

GUIDE POUR LA SURVEILLANCE DE HUIT MÉCANISMES DE DÉFAILLANCE COURANTS

Et les types d'équipements auxquels ils s'appliquent

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



INTRODUCTION

Pourquoi les composants tombent-ils en panne ? Que pouvons-nous faire à ce sujet ? Ce document explique huit mécanismes de défaillance courants, les types d'équipements auxquels chacun s'applique, et recommande des techniques de surveillance non intrusives pour découvrir pourquoi les composants se trouvent à différents stades de défaillance progressive.

Cet article s'appuie sur des publications antérieures concernant les mécanismes de défaillance, les taux d'usure, l'analyse des ondes de contrainte, le rôle du cisaillement dans les mécanismes de défaillance et les mécanismes de défaillance par usure.

L'analyse des ondes de contrainte soniques et ultrasoniques à l'aide de capteurs à microphone et à ondes radio sera présentée dans cet article. Il sera montré comment ces nouvelles techniques complètent et font progresser l'industrie en matière de surveillance des conditions pour plusieurs mécanismes de défaillance.

HUIT MÉCANISMES DE DÉFAILLANCE

1. Abrasion

Les particules de poussière de silice sont transportées par le lubrifiant jusqu'à un espace étroit entre les surfaces en mouvement. Les particules dures trop grosses pour passer à travers s'incrustent dans une surface et coupent l'autre. La force de cisaillement entre les particules dures lubrifiées et la surface mobile découpe une entaille en V dans la surface métallique mobile. Ce processus de coupe émet un spectre de vibrations mécaniques à partir du point d'abrasion et génère des débris d'usure abrasifs qui sont emportés par le lubrifiant. Ce mécanisme n'est généralement pas auto-entretenu et est facilement compensé par le contrôle de la contamination particulaire. Il affecte presque tous les systèmes mécaniques.

Ce mécanisme peut être déclenché par une surtension du système de circulation ou par un reniflard défectueux.

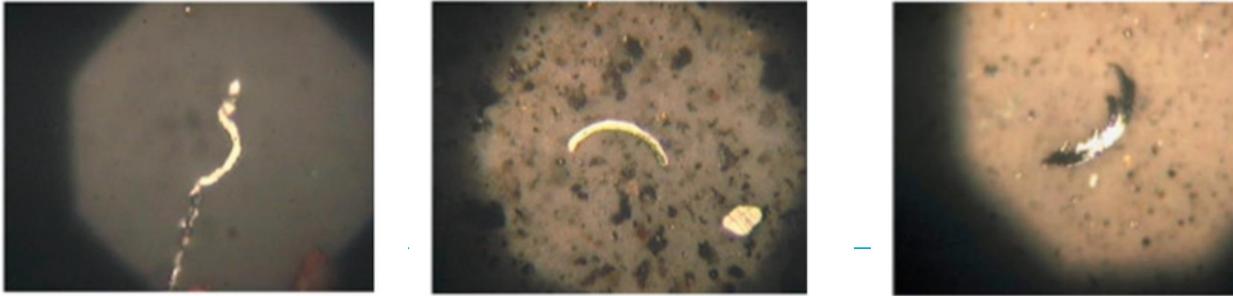
¹ "Identifying Root Causes of Failure with Condition Monitoring", Ray Garvey and Pat Henning, Machinery Lubrication Magazine, December 2012

² "How Machinery Wear Rates Impact Maintenance Priorities", Ray Garvey, Machinery Lubrication Magazine, March 2003

³ "Intelligent Decimation: Closing the Gaps Between Vibration and Oil Analyses", Ray Garvey, Machinery Lubrication Magazine, April 2019

⁴ "Composite Hull for Full-Ocean Depth", R. E. Garvey, Marine Technology Journal, Volume 24, Number 2, June 1990

⁵ "Converting Tribology Based Condition Monitoring into Measurable Maintenance Results", by Ray Garvey and Grahame Fogel, Computational Systems Inc., 1998



2. Corrosion

Une substance corrosive attaque le métal et transforme les surfaces de métal solide, thermiquement et électriquement conducteur en oxyde mou, électriquement et thermiquement résistant. L'oxyde qui en résulte est facilement éliminé par cisaillement, ce qui expose le métal frais à une oxydation durable. Ce léger frottement émet des ondes de contrainte à proximité et entraîne les oxydes métalliques mous dans le lubrifiant, exposant ainsi le métal au processus d'oxydation. Ce mécanisme est compensé par le contrôle de la contamination par l'humidité. Il peut être déclenché par une contamination du processus, une fuite de liquide de refroidissement ou un reniflard desséchant défectueux. La corrosion affecte presque tous les systèmes électriques et mécaniques et est synergique avec tous les autres mécanismes.

