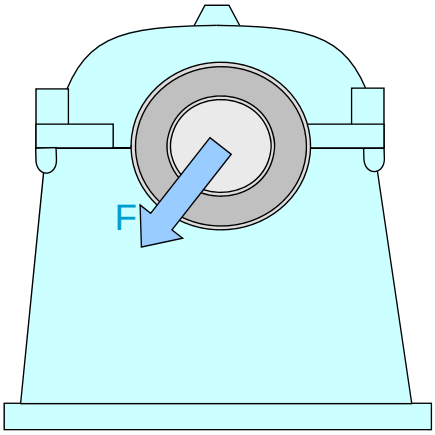
ANALYSE VIBRATOIRE DES MACHINES TOURNANTES
4. La Surveillance des Machines

A brand of acoem

OneProd

4 – Surveillance des Machines

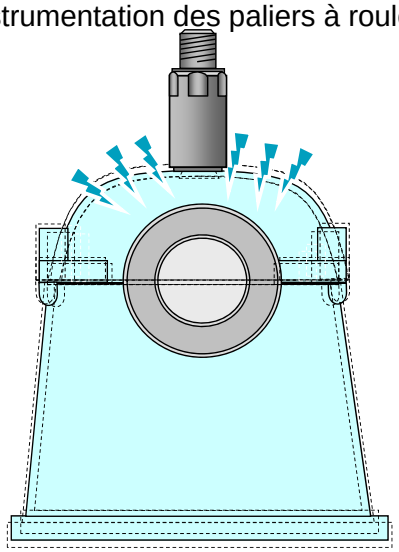
- **La mesure des vibrations**
- Introduction
  - Les vibrations d'une machine tournante sont l'image des forces internes à celle-ci.
  - Ces forces, représentatives du comportement mécanique de la machine, se transmettent du rotor à la structure au travers des paliers.
  - Les vibrations seront donc mesurées au niveau des paliers.



OneProd

4 – Surveillance des Machines

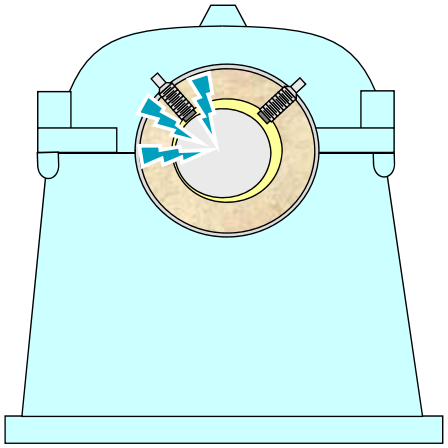
- **La mesure des vibrations**
- Les mesures de vibrations absolues
  - Le type de capteur utilisé pour la mesure des vibrations dépend directement du type de palier rencontré :
    - Les accéléromètres permettent la mesure des vibrations absolues.
    - Ils sont utilisés pour l'instrumentation des paliers à roulement.



OneProd

4 – Surveillance des Machines

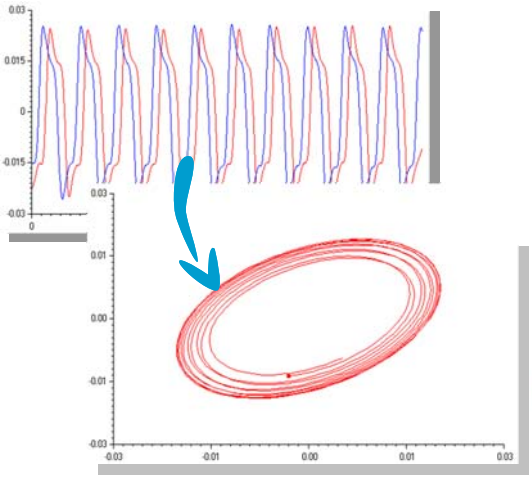
- **La mesure des vibrations**
- Les mesures de déplacement relatives
  - Les sondes de déplacement permettent la mesure des déplacements relatifs de l'arbre dans le palier.
  - Elles sont utilisées pour l'instrumentation des paliers fluides.



OneProd

4 – Surveillance des Machines

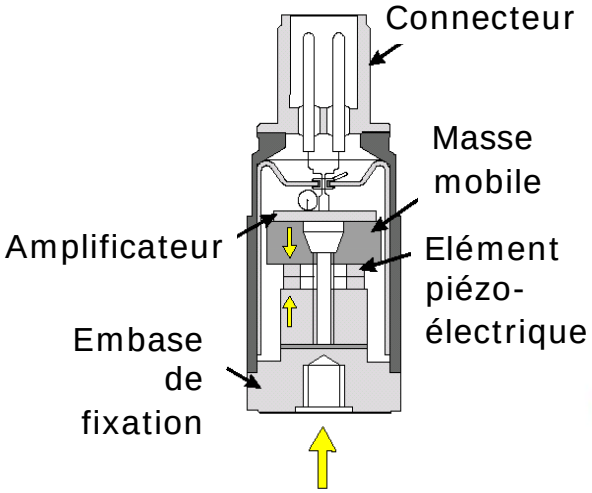
- **La mesure des vibrations**
- Les mesures de déplacement relatives
  - Les sondes de déplacement permettent la mesure des déplacements des arbres dans les paliers lisses.
  - Elles permettent notamment la visualisation de l'orbite de l'arbre lorsqu'elles sont utilisées par paire dans une direction radiale.



OneProd

4 – Surveillance des Machines

- **Les capteurs de vibration**
- L'accéléromètre : Constitution
  - Un élément piézo-électrique est comprimé par une masse mobile sollicitée par les vibrations auxquelles est soumis le capteur.
  - L'élément piézo-électrique délivre une charge électrique, convertie en tension, proportionnelle aux contraintes qu'il subit, et donc à l'accélération locale au point de mesure.



OneProd

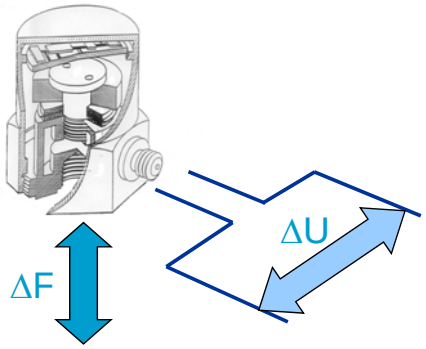
4 – Surveillance des Machines

- **Les capteurs de vibration**
- L'accéléromètre : Principe de fonctionnement

$\Delta U = f(\Delta F)$

$\Delta F = M.\Delta\gamma$ → $\Delta U = f1(\Delta\gamma)$

$M = C^{te}$



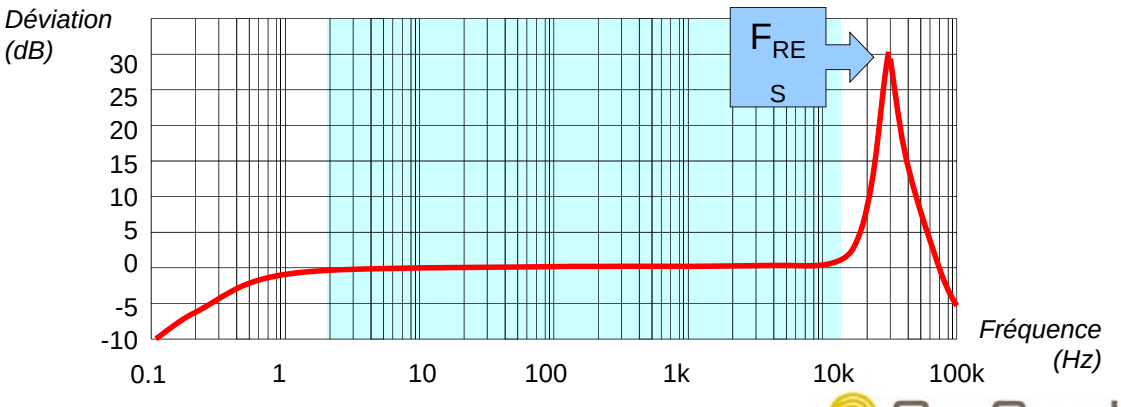
- Remarque : De par sa constitution, l'accéléromètre mesure une accélération selon un axe défini, en général perpendiculaire à la surface de fixation.

OneProd

4 – Surveillance des Machines

- **Les capteurs de vibration**
- L'accéléromètre : La Bande Passante

- La bande passante correspond au domaine de fréquences pour lequel la sensibilité du capteur demeure pratiquement constante. Elle est souvent définie à 10% ou à 3dB.

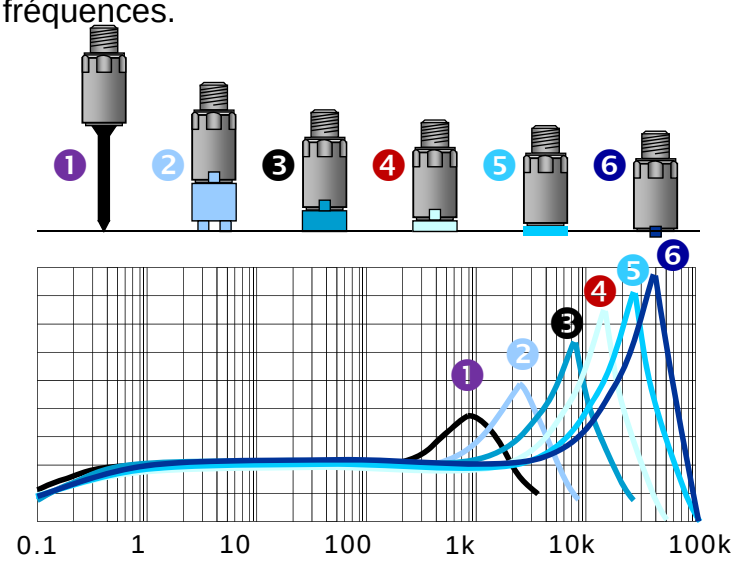


Exemple : Bande passante 2Hz - 12kHz

OneProd

4 – Surveillance des Machines

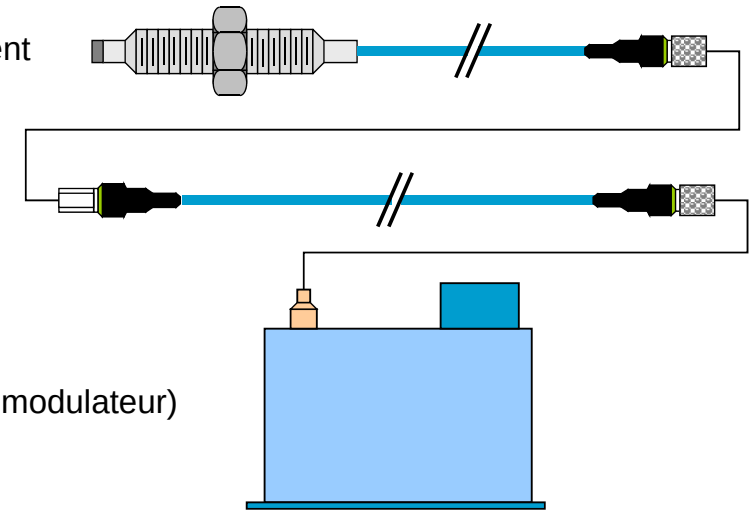
- **Les capteurs de vibration**
- L'accéléromètre : L'influence du montage sur la B.P
  - Le mode de fixation de l'accéléromètre sur la structure à une influence considérable sur la réponse du capteur :
  - Plus la fixation est rigide, plus la réponse s'élargit vers les hautes fréquences.



