

SURVEILLANCE DES ROULEMENTS PAR ANALYSE VIBRATOIRE

Reçu le 03/05/2003 – Accepté le 30/06/2004

Résumé

Ce travail présente une étude sur la surveillance des roulements par l'analyse vibratoire. Les vibrations sont des phénomènes physiques utilisés pour mettre en évidence les défauts de fonctionnement ou de dégradation d'une machine tournante et donnent une meilleure mesure de son état. La détection de la détérioration précoce d'un roulement est mise en évidence par l'utilisation d'un indicateur de défaut statistique temporelle qui est le kurtosis. Cette approche permet de développer une nouvelle forme de maintenance communément appelée maintenance conditionnelle.

Mots clés: maintenance conditionnelle, analyse vibratoire, diagnostic, kurtosis.

Abstract

This work presents a study on the monitoring of the bearings by vibration analysis. Vibrations are physical phenomena used to highlight the degradation or malfunctions of a rotating machine and give a better measurement of its state. The detection of the early deterioration of a bearing is highlighted by the use of an indicator of statistical temporal defect which is the kurtosis. This approach makes it possible to develop a new form of maintenance commonly called conditional maintenance.

Keywords: conditional maintenance, vibration analysis, diagnostic, kurtosis.

**R. CHAIB
S. MEZIANI**

Département Génie Mécanique
Université Mentouri
Constantine, Algérie

I. VERZEA
Université Technique
Gh. Asachi Iasi, Roumanie

ملخص

يمثل هذا العمل دراسة حول مراقبة المدحرجات بواسطة التحليل الاهتزازي. إن الاهتزازات هي ظواهر فيزيائية مستعملة لتجسيد أو لإظهار خلل الاشتغال أو تدهور حالة ماكينة دورا نية (دوارة) وتسمح بالقياس الجيد لحالة الماكينة. إن التعرف على التلف في مراحل الابتدائية المدحرجات يتم باستعمال مؤشر الخلل استاتيكي الزمني المسمى ب: Kurtosis. هذه الفكرة تسمح بتطوير شكل جديد للصيانة المعروفة بالصيانة الشرطية. **الكلمات المفتاحية:** الصيانة الشرطية، التحليل الاهتزازي، Kurtosis.

La production industrielle évolue dans un contexte de plus en plus sévère en ce qui concerne la qualité, la sécurité et les nuisances. Par conséquent, l'outil de production doit faire l'objet d'une maintenance efficace. Des pannes catastrophiques inattendues entraînent à la fois une perte de production et des factures de réparations très élevées. Un arrêt de production pour une maintenance sur la chaîne de production d'une cimenterie algérienne peut coûter jusqu'à un milliard de Da/jour. De plus, une maintenance mal adaptée à un maillon de la chaîne, peut également conduire à une situation critique, dangereuse aussi bien pour le personnel que pour le matériel et/ou pour l'environnement. De ce fait, la surveillance et le diagnostic des défauts sont aujourd'hui primordiaux pour la fiabilité, la disponibilité, la maintenabilité et l'efficacité des systèmes de production ainsi que pour la protection de l'environnement. Sans doute, les roulements sont des éléments primordiaux sur la majorité des machines tournantes, les plus sollicités et les plus sensibles [1]. Suite à ces sollicitations répétées, les roulements restent l'un des points faibles de la machine. Il est devenu un composant incontournable pour l'industrie, car il figure dans la grande majorité d'organes mécaniques vitaux. Sa consommation est de l'ordre de deux milliards de roulements par année, soit 40 % de la production mondiale [2]. L'objectif de ce travail est de répondre aux impératifs industriels dans le contexte de détection précoce de la détérioration des roulements, utilisant le signal vibratoire, étant donné que ce dernier est l'identité de la machine.

1- CAUSES POTENTIELLES DE DEGRADATION

Le roulement est constitué généralement de deux bagues dans lesquelles sont pratiquées les gorges de roulement, où se meuvent les parties roulantes (Fig. 1).

