

COMBLER LES LACUNES ENTRE LES ANALYSES VIBRATOIRES ET D'HUILE.

avec I-DNA

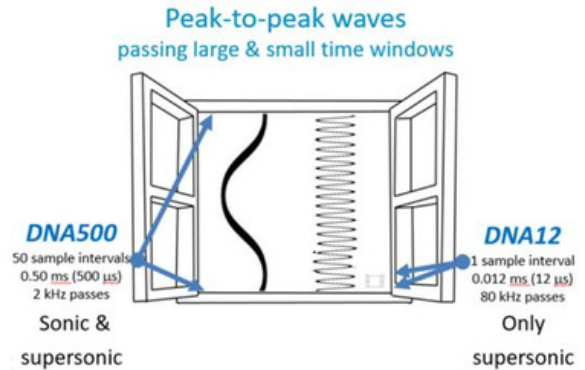
AUTEUR: Ray Garvey, R&D Engineer, I-care Reliability Inc.

WEB: www.icareweb.com



I-DNA: INTELLIGENT DECIMATION NUMERICAL ALGORITHM

La décimation intelligente est une technique d'analyse des ondes de contrainte haute fréquence qui quantifie les événements du domaine temporel tels que les impacts, les défauts des roulements et des engrenages, les glissades, les frottements, les glissements importants, les frottements mécaniques et les arcs électriques. Il complète l'analyse classique des vibrations selon la fréquence d'intérêt maximale (FMAX) pour les machines tournantes. Elle peut également être utilisée comme technique primaire d'analyse vibratoire pour d'autres types d'équipements, notamment les équipements à déplacement très lent, à mouvement alternatif, à articulation et à haute tension. L'algorithme numérique de décimation intelligente (I-DNA™) crée des formes d'onde de contrainte de détection de pics sonores et ultrasonores pour l'analyse. La forme d'onde Sonic Range (DNA500) expose des événements d'accélération puissants. La forme d'onde de la gamme ultrasonore (DNA12) expose en outre les événements liés au frottement glissant.



INTRODUCTION

Les spécialistes de la fiabilité industrielle surveillent les machines tournantes à l'aide de dispositifs de vibration non intrusifs qui déciment les données de vibrations numériques suréchantillonnées à une fréquence d'intérêt maximale (FMAX) en fonction de la vitesse de défilement. Les défauts détectés de cette manière incluent le déséquilibre, le désalignement, le desserrement, le pied mou, ainsi que les défauts de l'équipement et des roulements. Ils utilisent également l'analyse d'huile pour surveiller les machines tournantes et les compresseurs en cas de défauts tels que mauvaise qualité du lubrifiant, contamination du système de lubrification et débris d'usure transportés par le lubrifiant. L'analyse de vibration FMAX surveille les mouvements dynamiques des composants de la machine. L'analyse de l'huile surveille la composition des constituants liquides. Cependant, ni l'un ni l'autre ne surveille la lubrification réelle du fonctionnement des systèmes tribologiques en fonctionnement. «La tribologie est la science de l'usure, du frottement et de la lubrification et englobe la manière dont les surfaces en interaction et les autres tribo-éléments se comportent en mouvement relatif dans les systèmes naturels et artificiels. Cela comprend la conception des roulements et la lubrification.»

L'analyse intelligente des ondes de contrainte par décimation ajoute de la valeur en mesurant les événements maximaux d'accélération, d'impact, d'usure, de frottement et de lubrification de pointe dans le temps à l'aide d'analyses sonores et ultrasonores des ondes de contrainte. La technique utilise une bande passante étroite, une faible consommation d'énergie pour une batterie longue durée dans les émetteurs sans fil distants connectés au cloud (Figure 1) ou dans les analyseurs de vibrations filaires portables et en ligne.

Cet article explique comment améliorer l'analyse des vibrations non intrusives en utilisant davantage l'analyse sonore et ultrasonore des ondes de stress pour détecter, quantifier et caractériser les preuves de la fonctionnalité des tribosystèmes. Cette technique d'analyse des ondes de contrainte étend les vibrations de la surveillance des conditions mécaniques aux conditions tribo-mécaniques, couvrant ainsi les écarts importants entre les analyses vibratoires et d'huile.