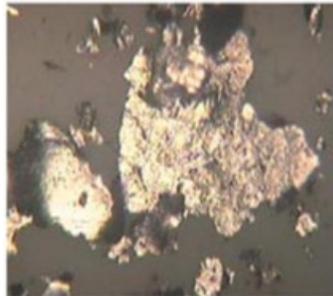


Illustration: particules d'usure corrosives

3. Fatigue

Les roulements à rouleaux et les engrenages tombent souvent en panne à cause du processus de contact par roulement qui finit par provoquer des fissures de fatigue du matériau et des éclatements. La compression entre les rouleaux et les chemins de roulement et entre les dents des engrenages produit un cisaillement de contact hertzien sous la surface qui finit par durcir le métal jusqu'à ce que des microfissures apparaissent, se développent, s'interconnectent, puis libèrent des débris métalliques généralement sous forme de morceaux, de plaquettes et d'aiguilles. Les ondes de contrainte émises par les impacts libèrent alors les débris métalliques dans le lubrifiant. Ce mécanisme est compensé par la réduction des charges dynamiques dues au déséquilibre, au désalignement et à la résonance, par la réduction des charges statiques et par d'autres bonnes pratiques de maintenance. Il peut être déclenché par un mauvais ajustement ou une croissance thermique.

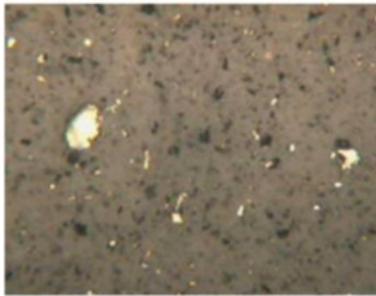
Elle affecte les systèmes mécaniques avec des roulements et des engrenages chargés. Comme décrit ci-dessous, le mécanisme de cavitation provoque également un cisaillement cyclique sous la surface, entraînant des fissures de fatigue et un écaillage du matériau.



Illustrations: particules d'usure dues à la fatigue

4. Adhésion (ou usure limite)

Un contact métal sur métal se produit lorsque le film lubrifiant conçu pour éliminer le frottement et séparer le rouleau de la bague ou le tourillon de l'arbre échoue en raison d'une lubrification inadéquate. L'augmentation du frottement et du cisaillement provoque des régimes de lubrification en mode mixte et en mode limite. Le contact émet des ondes de contrainte. La compression avec une lubrification en mode mixte et en mode limite entraîne un cisaillement et un frottement qui provoque un échauffement intense, une fusion et une décoloration. Elle libère des débris métalliques et des oxydes métalliques dans le lubrifiant et émet un spectre de vibrations. Ce mécanisme est compensé par le maintien d'un lubrifiant correct au bon niveau et par un fonctionnement à la vitesse et à la charge prévues. Ce mécanisme peut être déclenché par une vitesse trop lente, une charge trop élevée, une viscosité trop faible et une distribution inadéquate du lubrifiant. Ce mécanisme affecte presque tous les systèmes mécaniques dont les composants sont chargés. L'usure par adhérence et les autres dommages liés à l'usure limite sont progressifs, s'auto-propagent et accélèrent la corrosion.



Illustrations : particules d'usure par glissement sévère

5. Cavitation

La cavitation liquide menant à l'endommagement de la surface solide est stimulée par la variation cyclique de la pression dynamique de l'écoulement du fluide à proximité de la surface. Dans une partie lente du cycle de pression, la succion permet la nucléation de micelles évacuées provenant d'irrégularités de la surface solide. Le gaz dissous hautement saturé du liquide environnant peut se diffuser dans les bulles en expansion. Plus tard dans le cycle de pression, l'aspiration est relâchée, les bulles implosent vers le cycle de surface de nucléation. L'implosion provoque une impulsion supersonique de surface à charge de forme, analogue au pop de l'extrémité d'un fouet de taureau, transfère des ondes de compression et de contrainte de cisaillement après l'effondrement. Le cisaillement sous la surface, provoqué par l'onde de contrainte fluide-structure,

disloque la morphologie du matériau sous la surface. Finalement, les dislocations conduisent à des fissures de fatigue, puis à l'écaillage. Notez que lorsque les bulles contiennent des gaz à pression partielle diffusés à partir d'un liquide environnant proche de la saturation, il y a également un chauffage intense localisé dû aux gaz comprimés. Les impulsions des événements de cavitation émettent des ondes de contrainte qui délogent les débris particulaires. Ce mécanisme se produit généralement sur les roues, les pompes, les vannes et autres dispositifs d'écoulement qui supportent le processus d'endommagement par cavitation décrit. Les dommages dus à la cavitation sont compensés par la conception, le contrôle, la vitesse et le traitement de surface de l'écoulement du fluide. Ils sont déclenchés par les variations de pression, de débit et de vitesse. Les dommages dus à la cavitation sont normalement progressifs, se propagent d'eux-mêmes et conduisent souvent à la fissuration par fatigue et à la fissuration par corrosion sous contrainte.

