II. 1. 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 approprie des défauts, d'éviter la casse et de n'intervenir sur une machine qu'au bon moment et pendant des arrêts programmés de production. [2]

II. 2. VIBRATIONS DES MACHINES TOURNANTES

En pratique, une bonne conception produira de faibles niveaux vibratoires dans une machine tournante. Cependant, la machine vieillissant, les fondations travaillent, les pièces se déforment et s'usent, et de légers changements dans ses propriétés dynamiques apparaissent. Les arbres se désalignent, les paliers, les rotors se déséquilibrent, les courroies se détendent, les jeux augmentent. Tous ces facteurs se traduisent par une augmentation de l'énergie vibratoire qui excite les résonances et ajoute une charge dynamique considérable aux paliers.

Les vibrations recueillies lors des campagnes de mesures sont porteuses d'informations qui caractérisent l'état de fonctionnement de certains composants mécaniques constituant la machine analysée.

C'est grâce à l'analyse de ces vibrations qu'il est possible de détecter les composants défectueux et éventuellement de les localiser. Lorsqu'un certain seuil (correspondant à un niveau de vibration limite) fixé est atteint, il est possible d'estimer la durée de vie résiduelle du composant dans les conditions de fonctionnement données à partir de la connaissance des lois d'endommagement. [8]

II. 3. ORIGINE DES VIBRATION SUR LES MACHINE TOURNANTES

L'analyse vibratoire est utilisée en maintenance conditionnelle pour la surveillance des machines tournantes.

Les machines tournantes sont des systèmes lesquels peut se distinguer :

- Un rotor ;
- Une structure ;
- Des liaisons ;

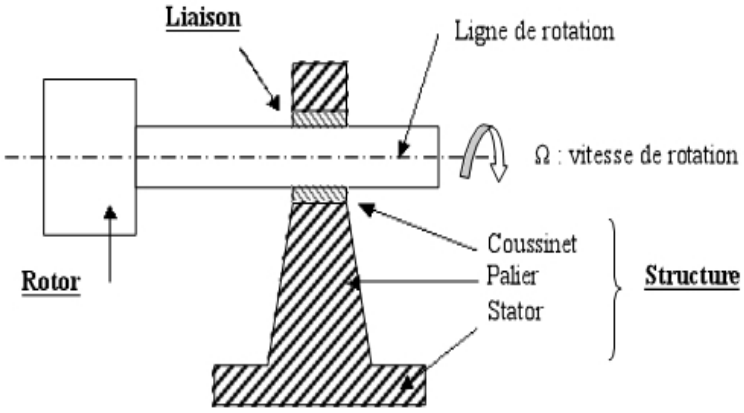


Fig. II. 1 : Les organes principaux d'une machine tournante.

Le rotor tourne autour d'une ligne de rotation par l'intermédiaire de liaisons ayant pour support la structure de la machine. La rotation du rotor engendré des forces qui dépendent de l'état des machines.

Ces efforts vont se répercuter sur tous les éléments de la machine. Des vibrations vont être crée si ces efforts rencontrent une mobilité (un peu jeu ou un élément peu rigide). Une vibration peut donc être vue comme : [9]

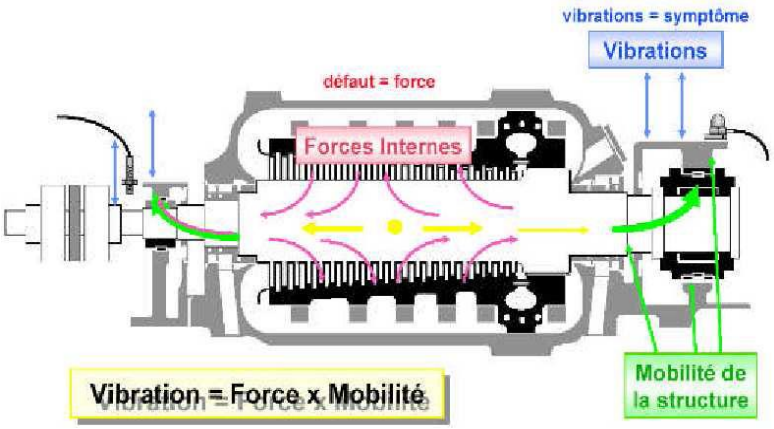


Fig. II. 2 : Les efforts qui traduisent les vibrations

II. 4. ANALYSE VIBRATOIRE

II. 4. 1. Définition

Le principe de l'analyse des vibrations est basé sur l'idée que les structures de machines, excitées par des efforts dynamiques, donnent des signaux vibratoires dont la fréquence est identique à celle des efforts qui les ont provoqués ; et la mesure globale prise en un point est la somme des réponses vibratoires de la structure aux différents efforts excitateurs.

On peut donc, grâce à des capteurs placés en des points particuliers, enregistrer les vibrations transmises par les structures de la machine et, grâce à leur analyse, identifier l'origine des efforts auxquels elle est soumise.

De plus, si l'on possède la « signature » vibratoire de la machine lorsqu'elle était neuve, ou réputée en bon état de fonctionnement, on pourra, par comparaison, apprécier l'évolution de son état ou déceler l'apparition d'efforts dynamiques nouveaux consécutifs à une dégradation en cours de développement. [2]

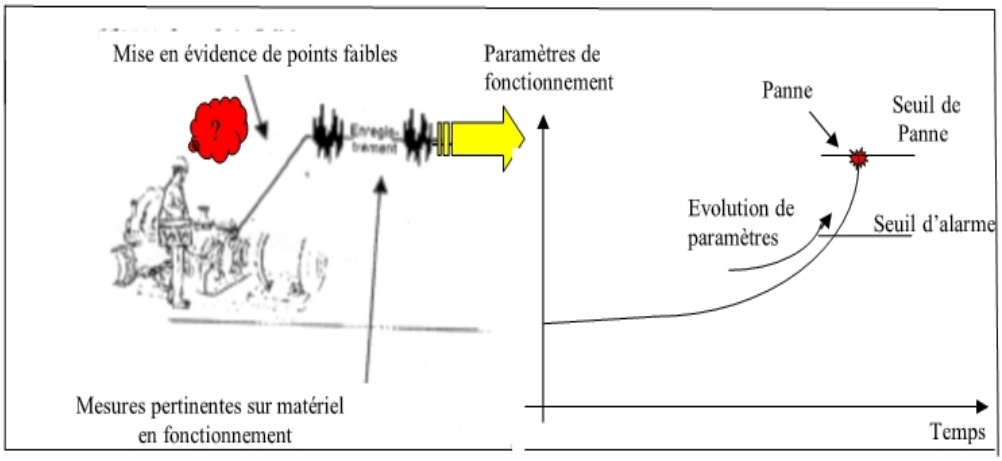


Fig. II. 3 : Principe de l'analyse vibratoire des machines tournantes.

II. 4. 2. Objectifs

L'analyse vibratoire poursuit deux objectifs :

- la détection des défauts
- l'analyse détaillée des défauts.

