TRIBOLOGIE

Huile dans un moteur ou un engrenage a pour but d'eviter les frottements ,mais en cas de defaillance les degats sont importants , alors en prelevant huile pour l'analyse il se comporte comme le sang dans un corps humain et l'analyse d'huile me permet de comprendre toutes les anomalies et intervenir avant la catastrophe

Mécanismes de surveillance des défaillances

Pourquoi les composants tombent-ils en panne ? Que pouvons-nous faire à ce sujet ? Cet article explique huit mécanismes de défaillance courants, et les types d'équipement auxquels chacun s'applique. Il recommande aussi des techniques de monitoring non intrusives pour découvrir pourquoi les composants sont à divers stades de défaillance progressive.

Cet article s'appuie sur des publications antérieures sur les mécanismes de défaillance[i], les taux d'usure[ii], l'analyse des ondes de contrainte[iii], le rôle du cisaillement dans les mécanismes de défaillance [iv]et les mécanismes de défaillance par usure[v]. L'analyse sonique et ultrasonique des ondes de contrainte à l'aide de microphones et de capteurs d'ondes radioélectriques est présentée dans cet article. On montrera comment ces nouvelles techniques complètent et font progresser l'état des connaissances en matière de maintenance prévisionnelle pour plusieurs mécanismes de défaillance.

Huit mécanismes de défaillance

L'abrasion, la corrosion, la fatigue et l'adhérence, la cavitation, l'érosion, les décharges électriques et les dépôts sont des mécanismes d'échec dans la documentation de référence. Les caractéristiques de chacun d'eux sont indiquées ci-dessous et dans le tableau 1.

1. **Abrasion**

Les particules de poussière de silice sont transportées par le lubrifiant jusqu'à un espace étroit entre les surfaces mobiles. Les particules dures trop grosses pour passer à travers s'encastrent dans une surface et coupent l'autre. La force de cisaillement entre les particules dures lubrifiées et la surface mobile coupe une encoche 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 autogène et est facilement

compensé par le contrôle de la contamination par les particules. Elle affecte presque tous les systèmes mécaniques. Ce mécanisme peut être déclenché par une surtension dans le système de circulation ou par un reniflard défectueux.

2.Corrosion.

Une substance corrosive attaque le métal et convertit les surfaces d'un métal fort, conducteur thermique et électrique en un oxyde mou, résistant électriquement et thermiquement. L'oxyde qui en résulte est facilement éliminé par le cisaillement qui expose le métal frais pour soutenir l'oxydation. Ce léger frottement émet des ondes de stress provenant du voisinage et frotte les oxydes de métaux 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 procédé, une fuite de liquide de refroidissement ou un reniflard de dessication défectueux. La corrosion affecte presque tous les systèmes électriques et mécaniques et est synergique avec tous les autres mécanismes.

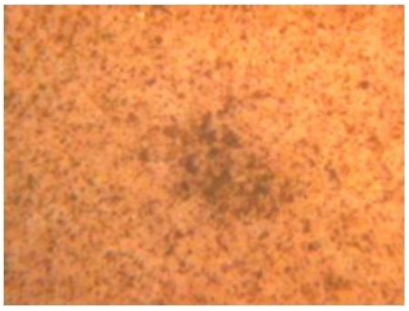
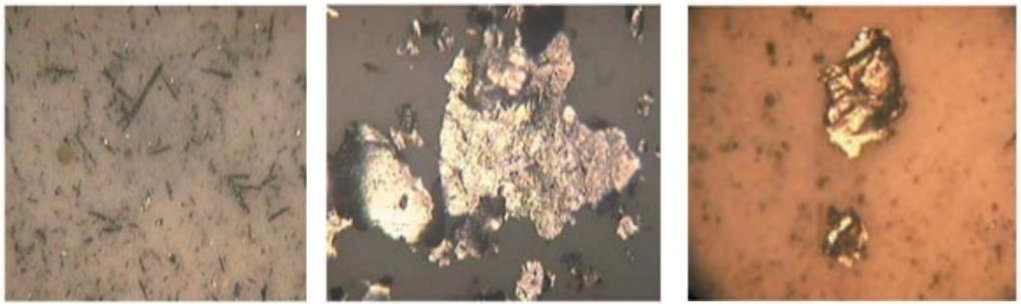