DÉCIMATION INTELLIGENTE

Les analyseurs de vibrations modernes convertissent les signaux de vibration analogiques en un flux de données numériques suréchantillonné. Les données numériques sont normalement échantillonnées à des vitesses ultrasonores élevées (51 kHz à 204 kHz). Ces données numériques haute fréquence sont décimées à une fréquence d'intérêt beaucoup plus basse (FMAX) en fonction de la vitesse de défilement d'un composant mécanique. La décimation traditionnelle est efficace pour extraire le mouvement sinusoïdal, la rotation, le déplacement et la résonance des composants de la machine.

La décimation intelligente opère sur les données d'origine du taux d'échantillonnage élevé avant que des processus de décimation arbitraires ne détruisent le contenu haute fréquence. I-DNA™ mesure l'accélération crête à crête dans les gammes de fréquences sonores et ultrasonores.

Sonic DNA500 mesure l'accélération maximale de 500 s en g Ultrasonic DNA12 mesure l'accélération maximale en pic de 12 µs par g pendant chaque intervalle d'échantillonnage DNA500 de 500 µs. DNA500 est principalement affecté par les fortes accélérations des composants de la machine. DNA12 est relativement beaucoup plus sensible aux frottements et aux turbulences que DNA500. Les valeurs maximales de DNA500 et DNA12, ainsi que les rapports DNA12 et DNA500, révèlent les caractéristiques tribologiques de systèmes mécaniques en mouvement relatif.

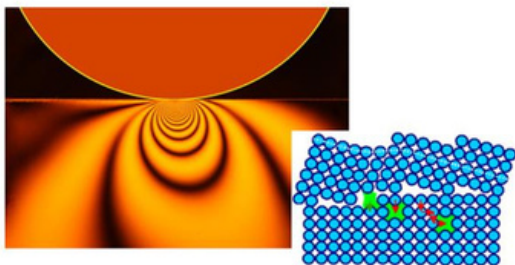
«Ces hautes fréquences sont les fréquences exactes générées par les roulements usés et sous-lubrifiés, les équipements électriques défectueux, les fuites sous haute pression, etc. Cela peut également être un excellent moyen de détecter une défaillance imminente de la machine avant qu'elle ne devienne catastrophique.»

L'analyse d'onde de décimation intelligente à portée sonore mesure les événements de compression violents, notamment le roulement, la compression et le glissement important. Dans la plage des ultrasons, il mesure les événements de friction, notamment les glissades, le polissage et les frottements. Voir Figure 2

Sonic stress waves

Sonic DNA500 reveals forceful events including compression, impact and severe sliding in time domain:

- Rolling
- Compression
- Impacting
- Severe sliding



Ultrasonic stress waves

Ultrasonic DNA12 compared with sonic DNA500 distinguishes hard surface slip intervals in time domain:

- Slipping
- Polishing
- Rubbing

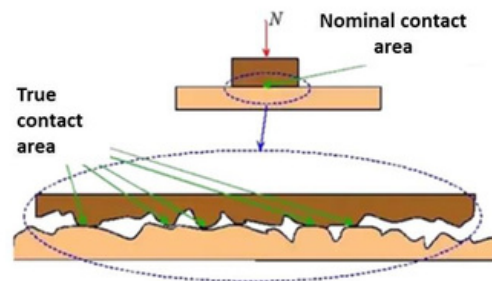


FIGURE 2. LES ONDES DE STRESS SONORES DÉTECTENT LES ÉVÉNEMENTS VIOLENTS ET LES ONDES DE STRESS ULTRASONORES DÉTECTENT LES ÉVÉNEMENTS DE GLISSEMENT.

Les ondes de stress d'événement proviennent d'un point de contact ou de compression, puis se propagent à travers les métaux ou les fluides à la vitesse relative du son transportant des informations sur les événements qui ont créé les ondes de stress. Chaque intervalle DNA500 comprend 40 intervalles DNA12. DNA500 est principalement composé d'événements puissants dans le domaine temporel, notamment la compression, l'impact et un glissement important.

