

Annexes

Annexe -A-

Questions	Réponses
Distingue-t-on les problèmes majeurs d'une machine ?	L'analyse vibratoire permet de trouver la cause majeure d'un dysfonctionnement. Par contre un phénomène majeur peut masquer d'autres phénomènes. En général, le traitement de la cause majeure règle le problème.
Trouve-t-on toujours la cause d'un problème ?	En théorie non ! En pratique, avec des moyens de mesure, parfois complétés par des calculs et une méthode de diagnostic efficace, la cause des problèmes est révélée.
Peut-il n'y avoir aucune vibration ?	Non : même une machine arrêtée vibre sous l'action de sollicitations extérieures : machines voisines, bruits...
Quelles sont les vibrations acceptables ?	Les niveaux vibratoires acceptables dépendent des machines et de leur utilisation. Hormis les niveaux vibratoires destructifs, des niveaux importants peuvent être acceptés dans certains cas alors que des niveaux vibratoires beaucoup plus faibles sont extrêmement pénalisants dans d'autres situations. L'examen des spectres et l'expérience permettent d'identifier rapidement les phénomènes vibratoires perturbants.
Peut-on distinguer un balourd d'un jeu de palier ?	Un balourd se reconnaît facilement si son influence est prépondérante. Il en est de même pour un jeu de palier. Pour les distinguer l'un de l'autre, il faut placer au moins deux accéléromètres au niveau du palier.
Peut-on détecter un défaut d'alignement au niveau d'une ligne d'arbre ?	Oui : le défaut d'alignement d'un palier, la déformation d'un arbre, un défaut d'alignement entre deux arbres causent une anomalie de spectre caractéristique.
Peut-on distinguer un phénomène d'origine électrique d'un phénomène d'origine mécanique?	Oui : certains phénomènes électriques se reconnaissent immédiatement dans le signal émanant d'un accéléromètre. Il est possible d'enregistrer simultanément des signaux électriques et des signaux mécaniques. L'analyse des enregistrements permet de trouver l'origine du dysfonctionnement.

Annexes

Annexe -B-

Domages causés par des vibrations excessives

Les vibrations excessives doivent être évitées et rapidement supprimées lorsqu'elles sont détectées parce qu'elles ont pour effet d'accélérer l'usure de l'équipement, qu'elles causent des dommages et qu'elles peuvent provoquer une défaillance et parfois même un accident catastrophique. On peut citer les principaux défauts et leurs fréquences correspondantes dans le tableau suivant :

Anomalie	Vibration		Remarque
	Fréquence	Direction	
Tourbillon d'huile	De 0.42 à 0.48 f	Radiale	Uniquement sur palier lisse hydrodynamique à grande vitesse.
Balourd	1 * f	Radiale	Intensité proportionnelle à la vitesse de rotation. Déphasage de 90° sur deux mesures orthogonales.
Défaut de fixation	1, 2, 3, 4 * f	Radiale	Aucun déphasage sur deux mesures orthogonales
Défaut d'alignement	2 * f	Axiale et Radiale	Vibration axiale plus importante si le défaut d'alignement comporte un écart angulaire.
Vitesse critique de rotation	Fréquence critique du rotor	Radiale	Apparaît en régime transitoire et s'atténue ensuite.
Excitation hydrodynamique	Fréquence de passage des aubes	Axiale et Radiale	
Détérioration de roulement	Haute fréquence	Axiale et Radiale	Ondes de chocs dues aux écaillages.