OneProd

4 – Surveillance des Machines

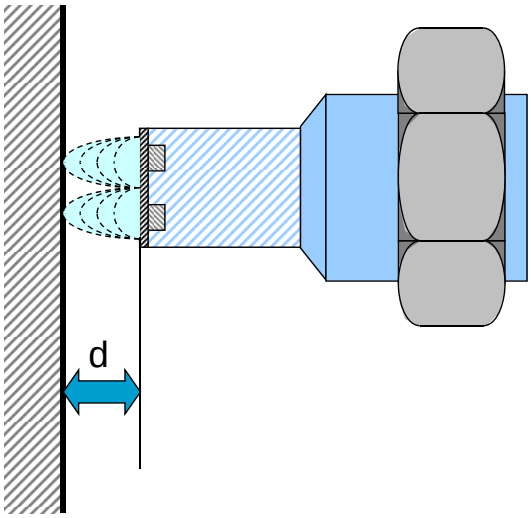
- **Les capteurs de vibration**
- La sonde de déplacement : Constitution
  - Sonde de déplacement
  - Câble d'extension
  - Driver (Oscillateur/démodulateur)



OneProd

4 – Surveillance des Machines

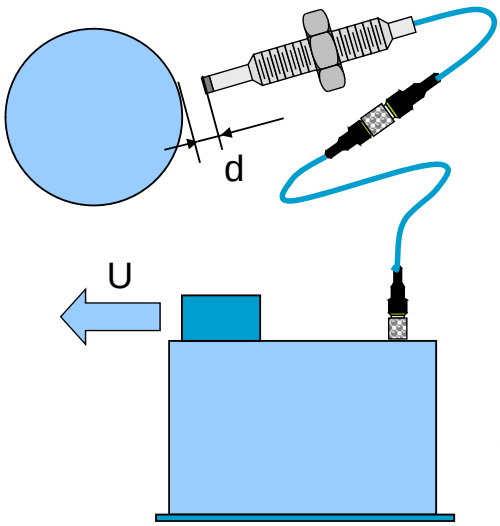
- **Les capteurs de vibration**
- La sonde de déplacement : Principe de fonctionnement
  - Une bobine située dans la tête de sonde produit un champ électromagnétique.
  - Une surface métallique placée dans ce champ est le siège de courants induits (courants de FOUCAULT) qui modifient son intensité.



OneProd

4 – Surveillance des Machines

- **Les capteurs de vibration**
- La sonde de déplacement : Principe de fonctionnement
  - La variation du champ électromagnétique correspondante est mesurée et linéarisée par le driver qui fournit une tension proportionnelle à la distance sonde-cible.
  - Il s'agit donc d'un capteur sans contact.

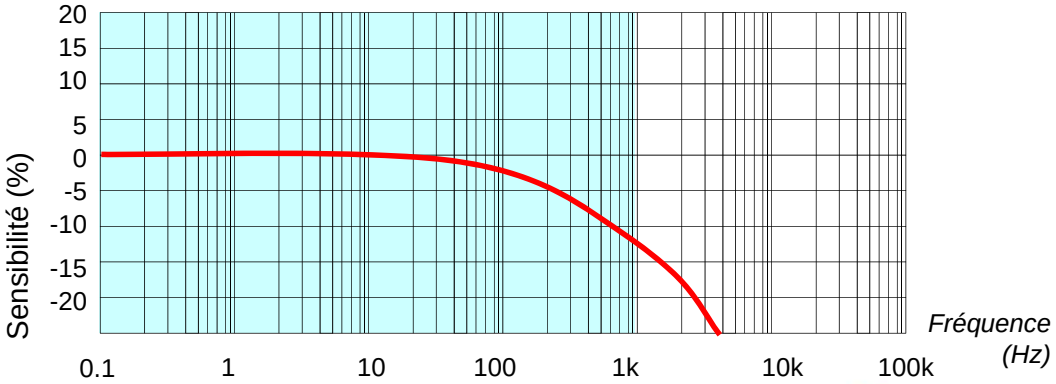


U=F(d)

OneProd

4 – Surveillance des Machines

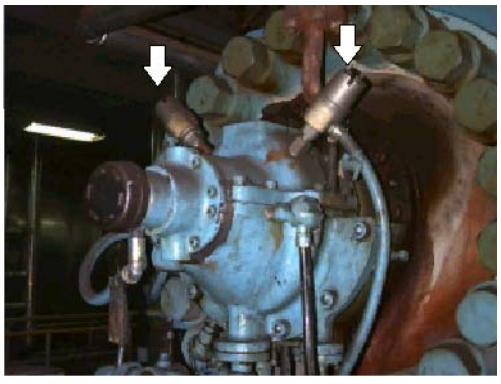
- **Les capteurs de vibration**
- La sonde de déplacement : La Bande passante
  - La bande passante de ce type de capteur est de l'ordre de [0-10kHz]
  - Néanmoins, la fréquence maximale des phénomènes vibratoires observables en déplacement n'excède pas 1kHz
    - A titre d'exemple, 100 g à 10kHz correspond à 0.25 µm en déplacement.



OneProd

4 – Surveillance des Machines

- **Les capteurs de vibration**
- La sonde de déplacement : Les différents montages
  - On utilise les sondes de proximité dans différentes configurations selon le besoin :
    - Mesure de position et de vibration radiale
    - Mesure de position axiale
    - Prise d'information vitesse et référence de phase
    - Mesure d'affaissement de tige de piston
    - Mesures de dilatation différentielle stator/rotor



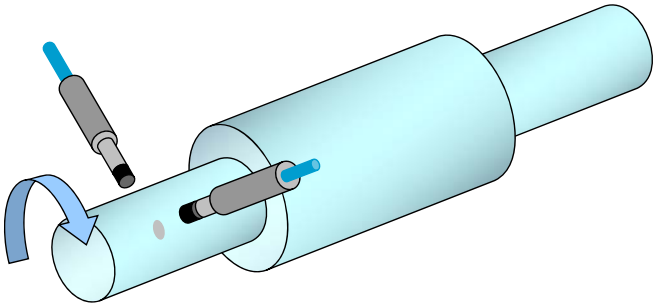
OneProd

4 – Surveillance des Machines

- **Les capteurs de vibration**
- La sonde de déplacement : Les mesures radiales
  - On utilise généralement deux sondes en X-Y à 90° :

    - La composante continue du signal (Gap) fournit la position moyenne de l'arbre dans ses paliers.

    - La composante alternative du signal (Vib) fournit le déplacement relatif crête à crête de l'arbre autour de sa position moyenne.

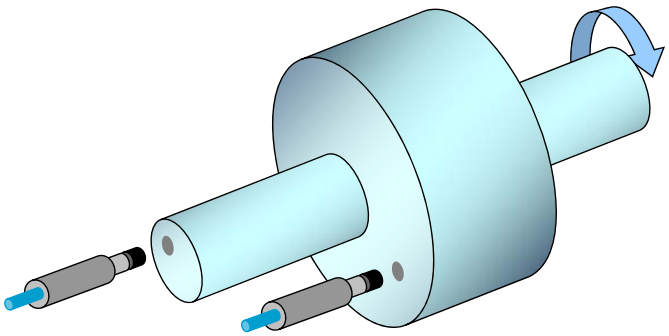


OneProd

4 – Surveillance des Machines

- **Les capteurs de vibration**
- La sonde de déplacement : Les mesures axiales
  - On utilise généralement deux sondes en redondance :

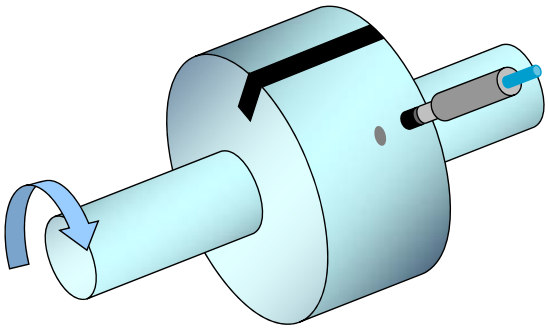
    - La composante continue du signal (Gap) fournit la position axiale moyenne de l'arbre et permet de surveiller les usures de butées.



OneProd

4 – Surveillance des Machines

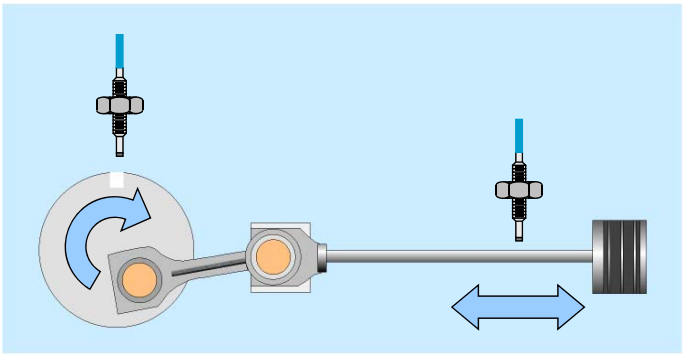
- **Les capteurs de vibration**
- La sonde de déplacement : Les mesures de vitesse
  - On utilise généralement une sonde disposée en radial et un repère sur l 'arbre réalisé par usinage.
    - Le passage du repère devant la sonde génère un échelon de tension.
    - Ce « Top » peut être utilisé pour le calcul de la vitesse, ou comme référence de phase pour l'équilibrage du rotor et l'analyse transitoire.



OneProd

4 – Surveillance des Machines

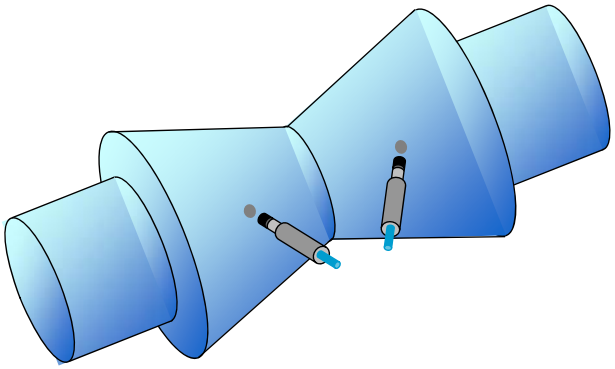
- **Les capteurs de vibration**
- La sonde de déplacement : Les mesures d'affaissement de tige de piston (« Rod Drop Monitoring »)
  - L'usure des segments porteurs provoque l'affaissement progressif de la tige de piston.
  - La sonde de proximité mesure la variation de la position de la tige dans le temps.
  - La position de la tige lors de la mesure est toujours la même grâce au top-tour utilisé.



OneProd

4 – Surveillance des Machines

- **Les capteurs de vibration**
- La sonde de déplacement : Les mesures de dilatation thermique
  - Les sondes de proximité permettent de mesurer les dilatations thermiques différentielles rotor/stator sur les turbomachines.

