

PARTIE I

SURVEILLANCE DES MACHINES PAR ANALYSE VIBRATOIRE

LES VIBRATIONS DES MACHINES TOURNANTES

I. Introduction

Toutes les machines en fonctionnement produisent des vibrations, images des efforts dynamiques engendrés par les pièces en mouvement. Ainsi, une machine neuve en excellent état de fonctionnement produit très peu de vibrations. La détérioration du fonctionnement conduit le plus souvent à un accroissement du niveau des vibrations. En observant l'évolution de ce niveau, il est par conséquent possible d'obtenir des informations très utiles sur l'état de la machine. Ces vibrations occupent une place privilégiée parmi les paramètres à prendre en considération pour effectuer un diagnostic. La modification de la vibration d'une machine constitue souvent la première manifestation physique d'une anomalie, cause potentielle de dégradations, voire de pannes.

Ces caractéristiques font de la surveillance par analyse des vibrations, un outil indispensable pour une maintenance moderne, puisqu'elle permet, par un dépistage ou un diagnostic approprié des défauts, d'éviter la casse et de n'intervenir sur une machine qu'au bon moment et pendant des arrêts programmés de production.

II. Définition d'une vibration

Un système mécanique est dit en vibration lorsqu'il est animé d'un mouvement de va-et-vient autour d'une position moyenne, dite position d'équilibre. Si l'on observe le mouvement d'une masse suspendue à un ressort [figure 2.1], on constate qu'il se traduit par :

- Un déplacement : la position de la masse varie de part et d'autre du point d'équilibre ;
- Une vitesse de déplacement : variation du déplacement par rapport au temps ;
- une accélération : variation de la vitesse par rapport au temps.

La vibration d'une machine soumise à une force périodique peut être décrite en termes de **déplacement**, de **vitesse** ou **d'accélération**. La vitesse du mouvement vibratoire correspond à la variation de son déplacement pour une unité de temps. L'accélération représente une variation de la vitesse par unité de temps.

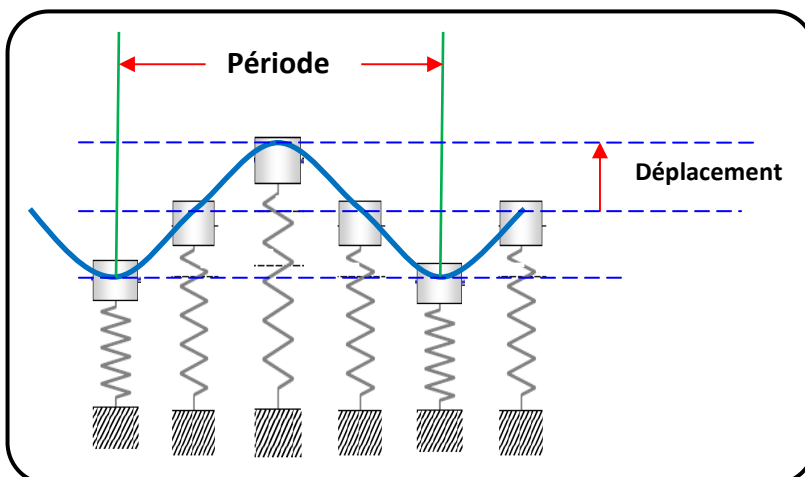
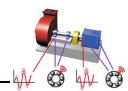
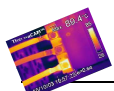


Figure 2.1 : Mouvement d'une masse suspendue à un ressort



III. Caractéristiques d'une vibration

Une vibration se caractérise principalement par sa **fréquence**, son **amplitude** et sa **nature**.

1. Fréquence

a. Définition

La fréquence est le nombre de fois qu'un phénomène se répète en un temps donné. Lorsque l'unité de temps choisie est la seconde, la fréquence s'exprime en **hertz [Hz]**. **1 hertz = 1 cycle/seconde**. Une vibration qui se produira 20 fois par seconde aura donc une fréquence f de 20 hertz.

