

**SURVEILLANCE VIBRATOIRE DE REDUCTEURS A ENGRENAGES :  
APPORT DES METHODES PARAMETRIQUES DU TRAITEMENT DU SIGNAL**

Ménad SIDAHMED

CETIM - 52 avenue Félix Louat - 60304 SENLIS  
GRECO/CNRS/TDSI

**RESUME**

Cet article concerne la surveillance et le diagnostic de réducteurs à engrenages par analyse des vibrations.

Une synthèse des méthodes classiques utilisées dans ce domaine est présentée pour montrer l'intérêt que pourraient apporter les techniques paramétriques.

En particulier, lorsque le défaut à détecter se manifeste par des non-stationnarités dans les signaux vibratoires. C'est le cas de l'écaillage des dentures d'engrenages cémentées trempées qui conduit rapidement à la rupture des dents et qu'il faut donc détecter dès son apparition.

Des tests préliminaires sur un banc d'essais de grandeur industrielle (300 Kwatts) montrent que les techniques de détection de non-stationnarités, basées sur le franchissement d'un seuil par l'erreur de prédiction linéaire (EPL) issue d'un modèle autoregressif (AR), permettent la détection précoce de ce type de défaut.

**1. INTRODUCTION**

L'analyse des vibrations permet de caractériser la plupart des efforts dynamiques dans une machine tournante, en particulier ceux liés à un fonctionnement anormal. Simple à mettre en œuvre, et ne nécessitant pas l'arrêt des machines, elle apparaît comme un outil de choix pour la Maintenance Conditionnelle en milieu industriel [1], [2], [3].

Actuellement, la plupart des techniques et des systèmes commercialisés permettent l'extraction de paramètres du spectre de Fourier (niveaux globaux, harmoniques...) ou du signal temporel (crête-crête, variance, kurtosis...). Ces paramètres sont à la base de systèmes de reconnaissances de formes [4] alors que l'expérience montre qu'ils sont souvent inefficaces (peu sensibles aux défauts naissants...).

Avec le développement actuel des moyens de calculs, des processeurs spécialisés de Traitement des Signaux, il est tout à fait envisageable d'utiliser en milieu industriel des techniques paramétriques de TS, qui ont fait leur preuve dans des domaines aussi divers que la parole, la sismique, le radar.... Outre la compression d'informations importante qu'elles apportent - ce qui est adapté pour la classification -, elles permettent d'analyser localement un signal (segmentation, détection de non-stationnarités...).

On peut néanmoins noter certaines applications de la modélisation ARMA en surveillance de machines [5] à [9].

Ces études confirment l'intérêt de ces techniques, qu'il s'agit de valider et de généraliser à d'autres types de machines. Dans [5], le suivi de l'erreur de prédiction (EPL) permet de surveiller des réacteurs d'avions en ligne. On montre dans [6], que le spectre ARMA est beaucoup plus sensible que le spectre FFT pour mettre en évidence de faibles variations de balourd. GERSCH [8], utilise le modèle AR pour classer des signaux vibratoires de moteurs à explosion en utilisant la distance de Kullback-Leibler. Enfin, dans [8] et [9], les paramètres des modèles sont utilisés pour le diagnostic modal, LEVEY [9] traitant de signaux multi-capteurs.

**SUMMARY**

This paper deals with gearboxes monitoring and diagnosis using vibration analysis.

Synthesis of classical methods available in this field is presented to exhibit advantage of parametric modelling techniques.

In particular, when the default to detect is characterised by non-stationarities in the vibration signal. This is the case of spalling in case-hardened gears which conducts quickly to tooth breakage and then early detection is essential.

Preliminary tests, on industrial test bench (300 Kwatts) show that non-stationarity detection techniques, based on level crossing of Linear Prediction Error (LPE) obtained with autoregressive (AR) modelling, are able to early detect this default.

Cet article entre dans le cadre d'une étude (\*) destinée à valider de telles techniques pour la surveillance et le diagnostic de réducteurs à engrenages et plus généralement de machines tournantes.