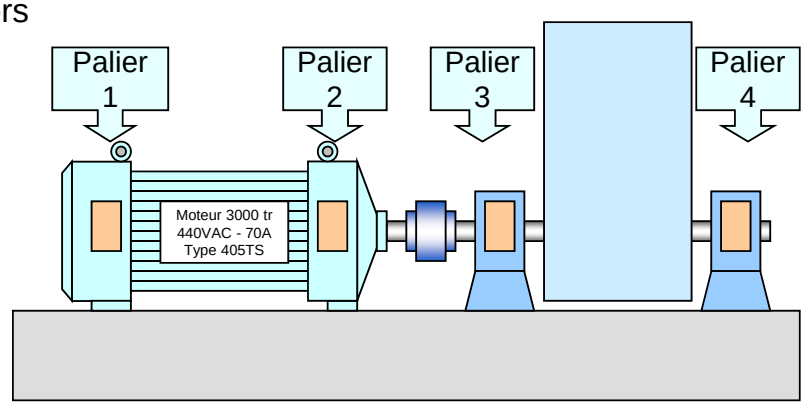


OneProd

4 – Surveillance des Machines

- **Les points de mesure**
- Localisation des points de mesure
  - Les mesures de vibrations sont réalisées au droit des paliers de la machine.
  - Numérotation des paliers

- Machine entraînante
- Machine entraînée



OneProd

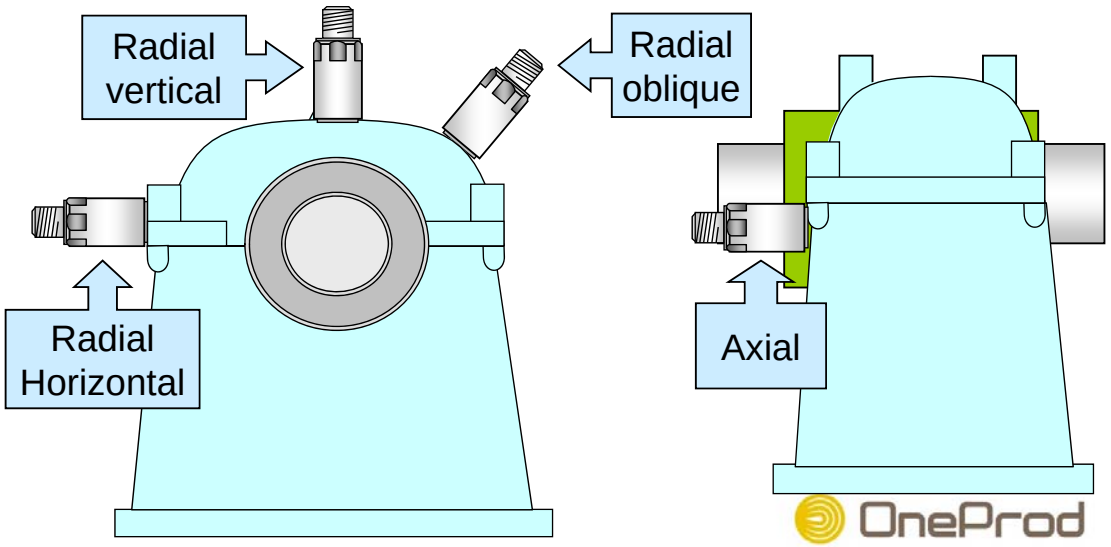
4 – Surveillance des Machines

- **Les points de mesure**
- Direction des points de mesure
  - Les capteurs utilisés mesurent les vibrations selon une direction, généralement confondue avec leur axe de symétrie.
  - On distingue différentes directions de mesure pour un même point de mesure physique.
  - Il serait souhaitable de réaliser les mesures de vibrations selon les trois directions possibles. Pour des raisons de temps et de coûts, on se limite généralement à une seule direction de mesure par palier : La direction radiale oblique constitue le plus souvent un bon compromis.

OneProd

4 – Surveillance des Machines

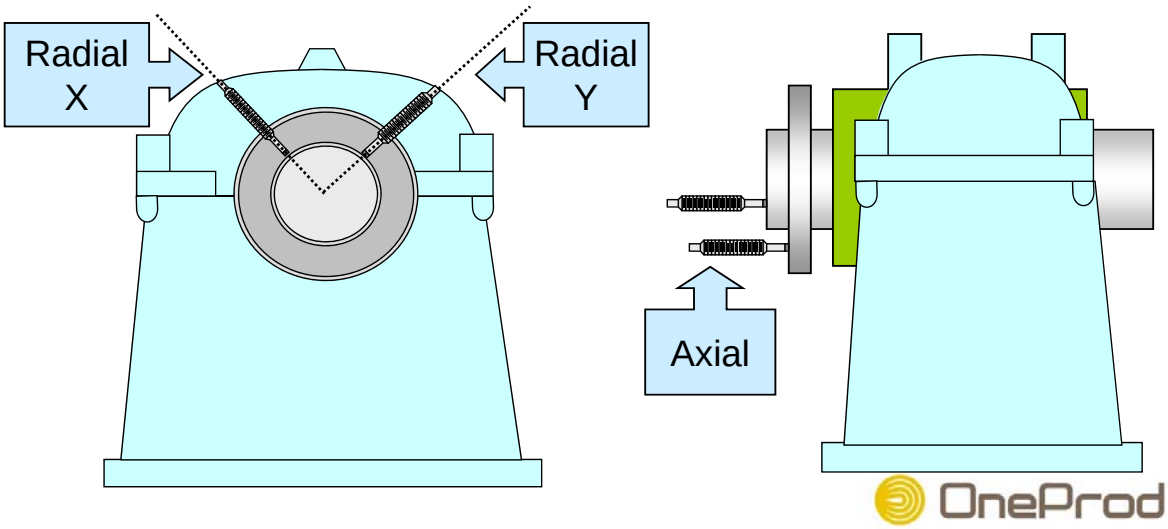
- **Les points de mesure**
- Direction des points de mesure pour un accéléromètre



OneProd

4 – Surveillance des Machines

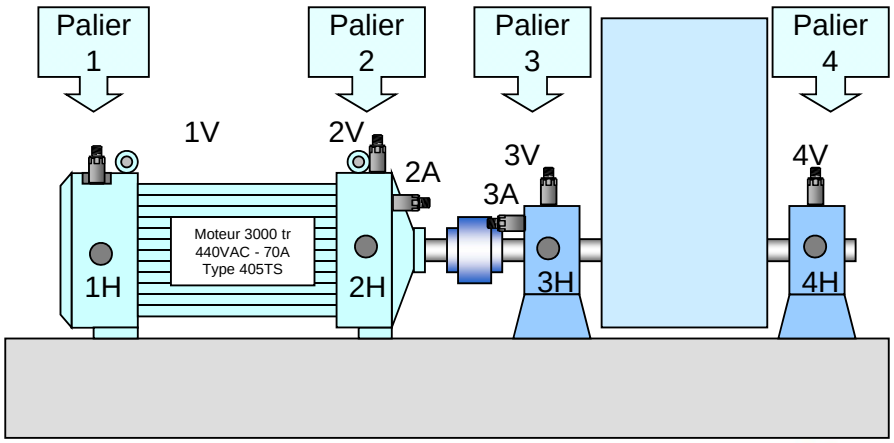
- **Les points de mesure**
- Direction des points de mesure pour une sonde de déplacement



OneProd

4 – Surveillance des Machines

- **Les points de mesure**
- Direction des points de mesure : Exemple



OneProd

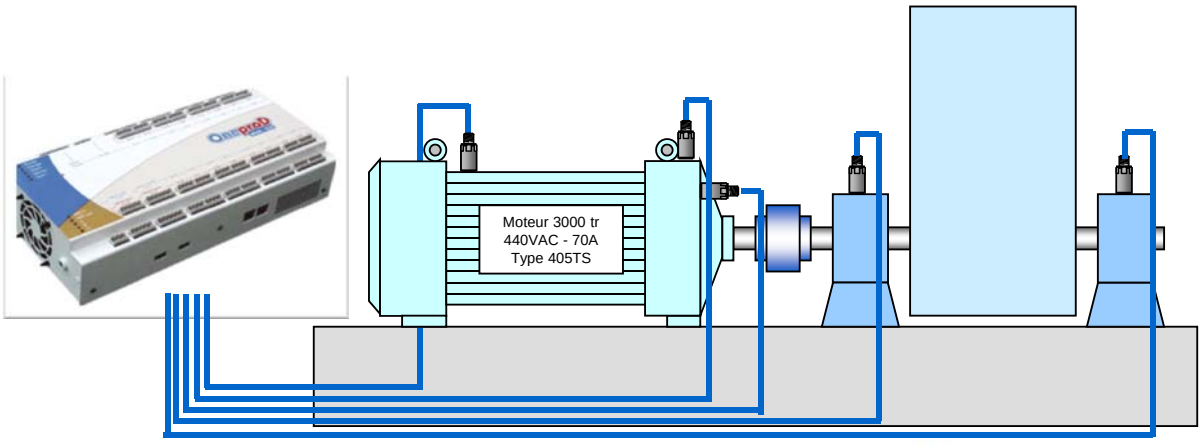
4 – Surveillance des Machines

- **Les appareils de mesure**
- Introduction
  - On distingue fondamentalement deux types de surveillance :
    - Surveillance on-line
    - Surveillance off-line
  - La surveillance peut en outre être continue ou périodique.
  - Le type de surveillance à appliquer à une machine dépend plusieurs critères parmi lesquels :
    - La criticité de la machine dans le process
    - La maintenabilité de la machine
    - Les conséquences d'une panne en termes de sécurité
    - La stratégie de l'entreprise

OneProd

4 – Surveillance des Machines

- **Les appareils de mesure**
- La surveillance on-line
  - Les capteurs sont installés à demeure sur les machines et connectés à un système de surveillance.

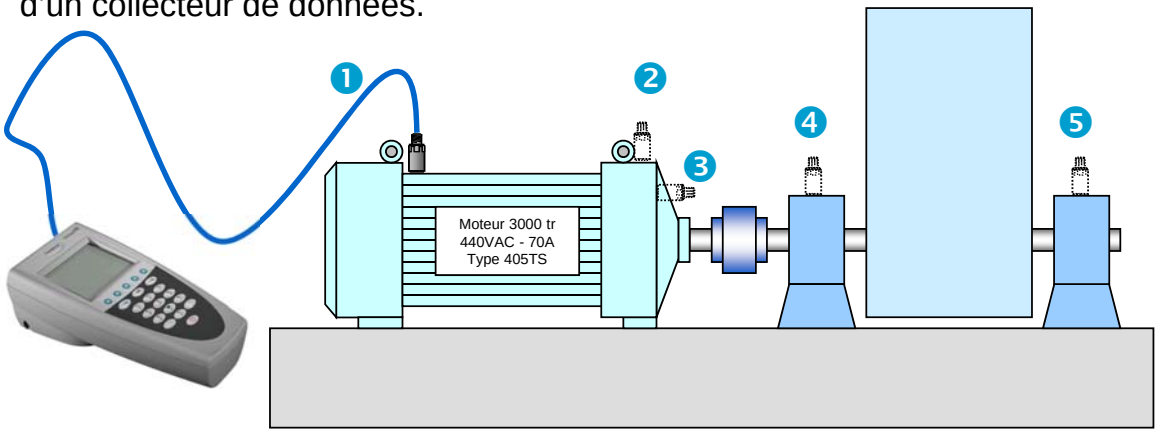


OneProd

4 – Surveillance des Machines

- **Les appareils de mesure**
- La surveillance off-line

  - Les mesures sont relevées à intervalles réguliers par un opérateur équipé d'un collecteur de données.