6. Erosion

Des particules liquides ou solides à grande vitesse frappent une surface solide en provoquant des points de compression intenses, ce qui entraîne une déformation et un cisaillement qui émettent des ondes de contrainte à partir des points d'impact et délogent les débris de la surface endommagée. Ce mécanisme est compensé en protégeant les surfaces concernées par des revêtements absorbant l'énergie. Ce mécanisme affecte les vannes, les tuyaux, les déflecteurs, les impulseurs et de nombreux autres composants électriques et mécaniques exposés à des particules en suspension.

7. Décharge électrique

Les électrons transportés sous forme de parcs, de décharges partielles et d'arcs dynamitent les surfaces cibles avec une compression locale intense provoquant une déformation et un cisaillement qui génèrent un large spectre d'énergie mécanique et électrique. Les électrons traversent des espaces à des vitesses supersoniques (disons 30 m/μs) en émettant des ondes radio et des bangs soniques, en générant des dommages thermiques locaux intenses sur les surfaces et en produisant diverses substances gazeuses telles que des hydrocarbures et de l'ozone. Ce mécanisme progressif ionise la matière à proximité pour former une décharge ou une trace de plasma. Le mécanisme peut être neutralisé par le maintien de matériaux et de compartiments propres, secs et aptes à être utilisés. Il est déclenché par l'humidité, la détérioration de l'isolation, les défauts de mise à la terre, le relâchement et la corrosion des contacts. Ce mécanisme affecte tous les équipements chargés statiquement et alimentés électriquement, notamment les interrupteurs électriques, les circuits, les faisceaux de câbles, les connexions, les disjoncteurs, les transformateurs, les compartiments, les contrôleurs, les moteurs, les entraînements à courant continu et à fréquence variable, les générateurs, les filtres, les paliers d'arbre et les boîtiers nécessitant une mise à la terre électrique.

8. Dépôt

Ce mécanisme résulte d'un dysfonctionnement et de l'accumulation progressive d'un matériau étranger sur un composant critique. Deux exemples de dépôt sont la formation et l'accumulation de vernis précipité sur une vanne de régulation et l'accumulation de matériaux fibreux sur un ventilateur. L'accumulation de vernis sur une vanne de régulation peut entraîner un bouchage et un collage. L'accumulation de matériaux fibreux sur un ventilateur peut entraîner un déséquilibre et un risque potentiel d'incendie. Le mécanisme de dépôt est compensé en détectant, interprétant et traitant le processus d'accumulation progressive spécifique. Chaque plan d'action corrective est spécifique à son processus caractéristique.

Failure Mechanism	Equipment	Contributing Factors	Proactive Measures	Condition Monitoring									
				Elemental spectroscopy	Particle count & shape classification	Total ferrous	Vibration analysis	Viscosity	Water, coolant, TAN/TBN	Thermal imaging	Stress wave analysis: accel, mic, antenna	Special test & inspect	
Abrasion	Mechanical items	Dust contamination System surge Defective breather	Contamination control Clean, dry, fit for use	X	X	X						X	
Corrosion	Mechanical items Electrical items	Water or coolant contamination Defective desiccating breather	Contamination control Clean, dry, fit for use	X	X	X				X		X	
Fatigue	Bearings Gears	High dynamic load Improper fit	Minimize resonance, misalignment, & imbalance	X	X	X	X					X	
Adhesion (boundary)	Mechanical items	Lubricant misapplication Slow speed, excess load, low viscosity	Effective lubrication Correct speed, load, viscosity	X	X	X	X	X				X	
Cavitation	Impellers, pumps, valves, piping	Speed, pressure, and flow extremes	Speed control, fluid dynamics, and surface treatment									X	
Erosion	Valves, pipes, windows, baffles, screens, throttles, impellers, sensors	Exposure to streaming particulates	Protective coating									X	
Electrical discharge	Electric powered items Static charged items	Moisture Ground faults Deterioration Looseness Corrosion	Clean, dry, fit for use							X	X	X	X
Deposition	Flow controls, filters, screens, valves, fans	Temperature cycle Static charge	Awareness & prevention										X

Tableau 1 : Huit mécanismes de défaillances courants avec équipement, facteurs influents, mesures proactives et maintenance prédictive.

Techniques de surveillance des mécanismes de défaillance

Spectroscopie élémentaire

La spectroscopie élémentaire par fluorescence X (XRF) des échantillons de filtres est préférable pour les mécanismes de défaillance des grosses particules, notamment l'abrasion, la fatigue et l'adhésion sévère. La spectroscopie d'émission optique et la fluorescence X conviennent toutes deux pour les mécanismes de corrosion et d'adhésion légère.

Classification du nombre et de la forme des particules

Les comptages de particules à des plages de taille >4 , >6 et >14 μm permettent une surveillance des conditions pour le contrôle de la contamination. La classification automatique de la forme des particules par imagerie directe ou l'analyse microscopique des particules d'usure permettent de distinguer le mécanisme de défaillance.

