



HAL
open science

Apport de la théorie des processus cyclostationnaires à l'analyse et au diagnostic des engrenages

Cécile Capdessus, Ménad Sidahmed, Jean-Louis Lacoume

► To cite this version:

Cécile Capdessus, Ménad Sidahmed, Jean-Louis Lacoume. Apport de la théorie des processus cyclostationnaires à l'analyse et au diagnostic des engrenages. 2ème conférence internationale. méthode de surveillance, 1995, Senlis, France. hal-02188493

HAL Id: hal-02188493

<https://hal.science/hal-02188493>

Submitted on 18 Jul 2019

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.

APPORT DE LA THEORIE DES PROCESSUS CYCLOSTATIONNAIRES A L'ANALYSE ET AU DIAGNOSTIC DES ENGRENAGES

Cécile Capdessus*, Menad Sidahmed**, Jean-Louis Lacoume*

* Centre d'Etude des Phénomènes Aléatoires et Géophysiques
ENSIEG, BP 46, 38402 Saint Martin d'Hères Cedex

** Centre Technique des Industries Mécaniques
52 av. Félix Louat, BP 67, 60304 Senlis Cedex

SUMMARY

This paper introduces a new vibration analysis method based on the spectral correlation function. This method is shown to be an extension of the well-known synchronized averaging method. Each of the two methods is a cyclostationary analysis of the signal, respectively at first and second order. The advantages of spectral correlation function are discussed.

RESUME

Cet article présente un nouvel outil de surveillance vibratoire des machines tournantes. On montre comment l'outil classique qu'est le moyennage synchrone est en fait une étude cyclostationnaire à l'ordre un. On présente alors une extension de l'analyse cyclostationnaire à l'ordre deux par l'application aux vibrations de la corrélation spectrale. Les avantages de ce nouveau paramètre sont discutés.

INTRODUCTION

L'étude présentée dans cet article se place dans le cadre de la maintenance prédictive des machines. La maintenance prédictive consiste à contrôler en permanence l'état des machines sur un site et à tâcher de prévoir les avaries le plus tôt possible, de façon à organiser l'arrêt des appareils pour réparation en affectant le moins possible la rentabilité du dispositif. Ce contrôle permanent comprend plusieurs phases. Il est d'abord nécessaire de définir un certain nombre de paramètres (température et composition du lubrifiant, niveau vibratoire, ...) significatifs de l'état de la machine, qui composeront la "signature" de la machine. Si ces paramètres sont judicieusement choisis, on doit pouvoir classer une machine à partir de sa signature, dans la classe des machines saines, ou celle des machines détériorées. On peut alors relever régulièrement les valeurs de ces paramètres, et les comparer à des signatures type, en appliquant par exemple des méthodes de traitement de données [1].

Le comportement vibratoire des machines a été de longue date utilisé pour caractériser leur état, mais les paramètres observés habituellement (niveau vibratoire global, amplitude de certains harmoniques, ...) ont été choisis intuitivement et sont pour l'instant peu nombreux. L'objet de cette étude est de montrer comment le concept de processus cyclostationnaires, développé dans le domaine du traitement du signal, peut apporter à l'analyse vibratoire de nouveaux outils pour le diagnostic des machines tournantes. Nous mettons en évidence que ce concept recouvre en fait une méthode classiquement utilisée pour le diagnostic : le moyennage synchrone. Il s'accorde ainsi avec l'approche intuitive qui a permis de développer les premières méthodes d'analyse vibratoire. Le fait d'aborder le problème de façon plus théorique va nous permettre de proposer un nouveau paramètre, la corrélation spectrale, dont nous verrons qu'elle est une extension du moyennage synchrone. Nous restreignons notre étude aux vibrations de réducteurs à engrenages, de façon à pouvoir mettre en parallèle l'étude théorique de ce nouveau paramètre et les résultats obtenus sur une expérimentation. Cependant la présentation des processus cyclostationnaires reste tout à fait générale, et l'étude peut être étendue aux vibrations d'autres types de machines tournantes.

1 PROCESSUS CYCLOSTATIONNAIRES

On a coutume de réserver l'analyse non-stationnaire à des signaux vibratoires dont la non-stationnarité est une forte variation de fréquence : phénomènes transitoires comme le démarrage des machines, variations rapides des fréquences de résonance de la structure étudiée (moteur diesel)... Les vibrations d'un engrenage qui tourne à vitesse constante étant périodiques, on classe celles-ci parmi les signaux stationnaires. Mais le terme de non-stationnarité recouvre en fait une classe plus vaste que celle des signaux dont le contenu fréquentiel varie au cours du temps. En effet, la stationnarité est une propriété statistique qui n'est pas forcément vérifiée sur un signal dont les composantes fréquentielles ne varient pas. On peut montrer que lorsqu'un signal est stationnaire, les composantes fréquentielles contenues dans ce signal ne peuvent pas être corrélées entre elles. Or, les vibrations d'un engrenage, comme on le verra plus en détail à partir du modèle, comprennent plusieurs familles de composantes fréquentielles harmoniques provenant d'un même phénomène physique, engrenement ou rotation des roues. Il n'est pas réaliste de supposer que les harmoniques d'une même famille sont complètement décorrélés entre eux. Compte tenu du caractère périodique du signal, on peut penser qu'il appartient à une classe particulière de signaux non-stationnaires : les signaux cyclostationnaires.

1-1 Cyclostationnarité, définition [2,3].

Stationnarité : un signal est stationnaire à l'ordre n si ses moments temporels jusqu'à l'ordre n ne varient pas au cours du temps.

Cyclostationnarité : un signal est cyclostationnaire à l'ordre n si ses moments temporels jusqu'à l'ordre n dépendent de t de façon périodique. La fréquence α de cette périodicité est la fréquence de cyclostationnarité du signal.

