Des capteurs de hautes performances au service de la Maintenance Prédictive

Par Pete Sopcik, directeur du marketing, division Condition-Based Monitoring ; et Dara O'Sullivan, responsable des applications, division Connected Motion and Robotics, Analog Devices

Les progrès enregistrés dans les semiconducteurs en termes de technologies et de fonctionnalités ouvrent de nouvelles opportunités de détection, de mesure, d'interprétation et d'analyse des données dans les applications industrielles, notamment dans le domaine de la maintenance prédictive (*condition-based monitoring*). Associés à des algorithmes sophistiqués pour applications de diagnostic et de prévisions, les capteurs de nouvelle génération utilisant des microsystèmes électromécaniques (MEMS) permettent de mesurer les performances d'un large éventail de machines afin de surveiller les équipements avec une efficacité accrue en augmentant leur disponibilité opérationnelle, le niveau de qualité des processus et leur cadence.

Pour mettre en œuvre ces nouvelles possibilités et tirer pleinement parti des avantages de la maintenance prédictive, les solutions utilisées doivent conjuguer exactitude, fiabilité et robustesse, si bien que la surveillance en temps réel dépasse le cadre de la détection élémentaire des éventuels défauts et fournisse des informations pertinentes et exploitables. Combinées à des connaissances approfondies du système, les performances élevées des technologies de nouvelle génération permettent de mieux comprendre le fonctionnement de l'application et de relever les défis de façon optimale.

Les vibrations, l'un des paramètres clés du diagnostic des machines, sont depuis longtemps mises à profit pour surveiller avec fiabilité les équipements les plus critiques dans un large éventail d'applications industrielles. Une riche littérature valide les diverses capacités de diagnostic et de prédiction requises pour mettre en œuvre des solutions avancées de surveillance des vibrations. *A contrario*, les relations établies entre, d'une part, les paramètres qui influencent les performances des capteurs de vibrations — bande passante et densité de bruit par exemple — et, d'autre part, la capacité à diagnostiquer les défauts qui touchent les applications finales suscitent moins d'intérêt. Le présent article aborde les principaux types de défauts qui touchent les machines employées dans des applications d'automatisation industrielle, et identifie les principaux paramètres de performance des capteurs de vibrations associés à certains défauts spécifiques.

Plusieurs types de défauts courants, ainsi que leurs caractéristiques, sont décrits ci-après pour mieux cerner certaines exigences clés dont il convient de tenir compte lors de l'élaboration d'une solution de maintenance prédictive : déséquilibres, défauts d'alignement, défauts de paliers à roulement et défauts d'engrenage.

Déséquilibre

Explication et origines

Le phénomène de déséquilibre est lié à une répartition inégale de la masse qui amène la charge à éloigner le centre de masse (CM) du centre de rotation. Les déséquilibres d'un système peuvent être attribués à des installations inappropriées : accouplement excentrique, erreurs de conception du système, anomalies des composants, accumulation de débris ou autres contaminants, etc. Par exemple, les ventilateurs intégrés dans la plupart des moteurs asynchrones peuvent être soumis à un déséquilibre provoqué par une accumulation irrégulière de poussières et de graisse, ou parce que l'une des pales est brisée.

Pourquoi ces défauts sont-ils préoccupants

Un système déséquilibré produit des vibrations excessives qui s'accouplent mécaniquement à d'autres composants du système (roulements, accouplements et charges), ce qui risque d'accélérer la détérioration de composants en bon état de fonctionnement.

Comment détecter et diagnostiquer un déséquilibre ?

L'augmentation du niveau global de vibrations dans le système peut indiquer un défaut potentiel créé par un déséquilibre. Toutefois, la cause réelle de cette augmentation des vibrations sera diagnostiquée par le biais d'une analyse du domaine fréquentiel. Les systèmes déséquilibrés produisent un signal à la vitesse de rotation du système (c'est la « composante 1x ») avec une amplitude proportionnelle au carré de la vitesse de rotation, $F = m \times w^2$. La composante 1x est généralement présente dans le domaine fréquentiel, de sorte que l'identification d'un système déséquilibré s'effectue en mesurant l'amplitude de la composante 1x et des harmoniques. Si l'amplitude de la composante 1x est supérieure à la mesure de référence et les harmoniques nettement inférieures à 1x, le système est probablement déséquilibré. Dans ce cas, il est également probable que des composantes vibratoires soient déphasées horizontalement et verticalement[1].