Annexes

Annexe -c-

Caractéristiques des vibrations

Caractéristiques de la vibration			
cause	Fréquence F	Amplitude	Remède
Balourd d'un rotor	f_{rotor}	Amplitude constant et reproductible, valeur max en direction radial	Equilibrer
Montage défectueux (mauvais alignement coincé jeux et voilage sur bride)	$2*f_{\text{rotor}}$	A coté de vibration radiales, souvent vibration axiales importantes	Aligner partie tournante, contrôler comparateur excentricité et voilage
Roulement défectueux	Différents fréquences, souvent très élevées	Indication non constante, pas reproductible	Changer roulement
Siege ovalisé roulement trop serré	$2*f_{\text{rotor}}$ parfois $3*f_{\text{rotor}}$ et plus	Vibration radiale importante à amplitude constante	Retoucher arbre et alésage
Jeu trop grand du roulement, bague intérieure libre	f_{rotor}	Mesure non reproductible, c à d Différence pour chaque lancé	Changer roulement, vérifier tolérance d'ajustement
Courroie d'entraînement défectueux	f_{courroie} f_{courroie} parfois au dessus	Indication souvent instable, vibrations radiales prédominantes	Utilisé courroie neuve à section constante
Défaut de boîte à vitesse	Fréquence différentes, généralement élevées p ex $Z*f_{\text{rotor}}$ (Z= nombre de dents)	En générale amplitude de vibration faible	Vérifier denture des pignons
Défaut électriques ou magnétiques	f_{rotor} $f_{\text{synchrone}}$ $2*f_{\text{rotor}}$	Indication constante, reproductible, amplitude faible	Elimination généralement impossible

Annexes

Défaut hydrauliques pneumatiques	Fréquence diverse (dépend de nombre d'ailettes de turbine respectivement pompe)	Généralement indication instable amplitude faibles	Elimination seulement par modification de la construction
Masses en de va-et vient (oscillants) entraînées par bielle	f_{course} $2*f_{course}$ $4*f_{course}$	Amplitude diminuent en général avec l'ordre des vibrations partielle	Vibration 1 ^{er} ordre souvent être réduite par équilibrage, des ordres supérieures seulement par modification de construction.
Machines voisines	Fréquence diverse surtout f_{course} des machines voisines	Amplitudes dépendent du montage	Elimination des vibrations sur machines Voisines.

Annexe -D-

Détection des défauts de roulement

Fréquences	Emplacement du défaut	Caractéristiques
BPFI	Piste intérieure	Défaut, charge radiale
BPFO	Usure de la piste extérieure	Défaut, charge radiale
BSF ou 2 x BSF	Billes ou cage	Bille ou cage brisée en un endroit
FTF ou (ω - FTF)	Détérioration de la cage.	Généralement avec un des problèmes ci-haut
2 x BPFO	Désalignement de la piste extérieure	
Harmoniques de ($k \times$ BPFO), k étant un entier quelconque	Piste extérieure	k faibles défauts Forte charge radiale
Harmoniques de ($k \times$ BPFI), k étant un entier quelconque	Fissures de la piste intérieure	
Harmoniques de ($k \times$ BSF), k étant un entier quelconque	Endommagement des billes	k Billes abîmées
Modulation à BPFI +/- ($k \times \omega$) k étant un entier quelconque	Piste intérieure	Gros défaut
Modulation à $n \times$ BPFO +/- ($k \times \omega$), k et n étant des entiers quelconques.	Piste extérieure	Gros défaut
Modulation à BSF	Billes	
Harmoniques de ($k \times \omega$), k étant un entier quelconque.	Usure de piste ou jeu ou glissement de la piste	
Modulation à BPFI +/- FTF	Cage ou billes	
Modulation à BPFO +/- FTF	Cage ou billes	
Harmoniques de $N_b \times \omega$ ou ($\omega -$ FTF) $\times (N_b + 1)$	Nombreux défauts sur plusieurs surfaces.	
Modulation à ($m \times$ BSF) +/- ($k \times$ FTF), k et m étant des entiers quelconques.	Billes	