Les phénomènes de friction dans le temps sont souvent associés à une lubrification insuffisante dans les machines tournantes, telles que les roulements à rouleaux, les roulements plans et les engrenages. Les vibrations non intrusives peuvent désormais être utilisées pour surveiller les performances de nombreux tribosystèmes (roulements, engrenages, joints d'étanchéité, guides, glissières et bagues) constituant le système d'une machine.

Régimes de lubrification dans les tribosystèmes

Il est admis qu'outre le contact sec entre les composants de la machine, il existe quatre régimes de lubrification différents, décrits dans la Fig. 3 qui présente un diagramme de Stribeck modifié. La durée de vie des composants de la machine dépend en grande partie de l'efficacité de la lubrification. Les concepteurs de machines peuvent choisir parmi des roulements hydrostatiques (HS) et hydrodynamiques (HD) à film fluide d'une épaisseur approximative de 100 µm. Ils préféreront peut-être des roulements à rouleaux élastohydrodynamiques (EHD) à film fluide de 1 µm d'épaisseur, en fonction de la charge, de la vitesse, du lubrifiant et d'autres facteurs, notamment la température et l'environnement. Le cycle de service pour le fonctionnement de la machine peut occasionnellement tomber dans un régime de lubrification en mode mixte ou en mode limite, tel que lorsque la vitesse est très lente ou la température est élevée ou la charge est extrême. La lubrification mixte et aux limites permet une séparation partielle entre les pièces en mouvement et, de ce fait, des additifs pour pression extrême (EP) et anti-usure (AW) peuvent être requis pour la performance des composants dans ces conditions.

Le frottement sous contact sec est essentiellement le coefficient de frottement. Les régimes de lubrification par glissement à sec, à glissement limité et à mode mixte sont préférables aux solutions dans lesquelles des forces de friction beaucoup plus élevées sur le bras entraînent un glissement important, un grippage et une adhérence provoquant un échauffement extrême et une déformation plastique des surfaces métalliques.

Les événements de frottement glissant sont révélés par la valeur ultrasonores ADN12 > 25% de la valeur sonore actuelle de l'ADN500. En variante, les événements de déformation plastique ne glissent généralement pas, de sorte que la valeur de DNA12 représente < 25% de la valeur actuelle de DNA500.

Les mouvements de force impliquant un chargement en compression sont détectés et caractérisés à l'aide d'une analyse sonore de l'onde de stress DNA500.

Les ondes de stress ultrasonores se produisent lorsque les aspérités et les joints de grains glissent les uns sur les autres lors du glissement. Cela se produit sous des régimes de lubrification en mode limite et en mode mixte, où les surfaces solides sont si proches les unes des autres qu'un contact appréciable entre des aspérités opposées est possible. «La friction et l'usure dans la lubrification limite sont principalement déterminées par l'interaction entre les solides. Selon W. E. Campbell, les propriétés d'écoulement du liquide jouent un rôle minime dans le comportement au frottement et à l'usure.

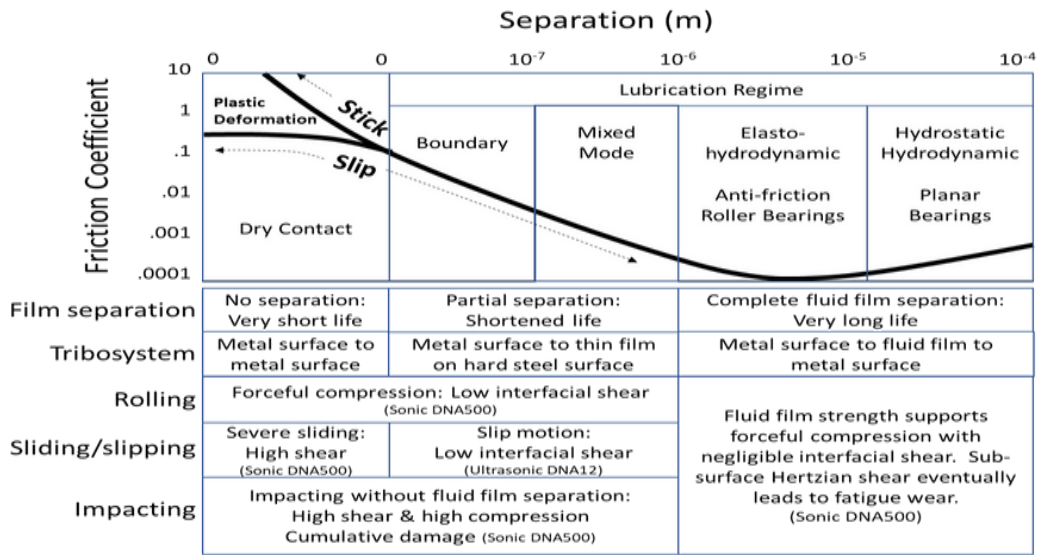


Figure 3. Modified Stribeck diagram showing lubrication regimes plus dry contact for rolling, sliding, slipping, and impacting.

