

## MAINTENANCE PRÉVENTIVE

# Les roulements, des composants à surveiller de près



Les roulements sont les composants les plus fragiles des machines tournantes. Pour éviter des arrêts de production coûteux dus à la défaillance imprévue de l'un d'entre eux, il faut donc en permanence les surveiller, et "traquer" l'apparition du moindre défaut... Pour cela, ce ne sont pas les techniques qui manquent. Des méthodes classiques d'analyse vibratoire (détection d'enveloppe, analyse du cespthe, kurtosis, facteur de crête, etc.) à des techniques plus spécifiques telles que l'onde de choc, elles permettent de détecter les défauts à un stade plus ou moins précoce, et parfois même d'en déterminer l'origine exacte. Bien sûr, il n'existe pas de méthode universelle. Le meilleur outil de surveillance est alors celui qui associe plusieurs techniques...

**D**es roulements, il y en a partout... Des pédales de vélos au ventilateur des PC en passant par les compresseurs ou les roues de véhicules, un très grand nombre de systèmes en rotation en sont équipés. Et dans l'industrie, ce sont des composants stratégiques des machines tournantes : situés entre les parties fixes et les parties mobiles de la structure, ils assurent la transmission des efforts et la rotation de l'arbre.

Mais s'ils sont les plus courants, ces composants sont aussi les plus fragiles. Il faut dire que les différents éléments qui les constituent (les billes, la cage et les bagues) sont en permanence sollicités. Le passage répé-

Un environnement poussiéreux, la présence de copeaux ou d'impuretés dans le corps du système, des lubrifiants pollués ou une atmosphère humide... sont autant d'agents extérieurs susceptibles de causer d'importants dégâts.

Pour éviter des arrêts de production imprévus et coûteux, il faut alors surveiller en permanence l'état des roulements, et "traquer" tous les signes précurseurs des défauts : un bruit inhabituel, des vibrations anormales, une élévation de température, etc.

### De nombreux outils de surveillance

Il existe pour cela une grande variété de méthodes. Le plus souvent, on emploie des **techniques d'analyse vibratoire** en exploitant le signal fourni par un accéléromètre (fixé à proximité du roulement). Ces méthodes, utilisées en maintenance préventive depuis de nombreuses années, ont largement fait leurs preuves. Elles permettent de détecter de façon précoce l'apparition d'un défaut, et même, pour certaines d'entre elles, d'en connaître l'origine.

Leur principe est simple. A chaque fois qu'une bille entre en contact avec un écaillage ou une fissure, il se produit des chocs (de nature périodique), qui se caractérisent par un signal vibratoire particulier. Une analyse temporelle, et surtout fréquentielle, de ce signal permet d'en déduire une mine d'informations : l'amplitude des chocs dépend de la dimension et de la géométrie du défaut, de la vitesse de rotation, de la charge... et leur fréquence de répétition est liée notamment



SKF

à la localisation du défaut (bague, bille, etc.). En comparant le signal obtenu avec un certain nombre de fréquences "caractéristiques" connues, on en déduit alors la nature du défaut...

Dans la pratique, la présence des défauts aux fréquences caractéristiques n'est pas toujours facile à déceler. Pour les mettre en évidence, il existe alors toutes sortes d'outils plus ou moins complexes de traitement du signal. C'est le cas notamment de certains indicateurs statistiques ou temporels, tels que le facteur de crête du signal vibratoire. Ce descripteur, qui se définit comme le rapport entre la valeur crête et la valeur efficace, donne une information précoce sur la dégradation du roulement tout en étant indépendant des caractéristiques de fonctionnement (les dimensions du roulement, la charge, la vitesse de rotation, etc.). Seul inconvénient, le facteur de crête décroît lorsque les défauts se développent...

À côté de ces grandeurs de base (valeur efficace, valeur crête et facteur de crête), il existe un autre indicateur plus complexe, le kurtosis. Celui-ci est relié à la forme de la courbe représentant l'amplitude du bruit généré par un roulement. En temps normal, la distribution statistique de cette variable obéit à une loi gaussienne. Mais lorsqu'un défaut apparaît, l'allure de la courbe est modifiée. Le kurtosis (ou moment statistique d'ordre 4) permet alors d'en caractériser "l'aplatissement".

Cet indicateur ne manque pas d'avantages.

### L'essentiel

- Analyse vibratoire, onde de choc, analyse d'huile, mesure de température... il existe de nombreuses méthodes de surveillance des roulements.
- L'analyse vibratoire est la plus courante, et notamment les méthodes spectrales. Elles permettent à la fois de détecter les défauts et d'en connaître l'origine.
- Les autres techniques, telles que la thermographie ou l'analyse d'huile, peuvent ensuite confirmer le diagnostic.
- L'outil de surveillance "idéal" est alors celui qui associe le plus grand nombre de méthodes...