On utilise à cet effet des paramètres calculés :

- soit dans le domaine temporel
- soit dans le domaine fréquentiel
- soit dans les deux à la fois

II. 4. 3. Surveillance

La comparaison des mesures vibratoires effectuées à intervalles de temps déterminés dans des conditions de fonctionnement identiques permet de suivre l'évolution d'un défaut en exploitant le signal vibratoire [10]. A partir de ces mesures, il est possible d'obtenir un historique de l'évolution du défaut par rapport à un niveau de référence caractérisé par la signature vibratoire de la machine en bon état.

La norme [ISO10816] fixe des critères d'évaluation des niveaux vibratoires permettant d'estimer la sévérité des défauts et donc de l'état de fonctionnement de la machine. La sévérité vibratoire représente la valeur efficace de la vitesse de vibration mesurée dans la bande fréquentielle [10-1000 Hz] sachant que les critères d'évaluation dépendent de la classe dans laquelle la machine se situe. Mais ces méthodes dites "mesures des niveaux globaux" restent imprécises et ne permettent pas la détermination de la cause de l'augmentation du niveau vibratoire. Les signaux sortant des capteurs doivent être enregistrées et traité par collecteur et un analyseur de vibration. [8]

On distingue alors deux types de surveillances : La surveillance on line et off line.

On Line : la machine est surveillée en permanence par un moniteur de vibrations.

Off Line : les mesures sont effectuées lors de rondes à intervalles réguliers. On utilise alors un collecteur de données. Les collecteurs modernes permettent également d'analyser les mesures.

On peut également analyser les mesures sur des ordinateurs équipés de logiciels spécifiques en y transférant les mesures effectuées. [9]

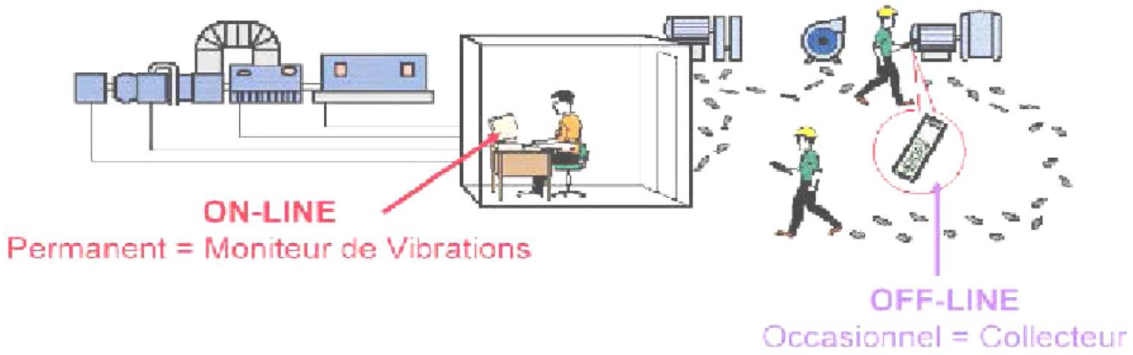


Fig. II. 4 : les deux types de surveillances.

II. 4. 4. Diagnostic

Pour établir un diagnostic vibratoire, il est souvent nécessaire de faire appel à des outils mathématiques relativement élaborés. Ces outils doivent assister l'opérateur et lui permettre de remonter aux origines du ou des défauts. Mais dans l'absolu, les signaux vibratoires sont insuffisants pour établir un diagnostic.

C'est pourquoi il est indispensable de connaître non seulement la cinématique de la machine, mais également les caractéristiques de ses composants ainsi que leurs différents modes de dégradation. La connaissance de ces modes de défaillance et de leurs influences sur le niveau de vibration est à la base d'un diagnostic et d'une surveillance fiable. [8]

II. 5. LES VIBRATIONS

II. 5. 1. Définition d'une vibration

Une vibration est une oscillation ou la quantité d'un paramètre définissant le mouvement d'un système mécanique. Une oscillation est une variation, normalement dans le temps, de la magnitude d'une quantité en regard d'une référence spécifiée, lorsque cette magnitude est alternativement plus grande ou plus petite que la référence.

Selon la norme ISO 2041 "Vibrations et chocs - Vocabulaire (Août 1990)" définit la notion de vibration :

Variation avec le temps de l'intensité d'une grandeur caractéristique du mouvement ou de la position d'un système mécanique, lorsque l'intensité est alternativement plus grande et plus petite qu'une certaine valeur moyenne ou de référence.

En fait, un corps est dit en vibration lorsqu'il est animé d'un mouvement oscillatoire autour d'une position d'équilibre ou de référence. [11]

II. 5. 2. Naissance d'une vibration

L'exemple le plus simple d'un système en vibration est sans doute donné par le mouvement d'une masselotte suspendue à un ressort et relâchée après traction.

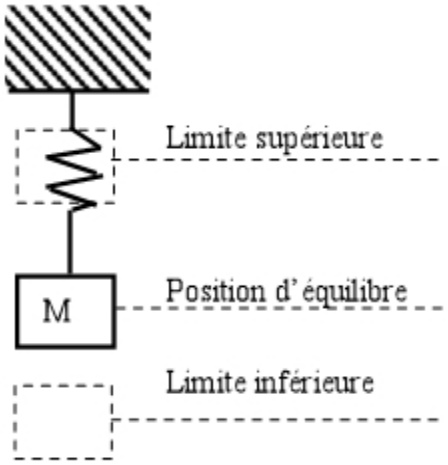


Fig. II. 5 : Système masse-ressort.

Cet exemple (figure II.5) montre que si le mouvement est entretenu par une force d'excitation périodique :

- la masselotte oscille entre des limites supérieures et inférieures, et l'écart entre chacune de ces limites et la position d'équilibre est appelé "amplitude".

- la masselotte oscille autour de sa position d'équilibre un certain nombre de fois par seconde ou par minute.

Ce nombre de cycles répétés à l'identique pendant une unité de temps s'appelle la "fréquence" et, à l'inverse, la durée du cycle s'appelle la "période".

Si la masselotte revient trois fois par seconde à sa position initiale, elle accomplira trois cycles par seconde, la fréquence du mouvement sera de trois Hertz (3 Hz) et sa période de 1/3 de seconde ou 333,333 ms. [12]

II. 5. 3. Caractères physiques de l'onde

Une vibration correspond à des variations périodiques d'un milieu matériel (gazeux, liquide ou solide) qui se transmettent de proche en proche. On parle souvent de son lorsque la vibration a lieu dans l'air alors que dans un milieu solide, on parle simplement de vibration.

L'onde vibratoire à certains caractères physiques dont les plus importants sont repris ci-dessous :

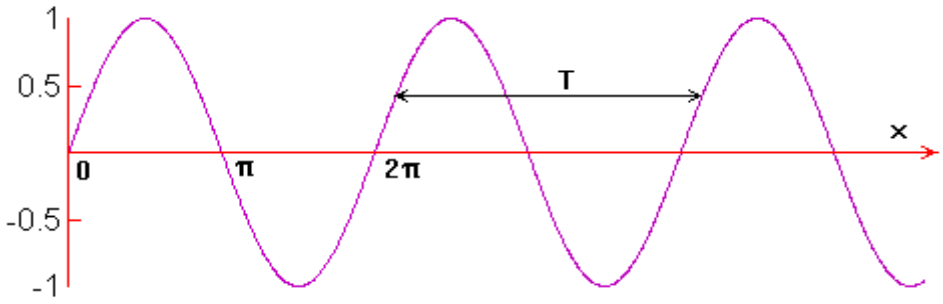


Fig. II. 6 : un signal sinusoïdal

La fréquence f

La fréquence représente la cadence de répétition d'un phénomène ou le nombre de fois qu'il se reproduit en un temps donné. Lorsque l'unité de temps choisi est la seconde, la fréquence s'exprime en Hertz (Hz).

