

# Etude des Caractères Non Linéaires et Cyclostationnaires des Signaux Vibratoires de Boite de Vitesse d'Hélicoptère

Laurent BOUILLAUT<sup>1</sup>, Ménad SIDAHMED<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire Heudiasyc, UTC

Centre de Recherches de Royallieu, 60200 COMPIEGNE, FRANCE

<sup>2</sup>Laboratoire Heudiasyc, UTC

Centre de Recherches de Royallieu, 60200 COMPIEGNE, FRANCE

[Laurent.Bouillaut@hds.utc.fr](mailto:Laurent.Bouillaut@hds.utc.fr), [Ménad.Sidahmed@hds.utc.fr](mailto:Ménad.Sidahmed@hds.utc.fr)

**Résumé** - Dans cet article, nous proposons de traiter les problèmes de l'analyse vibratoire de machines tournantes telles que la boite de vitesse d'un hélicoptère. Pour cela, nous considérons deux approches, maintenant habituelles, pour de tels systèmes : La cyclostationnarité et la bilinéarité. Toutefois, l'originalité de ce travail repose dans l'étude conjointe de ces deux approches. Ainsi, la nouveauté des résultats réside dans la capacité de la corrélation spectrale à analyser précisément des phénomènes non linéaires. Nous étendons également cette première comparaison théorique des approches bilinéaire et cyclostationnaire au cas de signaux réels de machines tournantes.

**Abstract** - In this paper, we deal with the analysis of rotating machinery, such as helicopter gearboxes, using vibrating signals. We therefore consider two approaches, considered now as classical methods for such systems: The cyclostationarity and the bilinearity. Nevertheless, the originality in this work is the jointly study of these two approaches. Indeed, the innovation of these results consists in the ability of the spectral correlation to analyse precisely non-linear phenomena. Finally, we extend this first theoretical comparison of the cyclostationary approach and the bilinear method to real data recorded on rotating machines.

## 1. Introduction

L'analyse vibratoire des systèmes d'engrenages est un domaine d'étude très complexe et à la base de très nombreux travaux. Il a notamment été démontré que ces vibrations étaient de nature cyclostationnaire [2] et/ou non linéaire [3]. Par la suite, de nombreuses équipes se sont intéressées à l'une ou l'autre de ces approches pour l'analyse vibratoire des machines tournantes [2] [4] [5] [6]... Toutefois, très peu d'études ont été réalisées en tenant compte, à la fois, de ces deux approches. En effet, il a été montré que, suivant le type de défaut considéré (de surface ou de profil), les vibrations engendrées par ce dernier étaient de nature cyclostationnaire ou non linéaire [2] [3]. Il est également important de déterminer la nature exacte de ces vibrations afin d'orienter le contrôle qualité (usinage de surface des dents ou déflexion sous la charge). Il est donc très intéressant d'étudier conjointement ces deux approches et de les comparer. Ces travaux ont fait l'objet d'une thèse réalisée à l'Université de Technologie de Compiègne et soutenue en Novembre 2000 [1]. Dans cet article, nous allons donc montrer que les approches cyclostationnaires et bilinéaires sont très étroitement liées. Tout d'abord par une étude théorique sur des signaux synthétiques. Puis, par une extension de ces résultats à des données réelles, provenant de la boite de vitesse d'un hélicoptère. Nous pourrions alors conclure à l'avantage, dans le cas étudié, d'une méthode par rapport à une autre. Cette conclusion sera confirmée par une application au diagnostic. Enfin, nous présenterons un algorithme permettant de déterminer, pour des phénomènes non linéaires cycliques, quelle est la nature du phénomène prédominant (non stationnaire ou non linéaire). Cet

algorithme est basé sur l'utilisation des statistiques cycliques d'ordre supérieur, et plus précisément du bispectre cyclique.

## 2. Approche théorique

Dans ce paragraphe, nous allons nous intéresser à l'étude de deux types de signaux synthétiques. Tout d'abord, un signal plus ou moins cyclostationnaire, donné par :

$$x(t) = a(t).e^{2j.p.f_1.t} + b(t).e^{2j.p.f_2.t} \quad (1)$$

Où  $a(t)$  et  $b(t)$  sont des modulations d'amplitudes aléatoires, centrées, stationnaires à l'ordre 2, filtrées passe-bas et plus ou moins corrélées. Il a été montré que si  $a(t)$  et  $b(t)$  sont indépendantes, le signal est stationnaire à l'ordre 2 [2]. Par contre, plus ces modulations d'amplitudes sont corrélées, plus le degré de cyclostationnarité de  $x(t)$  est élevé.