Comme il est calculé sur plusieurs bandes de fréquences à partir d'à peine quelques hertz et que les premiers défauts se manifestent par des chocs à basse fréquence, le kurtosis permet de détecter la dégradation des roulements à un stade précoce. De plus, « il est adapté à la surveillance des roulements des arbres tournants à de faibles vitesses de rotation (moins de 600 tours par minute) », indique David Bouin, ingénieur technico-commercial chez Prüftechnik.

L'inconvénient, c'est que tout comme le facteur de crête, le kurtosis décroît lorsque les défauts se développent. A un stade avancé de la détérioration du roulement, il reprend une valeur proche de 3, c'est-à-dire celle de l'état initial sans défaut. Pour pallier cet inconvénient, certains constructeurs d'outils de diagnostic ont alors défini leur propre descripteur. Suivant les cas, le langage employé est différent mais il s'agit presque toujours d'une combinaison plus ou moins complexe des indicateurs classiques. C'est le cas par exemple du facteur de défaut défini par 01dB-Stell. « C'est une combinaison linéaire du facteur de crête et de la valeur efficace, précise Jacky Dumas, directeur marketing de 01dB-Stell. Il en associe donc les avantages (une détection précoce, une faible sensibilité aux conditions de fonctionnement...), mais surtout, il croît pendant toute la phase de dégradation du roulement ».

En revanche, aucun de ces différents indicateurs ne permet vraiment de réaliser un diagnostic fiable. Pour aller plus loin et comprendre l'origine du défaut détecté, on utilise alors des méthodes d'analyse spectrales.

## Tout est dans le spectre

Outre l'analyse fréquentielle "classique" (obtenue à partir d'une transformée de Fourier du signal temporel), il existe des techniques d'analyse particulières qui permettant de réaliser un diagnostic de l'état des roulements.

C'est le cas notamment de la détection d'enveloppe (ou "démodulation d'amplitude"). Son principe consiste à filtrer en passe-bande le signal temporel, et à réaliser ensuite la transformée de Fourier de l'enveloppe du signal obtenu. La méthode permet donc de s'affranchir des signaux parasites basse fréquence émis par d'autres défauts de la machine (balourd, désalignement, etc.), et de ne garder que les signaux émis par les défauts des roulements (à haute fréquence). Ensuite, il ne reste plus qu'à rechercher les fréquences caractéristiques des défauts sur le spectre de l'enveloppe du signal filtré... « Cette méthode est intéressante pour réaliser un diagnostic à un stade précoce, et pour mettre en évidence des défauts géné-

ralement difficiles à observer (lorsque la puissance du signal est faible ou distribuée sur une large plage fréquentielle), souligne M. Dumas (01dB-Stell). Elle permet aussi de déterminer de manière fiable et rapide les fréquences de répétition des chocs, même dans le cas des chocs périodiques noyés dans du bruit de fond ». Néanmoins, elle nécessite de connaître le domaine fréquentiel d'intérêt pour le filtrage, et elle ne convient pas dans le cas de vitesses ou de charges variables. Enfin, comme les autres techniques d'analyse fréquentielle, elle montre ses limites dans les faibles vitesses de rotation.

Autre méthode, l'analyse cepstrale. Dans ce cas, on observe les raies présentes sur un spectre tout particulier : le cepstre. Souvent qualifié de "spectre du spectre", le cepstre est utilisé pour mettre en évidence les phénomènes périodiques qui se cachent derrière un spectre. Il est donc très efficace pour

rechercher et suivre l'évolution des chocs répétitifs, tels que ceux qui sont créés par un écaillage du roulement.

Mais les vibrations ne sont pas les seuls phénomènes à trahir la présence de défauts sur un roulement. Certains constructeurs exploitent directement les chocs causés par le passage répété des billes sur les défauts. La **méthode d'onde de choc** (mise en œuvre notamment chez SPM Instrument ou Prüftechnik pour ne citer qu'eux) est employée exclusivement dans la surveillance des roulements. « Lorsqu'elles tournent sur les bagues, les billes émettent en général des chocs à haute fréquence, autour de 30 kHz, explique Christian Cintrat, ingénieur commercial chez SPM Instrument. En utilisant un capteur spécifique dont la bande passante correspond à cette fréquence, on se concentre donc sur les signaux provenant des défauts de roulements. Les vibrations de la machine situées à des fréquences inférieures sont filtrées ».

