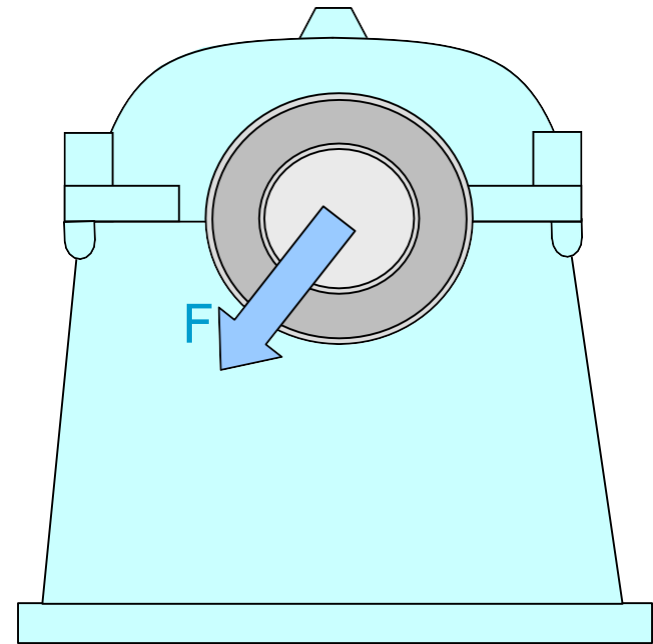


1. La mesure des vibrations

Introduction

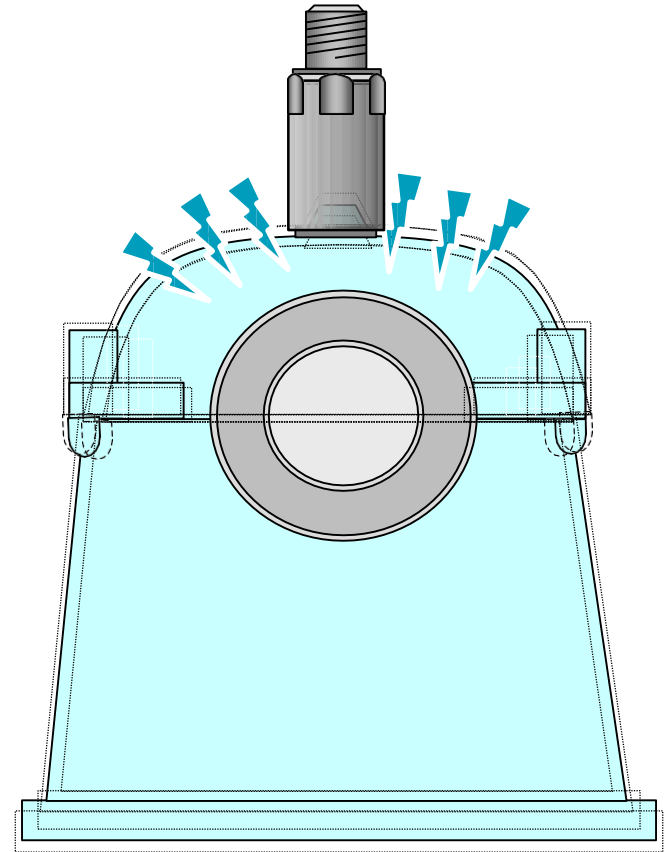
- ✓ Les vibrations d'une machine tournante sont l'image des **forces internes** à celle-ci.
- ✓ Ces forces, représentatives du **comportement mécanique** de la machine, se transmettent du rotor à la structure au travers des **paliers**.
- ✓ Les vibrations seront donc mesurées au niveau des paliers.



Les mesures de vibrations absolues

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

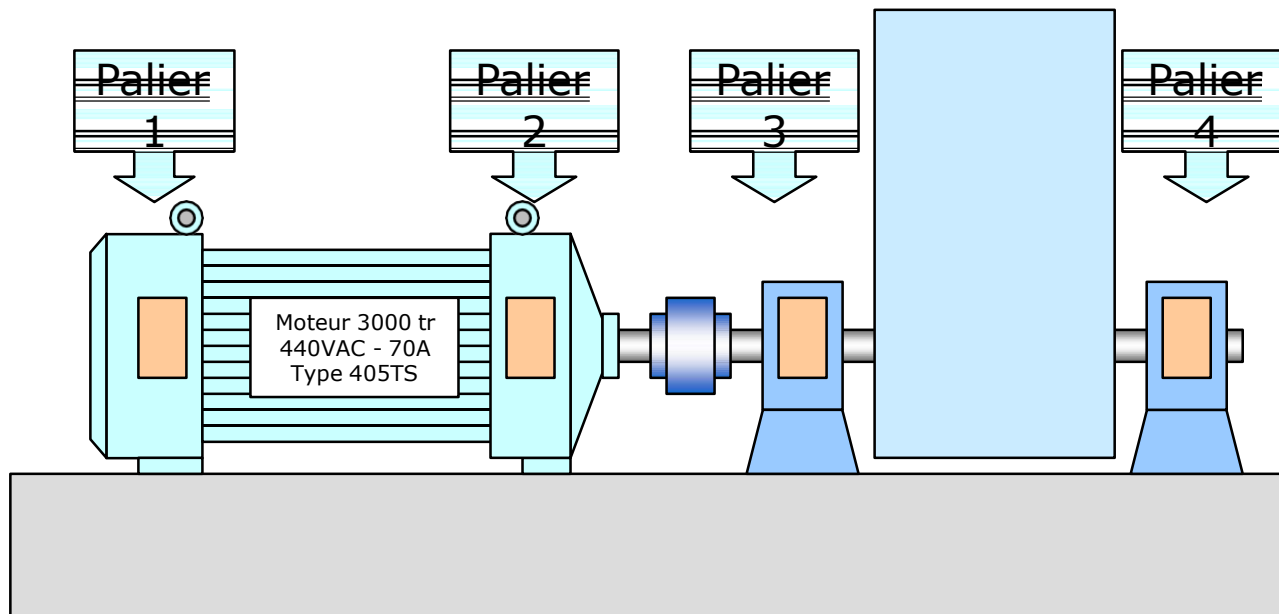
Les **accéléromètres** permettent la mesure des **vibrations absolues**. Ils sont utilisés pour l'instrumentation des **paliers à roulement**.