Si la fréquence f d'un phénomène est de 50 hertz, c'est-à-dire 50 cycles par seconde, la durée d'un cycle (ou **période T**) est de $1/50^{\text{ème}}$ de seconde. La fréquence f est l'inverse de la période T : $f = 1/T$.

b. Remarque

Si l'unité normalisée de la fréquence est l'hertz [Hz], on rencontre parfois des valeurs exprimées en CPM (cycle par minute) ou RPM (rotation par minute). D'où :

$$1 \text{ hertz} = \frac{1 \text{ CPM}}{60} = \frac{1 \text{ RPM}}{60}$$

Il est intéressant parfois d'exprimer des phénomènes liés à la rotation en multiple ou **ordre** de la fréquence de rotation.

c. Exemple

Un ventilateur tournant à 1500 tr/min possède 16 pales. Ce ventilateur présente un phénomène de balourd (déséquilibre), dû à l'encrassement des pales, se produisant à chaque rotation. L'axe du rotor est décentré par rapport à l'ouïe de refoulement, ce qui induit des phénomènes vibratoires qui se produiront au passage de chaque pale.

Calculer la fréquence de rotation du ventilateur :

Calculer la fréquence de la vibration due au balourd :

Calculer la fréquence du phénomène vibratoire dû au décentrement :

2. Amplitude

a. Définition

On appelle amplitude d'une onde vibratoire la valeur de ses écarts par rapport au point d'équilibre et on peut définir :

- l'amplitude maximale par rapport au point d'équilibre appelée amplitude crête (**Ac**) ou niveau crête ;
- l'amplitude double, aussi appelée l'amplitude crête à crête (**Acc**) (*peak to peak*, en anglais) ou niveau crête-crête ;
- l'amplitude efficace (**Aeff**) , aussi appelée **RMS** (*Root Mean Square*) ou niveau efficace.

b. Exemples

Cas d'une vibration sinusoïdale

Dans le cas d'une vibration de type sinusoïdal [figure 2.2], l'amplitude efficace s'exprime en fonction de l'amplitude crête de la façon suivante:

$$A_{\text{eff}} = \frac{A_c \sqrt{2}}{2} = 0.707 A_c$$

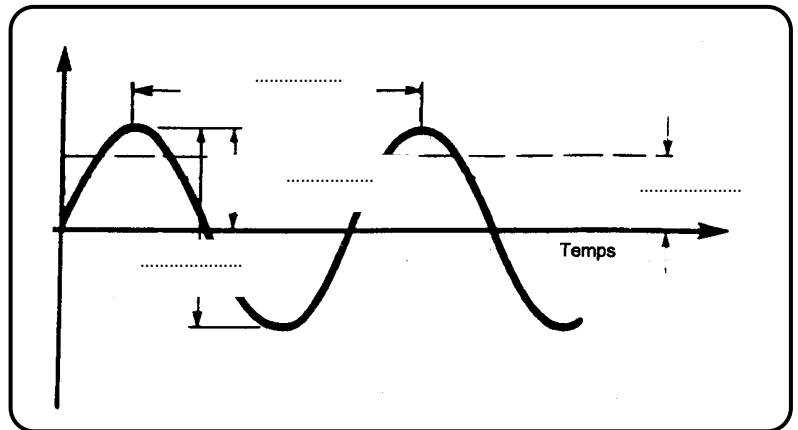


Figure 2.2 : vibration sinusoïdale

Cas d'une vibration quelconque

Dans le cas d'une vibration complexe quelconque [figure 2.3], il n'existe pas de relation simple entre la valeur crête de l'amplitude (A_c) et la valeur efficace de l'amplitude (A_{eff}) qui se définit mathématiquement par la relation:

$$A_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt}$$

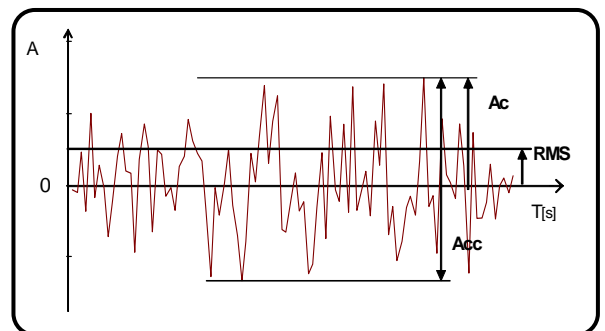


Figure 2.3 : vibration complexe

T : durée d'analyse du signal , $x(t)$: amplitude instantanée .