Cyclostationnarité à l'ordre 1 :

La moyenne d'une fonction aléatoire du temps $x(t)$ est définie par $m(t) = E[x(t)]$. Le $E[.]$ représente une moyenne statistique, c'est à dire une moyenne sur toutes les valeurs que peut prendre la fonction $x(t)$ pour une date t donnée, pondérée par la probabilité associée à ces valeurs, ou encore moyenne sur l'ensemble des réalisations possibles du signal (moyenne d'ensemble). Dans le cas général, cette moyenne dépend donc du temps t . Dans le cas d'un signal stationnaire cette moyenne est constante, et pour un signal cyclostationnaire, elle est périodique.

Cyclostationnarité à l'ordre 2 :

La fonction d'autocorrélation de $x(t)$ est définie par $R_X(t, \tau) = E[x(t+\tau/2) \cdot x^*(t-\tau/2)]$. Dans le cas général, cette autocorrélation dépend donc de la date moyenne t à laquelle on se place et de l'écart τ entre les deux observations. Le comportement de l'autocorrélation vis-à-vis de la variable t définit ses propriétés de stationnarité, cyclostationnarité ou non-stationnarité au sens large.

1-2 Grandeurs caractéristiques

La grandeur caractéristique des propriétés statistiques du signal au premier ordre est sa moyenne.

Au second ordre, quatre grandeurs différentes peuvent caractériser les propriétés statistiques du signal.

En effet, l'autocorrélation du signal étant fonction des deux variables t , le temps, et τ , la distance temporelle entre les deux variables dont on étudie le lien, on peut s'intéresser à sa composition fréquentielle suivant chacune de ces deux variables. L'étude de la

composition fréquentielle selon la variable τ fait apparaître les périodicités contenues dans le signal, tandis que l'étude de la composition fréquentielle selon la variable t met en évidence la présence de périodicité sous-jacentes. Les quatre représentations possibles qui en découlent pour un signal au second ordre sont illustrées par la figure 1. La fréquence obtenue par TF (transformée de Fourier) selon la variable τ est la fréquence spectrale f , et celle qu'on obtient par TF selon t est appelée fréquence cyclique, et notée α .

Les deux représentations les mieux adaptées aux signaux cyclostationnaires sont l'autocorrélation cyclique et la corrélation spectrale, sur lesquelles apparaissent des raies en fréquence cyclique aux fréquences de cyclostationnarité du signal. Les signaux que nous étudions présentant des raies spectrales à la fois en fréquence spectrale f et en fréquence cyclique α , nous avons choisi de leur appliquer la corrélation spectrale, qui met en évidence ces deux types de périodicités.

La corrélation spectrale, dont l'expression est $S_X^\alpha(f) = E[X(f+\alpha/2).X^*(f-\alpha/2)]$, où $X[f]$ est la transformée de Fourier de $x(t)$, a de plus l'avantage d'être une mesure du degré de corrélation entre les différentes composantes fréquentielles du signal, ce qui a une interprétation physique directe dans le cas des signaux d'engrenage.

1-3 Estimation des grandeurs caractéristiques

Estimation de la moyenne.

La moyenne étant périodique, elle ne peut être estimée par simple moyennage temporel. Le signal cyclostationnaire n'est plus supposé ergodique, mais cycloergodique. C'est-à-dire que la moyenne statistique est maintenant remplacée par un moyennage temporel périodique à la fréquence de cyclostationnarité du signal, soit

$$m(t) = \frac{1}{2.N} \cdot \sum_{n=-N}^N x(t-n/\alpha_0) \text{ où } \alpha_0 \text{ est la fréquence de cyclostationnarité du signal.}$$

Estimation de la corrélation spectrale

La corrélation spectrale n'est autre que l'interspectre entre deux versions du signal décalées en fréquence. On peut donc l'estimer par les méthodes classiques d'analyse interspectrale, qui sont le périodogramme moyenné et le périodogramme lissé. Pour des raisons de complexité et de rapidité des calculs, nous avons opté pour l'estimation par lissage en fréquence.

Le principe de la méthode est donné par la figure 2. Deux décalages fréquentiels sont effectués (en multipliant le signal par une exponentielle complexe), de $+\alpha/2$ et $-\alpha/2$, et l'on obtient ensuite par TF les deux signaux $X(f+\alpha/2)$ et $X(f-\alpha/2)$. L'interspectre de ces deux signaux est alors estimé par produit et lissage fréquentiel. Les propriétés de cet estimateur, soit le biais et la variance, sont déduites directement des propriétés classiques du périodogramme lissé.

1-4 Normalisation - résolution

Il est intéressant de normaliser la corrélation spectrale par l'énergie des composantes dans le spectre, de façon à mettre en évidence aussi bien des corrélations entre harmoniques de très faible énergie qu'entre les principaux harmoniques du spectre. On obtient alors la cohérence spectrale, dont l'expression est :

$$C_X^\alpha(f) = \frac{S_X^\alpha(f)}{\sqrt{|S_X(f+\frac{\alpha}{2})| \cdot |S_X(f-\frac{\alpha}{2})|}}$$

où $S_X(f)$ est le spectre de puissance du signal, et $S_X^\alpha(f)$ sa corrélation spectrale.

La cohérence spectrale est une grandeur comprise entre 0 et 1 qui mesure le degré de corrélation entre les deux composantes aux fréquences $f+\frac{\alpha}{2}$ et $f-\frac{\alpha}{2}$. Elle est nulle pour deux composantes complètement décorrélées, et égale à un pour deux composantes complètement corrélées, ceci quelle que soit l'énergie de ces composantes. Pour $\alpha = 0$, la corrélation spectrale est égale au spectre de puissance, et la cohérence spectrale est égale à 1.

