

Analyse vibratoire des machines tournantes

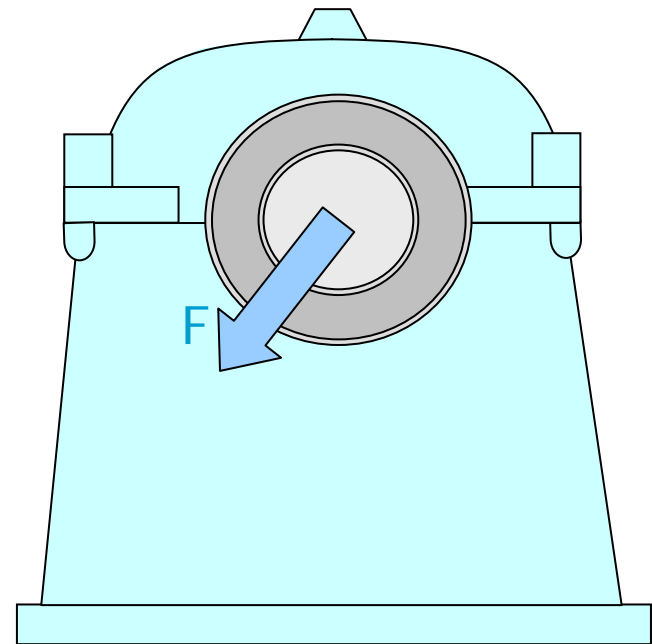
La Surveillance des Machines

Chapitre 4

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.

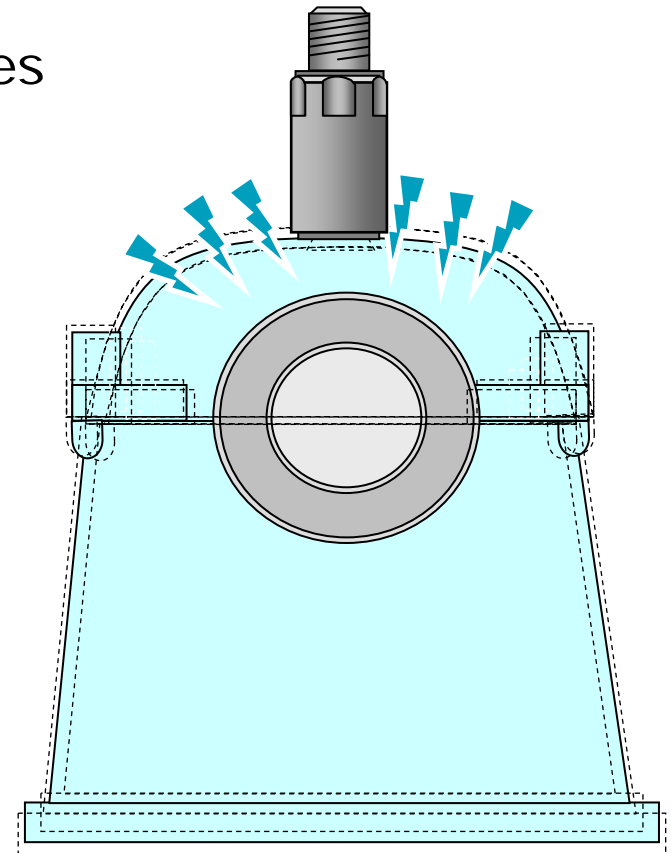


La mesure des vibrations

► Les mesures de vibrations absolues

Le type de capteur utilisé pour la mesure des vibrations dépend directement du type de palier rencontré :

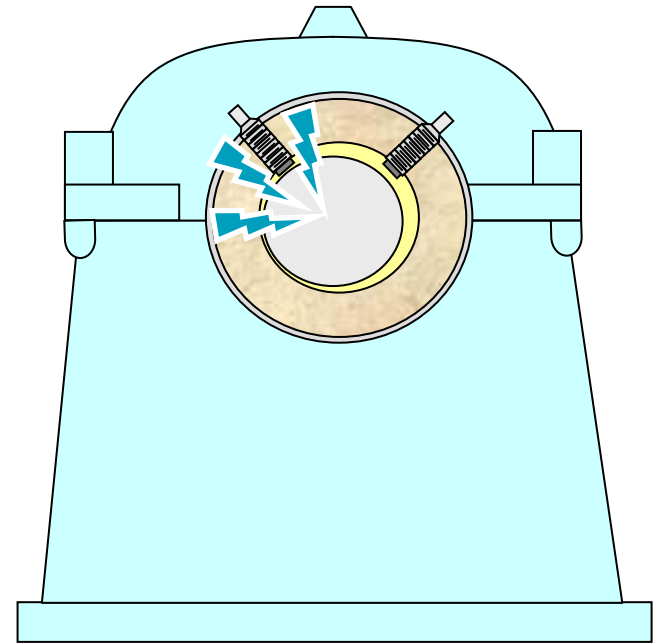
Les **accéléromètres** permettent la mesure des **vibrations absolues**. Ils sont utilisés pour l'instrumentation des **paliers à roulement**.



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**.

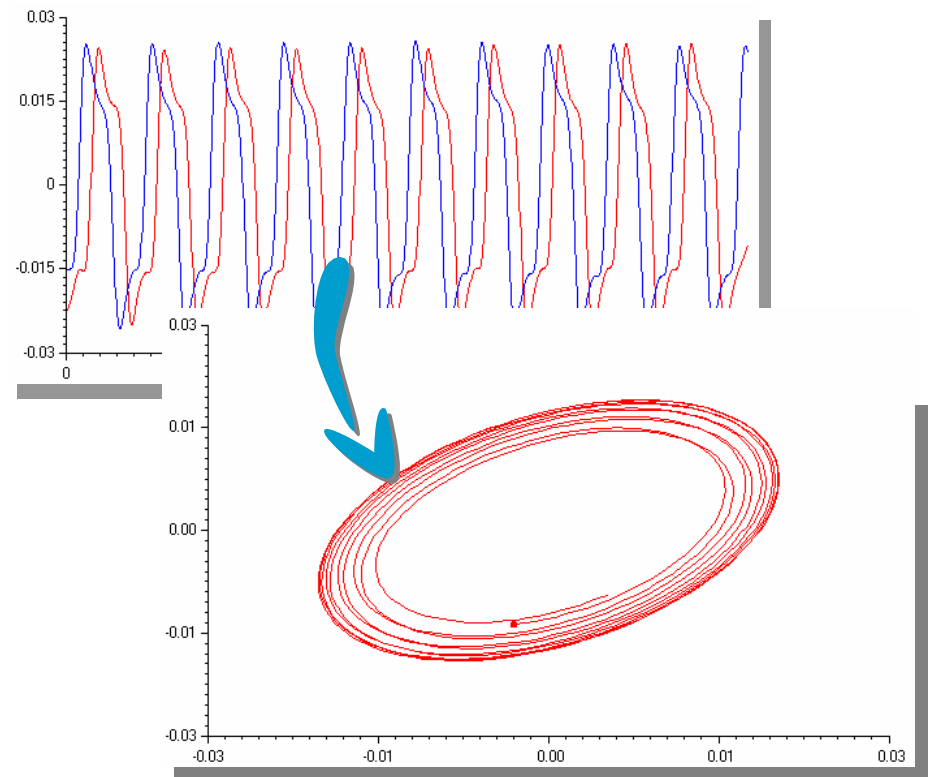


La mesure des vibrations

► Les mesures de déplacement relatives

Les sondes de déplacement permettent la mesure des déplacements des arbres dans les paliers lisses.

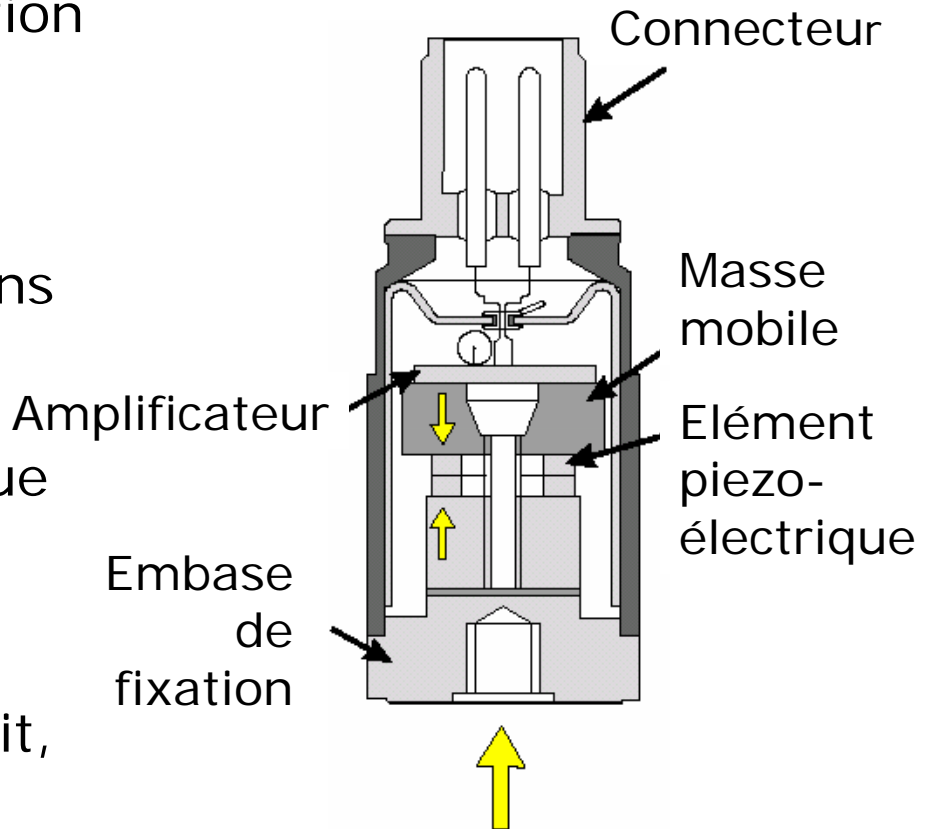
Elles permettent notamment la visualisation de **l'orbite** de l'arbre lorsqu'elles sont utilisées par paire dans une direction radiale.



Les capteurs de vibration

▶ L'accéléromètre : Constitution

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



Les capteurs de vibration

- ▶ L'accéléromètre : Principe de fonctionnement

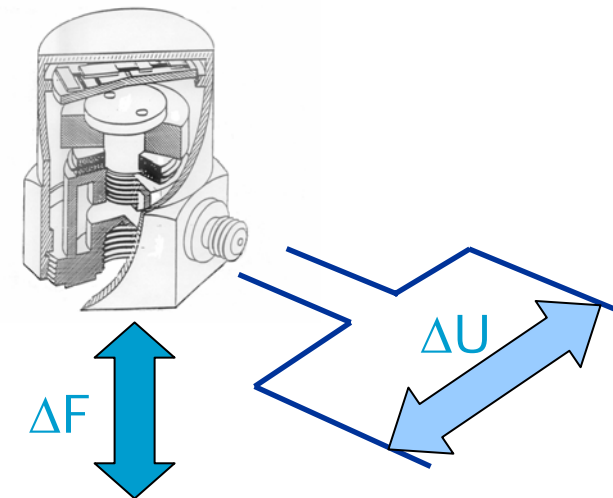
$$\Delta U = f(\Delta F)$$

$$\Delta F = M \cdot \Delta \gamma$$

$$M = C^{te}$$



$$\Delta U = f_1(\Delta \gamma)$$

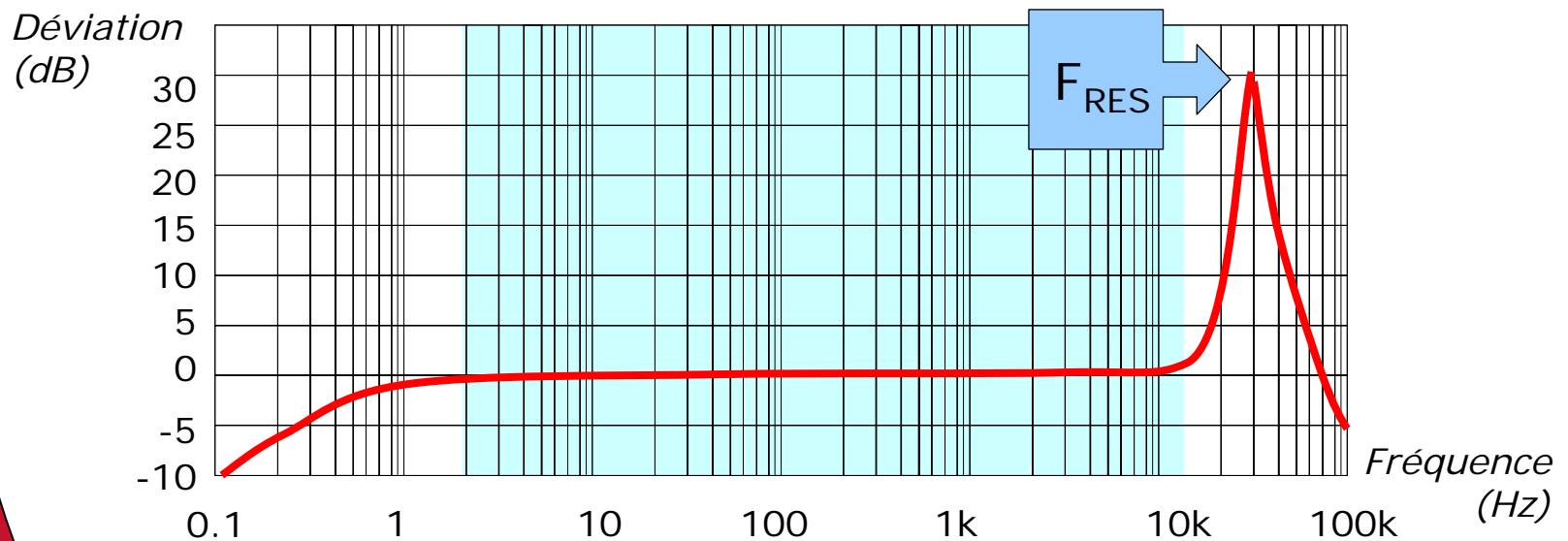


Remarque : Par sa constitution, l'accéléromètre mesure une accélération selon un axe défini, en général perpendiculaire à la surface de fixation.

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.