c. Grandeurs associées à l'amplitude d'une vibration

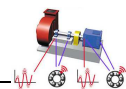
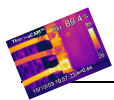
Une vibration est caractérisée par les trois grandeurs fondamentales : le **déplacement** x , la **vitesse** v et l'**accélération** γ . Les unités de ces grandeurs en SI et celles utilisées en mesures vibratoires sont données au tableau 2.1

PARAMETRES	UNITES S.I.	UNITES VIB.	CORRESPONDANCES
x
v
γ	$1g = 9.80665 \text{ m/s}^2$

Tableau 2.1 : Unités utilisées pour γ , v et x en SI et en mesure vibratoire.

d. Remarque

La valeur de crête à crête indique la différence entre les amplitudes maximale et minimale du mouvement. C'est une quantité utile pour déterminer le déplacement d'un composant, déplacement qui peut être critique pour des considérations de contrainte maximale ou de jeu mécanique. La valeur de crête donne l'amplitude maximale et s'avère utile dans les mesures concernant les phénomènes de courte durée; les chocs en sont un exemple. Cependant, elle ne tient pas compte de l'évolution de la vibration dans le temps.



La valeur efficace est la mesure la plus intéressante des amplitudes de vibration. En plus de tenir compte de l'évolution du signal dans le temps, le calcul de la valeur efficace est lié à l'énergie vibratoire et donc au « potentiel de détérioration » de la vibration.

Le facteur de crête définit le rapport de la valeur de crête d'un signal à sa valeur efficace. D'après la définition du niveau efficace, le facteur de crête du mouvement sinusoïdal est environ 1,4. Plus la vibration devient impulsive, plus la valeur de crête augmente.

3. Nature d'une vibration

Une machine tournante quelconque en fonctionnement génère des vibrations que l'on peut classer de la façon suivante:

- Les vibrations périodiques de type sinusoïdal simple [figure 2.4 a] ou sinusoïdal complexe [figure 2.4 b] représentatives du fonctionnement normal ou anormal d'un certain nombre d'organes mécaniques (rotation de lignes d'arbres, engrènements,...) ou d'un certain nombre d'anomalies (déséquilibre, désalignement, déformations, instabilité de paliers fluides, déversement de bagues sur roulements, ...).
- Les vibrations périodiques de type impulsif [figure 2.4 c] sont appelées ainsi par référence aux forces qui les génèrent et à leur caractère brutal, bref et périodique. Ces chocs peuvent être produits par des événements normaux (presses automatiques, broyeurs à marteaux, compresseurs à pistons, ...) ou par des événements anormaux comme l'écaillage de roulements ou un défaut sur des engrenages, un jeu excessif, ...
- Les vibrations aléatoires de type impulsif [figure 2.4 d] peuvent, par exemple, être générées par un défaut de lubrification sur un roulement, la cavitation d'une pompe, ...