Nous nous intéressons à la détection de l'écaillage dans des engrenages cémentés trempés, défaut se manifestant par de faibles non-stationnarités sur le signal de vibrations, et ce, à l'aide de techniques de filtrage, par modèles AR.

(\*) étude en partie financée par le M.R.T.

**2. SURVEILLANCE DES REDUCTEURS A ENGRENAGES**

Les réducteurs (et multiplicateurs) à engrenages sont des éléments importants dans une ligne d'arbres de machines tournantes. Les efforts importants auxquels sont soumises les dentures en font des composants à hauts risques de défaillances.

Ils ont fait (et font) l'objet de nombreuses études et publications dans les domaines :

- de la mécanique pour le calcul, le dimensionnement, les propriétés métallurgiques des matériaux, l'analyse des défaillances... (voir [13], [14] par exemple).
- de la surveillance vibratoire des machines, où plusieurs techniques de TS (§ 2.2) ont été appliquées pour la détection des défauts [1], [3], [10], à [12].



### 2.1. Signatures vibratoires et défauts

Pour un engrenage parfait (dents identiques, sans défaut...) des excitations se produiront à chaque engrènement d'une paire de dents.

On recueillera un signal vibratoire (en supposant l'existence d'harmoniques dues à des non-linéarités) du type :

$$x_E(t) = \sum_{m=1}^M a_m \sin(2\pi m N \cdot f_R \cdot t + \theta_m) + b(t) \quad (1)$$

où :  $N$  : est le nombre de dents d'une roue  
 $f_R$  : la fréquence de rotation de l'arbre

$f_E = N \cdot f_R$  est appelée fréquence d'engrènement

$b(t)$  représentant un bruit additif avec :

- des composantes harmoniques (balourd :  $f_R$ ...)
- des composantes aléatoires à large spectre (frottements...).

#### Influence des défauts

Plusieurs types de défauts peuvent affecter les dentures d'engrenages [11], [13], [14], on peut citer les défauts répartis sur toutes les dents :

- **l'usure** qui peut modifier les profils des dents et conduire à un mauvais fonctionnement de l'engrenage,
- **le pitting** qui, suivant les matériaux, peut évoluer ou non vers la destruction de l'engrenage,

et, les défauts localisés sur des dentures particulières :

- **la fissuration** (généralement par fatigue) qui conduit rapidement vers la rupture de la dent,

- **l'écaillage** pour les engrenages cémentés trempés, les plus prisés à l'heure actuelle car ils permettent de "passer" des couples importants avec des dimensions réduites. Il conduit également très rapidement vers la rupture et donc la mise hors service de l'engrenage.

Les défauts répartis, produisent des modulations d'amplitude et de phase du signal vibratoire. Les défauts "localisés" des chocs ou des non-stationnarités.

### 2.2. Les méthodes de surveillance vibratoire

Les techniques d'analyse les plus répandues [1], [2], [10], [11], [12], utilisent "l'analyse synchrone". En utilisant une cadence d'échantillonnage asservie à la fréquence de rotation de l'arbre entraînant la roue dentée, on peut sommer en phase toutes les composantes dont la fréquence est multiple de celle de la rotation de l'arbre.

En pratique, on moyenne sur un nombre important d'échantillons (> 100).

Ceci présente plusieurs avantages :

- on obtient un très bon rapport S/B, B le bruit étant tout ce qui n'est pas synchrone,
- le signal étant périodique, le problème du "fenêtrage" de la Transformée de Fourier est éliminé,
- on "localise" l'engrènement de chaque dent.

Cependant, en présence de fluctuations de vitesse de rotation (ce qui est souvent le cas en pratique), il se produit un filtrage passe-bas qui peut masquer ou atténuer justement la non-stationnarité que l'on souhaite détecter.

Généralement, la surveillance et la détection de défauts répartis sur les dentures se fait en analysant les modulations sur le spectre de Fourier ou mieux sur le cepstre [1].

Les défauts localisés sont recherchés sur le signal temporel synchrone en utilisant des paramètres tels que les valeurs crête-crête, le facteur de crête, la variance, le kurtosis....