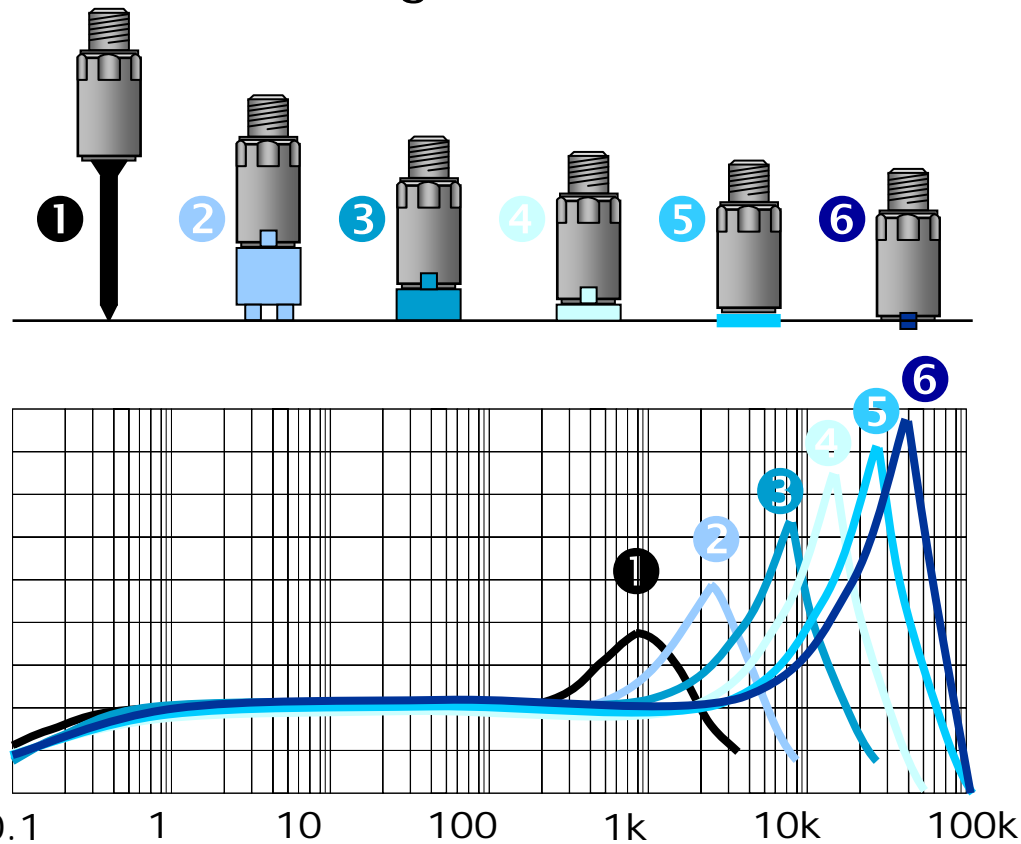


Exemple : Bande passante 2Hz - 12kHz

Les capteurs de vibration

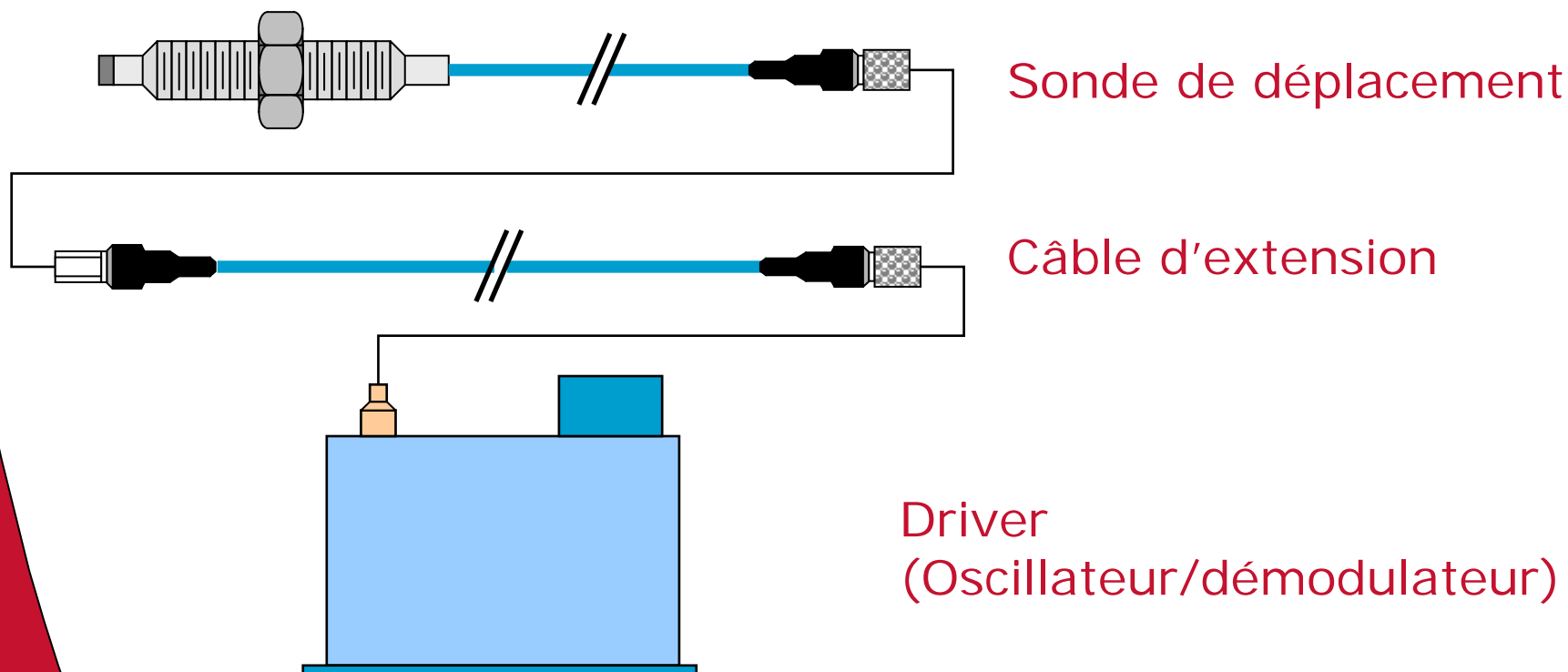
- L'accéléromètre : L'influence du montage sur la B.P

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**.



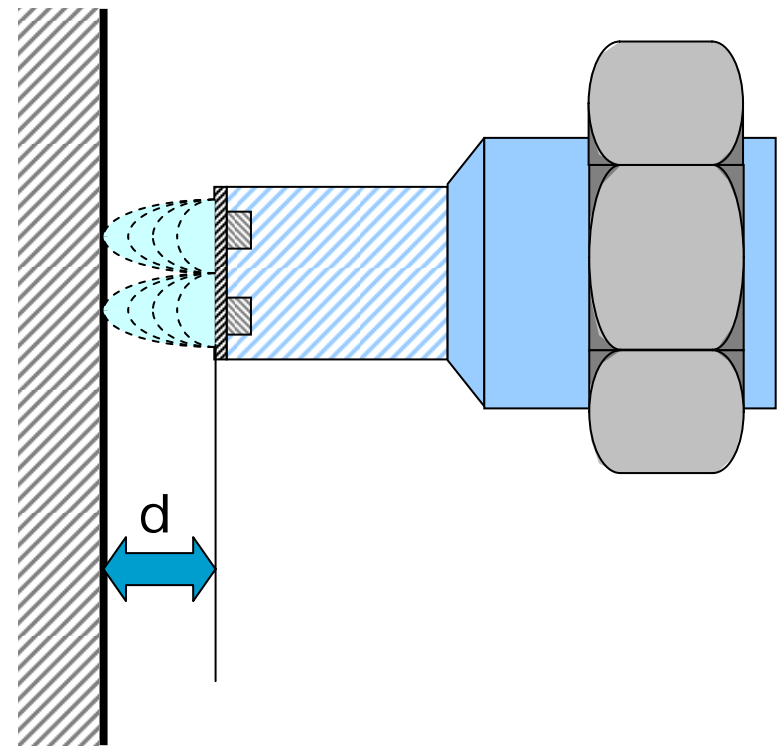
Les capteurs de vibration

► La sonde de déplacement : Constitution



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.

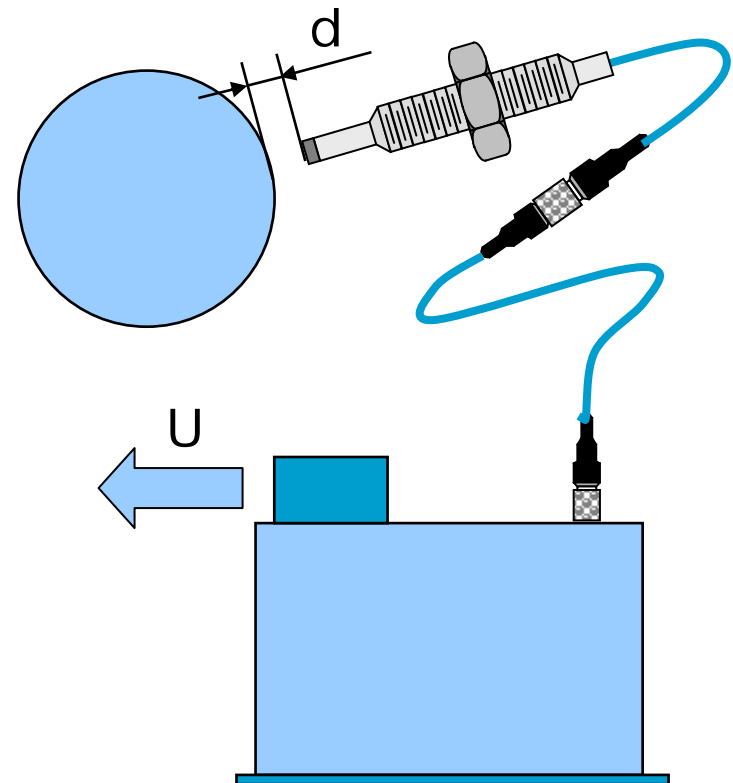


Les capteurs de vibration

► 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**.

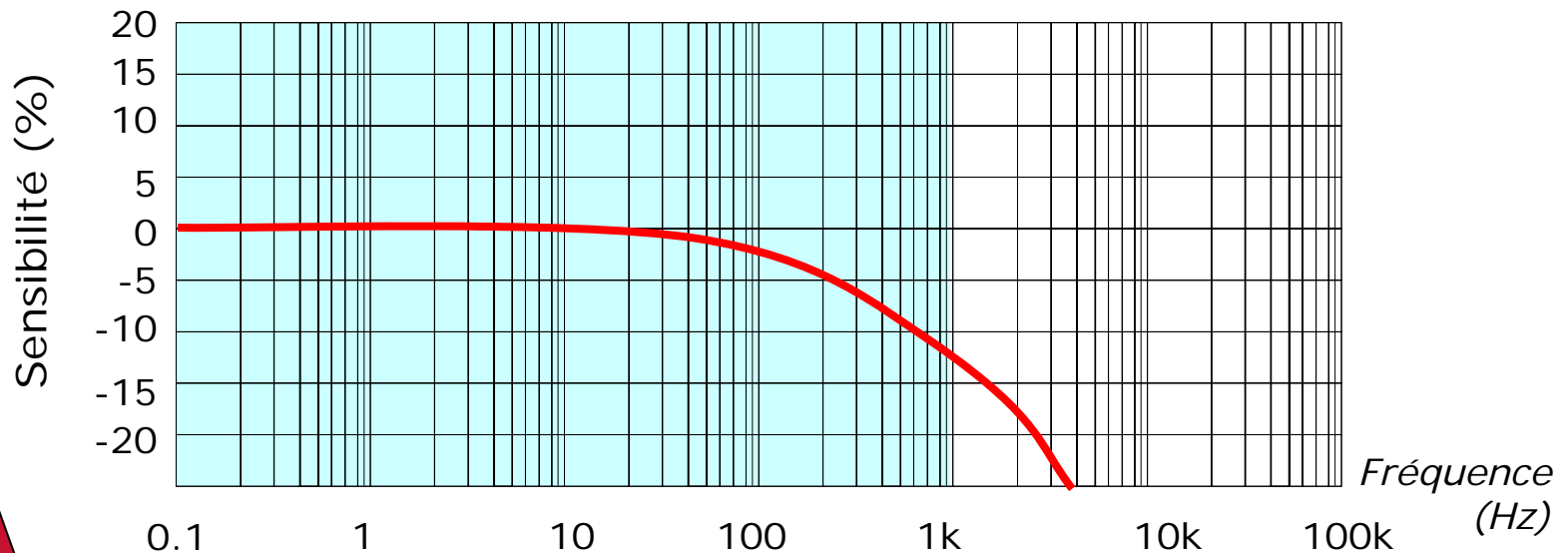
◆ Il s'agit donc d'un **capteur sans contact**.



$$U = F(d)$$

Les capteurs de vibration

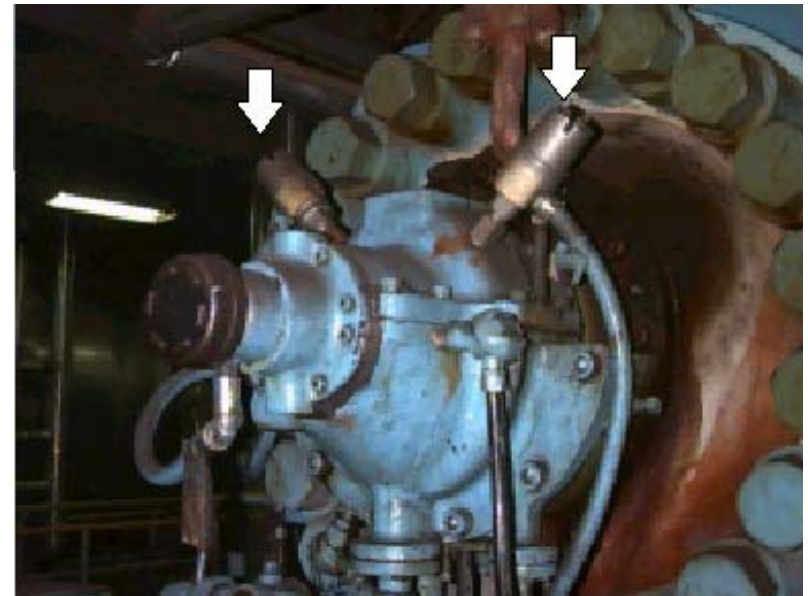
- ▶ La sonde de déplacement : La Bande passante
 La bande passante de ce type de capteur est de l'ordre de [0-10kHz]. Néanmoins, la fréquence maximale des phénomènes vibratoires observables en déplacement n'excède pas 1kHz . *A titre d'exemple, 100 g à 10kHz correspond à 0.25 μm en déplacement.*



Les capteurs de vibration

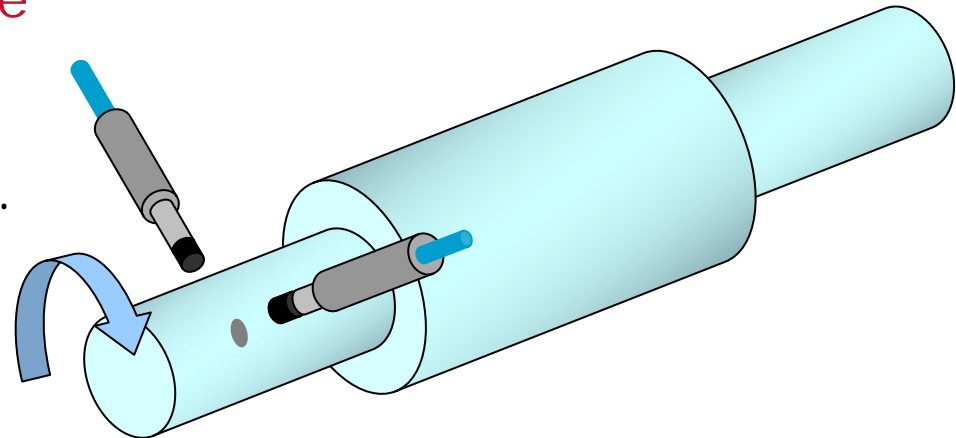
► La sonde de déplacement : Les différents montages
On utilise les sondes de proximité dans différentes configurations selon le besoin :