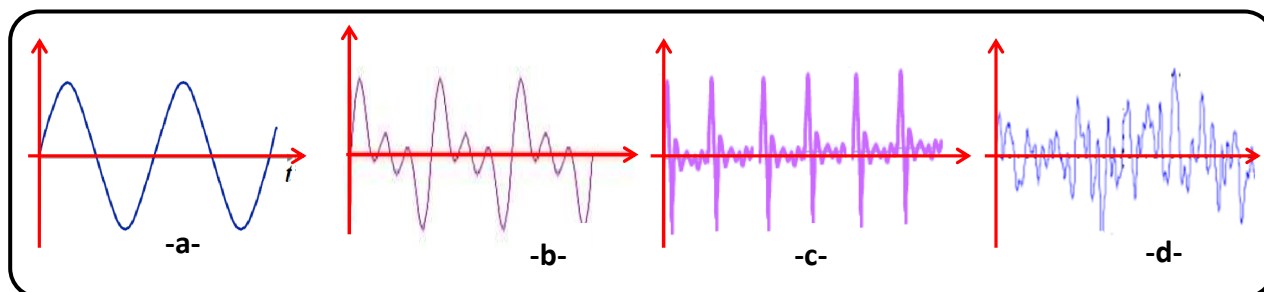


Figure 2.4 : Nature d'une vibration

IV. Les capteurs de vibration

1. Types et caractéristiques des capteurs

La première étape conduisant à l'obtention d'une lecture de vibration consiste à convertir la vibration mécanique produite par une machine en un signal électrique équivalent. Cette opération est réalisée au moyen des capteurs de vibrations. On retrouve parmi les capteurs les plus couramment utilisés le proximètre (mesure de déplacement), le vélocimètre (mesure de vitesse) et l'accéléromètre (mesure d'accélération).

Un capteur de vibration est caractérisé principalement par :

- sa **bande passante** (plage d'utilisation) : plage de fréquences à l'intérieur de laquelle l'amplitude mesurée par le capteur ne dépasse pas une marge d'erreur fixée par le constructeur (par exemple $\pm 3\%$ ou ± 3 dB de [3–8000] Hz).

- sa **gamme dynamique** (gamme de mesure d'amplitude) : gamme comprise entre la plus petite et la plus grande amplitude acceptée par le capteur.
- sa **sensibilité** : relation entre la grandeur électrique délivrée à la sortie du capteur et l'amplitude du mouvement mécanique qui lui donne naissance (par exemple 8 mV par μm). Elle est donnée par le constructeur du capteur, généralement sous forme de courbe d'étalonnage qui devra faire l'objet d'une vérification périodique.

2. Les proximètres

Le proximètre, ou sonde de proximité [figure 2.5], est un capteur de déplacement sans contact qui produit un signal électrique directement proportionnel au déplacement relatif de la vibration d'un arbre ou d'un rotor. Il est monté en permanence à l'intérieur du palier [figure 2.6]. Les mesures en déplacement ne sont pas quantifiables dans toutes les gammes de fréquence. Ces mesures seront limitées aux basses fréquences ($< 100 \text{ Hz}$).



Figure 2.5 : proximètres et leur driver

Le capteur de déplacement est utilisé pour toutes les applications où la surveillance des jeux entre les arbres et les paliers s'avère essentielle. C'est pourquoi l'on retrouve des capteurs de déplacement installés sur la plupart des turbines hydroélectriques et des turbomachines. A partir des connaissances des jeux radiaux réels d'un palier ou des jeux axiaux rotor-stator, il est beaucoup plus facile de déterminer des seuils d'alerte et de danger en terme de déplacement qu'en terme de vitesse ou d'accélération.

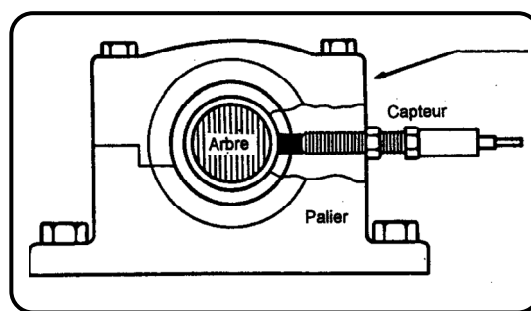


Figure 2.6 : proximètre monté sur un palier

Un exemple de fiche technique de proximètre est illustré en annexe 1.

3. Vélocimètres

Les capteurs de vitesse, ou vélocimètres, sont constitués d'une sonde à contact dite sonde sismique qui mesure le mouvement absolu de l'organe sur lequel elle est fixée.

Les vélocimètres les plus courants sont constitués d'une masse sismique reliée au boîtier par un ressort et solidaire d'une bobine qui se déplace dans un champ magnétique permanent créé par un barreau aimanté [figure 2.7]. La vibration du palier sur lequel est fixé le capteur, génère une tension proportionnelle à la vitesse de mouvement de la bobine.