Ces paramètres ne permettent pas la détection de l'écaillage à l'état précoce [10], [11], [12], c'est le cas dans les essais présentés au § 4 .

Notons enfin, l'utilisation des détections d'enveloppe autour de raies particulières avec les mêmes remarques que précédemment car les non-stationnarités sont généralement du type large bande.

### 3. DETECTION DE NON-STATIONNARITES PAR MODELES AR

La détection de changements brusques (de ruptures) dans un signal est abondamment traitée dans la littérature (voir [15] pour un survey).

Les propriétés recherchées pour les algorithmes correspondants sont les suivantes :

- i) pas de fausses alarmes et de non détection
- ii) une détection rapide
- iii) une détection "symétrique", ie, dans le sens direct et rétrograde

La dernière condition étant sensible aux changements de caractéristiques spectrales [15].

Dans notre cas (§ 4) les conditions i) et ii) sont suffisantes car la non-stationnarité recherchée - en l'occurrence le défaut - est brève et n'a pas de "signature" particulière.

Les techniques de détection les plus répandues utilisent un modèle AR pour blanchir le signal.

Considérons  $(y(n))_n$  un signal échantillonné, l'erreur de prédiction linéaire  $(e(n))_n$  est obtenue en filtrant le signal au travers d'un filtre blanchissant :

$$e(n) = y(n) + \sum_{k=1}^P a_k y(n-k) \quad (2)$$

Le filtre blanchissant :

$$A(z) = 1 + \sum_{k=1}^P a_k z^{-k} \quad (3)$$

peut être connu au préalable (modèle global du signal) ou identifié de façon séquentielle à l'aide d'algorithmes récursifs.

La détection du changement est alors réalisée sur l'erreur de prédiction en testant son éloignement de l'hypothèse bruit blanc ou, en étudiant les propriétés de franchissement d'un seuil par l'EPL plus apte à détecter les non-stationnarités brèves, technique que nous avons adoptée.

La procédure de détection est la suivante : "il y aura présence de non-stationnarité - ie d'un défaut - si le module de l'EPL séjourne pendant un certain nombre d'échantillons consécutifs  $L$ , au-dessus d'un seuil défini par la variance de l'erreur de prédiction". On ne tient pas compte des franchissements dans les autres cas. Cette procédure a été développée et décrite dans [16], [17].

Le seuil  $S$  permet de définir la probabilité de fausse alarme  $\alpha$  :

$$(P(|e(n)| > S))^L < \alpha \quad (4)$$

$$\text{avec : } S = k \sigma_E^2 \quad (5)$$

$\sigma_E^2$  étant la variance de l'EPL.

Dans les essais présentés en § 4, nous n'avons pas réinitialisé l'algorithme après chaque détection ceci car les non-stationnarités recherchées sont brèves et peu marquées.

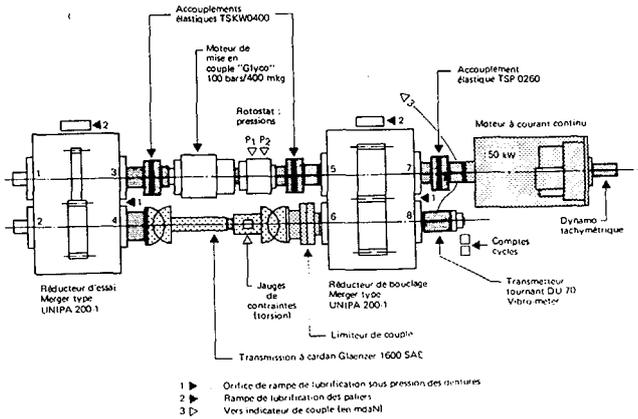


Figure 1 : Banc d'essai IDEFIX 401.