Une vibration qui se produira 50 fois/seconde aura donc une fréquence de 50 Hz.

1 Hertz = 1 cycle par seconde

Sur les machines tournantes industrielles, on utilise souvent le tour par minute pour exprimer une vitesse de rotation noté CPM (nombre de cycles par minute) ou encore en RPM (nombre de rotations ou révolutions par minute).

$$\mathbf{1}\,H_Z = \mathbf{1}\frac{CPM}{60} = \mathbf{1}\frac{tr/min}{60}$$

La période T

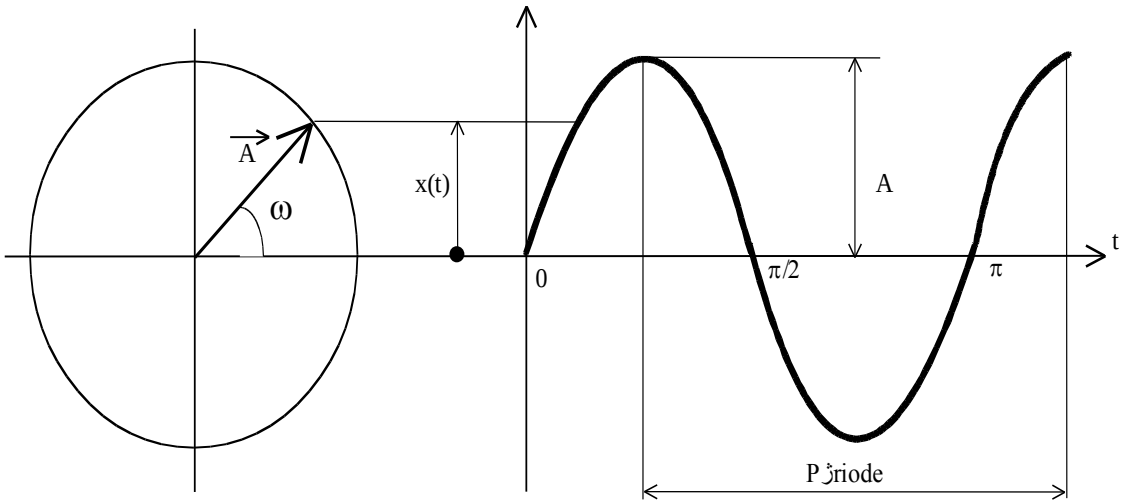
La période est l'inverse de la fréquence. C'est la durée d'une oscillation élémentaire du milieu matériel dans lequel le son se propage. Son unité [s]. [12]

II. 5. 4. Caractéristiques d'une sinusoïde

La forme la plus simple d'un signal vibratoire est un signal périodique que l'on représente sous la forme d'un mouvement sinusoïdal. Le mouvement sinusoïdal peut être représenté par la projection sur un axe vertical d'un vecteur tournant $\overline{\boldsymbol{A}}$ ayant une vitesse angulaire constante ω.

La rotation de ce vecteur provoque une variation de sa projection **x**, dont l'équation est :

$$\boldsymbol{x\,(t) = A\,.\,sin\,(\omega t)}$$



Période $T = \dfrac{2\pi}{\omega}$ ***Fréquence*** $f = \dfrac{1}{T} = \dfrac{\omega}{2\pi}$

Fig. II. 7 : exemple d'un signal sinusoïdal

Dans la réalité, les signaux vibratoires sont rarement des sinusoïdes pures. On remarque sur la figure ci-dessus un décalage entre les maxima de chaque sinusoïde. Ce décalage est appelé la phase du signal.

II. 5. 5. Différent types de vibrations

On classe généralement les vibrations d'après l'évolution de la variable considérée dans le temps (périodicité) comme dans le tableau ci-dessous :

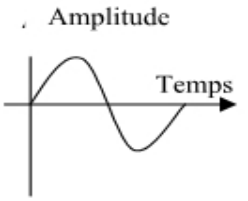
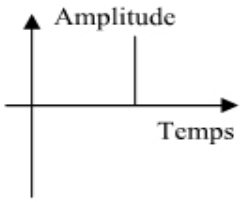
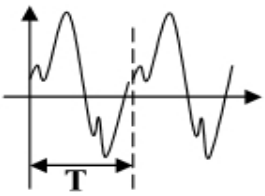
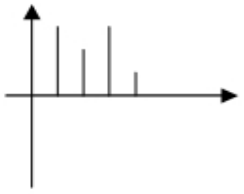
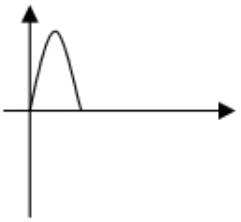
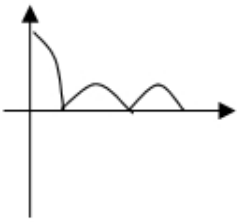
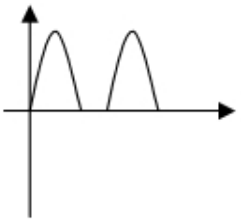
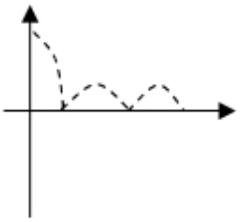
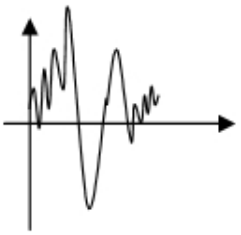
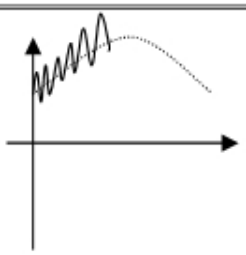
Nature de vibration	Forme temporelle	Forme spectrale
Harmonique (Sinusoïdale) Elle est représentée par une sinusoïde $x(t) = X.\sin(\omega.t + \varphi)$		
Périodique (Sinusoïdale Complexe) $x(t) = \sum X.\sin(\omega.t + \varphi)$ Elle est composée de plusieurs vibrations harmoniques		
Transitoire		
Transitoire périodique non harmonique		
Apériodique (Aléatoire) Elle à comportement temporel quelconque		

Tableau II. 1 : Les types des vibrations

II. 5. 6. Amplitude du signal vibratoire :

On appelle amplitude d'un mouvement vibratoire la valeur de ses écarts par rapport à sa position d'équilibre. De cette définition générale, la complexité d'un signal vibratoire réel conduit à définir plusieurs grandeurs (figure II.8) pour caractériser son amplitude

- **L'amplitude "crête (A_c)"**. Elle représente l'amplitude maximale du signal par rapport à sa valeur d'équilibre.

- **L'amplitude "crête à crête (A_{c-c})"** appelée "peak to peak" (A_{p-p}) en anglais. Elle représente l'écart entre les amplitudes extrêmes du signal pour un temps d'observation donné.

