

Démarche d'analyse spectrale en vue d'une interprétation automatique, application à un signal d'engrenages

M. Durnerin⁽¹⁾⁽²⁾, N. Martin⁽¹⁾, C. Mailhes⁽³⁾, G. Lejeune⁽¹⁾, J. Lienard⁽¹⁾,
J.-L. Lacoume⁽¹⁾, F. Castanié⁽³⁾, P. Prieur⁽⁴⁾, G. Goulet⁽⁵⁾, A. Silvent⁽⁵⁾⁽¹⁾

(1) CEPHAG, ENSIEG, Domaine Universitaire, BP 46, 38402 Saint Martin d'Hères, France

(2) GdR-PRC Information Signal ImageS, Matthieu.Durnerin@cephag.inpg.fr

(3) LEN7, ENSEEIHT-INPT, 2, rue Charles Camichel, BP 7122, 31071 Toulouse, France

(4) EDF/DER/SDM, 6, quai Watier, BP 49, 78401 Chatou, France

(5) DGA/DCE/CTSN, BP 28, Toulon Naval, France

RÉSUMÉ

Cet article décrit une démarche complète d'analyse spectrale commune à des experts du signal et du domaine concerné (acoustique, mécanique vibratoire) dans le but d'estimer un contenu spectral. L'originalité réside dans le processus de décision qui est fondé sur une confrontation de méthodes (Fourier, Maximum de Vraisemblance, paramétriques, déflation) couplée à une interprétation spectrale. Une pré-analyse consiste à évaluer certaines propriétés du signal (stationnarité, hypothèse gaussienne) et à étudier son autocorrélation. Ensuite, une démarche est construite à partir d'une succession d'analyses spectrales, aboutissant à la détection et à l'identification des différents motifs spectraux. L'interprétation de chaque étape est facilitée par la mise en place de critères objectifs. Enfin des analyses complémentaires sont envisagées (cyclostationnarité, recherche d'harmoniques).

1 Introduction

L'étude s'insère dans un projet de conception et de réalisation d'un système d'aide à l'Analyse SPECTrale [1] : l'opération ASPECT entre deux partenaires industriels, EDF et le Centre Technique des Systèmes Navals, et deux partenaires universitaires, le CEPHAG et le LEN7. Ce projet au sein du GdR-PRC Information Signal ImageS a pour objectif de construire des démarches d'analyse alliant l'expertise des spécialistes du domaine d'application et des spécialistes du traitement du signal, ceci en utilisant l'ensemble des ressources de chaque partenaire. Il concerne le domaine de la décision et, plus particulièrement, le problème de l'interprétation dans le domaine spectral. L'originalité réside dans un concept de décision fondée, non pas sur le choix d'une méthode pour un signal analysé, mais sur une confrontation de méthodes couplée à une interprétation spectrale. Le but est d'estimer les structures spectrales du signal et non nécessairement un spectre comme il est d'usage en analyse spectrale. Il convient de construire cette démarche sur des signaux réels en confrontant différentes méthodes d'analyse spectrale et leurs propriétés théoriques. Un scénario prend alors en compte les différentes étapes de l'interprétation spectrale. Ce scénario coordonne non seulement les choix successifs des méthodes et de leur jeu de paramètres, mais aussi l'interprétation de chaque

ABSTRACT

This paper describes a complete spectral analysis process, using the knowledge of both experts in signal processing as well as experts in fields of application (e.g. acoustic, vibratory mechanics) with the objective to estimate a signal spectral content. The contribution of this paper is the setup of a decision process based on the comparison of several methods in spectral analysis (e.g. Fourier, Maximum Likelihood, parametric, deflation) along with a spectral interpretation. A preanalysis consists in evaluating some signal properties of the signal (stationarity, gaussian hypothesis) and in studying its autocorrelation. Then, the process is builded from a succession of analyses, leading to the detection and identification of the different spectral patterns. The interpretation of each step is simplified by the definition of objective criteria. Finally, some additional analyses are considered (cyclostationarity, harmonic research).

spectre en tenant compte des étapes précédentes. Chaque étape apporte sa contribution à l'établissement du contenu spectral et au choix de l'étape suivante. Associés à chaque étape, des critères objectifs permettent de caractériser les propriétés du signal et de son contenu spectral. Cette contribution décrit la structure d'un scénario, c'est-à-dire la démarche complète d'analyse, sans détailler ici les critères proposés. La démarche est illustrée sur un signal particulier. Il s'agit d'un signal d'engrenages de trains parallèles de la base de signaux ASPECT obtenu lors d'un essai de fatigue et fourni par EDF dans le cadre de l'opération.

