstre associé à sa périodicité augmentera son amplitude au détriment des autres.

3. Résultats expérimentaux

3.1 Signal vibratoire

Pour un engrenage, le signal issu des vibrations peut se décomposer en une partie cinématique $s_e(t)$ appelée signal d'engrènement, convoluée par la réponse impulsionnelle de la structure mécanique $s_m(t)$, et une composante de bruit $b(t)$ dans laquelle sont rassemblées toutes les contributions indépendantes statistiquement de $s_e(t)$ et $s_m(t)$. Le signal $y(t)$ issu des vibrations d'un engrenage, s'écrit :

$$y(t) = s_e(t) * s_m(t) + b(t) \quad (9)$$

Les vibrations issues d'un engrenage sont produites principalement par le choc entre les dents des deux roues qui le composent.

Soit $s_e(t)$ le signal produit par le choc entre deux dents de l'engrenage. Ce signal est modulé en amplitude et en fréquence par les signaux $s_{r1}(t)$ et $s_{r2}(t)$, produits par la

rotation de la roue 1 et celle de la roue 2 [9]. Ces modulations peuvent être dues à un désalignement des axes, à un faux rond, balourd etc.. Le fait de procéder à des acquisitions sous échantillonnage angulaire nous permet de ne considérer que la modulation en amplitude [11]. En effet la modulation de fréquence, due à une variation instantanée de la vitesse de rotation du moteur, restera transparente avec ce type d'échantillonnage. Si τ_e est l'intervalle de temps séparant les chocs de la denture, le signal d'engrènement peut s'écrire :

$$s_e(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} s_c(t-n\tau_e) \cdot (1 + \sum_{m=-\infty}^{+\infty} s_{r1}(t-m\tau_{r1}) + \sum_{p=-\infty}^{+\infty} s_{r2}(t-p\tau_{r2})) \quad (10)$$

3.1 Réducteur à deux trains d'engrenages

Le réducteur choisi dans un premier temps est composé de deux trains d'engrenages (R1-R2 et R3-R4, voir figure 2). Ce réducteur est entraîné par un moteur électrique triphasé asynchrone et est chargé par un frein à poudre.

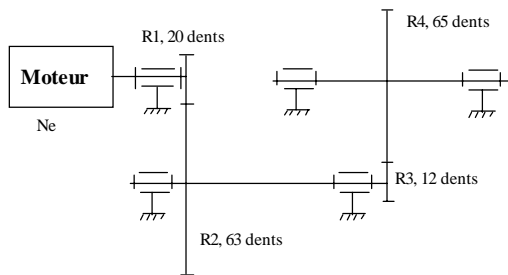


Figure 2 : Schéma cinématique du réducteur

La figure 3 présente le cepstre d'énergie du signal vibratoire issu du motoréducteur, obtenu après échantillonnage angulaire sur 65536 points. L'échantillonnage angulaire est fourni par le biais d'un codeur optique incrémental placé en bout d'arbre primaire. Nous avons réalisé des acquisitions représentant 256 points d'échantillons par tour de l'arbre primaire. On ne visualisera que la fenêtre utile, c'est à dire 4450 points. On y retrouve les peignes associés aux périodicités des trois axes de rotations.

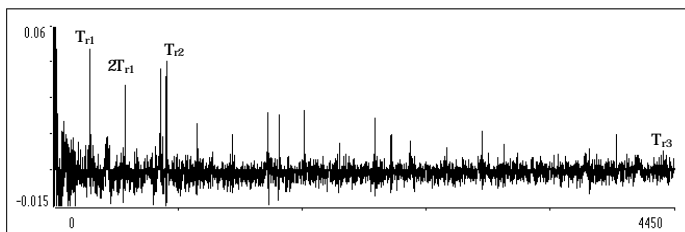


Figure 3 : Cepstre d'énergie des signaux vibratoires issus du motoréducteur en fonctionnement normal

T_{r1} est la période de rotation de l'arbre moteur, T_{r2} est la période de rotation de l'arbre intermédiaire, T_{r3} est la période de rotation de l'arbre de sortie.

La somme des premiers pics T_{r1} , T_{r2} et T_{r3} est égale à 0.43. On réalise un léger défaut de type choc sur l'arbre de sortie, et on calcule le cepstre d'énergie des signaux émis par le réducteur. On peut constater (figure 4) l'augmentation de l'amplitude du pic T_{r3} caractéristiques de la période de rotation de l'arbre de sortie au détriment des autres pics.