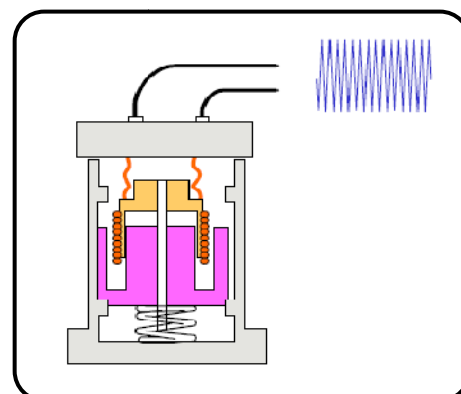


Figure 2.7 : schéma de principe d'un vélocimètre.

La fréquence de résonance de ce type de capteurs se situe généralement entre 8 et 15 Hz et la gamme dynamique s'étend de 10-20 Hz à 2000 Hz environ.

Un exemple de fiche technique de Vélocimètre proximètre est illustré en annexe 2.

4. Les accéléromètres

a. Principe

Un accéléromètre piézoélectrique [figure 2.8], est composé d'un disque en matériau piézoélectrique (quartz), qui joue le rôle d'un ressort sur lequel repose une masse sismique précontrainte. Quand la masse se déplace sous l'effet d'une accélération, elle exerce sur le disque des contraintes, induisant à la surface de ce dernier une charge électrique proportionnelle à cette accélération. Les accéléromètres piézoélectriques tendent à devenir les capteurs de vibration absolue les plus utilisés pour la surveillance. Ils possèdent les propriétés suivantes :

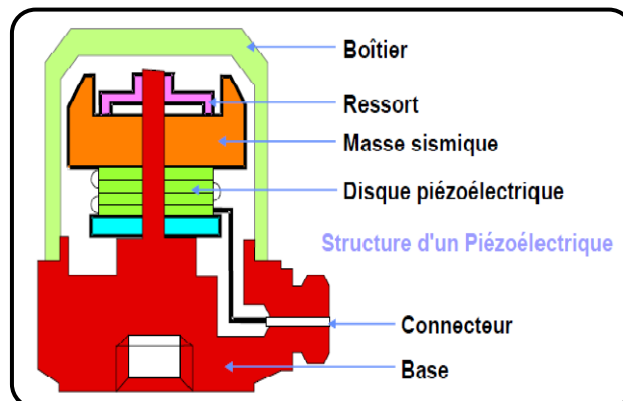


Figure 2.8 : schéma de principe d'un accéléromètre.

- Utilisables sur de très grandes gammes fréquentielles.
- Excellente linéarité sur une très grande gamme dynamique (typiquement 140 dB).
- Le signal d'accélération peut être intégré électroniquement pour donner le déplacement et la vitesse
- Aucun élément mobile, donc extrêmement durable.

Les accéléromètres à électronique intégrée sont semblables aux accéléromètres piézoélectriques à la différence qu'ils possèdent de manière intégrée un conditionnement de charge pour délivrer une tension proportionnelle à l'accélération.

Un exemple de fiche technique d'accéléromètre est illustré en annexe 3.

b. Réponse d'un accéléromètre

L'examen de la courbe de réponse d'un accéléromètre piézoélectrique, illustrée sur la figure 2.9, montre l'existence de deux zones :