Détection d'arc/étincelle par ondes radio

Cette nouvelle technique d'analyse des ondes de contrainte détecte de manière non intrusive les arcs, les étincelles et les décharges partielles dans les systèmes électriques et électromécaniques. Voir les figures 6 à 8.

Inspection et test spécial

Les décharges électriques des compartiments remplis d'huile peuvent bénéficier d'une analyse des gaz dissous (DGA) pour rechercher des preuves d'arcs électriques de tour à tour. Le dépôt et l'accumulation de matières sur les commandes de débit, les filtres, les écrans, les vannes, les ventilateurs et les compartiments d'huile sont des mécanismes de défaillance résultant de diverses conditions de fonctionnement. Le protocole d'inspection et de test dépend de ces éléments. Par exemple, la colorimétrie à membrane (MPC) est une technique de test privilégiée pour identifier les signes de précurseurs de vernis.

Analyse des ondes de contrainte

Les mécanismes d'usure que sont l'abrasion, le frottement (associé à la corrosion), la fatigue, l'adhésion (limite), la cavitation, l'érosion et la décharge électrique peuvent être détectés de manière non intrusive à l'aide d'un capteur analogique approprié. Les accéléromètres, les microphones, les capteurs d'ondes radio, les sondes de courant et les capteurs de flux magnétique sont d'autres exemples de dispositifs d'entrée sensoriels analogiques utilisés dans l'analyse des ondes de contrainte. Les données analogiques et numériques sont sur-échantillonnées et décimées de manière sélective afin de dériver des formes d'ondes sonores et ultrasoniques simultanées. La forme d'onde de l'analyse de l'onde de stress peut être soit le pic maximum rectifié, soit le pic maximum à pic. Les données présentées sur les figures 1 à 8 sont de type pic à pic. 1-8 sont du type crête à crête, et les capteurs utilisés pour ces mesures étaient des capteurs à microphone ou à ondes radio, comme indiqué.

Imagerie thermique

La résistance électrique, l'arc électrique et la friction mécanique produisent des points chauds détectables par imagerie thermique.

Ferreux total

Il est préférable d'utiliser un magnétomètre pour déterminer la concentration totale de ferreux (PPM) pour toutes les particules d'oxyde ferreux et de métal ferreux, de la taille moléculaire à celle des particules d'usure abrasive. Cet outil est très utile pour quantifier l'usure et la gravité des débris ferreux dans les fluides lubrifiants.

Analyse vibratoire

Les vibrations mécaniques en dessous d'une fréquence maximale d'intérêt (FMAX) sont surveillées pour caractériser les causes proactives des mécanismes de défaillance tels que le déséquilibre, le désalignement, le desserrage, la résonance et le pied mou. Elles sont également surveillées en combinaison avec des techniques d'analyse des ondes de contrainte pour caractériser les étapes prédictives de défaillance, de l'état initial à l'état catastrophique.

Viscosité

Une mauvaise application de lubrifiant, par exemple une mauvaise huile, est fréquemment identifiée en vérifiant la viscosité correcte des lubrifiants en service. Ceci est directement lié à la surveillance d'une lubrification inadéquate associée à l'adhérence.

Eau, liquide de refroidissement et indice de neutralisation

Une méthode pratique sur site pour contrôler l'eau, le liquide de refroidissement et l'indice d'acide total ou de base totale est la spectroscopie infrarouge par transmission d'un lubrifiant en service. Les méthodes de titrage en laboratoire (Karl Fischer, TAN et TBN) sont également efficaces. L'eau, le liquide de refroidissement et l'acide sont tous liés aux mécanismes d'usure corrosive.

TENSION, COMPRESSION ET CISAILLEMENT

"Rien, ou presque rien, ne se brise en compression", telle est la réponse d'un scientifique en chef du laboratoire Y-12 du DOE, John Googin, lorsque je l'interroge sur les mécanismes de défaillance. John a suggéré qu'à certains moments, lorsque je pense que la compression est une cause primaire de défaillance, une étude plus approfondie des preuves exposerait certainement un mécanisme de traction ou de cisaillement initiant une séquence de défaillance progressive. Trente ans plus tard, je n'ai pas trouvé d'exception, et la force de cisaillement est presque toujours un facteur contributif primaire des mécanismes de défaillance naissante à catastrophique.