C'est un organe qui assure à lui seul plusieurs fonctions principales. Il permet le positionnement d'un arbre par rapport à son logement, tout en assurant une rotation précise avec le minimum de frottement et transmet

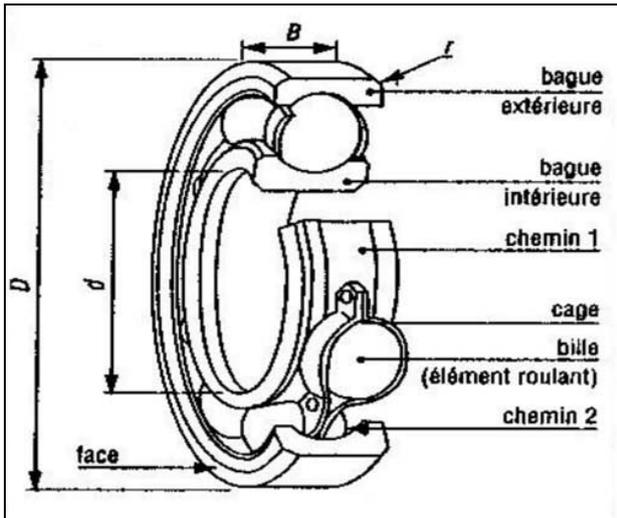


Figure 1: Constitution générale d'un roulement.

les efforts radiaux et/ou axiaux, ainsi que le guidage en rotation. C'est un organe de précision (précision de rotation et précision de position), difficile d'accès et dont l'entretien et/ou le remplacement peuvent engendrer des arrêts de maintenance longs et coûteux [3]. Comme tous les organes mécaniques, les causes de dysfonctionnement des roulements sont très nombreuses. Le plus souvent, ce sont l'écaillage, le grippage et la corrosion. Tous ces défauts ont en commun le fait qu'ils se traduisent tôt ou tard par une perte de fragments de métal (Fig. 2), qu'on appelle l'écaillage [4, 6].

L'écaillage se traduit par des chocs répétés des billes sur la cage ou les pistes du roulement. Ces chocs provoquent une vibration du type impulsif qui se propage sur la bague, puis sur la cage externe du roulement : impulsion [5] (Fig. 3). Ces impulsions deviennent la source de modulation d'amplitude du signal aléatoire de vibrations.

Elles sont caractérisées par une montée très raide et par une durée très courte et par conséquent, il se produira une augmentation de la valeur efficace du signal vibratoire et de son facteur de crête [6, 8]. La reconnaissance de la nature des vibrations est un élément précieux pour la détermination de l'origine d'une anomalie. En mettant en évidence la répétition de cette impulsion, nous définissons ainsi les fréquences caractéristiques des défauts de chaque élément du roulement.

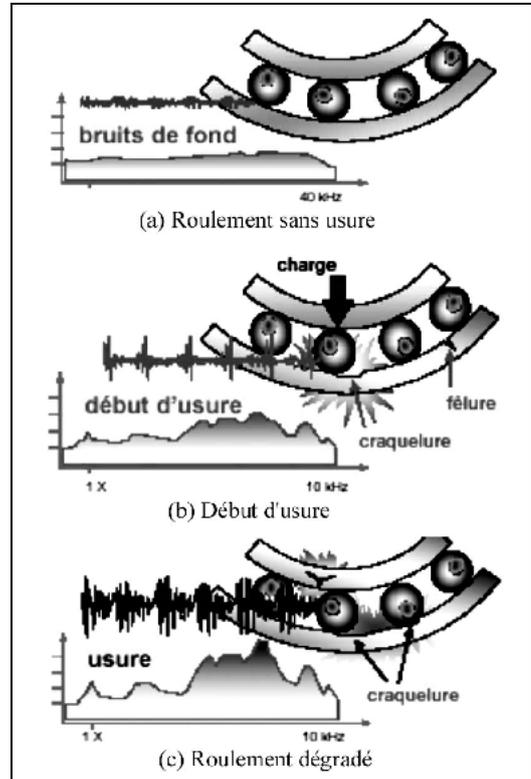


Figure 3: Processus de dégradation d'un roulement.