2 Méthodologie d'analyse

Les scénarios ont pour base un travail original sur les différentes méthodes d'analyse spectrale paramétriques et non-paramétriques [2], travail focalisé sur l'étude de différents critères de performance et l'influence des divers paramètres. En parallèle, des scénarios sont élaborés sur des signaux réels. A cette fin, une banque de signaux provenant du CTSN et d'EDF a été constituée. Elle contient des signaux dont les spectres offrent des structures variées et elle est orientée vers deux domaines d'application particuliers : les vibrations pour la surveillance de machines tournantes, l'acoustique pour la mesure de bruits propres et rayonnés. Nous décrivons ci-dessous la structure d'un scénario d'analyse dont chaque étape est illustrée par un extrait tiré

d'un scénario sur un signal d'engrenage. *Ces extraits sont écrits en italique afin de les distinguer de la description générale.*

3 Structure d'un scénario

Les informations a priori considérées en début d'analyse sont : le nombre de points du signal, la fréquence d'échantillonnage et la fréquence des filtres anti-repliement s'il y a lieu et l'hypothèse de stationnarité. La confrontation avec le reste des informations a priori connues de l'expert du domaine n'intervient qu'en fin d'analyse.

3.1 Pré-analyse

La première partie de l'analyse est constituée d'une brève étude du signal temporel (figure 1) (recherche de périodicité flagrante, de non-stationnarité marquée...), suivi d'un test sur la transformée de Fourier du signal pour vérifier le respect de la condition de Shannon. Ensuite vient une analyse de la puissance glissante, de l'asymétrie glissante (cumulant normalisé d'ordre 3) et du Kurtosis glissant (cumulant normalisé d'ordre 4) [3]. L'objectif est de détecter d'éventuelles non stationnarités, non seulement à l'ordre 2, mais aussi aux ordres 3 et 4, de vérifier l'hypothèse de symétrie de la densité de probabilité (asymétrie nulle) et l'hypothèse gaussienne (asymétrie et Kurtosis nuls). Il ne s'agit pas de caractériser de façon précise ces propriétés, en particulier l'hypothèse de stationnarité, mais de détecter d'importantes singularités, qui nécessiteront éventuellement de segmenter le signal et d'étudier de façon globale des propriétés dont dépendent les performances des estimateurs spectraux et l'interprétation de leur résultat. *La puissance, l'asymétrie et le Kurtosis glissants (figure 2) du signal d'engrenages sont approximativement constants sur l'ensemble des tranches et les variations sont de l'ordre des écart-types de référence (fondé sur un l'écart-type obtenu pour la totalité du signal), aucune singularité n'est détectée. L'asymétrie est de -0,1, la densité de probabilité est considérée comme symétrique, par contre le Kurtosis est égal à -1, le signal ne peut être considéré comme globalement gaussien...*

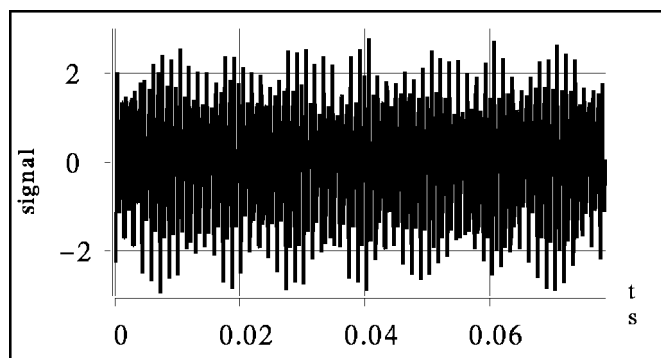


Figure 1 : 500 premiers points du signal d'engrenages de fréquence d'échantillonnage 6365 Hz et de 65536 points.