Le second signal est de nature non linéaire. Il s'agit en effet d'un signal à couplage quadratique de phase, défini par :

$$y(t) = e^{2j.p(f_1.t+f_1)} + e^{2j.p(f_2.t+f_2)} + e^{2j.p(f_3.t+f_3)} \quad (2)$$

Où  $f_3=f_1+f_2$  et  $f_3=f_1+f_2$ . Les phases  $\phi_1$  et  $\phi_2$  étant indépendantes et suivant une loi uniforme sur  $[-0.5 ; 0.5]$ .

La première étape de cette étude consistait alors à appliquer au signal plus ou moins cyclostationnaire  $x(t)$  un outil typiquement non linéaire (le bispectre). Puis, à appliquer à  $y(t)$  un outil typiquement non stationnaire (la corrélation spectrale). Les calculs théoriques peuvent être trouvés dans [1].

Il est ressorti de cette étude que la corrélation spectrale permettait parfaitement de détecter et d'identifier l'existence d'un phénomène non linéaire. De plus, dans certains cas très restreints, la réciproque a été démontrée.

La figure 1 présente les résultats de simulations, obtenus lors de l'application de la corrélation au signal non-linéaire  $y(t)$ . Pour ce signal, nous avons pris  $f_1=0.15Hz$ ,  $f_2=0.25Hz$  et  $f_3=0.4Hz$ .

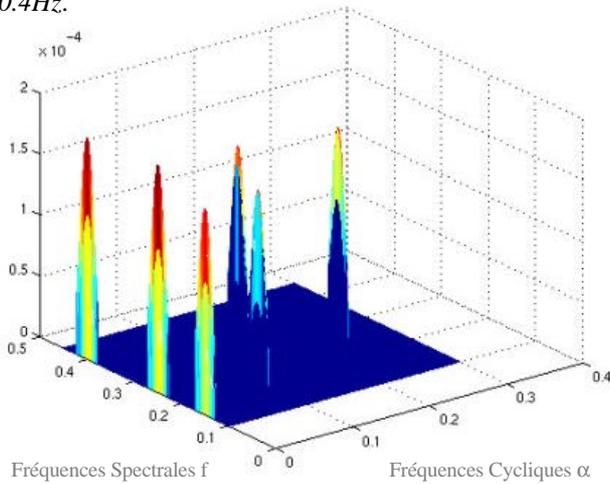


Fig. 1 : Corrélation spectrale du signal non linéaire  $y(t)$

Nous pouvons remarquer que pour la fréquence cyclique nulle, nous avons trois pics en  $f_1$ ,  $f_2$  et  $f_3$ . Nous retrouvons donc bien l'une des propriétés de la corrélation spectrale ; à savoir qu'en  $\alpha=0$ , nous devons retrouver la DSP du signal étudié. De plus, nous pouvons noter que trois autres pics apparaissent en  $[f; \alpha]=[(f_1+f_2)/2; f_2-f_1]$ , en  $[(f_1+f_3)/2; f_3-f_2]$  et en  $[(f_2+f_3)/2; f_3-f_2]$ . D'après la propriété d'interprétation en terme de fréquences statistiquement liées, caractérisant la corrélation spectrale [1] [2], ces trois pics caractérisent l'existence de liens entre les fréquences  $(f_1; f_2)$ ,  $(f_1; f_3)$  et  $(f_2; f_3)$ .

### 3. Applications industrielles

Le résultat obtenu précédemment étant très intéressant, nous nous intéressons maintenant à leur extension à des signaux industriels, enregistrés sur la boîte de vitesse d'un hélicoptère de l'US Navy (Westland data). Le schéma ci-dessous présente une idée simplifiée du système que nous étudions ici.

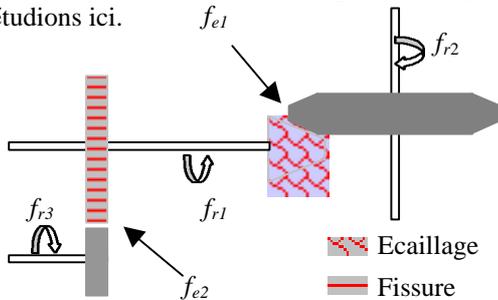


Fig. 2 : Schéma simplifié du système.