Dans le cas de notre étude, le principal intérêt que présente ce paramètre est sa résolution en fréquence cyclique. En effet, un lissage est effectué en fréquence spectrale pour améliorer l'estimation, mais ce lissage n'affecte pas la résolution en fréquence cyclique, qui ne dépend que de la durée du signal. Si T est la durée totale du signal et L la largeur de la fenêtre de lissage en nombre d'échantillons, les résolutions respectives en fréquence spectrale f et cyclique α sont données par :

$$\Delta f = L/T \text{ et } \Delta \alpha = 1/T$$

On peut donc améliorer la qualité de l'estimateur en jouant sur la fenêtre de lissage, sans nuire au pouvoir de séparation en fréquence cyclique.

2 MODELE DES VIBRATIONS ET ANALYSE CYCLOSTATIONNAIRE

2-1 Modèle des vibrations

Les vibrations d'un engrenage sont produites principalement par le choc entre les dents des deux roues qui le composent. Cette vibration, appelée signal d'engrènement, subit un filtrage causé par la structure de la machine entre la source et le point d'enregistrement. Nous supposons que ce filtrage est linéaire, et prendrons pour modèle du signal enregistré, le modèle du signal source. De nombreux modèles ont été proposés pour les vibrations d'un engrenage, mais la plupart s'inspirent d'une étude de base qu'a fait W.D. Mark, à partir de laquelle nous avons établi directement notre modèle.

D'après Mark [4], le signal d'engrènement correspond à la déviation de la position du point d'engrènement par rapport au mouvement de rotation parfait qui serait celui d'un engrenage idéal soumis à une charge nulle. Cette déviation est appelée erreur de transmission, et ses composantes sont d'une part la déviation des dents sous la charge, et d'autre part les déviations du profil de la dent par rapport au profil idéal. Nous ne rapporterons pas ici les détails des calculs conduits par Mark et admettrons que l'erreur de transmission a pour expression :

$$s(x) = s_e(x) \cdot (W + s_m(x) + s_1(x) + s_2(x))$$

Les termes $s_m(x)$ et $s_e(x)$ sont obtenus par intégration le long des lignes de contact de l'engrenage. Or, le nombre de paires de dents en contact varie périodiquement au cours du temps, avec une fréquence f_e , fréquence de contact entre les dents, dite fréquence d'engrènement. Ces termes sont donc périodiques à la fréquence f_e .

Les termes $s_1(x)$ et $s_2(x)$ représentent respectivement pour les roues 1 et 2 les phénomènes liés aux déviations du profil des dents par rapport à leur profil idéal. Ces

déviations étant différentes d'une dent à l'autre, chaque terme $s_i(t)$ est périodique à la fréquence de rotation f_i de la roue associée.

Les différentes fréquences intervenant dans le modèle sont liées par la relation

$$f_e = N_1 \cdot f_1 = N_2 \cdot f_2.$$

Dans le signal interviennent donc trois termes périodiques $s_e(x) \cdot (W + s_m(x))$, $s_e(x) \cdot s_1(x)$ et $s_e(x) \cdot s_2(x)$, de fréquences respectives f_e , f_1 et f_2 . Chacun de ces termes peut se décomposer en série de Fourier, et donc être vu comme une somme de fréquences pures.

La variable x n'est pas le temps, mais une variable liée à la position angulaire des roues. Normalement, cette variable dépend linéairement du temps, mais de petites fluctuations aléatoires peuvent intervenir, et se traduire sur les fréquences pures par une phase aléatoire.

Si un défaut apparaît sur la roue i , d'après notre modèle il se manifestera sur le terme $s_e(x) \cdot s_i(x)$. Nous nous intéresserons donc aux changements affectant la famille de raies associée : apparition de nouvelles raies ou changement d'amplitude.

Etudier les fréquences de cyclostationnarité du signal revient à étudier les périodicités apparaissant dans sa moyenne et son autocorrélation. Dans cette étude nous laissons de côté le terme périodique à la fréquence d'engrènement, car il a été montré [5] que celui-ci ne permet pas de détecter le défaut.

2-2 Cyclostationnarité à l'ordre un

Les deux familles de raies qui nous intéressent peuvent s'écrire :

$$s_e(x) \cdot s_i(x) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} a_{n,i} \cdot \exp(2\pi j n f_i t + j \cdot \Phi_n + j \cdot \delta\Phi_i)$$

où $\delta\Phi_i$ est une variable aléatoire centrée modélisant les perturbations de la position angulaire de la roue i au cours du temps. Cette variable aléatoire apparaît donc lorsqu'on passe de la variable x au temps t .

Les variations aléatoires de la position angulaire étant forcément faibles devant un tour de roue, on peut supposer que $\delta\Phi_i \ll 2\pi$. D'où $\exp(j \cdot \delta\Phi_i) \approx 1 + j \cdot \delta\Phi_i$, et $\exp(2\pi j n f_i t + j \cdot \Phi_n + j \cdot \delta\Phi_i) \approx \exp(2\pi j n f_i t + j \cdot \Phi_n) \cdot (1 + j \cdot \delta\Phi_i)$

Chaque composante sinusoïdale comprend donc un terme certain $a_{n,i} \cdot \exp(2\pi j n f_i t + j \cdot \Phi_n)$ et un terme aléatoire $a_{n,i} \cdot \exp(2\pi j n f_i t + j \cdot \Phi_n) \cdot j \cdot \delta\Phi_i$ périodiques à la même fréquence $n f_i$.

Etude à l'ordre un, moyenne du signal.

La moyenne de chaque terme sinusoïdal, compte tenu du fait que $\delta\Phi_i$ est une V.A. centrée, est égale à $a_{n,i} \cdot \exp(2\pi j n f_i t + j \cdot \Phi_n)$. Le signal est donc cyclostationnaire à l'ordre un, et ses fréquences de cyclostationnarité sont f_1 et f_2 . Un signal qui comprend ainsi deux fréquences de cyclostationnarité non proportionnelles est dit cyclostationnaire au sens large. On voit donc que l'étude au premier ordre fait perdre toute information relative à la composante aléatoire.