Illustration : particules d'usure corrosives

1. ## Fatigue

Les roulements à rouleaux et les engrenages se détériorent souvent en raison du processus de contact de roulement qui finit par causer des fissures et des éclats de fatigue du matériau. La compression entre les rouleaux et les bagues 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. Cela émet des ondes de contrainte dues aux chocs et libère les débris métalliques dans le lubrifiant. Ce mécanisme est compensé en minimisant les 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. Elle peut être déclenchée par un mauvais ajustement ou une croissance thermique. Elle affecte les systèmes mécaniques avec roulements et engrenages chargés. Tel que décrit ci-dessous, le mécanisme de cavitation provoque également un cisaillement cyclique sous la surface, ce qui entraîne des fissures de fatigue et un écaillage du matériau.



Illustrations : particules d'usure par fatigue

2. Adhérence (ou usure de la couche 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 du tourillon de l'arbre se rompt en raison d'une lubrification insuffisante. 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 en mode mixte et la lubrification limite entraînent un cisaillement et un frottement qui provoquent un échauffement, une fonte et une décoloration intenses. Il libère des débris métalliques et des oxydes métalliques dans le lubrifiant et émet un spectre de vibrations. Ce mécanisme est compensé par le maintien du bon lubrifiant au bon niveau et par le 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 un débit de lubrifiant inadéquat. Ce mécanisme touche presque tous les systèmes mécaniques dont les composants sont chargés. L'usure de l'adhésif et les autres dommages dus à l'usure des limites sont progressifs, se propagent d'eux-mêmes et accélèrent la corrosion.

3. Cavitation

La cavitation de liquide entraînant des dommages à la surface solide est stimulée par la variation de pression dynamique de l'écoulement cyclique du fluide à proximité de la surface. Dans une partie lente du cycle de pression, l'aspiration permet la nucléation de micelles sous vide provenant d'irrégularités de la surface solide. Le gaz dissous hautement saturé du liquide environnant peut se diffuser dans des 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 de surface supersonique à charge de forme, analogue au bruit du fouet d'un taureau, qui transfère les ondes de compression et de contrainte de cisaillement après l'effondrement. Le cisaillement souterrain dû à l'onde de contrainte de structure fluide disloque la morphologie du matériau souterrain. Les dislocations finissent par provoquer des fissures de fatigue, puis de l'écaillage. Notez que lorsque les bulles contiennent des gaz à pression partielle diffusés par le liquide environnant proche de la saturation, il y a aussi un échauffement intense localisé par les gaz comprimés. Les impulsions de cavitation provenant 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 décrit d'endommagement par cavitation. Les dommages causés par la cavitation sont compensés par la conception, le contrôle, la vitesse et le traitement de surface de l'écoulement du fluide. Elle est déclenchée par la pression, le débit et la variation de vitesse. Les dommages dus à la cavitation sont normalement progressifs, se propageant d'eux-mêmes et conduisent souvent à la fissuration par fatigue et à la fissuration par corrosion sous contrainte.

4. Erosion

Des particules liquides ou solides à grande vitesse frappent une surface solide en causant 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 par la protection des surfaces d'intérêt par des revêtements absorbant l'énergie. Ce mécanisme affecte les soupapes, les tuyaux, les chicanes, les roues et de nombreux autres composants électriques et mécaniques exposés à des particules en suspension.

5. Décharge électrique

Les électrons transportés dans les parcs, les décharges partielles et les arcs exploitent les surfaces cibles avec une compression locale intense causent une déformation et un cisaillement qui génère un large spectre d'énergie mécanique et électrique. Les électrons traversent des intervalles à des vitesses supersoniques (disons 30 m/s) et émettent des ondes radio et des bang soniques, causant d'intenses dommages thermiques locaux aux surfaces et produisant diverses substances gazeuses comme les hydrocarbures et l'ozone. Ce mécanisme progressif ionise la matière proximale pour former une voie de décharge ou de plasma. Le mécanisme peut être compensé par le maintien de matériaux et de compartiments propres, secs et aptes à l'emploi. Elle est déclenchée 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, y compris 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 terre électrique.