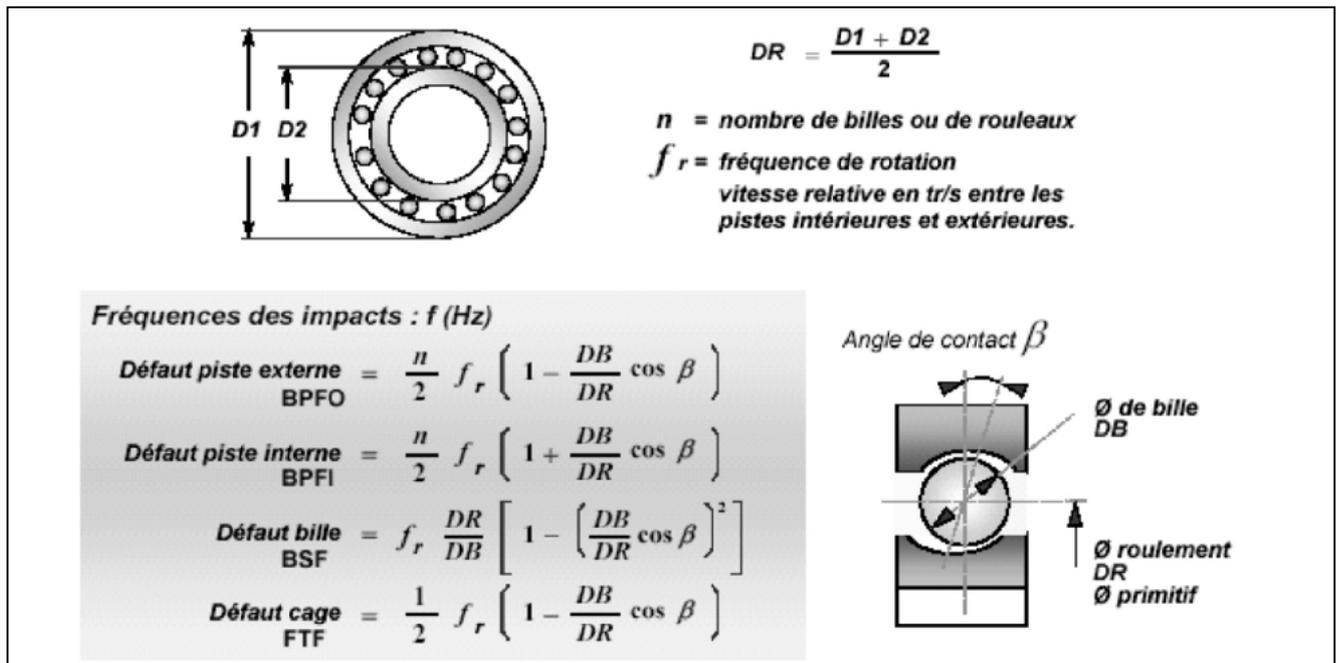


Figure 2: Fréquences caractéristiques des défauts des éléments d'un roulement.

2- ANALYSE VIBRATOIRE

L'expérience a montré que, parmi les différents phénomènes physiques utilisés pour mettre en évidence des défauts de fonctionnement ou de dégradation d'une machine tournante et donnant une meilleure mesure de son état, on a la vibration. Les vibrations fournissent des paramètres fondamentaux permettant la détection précoce des causes de défaillance et donc la définition de l'organe défectueux, sans démontage de la machine. Par conséquent, la correction éventuelle et la programmation des opérations de maintenance seront limitées aux seuls maillons et organes défaillants. Toutes les machines vibrent et au fur et à mesure que l'état de la machine se détériore (balourd, usure de roulements, usure d'engrenages, défaut d'alignement, défaut de graissage, desserrage, jeu, fissures, etc.), la signature vibratoire change. C'est la première manifestation physique d'une anomalie, cause potentielle de dégradation et de panne [1]. Les techniques et les méthodes mises en œuvre pour caractériser et surveiller l'état des roulements dans une machine tournante sont nombreuses et très diverses. Chacune de ces méthodes correspond à des niveaux différents de connaissances du phénomène et à l'utilisation de matériels d'analyse. Ces techniques peuvent être regroupées en trois grandes familles (Fig. 4).

Techniques de surveillance de l'état des roulements

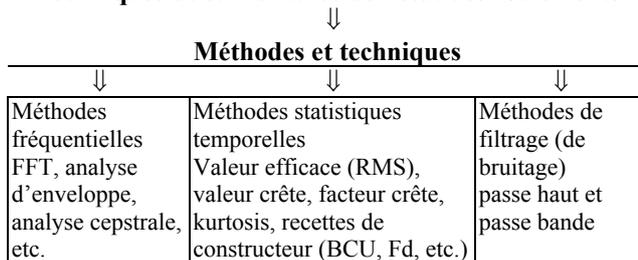


Figure 4: Techniques de surveillance des roulements.