2-3 Cyclostationnarité à l'ordre deux

Dans l'autocorrélation apparaîtront des termes de la forme :

$E[a_{n,i} \cdot \exp(2\pi j n f_i t + j \cdot \Phi_n + j \cdot \delta\Phi_i) \cdot (a_{m,j} \cdot \exp(2\pi j m f_j (t-\tau) + j \cdot \Phi_m + j \cdot \delta\Phi_j))^*]$ qui sont des termes d'intercorrélation entre deux composantes qui appartiennent à la même famille de raies si $i=j$, et à deux familles différentes sinon. En faisant la même approximation que précédemment,

$$E[a_{n,i} \cdot \exp(2\pi j n f_i t + j \cdot \Phi_n + j \cdot \delta \Phi_i) \cdot (a_{m,j} \cdot \exp(2\pi j m f_j (t-\tau) + j \cdot \Phi_m + j \cdot \delta \Phi_j))^*] \approx$$

$$E[a_{n,i} \cdot \exp(2\pi j n f_i t + j \cdot \Phi_n) \cdot (1 + j \cdot \delta \Phi_i) \cdot ((a_{m,j} \cdot \exp(2\pi j m f_j (t-\tau) + j \cdot \Phi_m))^* \cdot (1 - j \cdot \delta \Phi_j))] =$$

$$a_{n,i} \cdot a_{m,j}^* \cdot \exp(2\pi j (n f_i - m f_j) t + 2\pi j m f_j \tau + j \cdot (\Phi_n - \Phi_m)) \quad (1)$$

$$+ a_{n,i} \cdot a_{m,j}^* \cdot \exp(2\pi j (n f_i - m f_j) t + 2\pi j m f_j \tau + j \cdot (\Phi_n - \Phi_m)) \cdot j \cdot E[\delta \Phi_i] \quad (2)$$

$$+ a_{n,i} \cdot a_{m,j}^* \cdot \exp(2\pi j (n f_i - m f_j) t + 2\pi j m f_j \tau + j \cdot (\Phi_n - \Phi_m)) \cdot j \cdot E[-\delta \Phi_j] \quad (3)$$

$$+ a_{n,i} \cdot a_{m,j}^* \cdot \exp(2\pi j (n f_i - m f_j) t + 2\pi j m f_j \tau + j \cdot (\Phi_n - \Phi_m)) \cdot E[\delta \Phi_i \cdot \delta \Phi_j] \quad (4)$$

Le terme (1) existe dans tous les cas de figure. Les termes (2) et (3) s'annulent car $\delta \Phi_i$ et $\delta \Phi_j$ sont centrées. Les V.A. $\delta \Phi_i$ et $\delta \Phi_j$ peuvent être supposées indépendantes lorsque $i \neq j$ puisqu'elles ne concernent pas la même roue. Le terme (3) n'est donc non nul que si $i=j$, c'est-à-dire si les deux harmoniques appartiennent à la même famille et concernent la même roue.

On voit que les termes (1) et (4) sont périodiques en t de fréquence $n.f_i - m.f_j$. Dans le cas où $i=j$, ce qui veut dire que les deux composantes appartiennent à la même famille, on va donc voir apparaître sur la cohérence spectrale deux séries de raies de fondamental f_1 (ou f_2). Dans le cas où $i \neq j$, on mesure la corrélation entre deux composantes n'appartenant pas à la même famille, et d'autres raies vont apparaître aux positions $n.f_i - m.f_j$ mais de moindre amplitude puisque la part dues aux composantes aléatoires est nulle.

Le signal est donc cyclostationnaire au sens large à l'ordre 2, de fréquences de cyclostationnarité f_1 et f_2 .

Remarque :

Il est intéressant de calculer un cummulant d'ordre deux, au lieu d'un moment d'ordre deux. Cela revient à calculer le moment d'ordre deux du signal privé de sa composante cyclostationnaire à l'ordre un, soit sa moyenne périodique. Il faut donc d'abord retrancher du signal ses composantes certaines $a_{n,i} \cdot \exp(2\pi j n f_i t + j \cdot \Phi_n)$ et ne conserver que les composantes aléatoires $a_{n,i} \cdot \exp(2\pi j n f_i t + j \cdot \Phi_n) \cdot j \cdot \delta \Phi_i$. Il ne reste alors plus dans l'autocorrélation que les termes $a_{n,i} \cdot a_{m,j}^* \cdot \exp(2\pi j (n f_i - m f_j) t + 2\pi j m f_j \tau + j \cdot (\Phi_n - \Phi_m)) \cdot E[\delta \Phi_i \cdot \delta \Phi_j]$ relatifs aux composantes aléatoires et qui sont les termes cyclostationnaires strictement à l'ordre deux.

On voit donc que l'avantage d'une étude à l'ordre deux par rapport à l'étude à l'ordre un est de conserver l'information sur les composantes aléatoires du signal.

3 SIGNAUX REELS

Les signaux sur lesquels nous avons travaillé sont des vibrations d'engrenages qui nous ont été fournies par le CETIM⁰. Les caractéristiques de ces signaux sont les suivantes :

L'expérimentation comprend un moteur, un réducteur de bouclage (dont les roues ont respectivement 40 et 42 dents) et le réducteur étudié sur lequel est placé le point de mesure. Le réducteur étudié est composé de deux roues comportant respectivement 20 et 21 dents. L'arbre d'entraînement de ce réducteur tourne à la vitesse de 1000 tours/mn, soit 16,67 Hz. Un enregistrement a été effectué chaque jour pendant 13 jours, la machine ayant tourné en permanence pendant les 13 jours. La fréquence d'échantillonnage est de 20 kHz. Chaque enregistrement comporte 60 160 points. Au cours de l'expérimentation,

⁰ Centre Technique des Industries Mécaniques, SENLIS

l'engrenage passe de l'état de bon fonctionnement à celui d'engrenage détérioré. On sait que le défaut qui apparaît est un écaillage.