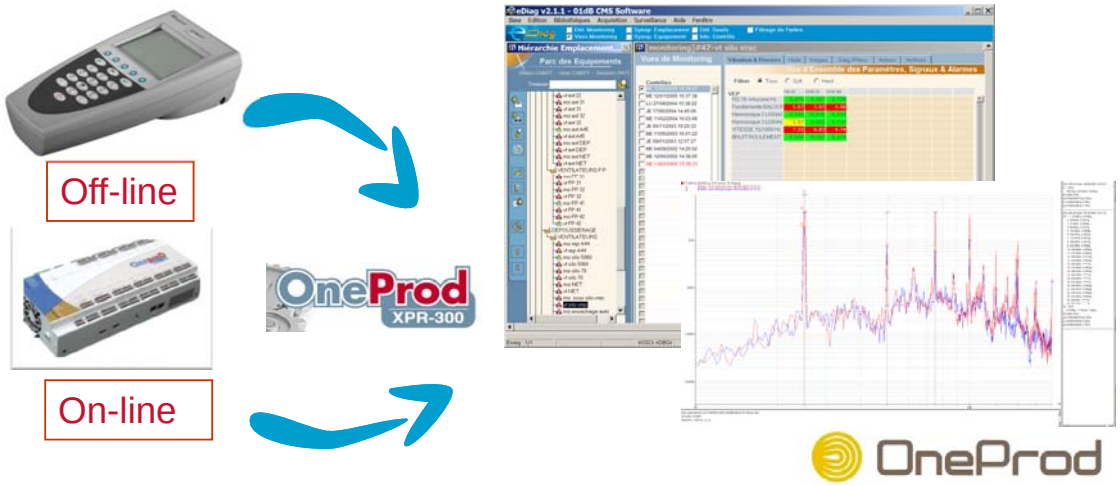
4 – Surveillance des Machines

- **Les appareils de mesure**
- Les fonctionnalités des appareils de surveillance
  - Les appareils de mesure, on-line ou off-line réalisent les fonctions suivantes :

    - Conditionnement des capteurs : Alimentation, surveillance de la ligne, filtrage.
    - Filtrage (analogique et/ou numérique)
    - Amplification
    - Numérisation
    - Stockage
    - Traitements spécifiques : Intégration, calcul d'énergie, FFT, détection crête,...
    - Comparaison à des seuils pré-définis pour émission d'alarmes (systèmes on-line)

4 – Surveillance des Machines

- **Les appareils de mesure**
- Couplage des appareils
  - L'ensemble des données vibratoires et process peuvent être archivées, traitées et affichées grâce à des logiciels d'application spécifiques tels que XPR-300



OneProd

4 – Surveillance des Machines

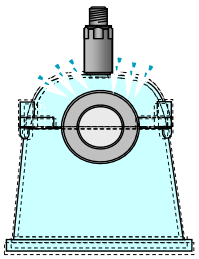
- **Les paramètres de surveillance**
- Introduction
  - Les paramètres de surveillance sont définis au niveau de la base de données. Ils fixent :

    - Les caractéristiques du signal à mesurer :
      - Capteur, grandeur mesurée, type de détection
    - Le format de l'acquisition :
      - Temporel, spectre, ordre, enveloppe.
    - Les caractéristiques de l'acquisition :
      - Fréquence, taille du bloc,fenêtrage,…
    - La nature et les caractéristiques des informations extraites des acquisitions :
      - Amplitudes maxi, moyenne ou RMS, énergie, amplitude à une fréquence donnée, traitement du signal spécifique (Facteur défaut, Kurtosis,…)

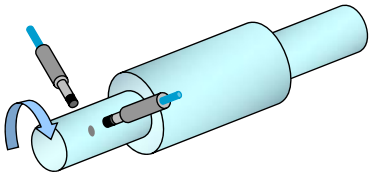
OneProd

4 – Surveillance des Machines

- **Les paramètres de surveillance**
- Le type de capteur
  - Le type de capteur utilisé dépend du type de paliers de la machine :
    - Accéléromètre pour les paliers à roulement



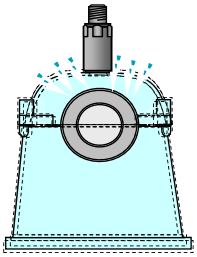
    - Sonde de déplacement pour les paliers lisses



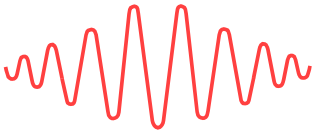
OneProd

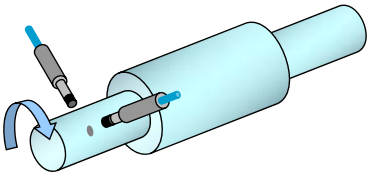
4 – Surveillance des Machines

- **Les paramètres de surveillance**
- La grandeur mesurée
  - Selon le type de capteur utilisé, le signal utile peut être exprimé en :
    - pour un accéléromètre
      - Accélération (g)
      - Vitesse (mm/s)
      - Déplacement (µm)



    - pour une sonde de déplacement
      - Déplacement (µm)

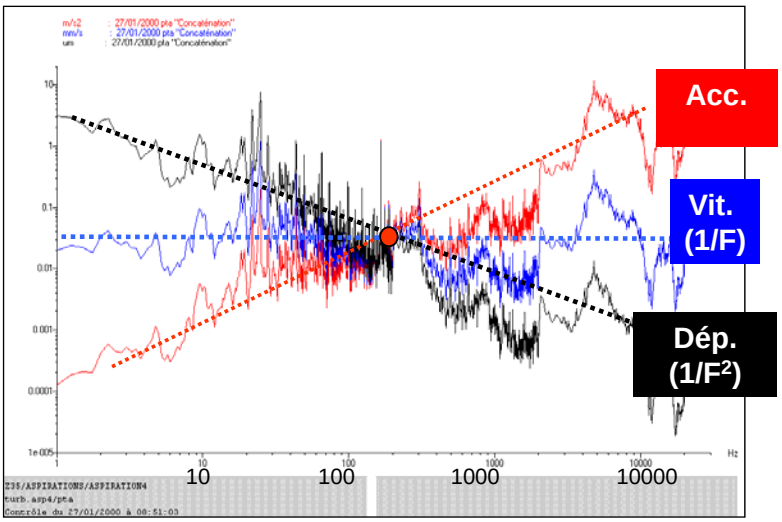




OneProd

4 – Surveillance des Machines

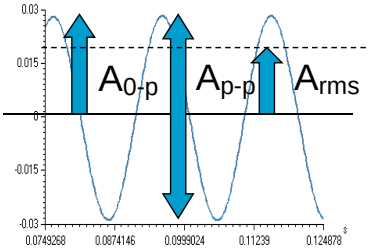
- **Les paramètres de surveillance**
- La grandeur mesurée : Influence sur la bande passante
  - Le choix de l'unité n'est pas indifférent. Les mesures en accélération sont à privilégier, les mesures en vitesse et en déplacement atténuant les phénomènes de fréquences élevées.



OneProd

4 – Surveillance des Machines

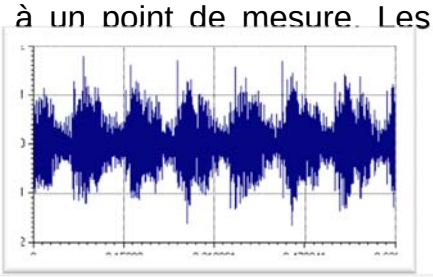
- **Les paramètres de surveillance**
- Le type de détection
  - Le type de détection doit être clairement identifié parmi :
    - L'amplitude crête A0-p
    - L'amplitude crête à crête Ap-p
    - La valeur moyenne A moy
    - La valeur efficace Aeff ou Arms
  - En pratique, on utilise souvent :
    - La valeur efficace Arms pour les mesures issues d'accéléromètres (en accélération, vitesse ou déplacement);
    - L'amplitude crête à crête Ap-p pour les mesures issues de sondes de déplacement (en déplacement).



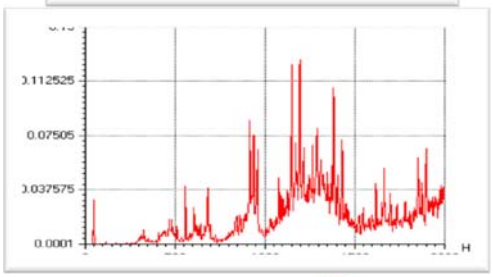
OneProd

4 – Surveillance des Machines

- **Les paramètres de surveillance**
- Le format de l'acquisition
  - Les mesures vibratoires sont stockées dans la base sous forme de fichiers (numériques) horodatés et associés à un point de mesure. Les signaux peuvent être sous deux formes :
    - Signal temporel



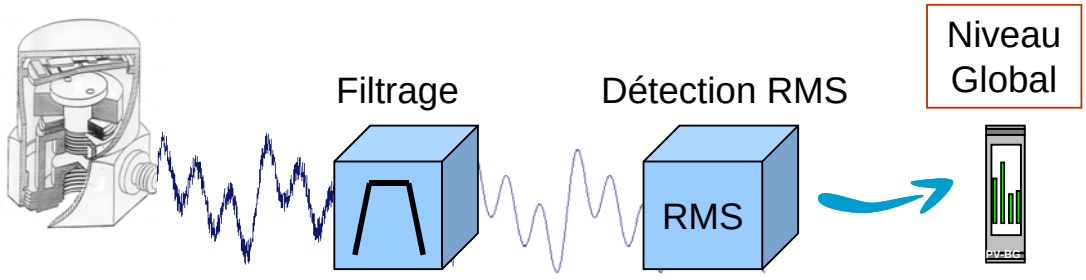
    - Signal fréquentiel (spectre)



OneProd

4 – Surveillance des Machines

- **Les paramètres de surveillance**
- Le niveau global : Introduction
  - Le niveau global constitue le premier indicateur de sévérité vibratoire car il quantifie l'énergie vibratoire globale du signal.
  - Il peut être élaboré à partir du signal temporel :



  - Le résultat de ce traitement est une valeur numérique unique.

OneProd

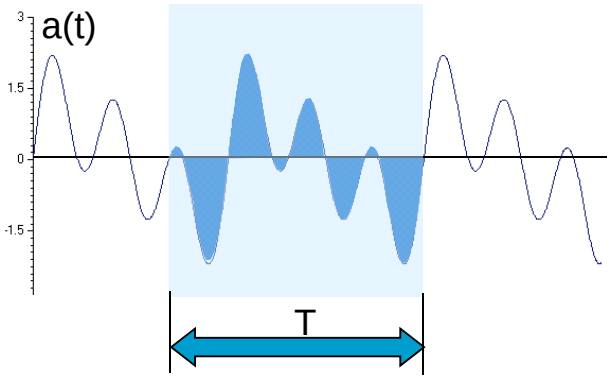
4 – Surveillance des Machines

- **Les paramètres de surveillance**
- Le niveau global : Grandeur de mesurage et filtrage
  - Le niveau global peut être exprimé selon les 3 grandeurs de mesurage courantes :
    - Accélération
    - Vitesse
    - Déplacement
  - Le choix de la grandeur n'est pas indifférent en raison de l'influence de l'unité sur les fréquences mises en évidence.
  - Le filtrage opéré pour la mesure de niveau global diffère selon l'unité utilisée :
    - Niveau global Accélération (exemple): [2-20000] Hz
    - Niveau global Vitesse (normalisé): [10-1000] Hz
    - Niveau global Déplacement (exemple) : [3-300] Hz

4 – Surveillance des Machines

- **Les paramètres de surveillance**
- Le niveau global : Détection RMS (Root Mean Square)
  - La détection RMS consiste à calculer la valeur efficace à partir du signal temporel sur une durée T. Elle s 'exprime par :

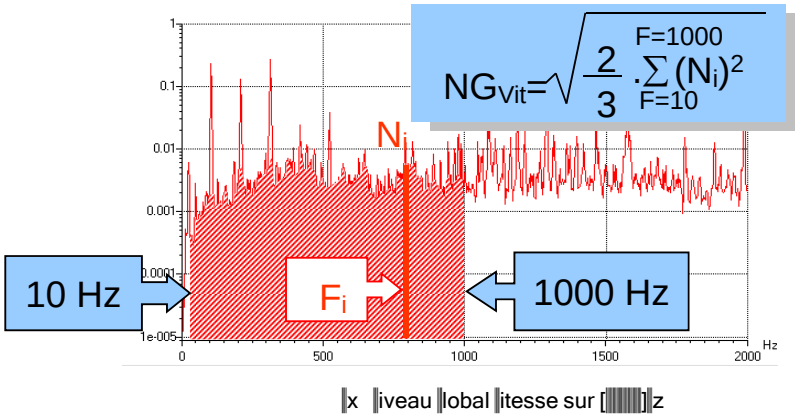
$$A_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T a^2(t).dt}$$



- T = constante de temps, supérieure à la période maximale des principales composantes du signal a(t).

