

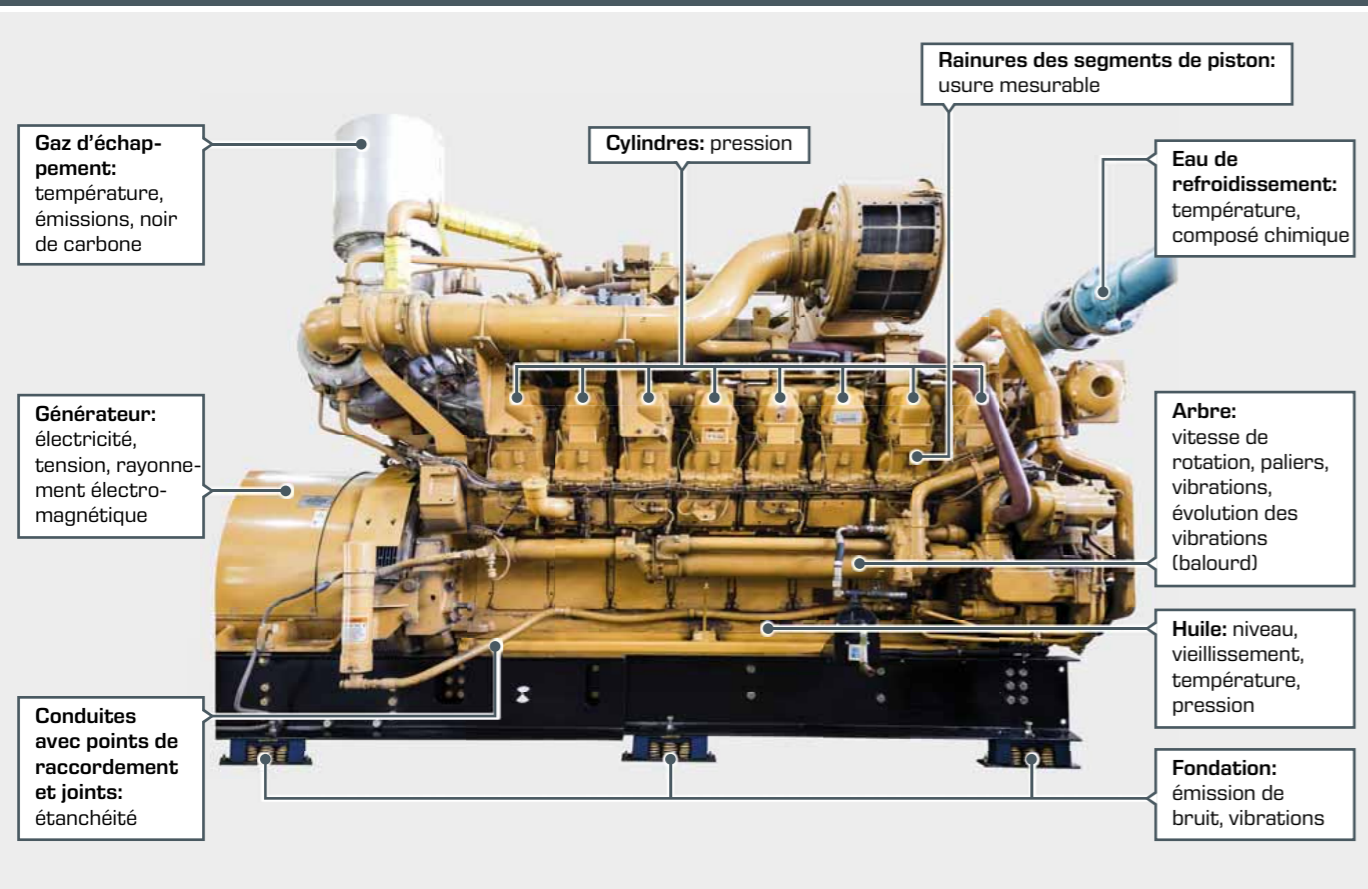
## Diagnostic de machines

L'objectif du diagnostic de machine, également appelé surveillance de l'état des machines ou en anglais CMS (Condition Monitoring System), consiste à réaliser une maintenance ou une remise en état adaptée aux besoins, afin de minimiser les temps de réparation et d'arrêt d'une machine. Les dommages doivent

être détectés dès leur apparition. Cela permet d'augmenter le taux de rendement global (OEE Overall Equipment Effectiveness), qui est indicateur de création de valeur d'une installation, et d'optimiser la structure des coûts.