3-1 Signaux réels. Adéquation du modèle.

La figure 3 représente les vibrations en temps pour chaque jour de l'expérimentation. La figure 4 représente la transformée de Fourier de chaque enregistrement sur 16384 échantillons, soit 0,8 s de signal. On remarque sur ces figures que l'apparition du défaut n'est visible sur ces représentations qu'à partir du 12ème jour d'expérimentation. Toute méthode pouvant permettre de diagnostiquer l'engrenage plus tôt est donc intéressante.

D'autre part on constate que l'aspect du spectre varie considérablement d'un jour sur l'autre. En particulier, l'harmonique d'engrènement le plus élevé est soit le second soit le quatrième, et ces variations d'amplitudes n'ont pas l'air d'être liées à l'apparition du défaut. Cette absence de reproductibilité fait qu'on ne peut pas prendre pour signature le spectre des vibrations tel quel. Il nous faut trouver des paramètres qui soient plus stables d'un jour sur l'autre et plus caractéristiques de l'apparition du défaut.

Pour déterminer de tels paramètres et pour valider le modèle que nous avons choisi, il est nécessaire d'observer plus en détail l'aspect des vibrations. On retrouve bien sur le spectre les trois familles de raies prévues par le modèle. Les harmoniques d'amplitude prépondérante apparaissant sur le spectre sont caractéristiques du phénomène d'engrènement. Le fondamental de cette famille d'harmoniques est la fréquence d'engrènement $f_e = 330\text{Hz}$. On constate également l'apparition des deux familles de raies liées à la forme des roues. La figure 5 montre une partie du spectre comprise entre deux harmoniques d'engrènement, en échelle logarithmique. On voit bien comment ces deux familles d'harmoniques, appelées bandes latérales, découpent cet intervalle en 20 et 21 intervalles réguliers respectivement. Des raies verticales sont tracées aux emplacements des harmoniques prévus par le modèle. C'est à mi-distance entre les deux harmoniques d'engrènement que les deux familles de raies sont le mieux séparées en fréquence, mais c'est aussi l'endroit du spectre où elles sont de plus faible amplitude. Ceci confirme l'hypothèse d'une modulation du phénomène d'engrènement aux fréquences de rotation des roues.

La figure 6 est une "loupe" encore plus fine sur une partie du spectre. Ce grossissement nous permet de constater que chaque harmonique des bandes latérales a une certaine largeur de bande, de 5 à 10 Hz environ. En nous référant à notre modèle, nous pouvons expliquer cette "épaisseur" des harmoniques par une modulation de phase due au fait que la variable x n'est pas exactement une fonction linéaire du temps.

3-2 Etude cyclostationnaire au premier ordre

Pour pouvoir pratiquer le moyennage synchrone sur un signal numérisé, il faut que l'acquisition ait été synchronisée sur la période du signal étudié, de façon à pouvoir sommer des échantillons correspondant exactement à la même position angulaire. Or, le signal que nous étudions a été enregistré avec une fréquence d'échantillonnage quelconque. Aussi nous ne pouvons pratiquer le moyennage synchrone qu'en commettant une erreur. Cependant cette erreur est au plus d'un échantillon et peut être considérée comme une variable aléatoire centrée qui s'élimine sous l'effet du moyennage. Le signal présentant deux fréquences de cyclostationnarité f_1 et f_2 , lorsqu'on pratique le moyennage synchrone pour détecter l'un des deux phénomènes périodiques, l'autre disparaît. En effet, si l'on se synchronise sur la fréquence f_1 , tous les termes à la fréquence f_2 se comportent vis-à-vis du moyennage comme des sinusoides à phase aléatoire équirépartie sur $[0, 2\pi]$. On doit donc effectuer ce moyennage deux fois respectivement avec les deux fréquences de cyclostationnarité.

Les figures 7-a et 7-b montrent le résultat du moyennage synchrone pour chacune des deux roues. Ce moyennage est pratiqué sur le maximum de tranches, compte tenu de la

durée des signaux. Le résultat est donné pour quelques jours de l'expérimentation. On peut constater sur ces courbes que ce moyennage permet en effet de séparer les contributions des deux roues. Cependant, le défaut n'est visible sur ces résultats qu'à partir du 12^{ème} jour d'expérimentation, date à laquelle il est bien visible sur le signal temporel. Ce manque d'efficacité peut avoir plusieurs explications, outre le fait que l'acquisition n'a pas été synchrone. La présence du défaut se manifeste peut-être dans la phase aléatoire des harmoniques. Or, on a vu que ce phénomène aléatoire est "tué" par le moyennage. Il ne ressort en fait que dans l'analyse cyclostationnaire au second ordre du signal.

3-3 Etude cyclostationnaire au second ordre

La cohérence spectrale est estimée pour chaque jour d'expérimentation dans les conditions suivantes :

Les vibrations sont filtrées autour du second harmonique d'engrènement, qui est en général le plus élevé, avec une largeur de bande égale à la fréquence d'engrènement. Puis le signal filtré est démodulé et ramené autour de la fréquence d'engrènement, et sous-échantillonné d'un facteur 16. Ces filtrage et sous-échantillonnage sont pratiqués pour réduire d'une part le temps de calcul et la place mémoire occupée par le résultat, et d'autre-part la quantité d'information à interpréter.