4 – Surveillance des Machines

- **Les paramètres de surveillance**
- Le niveau global : Élaboration à partir du spectre
  - Le niveau global peut aussi être calculé à partir du spectre en fréquence.
  - Il correspond alors au calcul d'une énergie sur une plage de fréquences correspondant à la grandeur mesurée.



Niveau global vitesse sur [ ]z

- Remarque : La durée d'intégration est dans ce cas réduite.

4 – Surveillance des Machines

- **Les paramètres de surveillance**
- Le niveau global : Application au suivi des machines
  - Les niveaux globaux sont des indicateurs simples pour le suivi des machines :
    - Traitement du signal simple et peu coûteux
    - Résultat numérique unique
  - Ils ne permettent pas le diagnostic précis de l'origine des défauts ou des évolutions constatées.
  - Ils permettent néanmoins d'orienter le diagnostic.

4 – Surveillance des Machines

- **Les paramètres de surveillance**
- Le niveau global : Utilisation des niveaux globaux

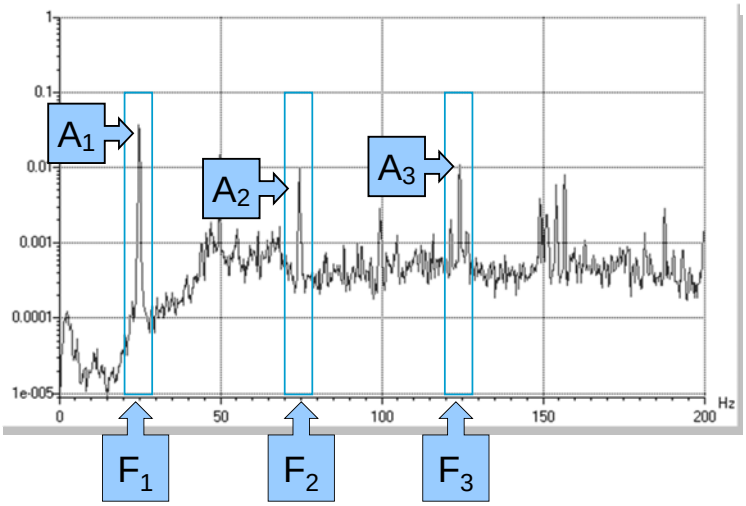
Évolution NG déplacement	Évolution NG vitesse	Évolution NG accélération
⇩ Basses fréquences ⇩	⇩ Moyennes fréquences ⇩	⇩ Hautes fréquences ⇩
Balourd Tourbillon d'huile Fouettement Accouplement Desserrage	Balourd Tourbillon d'huile Alignement Accouplement Desserrage Engrènement PV Passages pales PV	Roulements Engrènement GV Cavitation Turbulences Frottements Passages pales GV

OneProd

4 – Surveillance des Machines

- **Les paramètres de surveillance**
- Amplitude des raies discrètes
  - La mesure de l'amplitude de certaines raies du spectre permet le suivi des phénomènes périodiques :

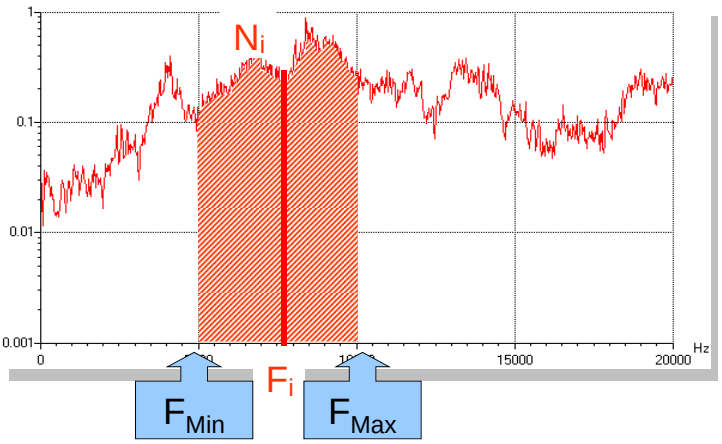
    - Balourd
    - Lignage
    - Engrènement
    - Défaut électrique



OneProd

4 – Surveillance des Machines

- **Les paramètres de surveillance**
- Niveau d'énergie dans une bande de fréquences
  - Il est utilisé pour le suivi des phénomènes aléatoires :
    - Roulements
    - Cavitation,...
  - Le niveau d'énergie dans la bande [FMin; FMax] est donné par :



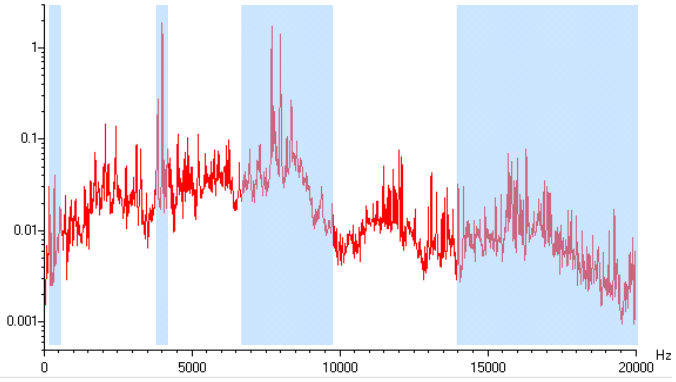
$$E = \sqrt{\frac{2}{3} \cdot \sum_{F_{Min}}^{F_{Max}} (N_i)^2}$$

(pour Hanning)

OneProd

4 – Surveillance des Machines

- **Les paramètres de surveillance**
- Analyse fréquentielle
  - Chaque point de mesure aura donc un certain nombre de paramètres associés selon les défauts recherchés :
    - Des raies pour les phénomènes périodiques
      - Balourd
      - Lignage
      - Engrènement



    - Des niveaux d'énergie pour les phénomènes aléatoires
      - Roulements
      - Cavitation

OneProd

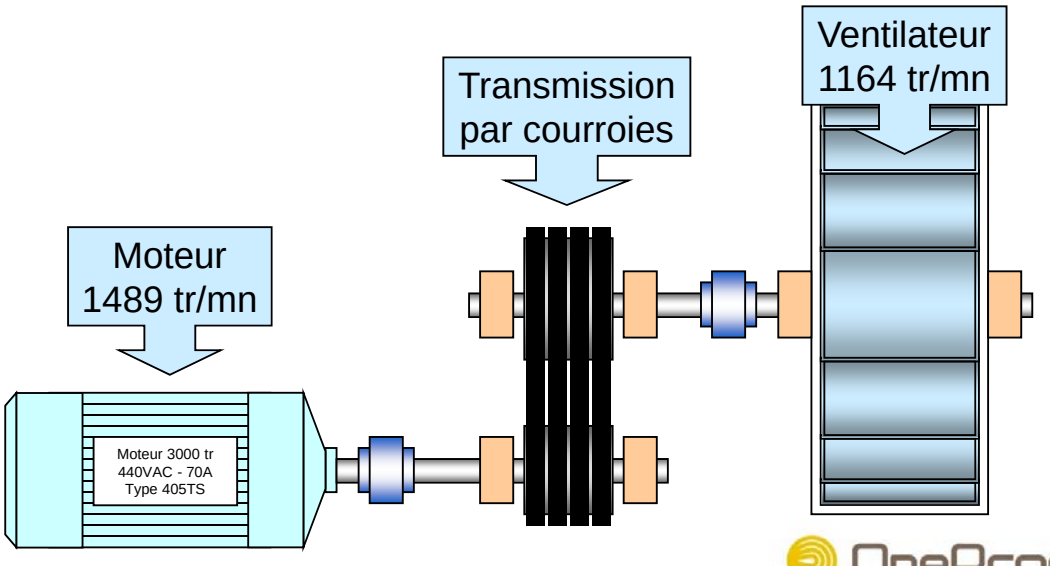
4 – Surveillance des Machines

- **Les paramètres de surveillance**
- Choix des paramètres de surveillance
  - Une analyse cinématique de la machine permet de définir les paramètres utiles à la surveillance.
  - Elle repose sur la connaissance des éléments suivants :
    - Eléments constitutifs de la machine :
      - Eléments mécaniques, chaînes cinématiques, dimensions
    - Paramètres de fonctionnement :
      - Vitesse, puissance, charge
    - Manifestations des phénomènes attendus
      - Fréquences caractéristiques, typologies spectrales

OneProd

4 – Surveillance des Machines

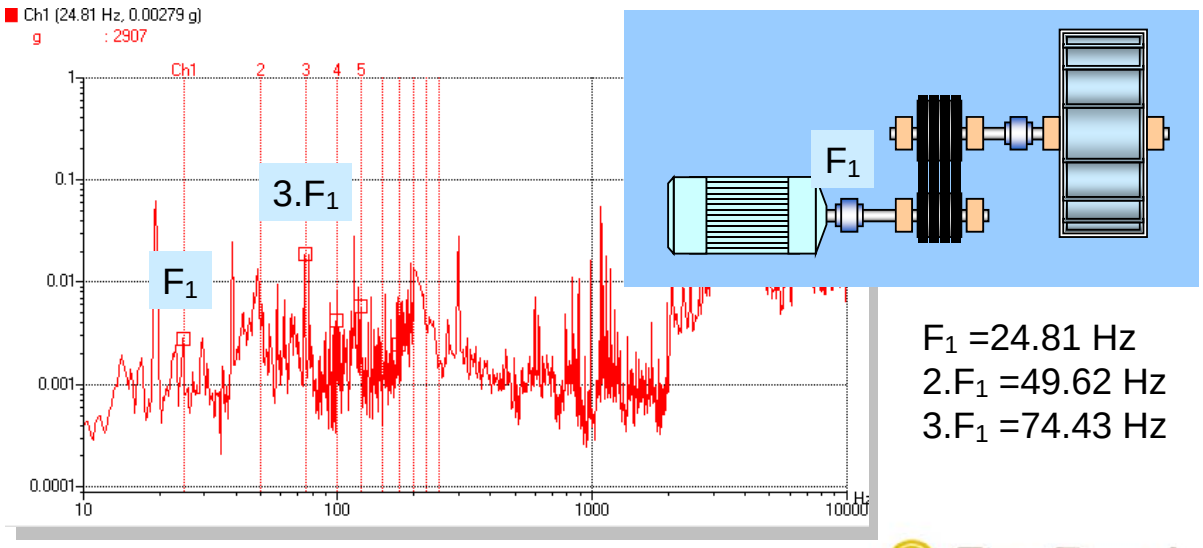
- **Les paramètres de surveillance**
- L'analyse cinématique : Exemple d'un moto-ventilateur



OneProd

4 – Surveillance des Machines

- **Les paramètres de surveillance**
- L'analyse cinématique : Exemple d'un moto-ventilateur