COMPRESSION ET CISAILLEMENT AUX INTERFACES PORTEUSES

La compression est la fonction normale de la plupart des composants de machines tournantes. Que la charge soit dynamique ou statique, le chargement par compression transfère les forces d'un rouleau à l'autre ou d'un arbre à l'autre. C'est ainsi que la plupart des travaux sont effectués dans les tribosystèmes à machines tournantes. La compression énergétique est transférée d'un élément solide à l'autre à travers le film de fluide lubrifiant par méthode de lubrification hydrostatique, hydrodynamique ou élastohydrodynamique. Lors du fonctionnement dans les conditions de conception, la charge de compression est transmise d'un élément à l'autre, tandis que la résistance du film fluide sépare les surfaces portantes, évitant ainsi l'usure et minimisant le frottement et le cisaillement. Une longue durée de vie et un fonctionnement efficace sont assurés par les tribosystèmes chargés en compression via la limite de séparation des composants permise par la résistance du film fluide.

Parfois, le transfert de charge de cisaillement interfacial est normal, comme les segments de piston, les courroies, les poulies, les bandes de roulement, les chaussures, les freins et les embrayages pour lesquels un contact de frottement peut se produire souvent en fonctionnement normal.

Pour d'autres systèmes, le transfert de la charge de cisaillement interfaciale est un problème sérieux qui entraîne une courte durée de vie des composants. Cela est particulièrement vrai pour les pistons, les glissières, les paliers de butée et les paliers lisses alternatifs. De nouveau, les régimes de lubrification hydrodynamique et hydrostatique permettent une longue durée de vie grâce à la limite de séparation des composants rendue possible par la résistance du film fluide.

Les machines à roulement et les compresseurs sont difficiles à contrôler avec les analyses de vibrations traditionnelles en raison des changements de direction, de vitesse et de synchronisation perpétuels des cycles de travail. Pour bon nombre de ces tribosystèmes, l'analyse de l'huile doit être utilisée seule sans bénéficier de l'analyse traditionnelle des vibrations.

Les roulements et les engrenages conçus pour transférer la compression à travers le film fluide ne posent aucun problème. Le cisaillement doit être efficacement éliminé par le film fluide afin d'éviter la création de défauts naissants à critiques. Une lubrification inadéquate, à commencer par le frottement, est le principal facteur de cisaillement interfacial pour ces tribosystèmes.

L'acier trempé sur au moins un côté d'une interface est une pratique courante pour obtenir un faible frottement et un faible cisaillement, ainsi qu'une tolérance pour un cisaillement interfacial occasionnel. L'ajout d'un additif extrême pression ou d'un additif anti-usure aux surfaces portantes améliore considérablement la durée de vie, réduit le frottement et diminue le cisaillement de 10 à 10 000 fois

Une usure importante due au glissement ou au grippage est une conséquence courante de la force normale et de la force de cisaillement combinées avec une lubrification inadéquate. L'utilisation d'acier trempé sur une ou les deux surfaces réduit les risques de frottement ou de glissement retardant considérablement l'apparition de dommages importants dus au glissement. L'utilisation ultérieure d'additifs lubrifiants anti-usure (AW) et extrême-pression (EP) peut considérablement prolonger le délai avant qu'une détérioration sérieuse ne commence.

LUBRIFICATION INADÉQUATE

Une lubrification inadéquate est un problème courant avec de nombreuses racines. Une lubrification inadéquate signifie généralement que la résistance du film est dégradée, permettant ainsi un contact métal sur métal qui aurait dû être supporté par le film fluide. Ce sont des problèmes de base qui entraînent une lubrification insuffisante: lubrifiant insuffisant, faible viscosité, vitesse lente, surcharge.