Les surfaces portantes lubrifiées permettent aux machines d'effectuer un travail par compression à travers un film lubrifiant. Le travail est l'application d'une force sur une distance ou d'une pression sur un volume. Les systèmes mécaniques sont conçus pour effectuer un travail et pour avoir une très longue durée de vie en effectuant ce travail par l'application de tension et de compression. La longue durée de vie prévue par le concepteur est écourtée par le cisaillement. Les mécanismes de défaillance de l'abrasion, de la corrosion, de la fatigue, de l'adhésion (ou régime de lubrification limite), de la cavitation, de l'érosion et de la décharge électrique ont tous un élément de défaillance commun, le cisaillement. Les huit figures suivantes montrent comment la compression et le cisaillement peuvent être révélés par la collecte simultanée d'ondes de contrainte soniques et ultrasoniques à partir d'un flux de données numériques d'un taux d'échantillonnage d'au moins 80 kHz. Ces techniques s'appliquent aux mesures effectuées par divers capteurs, notamment un accéléromètre piézoélectrique, un microphone à condensateur à électret et une antenne à ondes radio. Un capteur approprié est sélectionné pour la mesure non intrusive des mécanismes de défaillance. Les méthodes préférées d'analyse des ondes de contrainte effectuent simultanément une analyse sonique de maintien de crête des signaux passe-haut de 500 Hz et une analyse ultrasonique de maintien de crête des signaux passe-haut de 20 kHz à partir d'un flux de données suréchantillonné.

Tous les graphiques des figures 1 à 8 comprennent un tracé orange et un tracé bleu. L'abscisse (axe Y) est l'intensité du signal en millivolts (mV) et l'ordonnée (axe X) est le temps en secondes (s). La zone située sous la ligne orange représente l'énergie de crête ultrasonore totale au-dessus de 20 kHz. La zone entre la ligne bleue et la ligne orange est l'énergie de crête ultrasonique totale entre 500 Hz et 20 kHz. L'énergie ultrasonore sous la ligne orange est liée aux mécanismes de transfert d'énergie de cisaillement de la friction et de la turbulence. L'énergie ultrasonore entre les lignes bleue et orange est liée au transfert d'énergie par compression, reflétant le travail effectué par la force à travers la distance ou la pression à travers le volume.

La figure 1 présente des événements typiques d'impact d'adhérence et de fatigue. Ces 12 exemples montrent des modèles d'impact de compression de forte amplitude qui sont caractéristiques de ces collisions métal contre métal. Remarquez que dans chaque cas, le signal ultrasonore (orange) reste faible par rapport au signal sonore (bleu).

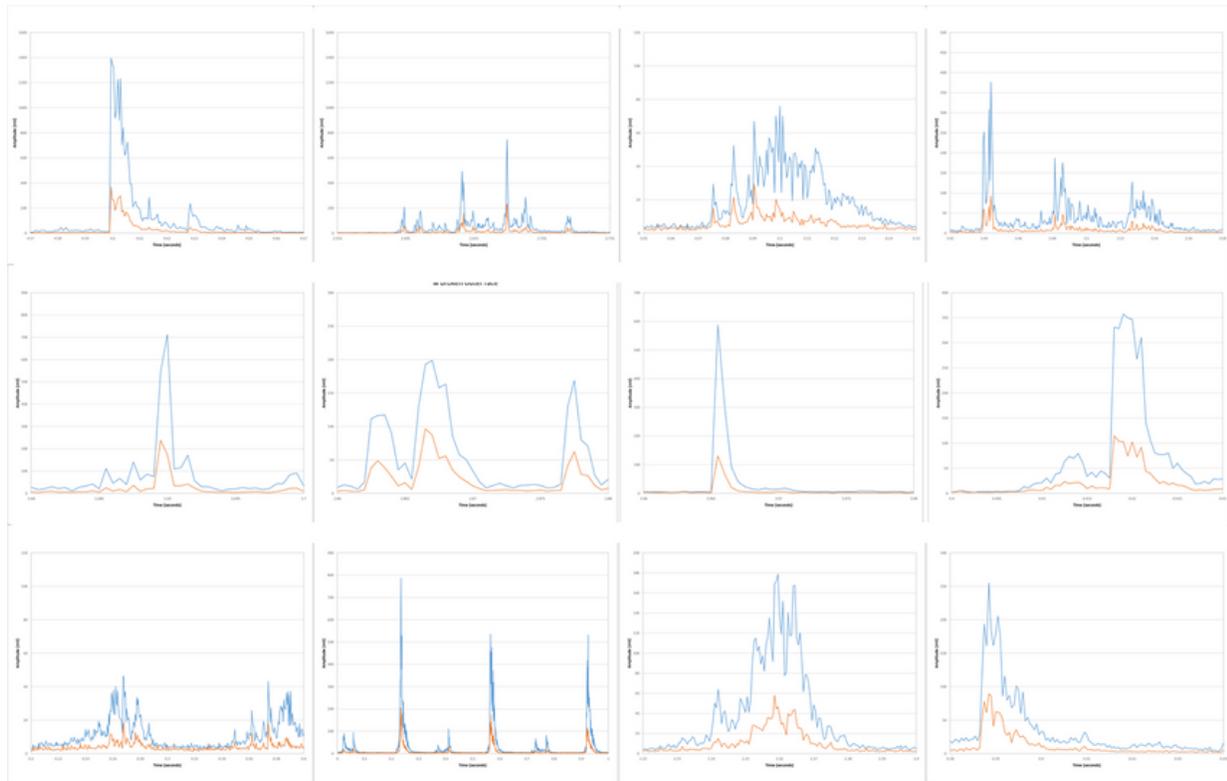


Figure 1: Microphone sensor collected stress waves from typical impacts involving a variety of adhesion events and fatigue defects.