2. 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

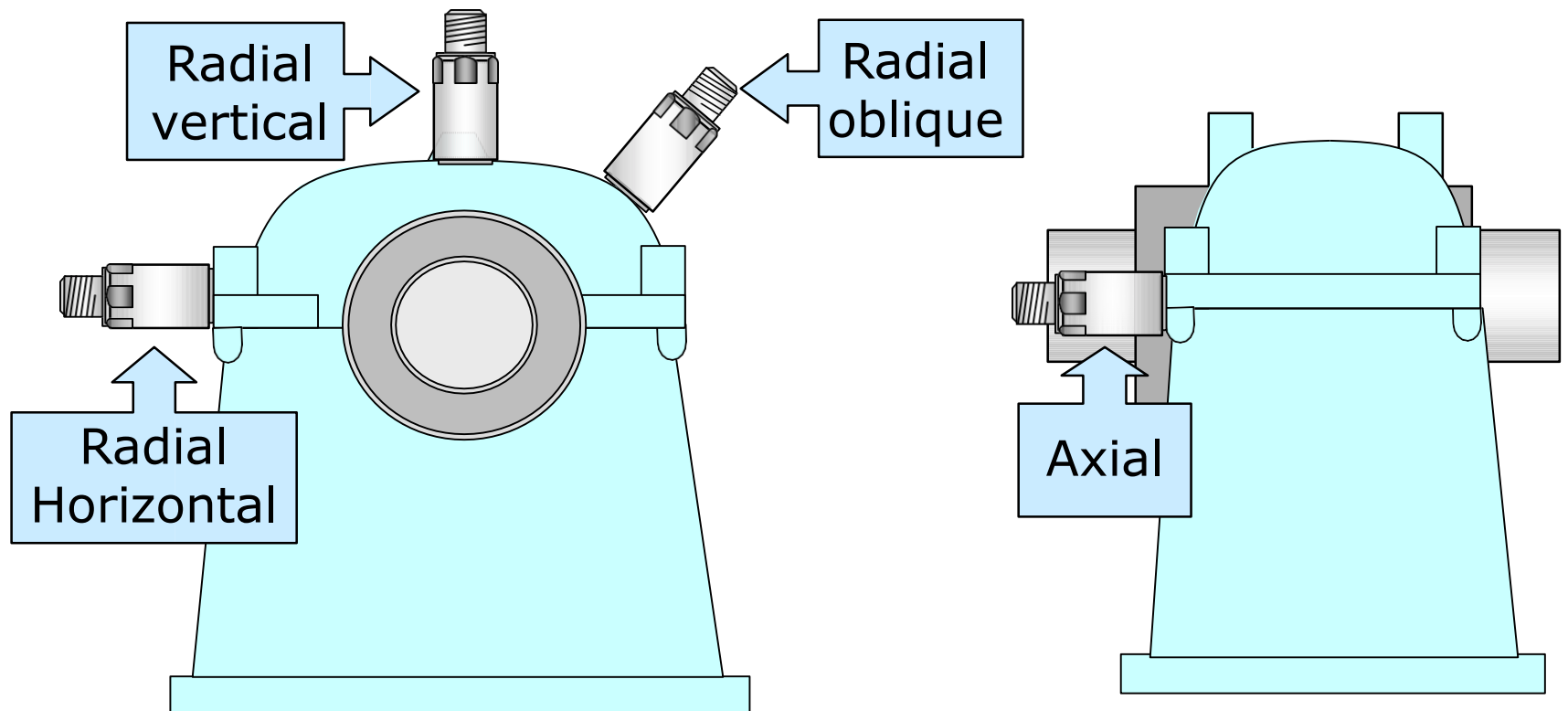


Machine
entraînée

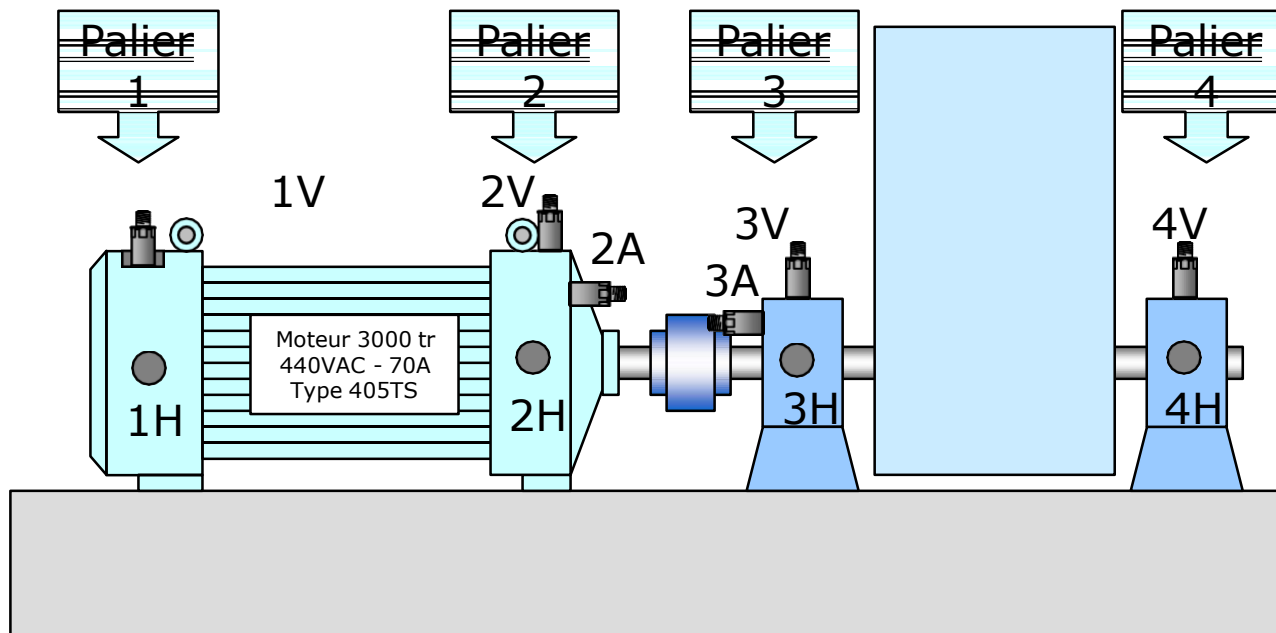
Direction des points de mesure

- ✓ 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.