### Qu'est-ce qui caractérise l'état d'une machine?

Exemple de grandeurs d'état mesurables sur un générateur diesel:



### Le diagnostic de machine sert à

- analyser les points faibles, pour optimiser un processus ou identifier en amont les évolutions défavorables prévisibles
- effectuer une maintenance en phase avec l'état de la machine; il s'agit par exemple de remplacer les pneus d'une voiture lorsque leurs profils ont une épaisseur inférieure à la valeur minimum prescrite
- éviter ou minimiser les pannes par le biais d'opérations de maintenance prédéfinies; exemple: vidange d'huile à intervalles fixes ou après un kilométrage déterminé des véhicules

### Le diagnostic de machine est réalisé sur

**une machine à l'arrêt** en effectuant:

- un démontage et un contrôle visuel
- une mesure de l'usure
- des essais de fissuration (radio, ultrasons, courants magnétiques, mesure de la fréquence propre)

### Le diagnostic de machine permet

- d'augmenter et optimiser l'exploitation de la durée de service des installations et des machines
- d'améliorer la sécurité de fonctionnement
- d'augmenter la disponibilité des installations
- d'optimiser les processus opérationnels
- de réduire les dysfonctionnements
- de diminuer les coûts

**une machine en service** en effectuant:

- une mesure des grandeurs d'état, p.ex. une mesure des vibrations
- une mesure acoustique
- un décalage de l'arbre
- une analyse des produits lubrifiants

### La signification des vibrations dans le diagnostic de machine

On obtient une bonne évaluation de l'état mécanique d'une machine, ou des pièces de la machine, en étudiant le type et l'ampleur des vibrations qu'elle produit. À cet effet, les vibrations sont enregistrées et évaluées au moyen de capteurs et d'instru-

ments de mesure. Pour bien interpréter des signaux de mesure, il est essentiel de bien comprendre les mécanismes d'action et d'avoir une certaine expérience en la matière.

### Origines des vibrations

#### 1. Forces périphériques ou périodiques dues à

- une compression ou un poinçonnage
- des blocages ou des erreurs d'alignement

#### 2. Forces d'inertie produites par des masses rotatives ou oscillantes

- mouvements de va-et-vient de pistons
- balourds rotatifs

#### 3. Chocs

- jeu au niveau des zones de contact et surfaces adjacentes variables en cas de transmission de force mécanique
- perte de contact en cas de transmission de force par adhérence
- roulement sur des endroits défectueux de la surface

#### 4. Forces dues aux gaz

- déformation de la construction due à des forces dynamiques elles-mêmes dues aux gaz et à l'excitation de vibrations longitudinales et de flexions alternées
- rotation irrégulière et excitation de vibrations de torsion

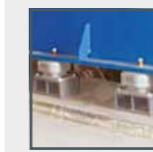
#### 5. Forces d'écoulement

- turbulences avec variations de pression sous la forme d'ondes de choc (bourdonnement, bruissement, sifflement) qui excitent des surfaces: le contraire étant le rayonnement sonore
- forces d'écoulement périodiques avec aubes mobiles

#### 6. Forces électromagnétiques

- champs magnétiques dynamiques ou modifications cycliques de la géométrie (faces polaires)
- similarité avec l'excitation par les variations de pression (vrombissement du transformateur, vibrations du stator sur un moteur)

### Exemples issus de la pratique pour le dépannage



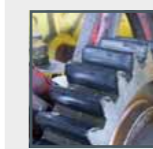
Palier élastique avec amortissement des vibrations de la machine, afin de prévenir / minimiser la transmission des vibrations.