Un lubrifiant insuffisant a plusieurs causes communes, notamment l'absence de lubrifiant, un manque d'huile, une température froide, des substances incompatibles et un moussage. Un compartiment d'huile vide est un problème commun aux conséquences évidentes. Pourquoi un niveau d'huile bas est-il un problème? Les puisards mal remplis ou qui fuient privent souvent un anneau de retenue, un tube de prélèvement ou un système de lubrification par barbotage.

Pourquoi le froid est-il un problème? L'huile froide est difficile à pomper et ne coule pas tandis que les viscosités sont élevées de plus de 1000% jusqu'à ce qu'elle se réchauffe. Voir la **figure 4**. Qu'en est-il des substances incompatibles? Le mélange des graisses est un gros problème lorsque la substance résultante ne lubrifie pas bien du tout. Qu'en est-il de la mousse? La mousse ne dissipe pas la chaleur, l'air ne lubrifie pas et l'huile restante se dégrade, se vernit et ne lubrifie pas bien.

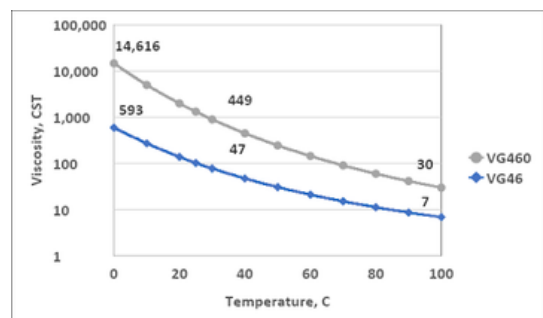


Figure 4. Viscosité changes with temperature by 1000% ++.

Une faible viscosité entraîne également une lubrification insuffisante. Une faible viscosité est souvent causée par une mauvaise application (mauvaise huile), une dilution ou une température élevée. Le changement de viscosité peut indiquer l'utilisation d'un lubrifiant incorrect et potentiellement inefficace. La dilution de l'huile lubrifiante par des substances de très faible viscosité, telles que les carburants ou les gaz entraînés, peut provoquer une chute de la viscosité en dessous du niveau nécessaire pour soutenir la lubrification hydrodynamique ou élastohydrodynamique. Le changement de température affecte de manière exponentielle la viscosité du lubrifiant; pour chaque surchauffe de fonctionnement de 10°C de la machine, un degré de viscosité (VG) supplémentaire sera nécessaire pour assurer une lubrification adéquate avec une fiabilité élevée.

Une vitesse lente est parfois inévitable. Certaines machines lubrifiées hydrodynamiques utilisent de l'huile de levage hydrostatique pour soulever l'arbre pendant qu'il monte en vitesse. La plupart des autres machines doivent simplement se lever et partir, puis un peu plus tard, elles doivent ralentir et s'arrêter. C'est comme démarrer ou arrêter un bateau rapide avec un skieur en remorque. Lorsque le bateau ne bouge pas, le skieur ne reste pas sur l'eau. Il se produit une vitesse lente et, le cas échéant, les régimes de lubrification passent des modes hydrodynamique ou élastohydrodynamique aux modes limite et mixte. Cette condition temporaire fonctionne pendant un certain temps, mais elle finira par endommager la surface. Les additifs pour pressions extrêmes agissent sur les surfaces en acier trempé afin de minimiser le cisaillement et d'éviter le grippage et une usure importante par glissement.

Les charges de compression sont soutenues par la résistance du film lubrifiant, qui est alimentée par la vitesse du fluide et de la machine. Une charge élevée avec une vitesse élevée fonctionne jusqu'à un certain point. Une charge élevée avec une vitesse lente peut entraîner un grippage. Une charge élevée avec une faible viscosité peut entraîner un glissement important. Une charge excessive dans un tribosystème peut avoir de nombreuses causes: conception, fonctionnement, torsion / couple / désalignement, dommages aux composants, etc.