Direction des points de mesure pour un accéléromètre



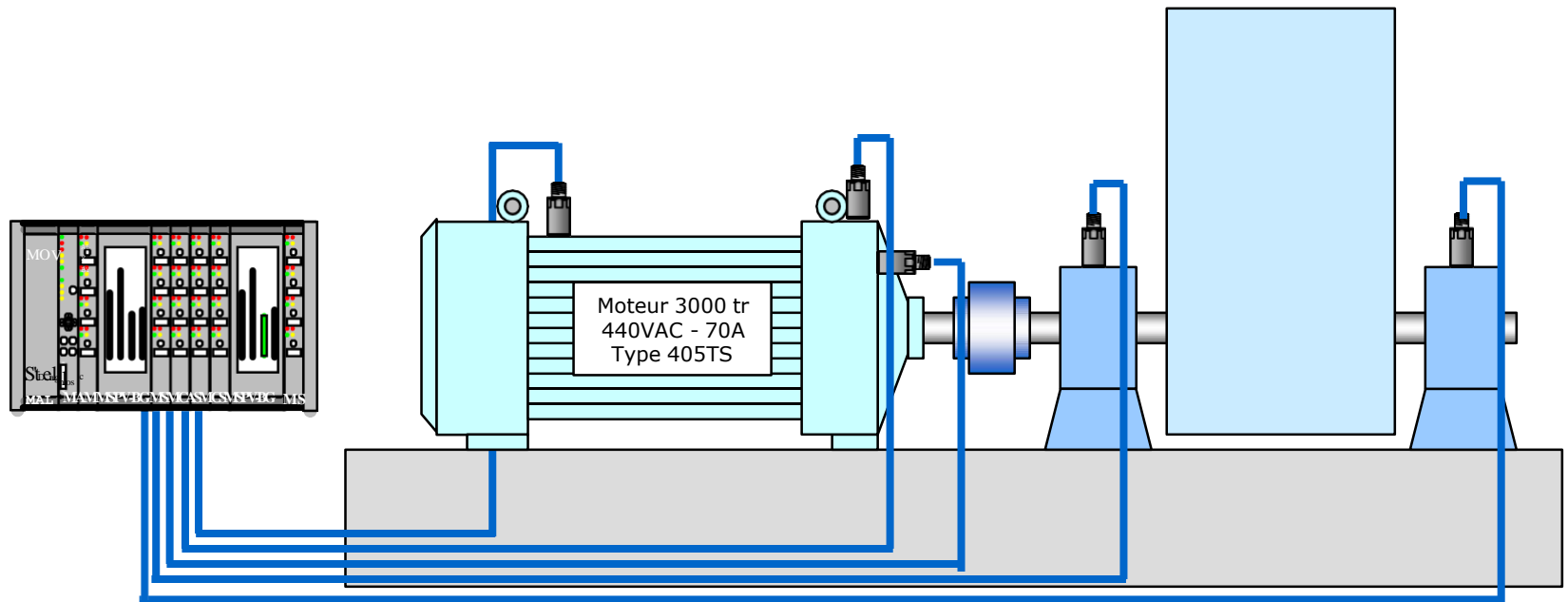
Direction des points de mesure : Exemple



3. Les appareils de mesure

La surveillance **on-line**

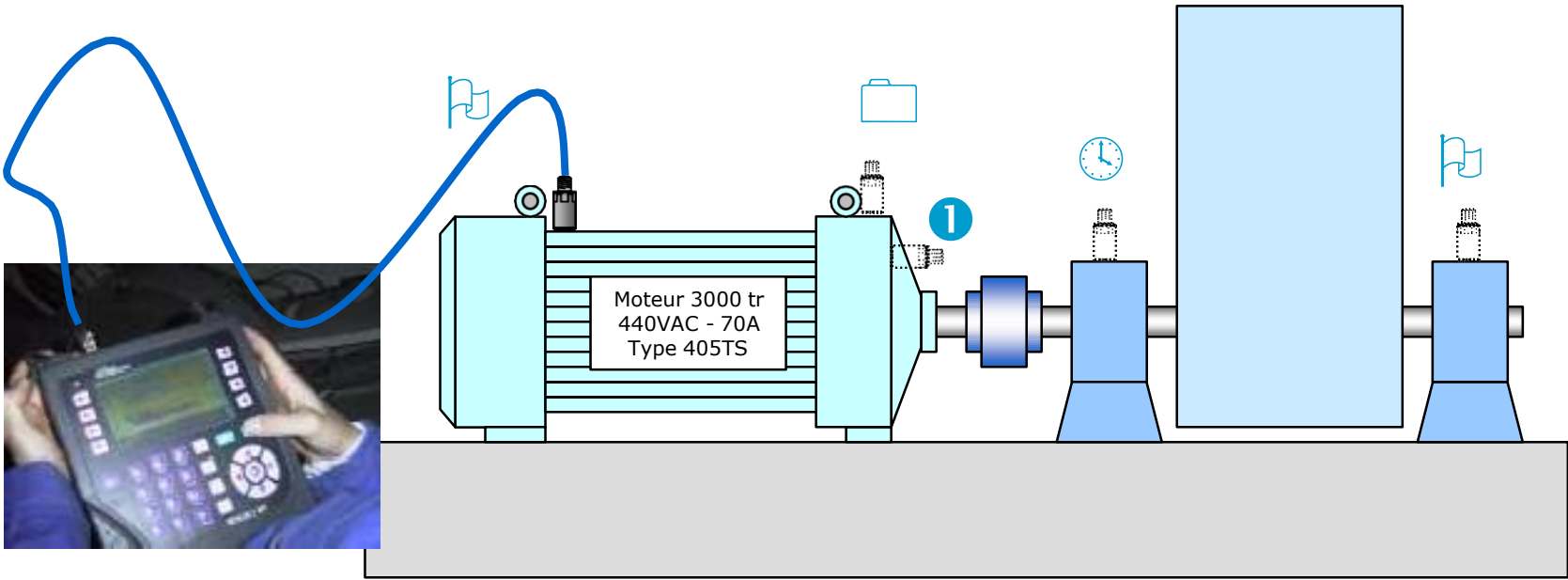
Les capteurs sont installés à demeure sur les machines et connectés à un **système de surveillance**.





La surveillance **off-line**

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



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 DIVADIAG et SURVAODIAG.

Off-line



On-line



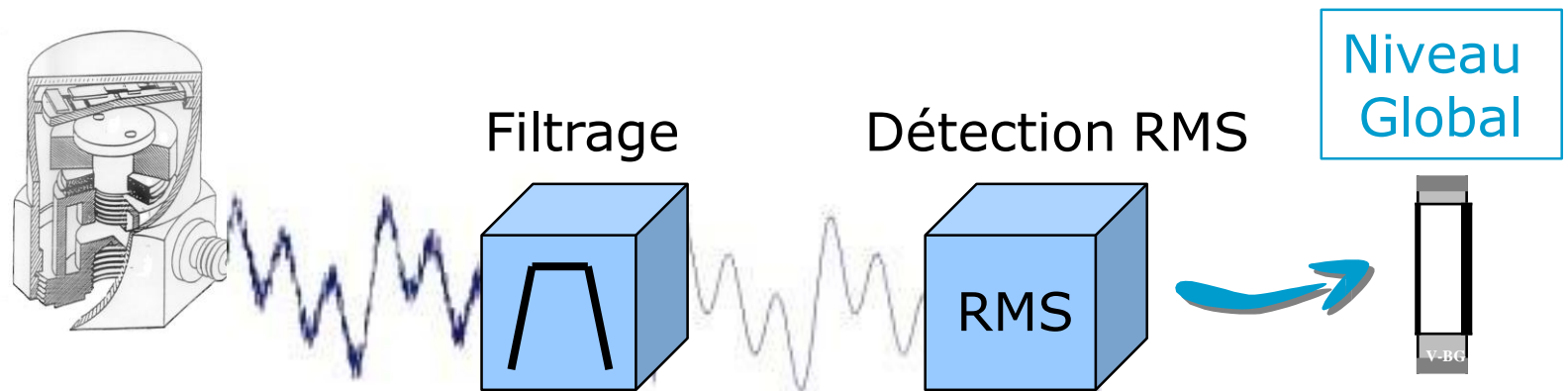
4. Les paramètres de surveillance

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,...)