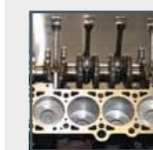
Les pneus sont équilibrés pour corriger les balourds.



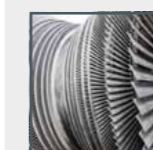
Les paliers précontraints permettent d'avoir un guidage des arbres encore plus exact, augmentent la rigidité et minimisent le jeu de palier.



Une bonne lubrification est essentielle pour minimiser l'endommagement des roues dentées, p.ex. dans les engrenages, et pour éviter l'apparition d'endroits défectueux à la surface.



Dans le carter de vilebrequin, on voit apparaître des forces qui sont dues à la transmission des forces elles-mêmes dues aux gaz de la tête de cylindre aux paliers des vilebrequins. Les carters de vilebrequin raidis et les vis flexibles évitent les vibrations et la fatigue du matériau.



Lorsque l'on conçoit des rotors destinés p.ex. à des ventilateurs ou à des compresseurs, il faut tenir compte des vibrations qui peuvent éventuellement apparaître, pour définir le nombre et la forme des aubes mobiles.



Moteur asynchrone: en cas de lame d'air asymétrique, les forces magnétiques circulaires excitent des vibrations de rotation et des flexions alternées. En variant la lame d'air entre le stator et le rotor, il est possible de modifier les vibrations mécaniques produites.

## Diagnostic de machines

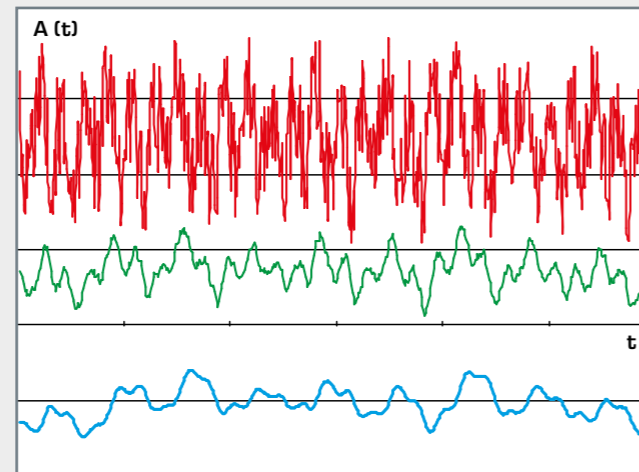
### Méthode du diagnostic de machine

Pour le diagnostic de machine, il faut s'intéresser aux **forces et énergies internes** de la machine. Il est impossible de mesurer ces grandeurs directement, mais l'on peut mesurer leurs effets, c'est-à-dire les **vibrations**. Pour se faire une idée de ces forces, on utilise donc la mesure et l'analyse de ces forces. On peut déduire des mesures des vibrations la manière dont les forces sont structurées, ce qui les a provoquées, ainsi que leur évolution dans le temps. Les signaux de mesure sont le plus souvent des spectres de fréquence qui sont formés par la superposition

de différentes vibrations de fréquences différentes. Certaines de ces vibrations font partie intégrante du fonctionnement normal de la machine, d'autres sont renforcées ou même provoquées par des défauts. L'interprétation des signaux de mesure permet d'évaluer l'état de la machine et d'identifier un défaut éventuel.