6. Dépôt

Ce mécanisme résulte d'une accumulation dysfonctionnelle et progressive de corps étrangers sur un composant critique. Deux exemples de dépôt sont la formation et l'accumulation de vernis précipité sur une valve de contrôle et l'accumulation de matière fibreuse sur un ventilateur. L'accumulation de vernis sur une vanne de régulation peut entraîner un colmatage et un collage. L'accumulation de matières fibreuses sur un ventilateur peut entraîner un

déséquilibre et un risque d'incendie. Le mécanisme de dépôt est compensé par la détection, l'interprétation et le traitement du processus d'accumulation progressive spécifique. Chaque plan d'actions correctives est spécifique à son processus caractéristique

.

				Condition Monitoring								
Failure Mechanism	Equipment	Contributing Factors	Proactive Measures	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 communs de défaillance avec équipement, facteurs contributifs, mesures proactives et surveillance de l'état

Techniques de monitoring des mécanismes de défaillance

- **Spectroscopie élémentaire**

  La spectroscopie élémentaire par fluorescence X (XRF) des échantillons de plaques filtrantes est préférée pour les mécanismes de défaillance des grosses particules, y compris l'abrasion, la fatigue et une adhérence sévère. La spectroscopie d'émission optique et la spectroscopie XRF sont toutes deux adaptées aux mécanismes de corrosion et d'adhérence légère.

- **Comptage de particules et classification de la forme des particules**

  Les comptages de particules dans les plages de tailles >4, >6 et >14 μm permettent une surveillance de l'état 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 et d'étincelles par ondes radio**

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

  - **Contrôles et essais spéciaux**

    Les décharges électriques dans les compartiments remplis d'huile peuvent bénéficier d'une analyse des gaz dissous (DGA) à la recherche de traces d'arcs électriques de virage en virage. Le dépôt et l'accumulation de matières sur les régulateurs de débit, les filtres, les tamis, les vannes, les ventilateurs et les compartiments d'huile est un mécanisme de défaillance résultant de diverses conditions opérationnelles. Le protocole d'inspection et d'essai en dépend. Par exemple, la colorimétrie des pièces rapportées sur membrane (CPM) est une technique d'essai privilégiée pour déceler la présence de précurseurs de vernis.

  - **Analyse des ondes de contrainte**

    Les mécanismes d'usure par abrasion, frottement (associé à la corrosion), fatigue, adhérence (limite), cavitation, érosion et 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 suréchantillonnées

et décimées sélectivement pour obtenir des formes d'onde simultanées soniques et ultrasonores en attente de crête. Une forme d'onde d'analyse d'onde de contrainte de maintien de crête peut être soit une crête redressée maximale, soit une crête à crête maximale. Les données affichées dans les FIG. 1-8 sont de type crête à crête, et les capteurs utilisés pour ces mesures étaient des capteurs microphoniques ou à ondes radio comme indiqué.

- **Imagerie thermique**

  La résistance électrique, les arcs électriques et les frottements mécaniques produisent des points chauds détectables par imagerie thermique.

- **Total ferreux**

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

- **Analyse des vibrations**

  Les vibrations mécaniques en dessous d'une fréquence maximale d'intérêt (F_{MAX}) sont surveillées pour caractériser les causes profondes proactives des mécanismes de défaillance tels que le déséquilibre, le désalignement, le relâchement, la résonance et le pied mou. Ils sont également surveillés en combinaison avec des techniques d'analyse des ondes de contrainte pour caractériser les stades de défaillance prédictifs, du début jusqu'à la catastrophe.

- **Viscosité**
- **Une mauvaise application du lubrifiant, par exemple une mauvaise huile, est souvent identifiée en vérifiant la viscosité correcte des lubrifiants en service. Ceci est directement lié à la surveillance de la lubrification inadéquate associée à l'adhérence. Eau, liquide de refroidissement et indice de neutralisation**

  La spectroscopie infrarouge de transmission du lubrifiant en service est une méthode pratique sur place pour surveiller l'eau et le liquide de refroidissement ainsi que l'indice d'acidité totale ou l'indice de base totale. 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 à des mécanismes d'usure corrosifs.

Tension, compression et cisaillement

"Rien, enfin presque rien, n'échoue en compression", répond John Googin, chef scientifique du laboratoire DOE Y-12, lorsque j'ai posé une question sur les mécanismes de défaillance.
John a suggéré qu'à des moments où je pense que la compression est une cause principale de défaillance, une étude plus approfondie des preuves exposerait certainement le mécanisme de traction ou de cisaillement à l'origine d'une séquence de défaillance progressive. Trois décennies plus tard, je n'ai pas trouvé d'exception, et la force de cisaillement est presque toujours le principal facteur qui contribue aux mécanismes de défaillance, du début à la fin.