5. Le niveau global

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.

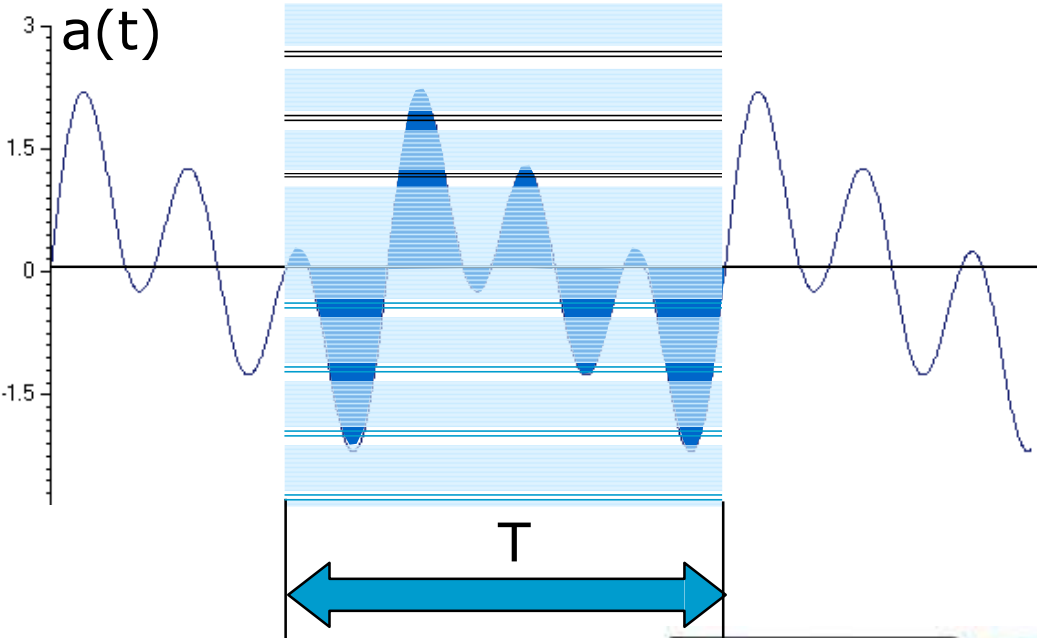


Le niveau global : Détection RMS (Root Mean Square)

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).



Le niveau global : Application au suivi des machines

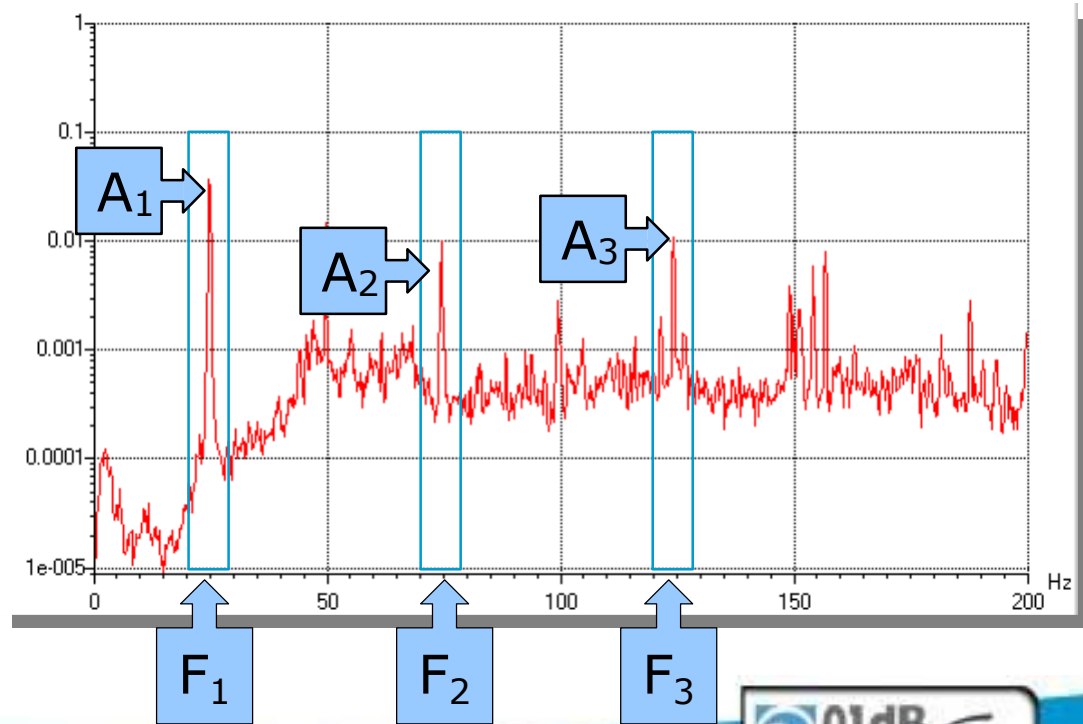
- ✓ Les niveaux globaux sont des indicateurs simples pour le suivi des machines :
 - Traitement du signal simple et peu coûteux
 - Résultat numérique unique
- ✓ Ils ne permettent pas le **diagnostic précis** de l'origine des défauts ou des évolutions constatées.
- ✓ Ils permettent néanmoins d'orienter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

6. Analyse fréquentielle

Amplitude des raies discrètes

La mesure de l'amplitude de certaines raies du spectre permet le suivi des phénomènes périodiques:

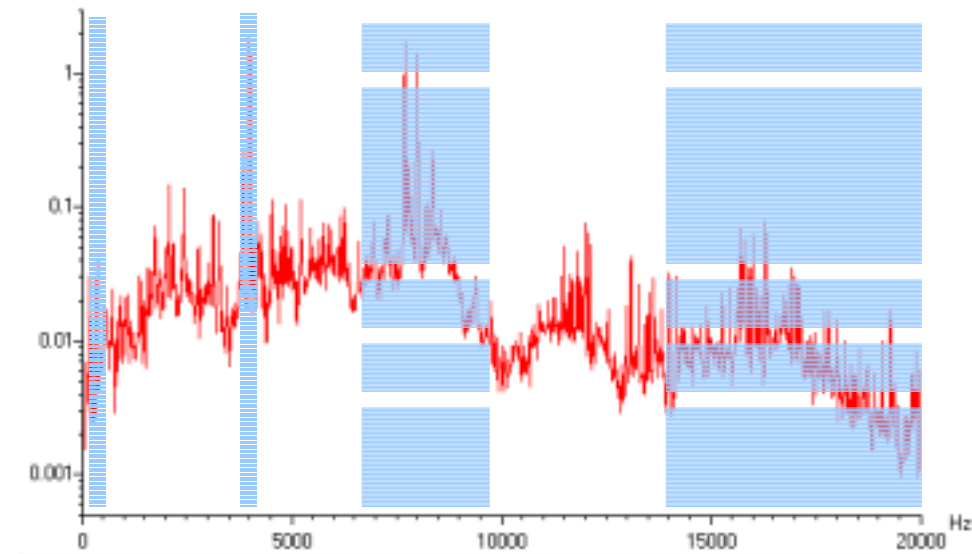
- ✓ BalourdLignage;
- ✓ Engrènement;
- ✓ Défaut électrique.