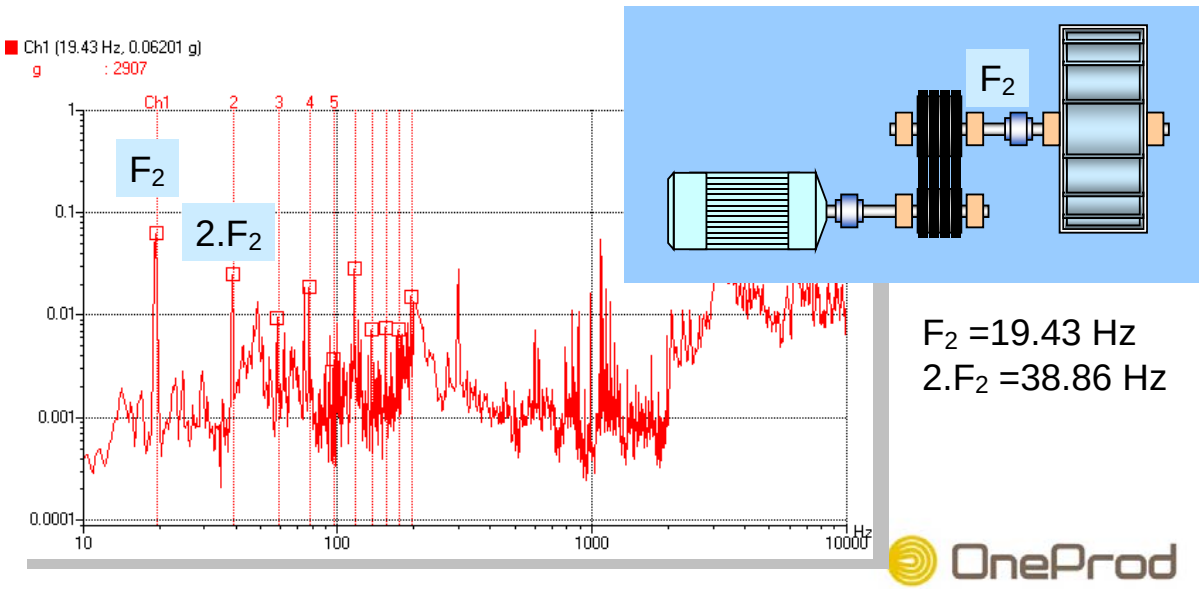


F_1 =24.81 Hz
$2.F_1$ =49.62 Hz
$3.F_1$ =74.43 Hz

OneProd

4 – Surveillance des Machines

- **Les paramètres de surveillance**
- L'analyse cinématique : Exemple d'un moto-ventilateur

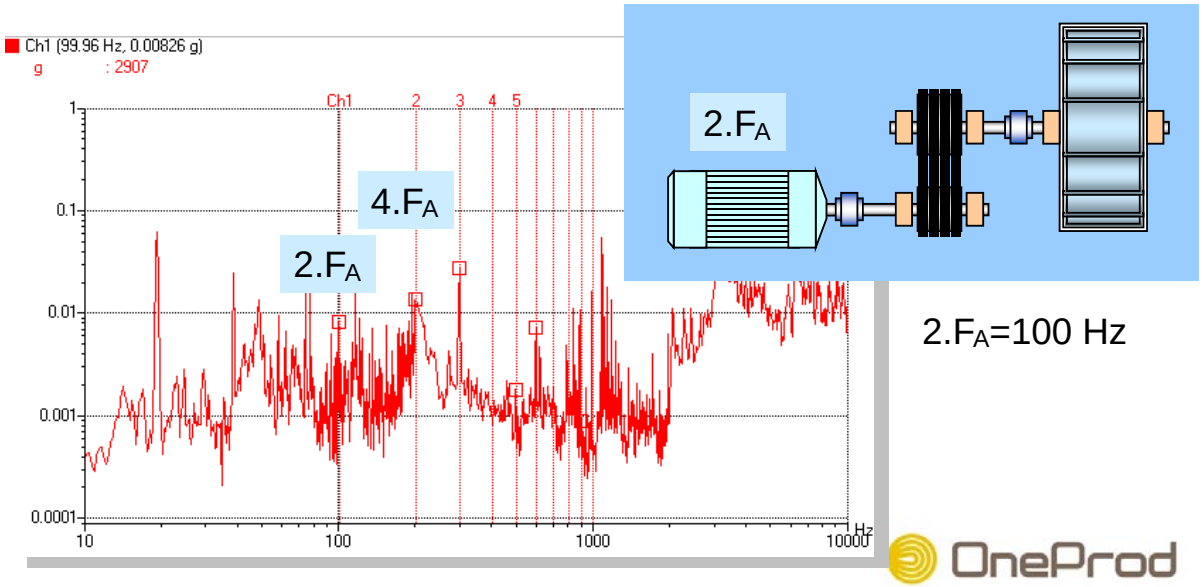


F_2 =19.43 Hz
$2.F_2$ =38.86 Hz

OneProd

4 – Surveillance des Machines

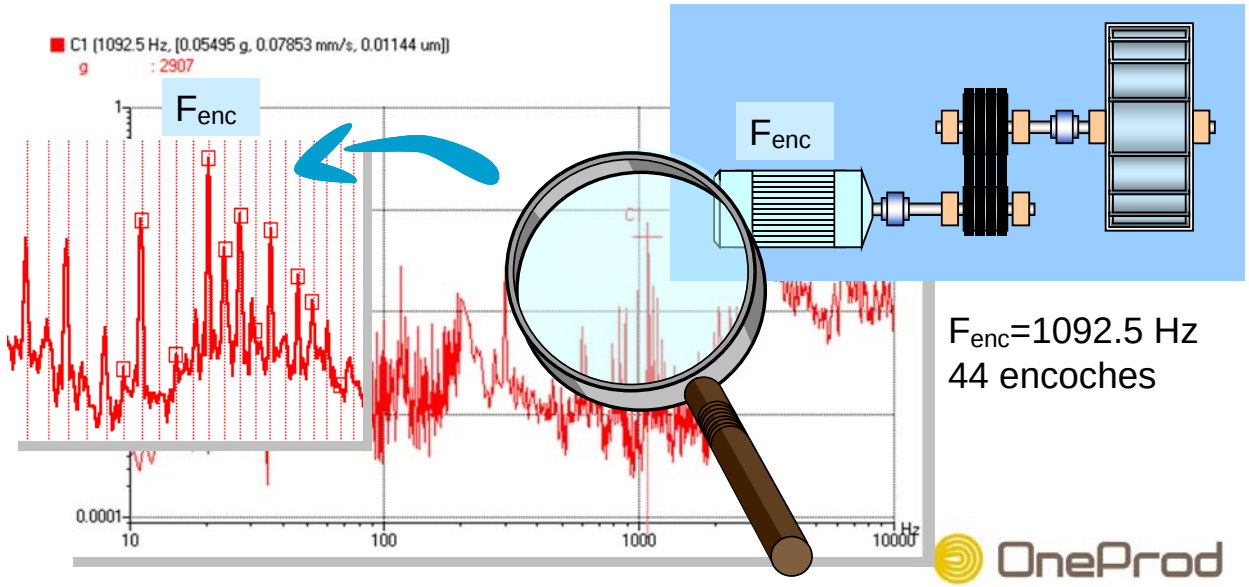
- **Les paramètres de surveillance**
- L'analyse cinématique : Exemple d'un moto-ventilateur



$2.F_A$=100 Hz

4 – Surveillance des Machines

- **Les paramètres de surveillance**
- L'analyse cinématique : Exemple d'un moto-ventilateur



F_{enc}=1092.5 Hz
44 encoches

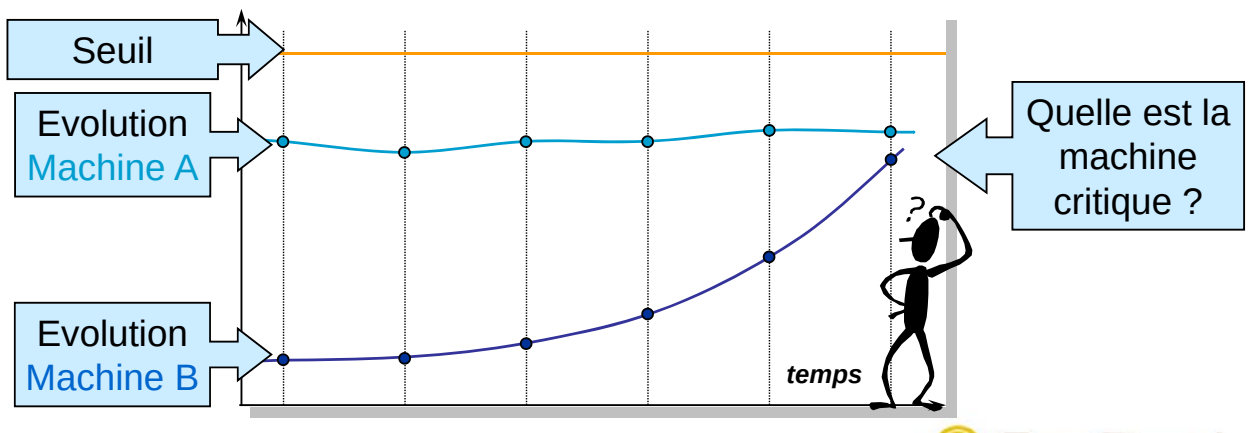
4 – Surveillance des Machines

- **L'interprétation des mesures**
- Introduction
  - Les paramètres étant définis, la surveillance consiste à :
    - Collecter périodiquement les mesures permettant l'extraction des paramètres.
    - Comparer les valeurs à des seuils pré-définis
    - Suivre l'évolution dans le temps des valeurs atteintes pour chacun d'eux (historiques d'évolution).
    - Interpréter les évolutions et dépassements de seuils (élaboration du diagnostic).
    - Analyser les spectres et signaux temporels acquis pour affiner ou confirmer le diagnostic.

OneProd

4 – Surveillance des Machines

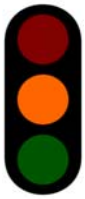
- **L'interprétation des mesures**
- L'analyse des tendances
  - L'analyse dans le temps des courbes d'évolution des paramètres de surveillance fournit des indications précieuses pour le diagnostic.



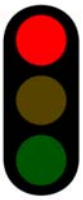
OneProd

4 – Surveillance des Machines

- **L'interprétation des mesures**
- La comparaison aux seuils
  - Les seuils pré-définis sont généralement au nombre de deux :



- Seuil Alarme
  - Indique qu'un changement significatif est intervenu. La machine peut généralement continuer de fonctionner durant la phase d'analyse du problème.



- Seuil Danger (ou Déclenchement)
  - Niveau au delà duquel la poursuite du fonctionnement de la machine peut provoquer une avarie. Une intervention pour réduire les vibrations ou arrêter la machine est requise.

4 – Surveillance des Machines

- **L'interprétation des mesures**
- La détermination des seuils
  - Ils peuvent provenir :

- De normes : ISO - API : Ces normes sont présentées et explicitées dans la section suivante.

- De préconisations constructeur

- D'un état de référence : Les valeurs des seuils sont extrapolées des valeurs des paramètres prélevées à un moment ou l'état de l'installation était jugé satisfaisant. La méthode d'extrapolation dépend du type de machine et fait grandement appel à l'expérience de l 'utilisateur.

4 – Surveillance des Machines

- **L'interprétation des mesures**
- La détermination des seuils à partir d'un état de référence
  - Sur une machine en bon état, fonctionnant en régime stabilisé à sa charge nominale :

    - Faire un relevé IO du paramètre dans les conditions de mesurages qui seront celles de la surveillance : Direction, fixation du capteur,…

    - Positionner la valeur du seuil Alarme SAL à la valeur la plus faible entre 2.I0 et la valeur « Non Acceptable » donnée par la norme.