Annexes

Annexe -E-

Stades de dégradation d'un roulement

Type de défaut	Analyse spectrale	Remarques
<p>Principe d'évolution des défaillances des roulements</p> <p>Stade 1 : défaut acceptable</p>	<p>Zone A Zone B Zone C</p> <p>Région de défaillance du roulement Région de la fréquence naturelle (fn) du roulement</p>	<p>➤ Il est encore trop tôt pour déceler un problème de roulement.</p>
<p>Stade 2 : léger défaut</p>	<p>1x 2x fn -1x +1x</p>	<p>Un léger défaut commence à apparaître sur le roulement. La fréquence naturelle est visible, modulée par la fréquence de rotation.</p>
<p>Stade 3 : le roulement doit être changé</p> $FTF = \frac{\omega}{2} \left(1 \pm \frac{Bd \cos \theta}{Pd} \right)$ $BSF = \frac{Pd}{2Bd} \left[1 - \left(\frac{Bd}{Pd} \cos \theta \right)^2 \right] \times \omega$ $BPFO = \frac{Nb}{2} \left(1 - \frac{Bd}{Pd} \cos \theta \right) \times \omega$ $BPFI = \frac{Nb}{2} \left(1 + \frac{Bd}{Pd} \cos \theta \right) \times \omega$	<p>1x BPFO BPFI 2BPFI fn -1x +1x</p>	<p>➤ Lorsque l'usure augmente, les fréquences de roulement apparaissent, avec leurs harmoniques, modulées par les fréquences de rotation.</p>
<p>Stade 4 : défaut très prononcé</p>	<p>1x 2x 30 k 120 k rpm</p> <p>Vibration aléatoire à large bande</p>	<p>En fin de vie du roulement, l'amplitude à la fréquence de rotation augmente considérablement ainsi que ses harmoniques. Les hautes fréquences sont remplacées par des fréquences aléatoires à large bande.</p>

Annexes

Annexe -F-

Glossaire

Tout au long de cet ouvrage, nous nous sommes efforcés de définir rapidement les mots techniques dont la compréhension n'était pas immédiate. Néanmoins, nous avons souhaité revenir sur la définition de certains d'entre eux, parce qu'ils étaient empreints de nuances propres au « jargon » du métier ou que, tout simplement, ils méritaient de plus amples développements.

Amortissement : Propriété d'un système à consommer de l'énergie par dissipation. L'amortissement a pour effet de réduire l'amplitude de la vibration si l'excitation correspond à un mode de structure.

Amplitude : Valeur d'un écart par rapport à un point d'équilibre. Il s'agit dans cet ouvrage de la valeur crête de l'amplitude.

L'amplitude crête à crête a pour valeur celle de la double amplitude, positive et négative, par rapport au point d'équilibre.

L'amplitude efficace correspond à une amplitude fictive, représentative de l'énergie du signal (analogue à la valeur efficace de la tension en électricité).

Balourd : La vibration de balourd est une vibration qui résulte de la force centrifuge liée à la mise en rotation d'un corps dont le centre de gravité (CDG) n'est pas situé sur l'axe de rotation.

Bruit : Signal n'ayant aucune fréquence prédominante. Le spectre est continu sans raie particulière.

Cepstre : Spectre inverse du logarithme d'un spectre permettant d'identifier et de quantifier, dans le spectre « source », les familles de composantes périodiques (peignes de raies ou bandes latérales de modulation). Voir aussi Spectre.

Contrôle :

- ❖ Action de mesure, examiner, passer au calibre, essayer une ou plusieurs caractéristiques d'un bien et de la comparer aux exigences spécifiées en vue d'établir leur conformité ;
- ❖ Vérification de la conformité des caractéristiques du bien à des données préétablies suivie d'un jugement.

Décibel (dB) : Rapport relatif sans dimension permettant de comparer une valeur nouvelle à une valeur de référence.

Dépistage ou localisation : Action conduisant à localiser l'élément par lequel la défaillance.

Annexes

Dépannage : Action sur un bien en panne en vue de le remettre provisoirement et état de fonctionnement avant réparation.

Détection : Action de déceler au moyen d'une surveillance accrue continue ou non, l'apparition d'une défaillance ou l'existence d'un élément défaillant.

Diagnostic : Identification de la cause probable de la défaillance à l'aide d'un raisonnement logique fondé sur un ensemble d'information provenant d'une inspection d'un contrôle ou d'un test.

Facteur de crête : Rapport de l'amplitude crête sur l'amplitude efficace. Ce facteur permet, en général, de reconnaître le type de vibration : sinusoïdal ou impulsionnel

FFT (Fast Fourier Transform) : Algorithme de calcul réduisant de façon importante les temps de calcul d'un spectre.

Filtrage : Opération qui consiste à éliminer d'un spectre les bandes de fréquences jugées inutiles.

FMA (Fonction de modulation d'amplitude) : Fonction permettant la mise en évidence des phénomènes modulant les efforts principaux.

FMF (Fonction de modulation de fréquences) : Fonction permettant la mise en évidence des phénomènes modulant la vitesse du rotor.

Fonction de transfert : Transformée de Fourier traduisant la réponse impulsionnelle de la structure de la machine.