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



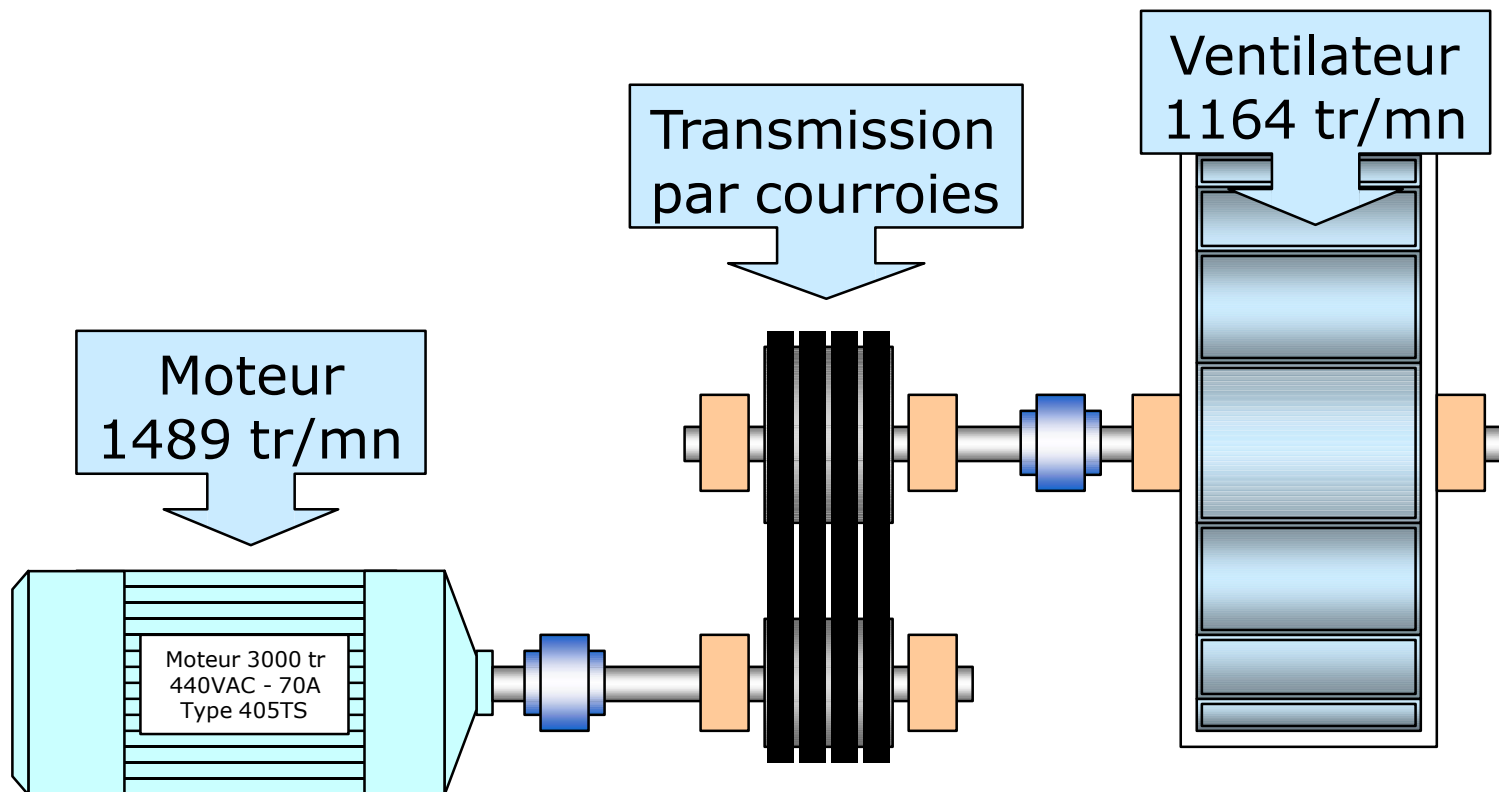
Choix des paramètres de surveillance:

Une **analyse cinématique** de la machine permet de définir les paramètres utiles à la surveillance.

Elle repose sur la connaissance des éléments suivants :

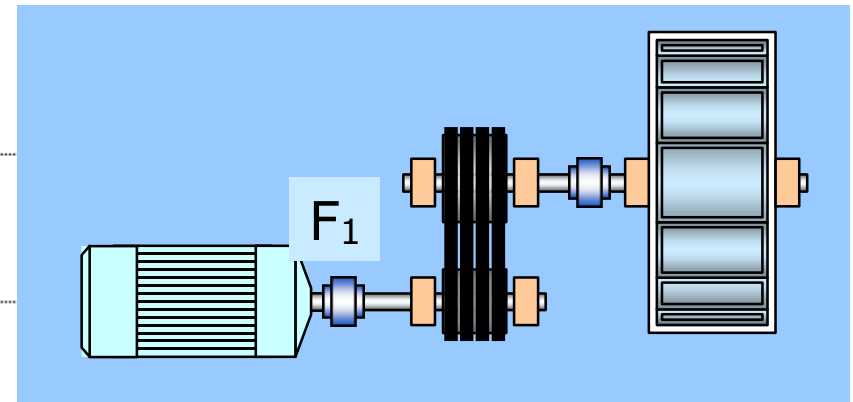
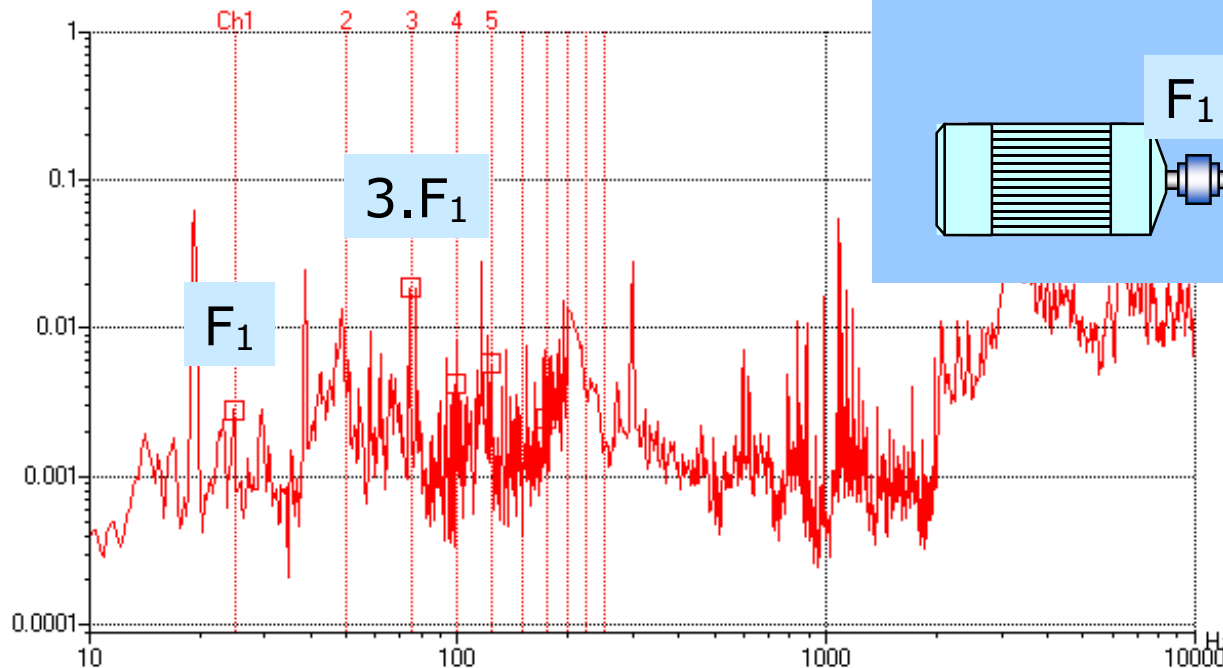
- ✓ Éléments constitutifs de la machine :
 - 💧 Éléments mécaniques, chaînes cinématiques, dimensions
- ✓ Paramètres de fonctionnement :
 - 💧 Vitesse, puissance, charge
- ✓ Manifestations des phénomènes attendus
 - 💧 Fréquences caractéristiques, typologie spectrales