Dans ce travail, nous allons utiliser les méthodes de traitement de signal associées à des méthodes statistiques appropriées, pour mettre en évidence la détection de la détérioration précoce d'un roulement, utilisant un des différents indicateurs des méthodes statistiques temporelles. Il faut signaler que les méthodes et les résultats dans le domaine de l'analyse vibratoire intéressent directement la production industrielle [9].

2.1- Valeur efficace

La valeur efficace, donnée par l'expression suivante : $V_{RMS} = [1/N \sum (x_i^2)]^{1/2}$, permet de contrôler rapidement l'état de la machine et d'indiquer si les conditions de fonctionnement ont évoluées de manière inquiétante depuis la dernière mesure. Ce critère n'évolue pas de manière significative au cours de la 1^{ère} phase de dégradation, il ne commence à croître que pendant la 2^{ème} phase de dégradation [7]. Ceci est un point faible pour la maintenance conditionnelle et rend la détection précoce impossible. De plus le signal vibratoire recueilli par le capteur contient toujours des bruits non seulement de la machine mais aussi de l'environnement, ce qui peut

entraîner une mauvaise interprétation de la valeur RMS, surtout dans un espace industriel où les machines ne sont pas isolées, sans toutefois oublier l'effet de masque.

2.2- Valeur crête

La valeur crête, donnée par : $V_c = 20 \log (Am/\sigma_x)$ est un indicateur qui caractérise l'amplitude maximale des chocs. Il se manifeste dès l'apparition de la première écaillage et donne une information très précoce de la prédiction. Malheureusement, c'est un mauvais indicateur une fois que la dégradation s'accroît.

Il faut remarquer aussi, que ces deux indicateurs (V_{RMS} , V_c) dépendent de la vitesse de rotation, des charges de la machine et des dimensions des roulements. Ceci est un inconvénient pour la surveillance des roulements (seuil de la surveillance).

Pour palier à cela, des méthodes équivalentes ont été introduites, telles que :

- le facteur de crête : $F_c = V_c/V_{RMS}$;
- le facteur de défaut : $F_d = a F_c + b V_{RMS}$.

Malheureusement, il est impossible de déterminer si le roulement est en début ou en fin de dégradation, au moins pendant les premières mesures. Un autre indicateur permettant de caractériser le caractère impulsif d'un signal vibratoire, en particulier pour les roulements, fondé sur l'examen de la distribution d'amplitude d'un signal vibratoire, est le kurtosis.

2.3- Le kurtosis

Le kurtosis, donnée par :

$$K = 1/N \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4 / \sigma^4$$

est un indicateur adimensionnel permettant de caractériser le degré d'aplatissement d'une distribution d'un signal vibratoire [7]. Il a l'avantage d'être indépendant des variations des vitesses de rotation et des charges de la machine.

Prenons l'exemple d'un roulement dont nous avons suivi l'évolution du kurtosis, en faisant varier la gamme de fréquence et celle de l'amplitude. Cette étude permet d'introduire le kurtosis, comme l'un des paramètres de la loi de dégradation d'un roulement.

En effet, le signal vibratoire d'un roulement en bon état génère un signal de distribution gaussienne avec un kurtosis voisin de 3 compris entre (2.75 – 3.25) [5]. Par contre, la détection d'un défaut précoce produit un signal transitoire et périodique avec une allure de distribution modifiée avec un kurtosis plus grand (Fig. 5). Pour quantifier ce changement de distribution, le kurtosis est le facteur le plus sensible.