Une lubrification inadéquate des composants de la machine en mouvement relatif entraîne un glissement par frottement, une usure par frottement, un grippage, un choc et une usure importante par glissement. Le frottement par glissement et l'usure par frottement produisent couramment une énergie d'onde de contrainte ultrasonore à large bande, un cri strident pour attirer l'attention. Les frottements, les chocs et les fortes usures dues au glissement sont des événements extrêmement violents qui produisent des ondes de stress sonores très fortes qui semblent écrasantes en comparaison de l'activité ultrasonore concurrente.

Le frottement peut être un indicateur révélateur d'une lubrification insuffisante avant que des dommages ne surviennent. Les roulements à rouleaux sont des tribosystèmes à plusieurs éléments avec de nombreux rouleaux, deux chemins et une cage destinés à maintenir l'espacement entre les rouleaux. L'épaisseur du film fluide nécessaire à la lubrification élastohydrodynamique entre les rouleaux et les bagues est d'environ 1μ . L'épaisseur du film fluide nécessaire à la lubrification hydrodynamique entre les rouleaux et la cage est d'environ 100μ . Par conséquent, une lubrification insuffisante causée par une graisse faible, une graisse inadéquate, un graissage excessif ou un autre mécanisme apparaît en premier dans la cage qui commence à manquer de lubrifiant. Étant donné que la charge entre le rouleau et la cage est très légère, les ondes de contrainte ultrasonores peuvent révéler un frottement de glissement se produisant longtemps avant l'apparition de dommages physiques dans ces tribosystèmes.

I-DNA AVEC GLISSEMENT ET CONTACT, IMPACT , CAVITATION & TURBULENCE

Les tribosystèmes correctement lubrifiés sont soutenus par la résistance du film lubrifiant. Les charges de compression statiques et dynamiques sont transférées entre des composants adjacents. Les forces de cisaillement interfaciales sont rendues insignifiantes par un fort film lubrifiant. Dans ces conditions, DNA500 signale un fort et puissant score d'accélération correspondant à la dynamique de la machine, tandis que le score d'accélération DNA12 reste bien inférieur à 25% du score d'accélération DNA500 simultanément.

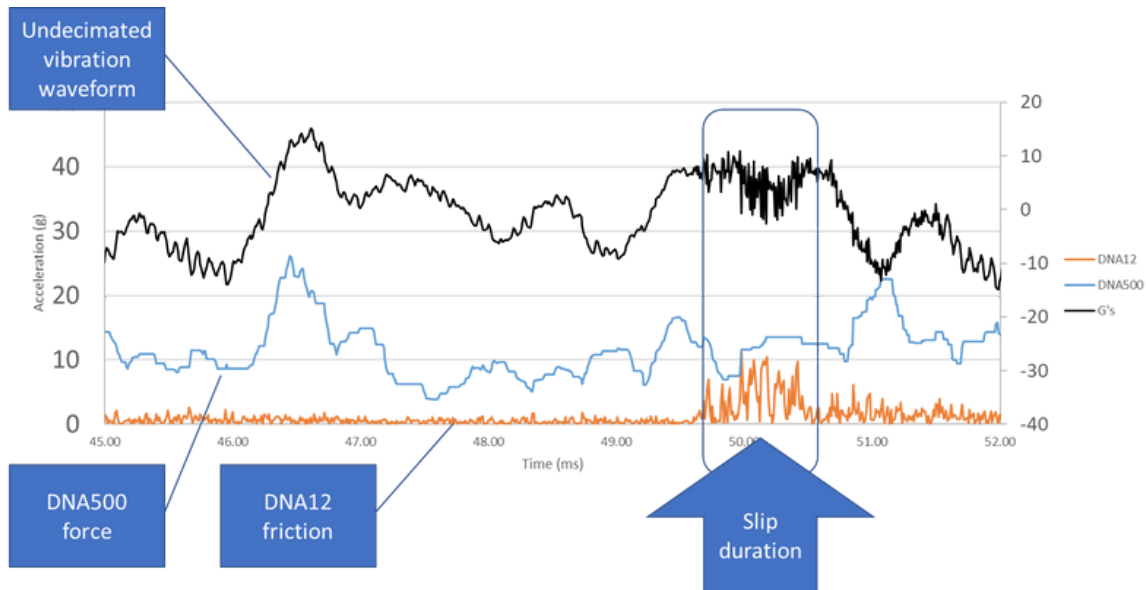
Le glissement se produit lorsque deux surfaces entrent en contact avec une différence de vitesse et sans un film de lubrification complètement développé. Le glissement signifie qu'il n'y a pratiquement pas de grippage ou d'adhérence entre les métaux pendant l'engagement. En conséquence, le coefficient de frottement par glissement est très faible (c'est-à-dire $\ll 0,1$), les dommages superficiels sont négligeables et, normalement, au