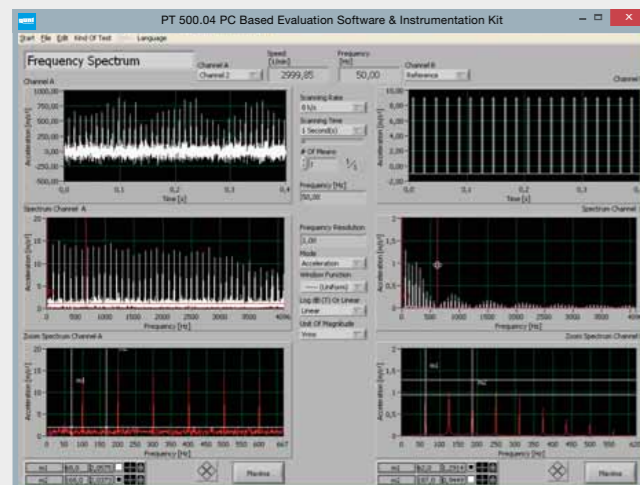
Concernant le diagnostic de machine, on distingue la **surveillance des valeurs caractéristiques** et l'**analyse des fréquences**.

Lors de la **surveillance des valeurs caractéristiques**, on compare l'amplitude du signal de vibration mesuré avec une valeur limite. La surveillance des valeurs caractéristiques peut s'effectuer de manière continue et automatique. Elle est facile à mettre en place, et l'utilisateur demande peu de connaissances spécialisées. Une valeur caractéristique couramment utilisée est la valeur efficace de la vitesse de vibration sur la plage de fréquence comprise entre 10 et 1000 Hertz. Elle est utilisée dans la DIN ISO 10816-3, qui est applicable à la technique d'entraînement. Pour les groupes standards simples, la surveillance des valeurs caractéristiques suffit pour le diagnostic. Mais pour les installations plus complexes, la fiabilité de cette méthode n'est quelquefois pas suffisante.



Signaux typiques de vibration sur une plage de temps

— Accélération  
— Vitesse  
— Trajectoire



L'utilisation de l'**analyse sur la plage de fréquence** est nettement plus complexe, mais aussi plus performante. Cette analyse permet d'identifier le type de dommage, ce qui permet de mettre en place des mesures de réparation ciblées. La réalisation d'une analyse des fréquences requiert une bonne compréhension des mécanismes efficaces ainsi que de l'expérience pour être en mesure d'interpréter les résultats. La méthode d'analyse des fréquences est le plus souvent utilisée en complément de la surveillance des valeurs caractéristiques.

### Contenus didactiques

<b>Vibrations mécaniques</b>	Origines, mécanismes de formation, balourd, rotor de Laval, résonance, amortissement, choc
<b>Technique de mesure des vibrations</b>	Capteur de mesure, amplificateur de mesure, représentation, oscilloscope, mesure de la vitesse de rotation
<b>Analyse des vibrations</b>	Accélération, vitesse des vibrations, trajet des vibrations, valeurs caractéristiques, représentation sur la plage de temps et de fréquence, spectre, FFT (Fast Fourier Transformation), ordres, analyse de suivi, analyse d'enveloppe, orbite, trajectoire
<b>Diagnostic de machine</b>	Vibrations des paliers et des arbres, intensité de vibration admissible, dommage des paliers à roulement, vibrations électromécaniques, vibrations dues au balourd et à l'équilibrage, dommages des engrenages, vibrations sur les entraînements par courroie, cavitation dans les pompes, vibrations des pales, vibrations et chocs dans les mécanismes bielle-manivelle, vibrations dépendantes de la vitesse de rotation

L'enseignement porte par ailleurs sur les aptitudes et expériences pratiques dans la manipulation et le montage des éléments de machine tels que paliers, arbres et accouplements. La construction des machines mécaniques est également étudiée.

Les problématiques posées permettent d'acquérir une expérience précieuse pour la pratique ultérieure dans l'industrie:

- quel capteur de mesure utiliser?
- où attendre un signal de mesure exploitable?
- comment masquer efficacement des signaux perturbateurs?

### Endommagement des éléments d'entraînement, exemple des paliers



Parmi les signes d'endommagement des éléments d'entraînement, on peut avoir:

- des dépôts sur les surfaces de roulement, p.ex. corrosion de contact de l'orifice d'une bague intérieure
- corrosion due à l'humidité et à l'arrêt du palier
- altération de la surface prenant la forme de piqûres
- dommage sur les paliers en raison de glissements
- fissures ou éclats

Si les premiers signes d'endommagement de la machine sont ignorés, le dommage devient plus important et peut entraîner une rupture.