Dans le cas d'une vibration sinusoïdale, elle est parfois appelée "amplitude double" ($A_{c-c} = 2A_c$)

- **L'amplitude "efficace (A_{eff})"** ou "RMS" en anglais (Root Mean Square). Comme en électricité, elle représente l'amplitude corrigée « statique » du signal redressé, indiquant ainsi l'énergie donnée par le mouvement vibratoire.

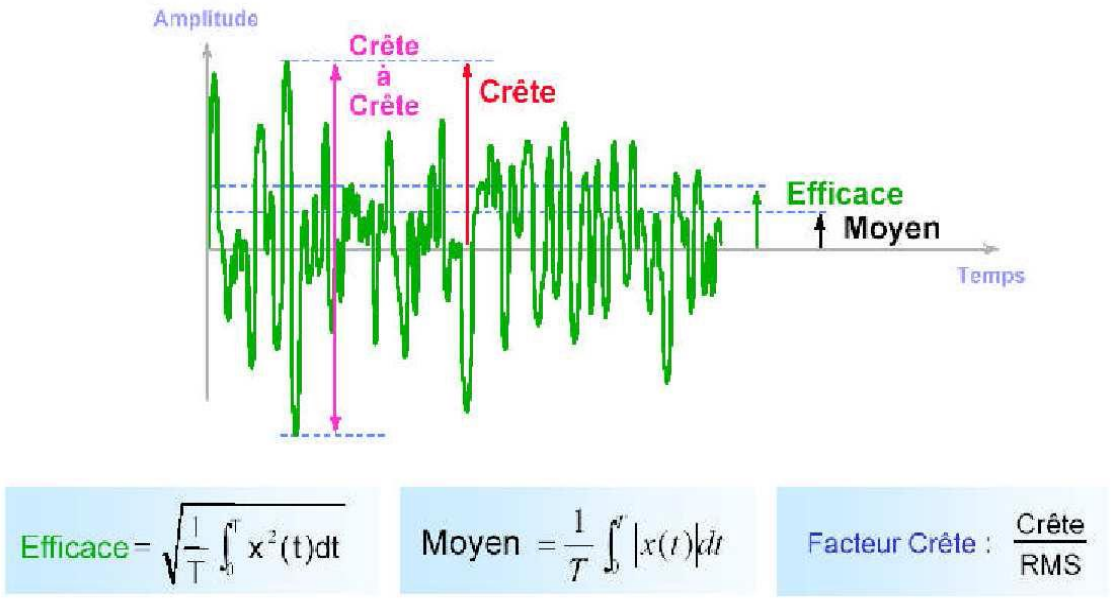


Fig. II. 8 : Représentation des différentes amplitudes caractéristiques dans le cas d'un signal complexe

Dans le cas d'une vibration sinusoïdale (induite par exemple par un balourd), les amplitudes crête, crête à crête et efficace sont liées par les relations suivantes :

$$A_{eff} = \frac{\sqrt{2}}{2} A_c = 0{,}707 A_c$$

$$A_{c-c} = 2\sqrt{2}\ A_{eff} = 2{,}828\ A_{eff}$$

Dans le cas d'un signal vibratoire complexe, il n'existe pas de relations mathématiques liant les valeurs crête et efficace.

Ces trois grandeurs, dont deux ne peuvent donc se déduire l'une de l'autre, devront donc être mesurées ou calculées simultanément par l'appareil de mesure suivant les formules :

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

$$A_c = \sqrt{\max[s^2(t)]}$$

$$A_{c\text{-}c} = \max[s(t)] - \min[s(t)]$$

Avec :

– **max [s(t)]** : amplitude instantanée la plus élevée atteinte par le signal pour la période d'observation T

– **min [s(t)]** : amplitude instantanée la plus faible atteinte par le signal pour la période d'observation T

– **s(t)** : fonction représentative du signal. [12]

II. 5. 7. Les trois grandeurs représentatives de l'amplitude

Si nous reprenons l'exemple du système mécanique précédent, on constate (figure II.9) que le mouvement de la masselotte se traduit par :

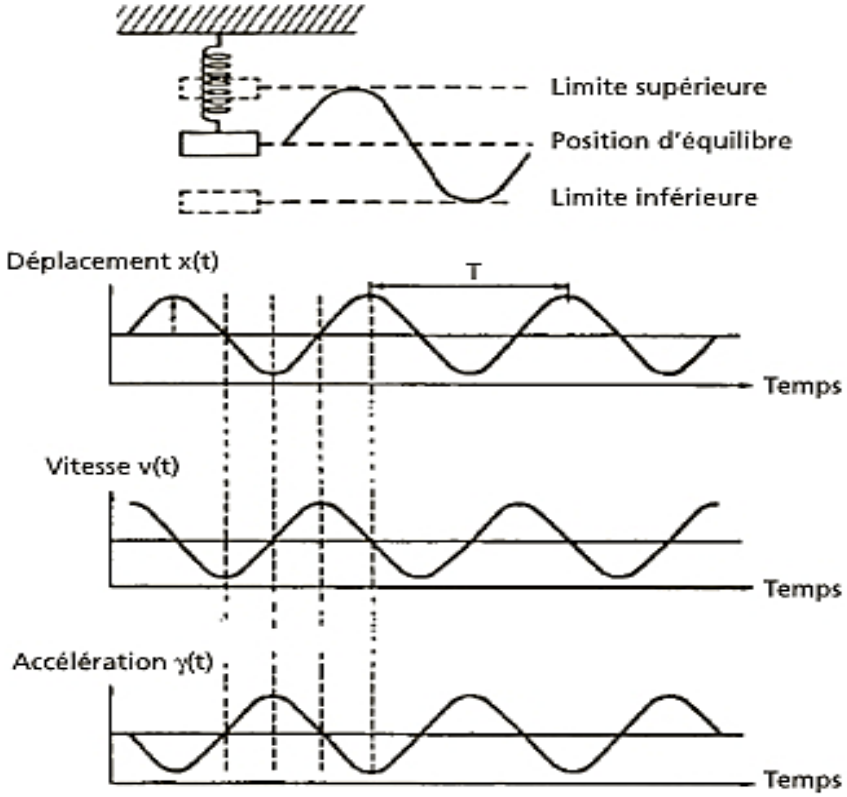


Fig. II. 9 : Représentations du mouvement d'un système masse-ressort selon les grandeurs cinématiques considérées

Un déplacement.

La position de la masselotte varie de part et d'autre de la position d'équilibre, allant de la limite supérieure à la limite inférieure du mouvement.

On peut écrire l'équation de la variation du déplacement en fonction du temps, de la manière suivante :

$$\mathbf{x(t) = A\sin(\omega t)}$$

Où :

x : déplacement

t : temps

A : amplitude

ω : pulsation ou vitesse angulaire (rad/s).

La période de ce mouvement est notée T, elle est exprimée en secondes (s). L'inverse de la période, c'est-à-dire la fréquence est notée *f*, et est exprimée en Hertz .Nous vous rappelons que ω , T et *f* sont liés par les relations:

$$\mathbf{f = \frac{1}{T}} \qquad\qquad \mathbf{\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}}$$

Le niveau de déplacement en log se définit par :

$$\boldsymbol{Ld} = 10\,\mathbf{log_{10}}\frac{\boldsymbol{D}}{\boldsymbol{D_{ref}}} \qquad qui\ vaut\ 1\ pm\ =\ 10^{-6}\mu m$$

***L*d** : niveau d' déplacement ; $\boldsymbol{D_{ref}}$: déplacement de référence

Une vitesse de déplacement.