Les principales composantes fréquentielles de ce système sont  $f_{e1}=1108,9Hz$ ,  $f_{e2}=3155,8Hz$ ,  $f_{r1}=42,6Hz$ ,  $f_{r2}=17,6Hz$  et

$f_{r3}=126,23Hz$ .

### 3.1 Détection de phénomènes non-linéaires

Dans un premier temps, nous avons appliqué le bispectre au système altéré. Il s'avère que, dans tous les cas (écaillage ou fissure), deux liens non linéaires forts apparaissent avec le défaut. Comme nous pouvons le voir sur la figure 3, l'altération d'une pièce du système se traduit par l'apparition de phénomènes non linéaires entre les fréquences d'engrènement  $f_{e1}$  et  $f_{e2}$  mais également entre  $f_{e2}$  et  $f_3=(f_1+f_2)/2$ . Toutefois, cette dernière composante fréquentielle n'est caractéristique d'aucun élément du système. Cependant, une analyse spectrale a confirmé l'apparition de cette fréquence avec le défaut [7].

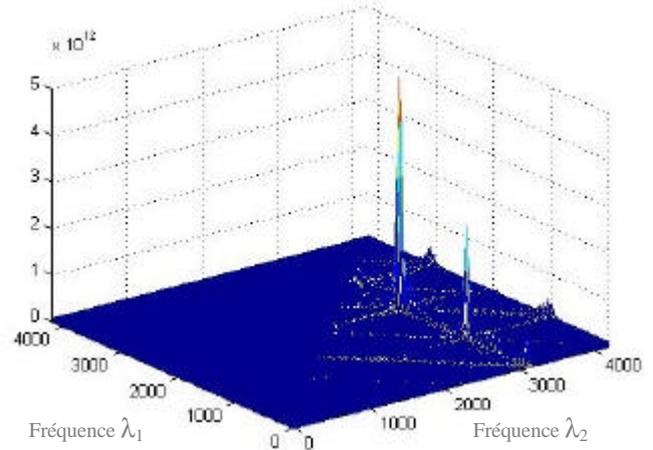


Fig. 3 : Bispectre des signaux avec défaut

Afin de déterminer si le résultat de la section 2 pouvait être étendu à des données industrielles, nous avons appliqué la corrélation spectrale à ces signaux. Dans un premier temps, nous avons recherché un éventuel lien entre les deux fréquences d'engrènement. La figure ci-dessous présente cette première estimation.

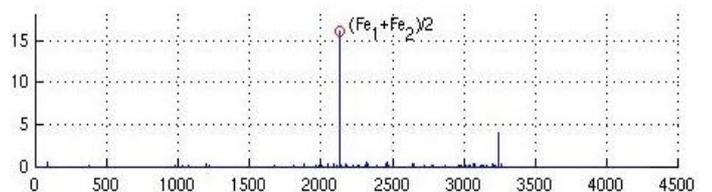


Fig. 4 : Corrélation spectrale : Détection du lien entre  $f_{e1}$  et  $f_{e2}$

D'après la propriété d'interprétation en termes de fréquences statistiquement liées, caractérisant la corrélation spectrale, le pic apparaissant en  $f=(f_{e1}+f_{e2})/2$  souligne l'existence d'un lien entre les fréquences d'engrènement. Nous retrouvons donc le premier lien mis en évidence par le bispectre.

Dans un second temps le calcul de la corrélation spectrale pour  $a=f_{e2}-f_3=f_3-f_{e1}=(f_{e2}-f_{e1})/2$  a été effectué. Comme le montre la figure 5, deux pics apparaissent en  $f=(f_{e1}+f_3)/2$  et en  $f=(f_{e2}+f_3)/2$ . Ces derniers sont donc caractéristiques de liens entre les fréquences  $(f_{e1}; f_3)$  et  $(f_{e2}; f_3)$ . Nous retrouvons donc bien le lien entre  $f_{e2}$  et  $f_3$  souligné par l'estimation du bispectre. Toutefois, la corrélation spectrale

nous permet également de mettre à jour l'existence d'un second lien avec l'autre fréquence d'engrènement. Ainsi, la fréquence  $f_3$  semble être étroitement liée aux phénomènes d'engrènement.