moins une des surfaces est en acier trempé. Par conséquent, il y a un grippage négligeable ou un glissement important, bien que de légers frottements et polissages puissent avoir lieu. Dans ces conditions, le score DNA12 dépasse de façon intermittente 25% du score d'accélération DNA500 simultanée.

Le contact par glissement et par impact est une condition néfaste résultant d'une lubrification insuffisante sous compression. Les surfaces sont creusées et striées. Une température locale extrêmement élevée peut souiller, fondre et décolorer les débris d'usure et les matériaux de surface. Dans ces conditions, le score DNA500 est très élevé et ses impacts durent plusieurs millisecondes. Pendant ces intervalles, les scores DNA12 restent bien inférieurs à 25% du score d'accélération DNA500 simultanée.

La cavitation, la turbulence des fluides et les arcs électriques sont des sources occasionnelles de vibrations ultrasonores dans l'industrie. La cavitation résulte de l'implosion d'un vide sur les roues entraînant des ondes de choc ultrasonores. L'interaction fluide-structure des fuites de fluides sous pression stimule également les ondes de stress ultrasonores. Les arcs électriques, la couronne et les décharges sont également des auteurs possibles de vibrations ultrasonores. Naturellement, ces sources inhabituelles de vibrations ultrasonores contribueront beaucoup plus à DNA12 qu'à DNA500.

Le graphique de la figure 5 comprend une forme d'onde suréchantillonnée non décimée (noir), une forme d'onde DNA500 (en bleu) et une forme d'onde DNA12 (en orange). Dans cet exemple, un chargement forcé correctement lubrifié est évident, sauf de 49,7 ms à 50,5 ms lorsqu'un glissement se produit. Pendant cet intervalle, le score DNA12 dépassait 25% du score DNA500. C'est là qu'un bref ajustement de la vitesse a eu lieu. Des dommages négligeables, le cas échéant, se sont produits pendant cet intervalle car il s'agissait d'un glissement et non d'un impact ou d'un glissement important. Cet événement particulier de glissement est probablement une rotation d'un maillon de chaîne et le glissement est normal pour cette application.



DNA500 MESURE PRÉCISEMENT LES ÉVÈNEMENTS PUISSANTS DANS LE TEMPS

Comme mentionné précédemment, DNA500 est une forme d'onde de mesure d'accélération de pic à pic. Cette forme d'onde de détection de pic suit l'accélération forcée résultant d'un fonctionnement normal, du mouvement du matériau, des impacts de défauts et d'un contact glissant important.

L'analyse par transformation de Fourier rapide (FFT) et l'analyse de corrélation de la forme d'onde DNA500 (ainsi que des formes d'onde DNA12 et FMAX) sont utiles pour différencier des événements périodiques et non périodiques et pour faire correspondre les fréquences d'occurrences aux mouvements du système mécanique.

SURVEILLEZ PLUS DE DÉFAUTS COUVRANT PLUS D'ÉQUIPEMENTS AVEC MOINS D'EFFORT

La décimation intelligente étend la gamme de défauts détectés, étend les types de machines surveillées et est facile à mettre en œuvre par rapport aux autres solutions.

L'analyse traditionnelle des vibrations FMAX révèle des problèmes liés aux entraînements par courroie, à l'arbre courbé, à la cavitation, aux défauts d'engrenage, au desserrement, au désalignement, à la résonance, au pied mou et au déséquilibre. L'analyse de l'huile révèle des problèmes liés à la chimie des lubrifiants, à la contamination du système et à l'usure des composants. Comme illustré à la figure 6, l'I-DNA™ élargit ces listes de défauts détectés, en ajoutant des frottements, un glissement important et des frottements glissants, comme l'indique la figure 6. Il étend également les types de machines surveillées, afin d'inclure les machines articulées, alternatives et à faible vitesse de rotation, comme indiqué en figure 7.