- ◆ 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



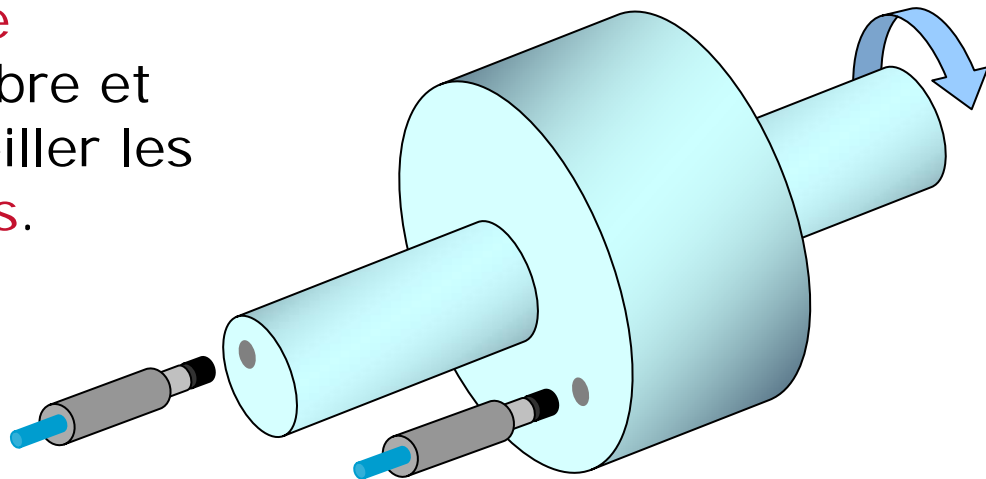
Les capteurs de vibration

- ▶ 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.



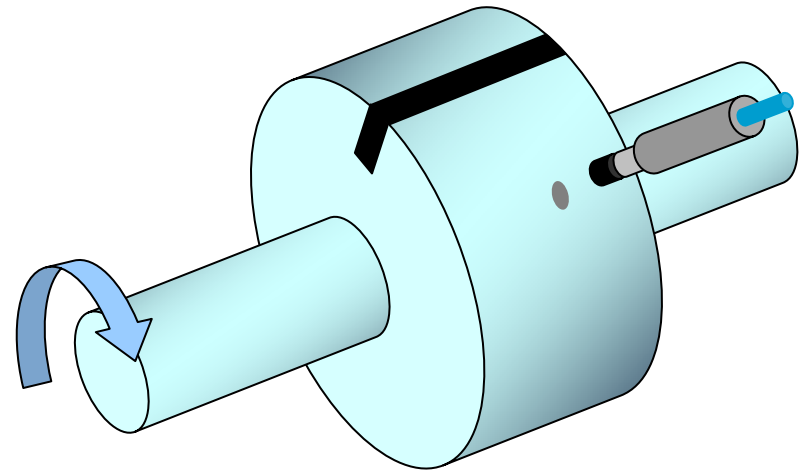
Les capteurs de vibration

- ▶ 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**.



Les capteurs de vibration

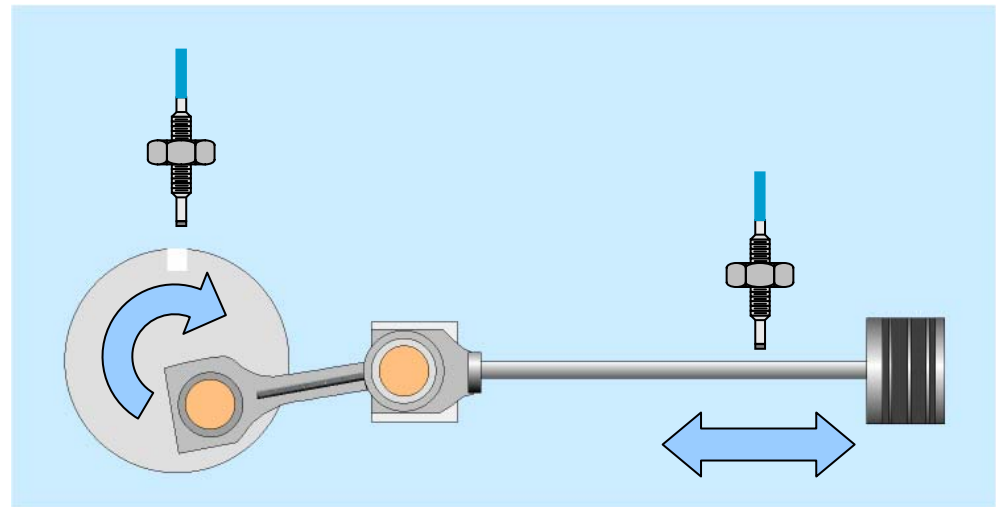
- ▶ La sonde de déplacement : Les mesures de vitesse
On utilise généralement une sonde disposée en radial et un repère sur l'arbre réalisé par usinage.
- ◆ Le passage du repère devant la sonde génère un échelon de tension.
- ◆ Ce « **Top** » peut être utilisé pour le calcul de la **vitesse**, ou comme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



Les capteurs de vibration

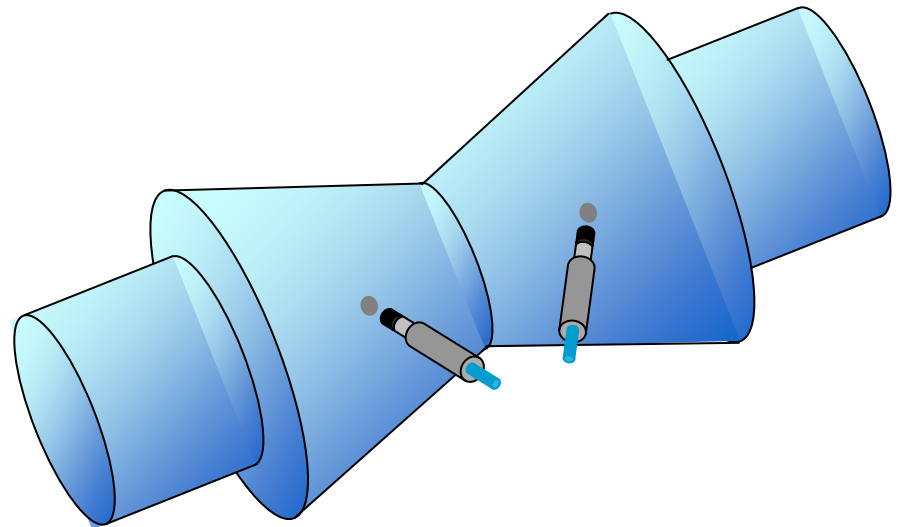
- ▶ La sonde de déplacement : Les mesures d'affaissement de tige de piston (« Rod Drop Monitoring »)
L'usure des **segments porteurs** provoque l'**affaissement** progressif de la tige de piston.

- ◆ 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.



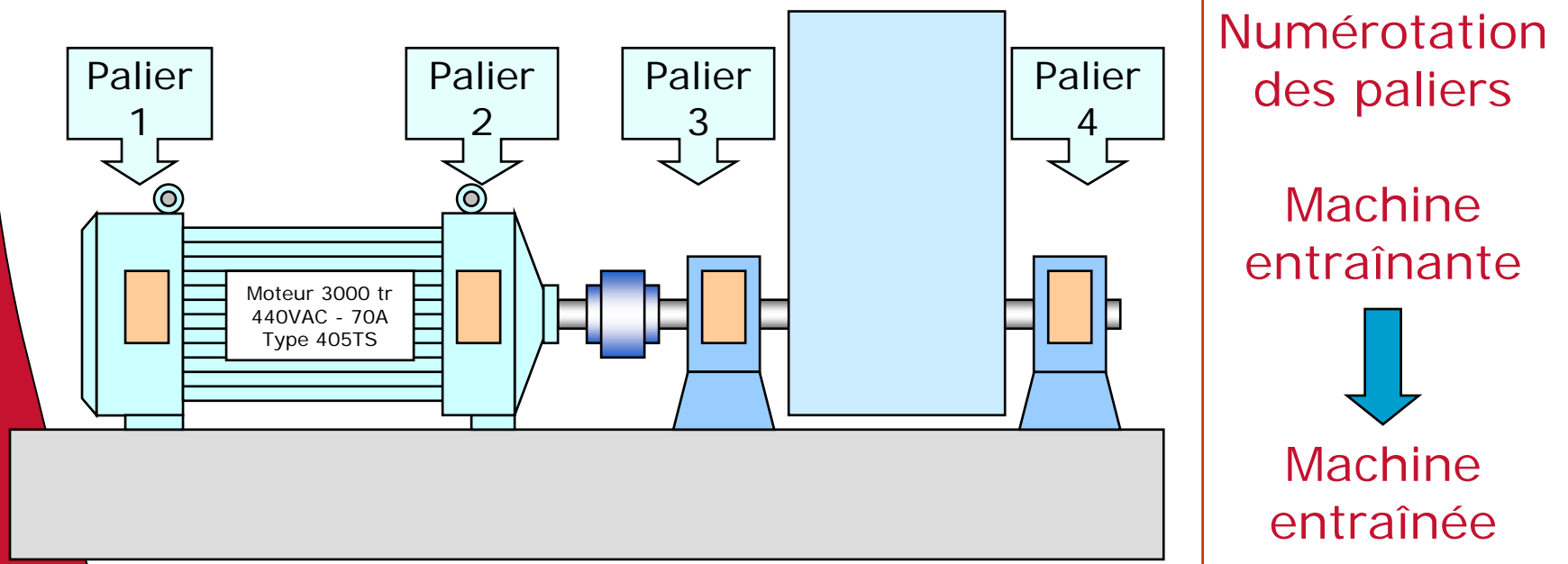
Les capteurs de vibration

- ▶ 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.



Les points de mesure

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

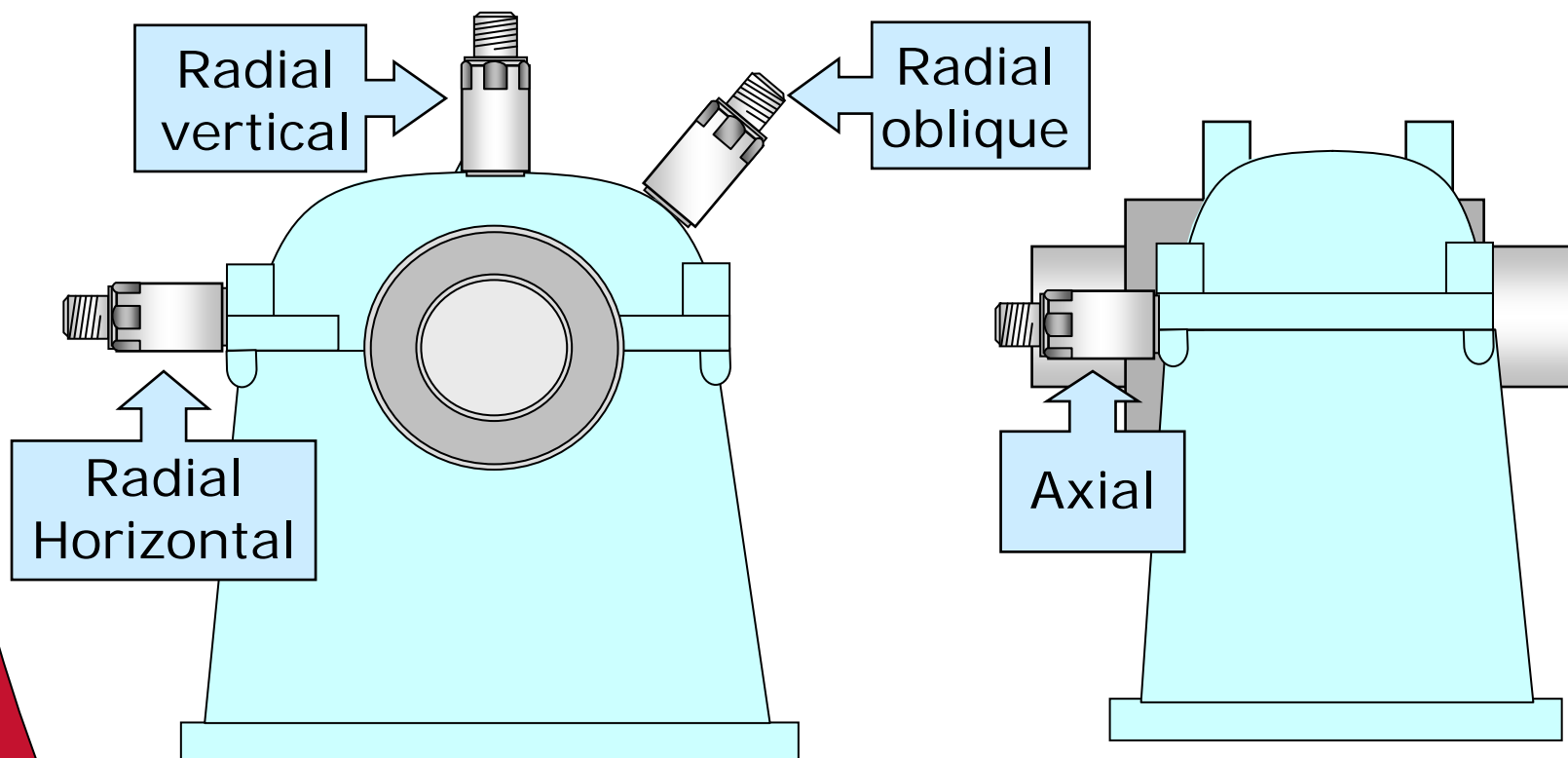


Les points de mesure

- ▶ 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.