Cette vitesse sera nulle au point haut et au point bas du mouvement de la masselotte et sera maximale autour du point d'équilibre. la vitesse notée v est la dérivée du déplacement par rapport au temps. Elle s'écrit ;

$$\mathbf{v = \frac{dx}{dt} = d\ A\sin\frac{\omega t}{dt} = A\ \omega\cos(\omega t)}$$

Le niveau de vitesse en log se définit par :

$$\boldsymbol{Lv} = 10\,\mathbf{log_{10}}\frac{\boldsymbol{V}}{\boldsymbol{V_{ref}}} \qquad qui\ vaut\ 1\ nm/s\ =\ 10^{-9}m/s$$

***L*v** : niveau de vitesse ; $\boldsymbol{V_{ref}}$: vitesse de référence

Une accélération.

Celle-ci permet à la masselotte de passer de sa vitesse minimale en début de course à sa vitesse maximale au point d'équilibre avant de décélérer en fin de course.

L'accélération est une variation de vitesse par unité de temps. Mathématiquement, l'accélération notée γ est la dérivée de la vitesse par rapport au temps. Elle s'écrit :

$$\boldsymbol{\gamma = \frac{dv}{dt} = \frac{d[\omega A \cos(\omega t)]}{dt} = -A\omega^2 \sin(\omega t)}$$

Le niveau de l'accélération en log se définit par :

$$\boldsymbol{La = 10 \log_{10} \frac{A}{A_{ref}}} \qquad qui\ vaut\ 1\frac{\mu m}{s^2} = \frac{10^{-6} m}{s^2} \quad ou \quad g = \frac{9.81 m}{s^2}$$

$\boldsymbol{La}$: niveau d' accélération ; $\boldsymbol{A_{ref}}$: accélération de référence

On peut déduire, par analogie avec ce qui précède, qu'une vibration est caractérisée par trois grandeurs physiques ou cinématiques fondamentales qui sont : le déplacement **x,** la vitesse v et l'accélération a**.** [78, 11,12]

III. 5. 8. Décomposition d'un signal

Quelle que soit la forme d'un signal S (t), on peut le décomposer sous forme d'une somme de sinusoïdes de différentes amplitudes, de différentes fréquences.

$$\boldsymbol{S(t) = A_1 \sin(1t + \omega_1) + A_2 \sin(2t + \omega_2) + \ldots\ldots + A_n \sin(1t + \omega_n)}$$

Cette décomposition est réalisée grâce à une fonction mathématique appelée transformée de Fourier. Les ordinateurs utilisent un algorithme qui permet de réaliser rapidement cette transformation sur des données numériques.

Dans les figures ci-dessous, le signal en couleur rouge est compose de quatre sinusoïdes. Les temps en abscisse sont en milliseconde

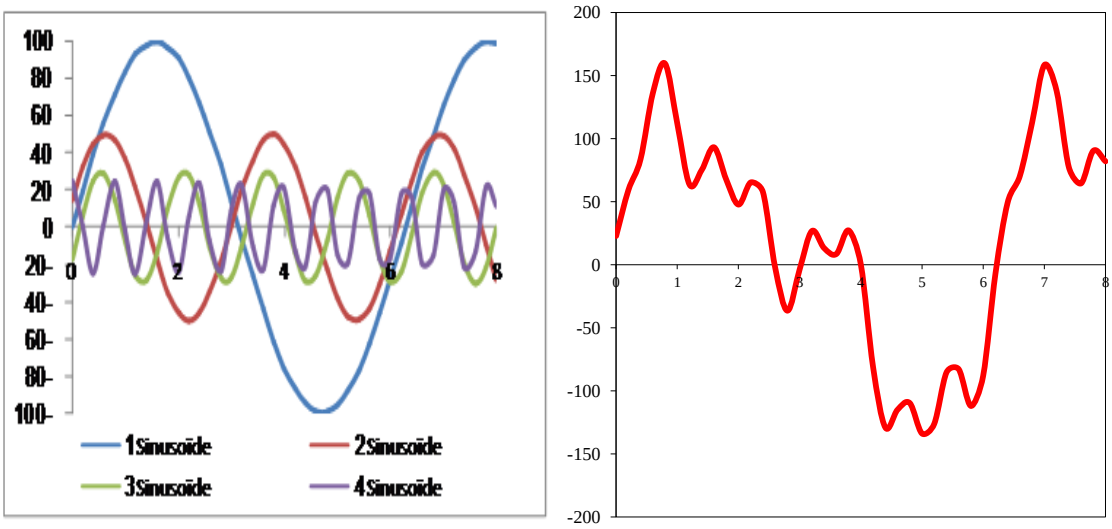


Fig. II. 10 : Représentations graphique des signaux vibratoire

II. 6. CHAINE DE MESURE

Le but de la mesure est de faire correspondre, à une grandeur physique que l'on désire connaître, une grandeur compréhensible par le système d'acquisition.

De nos jours, il s'agit presque uniquement de signaux électriques qui ont remplacé les systèmes mécaniques et optiques d'autre fois.

Ainsi le capteur délivre un signal qui est amplifié et converti généralement en tension par un conditionneur. Le système d'acquisition n'a plus alors à traiter qu'un courant électrique dont l'intensité est directement reliée à l'amplitude du phénomène vu par le capteur et cela quel que soit le type de ce capteur. [14]

La chaîne d'acquisition analogique

Prenons l'exemple (figure II.11). Le mot analogique veut dire que la loi liant l'information issue du capteur à la grandeur mesurée est continue. Le signal issu du capteur est transformé par un conditionneur de signaux qui comprend généralement les éléments suivants:

- le convertisseur de mesure, qui transforme généralement le signal en un courant électrique aisément transportable et qui est en entrée de la plupart des stations d'acquisition modernes.

- l'amplificateur, qui a pour but d'augmenter l'intensité du signal et de le rendre en cela moins sensible au bruit de fond ambiant.

- un ou plusieurs dispositifs de traitement du signal qui sont dédiés à la chaîne d'acquisition et varient en fonction des objectifs fixés par l'utilisateur.

Ces dispositifs mettent en œuvre des fonctions très variées allant des filtres aux corrélations entre signaux en passant par la conversion en valeur efficace ou la linéarisation.