3- ETUDE EXPERIMENTALE

Nous étudions le cas d'un roulement à rangée à billes et à contact oblique, pour des conditions de fonctionnement sous une charge purement radiale constante et de différentes vitesses de rotation. La bague intérieure fut montée sur un axe tournant, la bague extérieure dans un logement fixe. L'essai a été répété pour sept roulements de

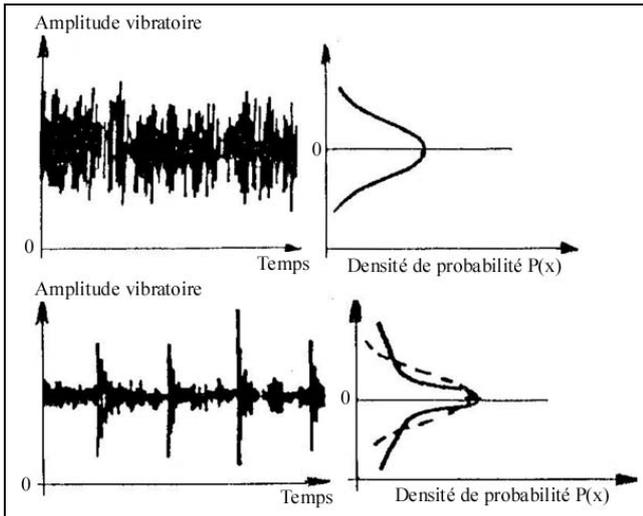


Figure 5: Signature vibratoire d'un roulement: a) roulement en bon état, b) roulement dégradé.

même type. Pour mesurer le kurtosis dans le temps, tout en faisant varier la fréquence de rotation, nous avons utilisé le dispositif donné sur la figure 6. La collecte des données nécessaires à la mesure et l'analyse, a été effectuée à l'aide de deux accéléromètres, disposés respectivement, parallèlement (capteur 12) et perpendiculairement (capteur 11) à la charge. Etant donné que le signal vibratoire d'un choc couvre une large bande de fréquence, seulement la partie haute fréquence sera utilisée pour évaluer l'état de roulement. La partie basse fréquence est à écarter parce qu'elle est toujours perturbée par des phénomènes mécaniques générés par d'autres défauts de la machine.

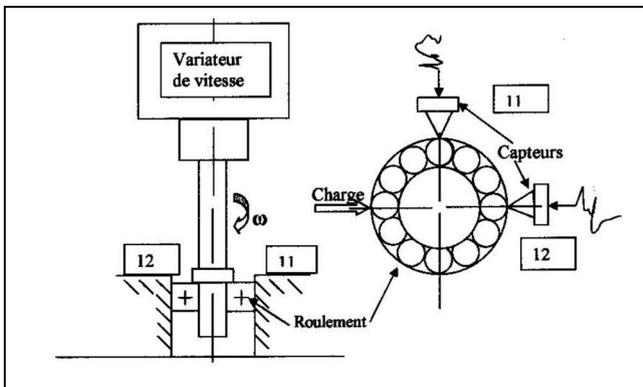


Figure 6: Dispositif expérimental.

4- RESULTATS ET DISCUSSION

Les figures 7 et 8, présentent la variation du kurtosis pour chaque cas de mesure.

Sur la figure 7, nous représentons l'évolution du kurtosis dans le temps pour différentes fréquences de rotation et avec un capteur placé parallèlement à la charge. Nous remarquons que cette disposition du capteur ne permet pas de donner un diagnostic fiable sur l'état de dégradation du roulement, les amplitudes de vibration à cet endroit sont plus faibles à cause du jeu qui est minimum.

Sur la figure 8, nous représentons l'évolution du kurtosis dans le temps pour différentes fréquences de

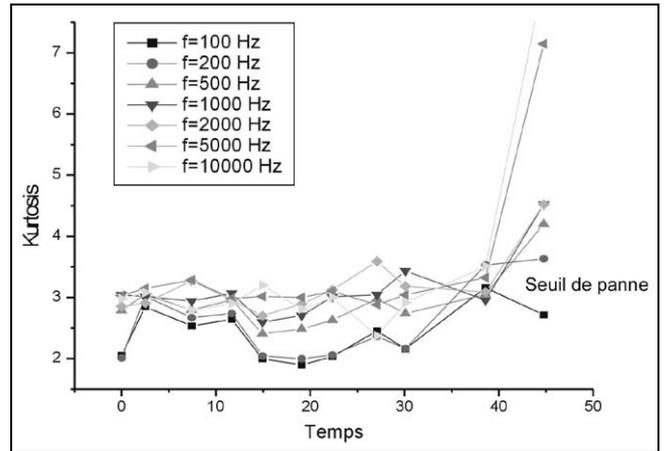


Figure 7: Variation du kurtosis longitudinal en fonction du temps.