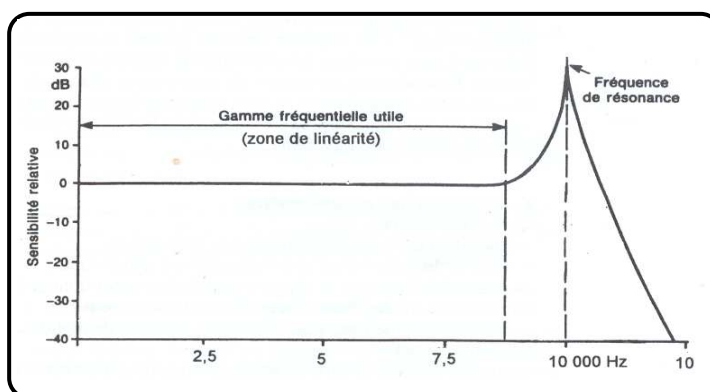


Figure 2.9 : courbe de réponse d'un accéléromètre

- une zone de linéarité du capteur : c'est la plage de fréquences à l'intérieur de laquelle la réponse du capteur correspond à l'amplitude du signal mesurée avec une bonne sensibilité. Cette zone définit la plage de fréquences pour une bonne utilisation du capteur.
- Une zone englobant la résonance du capteur à l'intérieur de laquelle les mesures d'amplitude sont amplifiées, de façon non contrôlée. Cette zone sera évitée puisque la mesure est faussée.

V. Choix de l'emplacement de capteurs

1. Emplacement

Dans le cas des machines tournantes, les principales mesures seront effectuées le plus souvent au droit des paliers qui sont les parties fixes les plus directement en relation avec les efforts appliqués à la partie mobile [figures 2.10 et 2.11] . Ces efforts sont de deux types :

- **Efforts tournants** : ce sont les efforts liés à la rotation de l'arbre, générés par exemple par un balourd ou un désalignement, et dont les amplitudes seront plus grandes dans le cas d'une mesure effectuée dans un plan radial ;
- **Efforts directionnels** : ce sont des efforts liés à une contrainte de l'arbre, générés par exemple par la tension d'une courroie (effort directionnel radial [figure 2.12]), ou un par le contact d'un engrenage conique (effort directionnel axial).

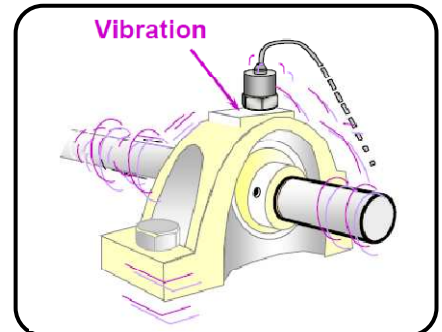


Figure 2.10 : Fixation du capteur sur palier

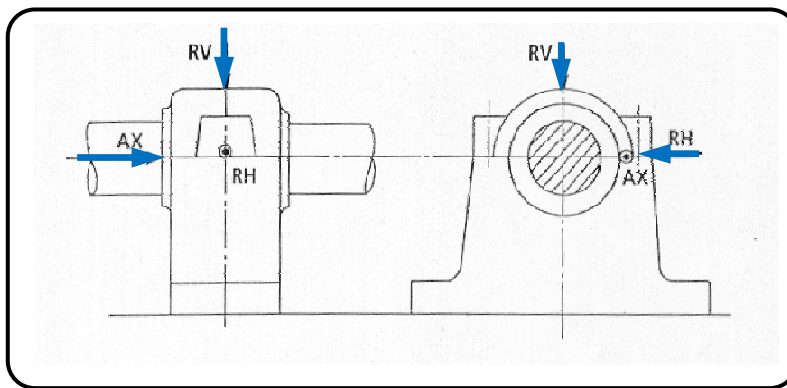


Figure 2.11 : Choix directionnel pour la prise de mesure

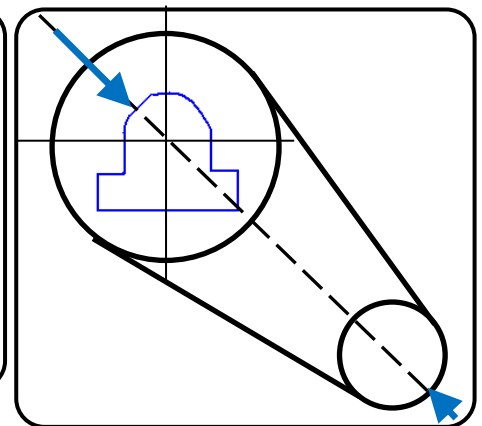


Figure 2.12 : direction favorisée pour transmission par poulies courroies.