# Diagnostic de machines

## Résultats d'essai typiques en diagnostic de machine

### 1. Identification de dommages sur les paliers

#### Analyse d'enveloppe

L'analyse d'enveloppe est utilisée par exemple pour identifier des dommages sur les paliers à roulement et les engrenages. Les dommages provoquent des chocs ayant des parts de vibrations à très haute fréquence. La basse fréquence de choc à considé-

rer pour le diagnostic de dommages n'est pratiquement pas, ou même pas du tout, identifiable dans le spectre normal. L'analyse d'enveloppe démodule le signal de choc haute fréquence, et permet ainsi de mesurer la fréquence de choc.

#### Déroulement de l'analyse d'enveloppe

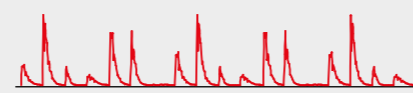
Mesure du signal de choc haute fréquence et du filtrage passe-haut pour atténuer les signaux perturbateurs à basse fréquence (balourd, erreur d'alignement)



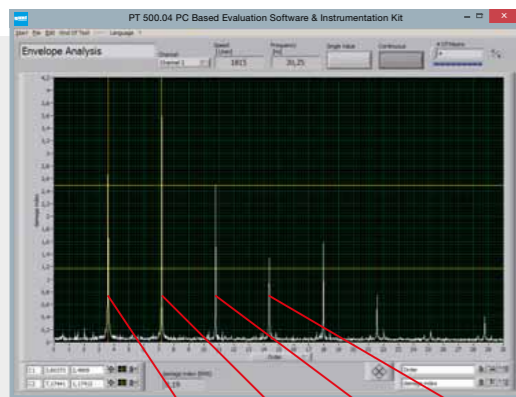
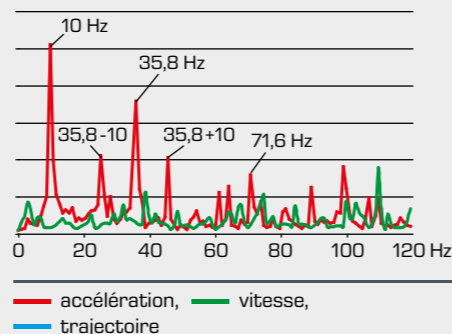
Redressement du signal haute fréquence



Génération de l'enveloppe du signal redressé par filtrage passe-bas



Réalisation d'une FFT pour l'obtention du spectre de l'enveloppe. La vitesse de rotation (10 Hz) et la fréquence de choc (35,8 Hz) sont clairement visibles. Les bandes latérales à distance de la vitesse de rotation (35,8 -10, 35,8 +10) montrent une modulation d'amplitude. Il s'agit d'un endommagement de la bague externe avec charge circulaire.



Ordres: 3,58 7,16 10,74 14,32

L'illustration montre le spectre de l'enveloppe d'un dommage typique sur les paliers. Pour obtenir une représentation indépendante de la fréquence de rotation, on a choisi l'ordre en abscisse. Un signal de fréquence de rotation est d'ordre 1. On lit des lignes de fréquence en prenant les multiples de l'ordre 3,58. Cela indique un dommage sur la bague externe du palier. Les lignes des bandes latérales manquantes à la distance d'un ordre suggèrent une direction constante de la force, ici la tension de courroie, et n'indiquent pas de charge de balourd.

### 2. Équilibrage sur site

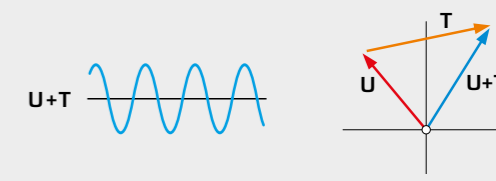
Lorsque l'on effectue un équilibrage, on essaye de réaligner le centre de gravité du rotor sur son axe de rotation. À cet effet, on ajoute ou on retire des masses du rotor. Pour pouvoir déterminer la position et la taille des masses d'équilibrage requises,

on doit d'abord connaître le balourd. Étant donné qu'on ne peut pas mesurer directement un balourd, il faut le déduire de manière indirecte des vibrations de paliers qui, elles, sont mesurables.