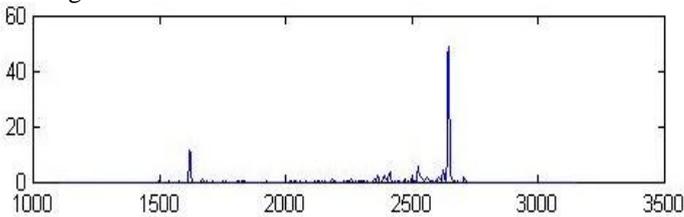


Fig. 5 : Corrélation spectrale : Détection de liens éventuels entre  $f_3$  et les fréquences d'engrènement

En conclusion, la corrélation spectrale nous a permis de détecter précisément les phénomènes non-linéaires rencontrés lors du calcul du bispectre. L'étude théorique a montré qu'un phénomène non linéaire se traduisait par trois liens cyclostationnaires entre les différentes fréquences concernées par le couplage quadratique de phase. Il pouvait donc sembler plus compliqué d'interpréter ces trois liens plutôt qu'un unique, fourni par le bispectre. Toutefois, compte tenu des facilités d'estimation de la corrélation spectrale, il est possible de calculer une seule corrélation comme nous l'avons fait pour les signaux industriels. L'interprétation des résultats est alors très facile à faire et le gain en temps de calcul est très important. De plus, l'approche cyclostationnaire nous a également permis d'expliquer l'apparition de la fréquence  $f_3$ , dans le spectre des signaux avec défaut, comme une conséquence du lien non linéaire entre les fréquences d'engrènement, généré par ce défaut. D'après ces premiers résultats, il semble donc préférable d'utiliser une approche cyclostationnaire plutôt qu'une analyse bilinéaire pour l'étude d'un tel système.

### 3.2 Influence du couple sur le diagnostic

Comme l'a montré C. Capdessus, l'altération d'un système d'engrènement se traduit par une modulation entre les fréquences d'engrènement et de rotation caractérisant l'élément défectueux [2]. La détection de ce phénomène permet donc de réaliser un diagnostic précoce de très bonne qualité. De plus, une comparaison avec d'autres techniques (spectre, cepstre, Temps-fréquence, bispectre) a permis de présenter la corrélation spectrale comme l'outil le plus adéquat pour ce type de diagnostic [1].

Comme nous l'avons souligné précédemment, la boîte de vitesse d'un hélicoptère est caractérisée par un fonctionnement à vitesse constante. Le seul paramètre permettant de discerner les modes de fonctionnement de l'appareil (au sol, en vol) est le couple. Compte tenu de l'extrême sensibilité du système (et de l'évolution rapide des défauts) nous recherchons une technique de diagnostic permettant de mettre à jour l'apparition d'un défaut lorsque l'appareil est encore au sol ; et donc, fonctionnant avec un couple faible.

La figure 6 présente, en fonction du couple, l'évolution du pic significatif de l'écaillage dans la corrélation spectrale. Cette évolution est tracée pour les trois états du système dont nous disposons. Nous pouvons remarquer, qu'en règle

générale, pour un défaut de niveau faible ou moyen, il serait préférable d'effectuer le diagnostic sous une charge maximale (et donc en vol). Ceci peut être expliqué par le fait que l'apparition d'un écaillage sur une dent est la conséquence d'une fragilité de cette dernière. Plus le couple exercé sur l'engrènement sera élevé, plus les pressions de surface seront grandes. De ce fait, la moindre modification de surface 'résonnera' plus fortement si le couple est élevé.

Au contraire, pour un défaut établi, l'influence du couple est complètement inversée. En effet, nous pouvons noter que, pour un couple faible, le pic caractéristique du défaut a une amplitude très élevée. De plus, cette amplitude diminue fortement avec le couple. Une explication de ce phénomène peut être que le défaut, de simple pitting, devient un écaillage notable. Une partie de la surface de la dent altérée a donc été arrachée. Le phénomène d'engrènement de cette dent se traduit alors par un choc lors du passage d'une dent saine sur la zone d'écaillage. Plus le couple sera élevé, plus la dent engrenant la roue abîmée aura tendance à épouser la forme de l'écaillage ; diminuant ainsi les répercussions de ce dernier sur le signal vibratoire.