2. Remarques

- Bien que l'effort soit constant dans toutes les directions du plan radial, une mesure dans la direction radiale horizontale donne une valeur d'amplitude plus forte.
- La lecture des valeurs d'amplitude doit tenir compte du temps nécessaire à la prise d'une mesure correcte et de l'estimation des fluctuations de niveaux éventuelles.
- Toute remarque au cours de cette évaluation peut être importante et significative d'un défaut.

3. Consignes pour la fixation des capteurs

- Les capteurs doivent être placés en liaison aussi directe que possible avec les paliers, en limitant au strict minimum le nombre de pièces assurant l'interface entre l'élément mobile et le capteur [figure 2.13].
- L'emplacement des points de mesure doit être propre (pas de traces de graisse ou de peinture) et les surfaces de contact avec les capteurs lisses, planes et perpendiculaires à la direction de mesure [figure 2.14].

- Lorsque le palier est difficilement accessible de façon directe, la prise de la mesure est effectuée par un capteur au point judicieusement choisi en fonction des raideurs [figure 2.15].
- Les mesures sont effectuées toujours au même endroit sur la machine. Les points de mesure sont repérés, soit par la peinture, soit par la mise en place de goujons.

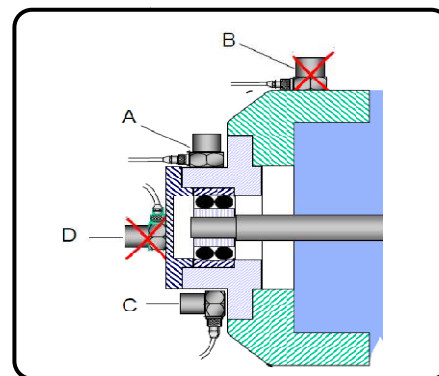


Figure 2.13 : Choix de l'emplacement du capteur

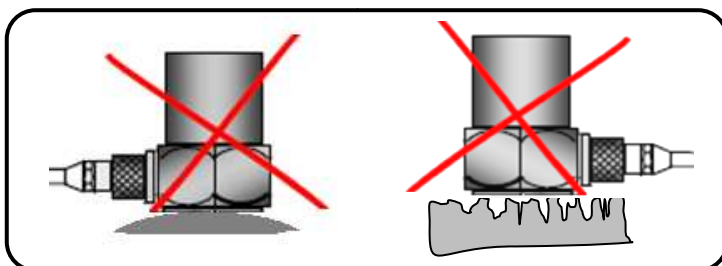


Figure 2.14 : Les surfaces de contact avec les capteurs doivent être lisses et planes

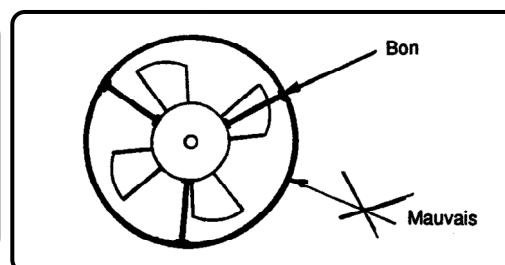


Figure 2.15 : emplacement du capteur sur un palier inaccessible directement

4. Modes de fixation

Les accéléromètres possèdent une réponse linéaire sur une large gamme de fréquences, mais cette gamme de fréquences peut être considérablement diminuée selon leur mode de fixation [figure 2.16].

Pour que les mesures soient fiables, il faut qu'elles soient faites dans une gamme de fréquences nettement inférieures à la fréquence de résonance du capteur