La **figure 2** montre comment un mécanisme de compression alternatif effectue un travail de compression avec un cisaillement négligeable. Dans ce cas, le lubrifiant fournit un film fluide hydrodynamique complet minimisant le cisaillement tout au long du contact glissant alternatif continu.

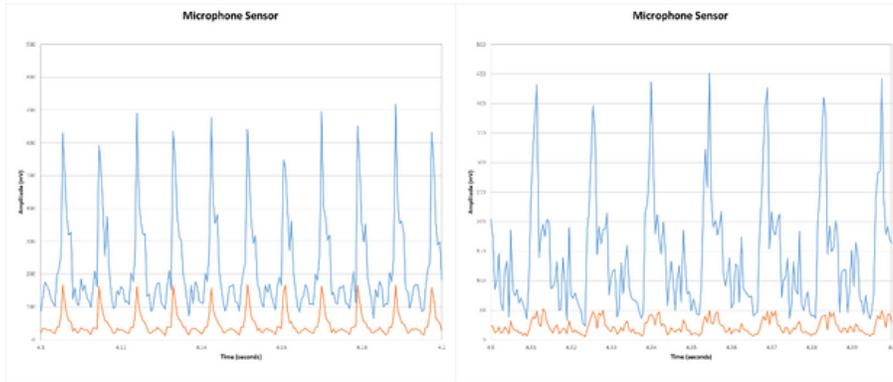


Figure 2: Ondes de contrainte aéroportées provenant d'une compression alternative avec séparation hydrodynamique du film fluide.

La **figure 3** montre comment le frottement par adhérence lors d'une usure par frottement d'un adhésif léger est en grande partie ultrasonique sans beaucoup d'énergie sonore. Les lignes orange du passe-haut ultrasonique au-dessus de 20 kHz sont "devant" les lignes bleues du passe-haut sonore au-dessus de 500 Hz. Cependant, par définition, la valeur de crête du passe-haut au-dessus de 500 Hz est toujours égale ou supérieure à la valeur de crête du passe-haut au-dessus de 20 kHz. Un modèle d'onde sonore caractéristique est évident dans le graphique de droite. Dans l'ensemble, la figure 3 représente le cisaillement dû à la friction lors d'une légère usure par frottement de l'adhésif.

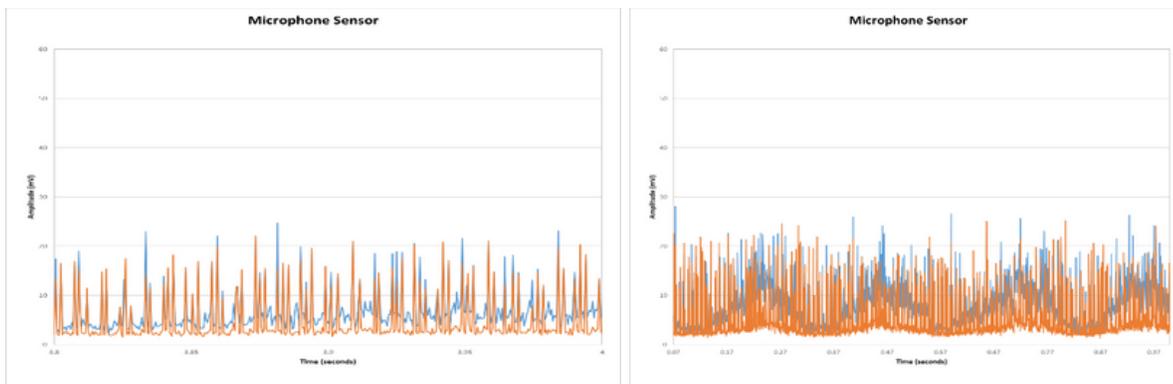


Figure 3. Ondes de stress aériennes dues à une légère usure par frottement de l'adhésif.

La figure 4 est similaire à la figure 3, l'usure de la coupe abrasive effectuant un travail physique, comme le montre la séparation entre les lignes orange et bleue des ultrasons.