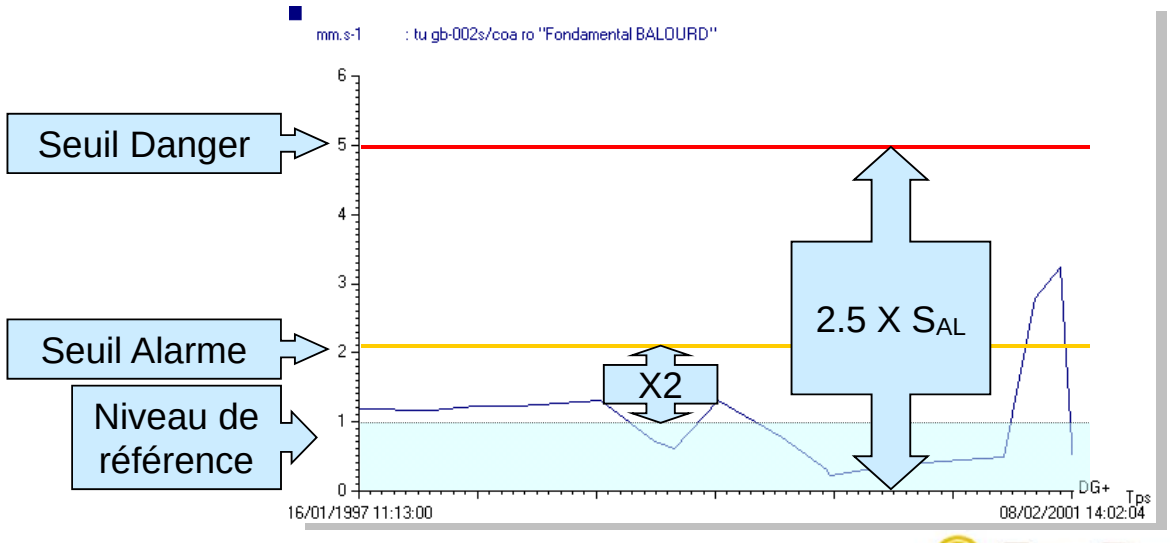
    - Positionner la valeur du seuil Danger SDG à la valeur 2,5.SAL

S_{AL} = Min.[2.I_O ; non acceptable selon la norme]
S_{DG}= 2.5 X S_{AL}

OneProd

4 – Surveillance des Machines

- **L'interprétation des mesures**
- La détermination des seuils : Exemple



OneProd

4 – Surveillance des Machines

- **Les normes**
- Références normatives : Normes ISO
  - Les normes ISO pertinentes sont les suivantes :

ISO 10816 : Vibrations mécaniques - Evaluation des vibrations des machines par mesurages sur les parties non tournantes

ISO 10816-1 : Directives générales
ISO 10816-2 : Turbo-alternateurs excédant 50MW
ISO 10816-3 : Machines industrielles de puissance nominale supérieure à 15kW et de vitesse nominale entre 120 et 15000 tr/mn mesurées in situ
ISO 10816-4 : Ensemble des turbines à gaz hors aéronautique
ISO 10816-5 : Groupes générateurs de puissance et installations de pompage hydraulique
ISO 10816-6 : Machines alternatives excédant 100 kW

4 – Surveillance des Machines

- **Les normes**
- Références normatives : Normes ISO

ISO 7919 : Vibrations mécaniques des machines non alternatives - Mesurages sur arbres tournants et critères d'évaluation

ISO 7919-1 : Directives générales
ISO 7919-2 : Turbo-alternateurs installés sur fondation radier
ISO 7919-3 : Machines industrielles couplées
ISO 7919-4 : Turbines à gaz
ISO 7919-5 : Machines équipant les centrales électriques et les stations de pompage

4 – Surveillance des Machines

- **Les normes**
- Références normatives : Normes ISO

ISO 2954 : Vibrations mécaniques des machines tournantes ou alternatives - Spécifications des appareils de mesurage de l'intensité vibratoire.

ISO 8579-2 : Code de réception des engrenages - Partie 2 : Détermination des vibrations mécaniques d 'une transmission par engrenages au cours des essais de réception

ISO 14694 : Ventilateurs industriels - Spécifications pour la qualité de l 'équilibrage et les niveaux de vibrations

4 – Surveillance des Machines

- **Les normes**
- Références normatives : Normes API
  - Les normes API pertinentes sont les suivantes :

API STANDARD 610 : Centrifugal Pumps for Petroleum, Heavy Duty Chemical and Gas Industry Services - 1994

API STANDARD 611 : General Purpose Steam Turbines for Petroleum, Chemical, and Gas Industry Services -

API STANDARD 612 : Special Purpose Steam Turbines for Petroleum, Chemical, and Gas Industry Services - Jun.1995

API STANDARD 613 : Special Purpose Gear Units for Petroleum, Chemical, and Gas Industry Services - Jun.1995

4 – Surveillance des Machines

- **Les normes**
- Références normatives : Normes API

API STANDARD 616 : Gas Turbines for Petroleum, Chemical, and Gas Industry Services - Aug.1998

API STANDARD 617 : Centrifugal Compressors for Petroleum, Chemical, and Gas Service Industries - Fev.1995

API STANDARD 618 : Reciprocating Compressors for Petroleum, Chemical, and Gas Service Industries -

API STANDARD 619 : Rotary-Type Positive Displacement Compressors for Petroleum, Chemical, and Gas Industry Services -1995

4 – Surveillance des Machines

- **Les normes**
- Références normatives : Normes API

API STANDARD 670 : Machinery Protection Systems - Dec. 2000

API STANDARD 671 : Special-Purpose Couplings for Petroleum, Chemical, and Gas Industry Service - Oct.1998

API STANDARD 672 : Packaged, Integrally Geared Centrifugal Plant and Instrument Air Compressors for General Refinery Service

API STANDARD 673 : Special-Purpose Centrifugal Fans for General Refinery Service - Jan.1982

4 – Surveillance des Machines

- **Les normes**
- Références normatives : Normes API

API STANDARD 674 : Positive Displacement Pumps - Reciprocating

API STANDARD 675 : Positive Displacement Pumps - Controlled Volume

API STANDARD 676 : Positive Displacement Pumps - Rotary

API STANDARD 677 : General-Purpose Gear Units for General Refinery Service

API STANDARD 678 : Accelerometer-Based Vibration Monitoring system

OneProd

4 – Surveillance des Machines

- **Les normes**
- Références normatives : Normes API

API STANDARD 684 : Tutorial on the API Standard Paragraphs Covering Rotor Dynamics and Balancing :
An introduction to Lateral Critical and Train Torsional Analysis and Rotor Balancing

OneProd

4 – Surveillance des Machines

- Les normes
- La norme ISO 10816 : Evolutions de la norme

  - La norme internationale ISO 10816 (1995) remplace la norme ISO 2372 (1974).

  - L'évolution du texte porte sur les points suivants :
    - Evaluation de la sévérité vibratoire selon 2 critères :
      - Niveaux vibratoires absolus
      - Evolution des niveaux vibratoires dans le temps

    - Ouverture à l'utilisation de paramètres de mesure autres :
      - Accélération ou déplacement en bande large
      - Paramètres Accélération, vitesse ou déplacement en bande fine

OneProd
65

4 – Surveillance des Machines

- **Les normes**
- La norme ISO 10816 : Évolutions de la norme

  - Ces évolutions ont pour objectif de permettre :

    - Une meilleure adéquation de la norme aux machines à vitesse lente ou rapide ($\leq$ 600 tr/mn ou $\geq$ 12000 tr/mn)

    - La prise en compte de l'évolution des moyens de mesure et notamment la généralisation de l'utilisation des analyseurs de fréquences.

    - La reconnaissance des spécificités des différentes catégories de machine selon leur type, leurs conditions d 'installation et leurs paramètres de fonctionnement.

OneProd
66

4 – Surveillance des Machines

- **Les normes**
- La norme ISO 10816 : Principes de surveillance
  - L'évaluation des vibrations repose sur les principes suivants :
    - Mesure de vitesse vibratoire large bande
    - Comparaison à des valeurs limites établies pour différentes classes de machines, en fonction de leur type et de leur puissance : Critère 1
    - Comparaison de l'évolution des amplitudes vibratoires à des valeurs limites : Critère 2

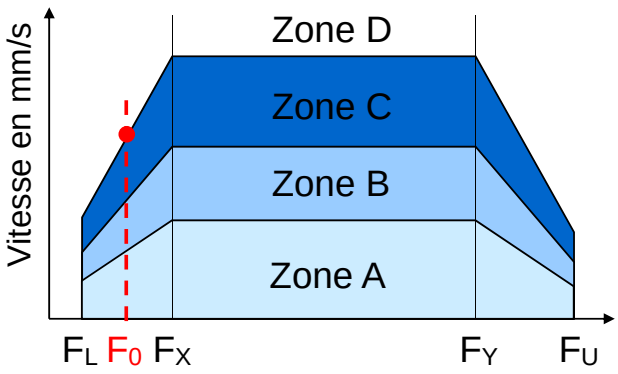
Ces valeurs limites sont définies en fonction des charges dynamiques acceptables sur les paliers et du niveau acceptable de transmission des vibrations au radier et aux fondations.

OneProd

4 – Surveillance des Machines

- **Les normes**
- La norme ISO 10816 : Forme générale des critères

$$V_{RMS}=V_A.G.\left[\frac{F_Z}{F_X}\right]^k.\left[\frac{F_Y}{F_W}\right]^m$$



V_{RMS} :Vitesse acceptable
V_A : Vitesse efficace constante pour la zone A qui s'applique entre F_X et F_Y
G : Paramètre de zone dépendant de la machine
Exemples :

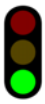
- G=1 pour zone A
- G=2.56 pour zone B
- G=6.4 pour zone C

k et m constantes dépendantes du type de machine

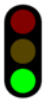
OneProd

4 – Surveillance des Machines

- **Les normes**
- La norme ISO 10816 : Définition des zones



- Zone A : Niveaux vibratoires pour machines neuves



- Zone B : Niveaux vibratoires acceptables pour un service de longue durée sans restrictions de durée

- Zone C : Niveaux vibratoires non acceptables pour un service de longue durée en continu. La machine peut toutefois continuer à fonctionner pendant une durée limitée.

- Zone D : Niveaux vibratoires suffisants pour endommager la machine : La machine doit être arrêtée.