Quelles spécifications doit-on prendre en compte lors du diagnostic d'un système déséquilibré ?

Un faible niveau de bruit est nécessaire pour réduire l'influence des capteurs et permettre la détection des petits signaux générés par un système déséquilibré. Ce paramètre est crucial pour le capteur, le conditionnement du signal et la plateforme d'acquisition.

La résolution du système d'acquisition utilisé pour extraire le signal (en particulier le signal de base) doit être suffisante pour détecter ces légers déséquilibres.

Une bande passante large est importante, car elle permet de capter suffisamment d'informations au-delà des seules vitesses de rotation et ainsi d'améliorer la précision et la confiance accordée au diagnostic. L'harmonique 1x peut être influencée par d'autres anomalies du système, telles qu'un défaut d'alignement ou un jeu mécanique, de sorte que l'analyse des harmoniques de la vitesse de rotation — fréquence 1x — peut permettre de différencier le bruit système d'autres défauts potentiels.[1] Dans le cas de machines tournant à bas régime, les vitesses de rotation fondamentales peuvent être nettement inférieures à 10 tours/minute, de sorte que la réponse du capteur à basse fréquence est critique pour capturer ces vitesses fondamentales. La technologie de capteurs MEMS d'Analog Devices permet de détecter des signaux jusqu'au continu, ainsi que de mesurer des équipements tournant à bas régime, tout en permettant d'effectuer des mesures en bande large aux fréquences élevées habituellement associées aux défauts de paliers ou d'engrenage.

Pourquoi ces défauts sont-ils préoccupants ?

Les défauts d'alignement peuvent avoir un impact sur l'ensemble du système en obligeant les composants à fonctionner sous des contraintes ou des charges supérieures à celles pour lesquelles ils ont été conçus, avec à la clé des risques de défaillances prématurés.

Comment détecter et diagnostiquer ce type de défaut ?

Les défauts d'alignement apparaissent généralement sous la forme de la deuxième harmonique de la vitesse de rotation du système, appelée 2x. La composante 2x n'est pas toujours présente dans la réponse fréquentielle, mais lorsque c'est le cas, on utilisera la relation entre l'amplitude et la composante 1x pour identifier la présence d'un éventuel défaut d'alignement. Des défauts d'alignement accrus peuvent exciter des harmoniques jusqu'à 10x, en fonction du type de défaut d'alignement, de l'endroit où il est mesuré et de l'information directionnelle.[1] La figure 4 met en évidence les signatures associées aux défauts d'alignement potentiels.

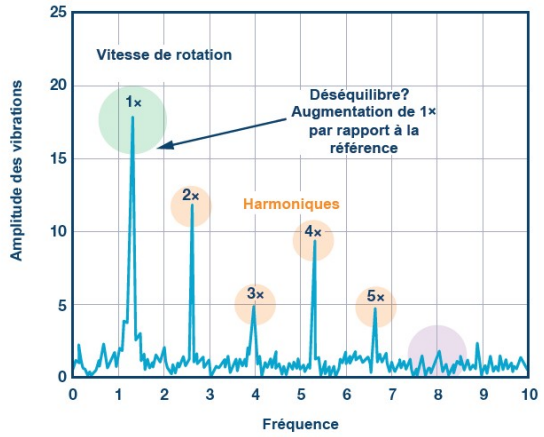


Figure — Risque de déséquilibre en raison de l'augmentation de l'amplitude à la vitesse de rotation, ou à la fréquence 1x.

Défauts d'alignement

Explication et origines

Comme leur nom l'indique, les défauts d'alignement se produisent lorsque deux arbres rotatifs d'un système ne sont pas alignés. La Figure 2 représente un système idéal où l'alignement est obtenu, en commençant par le moteur, puis l'arbre et l'accouplement jusqu'à la charge (dans ce cas, une pompe).