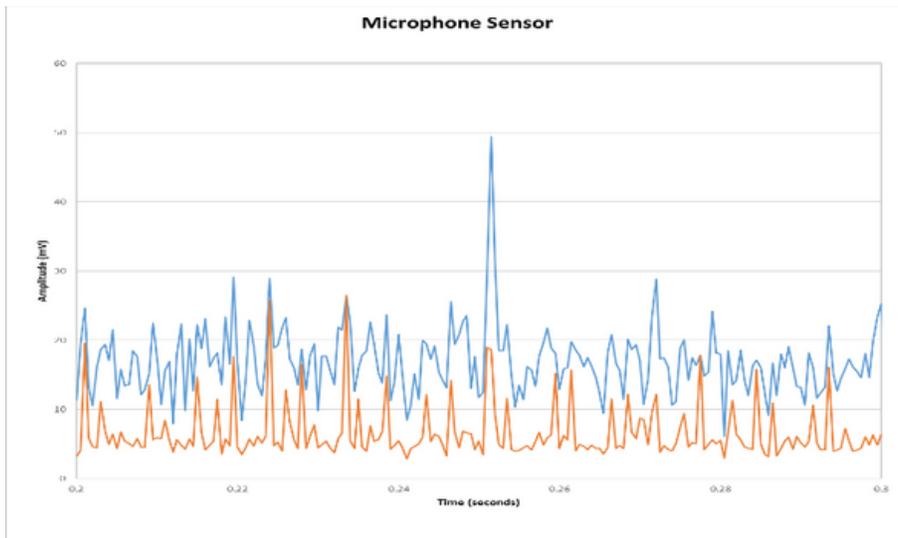


Figure 4. Ondes de contrainte aéroportées dues à l'usure abrasive.

La figure 5 montre le processus d'érosion avec des impacts de fluides et de particules produisant des événements de compression et de cisaillement dans ces tracés du domaine temporel. Ces tracés typiques ont été enregistrés au niveau d'une chute d'eau. Par coïncidence, l'action de l'eau apparaît dans la couleur bleue, les impacts de particules sont de couleur sable.

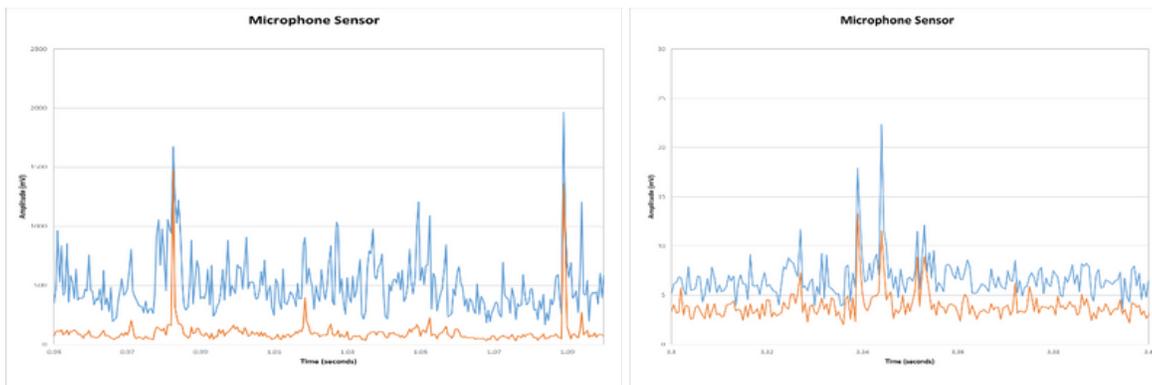


Figure 5: Ondes de stress aériennes dues à l'érosion

La figure 6 montre l'énergie des ondes radio pendant les événements de décharge partielle. Notez que les événements de décharge électrique ont tendance à être des événements ultrasoniques très, très rapides. Cependant, lors d'une décharge partielle, les signaux d'ondes radio apparaissent lents et atténués comme le montre cette figure. Remarquez que l'énergie sonore est plusieurs fois plus forte que l'énergie des ondes radio ultrasoniques. C'est peut-être la preuve que les électrons qui quittent les conducteurs ne s'échappent pas complètement de la matière isolante environnante.

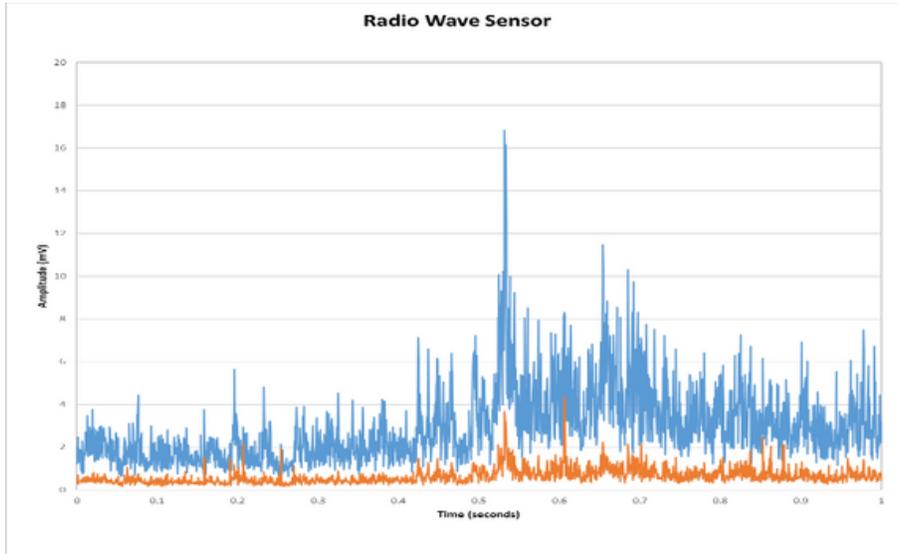


Figure 6. Ondes de stress radio provenant d'une décharge électrique partielle.