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



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

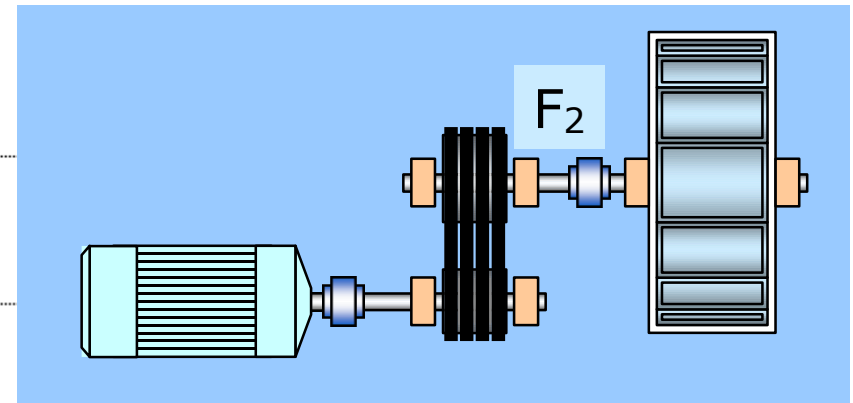
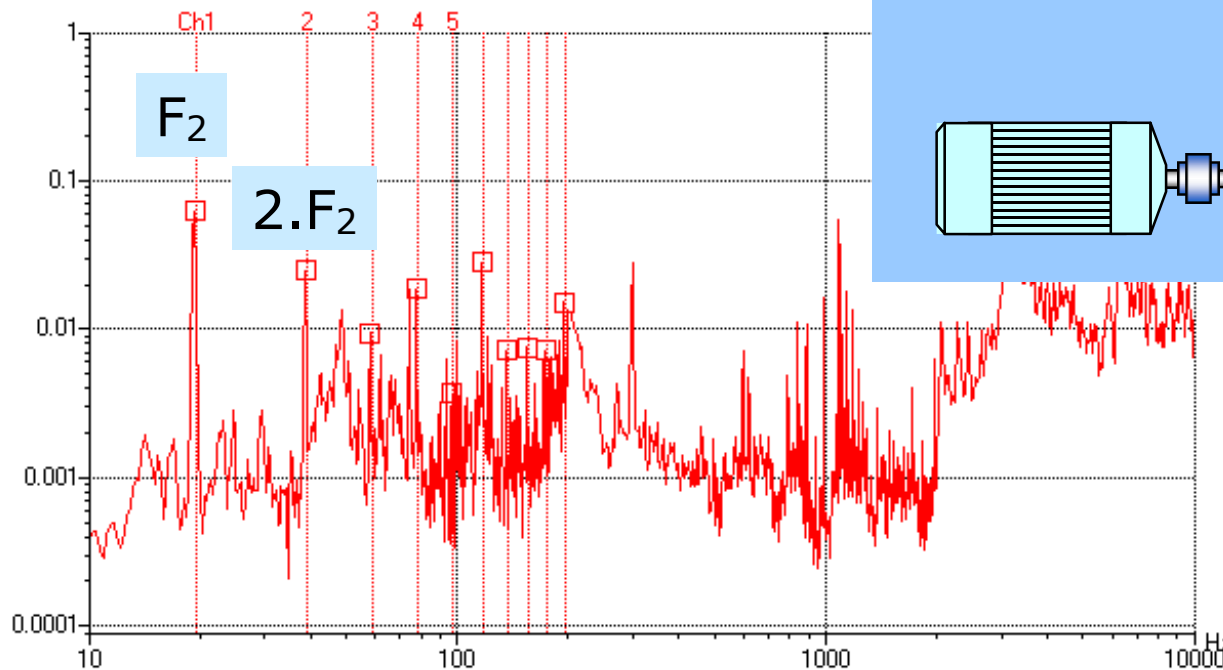
■ Ch1 (24.81 Hz, 0.00279 g)
g : 2907