## A chaque défaut sa fréquence

Les défauts qui apparaissent sur les roulements se manifestent par l'apparition de chocs périodiques à des fréquences particulières. Pour réaliser un diagnostic fiable à partir d'un spectre, on peut donc utiliser un certain nombre de fréquences "caractéristiques" :

→ Fréquence de rotation de la cage :

$$F_{cage} = \frac{1}{2} \cdot F_{arbre} \cdot \left(1 - \frac{d}{D_m} \cos \alpha\right)$$

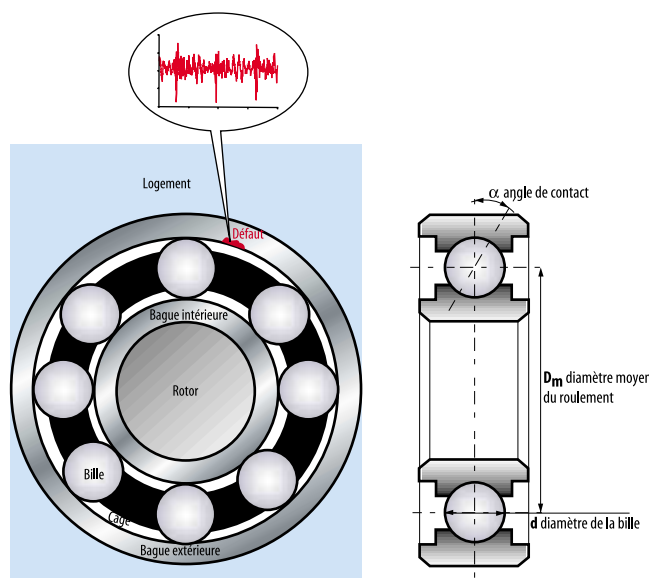
→ Fréquence de défaut de la bague extérieure :

$$F_{ext} = N \cdot F_{cage}$$

→ Fréquence de défaut de la bague intérieure :

$$F_{int} = N \cdot (F_{arbre} - F_{cage})$$

où  $F_{arbre}$  est la fréquence de rotation de l'arbre,  $d$  le diamètre d'une bille,  $D_m$  le diamètre moyen du roulement,  $\alpha$  l'angle de contact et  $N$  le nombre de billes.



Le résultat peut être donné sous la forme d'une simple indication qualitative. En fixant au préalable un seuil de référence, l'analyseur de SPM Instrument indique ainsi le résultat sous forme de trois indicateurs différents : vert lorsque l'état du roulement est normal, jaune lorsqu'il y a un signe de dégradation, et rouge lorsque l'état de détérioration est très avancé... Mais il est également possible de localiser le défaut et d'en comprendre l'origine. « On utilise alors un "spectre de choc", à partir de la transformée de Fourier du signal temporel obtenu avec le capteur d'onde de choc », indique Laurent Papillon, chef de produit chez SPM Instrument. La méthode d'onde de choc permet aussi d'évaluer la qualité de la lubrification. « Lorsque le film d'huile n'est pas suffisamment épais, le niveau d'onde de choc, habituellement faible, se met à augmenter », précise M. Cintrat (SPM Instrument). Autre intérêt, « comme il est excité à sa fréquence de résonance, un capteur d'onde de choc réagit avec une ampli-



Cérim

tude importante à des ondes de choc faibles, poursuit M. Cintrat. Il est donc très sensible, et cela dès l'initiation des défauts. Cela peut être utile pour s'assurer dès le départ que le roulement est correctement monté et qu'il n'a pas subi de chocs durant le transport ».

À côté de l'analyse des chocs ou des vibrations, la **surveillance thermique** du roulement constitue une autre méthode de surveillance. Toute élévation anormale de la température trahit en effet la présence d'un défaut dans le roulement. On utilise alors soit des thermocouples placés à proximité du

composant, soit des techniques de mesure sans contact telles que la thermographie infrarouge.

Une autre méthode consiste à **analyser l'huile** présente dans le roulement. Parfois, un simple examen visuel est riche d'enseignements : une graisse noire est le signe d'une usure anormale, une graisse rouge brun peut trahir la présence d'une corrosion, une graisse polluée d'éléments métalliques révèle un écaillage des surfaces, etc. Mais on peut aussi prélever un échantillon du fluide de graissage et l'analyser avec des méthodes quantitatives d'analyse chimique (telles que la ferrographie).

Enfin, il ne faut pas oublier qu'un bruit anormal peut aussi alerter le technicien de maintenance de l'apparition d'un défaut. **L'analyse acoustique**, basée sur une écoute en continu des bruits émis par la machine, se révèle alors intéressante...