#### 4. APPLICATION A LA DETECTION PRECOCE DE L'ÉCAILLAGE DANS LES ENGRÈNAGES

Les tests ont été effectués sur un banc d'essais d'engrenages de grandeur industrielle du CETIM fonctionnant 24h/24 (figure 1). Le dimensionnement des roues de l'engrenage cémenté trempé, ainsi que les conditions de fonctionnement (vitesse, couple) sont fixés de façon à obtenir un écaillage sur toute la largeur d'une dent (qui fixe la fin de l'essai, la rupture étant imminente) en environ 15 jours. Ceci permet d'étudier la tenue à la pression superficielle de certains matériaux [14].

Il est essentiel de détecter l'écaillage dès son apparition pour deux raisons :

- il évolue très vite vers la rupture
- on peut retarder la dégradation en diminuant (quand c'est possible) les conditions de charge sur les dents

Dans le cas présenté ci-dessous, l'essai a duré 10 jours, les mesures de vibrations ont été recueillies sur le palier (en vertical) de la roue testée, toutes les 24 heures, juste avant un arrêt pour le contrôle visuel de l'état des dentures.

Les conditions d'essais étaient :

- Vitesse : 1000 tr/mn
- Couple : 200 mdaN
- Nombre de dents de la roue testée : 20 (rapport 20/21)

##### Evolution des défauts constatés

- 6<sup>ème</sup> jour : apparition d'un écaillage sur la dent 1/2(\*) (1/5 de la largeur de la dent) qui n'a pratiquement pas évolué.
- 8<sup>ème</sup> jour : début écaillage sur la dent 15/16.
- 9<sup>ème</sup> jour : évolution de celui-ci (1/2 largeur).
- 10<sup>ème</sup> jour : écaillage sur toute la largeur de la dent 15/16 (arrêt de l'essai).

(\*) les dents sont repérées par rapport à un top tour avec une précision de  $\pm 1$  dent.

##### Détection de l'écaillage

La figure 2, représente les signaux sur un tour obtenus par sommation synchrone sur 20 tours pour avoir un bon repère de phase, la vitesse de rotation étant légèrement variable (~ 5 %). Ils ont été enregistrés le :

- 3<sup>ème</sup> jour : pas de défaut apparent.
- 7<sup>ème</sup> jour : 24h après l'apparition de l'écaillage dents 1/2.
- 8<sup>ème</sup> jour : début de l'écaillage dents 15/16.
- 9<sup>ème</sup> jour : écaillage sur 1/2 largeur dents 15/16.
- 10<sup>ème</sup> jour : sur toute la largeur.

Sur de tels signaux, le défaut est clair le 10<sup>ème</sup> jour.

Notons tout d'abord, que les techniques classiques (crête-crête/kurtosis sur le signal brut ou sur l'enveloppe) n'ont pas permis de mettre en évidence l'écaillage avant le 10<sup>ème</sup> jour.

Le seuil  $S$  et la durée de séjour au-dessus du seuil ont été fixés à  $S = 2 \times \sigma_E$  et  $L = 4$ . Les meilleurs résultats ont été obtenus avec ces choix et ce, quelque soit l'ordre du modèle.

En figure 2 : on note les détections faites en utilisant un modèle AR d'ordre 3 identifié sur le premier fichier (pas de défaut) à l'aide de l'algorithme de Levison.

Il est remarquable de noter une détection avant que les défauts n'apparaissent, ce qui suggère l'utilisation de ces techniques pour le contrôle qualité des engrenages [18], [19].

On note une détection plus tardive lorsqu'on utilise un AR (10), ceci car la non-stationnarité recherchée est brève (figure 3).

L'utilisation d'un modèle global pour chaque fichier conduit à des résultats équivalents, ceci suggère d'utiliser ce type de techniques pour faire du "one-shoot monitoring" [11] - (Détection d'un défaut sur une acquisition).

Concernant les fausses alarmes, elles ne se retrouvent généralement "verticalement" (figure 2 : dent 13).

L'utilisation d'une détection séquentielle avec un algorithme des moindres carrés récurrents (RLS) engendre beaucoup de fausses alarmes [on détecte le passage d'une dent à l'autre] (figure 4).