Les surfaces porteuses lubrifiées permettent aux machines de travailler par compression à travers un film lubrifiant. Le travail est l'application d'une force à travers une distance ou d'une pression à travers un volume. Les systèmes mécaniques sont conçus pour effectuer le travail et pour avoir une très longue durée de vie en effectuant ce travail par traction et compression appliquées. La longue durée de vie prévue par le concepteur est raccourcie par le cisaillement. Les mécanismes de défaillance de l'abrasion, de la corrosion, de la fatigue, de l'adhérence (ou régime de lubrification limite), de la cavitation, de l'érosion et de la décharge électrique ont chacun un élément de défaillance commun du 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 ultrasonores à partir d'au moins 80 kHz d'échantillonnage de données numériques. Ces techniques s'appliquent aux mesures de divers capteurs, y compris l'accéléromètre piézoélectrique, le microphone à condensateur électret et l'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 permettent d'effectuer simultanément l'analyse sonique des signaux passe-haut à 500 Hz et l'analyse ultrasonique passe-haut à 20 kHz 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 sous la ligne orange est l'énergie ultrasonore totale de crête au-dessus de 20 kHz. La zone entre la ligne bleue et

la ligne orange est l'énergie sonique 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 friction et de turbulence. L'énergie sonore entre les lignes bleue et orange est liée au transfert forcé d'énergie de compression qui reflète le travail effectué par la force à travers la distance ou la pression à travers le volume.

La figure 1 illustre les phénomènes typiques d'adhérence et d'impact en fatigue. Ces 12 exemples montrent des schémas d'impact de compression de forte amplitude et de forte amplitude qui sont caractéristiques de ces collisions métal sur métal. Notez dans tous les cas que le signal ultrasonore (orange) reste faible par rapport au signal sonore (bleu).