## Principales méthodes de surveillance vibratoire

	Principaux avantages	Principales limitations
<b>Indicateurs simples</b>		
- Niveau global (mesure d'accélération)	- Indicateur simple et fiable	- Détection tardive - Diagnostic difficile - Peu adapté aux faibles vitesses de rotation - Détermination des seuils empirique
- Kurtosis (moment statistique d'ordre 4)	- Adapté à la surveillance des roulements des arbres tournant à de faibles vitesses de rotation (<600 t/min) - Détection à un stade précoce - Grande sensibilité aux chocs périodiques et non périodiques	- Décroissance de l'indicateur en fin de vie du roulement - Diagnostic souvent difficile
- Facteur de crête (rapport entre la valeur crête et la valeur efficace)	- Indépendant des conditions de fonctionnement (dimensions du roulement, charge, vitesse de rotation...)	- Décroit lorsque les défauts se développent
- Facteur de défaut (combinaison du facteur de crête et de la valeur efficace)	- Croît pendant toute la phase de dégradation du roulement - Détection à un stade précoce - Peu sensible aux conditions de fonctionnement	- Diagnostic souvent difficile - Peu adapté aux faibles vitesses de rotation
<b>Méthodes d'analyse qualitative</b>		
- Analyse temporelle	- Adaptée aux faibles vitesses de rotation - Permet d'analyser des phénomènes non périodiques (chocs aléatoires, chocs répétitifs à vitesse ou charge variable)	- Diagnostic souvent difficile
- Analyse fréquentielle	- Permet de localiser les défauts et de réaliser un diagnostic fiable - Ne nécessite pas de mesures supplémentaires	- Interprétation des spectres parfois difficile - Détection tardive - Inopérant à vitesse ou charge variable
- Détection d'enveloppe	- Diagnostic de défauts à un stade précoce - Permet de déterminer de manière fiable et rapide les fréquences de répétition des chocs	- Interprétation des spectres parfois difficile - Nécessite de connaître le domaine fréquentiel d'intérêt - Inopérant si vitesse ou charge variable - Généralement associé à d'autres méthodes (kurtosis par exemple)
- Analyse cepstrale	- Met en évidence les composantes périodiques d'un spectre - Permet de localiser et déterminer l'origine des défauts induisant des chocs périodiques - Interprétation de spectres complexes	- Utilisation en complément d'autres techniques





Pour connaître l'état des roulements, on utilise le plus souvent des méthodes de surveillance périodique. Moins coûteuses que les méthodes de surveillance continue, elles sont basées sur des appareils portables tels que les collecteurs de données. Reste ensuite au service maintenance à déterminer la périodicité des contrôles...

Prüftechnik

On l'aura compris, pour surveiller l'état des roulements, ce ne sont pas les techniques qui manquent. Et le choix de l'une ou l'autre d'entre elles est loin d'être une mince affaire.

## Un choix bien difficile

L'analyse vibratoire, par exemple, ne fait pas toujours l'unanimité. « Elle convient surtout pour surveiller l'état général de la machine tournante : la présence d'un balourd, d'un désalignement, de pièces desserrées, etc., tranche M. Cintrat (SPM Instrument). De plus, elle nécessite de bien connaître les différentes caractéristiques de la machine (le nombre de dents des pignons, le diamètre de l'arbre, etc.) et d'avoir une certaine expérience dans ce domaine pour interpréter correctement les spectres ». M. Bouin (Prüftechnik) fait la même analyse. « Les vibrations conviennent bien pour des problèmes "classiques" de machines tournantes mais l'analyse des chocs est plus adaptée à la surveillance spécifique des roulements ». Mais tous ne partagent pas cet avis. « L'analyse vibratoire a largement fait ses preuves dans la surveillance des roulements. Elle offre d'ailleurs un avantage de taille par rapport à l'émission acoustique ou à l'onde de choc : elle ne nécessite pas de capteur spécifique. Contrairement à la méthode d'onde de choc, n'importe quel accéléromètre peut convenir. Pour le personnel de maintenance, c'est donc une technique peu coûteuse », souligne M. Dumas (01dB-Stell).

Pour Dominique Carreau, responsable des produits bruits et vibrations au Cetim (Centre Technique des Industries Mécaniques), « quelle que soit la technique, il s'agit toujours de détecter un choc ou la réponse à un choc. Ces méthodes ont donc plus ou moins les mêmes avantages et les mêmes limitations. Le choix dépend surtout de l'application, et notamment de l'environnement vibratoire ». Il existe toujours des situations où des phénomènes parasites se superposent aux signaux provenant des roulements. En analyse vibratoire, par exemple, des défauts d'engrenages peuvent cacher les défauts de roulements. Il en est de même avec la méthode d'onde de choc. « Certaines soupapes de moteurs engendrent des chocs à une

fréquence proche de celle du capteur que l'on utilise (30 kHz), précise M. Cintrat (SPM Instrument). Mais ce sont des cas particuliers, et en général, on s'en aperçoit tout de suite... ».