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

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

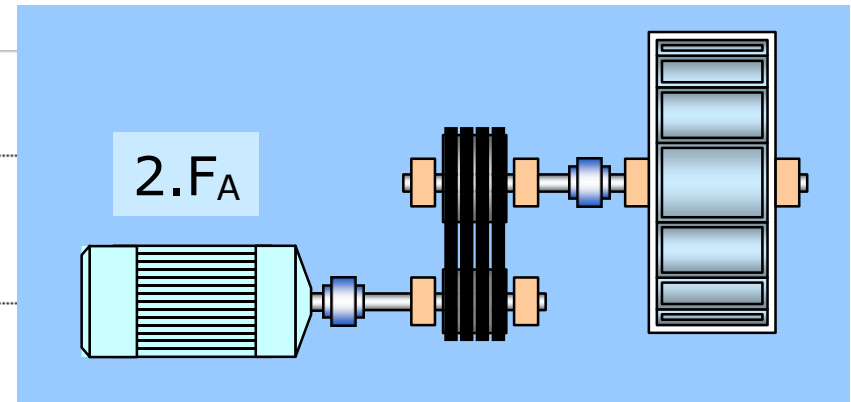
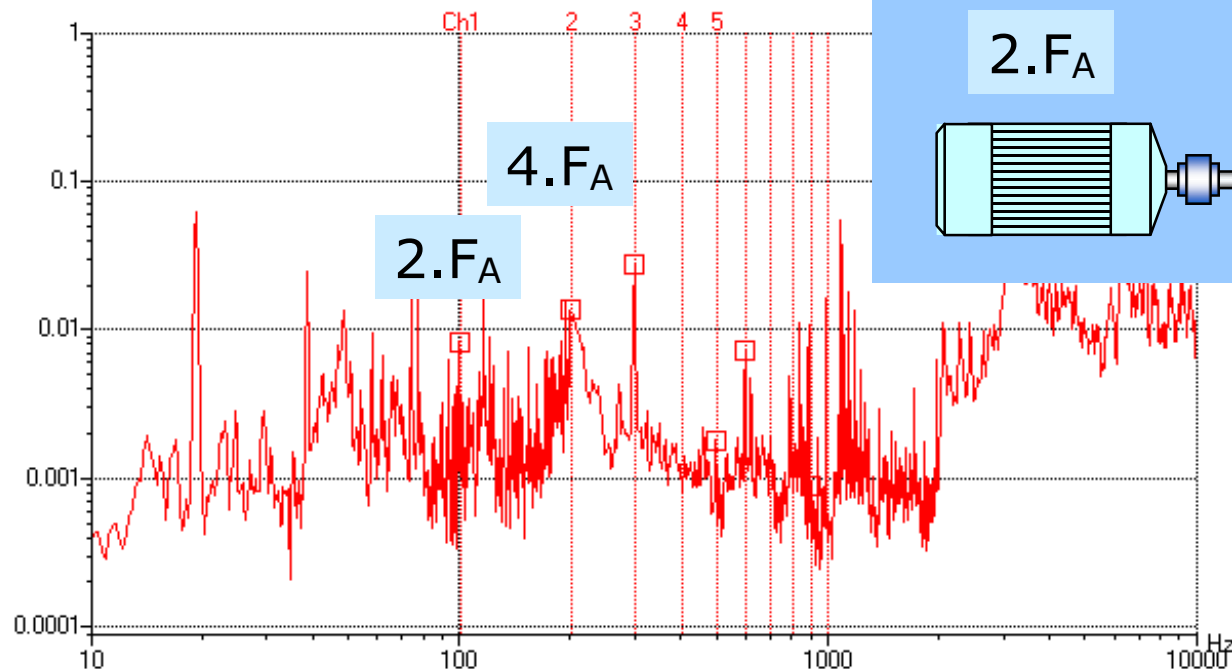
■ Ch1 (19.43 Hz, 0.06201 g)
g : 2907



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

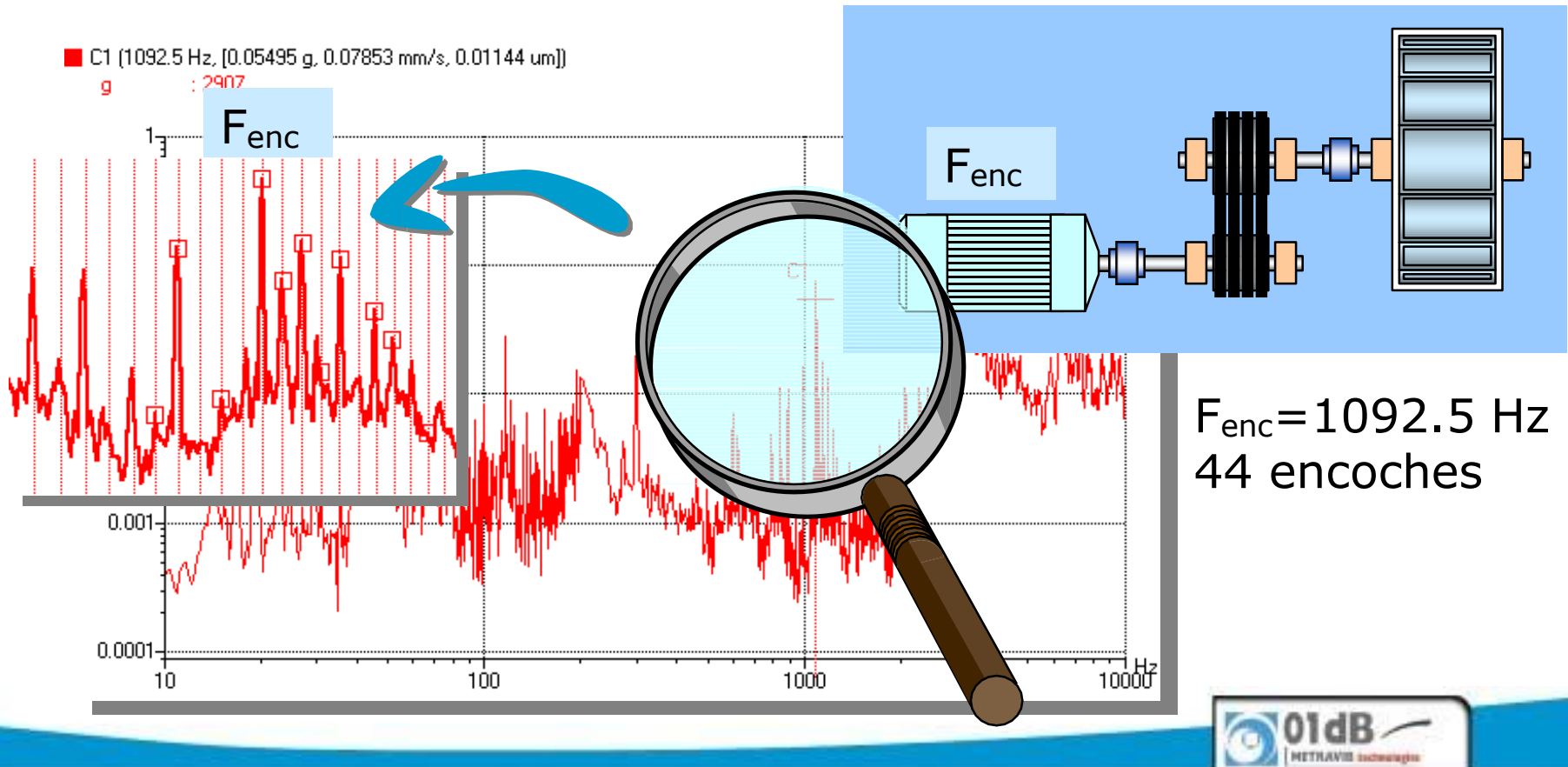
L'analyse cinématique : Exemple d'un moto-ventilateur