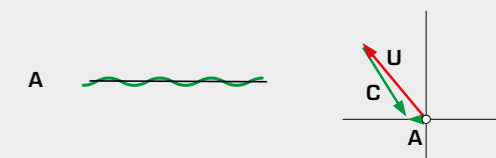
Mesure des vibrations de paliers de la machine non équilibrée (balourd initial **U**).



Mesure des vibrations de paliers après que la machine a été pourvue d'un balourd supplémentaire connu (balourd test **T**). On calcule le balourd initial en comparant les deux mesures.



Calcul de la taille et de la position des masses d'équilibrage à ajouter ou à retirer (**C**). Mesure de contrôle (**A**) après réalisation de la correction des masses. Selon le succès de l'équilibrage, on recommence la procédure jusqu'à ce que les valeurs limites souhaitées pour la vibration de palier soient respectées.

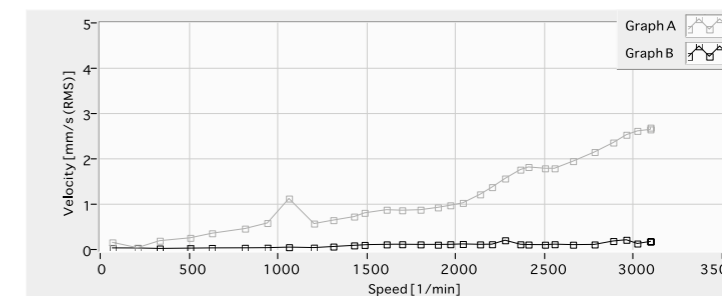


### 3. Identification de fissures dans les arbres

Les arbres présentant des fissures génèrent un signal de vibration caractéristique qui peut être utilisé pour identifier la fissure. Une méthode d'analyse possible est l'analyse de suivi, qui

consiste à enregistrer le signal de vibration sur une plage de vitesse de rotation plus étendue, et à l'étudier dans un filtre spécial selon les différents ordres de fréquence de rotation.

Le graphique A montre la part de la vibration de palier de 1<sup>er</sup> ordre (1Ω), tandis que le graphique B montre la part de 2<sup>e</sup> ordre (2Ω).



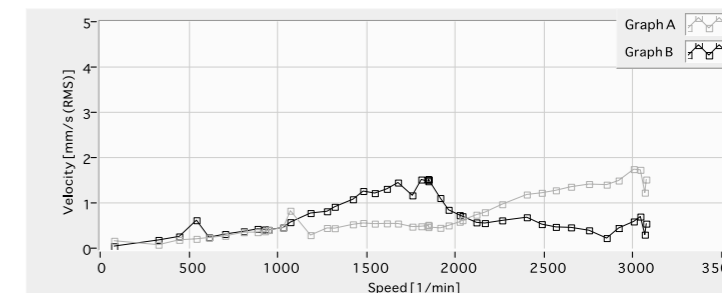
Analyse de suivi d'un arbre sans fissure

#### État sans fissure:

Les vibrations de paliers de 1<sup>er</sup> ordre augmentent tout à fait normalement avec la vitesse de rotation en raison du balourd. Les vibrations de paliers de 2<sup>e</sup> ordre sont très faibles.

#### État avec fissure profonde:

tandis que les vibrations de paliers de 1<sup>er</sup> ordre présentent un comportement similaire à celui d'un arbre sans fissure, pour le 2<sup>e</sup> ordre sur la plage de vitesse intermédiaire, on observe une augmentation très forte, ce qui indique clairement la présence d'une fissure.



Analyse de suivi d'un arbre avec fissure