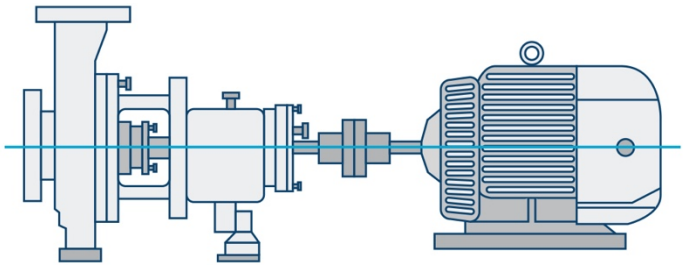


Figure 2 — Illustration d'un système parfaitement aligné.

Les défauts d'alignement peuvent être parallèles et angulaires, parfois une combinaison des deux (voir Figure 3). Un défaut d'alignement parallèle se produit lorsque les deux arbres sont déplacés dans le sens horizontal ou vertical. Un défaut d'alignement angulaire se produit lorsque les deux arbres forment un angle.[2].

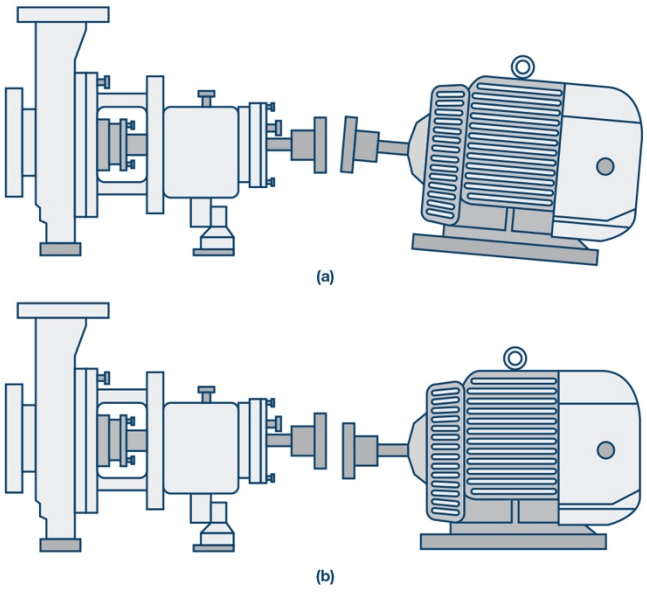


Figure 3 — Exemples de défaut d'alignement : (a) angulaire, (b) parallèle, ou une combinaison des deux.

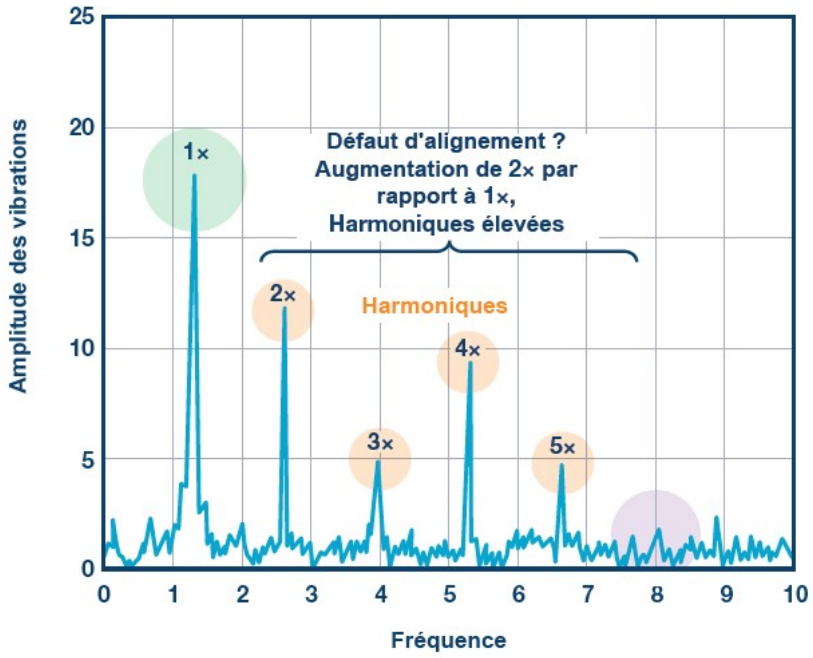


Figure 4 — Une augmentation de l'harmonique 2×, combinée à une augmentation des harmoniques d'ordre supérieur, indique un défaut d'alignement potentiel.