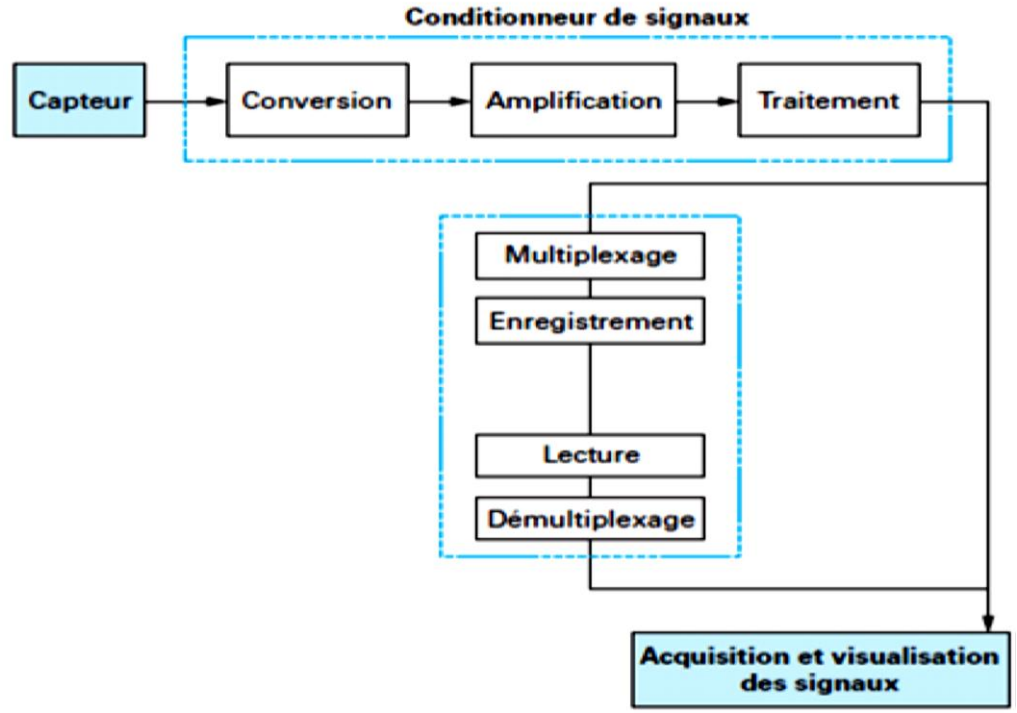


Fig. II. 11 : la chaine de mesure analogique

La chaîne de mesure numérique

Parmi l'exemple donné à (figure II.12), utilise au départ les mêmes dispositifs que la chaîne de mesure analogique. En sortie du conditionneur de signaux, le signal est échantillonné et numérisé par les éléments suivants :

- l'échantillonneur-bloqueur (E/B) a pour mission, au moment indiqué par le système logique de commande, de figer la valeur instantanée du signal au moins le temps que le convertisseur analogique-numérique effectue sa conversion.

-le convertisseur analogique-numérique (CAN) a pour rôle de coder la valeur instantanée du signal en entrée en un nombre. Son fonctionnement est géré par le système logique de commande qui peut être un microprocesseur.

De la même manière que pour la chaîne analogique, dans le cas de plusieurs voies d'acquisition, un multiplexeur peut venir s'intercaler dans la chaîne numérique soit entre le conditionneur et l'échantillonneur-bloqueur, soit entre ce dernier et le convertisseur analogique-numérique. [14]

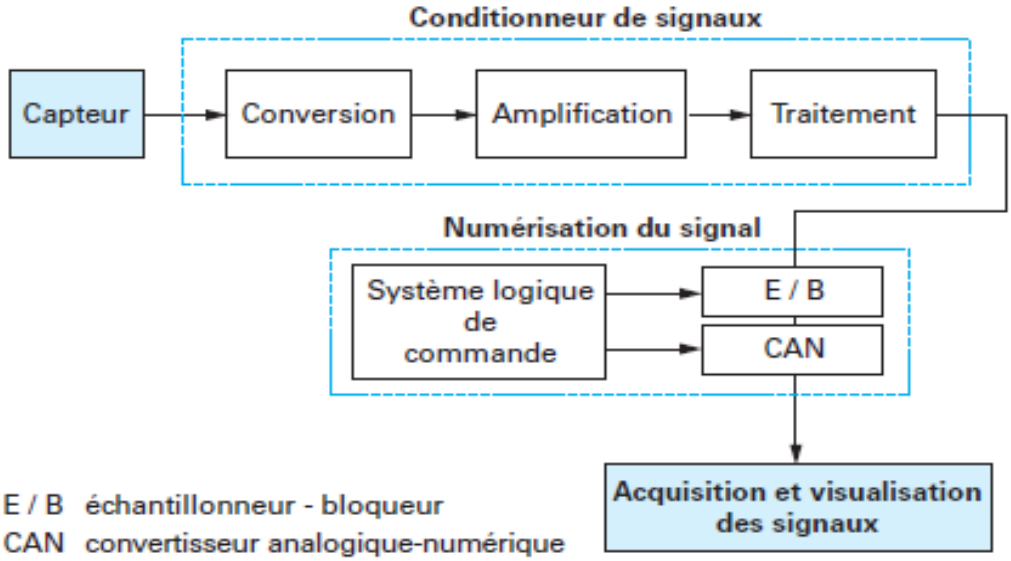


Fig. II. 12 : la chaine de mesure numérique.

II. 7. LES CAPTEURS DE VIBRATION

II. 7. 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 utilises le prosimètre (mesure de déplacement), le vélocimétrie (mesure de vitesse) et l'accéléromètre (mesure d'accélération)

Un capteur de vibration est caractérise 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 + 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 l'amplitude du mouvement mécanique qui lui donne naissance.

Par exemple 8 mV par Elle est donnée par le constructeur du capteur, généralement sous forme de courbe d'étalonnage qui devra faire l'objet d'une vérification périodique. [15]

II. 7. 2. Les prosimètres

Le prosimètre, ou sonde de proximité [figure II.13], 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.



Fig. II. 13 : prosimètres et leur driver

Il est monté en permanence à l'intérieur du palier (figure II. 14). Les mesures en déplacement ne sont pas quantifiables dans toutes les gammes de fréquence, Ces mesures seront limitées aux basses fréquences **(**< 100 Hz**).**

Le capteur de déplacement est utilisé pour toutes les applications ou la surveillance des jeux entre les arbres et les paliers. C'est pourquoi l'on retrouve des capteurs de déplacement installés sur la plupart des turbines hydroélectriques et des turbomachines. [15]

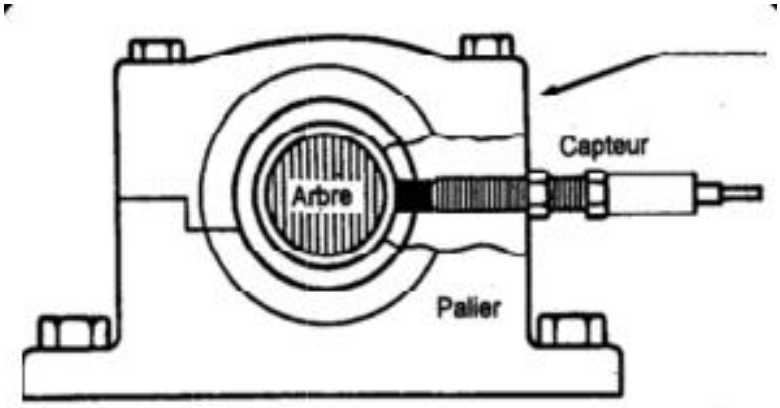


Fig. II. 14 : prosimètre monté sur un palier

II. 7. 3. Les vélocimétres

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

Les vélocimétres les plus courants sont constitués d'une masse sismique reliée au boitier par un ressort et solidaire d'une bobine qui se déplace dans un champ magnétique permanent crée par un barreau aimante [figure II.14].