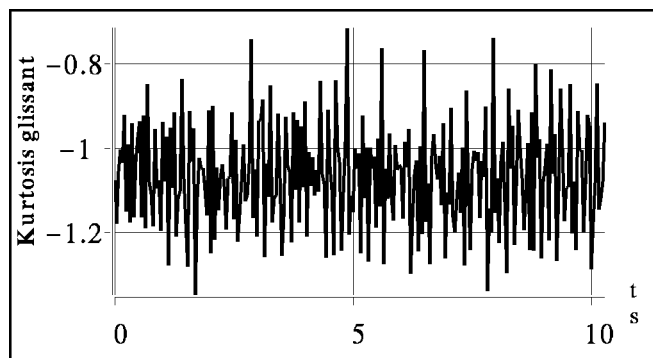


Figure 2 : Kurtosis glissant du signal sur 256 tranches de 256 points ne se recouvrant pas. Les variations sont de l'ordre de l'écart-type de référence égal à 0,2.

L'étude de l'autocorrélation apporte des informations sur le signal et sur la façon de fixer les paramètres des méthodes d'analyse spectrale qui sont mises en oeuvre. Nous proposons, entre autres, deux critères, pour l'interprétation de l'autocorrélation : l'estimation du caractère périodique aboutissant à la mesure du support de la fonction d'autocorrélation et l'estimation du rapport signal sur bruit. *L'allure de l'estimation biaisée de l'autocorrélation du signal d'engrenages (figure 3) est particulièrement régulière et présente un aspect périodique marqué. Le support de la fonction d'autocorrélation est considéré égal à la taille du signal. La régularité et la périodicité permettent d'appliquer un critère dans l'hypothèse d'un signal périodique dans du bruit blanc. Il est fondé sur la différence entre la valeur du retard nul et la valeur à l'origine de la droite passant par les maxima de l'autocorrélation pour les retards supérieurs à 0 : le rapport signal sur bruit est estimé à 15 dB.*

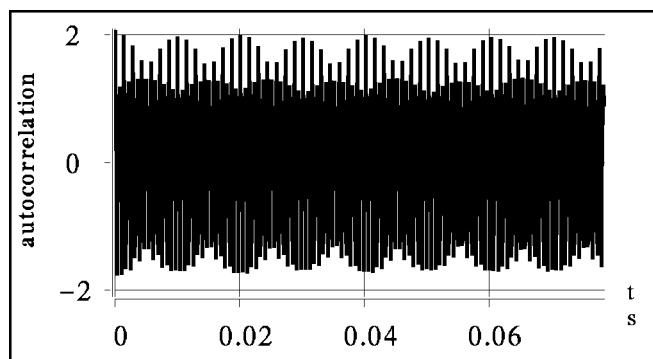


Figure 3 : 500 premiers retards de l'autocorrélation biaisée du signal.

3.2 Première analyse

Suite à la pré-analyse, une première analyse spectrale est réalisée avec une méthode non-paramétrique adaptée à tout type de signaux et dont le comportement, ainsi que les performances (variance normalisée, résolution, biais), sont calculables et prévisibles : Welch-WOSA (périodogramme pondéré et moyenné) ou Blackman-Tukey (corrélogramme pondéré). *Dans le cas du signal d'engrenages, étant donné le support de la fonction d'autocorrélation et le fort rapport signal sur bruit, un simple périodogramme avec une fenêtre de Hanning pris sur l'ensemble du signal sert de point de départ. Cette analyse est suivie d'une interprétation spectrale. Le spectre obtenu (figure 4) est particulièrement*

riche et est constitué de plus de 8000 pics répartis régulièrement sur l'ensemble de la bande. Le spectre a également une forte dynamique. On constate la présence de 4 pics principaux harmoniques entre eux et une plus grande concentration de pics autour de leurs fréquences...