La corrélation spectrale est estimée par lissage fréquentiel, avec lissage sur par une fenêtre de largeur 50 échantillons, ce qui correspond à peu près à la largeur de bande des harmoniques. La cohérence spectrale est ensuite estimée pour les seules composantes dont l'amplitude dépasse un certain seuil. En effet, comme on divise la corrélation spectrale par l'énergie des composantes du spectre, si cette énergie est très faible, on risque d'obtenir une cohérence spectrale élevée pour des composantes n'étant en fait que du bruit. Ce seuillage réduit le support de la cohérence spectrale à un "triangle" correspondant aux cohérences entre composantes non négligeables.

La cohérence spectrale présentant diverses propriétés de symétrie [2], nous ne représentons que le cadran correspondant aux fréquences spectrales et cycliques positives. Seuls sont représentés les niveaux de cohérence supérieurs à 0,7, les cohérences plus basses étant considérées comme non significatives.

La figure 8 représente la cohérence spectrale des vibrations, ainsi qu'une cohérence spectrale schématique donnant l'emplacement des fréquences de cyclostationnarité prévues par le modèle. Les raies apparaissant en fréquence cyclique confirment le caractère cyclostationnaire des vibrations. On constate la présence d'autres raies de moindre importance dont les fréquences cycliques ne semblent pas présenter de dénominateur commun. Ceci peut s'expliquer par la présence du terme certain pour chaque harmonique, d'où la présence de raies aux fréquences cycliques $n.f_1 - m.f_2$. Lorsque l'engrenage se détériore, le terme aléatoire prend de l'importance relativement au terme certain, et les cohérences entre harmoniques n'appartenant pas à la même famille de raies diminuent.

L'information fournie sous forme de surface étant trop "touffue" pour être interprétée directement, il est intéressant de la réduire, soit en faisant des coupes, soit en faisant des projections. La figure 9 représente la projection de la cohérence spectrale sur l'axe des fréquences cycliques pour les jours 2 et 13 de l'expérimentation. On voit émerger distinctement les raies correspondant aux fréquences de cyclostationnarité prévues par notre modèle : soit tous les multiples des fréquences de rotation. Cette figure présente également l'évolution des raies observées sur ces projections. On suit pour les 12 jours l'évolution d'un paramètre qui est le rapport entre les amplitudes des raies sortant respectivement aux fréquences cycliques $n.f_1$ et $n.f_2$. Cette courbe est tracée pour $n=4$ et $n=2$ (soit les fréquences cycliques égales à deux fois et quatre fois les fréquences de rotation). On constate qu'il se produit une nette cassure à partir du neuvième jour, quel que soit l'ordre de l'harmonique. Les raies appartenant à la famille de la roue à 21 dents

prédominant donc globalement jusqu'au huitième jour. A partir du neuvième jour, l'autre famille de raies devient plus présente, et cette évolution se poursuit jusqu'au treizième jour, où seule la famille de raies de la roue à 20 dents apparaît. Or on sait que c'est sur cette roue qu'apparaît un défaut. Il semble donc que la détérioration se traduit sur la cohérence spectrale par une intensification des liens entre les harmoniques de la famille correspondante (ou apparition de nouveaux harmoniques).

Cette hypothèse est confirmée par la figure 10. Cette figure représente pour chaque jour de l'expérimentation la cohérence spectrale pour les deux fréquences cycliques $\alpha_1 = 2.f_1$ et $\alpha_2 = 2.f_2$. On peut constater que pour la roue qui s'abîme, de nouveaux liens apparaissent, révélateurs de la présence de nouveaux harmoniques. Or, rappelons que le signal étant filtré autour d'un harmonique d'engrènement et sur une largeur de bande f_c , ces nouveaux harmoniques sont donc des harmoniques d'ordre élevé de la modulation à la fréquence de la roue 20, ce qui veut dire que la forme de cette modulation s'éloigne de celle d'une sinusoïde. Cela correspond tout à fait à ce qu'on constate sur le signal temporel.

CONCLUSION

On a montré dans cet article que le moyennage synchrone n'est autre qu'une étude cyclostationnaire à l'ordre un du signal, et que cette étude peut s'étendre à l'ordre deux. Le paramètre choisi pour mener cette étude cyclostationnaire à l'ordre deux est la cohérence spectrale. On explique comment la corrélation spectrale permet de mettre en évidence la présence de phénomènes aléatoires sur lesquels on perd toute information à l'ordre un. L'étude de ces phénomènes aléatoires permet de détecter l'apparition d'un défaut 4 jours avant qu'il ne soit visible sur le signal temporel pour le signal étudié. L'intérêt présenté par la cohérence spectrale est d'une part d'offrir un excellent pouvoir de séparation en fréquence cyclique, et d'autre part de fournir une information normalisée, comprise entre 0 et 1, sur laquelle on peut aisément placer un seuil. Il est à noter que les fréquences de cyclostationnarité du signal étant connues (ce sont les fréquences de rotation des roues), le calcul de ce paramètre peut n'être fait que pour certaines fréquences cycliques, et n'est donc pas un calcul lourd. Cette étude n'ayant porté que sur un engrenage, il faudrait encore la valider sur d'autres exemples pour tirer des conclusions générales. Cependant il semble que ce nouveau paramètre pourrait être ajouté avec profit à la batterie des paramètres déjà couramment utilisés, dans la perspective d'obtenir un diagnostic de plus en plus sûr.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] POUBLAN, CASTANIE "Reconnaissance automatique de signaux à évolution continue" Thèse de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, 20 décembre 1991.
- [2] GARDNER "Statistical Spectral Analysis. A Non Probabilistic Theory" 1988 by Prentice-Hall, Inc.
- [3] HURD "An investigation of periodically correlated processes" Ph. D dissertation in engineering, Duke University, 1970.
- [4] MARK "Analysis of the Vibratory Excitation of Gear Systems : Basic Theory" J. Acoust. Soc. Am., Mai 1978, Vol. 63(5), pp. 1409-1430.
- [5] CAPDESSUS "Aide au diagnostic des machines tournantes par traitement du signal" Thèse de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, 15 décembre 1992.