Le mouvement de la bobine, induit par la vibration du palier sur lequel est fixé le capteur, génère une tension proportionnelle à la vitesse du mouvement de la bobine. [12]

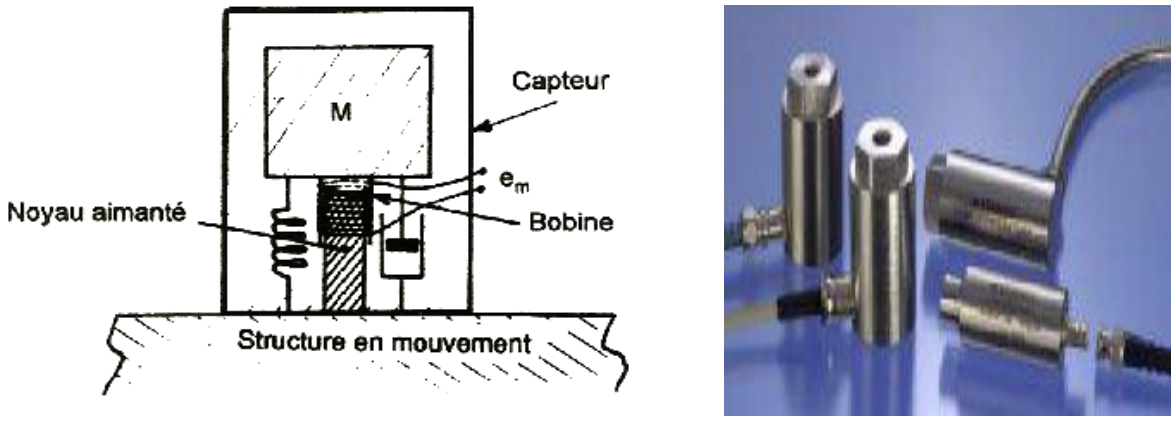


Fig. II. 15 : schéma de principe d'un vélocimétres

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

III. 7. 4. Les accéléromètres

Principe :

Un accéléromètre piézoélectrique (figure II.16), 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.

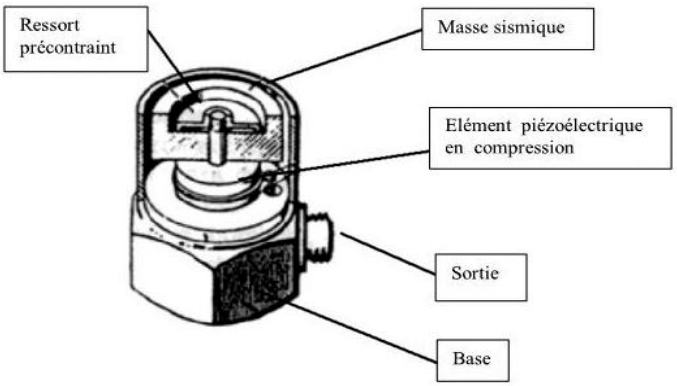


Fig. II.16: schéma de principe d'un accéléromètre.

Les accéléromètres piézoélectriques tendent à devenir les capteurs de vibration absolue les plus utilisés pour la surveillance. Ils possèdent les propriétés suivantes :

-Utilisables sur de très grandes gammes fréquentielles.

-Excellente linéarité sur une très grande gamme dynamique (typiquement 140 dB).

-Le signal d'accélération peut être intègre électroniquement pour donner le déplacement et la vitesse.

- Aucun élément mobile, donc extrêmement durable.

Réponse d'un accéléromètre :

L'examen de la courbe de réponse d'un accéléromètre piézoélectrique, illustrée sur la figure III. 17, montre l'existence de deux zones :

- 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 fausse. [15]

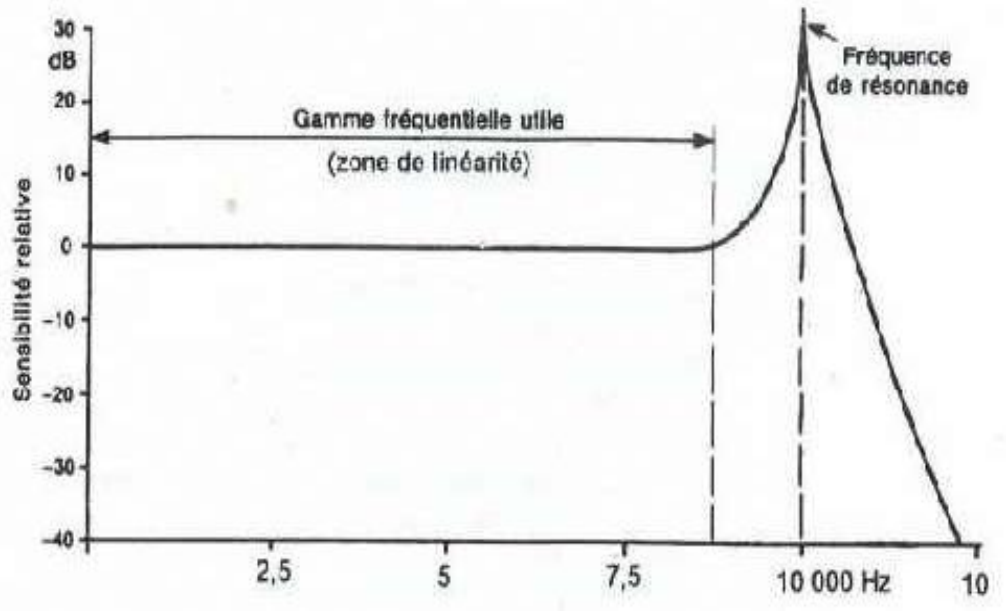


Fig. II.17: Réponse en fréquence d'un capteur Piézoélectrique.

II. 7. 5. 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 appliques a la partie mobile (figures II.18 et II.19) [15]. Ces efforts sont de deux types :

Efforts tournants

Ce sont les efforts lies a la rotation de l'arbre, génères 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 ;

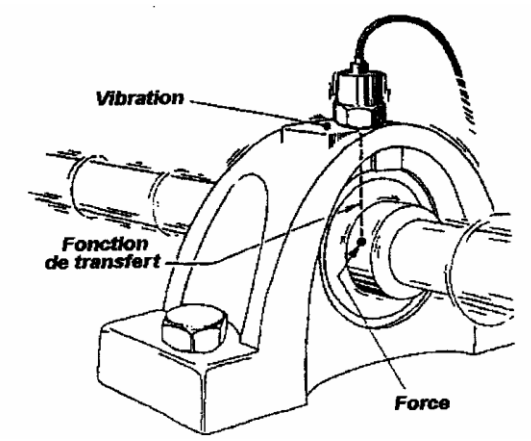


Fig. II. 18 : Fixation du capteur sur palier

Efforts directionnels

Ce sont des efforts lies a une contrainte de l'arbre, génères par exemple par la tension d'une courroie (effort directionnel radial figure II. 20), ou un par le contact d'un engrenage conique (effort directionnel axial).