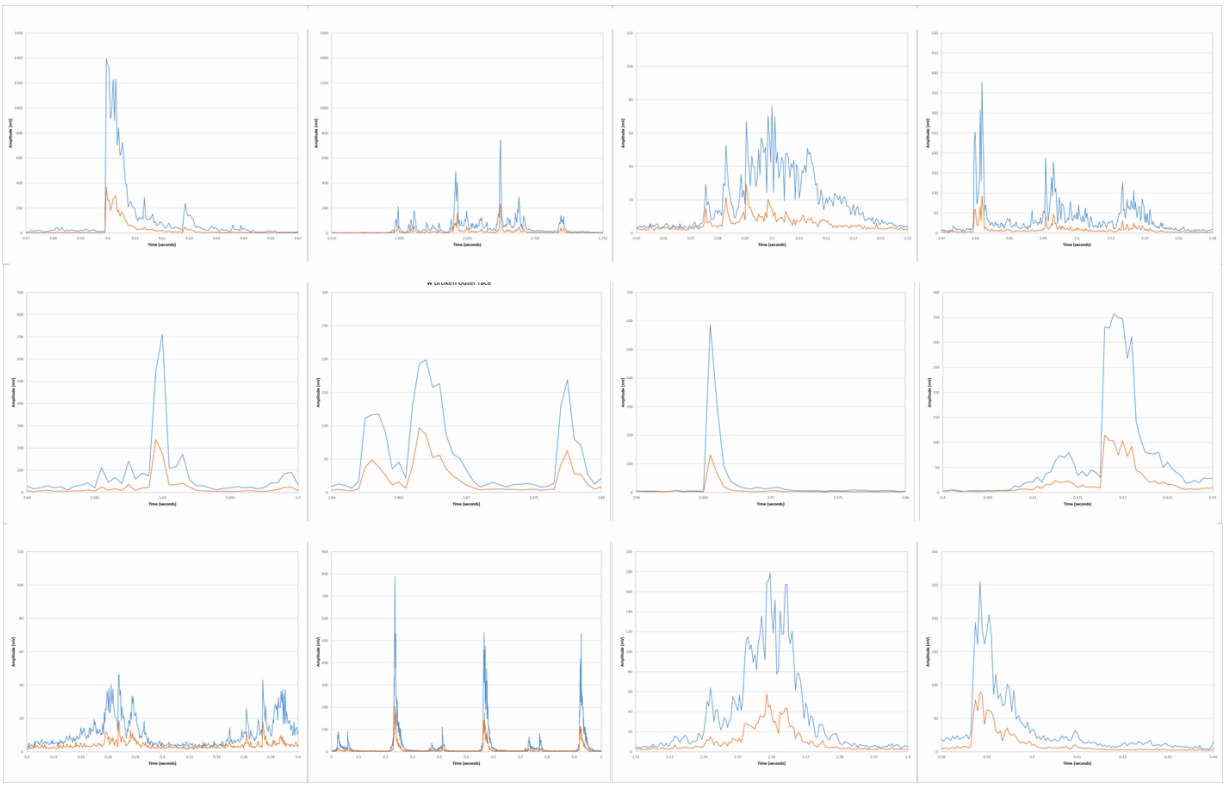


FIG. 1 : Un capteur microphonique a capté les ondes de contrainte lors d'impacts typiques impliquant une variété d'adhérences et de défauts de fatigue.

La figure 2 montre comment un mécanisme de compression à mouvement alternatif effectue un travail par compression avec un cisaillement négligeable. Dans ce cas, le lubrifiant fournit un film de fluide hydrodynamique complet minimisant le cisaillement par un contact de glissement alternatif continu.

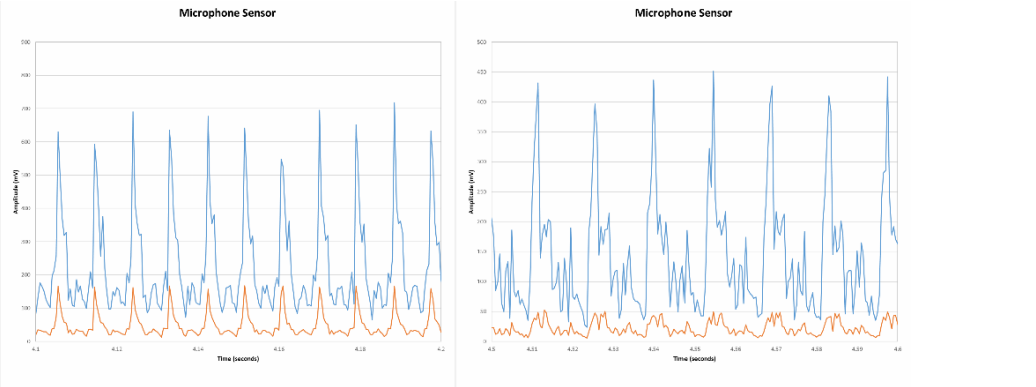


FIG. 2. : Ondes de contrainte aéroportées provenant d'une compression à mouvement alternatif avec séparation hydrodynamique du film de fluide.

La figure 3 montre comment le frottement stick-slip lors d'un frottement adhésif léger est en grande partie ultrasonique sans beaucoup d'énergie sonore. La passe-haut ultrasonique au- dessus des lignes orange 20 kHz est "en avant" de la passe-haut sonique au-dessus des lignes bleues 500 Hz. Toutefois, par définition, l'écrêtage passe-haut au-dessus de 500 Hz est toujours égal ou supérieur à l'écrêtage passe-haut au-dessus de 20 kHz. Le graphique de droite présente une configuration caractéristique d'ondes sonores. Dans l'ensemble, la figure 3 représente le cisaillement dû au frottement pendant l'usure par frottement de l'adhésif.