Quelles spécifications doit-on prendre en compte lors du diagnostic d'un défaut d'alignement ?

Un faible niveau de bruit et une résolution suffisante permettent de détecter des défauts d'alignement mineurs. Le type de la machine, les exigences relatives au système et aux processus, ainsi que les vitesses de rotation, déterminent les tolérances admissibles.

La bande passante est nécessaire pour capturer une plage de fréquences suffisante et améliorer la précision et la confiance accordée à un diagnostic. L'harmonique 1x peut être influencée par d'autres défauts du système — défaut d'alignement, par exemple —, de sorte que l'analyse des harmoniques de la fréquence 1x peut faciliter la différenciation par rapport aux autres défauts du système. C'est particulièrement le cas des machines dont la vitesse de rotation est élevée. Par exemple, des machines qui fonctionnent à plus de 10 000 tours/minute (machines-outils, notamment) ont généralement besoin d'informations de qualité au-delà de 2 kHz pour détecter les déséquilibres avec précision et fiabilité.

Les informations multidirectionnelles améliorent également la précision du diagnostic et procurent des informations pertinentes quant au type d'erreur liée à un défaut d'alignement et à sa direction.

La phase du système, combinée aux informations relatives à la direction des vibrations, permet de diagnostiquer des défauts d'alignement avec une plus grande précision. La mesure des vibrations en différents points de la machine, ainsi que la possibilité de déterminer la différence dans la mesure des phases ou dans l'ensemble du système, fournit des indications qui permettent de savoir si le défaut d'alignement est angulaire ou parallèle, ou une combinaison des deux[1].

Défauts de roulements mécanique

Explication et origines

Les défauts qui touchent les roulements mécaniques sont généralement provoqués par des contraintes mécaniques induites ou par des problèmes de lubrification qui créent de petites fissures ou des défauts à l'intérieur des composants mécaniques, entraînant une hausse des vibrations. La Figure 5 représente des exemples de roulement, ainsi que quelques défauts potentiels.



Figure 5. Exemples de roulements à billes (en haut) et de défauts de lubrification et de courant de décharge (en bas).

Pourquoi ces défauts sont-ils préoccupants ?

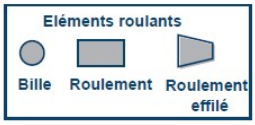
On trouve des roulements dans la quasi-totalité des machines tournantes, qu'il s'agisse des turbines de grandes dimensions, des moteurs fonctionnant à une vitesse de rotation réduite, des pompes et ventilateurs relativement élémentaires, ou des broches à commande numérique (CNC) ultrarapides. Ces défauts peuvent être le signe d'une lubrification contaminée (Figure 5), d'installations inadaptées, de courants de décharge à des fréquences élevées (Figure 5) ou d'une charge accrue du système. Ils peuvent provoquer des dommages catastrophiques pour le système avec des répercussions considérables sur d'autres composants.

Comment ces défauts sont-ils détectés et diagnostiqués ?

Plusieurs techniques sont utilisées pour diagnostiquer les défauts d'un roulement. En raison des phénomènes physiques qui sous-tendent leur conception, la fréquence des défauts peut être calculée pour chaque palier en fonction de sa géométrie, de la vitesse de rotation et du type de défaut, ce qui facilite l'établissement du diagnostic. Les fréquences associées aux défauts de paliers sont présentées à la Figure 6.