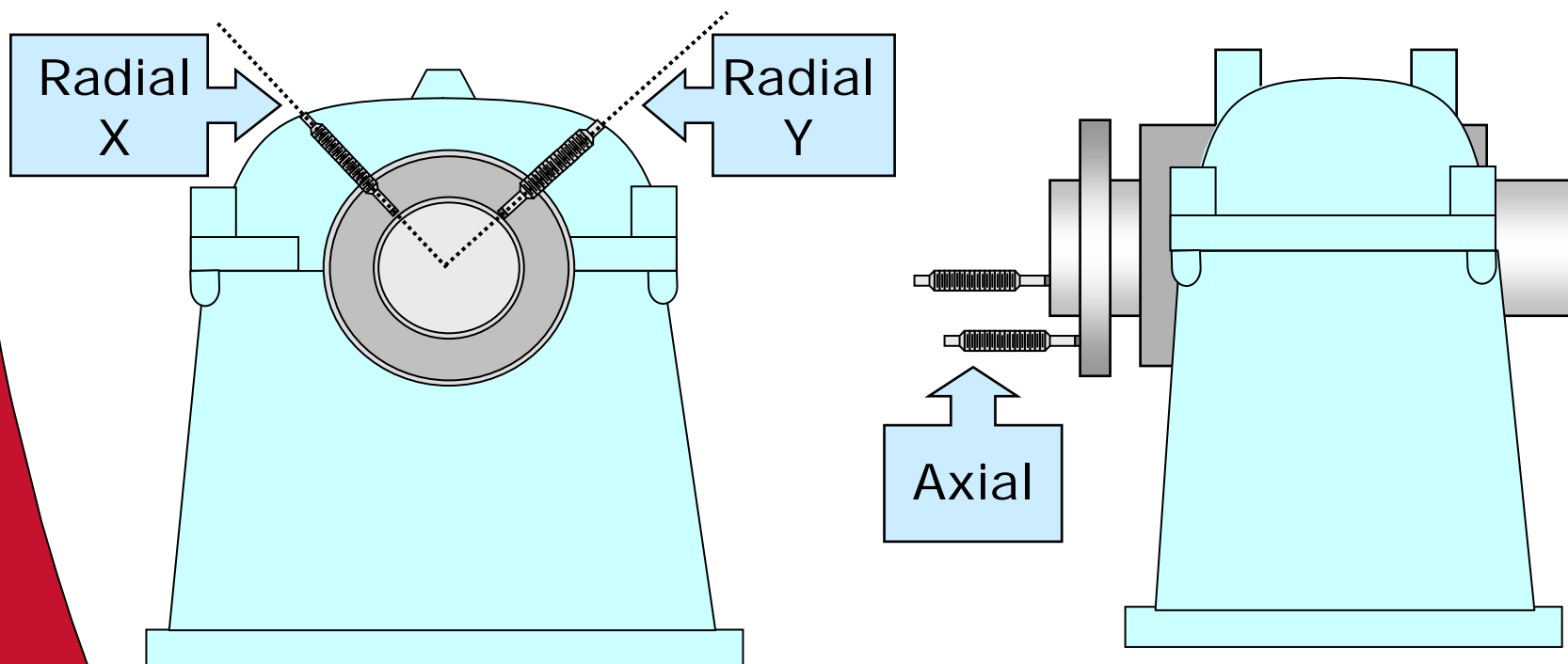
Les points de mesure

- Direction des points de mesure pour un accéléromètre



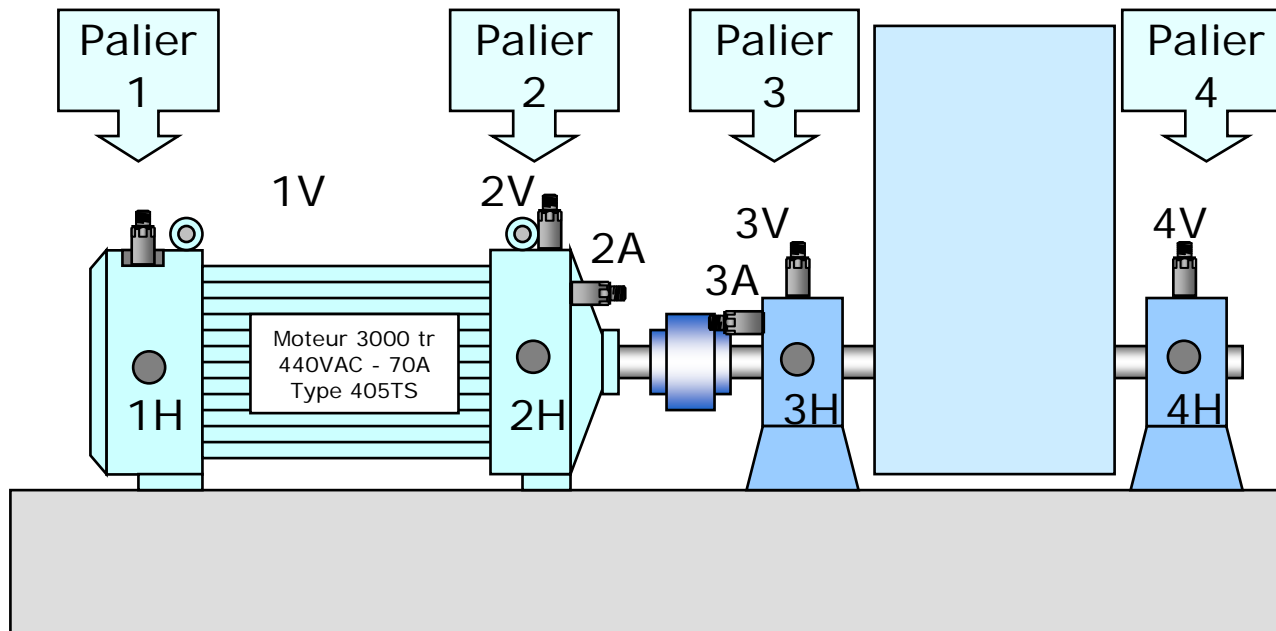
Les points de mesure

- Direction des points de mesure pour une sonde de déplacement



Les points de mesure

- Direction des points de mesure : Exemple



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**.

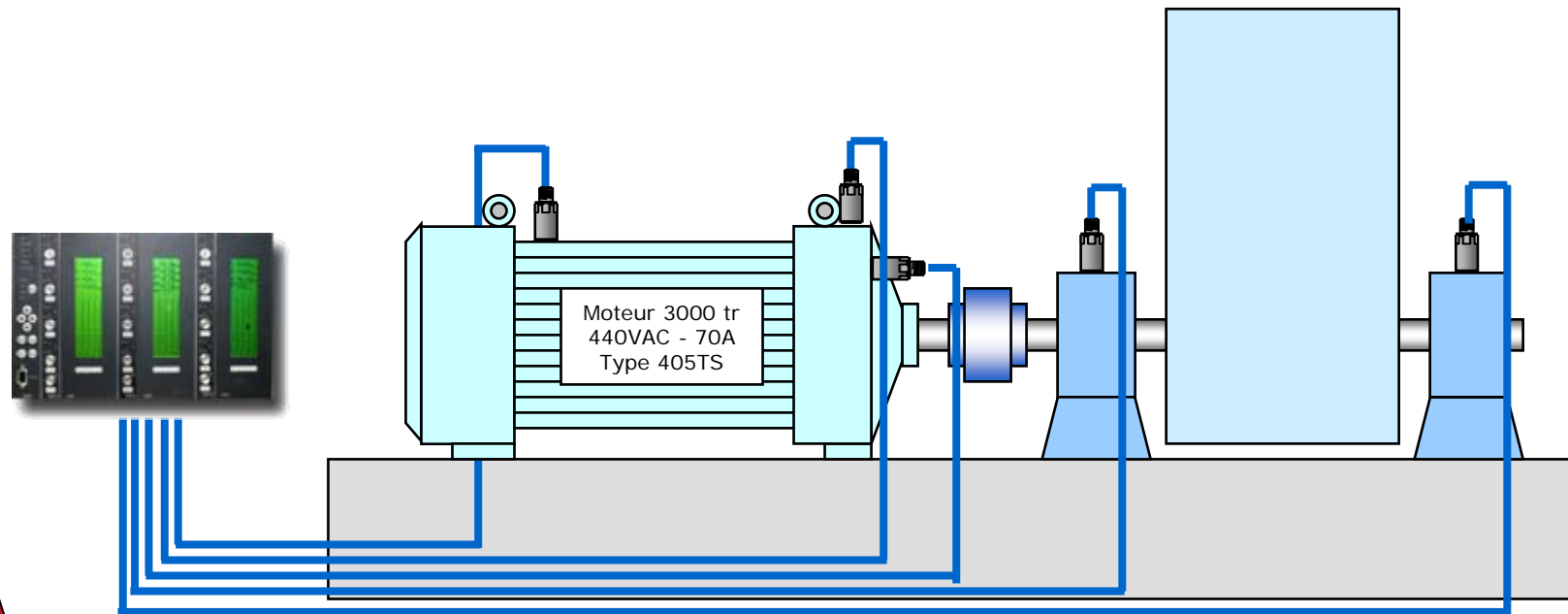
Le type de surveillance à appliquer à une machine dépend plusieurs critères parmi lesquels :

- ➔ 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

Les appareils de mesure

► La surveillance **on-line**

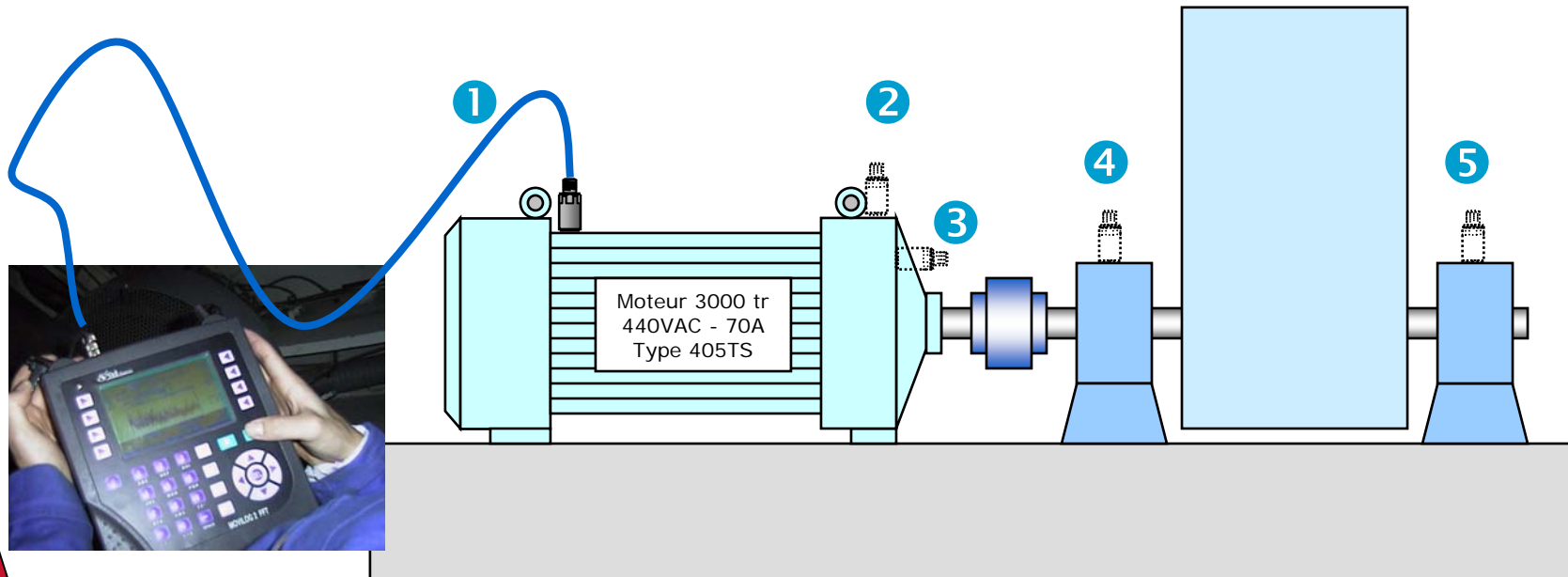
Les capteurs sont installés à demeure sur les machines et connectés à un **système de surveillance**.



Les appareils de mesure

► La surveillance **off-line**

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



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)

Les appareils de mesure

► Couplage des appareils

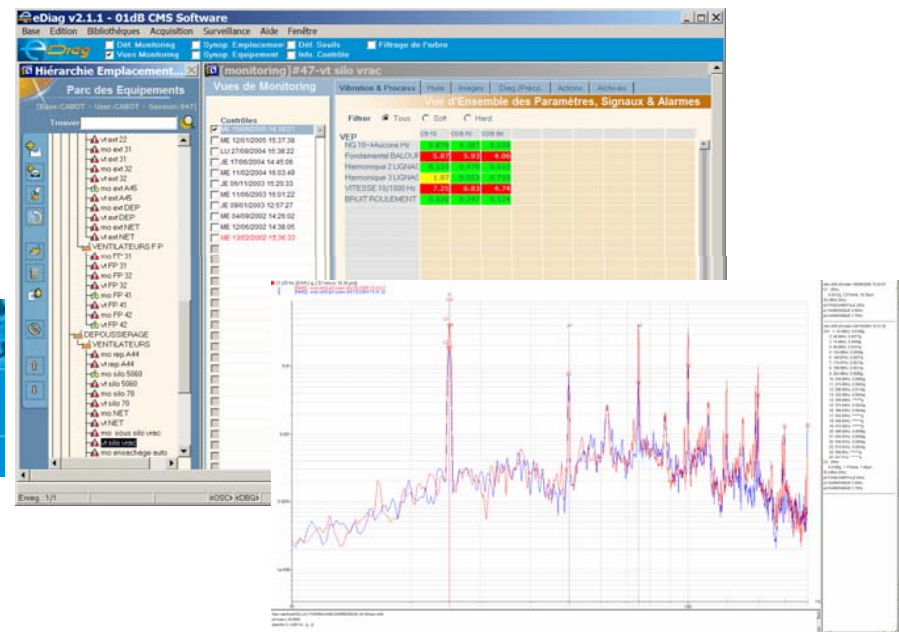
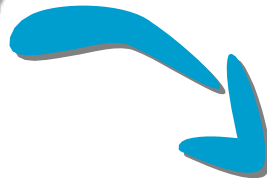
L'ensemble des données vibratoires et process peuvent être archivées, traitées et affichées grâce à des logiciels d'application spécifiques tels que EDiag.



Off-line



On-line



Les paramètres de surveillance

► Introduction

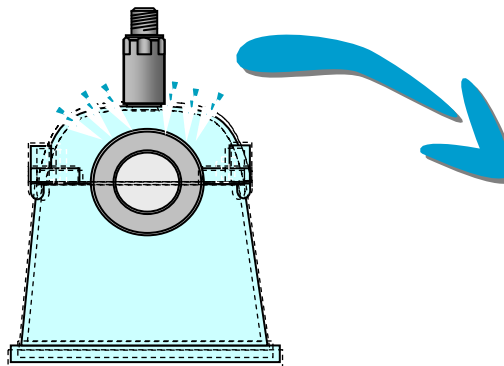
Les paramètres de surveillance sont définis au niveau de la **base de données**. Ils fixent :

- ◆ Les caractéristiques du signal à mesurer :
 - ➔ Capteur, grandeur mesurée, type de détection
- ◆ La 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,...)