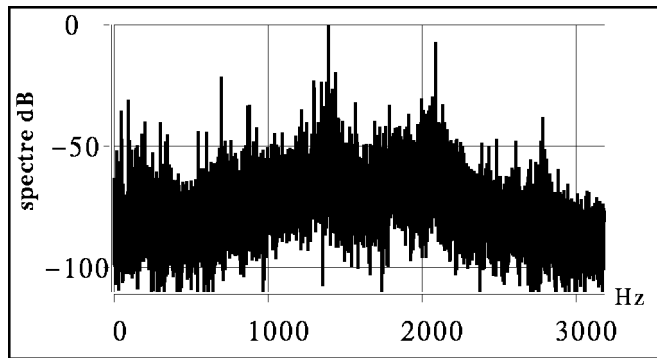


Figure 4 : estimation en dB du spectre par un périodogramme avec une fenêtre de Hanning sur les 65536 points du signal.

3.3 Point charnière

Chaque analyse aboutit à un point charnière qui a trois objectifs.

- Le premier est de **mettre à jour l'interprétation spectrale** du signal. Dans le cas de la première analyse, il s'agit de décrire l'ensemble des structures sur lesquelles il est possible d'émettre des hypothèses. Ces informations sont mises à jour après chaque analyse.
- Le deuxième objectif est de **déterminer les lacunes de l'estimation en cours** : la variance normalisée est de 1. Malgré le fort rapport signal sur bruit, une telle variance ne permet pas d'interpréter les pics comme des raies spectrales et de détecter l'ensemble des motifs spectraux à étudier...
- Le dernier objectif est d'envisager les différentes possibilités susceptibles d'apporter des améliorations en fonction des informations accumulées, puis de choisir parmi elles l'étape suivante et ses paramètres associés : l'objectif est de trouver un meilleur compromis résolution/variance. Cet objectif peut être atteint en exploitant un autre jeu de paramètres de la méthode Welch-WOSA, une résolution délibérément sous-estimée permettra notamment de faire apparaître les principales concentrations d'énergie. Il est nécessaire d'adapter la fenêtre d'apodisation à la dynamique du signal, on choisit une fenêtre Blackman-Harris 4 termes...

3.4 Etapes suivantes

Chaque étape du scénario est constituée de 3 phases distinctes, suivie d'un point charnière :

- une estimation spectrale déterminée par le point charnière précédent,
- une **interprétation "brute"** du spectre estimé faisant abstraction des étapes précédentes, prend en compte les critères de performance liés au choix spécifique des paramètres de l'estimation. Afin d'aider à l'interprétation, un critère fondé sur le calcul théorique de la variance normalisée [4] permet de séparer les pics significatifs des pics liés à la variance de l'estimateur. Ce critère est valable pour toutes les méthodes de type Fourier : Welch-WOSA,

Blackman-Tukey, PER-COR (estimateur combiné périodogramme/corrélogramme) ou STUSE (Short Time Unbiased Spectrum Estimator) [4].

- une **interprétation comparative** intègre les étapes précédentes pour interpréter l'estimation en cours.

Trois stratégies peuvent être suivies après chaque point charnière.

- La première consiste à **modifier les paramètres** de la méthode déjà appliquée : dans l'exemple du signal d'engrenages, la stratégie s'oriente tout d'abord vers la recherche de nouveaux compromis résolution/variance avec la méthode Welch-WOSA en partant d'une résolution volontairement sous-estimée, puis en augmentant cette résolution. La stratégie s'appuie sur l'apparition ou l'évolution, compte-tenu des performances de la méthode (résolution, variance...), des pics significatifs et sur l'évolution des motifs constitués de pics non significatifs. Pour l'interprétation comparative, un critère est fondé sur l'évolution de la forme spectrale de chaque pic entre chaque analyse. Pour toute fenêtre utilisée, la forme d'une raie spectrale est connue. Chaque pic peut alors être caractérisé, entre autre, par son maximum et sa bande à -3dB et comparé avec l'évolution attendue s'il s'agissait d'une raie spectrale. Ces deux éléments servent d'indice pour s'assurer de la présence d'une seule ou au contraire de plusieurs raies ou encore d'une structure large bande. De telles techniques peuvent être appliquées à toutes les méthodes du type Fourier. *Après avoir calculé les fenêtres spectrales équivalentes, la majorité des raies est interprétée comme des raies spectrales. Un bon compromis résolution/variance/biais peut être atteint (figure 5).*