OneProd

4 – Surveillance des Machines

- **Les normes**
- La norme ISO 10816 : Application de la norme
  - Les directives générales sont établies dans la partie 1.
  - Les critères de mesurage et d'évaluation sont données dans les parties complémentaires consacrées aux différentes catégories de machines :
    - ISO 10816-1 : Directives générales
    - ISO 10816-2 : Turbo-alternateurs excédant 50MW
    - ISO 10816-3 : Machines industrielles excédant 15kW et de vitesse nominale entre 120 et 15000 tr/mn
    - ISO 10816-4 : Ensemble des turbines à gaz hors aéronautique
    - ISO 10816-5 : Groupes générateurs de puissance et installations de pompage hydraulique
    - ISO 10816-6 : Machines alternatives excédant 100 kW

OneProd

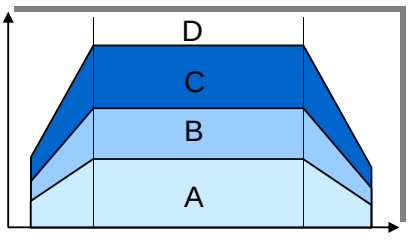
4 – Surveillance des Machines

- **Les normes**
- La norme ISO 10816-2 : Turbo-alternateurs installés sur fondation radier, excédant 50 MW
  - Mesure de la vitesse efficace VRMS en régime de fonctionnement nominal stable
  - Mesures bande large [10-A] Hz - A ≥ 500 Hz
  - Les limites des zones sont données en fonction de la vitesse de rotation de la machine :
    - 1500 / 1800 tr/mn
    - 3000 / 3600 tr/mn

4 – Surveillance des Machines

- **Les normes**
- La norme ISO 10816-2 : Turbo-alternateurs installés sur fondation radier, excédant 50 MW

Limite de zone	V_{RMS} (mm/s)	
	1500 / 1800 tr/mn	3000 / 3600 tr/mn
A/B	2.8	3.8
B/C	5.3	7.5
C/D	8.5	11.8



4 – Surveillance des Machines

- **Les normes**
- La norme ISO 10816-3 : Machines industrielles de puissance nominale supérieure à 15 kW et de vitesse nominale entre 120 tr/mn et 15000 tr/mn lorsqu'elles sont mesurées in situ
  - Mesure de la vitesse efficace VRMS et du déplacement efficace DRMS en régime de fonctionnement nominal stable
  - Mesures bande large [10-1000] Hz si V ≥ 600 tr/mn
  - Mesures bande large [2-1000] Hz si 120 < V < 600 tr/mn
  - Les limites des zones sont données par groupes de machines en fonction du type de support.

4 – Surveillance des Machines

- **Les normes**
- La norme ISO 10816-3 : Machines industrielles de puissance nominale supérieure à 15 kW et de vitesse nominale entre 120 tr/mn et 15000 tr/mn lorsqu'elles sont mesurées in situ
  - Groupe 1 : Machines de grande dimension de puissance supérieure à 300 kW ; Machines électriques de hauteur d'axe H ≥ 315 mm

Type de support	Limite de zone	D_{RMS} (µm)	V_{RMS} (mm/s)
Rigide	A/B	29	2.3
Rigide	B/C	57	4.5
Rigide	C/D	90	7.1
Souple	A/B	45	3.5
Souple	B/C	90	7.1
Souple	C/D	140	11.0

4 – Surveillance des Machines

- **Les normes**
- La norme ISO 10816-3 : Machines industrielles de puissance nominale supérieure à 15 kW et de vitesse nominale entre 120 tr/mn et 15000 tr/mn lorsqu'elles sont mesurées in situ

  - Groupe 2 : Machines de taille moyenne d'une puissance nominale supérieure à 15 kW et jusqu'à 300 kW ; Machines électriques de hauteur d'axe 160 mm<H<315 mm

Type de support	Limite de zone	D_{RMS} (µm)	V_{RMS} (mm/s)
Rigide	A/B	22	1.4
Rigide	B/C	45	2.8
Rigide	C/D	71	4.5
Souple	A/B	37	2.3
Souple	B/C	71	4.5
Souple	C/D	113	7.1

OneProd

4 – Surveillance des Machines

- **Les normes**
- La norme ISO 10816-3 : Machines industrielles de puissance nominale supérieure à 15 kW et de vitesse nominale entre 120 tr/mn et 15000 tr/mn lorsqu'elles sont mesurées in situ

  - Groupe 3 : Pompes à roue ailettée (centrifuges, hélicoïdes ou axiales, avec entraînement séparé, d'une puissance nominale supérieure à 15 kW

Type de support	Limite de zone	D_{RMS} (µm)	V_{RMS} (mm/s)
Rigide	A/B	16	2.3
Rigide	B/C	36	4.5
Rigide	C/D	56	7.1
Souple	A/B	26	3.5
Souple	B/C	56	7.1
Souple	C/D	90	11.0

OneProd

4 – Surveillance des Machines

- **Les normes**
- La norme ISO 10816-3 : Machines industrielles de puissance nominale supérieure à 15 kW et de vitesse nominale entre 120 tr/mn et 15000 tr/mn lorsqu'elles sont mesurées in situ

  - Groupe 4 : Pompes à roue ailettée (centrifuges, hélicoïdes ou axiales, avec entraînement intégré, d'une puissance nominale supérieure à 15 kW

Type de support	Limite de zone	D_{RMS} (µm)	V_{RMS} (mm/s)
Rigide	A/B	11	1.4
Rigide	B/C	22	2.8
Rigide	C/D	36	4.5
Souple	A/B	18	2.3
Souple	B/C	36	4.5
Souple	C/D	55	7.1

4 – Surveillance des Machines

- **Les normes**
- La norme ISO 10816-4 : Ensemble des turbines à gaz, à l'exception des turbines dérivées de celles utilisées en aéronautique

  - Mesure de la vitesse efficace VRMS en régime de fonctionnement nominal stable

  - Mesures bande large [10-B] Hz - B ≥ 6xF0
    - F0 : Fréquence max. de rotation de l'arbre

  - La vitesse de rotation de l'arbre doit être comprise entre 3000 tr/mn et 20000 tr/mn

4 – Surveillance des Machines

- **Les normes**
- La norme ISO 10816-4 : Ensemble des turbines à gaz, à l'exception des turbines dérivées de celles utilisées en aéronautique

Limite de zone	V_{RMS} (mm/s)
A/B	4.5
B/C	9.3
C/D	14.7
Note : Ces valeurs s'appliquent aux mesures en direction radiale sur les paliers de l'arbre, et aux mesures en direction axiale sur les paliers de butées.	

4 – Surveillance des Machines

- **Les normes**
- La norme ISO 10816 : Application du critère 2
  - Le critère 2 est fondé sur une évolution des amplitudes vibratoires par rapport à une valeur de référence pré-établie.
  - La norme précise qu'une variation (en plus ou en moins) des niveaux vibratoires supérieure à 25% de la valeur supérieure de la zone B (indiquée dans les tableaux) est considérée comme significative, surtout si cette variation est rapide.
  - Il convient alors d'effectuer une analyse des causes et de mettre en place des actions correctives si nécessaire.

4 – Surveillance des Machines

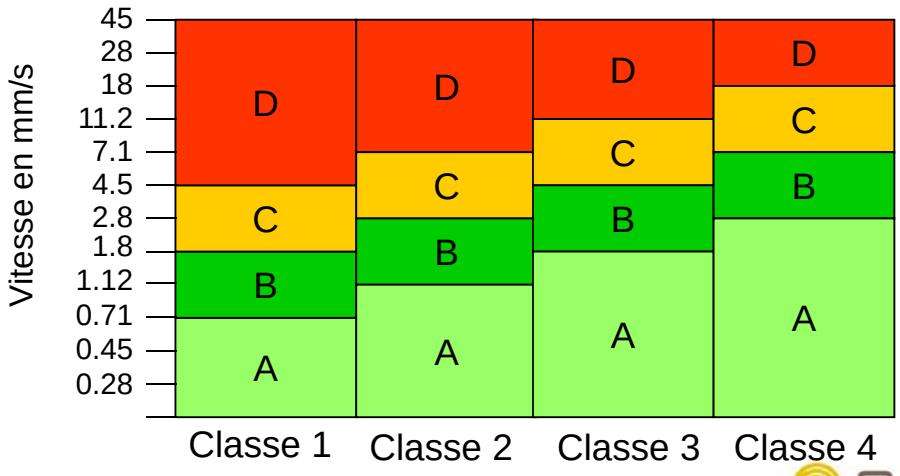
- **Les normes**
- La norme ISO 10816 : Annexe provisoire
  - La norme ISO 10816-1 prévoit la définition des critères d'évaluation par types de machines dans des parties complémentaires spécifiques.
  - En l'absence de critères spécifiques pour un type de machine donné, la norme prévoit l'utilisation de critères issus de la précédente norme ISO 2372 :
    - Mesure de la vitesse vibratoire efficace sur [0-1000]Hz
    - Classifications des machines en 4 classes
    - Critères d'évaluation constants par classe de machine

4 – Surveillance des Machines

- **Les normes**
- La norme ISO 10816 : Annexe provisoire
  - Classification des machines
    - Classe 1 (ou groupe K) : Petites machines telles que moteur électriques jusqu'à 15kW
    - Classe 2 (ou groupe M) : Machines de taille moyenne, de 15kW à 75kW, ou grandes machines jusqu'à 300kW sur assises spéciales
    - Classe 3 (ou groupe C) : Grandes machines sur fondations rigides et lourdes opérant à une vitesse inférieure à la fréquence propre de la fondation
    - Classe 4 (ou groupe T) : Grandes machines opérant à une vitesse supérieure à la fréquence propre de la fondation (ex : turbo-machines)

4 – Surveillance des Machines

- **Les normes**
- La norme ISO 10816 : Annexe provisoire
  - Critères d'évaluation : Limites des périmètres de zones



OneProd

4 – Surveillance des Machines

- **Les normes**
- La norme ISO 10816 : La détermination des seuils
  - Les parties supplémentaires de l'ISO 10816 fournissent des lignes directrices pour le positionnement des seuils :

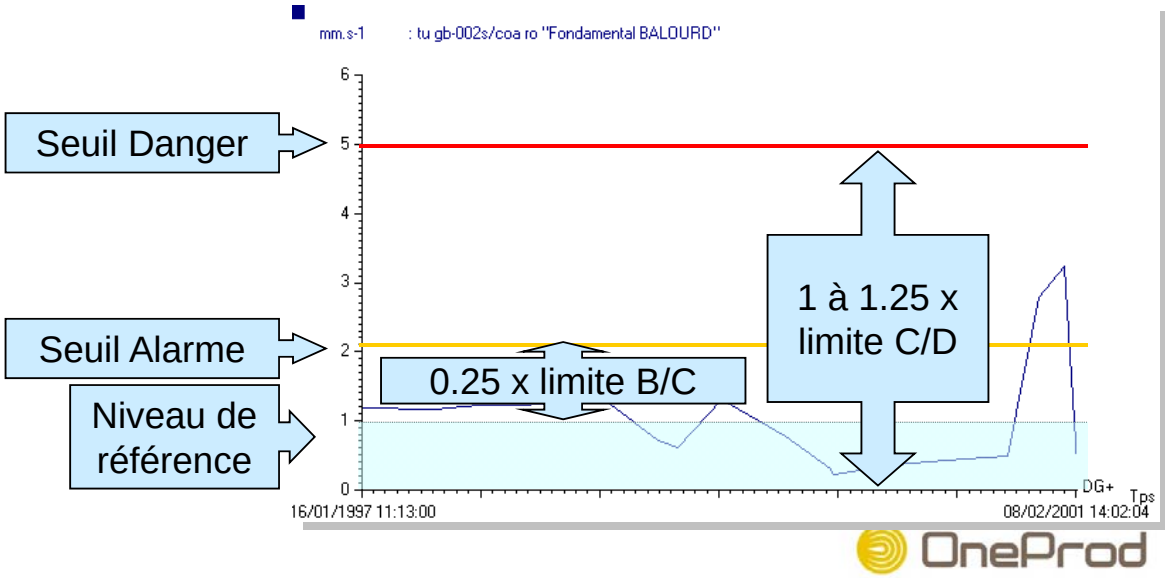
- Seuil Alarme
  - A 25% de la limite supérieure de la zone B au dessus du niveau de référence (niveau atteint par la machine en bon état).
  - En l'absence de niveaux de référence, entre 1 et 1.25 fois la limite supérieure de la zone B.

- Seuil Danger
  - Valeur non liée au niveau de référence : Entre 1 et 1.25 fois la limite supérieure de la zone C.

OneProd

4 – Surveillance des Machines

- **Les normes**
- La norme ISO 10816 : La détermination des seuils



OneProd

85