#### 5. CONCLUSIONS

Cet article a été consacré à l'application de techniques de détection de non-stationnarités dans un signal utilisant les propriétés de franchissements d'un seuil par l'EPL, pour la détection précoce de défaut (l'écaillage) dans un engrenage.

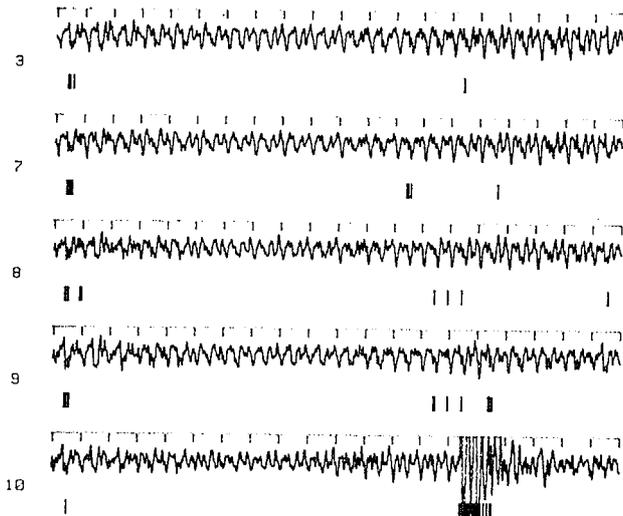
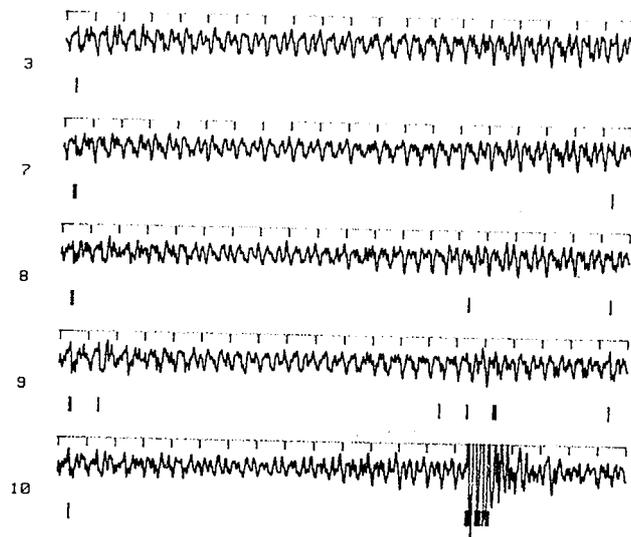
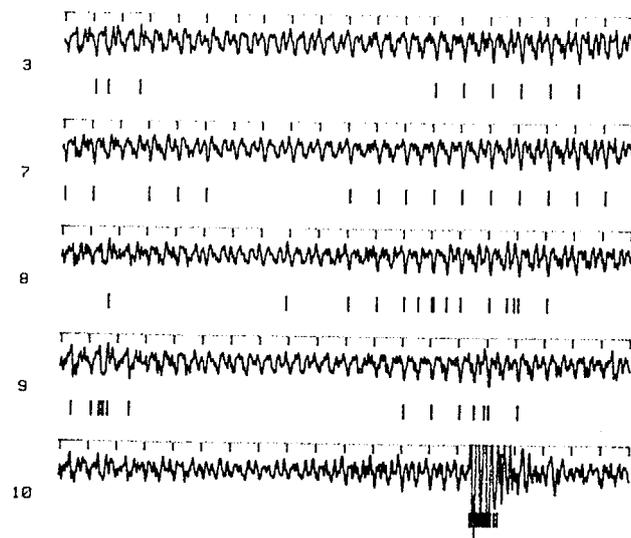
Sur les essais préliminaires qui ont été effectués, cette technique a permis de détecter le défaut à l'état précoce (et même avant que celui-ci n'apparaisse : défauts de taillage des dents...?). Ces résultats sont prometteurs pour la surveillance et le diagnostic de machines tournantes car ils ont été obtenus sur un cas relativement complexe (variation de vitesse de rotation, défauts caractérisés par des non-stationnarités faibles sans signature caractéristique). De plus, du point de vue numérique de tels algorithmes sont très simples à mettre en œuvre.