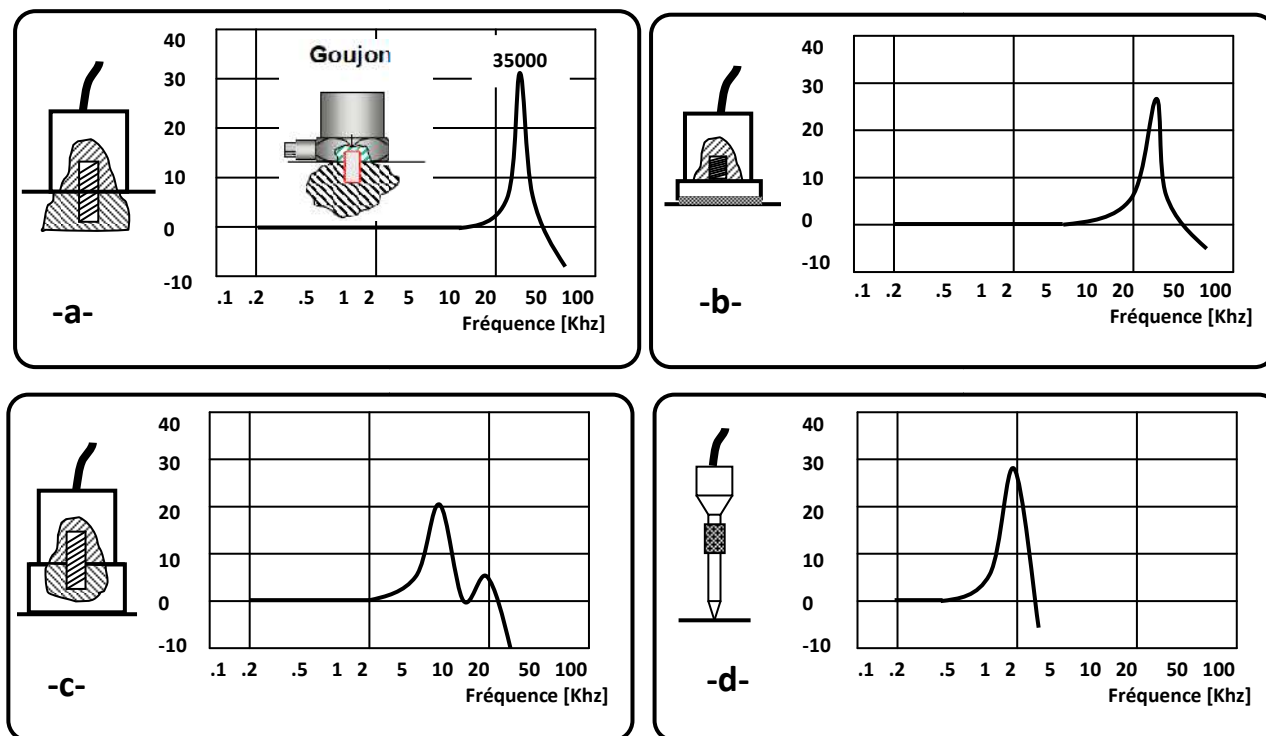
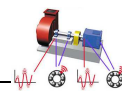
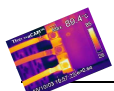


Figure 2.16: réponse d'un accéléromètre en fonction de la fréquence selon le mode de fixation

-a- fixation par goujon -b- fixation par embase collée -c- fixation par aimant -d- fixation par pointe de touche



VI. Stratégies de surveillance vibratoire

1. Mesure vibratoire en niveau global

Cette stratégie de surveillance consiste à mesurer, à l'aide de capteurs, le niveau global d'un ou de plusieurs indicateurs (déplacement, vitesse ou accélération), à suivre son évolution dans le temps et à le comparer à des normes ou des mesures précédentes. Certes, toute évolution est due à une dégradation de la machine. Cela permet de mettre en évidence l'existence d'une anomalie à un stade précoce et de faire une première idée des types de défauts qui affectent la machine, mais ne permet pas d'établir un diagnostic précis.

2. Analyse temporelle

Cette stratégie consiste à suivre, au cours du temps, le comportement vibratoire d'une machine en fonction de ces paramètres de fonctionnement (étude de la vibration d'une turbine lors de son accélération ou sa décélération). Ce type de suivi est simple à exploiter lorsque le signal est simple mais il devient inexploitable lorsque le signal a pour origine des sollicitations multiples.

3. Analyse spectrale

L'analyse spectrale consiste à relever le signal vibratoire mesuré sur la machine et de procéder à une analyse systématique pour rechercher la présence d'images vibratoires de l'ensemble des défauts susceptibles d'affecter l'installation considérée. Cela permet d'accéder au diagnostic, c'est à dire, d'identifier avec précision la nature de l'anomalie et si possible en préciser la gravité.