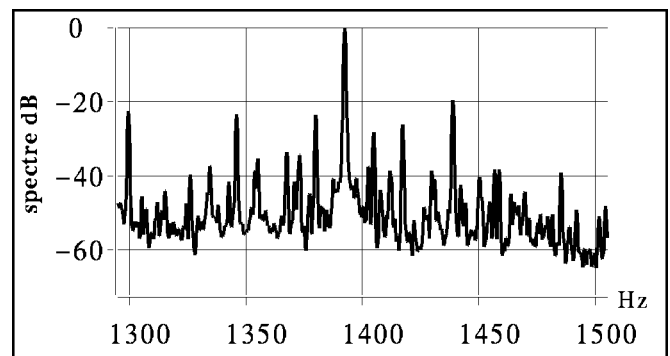


Figure 5 : estimation en dB du spectre entre 1295 Hz et 1505 Hz par Welch-WOSA. La résolution est fixée par le choix de la fenêtre de Blackman-Harris 4 termes et la taille des segments de 16384 points. Le décalage entre segments est alors fixé à 26 % pour des raisons de variance minimale.

- La prise de décision peut aussi être orientée **vers un changement de méthode**. Les différents compromis atteints avec Welch-WOSA ne permettent pas d'interpréter quelques pics de faible énergie à la limite d'un niveau significatif. Aucune autre méthode non-paramétrique n'apporte réellement d'amélioration à ce compromis. Pour identifier ces pics particuliers et corroborer les résultats obtenus, il est alors nécessaire d'utiliser des méthodes de type paramétrique. Etant donné l'aspect harmonique du signal, une analyse par modélisation AR doit permettre d'estimer correctement les différentes fréquences présentes. Le signal étant très riche, une analyse sur l'ensemble de la bande est

impossible, il est alors nécessaire de construire des sous-bandes et de les étudier séparément (figure 6). Un critère de sélection de l'ordre AR est proposé à partir des estimateurs de Fourier corrélativement à des critères classiques tel que celui d'Akaïké. L'ordre ainsi déterminé évolue ensuite en fonction des différents spectres successivement obtenus et de l'analyse Welch-WOSA. Cette démarche permet de confirmer la structure spectrale déjà obtenue et d'interpréter certains pics de faible énergie comme des raies spectrales.

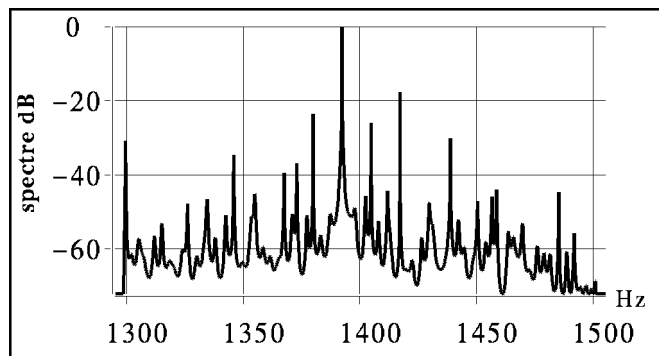


Figure 6 : estimation en dB du spectre par une modélisation AR avec un ordre de 180 sur la sous-bande 1300 Hz-1500 Hz.

Afin de mieux caractériser les différentes raies spectrales, notamment en ce qui concerne leur amplitude, leur phase et leur amortissement éventuel, la méthode de Prony par déflation [5] a également été mise en oeuvre sur chaque sous-bande. Cette opération est particulièrement intéressante dans les sous-bandes autour des 4 raies principales où la différence d'amplitude entre la raie principale et les bandes latérales est de l'ordre de 20 dB.

- En dehors de l'estimation d'un spectre **d'autres types d'analyses peuvent être envisagées** comme par exemple une recherche de cyclostationnarité [6], [7], ou bien une recherche d'harmoniques : plusieurs séries d'harmoniques sont trouvées formant des bandes latérales autour des 4 raies principales. La présence des différentes harmoniques est vérifiée par une analyse cepstrale [8], [9].