Fréquences des défauts de paliers

FTF (Fundamental Train Frequency)	Fréquence de rotation de la cage	$FTF = \frac{F}{2} \times \left(1 - \frac{B}{P} \times cos\Theta\right)$
BSF (Ball Spin Frequency)	Fréquence de passage des billes	$BSF = \frac{P}{2B} \times F \times \left[1 - \left(\frac{B}{P} \times cos\Theta\right)^2\right]$
BPFO (Ball Pass Frequency Outer Race)	Fréquence de passage des billes en cas de défaut sur la bague extérieure	$BPFO = \frac{N}{2} \times F \times \left(1 - \frac{B}{P} \times cos\Theta\right)$
BPFI (Ball Pass Frequency Inner Race)	Fréquence de passage des billes en cas de défaut sur la bague intérieure	$BPFI = \frac{N}{2} \times F \times \left(1 + \frac{B}{P} \times cos\Theta\right)$



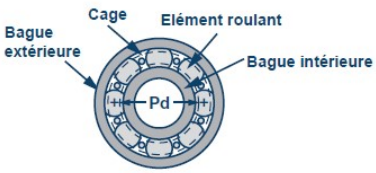


Figure 6. La fréquence des défauts de paliers dépend du type, de la géométrie et de la vitesse de rotation.

L'analyse des données vibratoires d'une machine ou d'un système donné repose souvent sur l'analyse combinée des domaines temporel et fréquentiel. L'analyse du domaine temporel est utile pour détecter les tendances à une augmentation globale des niveaux de vibrations du système. Cependant, très peu d'informations de diagnostic découlent de cette analyse. Pour sa part, l'analyse dans le domaine fréquentiel permet de mieux comprendre le diagnostic, même si l'identification de la fréquence des défauts peut s'avérer complexe en raison de l'influence d'autres vibrations perturbant le système.

Concernant le diagnostic avancé des défauts de roulement, les harmoniques des fréquences des défauts sont utilisées pour identifier les défauts précoces ou naissants afin qu'ils puissent être surveillés et traités avant de provoquer une défaillance catastrophique. Pour détecter, diagnostiquer et comprendre les implications d'un défaut de roulement au niveau du système, des techniques telles que la détection de l'enveloppe du signal (Figure 7), combinée à l'analyse spectrale dans le domaine fréquentiel, fournissent généralement des informations plus pertinentes.

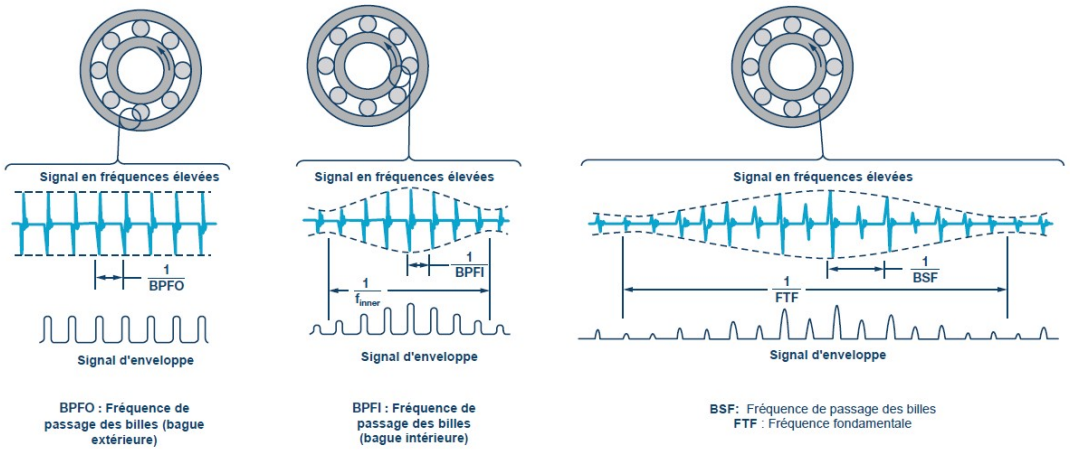


Figure 7. Des techniques telles que la détection de l'enveloppe du signal permettent d'extraire rapidement la signature des défauts de paliers à partir des données de vibrations dans une large bande passante.