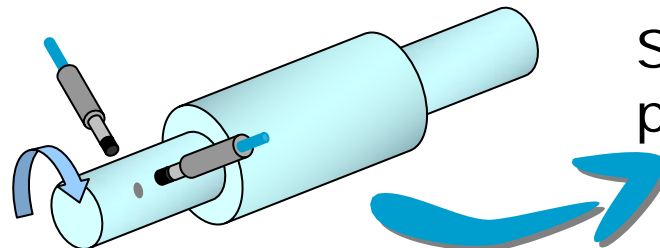
Les paramètres de surveillance

► Le type de capteur

Le type de capteur utilisé dépend du type de paliers de la machine :



Accéléromètre pour les paliers à roulement



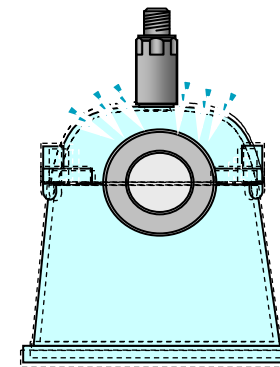
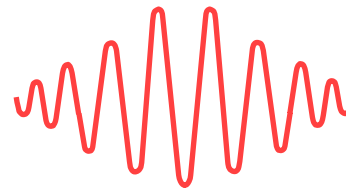
Sonde de déplacement pour les paliers lisses

Les paramètres de surveillance

► La grandeur mesurée

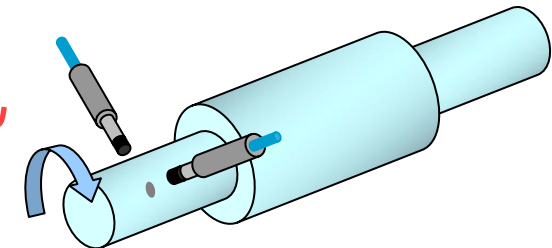
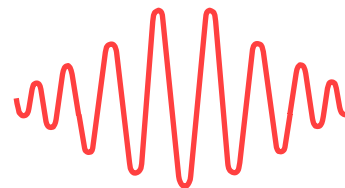
Selon le type de capteur utilisé, le signal utile peut être exprimé en :

- ◆ Accélération (g)
- ◆ Vitesse (mm/s)
- ◆ Déplacement (μm)



pour un **accéléromètre**

- ◆ Déplacement (μm)

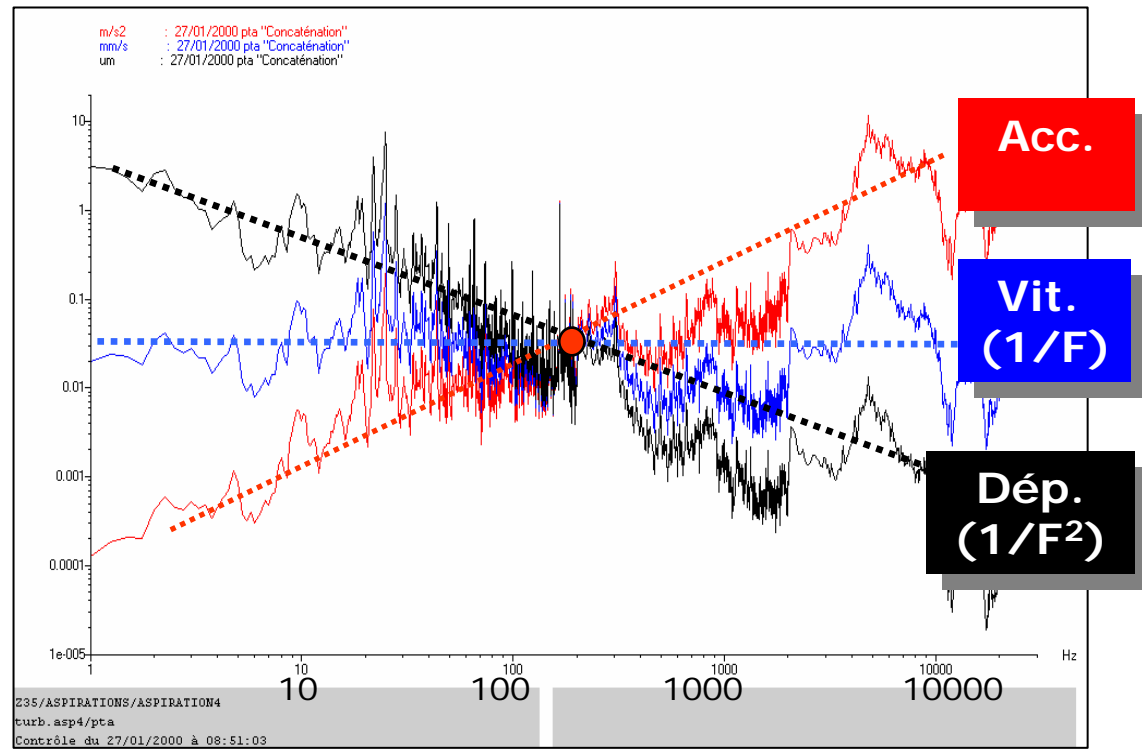


pour une **sonde de déplacement**

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.



Les paramètres de surveillance

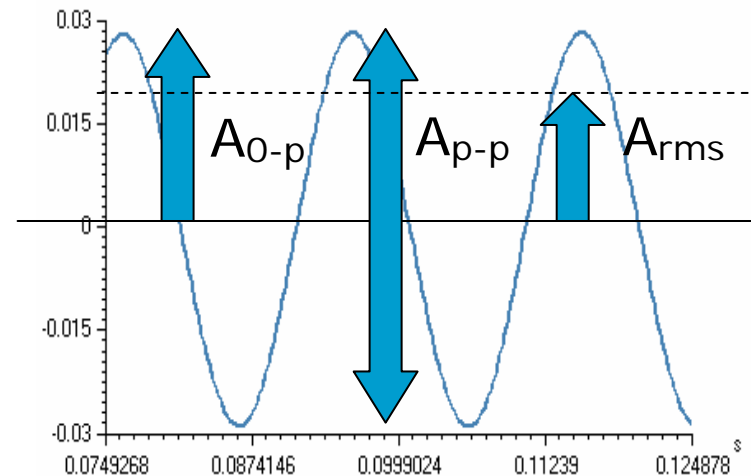
► Le type de détection

Le type de détection doit être clairement identifié parmi :

- ◆ L'amplitude crête A_{0-p}
- ◆ L'amplitude crête à crête A_{p-p}
- ◆ La valeur moyenne A_{moy}
- ◆ La valeur efficace A_{eff} ou A_{rms}

En pratique, on utilise souvent :

- ◆ La **valeur efficace** A_{rms} pour les mesures issues d'**accéléromètres** (en accélération, vitesse ou déplacement);
- ◆ L'**amplitude crête à crête** A_{p-p} pour les mesures issues de **sondes de déplacement** (en déplacement).

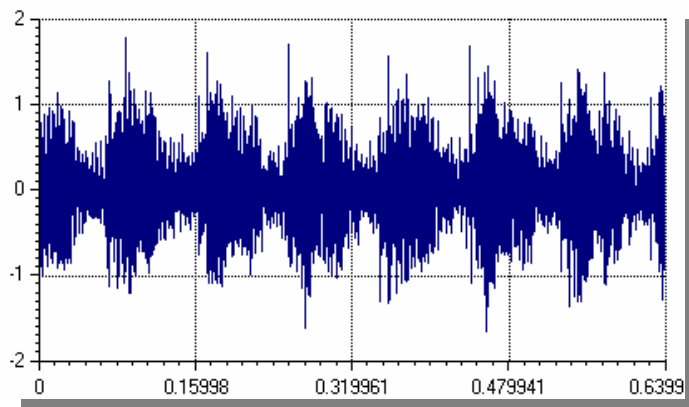


Les paramètres de surveillance

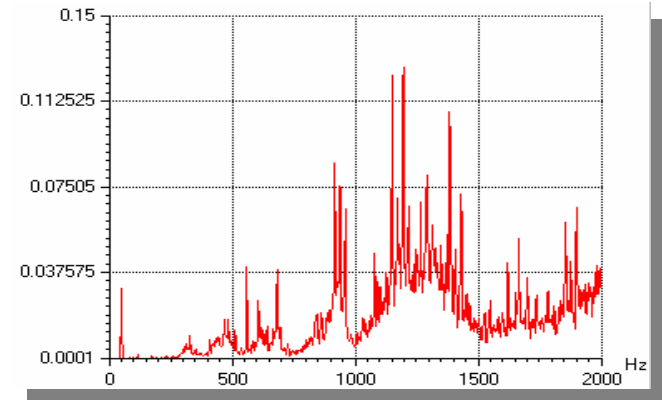
► Le format de l'acquisition

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)

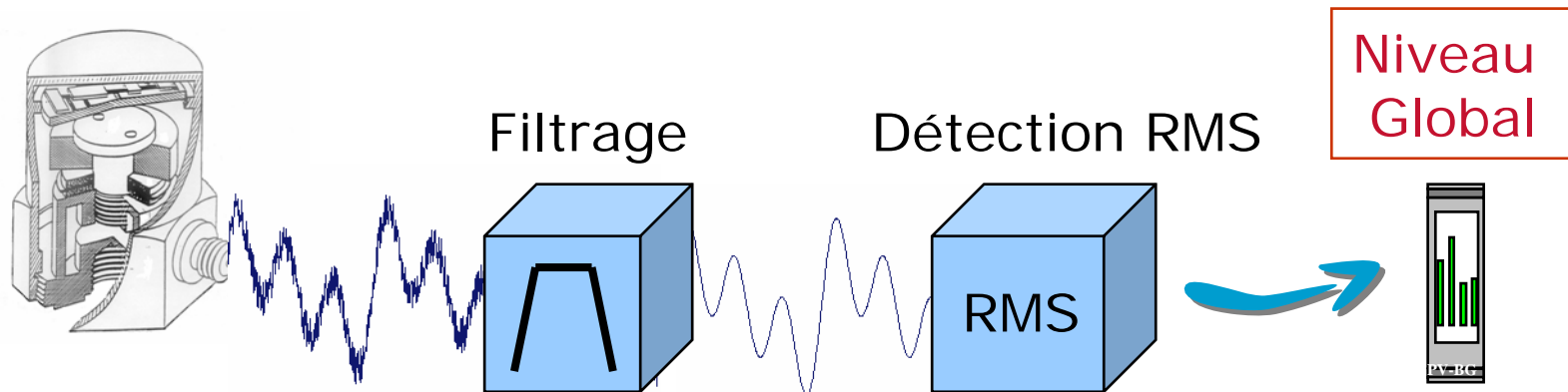


Les paramètres de surveillance

► 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.

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 :

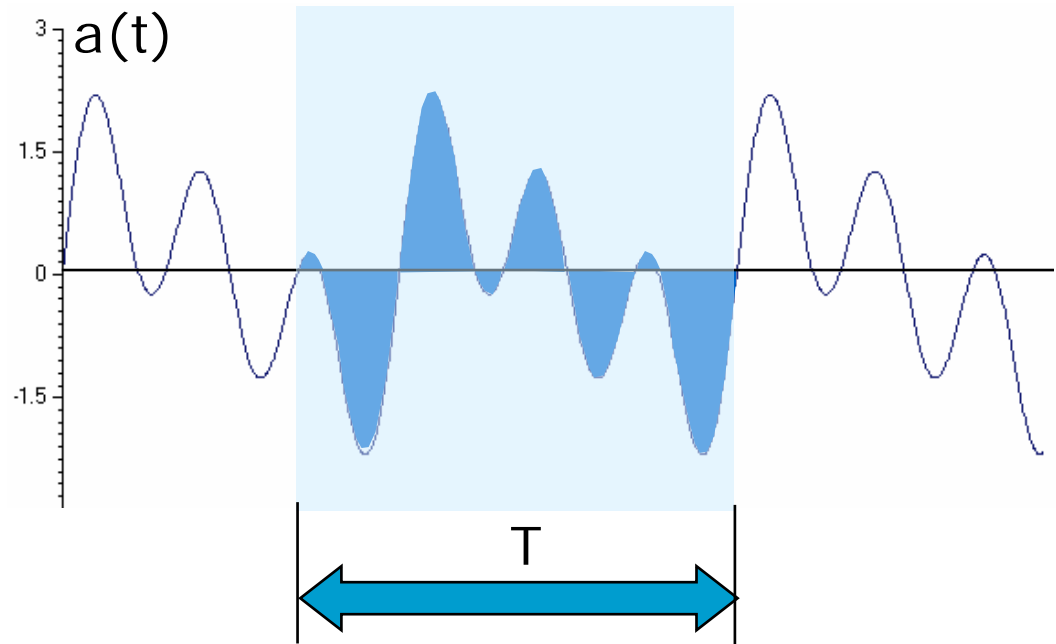
- ➔ Niveau global Accélération (exemple): [2-20000] Hz
- ➔ Niveau global Vitesse (normalisé): [10-1000] Hz
- ➔ Niveau global Déplacement (exemple) : [3-300] Hz

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 :

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

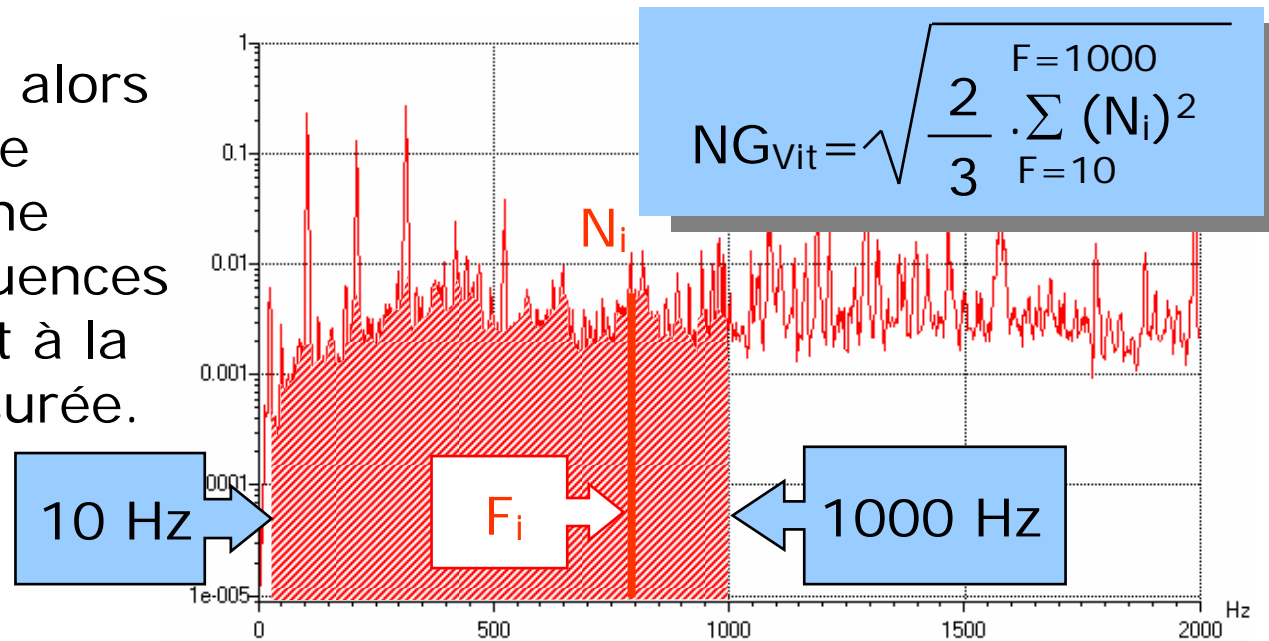
T = constante de temps, supérieure à la période maximale des principales composantes du signal a(t).