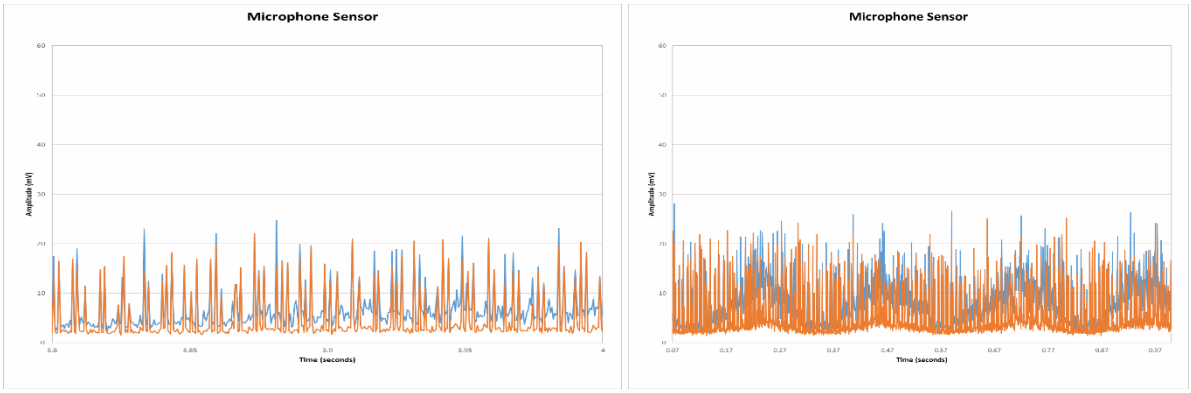


FIG. 3. Ondes de stress aéroportées dues à une légère usure par frottement de l'adhésif.

La figure 4 est similaire à la figure 3 avec l'usure par abrasion par enlèvement de copeaux qui montre le travail physique par la séparation entre les lignes orange et bleue des ultrasons.

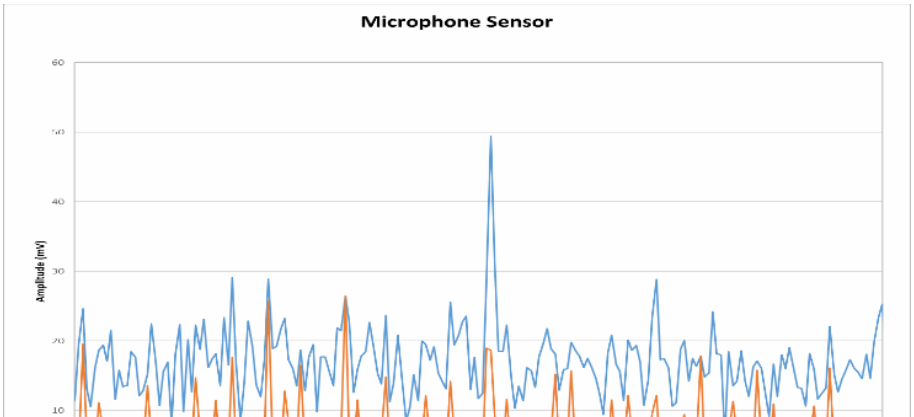


FIG. 4. Ondes de contraintes aéroportées dues à l'usure par abrasion.

La figure 5 montre le processus d'érosion avec des impacts de fluides et de particules entraînant des phénomènes de compression et de cisaillement dans ces diagrammes du domaine temporel. Ces parcelles typiques ont été enregistrées à une chute d'eau. Par coïncidence, l'action de l'eau apparaît dans la couleur bleue, les impacts des particules sont de couleur sable.

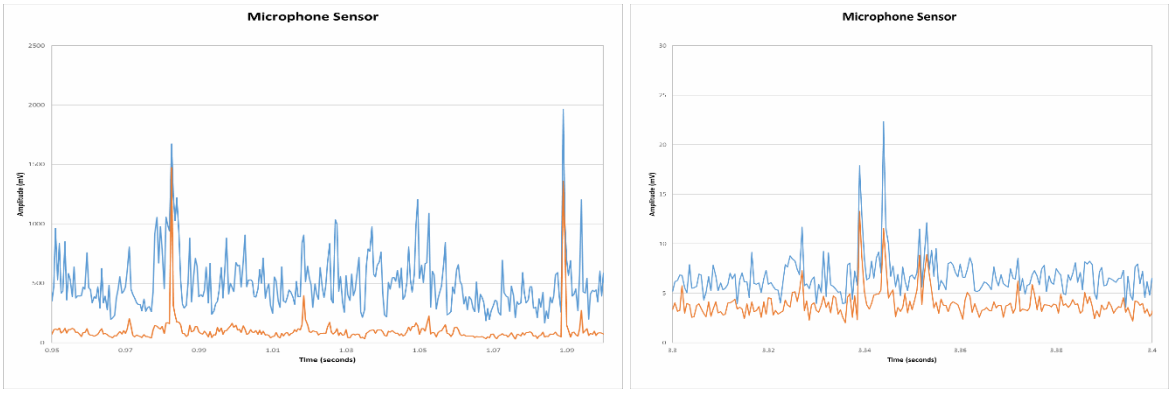


FIG. 5. : Ondes de stress aéroportées dues à l'érosion.