Figures

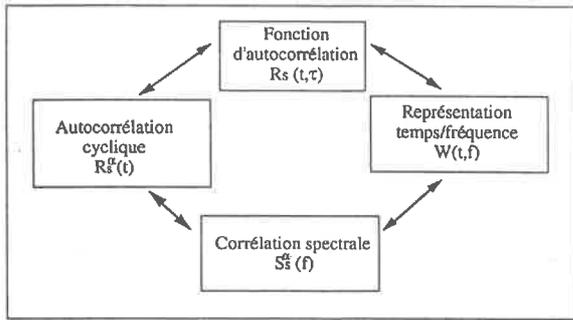


Fig. 1
Représentations du signal au second ordre

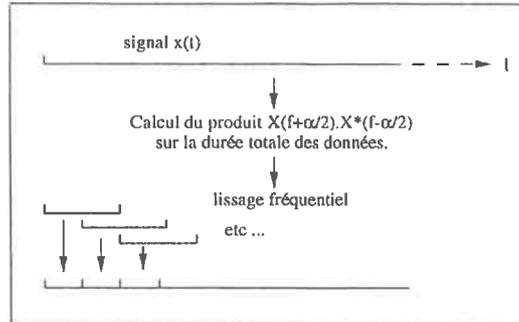


Fig. 2
Estimation de la corrélation spectrale par périodogramme lissé

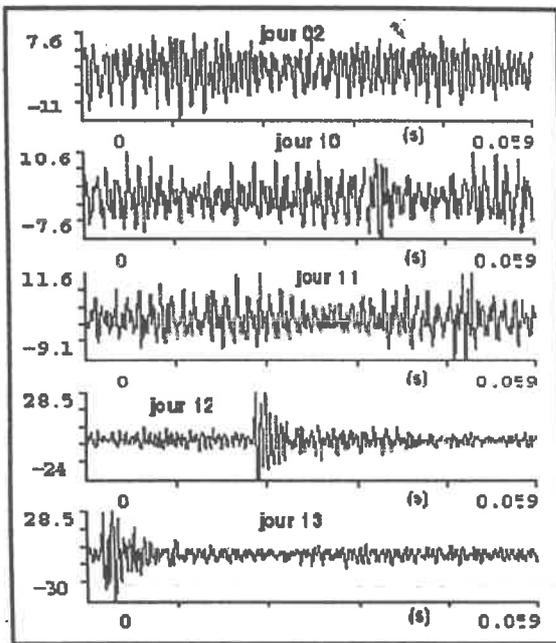


Fig. 3
Représentation temporelle sur une période

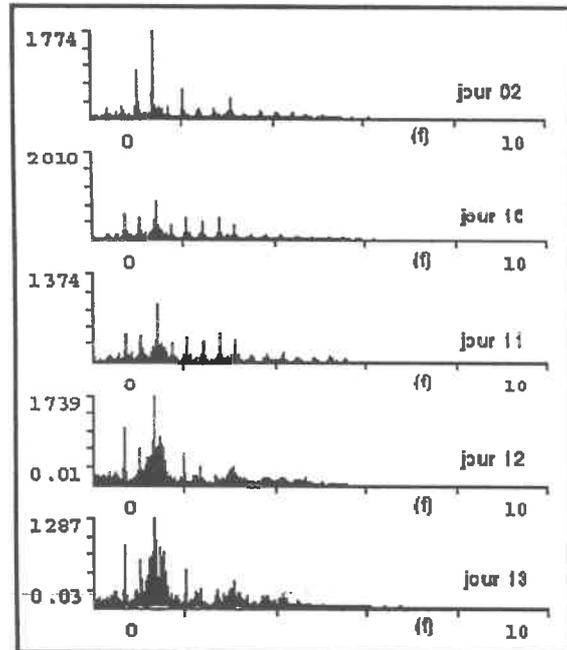


Fig. 4
TF des vibrations sur 16384 échantillons

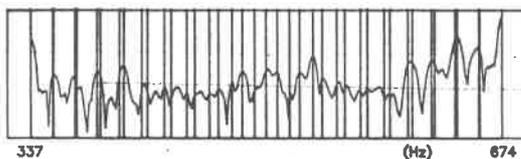


Fig. 5
Spectre du signal entre deux harmoniques d'engrènement

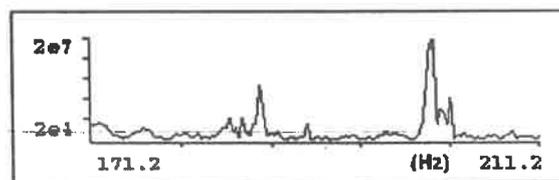


Fig. 6
Loupe sur une partie du spectre

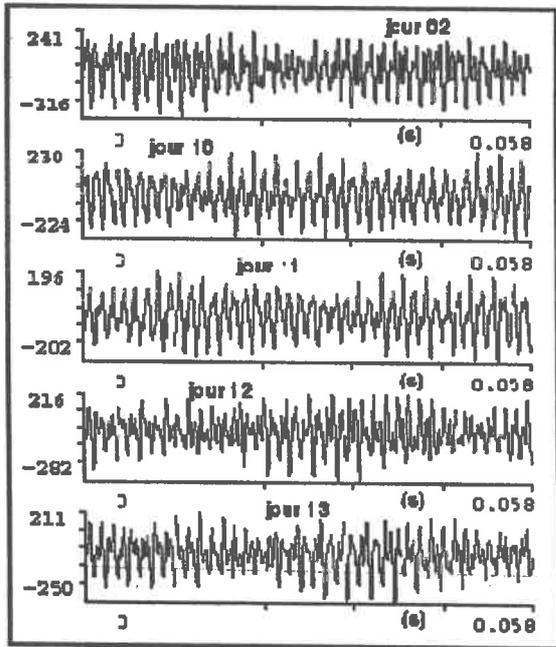
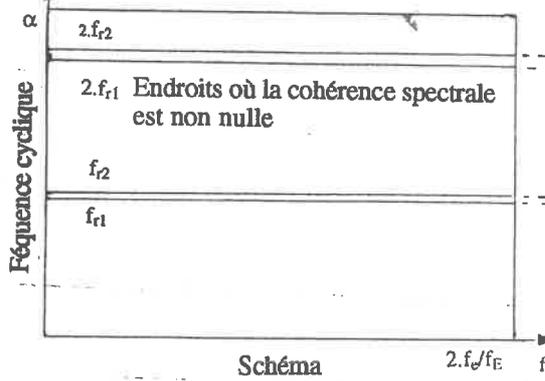