Quelles spécifications doit-on prendre en compte lors du diagnostic d'un défaut de roulement ?

Un faible niveau de bruit et une résolution suffisante sont essentiels pour détecter au plus tôt des défauts de roulement. Généralement, ces signatures présentent une faible amplitude lors de l'apparition d'un défaut. Le glissement mécanique, un phénomène inhérent aux roulements dû aux tolérances de conception, réduit davantage l'amplitude des vibrations en répartissant l'information d'amplitude entre plusieurs pics dans la réponse en fréquence d'un roulement, ce qui requiert un niveau de bruit peu élevé pour détecter les signaux de façon anticipée.[2]

La bande passante joue un rôle essentiel dans la détection précoce des défauts de roulement. Une impulsion incluant un contenu haute fréquence est créée dès que le défaut est « frappé » au cours d'une rotation (voir Figure 7). Les harmoniques des fréquences de défauts de roulement — et non la vitesse de rotation — sont surveillées pour déceler ces défauts à un stade précoce. En raison de la relation entre la fréquence des défauts de roulement et la vitesse de rotation, ces signatures précoces peuvent se produire dans la gamme de plusieurs kHz et s'étendre bien au-delà de la plage comprise entre 10 et 20 kHz.[2] Même dans le cas des équipements fonctionnant à bas régime, la nature même des défauts de roulement exige des bandes passantes plus larges pour détecter un défaut de façon précoce et ainsi éviter les effets des résonances et du bruit du système qui influencent les bandes de fréquence inférieures.[3]

La plage dynamique est également importante pour la surveillance des défauts de roulement ; en effet, les défauts et les charges peuvent influer sur les vibrations que le système subit. L'augmentation des charges accroît les forces qui s'exercent sur les paliers et amplifient le défaut. Les défauts de paliers créent également des impulsions qui excitent les résonances structurelles, amplifiant les vibrations ressenties par le système et le capteur.[2] Lorsque les machines montent et baissent en régime au cours des phases d'arrêt/démarrage ou en fonctionnement normal, les changements de vitesse induisent la possibilité d'excitations des résonances système, augmentant les vibrations.[4] La saturation du capteur peut se traduire par la perte d'informations, un diagnostic erroné et, avec certaines technologies,

l'endommagement d'éléments sur les capteurs.

Défauts d'engrenage

Explication et origines

Les défauts d'engrenage se produisent généralement dans les dentures d'un mécanisme d'engrenage en raison de phénomènes tels que la fatigue, l'effritement. Ces défauts peuvent se manifester par des fissures dans la base des dents de l'engrenage ou par l'élimination de métal à la surface de la dent. Ils peuvent être dus à l'usure, à des charges excessives, à une mauvaise lubrification, à un jeu, voire à une installation défectueuse ou à des défauts de fabrication[5].

Pourquoi ces défauts sont-ils préoccupants ?

Les engrenages sont les principaux organes utilisés pour transmettre de l'énergie dans de nombreuses applications industrielles et à ce titre, ils sont soumis à des contraintes et des charges élevées. Leur « santé » est par conséquent essentielle au bon fonctionnement de l'ensemble du système mécanique. Exemple bien connu dans le domaine des énergies renouvelables, les défaillances des systèmes d'engrenage à plusieurs étages de la boîte de transmission principale constituent la principale cause d'interruption des éoliennes (et du manque à gagner qui en résulte).[5] Des considérations similaires s'appliquent aux applications industrielles.

Comment détecter et diagnostiquer ce type de défaut ?

La détection des défauts d'engrenage peut s'avérer compliquée, dans la mesure où il peut être difficile d'installer des capteurs de vibrations à proximité des défaillances potentielles, et en raison de la présence d'un bruit de fond important lié aux multiples excitations mécaniques qui caractérisent le système. C'est notamment le cas des systèmes complexes où peuvent cohabiter plusieurs fréquences de rotation, rapports d'engrenage et fréquences d'engrènement.[6] Par conséquent, des approches multiples et complémentaires peuvent être adoptées pour détecter des défauts d'engrenage, parmi lesquelles l'analyse des émissions acoustiques, l'analyse des signatures actuelles, et l'analyse des résidus d'huile.