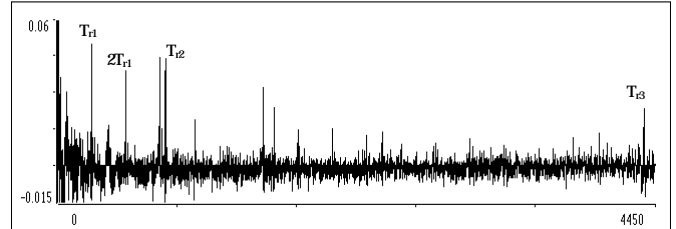


Figure 4 : Cepstre d'énergie avec défaut moyen

La somme des premiers pics T_{r1} , T_{r2} et T_{r3} est égale à 0.52.

On augmente l'intensité du défaut en sortie de l'arbre réducteur, et on recalcule le cepstre d'énergie des signaux associés. On constate (figure 5) que l'amplitude du pic T_{r3} augmente dans les mêmes proportions au détriment des autres. La somme des premiers pics T_{r1} , T_{r2} et T_{r3} est égale à 0.45.

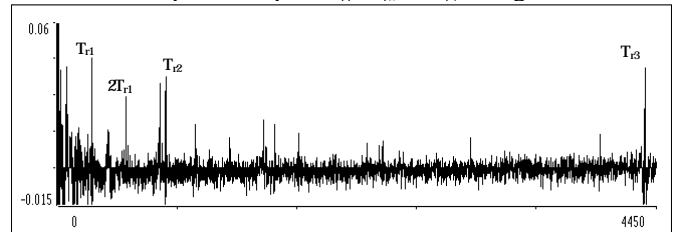


Figure 5 : Cepstre d'énergie avec défaut important

Les défauts provoqués sur ce banc d'essai ne sont pas réalistes, on montre dans le paragraphe suivant, l'application de cette méthode à des signaux plus réalistes extraits d'une campagne de mesures réalisée par le CETIM, sur un système industriel constitué d'un train d'engrenage.

3.2 Réducteur à un train d'engrenages

Les acquisitions ont été effectuées sur un banc d'essais d'engrenage de grandeur industrielle du CETIM fonctionnant 24h/24h. L'essai a duré 12 jours, les mesures ont été recueillies toutes les 24 heures. Bien que les acquisitions aient été faites de manière temporelle, l'utilisation du cepstre d'énergie peut être envisagée dans la mesure où la vitesse de rotation ainsi que la charge étaient maintenues constantes. Les figures 6 et 7 montrent l'évolution des premiers pics entre le 2^{ème} jour et le 12^{ème} jour.

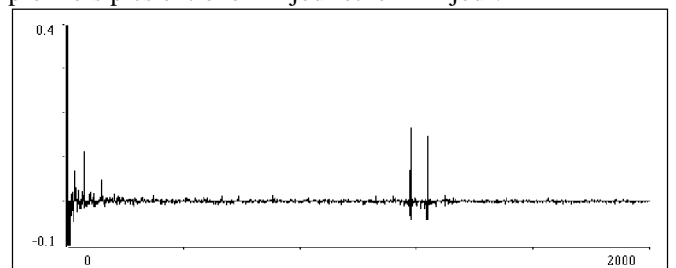


Figure 6 : Les deux premiers pics du cepstre d'énergie au 2^{ème} jour

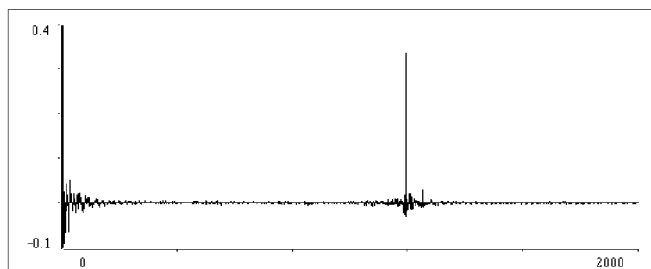


Figure 7 : Les deux premiers pics du cepstre d'énergie au 12^{ème} jour

Les premiers pics du cepstre d'énergie caractérisent les périodes de rotations des roues. Au 12^{ème}, jour on note un défaut sur une des dents de la roue 1 (écaillage de la dent); le pic correspondant a fortement augmenté au détriment de l'autre.

Sur la figure 8, on peut suivre l'évolution des premiers pics du cepstre d'énergie et de la somme des premiers pics sur une durée de 12 jours. On obtient une dégradation de la roue 1 qui accentue l'amplitude du pic cepstral dû à sa période de rotation. En contre partie, le pic cepstral de l'autre roue diminue. Globalement, la somme des premiers reste constante.