La figure 6 montre l'énergie des ondes radioélectriques pendant les décharges partielles. Notez que les décharges électriques ont tendance à être des événements ultrasoniques très, très rapides. Cependant, en cas de décharge partielle, les signaux d'ondes radioélectriques semblent lents et atténués comme on peut le voir sur cette figure. Notez que l'énergie sonore est plusieurs fois plus forte que l'énergie ultrasonore des ondes radio. C'est peut-être la preuve que les électrons qui s'éloignent des conducteurs ne s'échappent pas complètement de la matière isolante environnante.

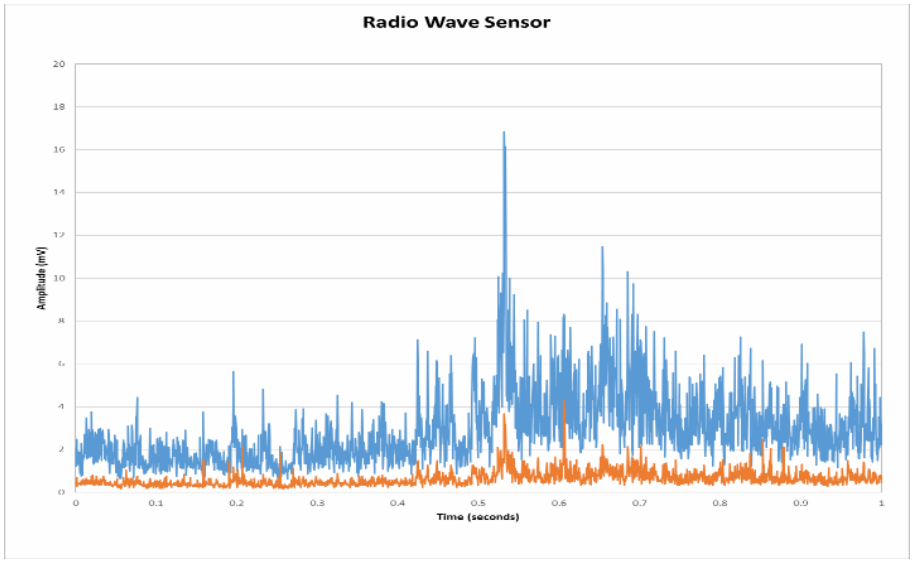


FIG. 6. Ondes de contraintes radioélectriques dues aux décharges partielles électriques.

La figure 7 montre des diagrammes provenant de capteurs microphoniques et de capteurs d'ondes radioélectriques produisant des ondes de contrainte soniques et ultrasonores qui suivent les événements se produisant lors d'une décharge électrique continue d'arc à plasma avec un arc de 10 kV sur un intervalle de ~10 mm. Typiquement, l'arc électrique produit des événements ultrasoniques rapides. Par conséquent, la ligne orange tend à superposer et à masquer la ligne bleue dans les graphiques. Les arcs électriques sont plus fréquents que les étincelles pour les équipements électriques de 2 kV et plus...