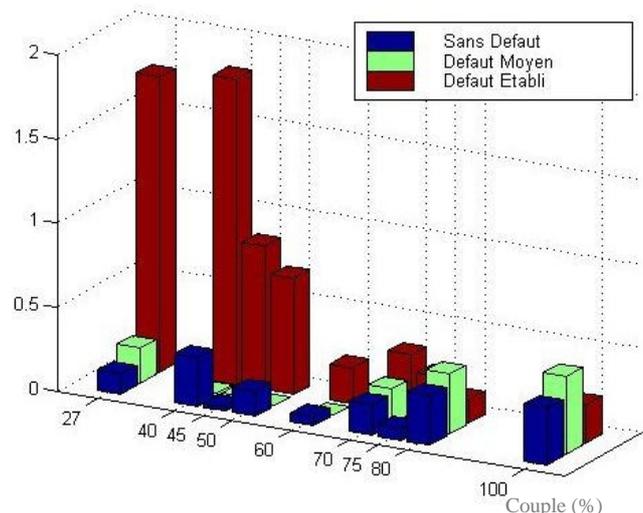


Fig. 6 : Corrélation spectrale : Evolution, en fonction du couple et du niveau d'altération, du pic significatif du défaut

De plus, nous pouvons également remarquer que, pour un couple faible, il est parfaitement possible de distinguer le cas sans défaut du cas avec un défaut moyen. Ainsi, la corrélation spectrale permet d'effectuer un diagnostic précis au sol ; aussi bien pour un défaut moyen que pour un défaut établi. Ces résultats ont été confirmés pour d'autres défauts tels qu'une fissure. De plus, comme nous l'avons montré dans [1], le bispectre ne permet pas de réaliser un tel diagnostic au sol. Ainsi, l'approche cyclostationnaire semble être préférable à l'utilisation d'un outil bilinéaire pour réaliser le diagnostic au sol d'un quelconque défaut.

## 4. Recherche de la nature principale d'un phénomène non-linéaire cyclique.

Nous venons de montrer que les outils classiquement utilisés pour l'étude de phénomènes non linéaires ou non stationnaires ne permettaient pas de conclure en la nature du

phénomène étudié. En effet, la corrélation spectrale permet de détecter des liens aussi bien cyclostationnaire que non-linéaire. Or, il a été montré que l'apparition d'un défaut sur une dent d'engrenage se traduisait par des phénomènes de nature différente selon le type de défaut rencontré. Ainsi, la détermination exacte de la nature d'un phénomène (non linéaire ou cyclostationnaire) nous permettrait de déterminer la nature du défaut que nous rencontrons ; ce qui, d'un point de vue industriel, serait très intéressant.

Les approches cyclostationnaire et non linéaire ne permettant pas de réaliser cette discrimination, nous nous sommes intéressés aux statistiques cycliques d'ordre supérieur (SCOS). Nous avons alors calculé les bispectres cycliques des signaux synthétiques introduits dans cet article [1]. Ces calculs, confirmés par des simulations, nous ont alors permis de déterminer des paramètres propres à chaque type de signal. Il était alors possible de mettre en œuvre un algorithme permettant de déterminer la nature exacte d'un phénomène. La figure 7 présente cet algorithme, basé sur l'estimation d'une corrélation spectrale (permettant de détecter l'existence de liens aussi bien cyclostationnaire que non linéaire et beaucoup plus rapide à estimer que le bispectre) et de un ou deux bispectres cycliques selon le signal étudié.