S'agissant de l'analyse des vibrations, le carter de la boîte de vitesses est l'emplacement idéal pour monter un accéléromètre, la direction axiale constituant le mode de vibration majeur.[7] Les engrenages sains produisent une signature vibratoire à une fréquence connue sous le nom de fréquence d'engrènement. Cette fréquence est égale à la fréquence de rotation de la roue multipliée par son nombre de dents. On constate également la présence de bandes latérales de modulation d'amplitude (raies) liées aux tolérances de fabrication et d'assemblage (un exemple d'engrenage sain est représenté à la Figure 8). Lorsqu'un défaut localisé se produit (une dent fissurée), le signal vibratoire généré à chaque rotation inclura la réaction mécanique du système à un impact de courte durée pour un niveau d'énergie relativement faible. Il s'agit d'un signal large bande de faible amplitude qui est généralement considéré comme non périodique et non stationnaire.[7-8]

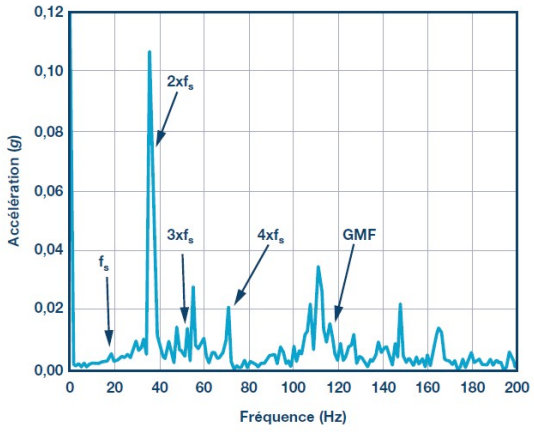


Figure 8 — Spectre de fréquence d'un engrenage sain avec un vilebrequin tournant à environ 1000 tours/minute, une vitesse de rotation de l'engrenage d'environ 290 tr/min et 24 dents d'engrenage.

En raison de ces caractéristiques particulières, les techniques habituellement appliquées dans le domaine fréquentiel ne peuvent être utilisées seules pour identifier des défauts d'engrenage avec la précision requise. L'analyse spectrale peut s'avérer inapte à détecter des défauts précoces sur les engrenages, car l'énergie d'impact est contenue dans les bandes latérales de modulation — lesquelles peuvent également contenir de l'énergie provenant d'autres couples d'engrenage et composants mécaniques. Les techniques du domaine temporel, telles que l'établissement de moyennes synchrones dans le temps (TSA) ou les approches à domaines mixtes comme l'analyse d' ondelettes et la démodulation d'enveloppe, sont généralement mieux adaptées[9].

Quelles spécifications doit-on prendre en compte lors du diagnostic d'un défaut d'engrenage ?

Une large bande passante est généralement très importante pour détecter des défauts d'engrenage. En effet, le nombre de dents agit comme un multiplicateur dans le domaine fréquentiel. Même pour les systèmes fonctionnant à un régime relativement bas, la plage de fréquence de détection requise augmente rapidement pour atteindre plusieurs kHz. De plus, les défauts localisés accroissent encore les besoins en bande passante.

La résolution et le faible niveau de bruit sont extrêmement critiques également, et ce, pour plusieurs raisons. Compte tenu de la difficulté d'installer des capteurs de vibrations à proximité de zones d'erreur spécifiques, le signal vibratoire est, potentiellement, davantage affaibli par le système mécanique, de sorte qu'il est indispensable de pouvoir détecter les signaux de faible énergie. De plus, les signaux n'étant pas de type périodique et statique, les techniques classiques basées sur la transformée de Fourier rapide (FFT) et utilisées pour extraire des signaux de faible amplitude à partir d'un plancher de bruit élevé ne sont pas fiables, et le plancher de bruit du capteur doit être bas. C'est particulièrement le cas des boîtes d'engrenage où se mêlent de multiples signatures vibratoires provenant de différents éléments de la boîte. À ces considérations s'ajoute l'importance de la détection précoce, non seulement pour assurer la protection des actifs, mais également pour des raisons de conditionnement du signal. Il a été démontré que l'intensité des vibrations peut être plus élevée avec une dent détériorée qu'avec deux, voire plus. En d'autres termes, la détection peut être relativement plus aisée aux stades précoces.