Fig. 7-a

Moyennage synchrone, roue à 21 dents



Schéma

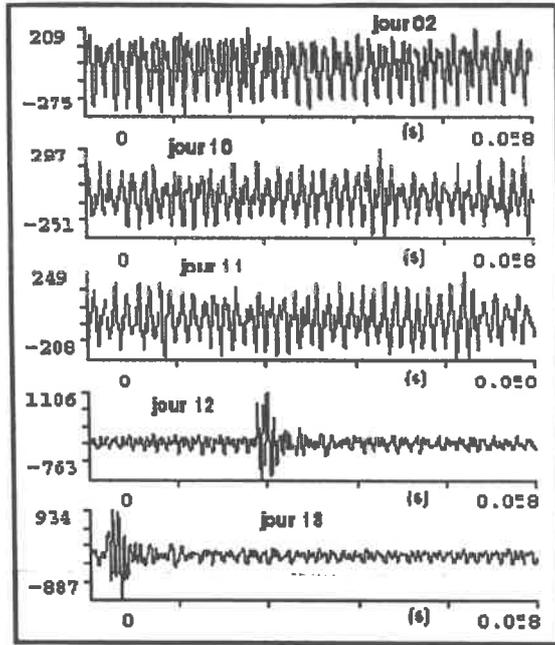
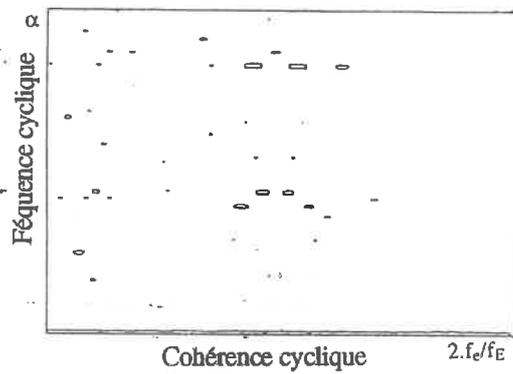


Fig. 7-a

Moyennage synchrone, roue à 20 dents



Cohérence cyclique

Fig. 8

Cohérence spectrale, niveau 0.7

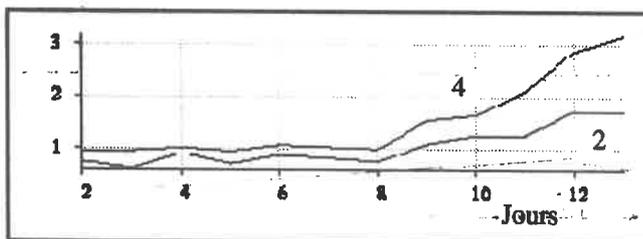
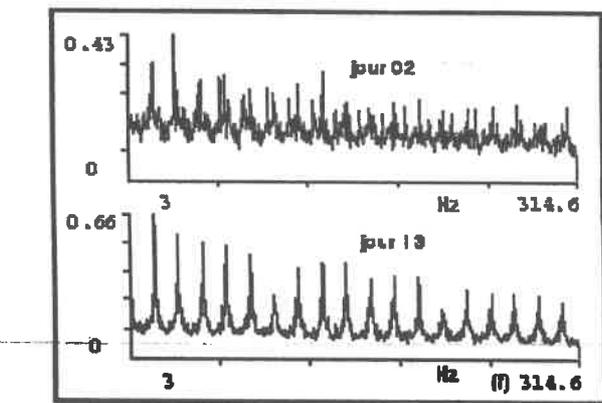


Fig. 9

Projection sur les fréquences cycliques
Evolution relative pour les harmoniques 2 et 4

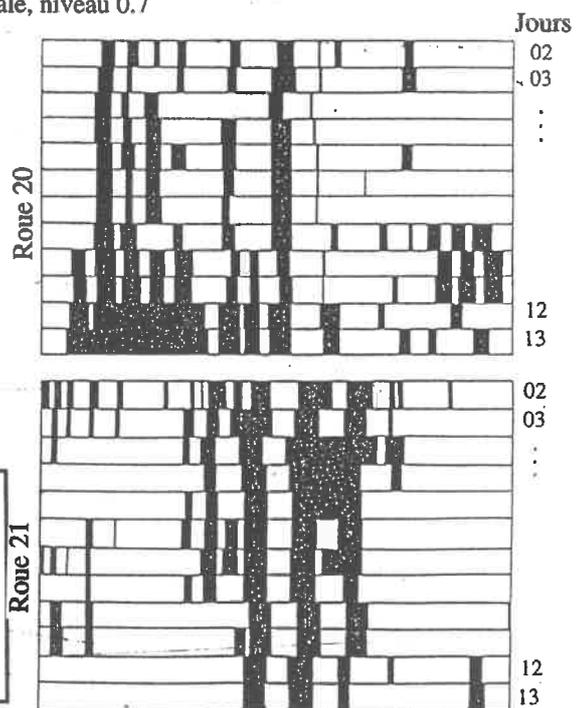


Fig. 10

Evolution de la cohérence spectrale
au cours des 12 jours