Ch1 (99.96 Hz, 0.00826 g)
g : 2907



$$2.F_A = 100 \text{ Hz}$$

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



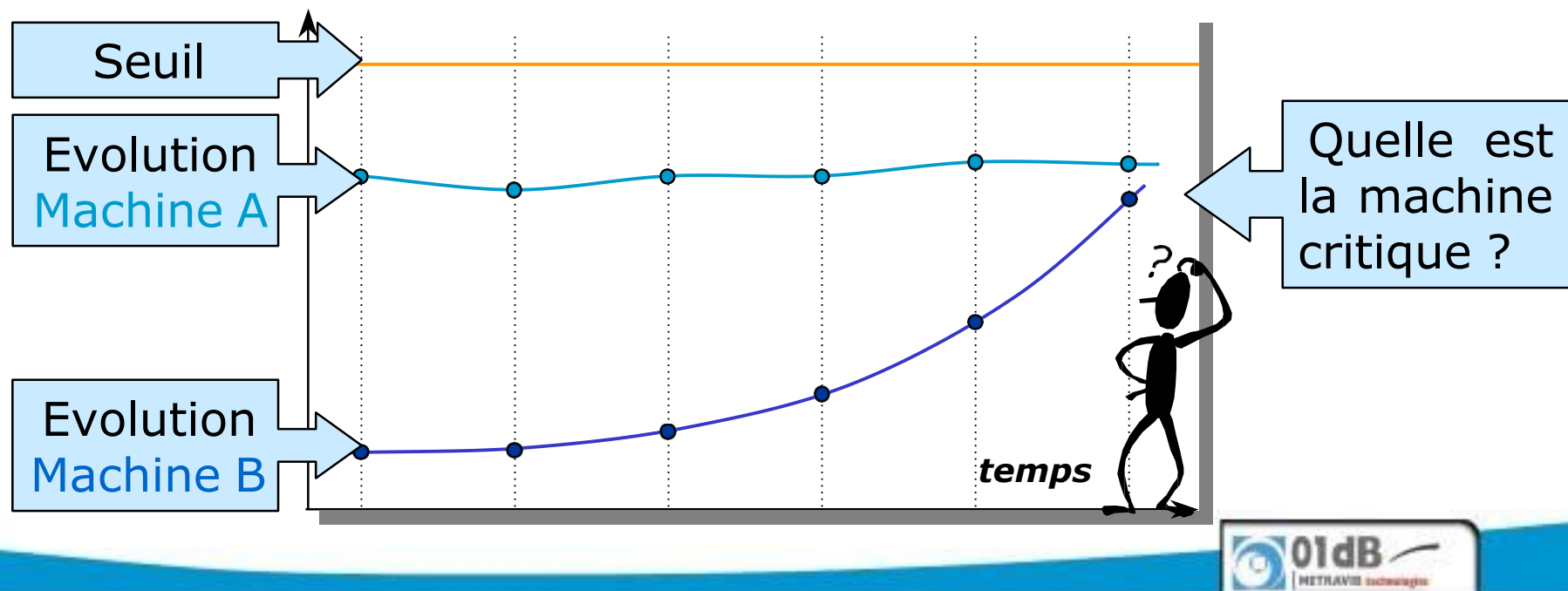
7. Interprétation des mesures

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'analyse des tendances:

L'analyse dans le temps des courbes d'évolution des paramètres de surveillance fournit des indications précieuses pour le diagnostic.



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.

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.

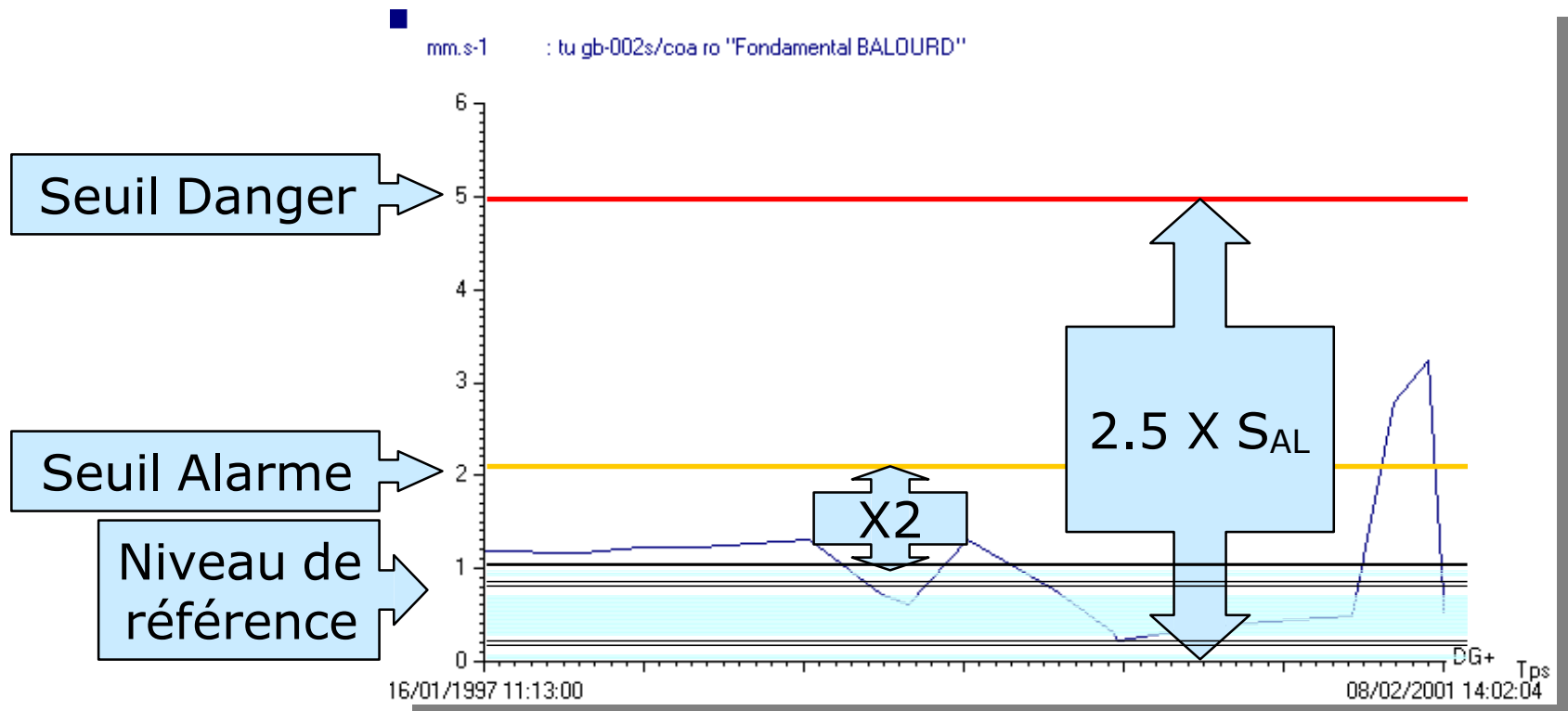


La détermination des seuils à partir d'un état de référence
Sur une machine en bon état, fonctionnant en régime stabilisé
à sa charge nominale :

- 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 $2,5 \times S_{AL}$

$$S_{AL} = \text{Min.}[2.I_0 ; \text{non acceptable selon la norme}]$$
$$S_{DG} = 2.5 \times S_{AL}$$

La détermination des seuils : Exemple



8. 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

La norme ISO 10816 : Evolutions 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.

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**



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.**



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.

La norme ISO 10816 : 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)



La norme ISO 10816 :
Critères d'évaluation : Limites des périmètres de zones