Tout dépend aussi du type de surveillance que l'on souhaite effectuer. Si une surveillance périodique est généralement suffisante, il est parfois indispensable de réaliser une surveillance en ligne, notamment pour des applications exigeantes en termes de sécurité ou de cadences. Dans ce cas, la méthode d'analyse d'huile (qui nécessite de prélever un échantillon de fluide avant de l'examiner) ne peut pas convenir. On utilise alors des capteurs d'onde de choc, d'émission acoustique ou de vibrations que l'on fixe à demeure sur une structure fixe à proximité du roulement.



Il existe une grande variété de roulements. Les éléments roulants sont tantôt des billes, tantôt des rouleaux, tantôt des aiguilles... le diamètre du composant peut varier entre quelques millimètres et plusieurs mètres, sa masse entre quelques grammes et plusieurs dizaines de tonnes, etc. Suivant les cas, on n'utilise pas forcément les mêmes techniques de surveillance. Pour les roulements les plus onéreux, par exemple, il ne suffit pas de détecter l'apparition d'un défaut, mais d'en connaître précisément l'origine pour ne remplacer que l'organe défaillant.

Quoi qu'il en soit, il est toujours possible de combiner différentes méthodes pour confirmer le résultat. La mesure de température et l'analyse d'huile, par exemple, s'y prêtent particulièrement. « L'analyse thermique ne peut pas vraiment permettre de détecter les défauts à un stade précoce,

où la température varie relativement peu. En revanche, elle est utilisée pour confirmer le diagnostic, car la température évolue assez rapidement lorsqu'on se rapproche de la dégradation du roulement », souligne M. Carreau (Cetim). M. Dumas (01dB-Stell) fait la même analyse. « La thermographie et l'analyse d'huile sont complémentaires aux autres méthodes, car elles sont généralement plus tardives. Lorsqu'on détecte des paillettes métalliques dans le fluide de graissage, il est déjà un peu tard... ».

S'il n'existe pas de méthode universelle, la solution "idéale" consiste alors souvent à coupler les différentes techniques. Dans la détection d'enveloppe, par exemple, la présence d'un peigne de raies n'est pas nécessairement la conséquence de chocs périodiques provenant des roulements. Pour éviter des erreurs de diagnostic, on peut alors l'associer à un traitement statistique tel que le kurtosis. De même, « en combinant le kurtosis à une mesure de niveau global, il est possible d'avoir une idée de l'aggravation du défaut », souligne M. Carreau (Cetim).

Pour M. Dumas (01dB-Stell), il faut donc pouvoir disposer « d'une sorte de "boîte à outils" composée de différentes méthodes que l'on peut employer, ou pas, suivant les applications. Ainsi on utilisera par exemple des méthodes classiques d'analyse vibratoire pour les cas les plus courants, et le kurtosis pour les applications où l'on a de faibles vitesses de rotation ».

Bien sûr, il n'est pas toujours nécessaire de réaliser un diagnostic pour connaître l'origine exacte du défaut sur le roulement. « Dans 80 % des cas, ce qui intéresse l'industriel est surtout de savoir s'il y a un défaut ou pas, et non pas de savoir s'il vient des billes ou des cages. Le diagnostic de l'origine du défaut n'est utile que dans des cas particuliers où les roulements sont très onéreux (certains coûtent plus de 10 000 euros), ou pour des modèles spéciaux tels que des composants à revêtement céramique pour les machines d'usinage », souligne M. Papillon (SPM Instrument). Pour M. Dumas (01dB-Stell), « les descripteurs classiques tels que les facteurs de crête ou de défaut suffisent à la majorité des applications. Le but de l'industriel est simplement d'avoir un indicateur suffisamment précoce pour minimiser ses pertes... ».

## Pour en savoir plus

- Techniques de l'Ingénieur, traité Mesures et Contrôle (R600)
- <http://www.maintexpert.com> (Portail spécialisé en maintenance)
- 01dB-Stell  
Tél. : 04 72 52 48 00  
Fax : 04 72 52 47 47  
<http://www.01db-stell.com>
- Prüftechnik  
Tél./Fax : 01 30 83 09 70  
<http://www.pruftechnik.fr>

Marie-Line Zani