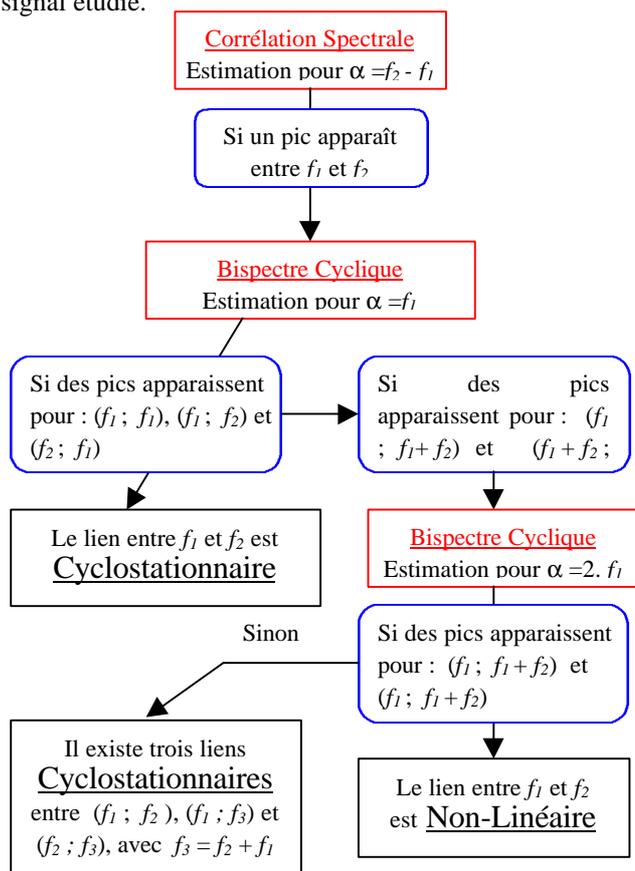


Fig. 7 : Détermination de la nature d'un phénomène

Cependant, l'estimation du bispectre cyclique est très complexe et coûteuse en terme de temps de calcul. Des travaux sont actuellement en cours afin de déterminer un estimateur également efficace et abordable pour des signaux industriels.

## 5. Conclusion

Dans cet article, nous avons montré que les approches cyclostationnaire et bilinéaire étaient étroitement liées. Ainsi, la corrélation spectrale permet de détecter et de caractériser précisément des phénomènes aussi bien cyclostationnaires que non-linéaires. De plus, comparée au bispectre, cet outil présente bien des intérêts d'un point de vue 'souplesse' d'estimation et temps de calcul. Enfin, nous avons vu que l'analyse cyclostationnaire fournissait de bien meilleurs résultats pour le diagnostic de défauts sur les systèmes d'engrenage, et ce, quelle que soit la nature du défaut étudié. Aux vues de ces résultats, il semble donc préférable d'utiliser une approche cyclostationnaire plutôt que non-linéaire pour l'analyse de tels systèmes.

Finalelement, dans un souci de recherche de la nature exacte de défauts, nous avons présenté une méthode basée sur les SCOS permettant de déterminer si un phénomène est plutôt cyclostationnaire ou non-linéaire. Toutefois, si cet algorithme fonctionne bien pour des signaux synthétiques, il nous faut encore rechercher des estimateurs plus rapides avant de pouvoir appliquer cette méthode à des données réelles. Nous travaillons actuellement à la résolution de ce problème et ces travaux feront l'objet d'une prochaine publication.

## Références

- [1] L. Bouillaut, Approches Cyclostationnaire et Bilinéaire pour l'Analyse Vibratoire des Machines Tournantes, Thèse Université de Technologie de Compiègne, 07 Novembre 2000.
- [2] C. Capdessus, 'Aide au diagnostic des machines tournantes par traitement du signal', Thèse INPG, 1992.
- [3] P. Prieur et M. Cai, 'Modélisation non linéaire des signaux d'engrenages', 13<sup>ème</sup> Colloque GRETSI, Juan-les-Pins, 1993.
- [4] G. Gelle, A. Moineau et G. Delaunay, 'Détection et classification de courroies défectueuses par analyse acoustique. Comparaison entre une approche temps-fréquence et une approche statistique d'ordre supérieur', 16<sup>ème</sup> colloque GRETSI, Grenoble, pp. 227-230, 1997.
- [5] G. Gelle M. Colas G. Delaunay, 'Higher Order Statistics for Detection and Classification of Faulty Fanbelts Using Acoustical Analysis', Signal Processing Workshop on Higher-Order Statistics, pp. 43-46, Alberta, Canada, 1997.
- [6] L. Bouillaut et M. Sidahmed, 'Cyclostationary and Bilinear Approaches for Gears Vibrating Signals: Applications to Helicopter ear Box Diagnosis', 9<sup>th</sup> IMEKO TC-10 International Conference on Technical Diagnostics, pp. 86-102, Wroclaw, 1999.
- [7] S. Braun M. Feldman M. Sidahmed M. Zacksenhouse, 'Vibration Based Gear Diagnostics to Westland Helicopter Data', Proceeding of the 17<sup>th</sup> International modal analysis Conference, USA, pp. 1347-1358, 1999.