La figure 7 montre les tracés de microphones et de capteurs d'ondes radio produisant des ondes de stress soniques et ultrasoniques suivant les événements survenant lors d'une décharge électrique continue par arc au plasma avec un arc de 10 kV sur un espace de ~10 mm. En général, l'arc électrique produit des événements ultrasoniques rapides. Par conséquent, la ligne orange a tendance à se superposer à la ligne bleue et à l'obscurcir dans les graphiques. Les arcs électriques sont plus courants que les étincelles pour les équipements électriques de 2 kV et plus.

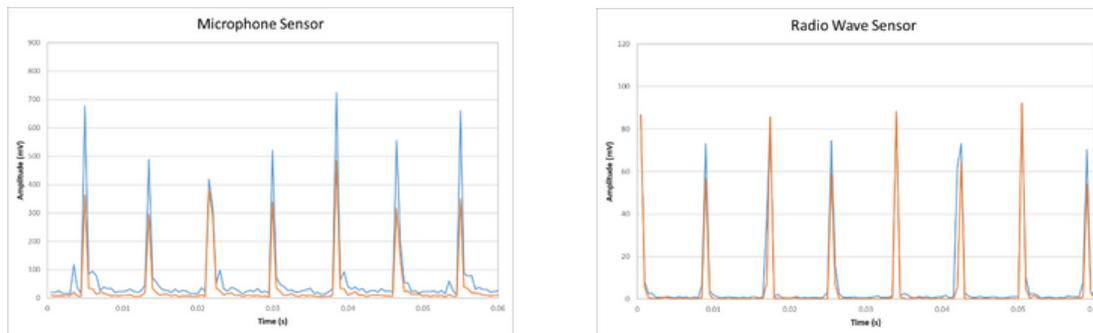


Figure 7: Ondes de contraintes sonores et ultrasoniques à l'aide d'un microphone et d'un capteur d'ondes radio pour surveiller une décharge électrique continue de plasma et d'arc avec 10 kV

La figure 8 montre les tracés des microphones et des capteurs d'ondes radio produisant des ondes de stress soniques et ultrasoniques qui suivent les événements survenant lors d'étincelles provenant d'une source de 120 V. Les étincelles sont plus fréquentes que les arcs électriques pour les équipements électriques de 480 V et moins.

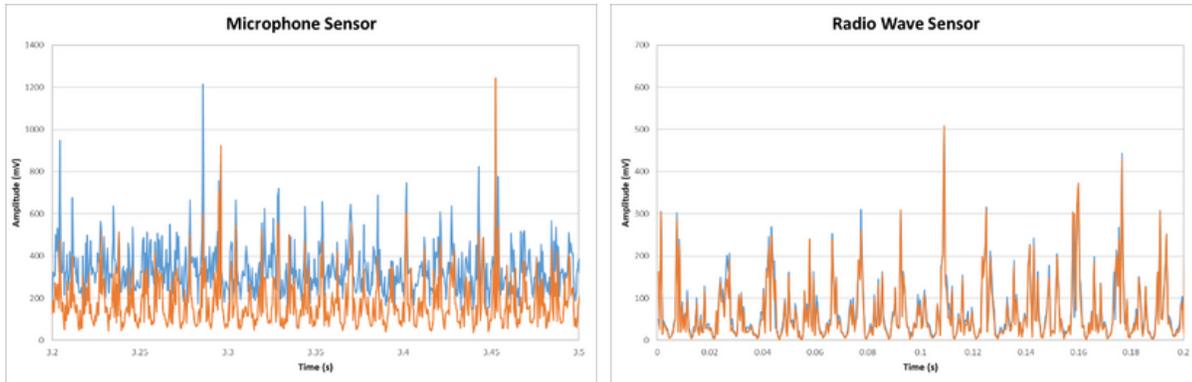


Figure 8. Des capteurs microphones et d'ondes radio détectent les ondes de stress provenant d'une décharge électrique en provenance d'une source de 120 V.

CONCLUSION

Cet article tente de décrire comment les équipements tombent en panne et ce qui peut être fait pour améliorer la fiabilité globale. L'article identifie les mécanismes courants de défaillance : abrasion, corrosion, fatigue, adhésion, érosion, cavitation, décharge électrique et dépôt.

Chaque mécanisme a des facteurs contributifs, des mesures proactives et affecte différents types d'équipements. Plusieurs techniques de surveillance non intrusives sont identifiées afin de permettre des efforts proactifs et préventifs pour améliorer la fiabilité.

L'analyse simultanée des ondes de contraintes sonores et ultrasonores à l'aide de capteurs à microphone et à ondes radio, qui constitue une avancée dans l'état de l'art, est présentée dans la liste des techniques de surveillance de l'état des équipements.

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.