Faults	FMAX + I-DNA
Bearing defects	✓
Belt problems	✓
Bent shaft	✓
Cavitation	✓
Gear defects	✓
Imbalance	✓
Looseness	✓
Misalignment	✓
Resonance	✓
Rubbing	✓
Severe sliding	✓
Bearing defects	✓
Slip	✓
Soft foot	✓

Figure 6. Faults detected

La décimation intelligente est également facile à mettre en œuvre. Un calcul simple, une consommation faible et une bande passante étroite pour le traitement de décimation intelligent sont acceptables pour les capteurs sans fil à longue durée de vie fonctionnant sur piles. Des capteurs comme celui-ci sont faciles à installer à l'aide d'aimants ou de goujons (de préférence). Ils sont automatiquement connectés au cloud et configurés.

Equipment	FMAX + I-DNA
Articulating machines	✓
Electrical equipment	✓
Reciprocating machines	✓
Rotating machines	✓
Slow speed machines	✓

Figure 7. Equipment types

Tout ordinateur ou appareil mobile connecté à Internet fournit une interface de surveillance et d'analyse aux spécialistes de la fiabilité, à tout moment et en tout lieu.

UTILISATION DE CAPTEURS SANS FIL POUR SURVEILLER LES ÉQUIPEMENTS AVEC I-DNA

L'efficacité de la méthode I-DNA est particulièrement bien adaptée aux capteurs sans fil collectant des formes d'onde d'accélération. Les calculs sont en effet légers, rapides et compressent les données par décimation de telle sorte que seuls les événements significatifs soient rapportés. Cela permet de longues périodes de collecte de données d'accélération avec un taux d'échantillonnage à haute fréquence. I-DNA a été implémenté avec succès dans Wi-care™, une solution sans fil de vibration et de température alimentée d'I-care™, facile à installer, configurer et utiliser. La solution s'appuie sur des technologies cloud sécurisées pour stocker, traiter et récupérer les données de manière transparente afin de permettre le partage entre les parties prenantes. Intégrer l'I-DNA dans la solution Wi-care™ et I-see™ sans compromettre l'autonomie de la batterie a fait ses preuves sur de nombreux types d'équipements. La surveillance des paramètres clés sur les formes d'onde DNA500 et DNA12 permet aux responsables de la maintenance d'utiliser la maintenance prédictive sur des machines critiques avec une installation plug-and-play et à faible coût comparée à d'autres solutions.



A PROPOS DE L'AUTEUR

Ray Garvey - R&D Engineer, I-care Reliability Inc.



Ray est un ingénieur et un inventeur nommé sur deux douzaines de brevets américains associés aux analyseurs d'huile, à la thermographie infrarouge, à la surveillance des machines et aux structures composites. Ray est connu pour sa participation au développement des minilabs CSI 5100 et CSI 5200. Ray a obtenu son diplôme de BS à West Point et de MS à l'Université du Tennessee. Il a obtenu les certifications professionnelles suivantes : ingénieur professionnel (PE), spécialiste certifié en lubrification (CLS) et ingénieur de l'armée américaine (LTC retraité). Ray a travaillé pour le US Army Corps of Engineers, le US DOE Uranium Gas Centrifuge Program, CSI Emerson Process Management, I-care Reliability Inc. et Spectro Scientific.

ⁱ"TRIBOLOGY The Study of Interacting Surfaces in Motion", by BearingAdmin, August 23, 2017 <http://www.bearing-news.com/tribology-study-interacting-surfaces-motion/>

ⁱⁱ"How to Leverage Multiple Predictive Maintenance Technologies", Jeremy Wright, Machinery Lubrication Magazine, August 2014.

ⁱⁱⁱ Modified Stribeck curve is based on W. E. Campbell, Boundary Lubrication, Boundary Lubrication, an Appraisal of World Literature, ASME 1969, PP87-117; it is based on STLE, "The Ultrasonic Tribologist – Using a Sonic/Ultrasonic Sensor to Monitor for Inadequate Lubrication," 62d Meeting of STLE, 2007 pages 252 – 259; and it is based on patent application number WO2017201247A1, Fig 17.

^{iv} Ibid, W. E. Campbell.