Synthèse

Bien que courants, des phénomènes tels que les déséquilibres et les défauts d'alignement, de roulement ou d'engrenage ne sont que quelques-uns des nombreux types de problèmes pouvant être détectés et diagnostiqués à l'aide de capteurs de vibrations sophistiqués. Des performances de détection plus élevées, combinées à des considérations appropriées au niveau du système, permettent de réaliser des solutions de maintenance prédictive de nouvelle génération qui aident à mieux comprendre le fonctionnement mécanique d'une vaste gamme d'équipements et d'applications industrielles. Ces solutions transformeront la façon dont les opérations de maintenance sont exécutées et le fonctionnement des machines, ce qui, à terme, réduira les indisponibilités opérationnelles, améliorera l'efficacité et dotera les équipements de prochaine génération de nouvelles possibilités.

Tableau 1. Exigences relatives à chaque paramètre du capteur

Type de défaut	Bande passante	Densité de bruit	Dynamique	Résolution
Déséquilibre	Basses	Moyennes	Élevées	Moyennes
Défaut d'alignement	Moyennes	Basses/ Moyennes	Élevées	Moyennes

Défauts de paliers	Élevées/Très élevées	Basses	Moyennes	Élevées
Défauts d'engrenage	Très élevées	Basses	Basses	Élevées

Pour le tableau 1, les paramètres utilisés sont les suivants :

- Une bande passante étroite inférieure à 1 kHz ; une bande passante moyenne comprise entre 1 et 5 kHz et une bande passante supérieure à 5 kHz ;
- Une faible densité de bruit, <100 µg/√Hz; une densité de bruit moyenne comprise entre 100 µg/√Hz et 1 mg/√Hz ; et une densité de bruit élevée >1 mg/√Hz.
- Une faible plage dynamique <5 g, une dynamique moyenne comprise entre 5 et 20 g, et une dynamique élevée supérieure à 20 g.

Références

[1] Jason Mais. "Spectrum Analysis: The Key Features of Analyzing Spectra." SKF USA, Inc. 2002.

[2] Robert Bond Randall. Vibration-based Condition Monitoring: Industrial, Aerospace, and Automotive Applications. John Wiley & Sons, Ltd., Décembre 2010.

[3] Scott Morris. "SKF Pulp and Paper Practices." *SKF Global Pulp & Paper Segment*, No. 19, 2016.

[4] Chris D. Powell, Erik Swanson, and Sorin Weissman. "A Practical Review of Rotating Machinery Critical Speeds and Modes." *Sound and Vibration*, Mai 2005.

[5] Shahin Hedayati Kia, Humberto Henao et Gérard-André Capolino, "Trends in Gear Fault Detection Using Electrical Signature Analysis in Induction Machine-Based Systems," 2015 IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD), Turin, pp. 297-303, 2015.

[6] Alexander Bliznyuk, Ido Dadon, Renata Klein et Jacob Bortman. "Gear Diagnostics—Fault Type Characteristics." 2014.

[7] Giorgio Dalpiaz, Alessandro Rivola et Riccardo Rubini. "Effectiveness and Sensitivity of Vibration Processing Techniques for Local Fault Detection in Gears." *Mechanical Systems and Signal Processing*, Volume 14, Issue 3, 2000.

[8] Wenyi Wang. "Early Detection of Gear Tooth Cracking Using the Resonance Demodulation Technique." *Mechanical Systems and Signal Processing*, Volume 15, Issue 5, 2001.

[9] Kiran Vernekar, Hemantha Kumar et K. V. Gangadharan. "Gear Fault Detection Using Vibration Analysis and Continuous Wavelet Transform." *Procedia Materials Science*, Volume 5, 2014.