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.



Ex : Niveau Global Vitesse sur [10-1000]Hz

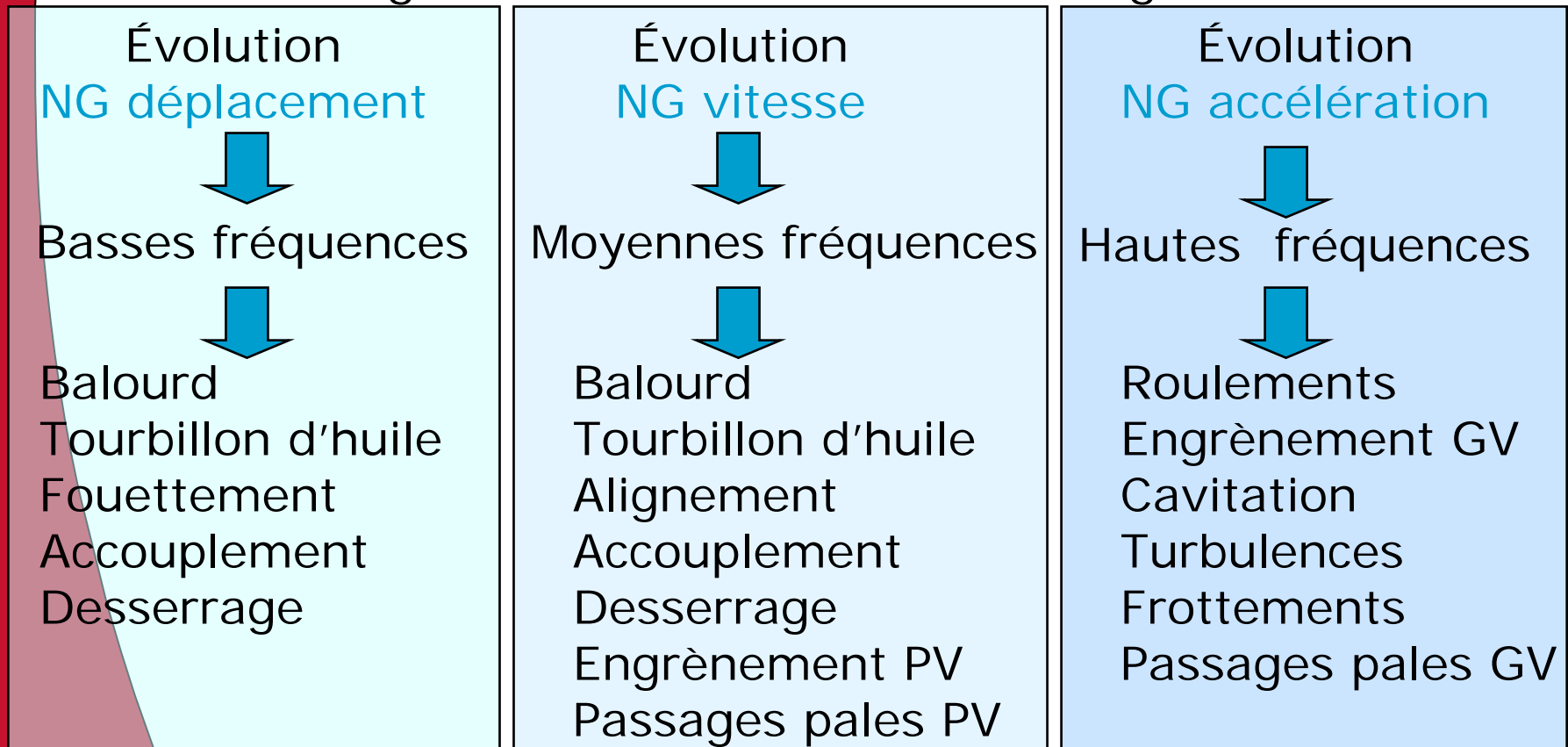
Remarque : La durée d'intégration est dans ce cas réduite.

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.

Les paramètres de surveillance

► Le niveau global : Utilisation des niveaux globaux

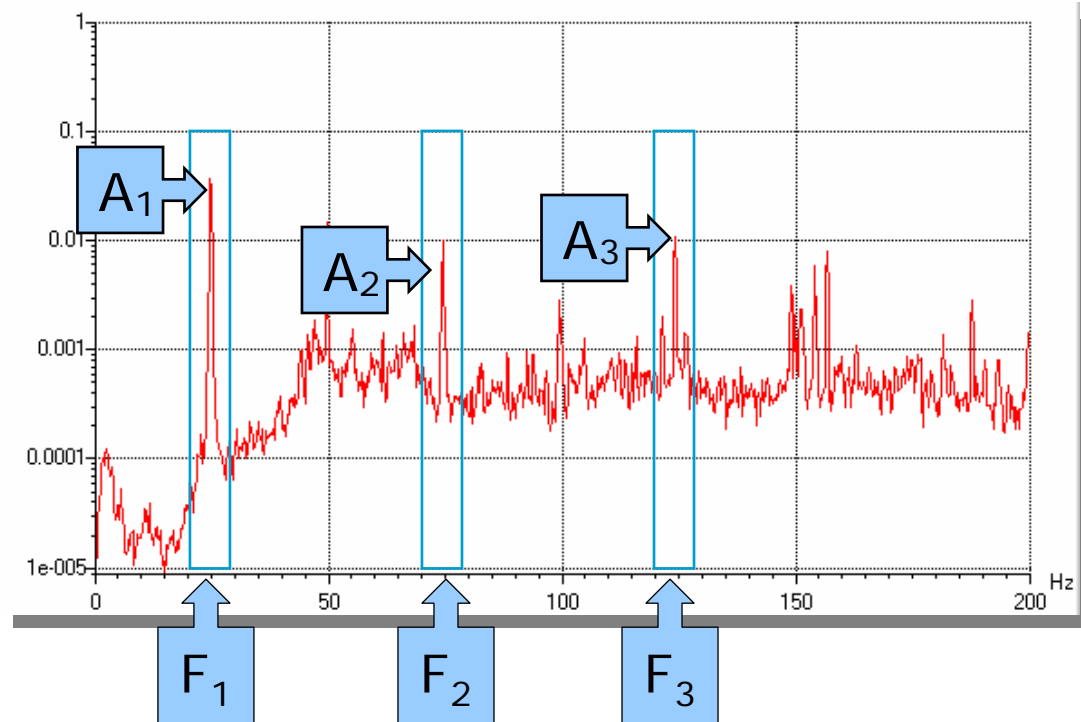


Les paramètres de surveillance

► 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



Les paramètres de surveillance

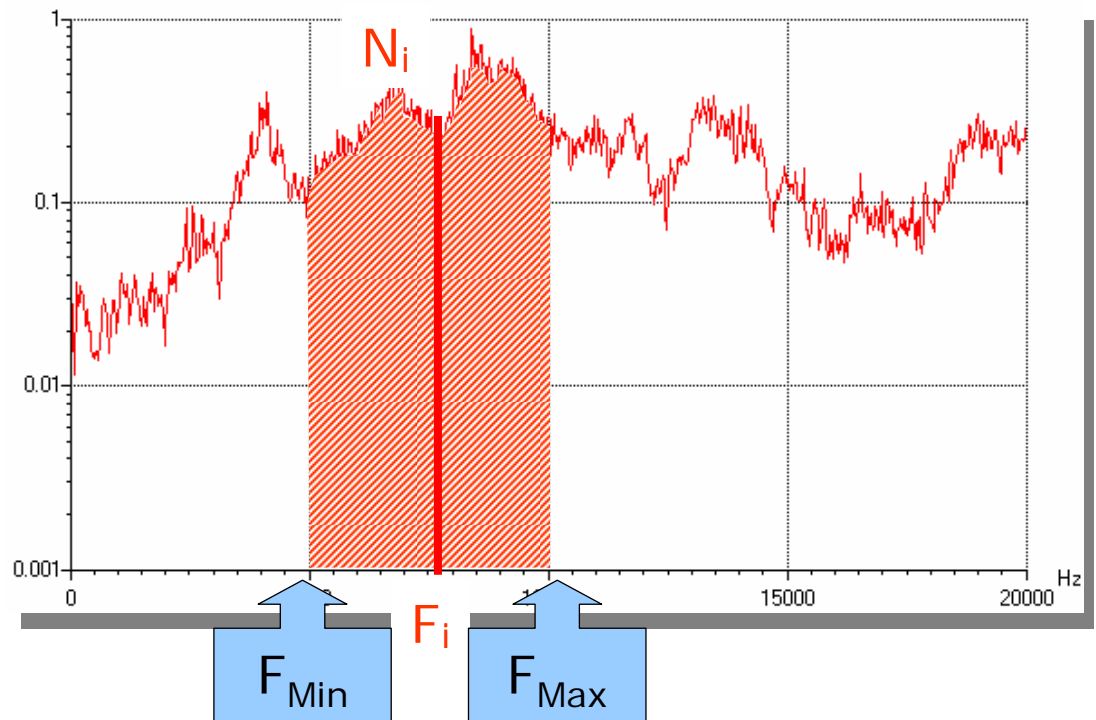
- ▶ Niveau d'énergie dans une bande de fréquences
Il est utilisé pour le suivi des **phénomènes aléatoires** :

- ◆ Roulements
- ◆ Cavitation, ...

Le **niveau d'énergie** dans la bande $[F_{\min}; F_{\max}]$ est donné par :

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

(pour Hanning)

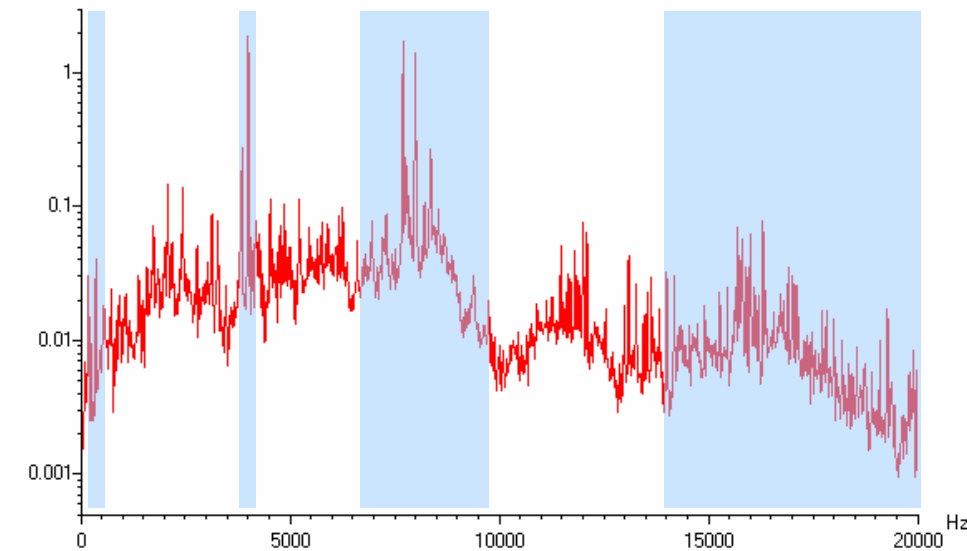


Les paramètres de surveillance

► 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



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 :

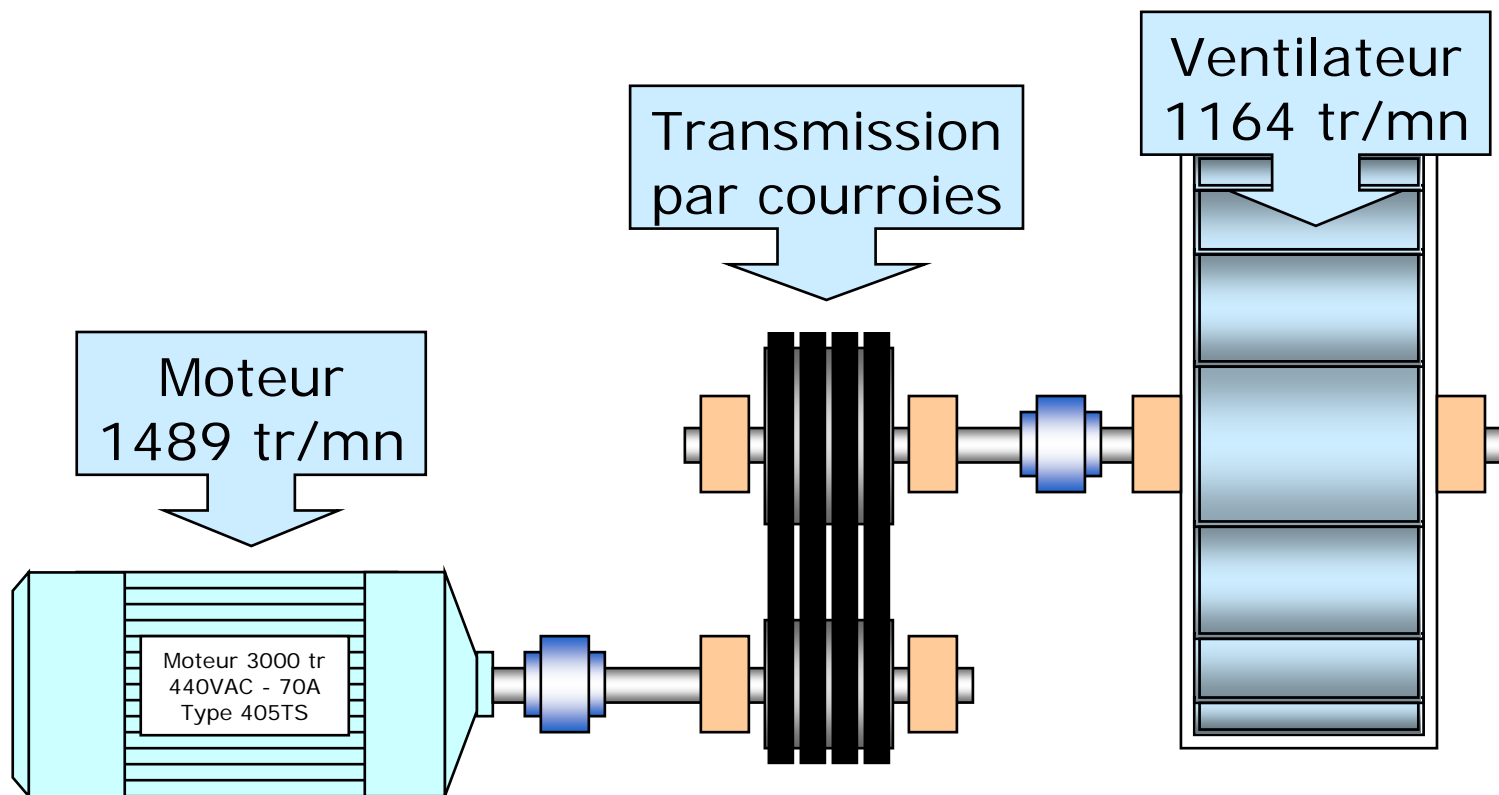
- ◆ Éléments constitutifs de la machine :
 - ➔ Éléments mécaniques, chaînes cinématiques, dimensions