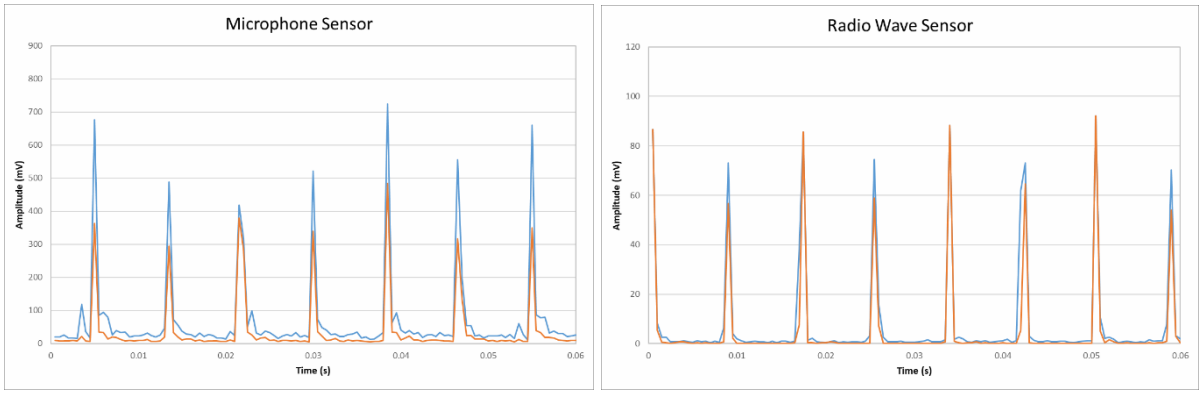


FIG. 7. Ondes de contrainte ultrasonores et soniques utilisant un microphone et un capteur d'ondes radio pour surveiller un plasma continu et une décharge électrique d'arc électrique à 10 kV

La figure 8 montre des diagrammes provenant de capteurs microphoniques et de capteurs d'ondes radioélectriques produisant des ondes de contrainte soniques et ultrasonores qui suivent les événements se produisant lors d'étincelles à partir d'une source de 120 V. Les étincelles sont plus fréquentes

que les amorçages d'arcs électriques de 480 V et moins.

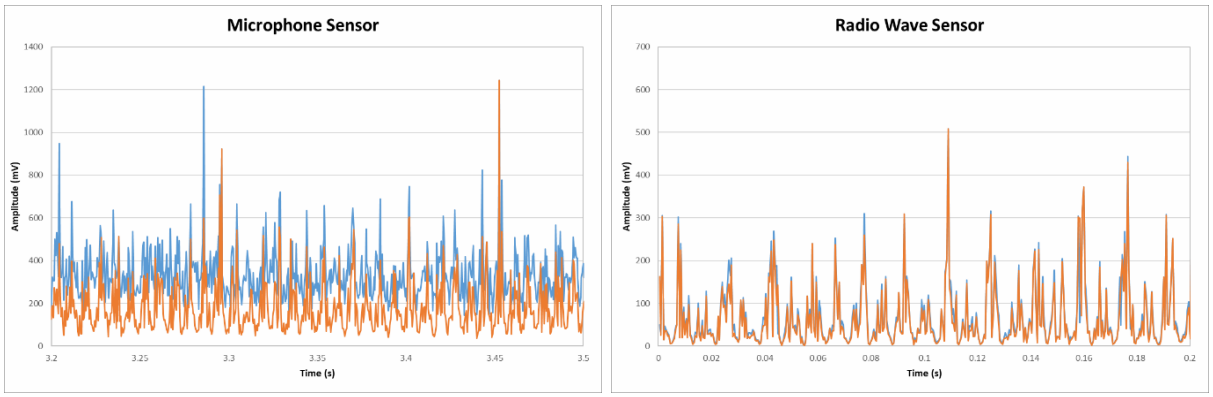


FIG. 8. Les capteurs de microphones et d'ondes radio détectent les ondes de stress dues aux étincelles de décharges électriques provenant d'une source de 120 V.

Conclusion

Le présent article tente de décrire comment l'équipement tombe en panne et ce qui peut être fait pour améliorer la fiabilité globale. L'article identifie les mécanismes communs de défaillance : abrasion, corrosion, fatigue, adhérence, érosion, cavitation, décharge électrique et dépôt.

Chaque mécanisme comporte des facteurs contributifs, des mesures proactives et touche divers types d'équipement. Plusieurs techniques de surveillance non intrusive privilégiées sont identifiées pour permettre des efforts proactifs et préventifs en vue d'améliorer la fiabilité.

L'analyse simultanée des ondes sonores et ultrasonores à l'aide de microphones et de capteurs d'ondes radio qui font progresser l'état de la technique est présentée dans la vaste liste des techniques de surveillance d'état les plus utiles.

TAL INSTRUMENTS
A bien compris qu'il est important de contrôler à toutes les étapes l'huile même neuve, pour confirmer que c'est bien les bons paramètres de viscosité d'additifs, le stockage avec une teneur en eau.
Et l'huile usée permet de comprendre ce qui se passe et quels sont les organes défaillants pour faire de la maintenance préventive et prédictive
Nous commercialisons une série d'appareils portables pour le contrôle sans avoir besoin du laboratoire avec des temps hélas trop long et qui bloque la bonne marche de l'activité. Nous consulter
Notre site www.talinstruments.fr

Ray Garvey - R&D Engineer qui a beaucoup contribué pour faire avancer et mettre les techniques aux points