3.5 Confrontation avec les informations a priori

Une fois que l'interprétation spectrale est considérée comme complète, elle est comparée aux informations a priori connues de l'expert du domaine, ce qui permet alors de valider l'interprétation ou au contraire d'effectuer de nouvelles analyses. Dans le cas du signal d'engrenages, l'interprétation obtenue est conforme du point de vue de l'expert du domaine et ne nécessite pas de nouvelle analyse.

4 Conclusions

L'ensemble de ces opérations permet de décrire de façon complète l'intégralité d'un spectre très riche. Il est important de souligner que ce n'est **pas une analyse** avec un jeu de paramètres optimisés qui est proposée, **mais** bien une **description du contenu spectral** du signal à l'issue d'une **confrontation méthodologique**.

Une pré-analyse à l'aide de critères spécifiques consiste à évaluer certaines propriétés du signal tels que le respect de la condition de Shannon, la stationnarité, l'hypothèse gaussienne qui sont nécessaires pour une bonne interprétation des analyses spectrales mises en jeu. Elle consiste également à analyser l'autocorrélation du signal avec notamment l'estimation à partir de critères objectifs de sa périodicité, de son support et du rapport signal sur bruit.

Ensuite une démarche est construite à partir d'une succession d'analyses, aboutissant à la détection et à l'identification des différents motifs spectraux. Chaque étape est constituée d'une interprétation du spectre estimé dite brute, puis d'une interprétation comparative avec les estimations spectrales précédentes. Une étape est suivie d'un point charnière qui met à jour l'interprétation spectrale, en détermine les lacunes et choisit l'étape suivante. Les interprétations sont facilitées par la mise en place de critères objectifs : pics significatifs par rapport à la variance de l'estimateur, suivi de pics entre différentes analyses...

Enfin des analyses complémentaires sont envisagées suivant les conclusions obtenues et les connaissances de l'expert du domaine : recherche d'harmoniques, étude de la cyclostationnarité.

La généralisation de tels scénarios doit permettre de référencer les différentes démarches suivant les différentes configurations spectrales rencontrées par rapport à la base de signaux ASPECT (acoustique et mécanique vibratoire). A terme, ces démarches d'analyse pourront être automatisées en proposant des critères fondés sur les propriétés théoriques des estimateurs.

5 Références

- [1] P. Martini, "Aide à l'analyse spectrale", thèse INPG, janvier 1995.
- [2] C. Adnet, "Unification des méthodes d'analyse spectrale (Fourier et haute résolution) en vue de la réalisation d'un système expert d'aide à l'analyse", thèse INPG, octobre 1990.
- [3] P.O. Amblard, J.L. Lacoume, J.M. Brossier, "Transient detection higher-order time frequency distributions and the entropy", Proc. IEEE SP Workshop on Higher-Order Stat., Lake-Tahoe, USA, pp. 265-269, 1993.
- [4] V.J. Mathews, D.H. Houn, N. Ahmed, "A Unified Approach to Non Parametric Spectrum Estimation Algorithms" IEEE Trans. on Acoustics, Speech and Signal Processing, Vol. 35, pp. 338-349, mars 1987.
- [5] A. Ducasse "Estimation de sous-harmoniques à l'aide de méthodes paramétriques", thèse INPT, janvier 1997.
- [6] P. Prieur, G. D'Urso, "Des indices de cyclostationnarité pour la surveillance des engrenages", quinzième colloque GRETSI, Juan-Les-Pins, pp. 1241-1244, septembre 1995.
- [7] G. Lejeune et al. "Cyclostationnarités d'ordre 1 et 2 : application à des signaux vibratoires d'engrenages", seizième colloque GRETSI, Grenoble, 1997.
- [8] P. Prieur, C. Fontanive, "Surveillance et diagnostic des engrenages", EDF, notes internes de la DER, 93NB00094
- [9] C. Capdessus, "Aide au diagnostic des machines tournantes par traitement du signal", thèse INPG, mars 1992.