- ◆ Paramètres de fonctionnement :
 - ➔ Vitesse, puissance, charge

- ◆ Manifestations des phénomènes attendus
 - ➔ Fréquences caractéristiques, typologie spectrales

Les paramètres de surveillance

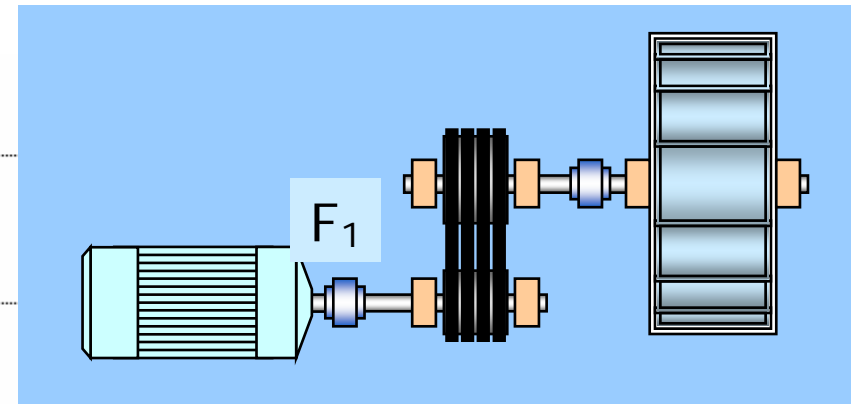
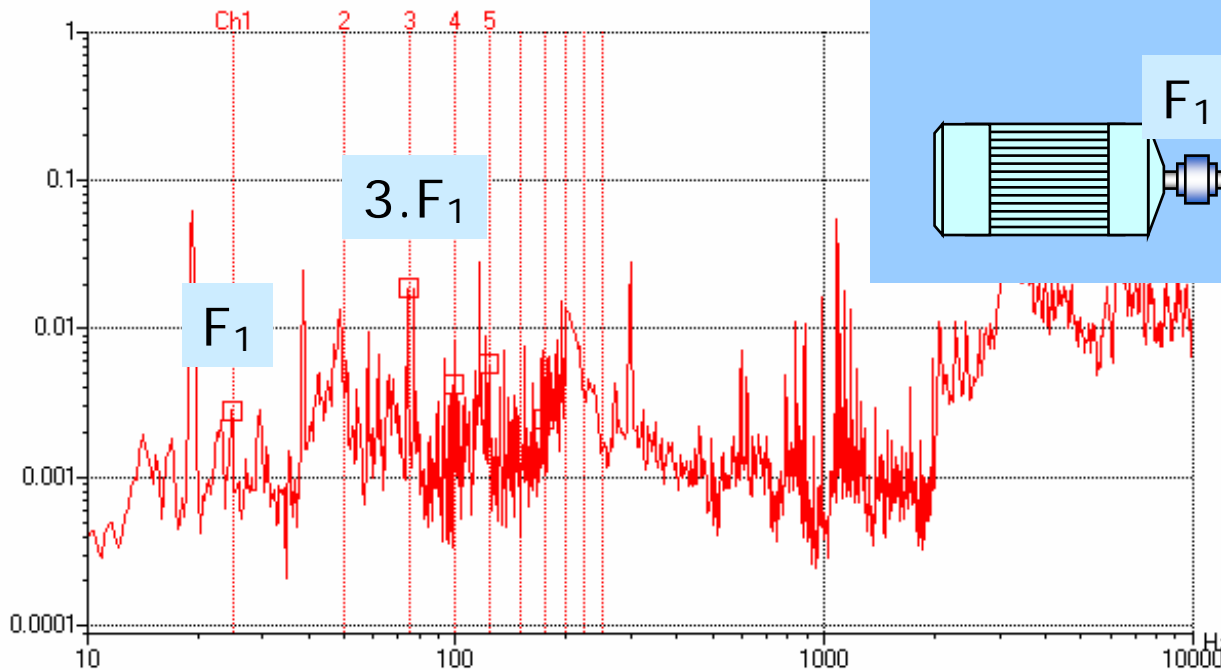
- L'analyse cinématique : Exemple d'un moto-ventilateur



Les paramètres de surveillance

► L'analyse cinématique : Exemple d'un moto-ventilateur

■ Ch1 (24.81 Hz, 0.00279 g)
g : 2907

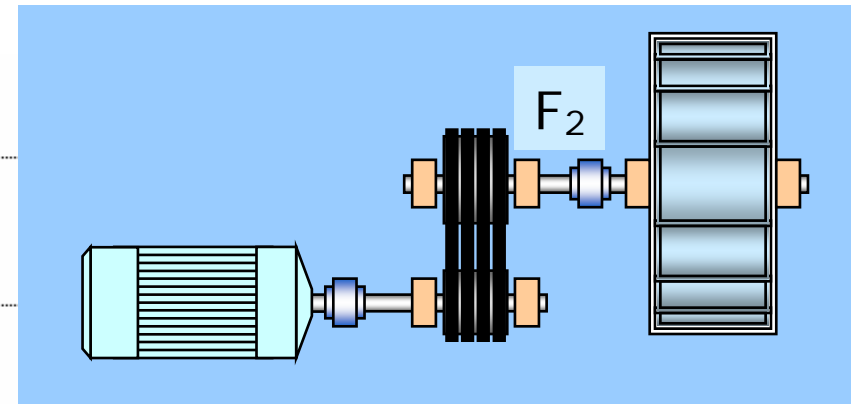
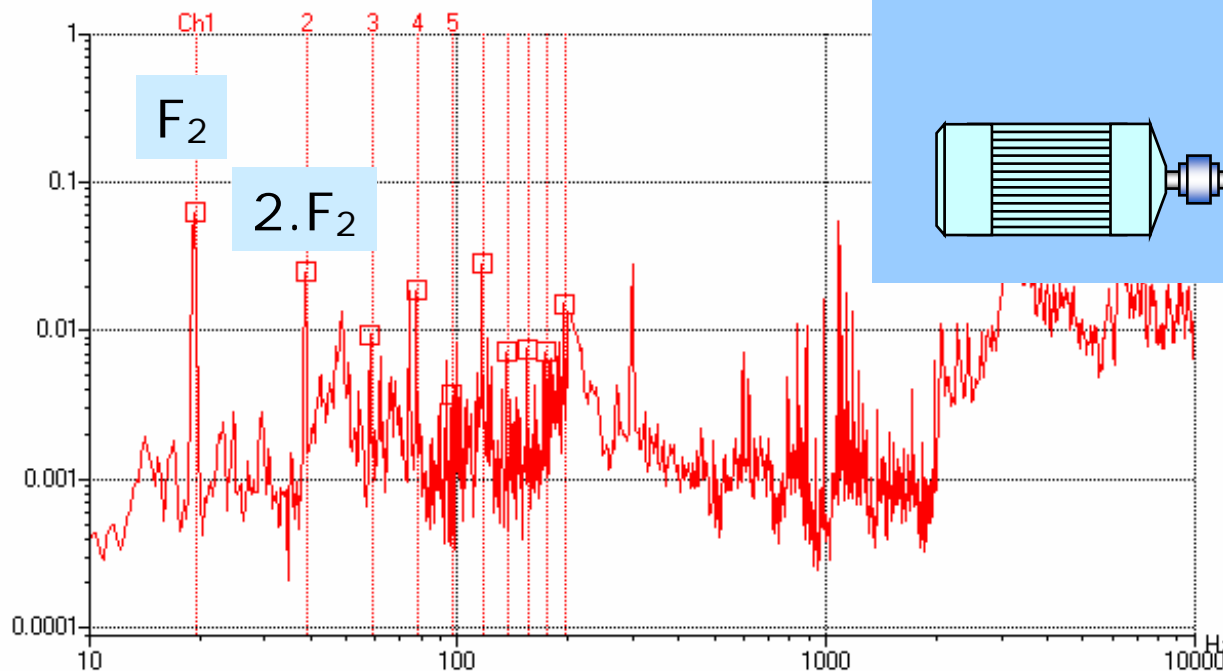