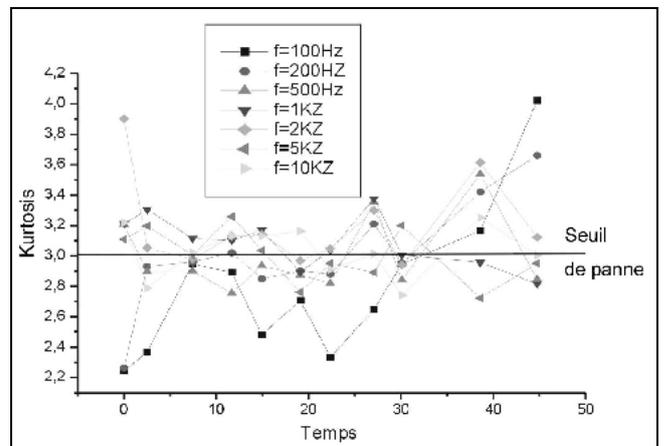


Figure 8: Variation du kurtosis vertical en fonction du temps.

rotation et avec un capteur placé perpendiculairement à la charge. Cette disposition du capteur permet de détecter l'évolution de la dégradation par un accroissement important du kurtosis. Cet accroissement est plus marqué pour les hautes fréquences (1,2,5,10 Kz). Dans cette direction, le jeu est maximal entre les éléments actifs du roulement, ce qui nous a permis de caractériser l'impulsion.

CONCLUSIONS

La détection de la détérioration précoce d'un roulement est mise en évidence par l'utilisation d'un indicateur de défaut statistique temporelle qui est le kurtosis. Dans le cas du roulement traité, l'évolution du kurtosis a été étudiée pour différentes gammes de fréquences de rotation. Cette étude a permis d'arriver aux conclusions suivantes :

- Le kurtosis semble bien adapter à la surveillance de certains éléments de machines tournantes, en particulier les roulements, à condition d'avoir une bonne qualité de mesure (positionnement des capteurs) ;
- Le kurtosis permet à l'utilisateur de disposer d'un outil particulièrement adapté à la surveillance de chocs périodiques et de quantifier le caractère impulsionnel d'un signal ;
- Il permet aussi de détecter les problèmes de lubrification des roulements. Lors d'une augmentation de ce paramètre, il suffit de faire un graissage et d'effectuer une nouvelle

mesure, pour se rendre compte s'il s'agit d'une usure ou d'un simple manque de lubrification ;
- Il présente l'avantage d'être un indicateur simple à surveiller au cours du temps

REFERENCES

- [1]- Rasolofondraire L., "Mise en œuvre des méthodes paramétriques adaptatives pour la surveillance d'une machine de production par analyse vibratoire", Thèse de doctorat de l'université de Reims Champagne-Ardenne, Déc. (1995).
- [2]- Nelias D., "Contribution à l'étude des roulements. Modélisation globale des roulements et avaries superficielles dans le contact EHD pour des surfaces réelles ou indentées", Thèse de doctorat de l'institut national des sciences appliquées de Lyon. Université Claude Bernard-Lyon I, déc. (1999).
- [3]- SKF, assistance technique. Les lubrifiants et les outils SKF. Pour un fonctionnement sans problème, avril (1999).
- [4]- des Forges X., "Méthodologies de surveillance en fabrication mécanique. Application de capteur intelligent à la surveillance d'axe de machine outil", Janv. (1999).
- [5]- Arques P., "Diagnostic prédictif de l'état des machines", Masson (1996).
- [6]- Morel J., "Vibration des machines et diagnostic de leur état mécanique", Eyrolles (1992).
- [7]- Poizat Framatone Ph., "Diagnostic, le facteur défaut pour la surveillance des roulements", *Maintenance & entreprise*, N° 458, janv.- fév. (1993).
- [8]- Boulenger A., Pachaud C., "Surveillance des machines par analyse des vibrations. Du dépistage au diagnostic", AFNOR, 2ème Tirage, (1998).
- [9]- Chaïb R., Meziani S., Verzea I., "Management de la maintenance conditionnelle. Etude de cas : surveillance des roulements par analyse vibratoire", Buletinul Institutului Politehnic Iasi, Tomul XLVII, Sectiunea VIII, Fasc.1-2, Iasi, Romania, (2002). □