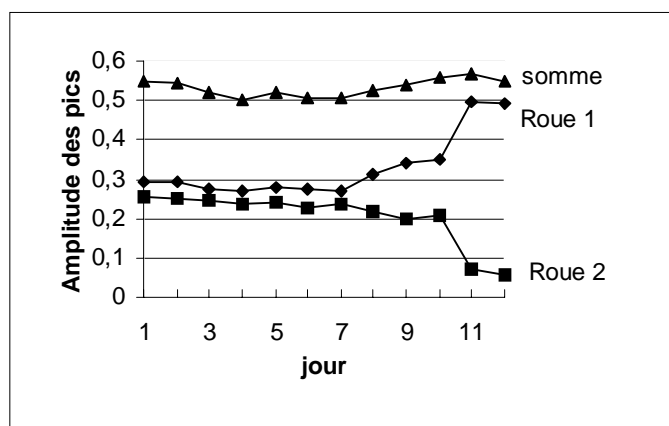


Figure 8 : évolution des premiers pics du cepstre d'énergie

En pratique, on trouve que la somme des premiers pics est comprise entre 0.43 et 0.52. Cette différence avec la théorie peut être due au repliement des pics négatifs du cepstre d'énergie et au fort niveau du bruit de fond du signal acquis.

4. Conclusion

Nous montrons dans cet article l'intérêt de l'analyse cepstrale associée à un échantillonnage angulaire. Les prévisions théoriques concernant la constance de la somme des premiers pics du cepstre d'énergie ont été vérifiées sur deux expérimentations différentes. Cette technique peut constituer un outil de diagnostic efficace et simple à interpréter.

5. Références

- [1] K. Drouiche, M. Sidhamed, Y. Grenier, « Détection de défauts d'engrenages par analyse vibratoire ». Traitement du signal vol 8 N° 5 p 331 (1992).
- [2] P.D. Mac Fadden, J.D. Smith. « A signal processing technique for locals defects in gear detection from the signal average of the vibration ». Pro. Instr. Mech. Eng., Vol 199 n°4, pp. 287-292, 1985.
- [3] I.M. Lebal, D. Brie, V. Begotto, M. Tomczak, « Détection de défauts d'engrenage par démodulation simultanée d'amplitude et de phase ». 2^{ème} conf. inter. Méthode de surveillance. Senlis France 10-12 oct 1995.
- [4] M. Chiollaz, P. Flandrin, N. Gache, « Utilisation de la représentation de Wigner-Ville comme outil de diagnostic des défauts de fonctionnement des moteurs thermiques ». 11^{ème} Colloque GRETSI, Nice 1987, pp 579-82.
- [5] J. Ondroubh, A. Chrapkova, J. Bilos, « Research based on modal parameters changes for crack détection ». 2^{ème} conf. Inter. sur les Meth. de Surv. et tech. de diagnostic acoustique et vibratoire. Senlis France 10-12 Oct. 1995.
- [6] D. Leducq, R. Schelegel, « Apports de l'analyse par ondelettes en surveillance et diagnostic sur installations industrielles ». 1^{ème} conf. Inter. sur les Meth. de Surv. et tech. de diagnostic acoustique et vibratoire. Senlis France 27-29 Oct. 1995.
- [7] B.P. Bogert, M.J.R. Healy, J.W. Tukey, « The frequency analysis of time series for echoes : Cepstrum, pseudo-autocovariance, cross-cepstrum and saphe cracking ». Proc. symp. time series analysis, M. Rosemblah (ed.), New York, Woley, 1963, pp 209-243.
- [8] A.V. Oppenheim « superposition in a class of no linear systems », Techn. Rept 432, Research Laboratory of Electronics, MIT, Cambridge, Mass., March 1965.
- [9] C. Capdessus, M. Sidahmed, J.L. Lacoume, « Apport de la théorie des processus cyclostationnaires à l'analyse et au diagnostic des engrenages ». 2^{ème} conf. inter. méthode de surveillance, Senlis France 10-12 Octobre 1995.
- [10] T. Fournel, Danière J., Moine M., Pigeon J., Courbon M., Schon J.P., « Utilisation du cepstre d'énergie pour la vélocimétrie par images de particules », traitement du signal vol.9 n°3 pp 267-271.
- [11] F. Crapart « Implantation d'algorithmes rapides sur processeur de traitement du signal. Application à l'analyse vibratoire de machines tournantes ». Thèse de l'Université de Reims Champagne-Ardenne, 1995.
- [12] R. B. Randall, « A new method of modeling gear faults ». Journal of Mechanical Design, April 1982, vol. 104, pp. 259-267.