$F_1 = 24.81 \text{ Hz}$
 $2.F_1 = 49.62 \text{ Hz}$
 $3.F_1 = 74.43 \text{ Hz}$

Les paramètres de surveillance

- L'analyse cinématique : Exemple d'un moto-ventilateur

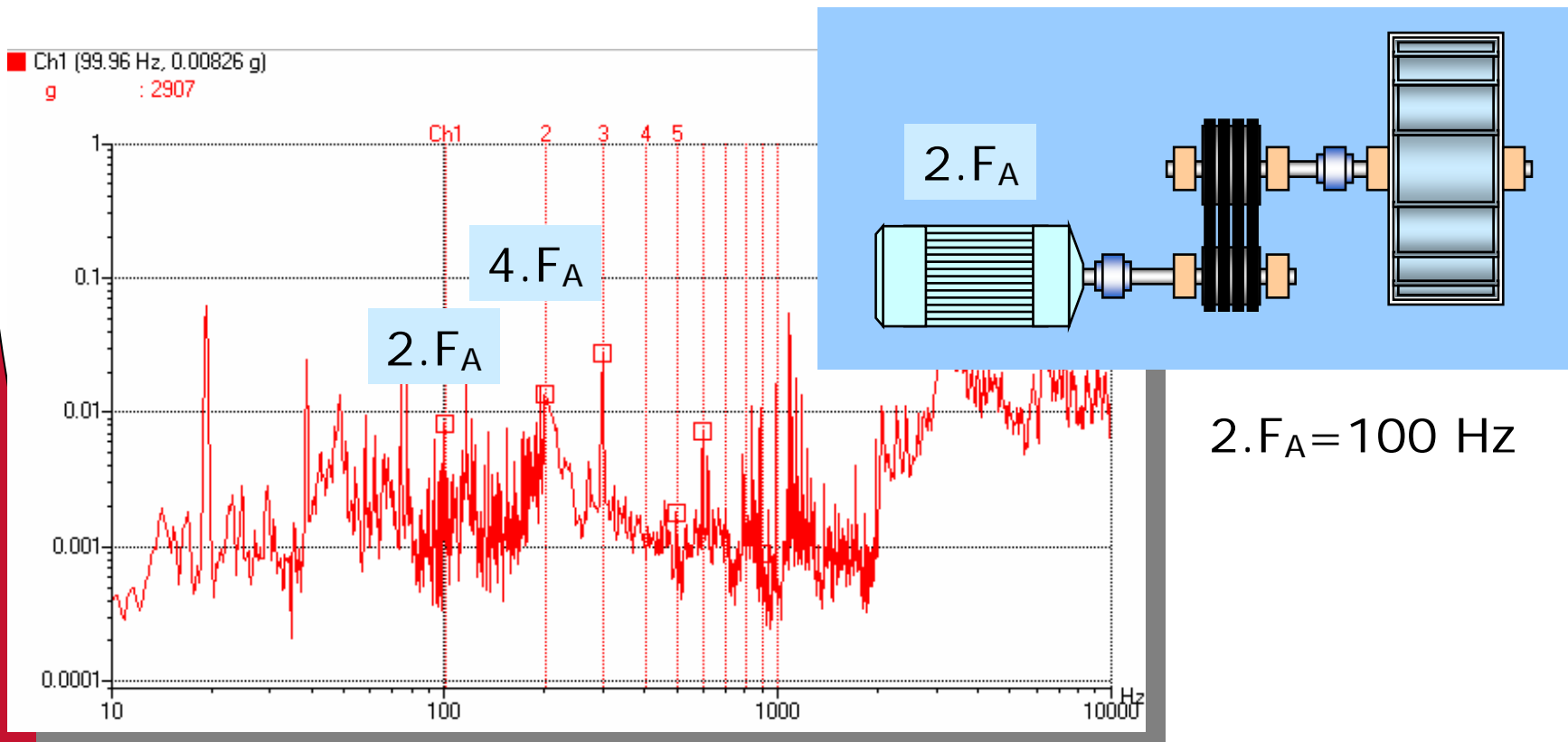
■ Ch1 (19.43 Hz, 0.06201 g)
g : 2907



$F_2 = 19.43 \text{ Hz}$
 $2.F_2 = 38.86 \text{ Hz}$

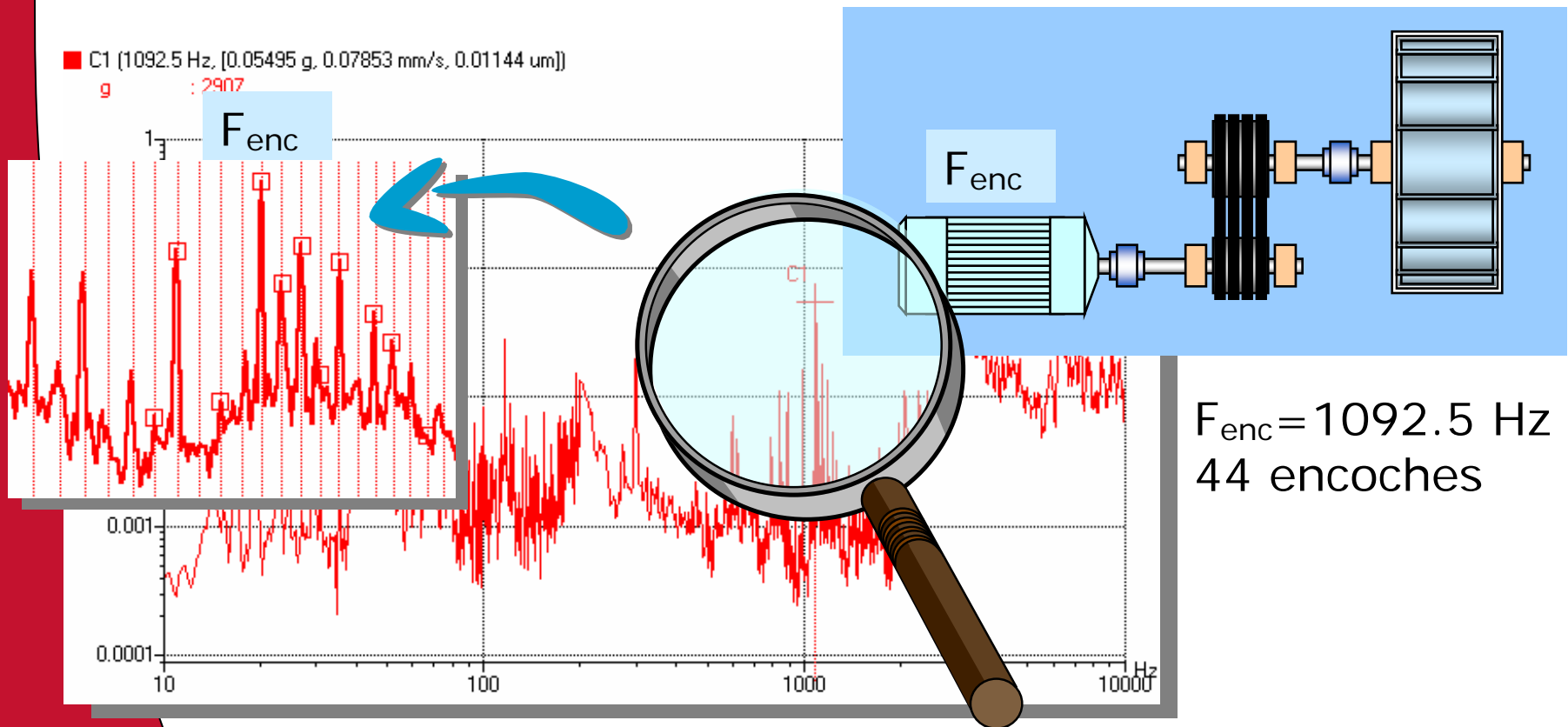
Les paramètres de surveillance

► L'analyse cinématique : Exemple d'un moto-ventilateur



Les paramètres de surveillance

- ▶ L'analyse cinématique : Exemple d'un moto-ventilateur



L'interprétation des mesures

► Introduction

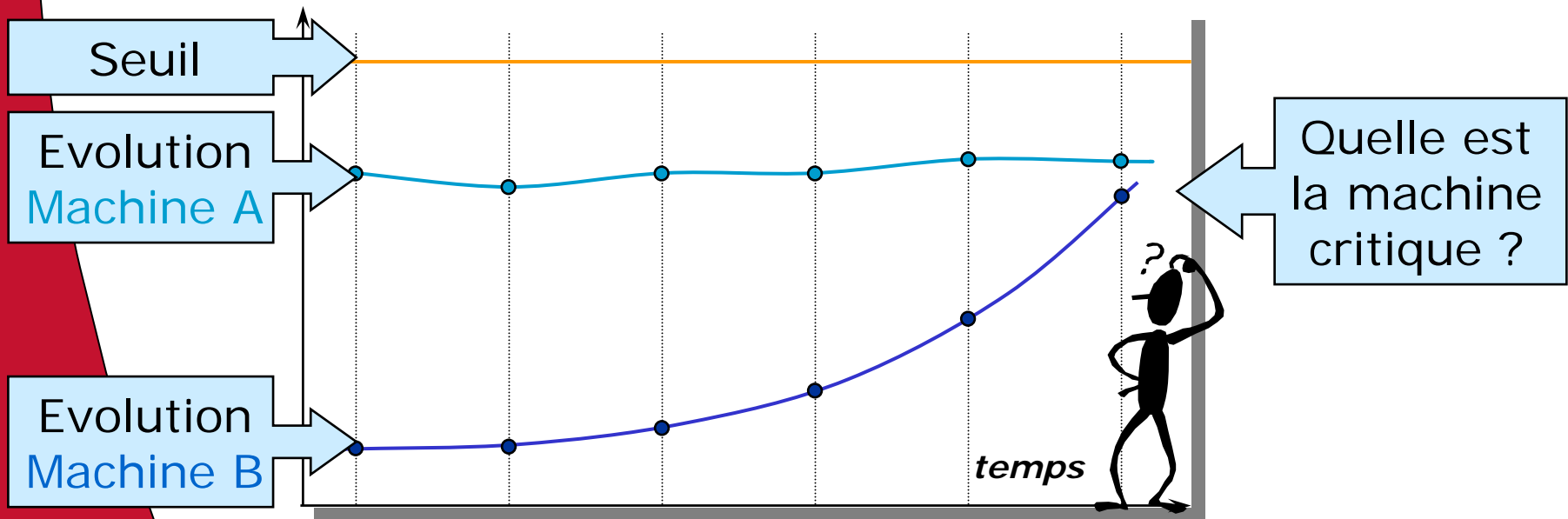
Les paramètres étant définis, la surveillance consiste à :

- ◆ 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.

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.



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.

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 où 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.

L'interprétation des mesures

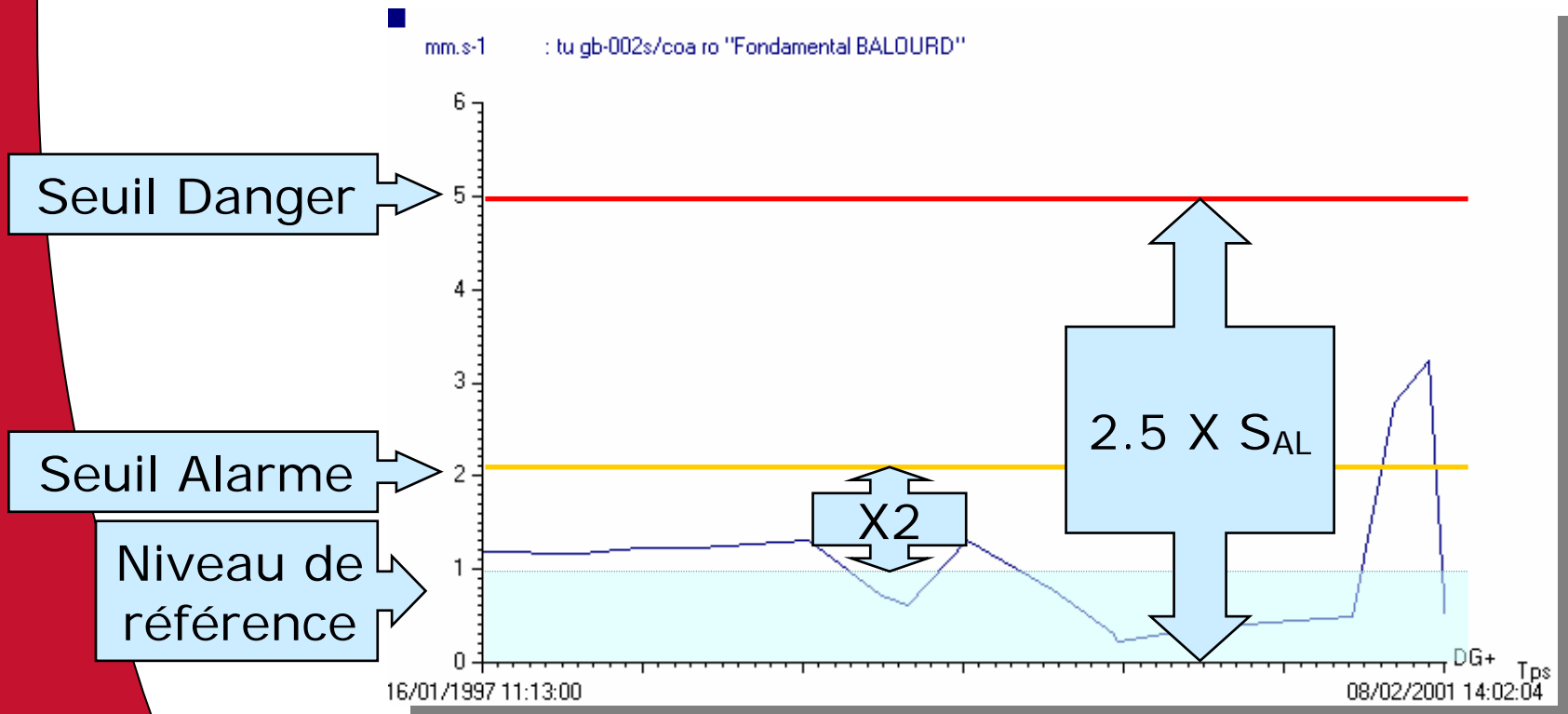
- ▶ La détermination des seuils à partir d'un état de référence
 Sur une machine en bon état, fonctionnant en régime stabilisé à sa charge nominale :
 - ➔ Faire un relevé I_0 du paramètre dans les conditions de mesurages qui seront celles de la surveillance : Direction, fixation du capteur,...
 - ➔ Positionner la valeur du seuil **Alarme** S_{AL} à la valeur la plus faible entre $2.I_0$ et la valeur « Non Acceptable » donnée par la norme.
 - ➔ Positionner la valeur du seuil **Danger** S_{DG} à la valeur $2,5.S_{AL}$

$$S_{AL} = \text{Min.}[2.I_0 ; \text{non acceptable selon la norme}]$$

$$S_{DG} = 2.5 \times S_{AL}$$

L'interprétation des mesures

► La détermination des seuils : Exemple



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

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

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

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

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

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

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

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

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

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 (≤ 600 tr/mn ou ≥ 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.

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**

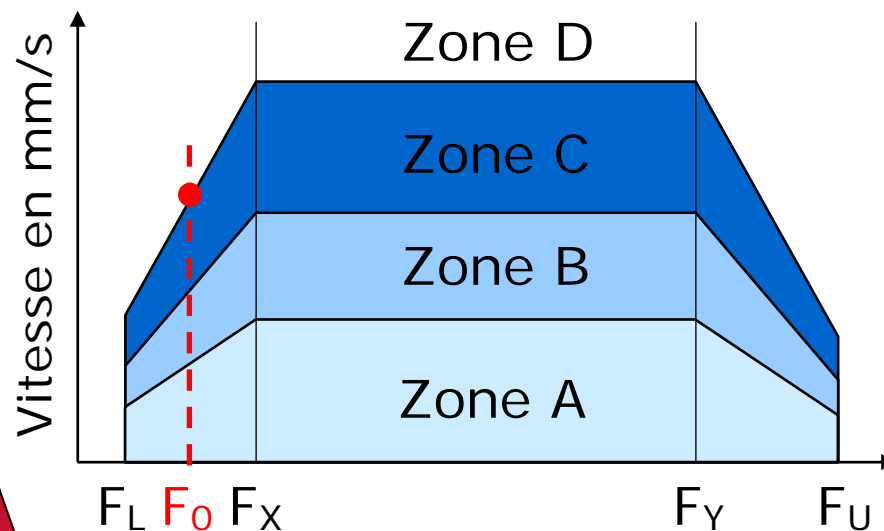
Ces valeurs limites sont définies en fonction des charges dynamiques acceptables sur les paliers et du niveau acceptable de transmission des vibrations au radier et aux fondations.

- ◆ Comparaison de l'**évolution** des amplitudes vibratoires à des valeurs limites : **Critère 2**

Les normes

- ▶ La norme ISO 10816 : Forme générale des critères

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



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

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.**

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

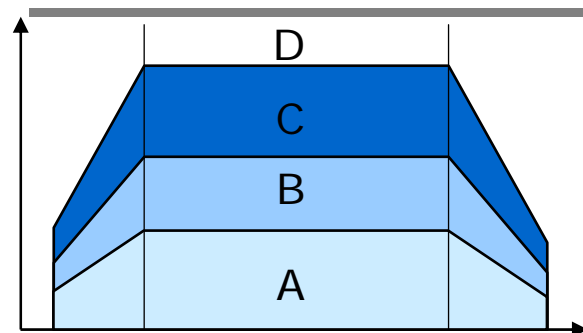
Les normes

- ▶ La norme ISO 10816-2 : Turbo-alternateurs installés sur fondation radier, excédant 50 MW
 - ➔ Mesure de la vitesse efficace V_{RMS} en régime de fonctionnement nominal stable
 - ➔ Mesures bande large [10-A] Hz - $A \geq 500$ 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

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



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 V_{RMS} et du déplacement efficace D_{RMS} en régime de fonctionnement nominal stable
 - ➔ Mesures bande large [10-1000] Hz si $V \geq 600$ 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.

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

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 $160 \text{ mm} < H < 315 \text{ mm}$

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

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 ailetée (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

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 ailetée (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

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 V_{RMS} en régime de fonctionnement nominal stable
 - ➔ Mesures bande large [10-B] Hz - $B \geq 6 \times F_0$
 F_0 : 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

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.

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.

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

Les normes

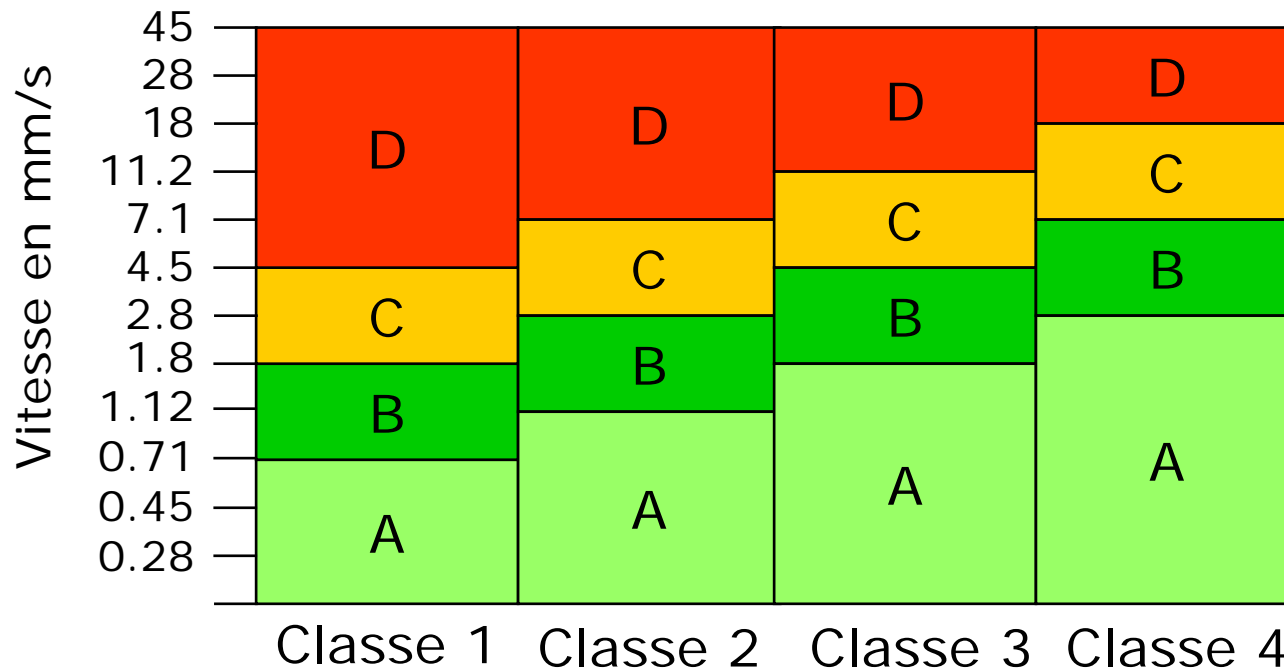
- ▶ La norme ISO 10816 : **Annexe provisoire**

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)

Les normes

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



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.

Les normes

- ▶ La norme ISO 10816 : La détermination des seuils