Foucault : Léon Foucault (1818-1868) Courant induit dans un matériau par un champ magnétique. Phénomène utilisé par les capteurs inductifs sans contact pour la mesure des vibrations des arbres dans les paliers lisses.

Fréquence : Répétition systématique d'un phénomène pendant un temps donné.

Fréquences propres : Fréquences invariables d'un système qui, lorsqu'elles sont excitées, entrent en résonance.

Inception : Action de surveillance s'exerçant dans le cadre d'une mission définie .elle n'est pas obligatoirement limitée à la comparaison avec des données préétablies

Inductif : Capteur inductif: capteur de déplacement sans contact utilisant la propriété des courants de Foucault. Le capteur vise la cible dont la surface doit être magnétique.

Annexes

Harmonique : Multiple d'une fréquence donnée.

Hertz (Hz) : Unité du système international utilisée pour mesurer la fréquence (autrement dit, un nombre de cycles par seconde).

Hilbert : David Hilbert (1862-1943) opération mathématique qui permet de calculer les modulations d'amplitude et les fréquences d'un signal.

Kurtosis : Indicateur statistique permettant, en général, de différencier un signal de type sinusoïdal, aléatoire ou impulsionnel...

La modernisation : Remplacement d'équipement, accessoires et appareils apportant, grâce à des perfectionnements techniques n'existant pas sur lieu d'origine, une amélioration de l'aptitude à l'emploi du bien.

La modification : Opération à caractère définitif effectuée sur bien en vue d'en améliorer le fonctionnement ou d'en changer les caractéristiques.

La rénovation : C'est l'inspection complète de tous les organes, reprise dimensionnelle complète ou remplacement des pièces déformées, vérification des caractéristiques et éventuellement réparation des pièces et sous-ensembles.

La reconstruction : Remise en l'état défini par le cahier des charges initial qui impose le remplacement des pièces vitales par des pièces d'origine ou des pièces neuves équivalentes.

Orbite : Trajectoire fermée décrivant le mouvement radial de l'arbre dans son logement (notamment pour les paliers fluides) ou le mouvement vibratoire radial du palier.

Piézoélectrique : Qualité de tout matériau pouvant convertir une force mécanique en charge électrique.

Pic : Ensemble de raies confondues se détachant nettement sur un spectre par son amplitude.

Phase : Mesure d'un lien temporel ou angulaire entre deux événements.

Résonance : On dit qu'il y a résonance lorsque la fréquence propre d'un système (structure, paliers, capteurs) coïncide avec la fréquence d'une force d'excitation et que les points d'application des forces excitatrices sont proches d'un « ventre » de déformation du mode considéré.

Réparation : Intervention définitive et limitée de maintenance corrective après panne ou défaillance.

Annexes

RMS (Root Mean Square) : Abréviation anglo-saxonne signifiant que l'amplitude est donnée en valeur efficace.

Signal temporel : Signal enregistré en fonction du facteur temps.

Spectre : Graphe représentant l'amplitude des composantes du signal en fonction de leur fréquence.

Temps réel : On dit qu'un spectre est calculé en temps réel lorsque le temps de calcul de ce spectre est inférieur au temps d'acquisition du signal correspondant (aucune perte d'information).

Test : Opération permettant de comparer des réponses d'un dispositif a une sollicitation appropriées et définie, avec celles d'un dispositif de référence, ou avec un phénomène physique significatif d'une machine correct.

Transitoire : Vibration non entretenue qui dure peu de temps.

Vélocité : Vitesse vibratoire (mm/s).

Vitesse : Vitesse vibratoire (vélocité): en mm/s

Vitesse de rotation ; en trs/s ou trs/mn

Vitesse critique : Vitesse d'une pièce en rotation dont la fréquence correspond à une fréquence de résonance.

Visite : Action de maintenance préventive consistant en un examen détaillé et prédéterminé et tout (visite générale) ou une partie (visite limite) des différentes pièces du bien et pouvant impliquer des opérations de maintenance de 1^{er} niveau.

Vérification : Action permettant de constater que les écarts entre les valeurs indiquées par un appareil (ou un système) de mesure et les valeurs de référence connues sont tous inférieurs aux erreurs maximales tolérées.