Il faut néanmoins, tester d'autres techniques de modélisation paramétriques, temps-fréquence ou temps-échelle pour la détection, la classification de défauts dans les machines tournantes et les valider.

De telles études sont actuellement menées dans ce sens avec l'ENST et dans le cadre du GRECO-TDSI.



## BIBLIOGRAPHIE

Figure 2 : AR(3) Levinson,  $L = 4$ ,  $k = 2$ Figure 3 : AR(10) Levinson,  $L = 4$ ,  $k = 2$ Figure 4 : AR(3) RLS,  $L = 4$ ,  $k = 2$ 

- [1] **R.B. RANDALL** : "Machine health monitoring by analysis of accelerometer derived signals". Fase 84, invited paper, 1984.
- [2] **J.F. GAILLOCHET** : "Méthodes de surveillance de l'état mécanique des machines au moyen de l'analyse des vibrations". Revue d'acoustique n° 57, pages 82-91, 1979.
- [3] **P. PAPIN** : "Vibrations des réducteurs et multiplicateurs, méthodes modernes de diagnostic, remèdes possibles". Journées d'études sur l'engrenage, Mai 1979.
- [4] **C. CHABANON** : "Etude de méthodes de discrimination quadratique en Rf. Application au diagnostic automatique de réducteurs à engrenages". Thèse Docteur-Ingénieur, UTC, 1982.
- [5] **L.F. PAU** : "Failure diagnosis and performance monitoring". Dekker, Inc, New York 1981.
- [6] **S.M. WU et al** : "Signature Analysis for Mechanical systems via Dynamic Data System (DDS) monitoring technique". Journal of Mechanical Design, volume 102, Avril 1980.
- [7] **W. GERSH** : Two applications of parametric time-series modelling methods". In "Mechanical signature analysis", édité by S. BRAUN, Academic Press, 1986.
- [8] **S.M. PANDIT et al** : "Application of Data Dependant Systems to Diagnostic Vibration Analysis". Journal of Mechanical Design, volume 102, Avril 1980.
- [9] **G. LEVEY** : "Analyse modale et surveillance vibratoire des machines tournantes. Thèse de Doctorat, Université Rennes, Septembre 1988.
- [10] **R.M. STEWART** : "Some useful data analysis techniques for gearboxes diagnosis". Time Series Analysis Symposium Southampton, 1977.
- [11] **R.M. STEWART** : "The specification and development of standard for gearbox-monitoring". Proc. Instr. Mech. Eng, 1980.
- [12] **P.D. Mc FADDEN** : "Detecting fatigue cracks in gears by amplitude and phase modulations of the meshing vibrations". Journal vib, acc, stress, volume 108, 1985.
- [13] **T. DANG** : "Les différents aspects des dentures d'engrenages après fonctionnement". CETIM Information n° 104, Février 1988.
- [14] **L. FAURE** : "Engrenages cémentés trempés. Détermination de la pression limite de fonctionnement. Rôle de la lubrification". CETIM Information n° 104.
- [15] **M. BASSEVILLE** : "Detecting changes in signals and systems : A survey". Rapport de recherche IRISA, n° 351, 1987.
- [16] **P. SOULE, F. CASTANIE** : "Méthode de détection de non-stationnarités par analyse des propriétés de franchissement d'un seuil par l'erreur de prédiction linéaire", GAPSE/ENSEEIH, GRETSI, 1983.
- [17] **C. VILLEMUR, F. CASTANIE, D. GARREAU** : "Détection de défauts et segmentation de signaux de contrôle non destructif". GRETSI, Nice, Juin 1987.
- [18] **L. FAURE** : "Contrôle des Engrenages - Mesure de l'écart de transmission". CETIM Information n° 109, Février 1989.
- [19] **E. BARON, B. FAVRE** : "Analysis of relation between gear noise and transmission error". Internoise, Avignon, Septembre 1988.