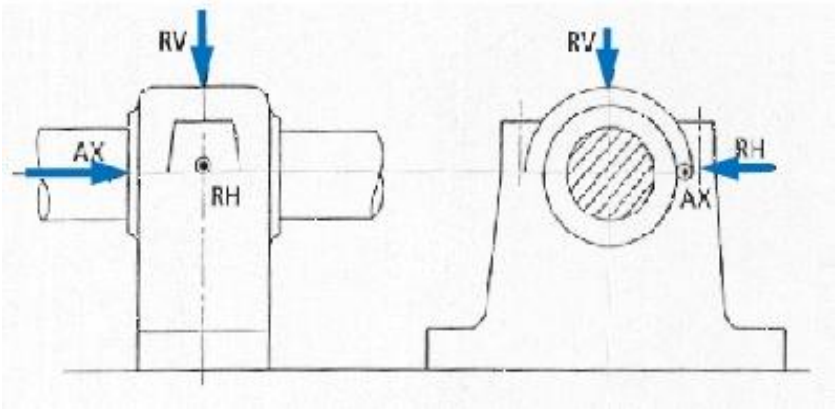


Fig. II. 19 : Choix directionnel pour la prise de mesure

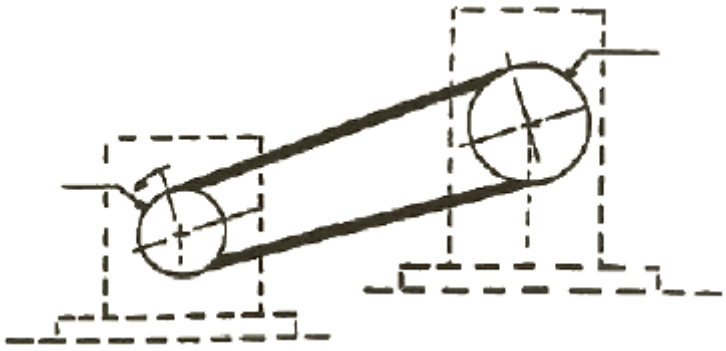


Fig. II. 20 : direction favorisée pour transmission par poulies courroies

2. Consignes pour la fixation des capteurs

- Les capteurs doivent être places 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 II.21].

- 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 a la direction de mesure [figure II.20].

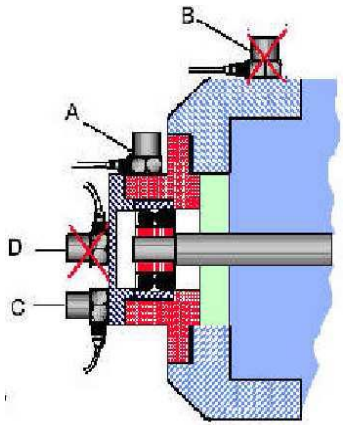


Fig. II.21 : choix de l'emplacement du capteur

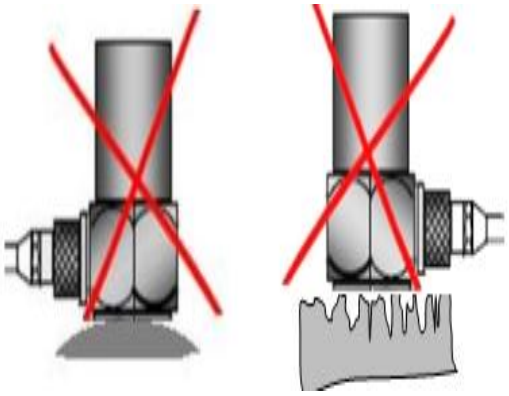


Fig. II.22: Les surfaces de contact avec les capteurs doivent être lisses et planes

- 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 II.23].

- Les mesures sont effectuées toujours au même endroit sur la machine. Les points de mesure sont repères, soit par la peinture, soit place de goujons. [15]

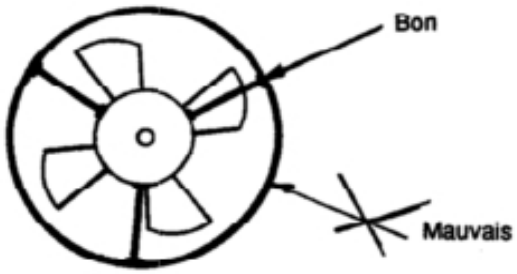


Fig. II. 23 : Choix de l'emplacement du capteur

3. 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 II. 24).

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. [15]

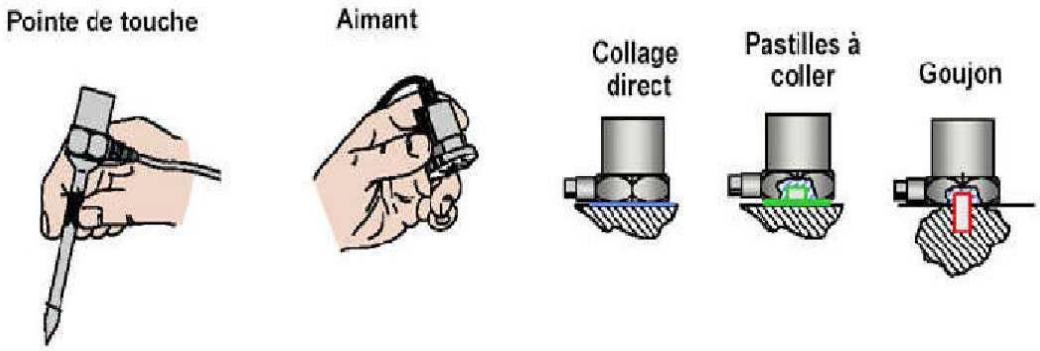


Fig. II. 24: réponse d'un accéléromètre en fonction de la fréquence selon le mode de fixation

II. 8. STRATEGIES DE SURVEILLANCE VIBRATOIRE

II. 8. 1. Mesure vibratoire en niveau global

Principe

La mesure des vibrations en niveau global permet de qualifier l'état général d'une machine par comparaison à des normes ou des mesures précédentes. Cette stratégie de surveillance consiste en un suivi de l'évolution dans le temps d'un ou de plusieurs indicateurs (déplacement, vitesse ou accélération).

Les vibrations mécaniques sont détectées par un capteur de vibrations, monte sur le palier de la machine, qui convertit le signal mécanique en un signal électrique qui sera achemine a un mesureur de vibrations pour l'analyser et afficher la valeur globale.

Le suivi se fait de deux façons différentes : continu, ou en ligne, ou périodique sous forme de rondes plus ou moins espacées dans le temps. La périodicité des mesures est adaptée en fonction de l'évolution des indicateurs. Plus une augmentation est rapide, plus les contrôles doivent être rapproches.

Il est obligatoire que les conditions de fonctionnement de la machine ainsi que les conditions de mesure (vitesse, charge, températures etc.) doivent être rigoureusement identiques d'une mesure à l'autre. [3]

Mesureur de vibration

Le mesureur de vibrations est l'instrument le plus simple utilise pour la mesure précise de l'amplitude vibratoire. En effet, il s'agit d'un instrument qui affiche une valeur unique indiquant, par exemple, la valeur efficace de la vitesse dans différentes gammes de fréquences. Il est conçu pour être utilise facilement par du personnel d'entretien pour qui la mesure des vibrations n'est qu'une tache parmi d'autres. [3]

Exploitation des mesures

Une valeur de niveau global unique est souvent difficilement exploitable en valeur absolue, mais nous pourrons par contre les utiliser en relatif, c'est-à-dire que l'évolution dans le temps d'un niveau global est réellement significative de l'évolution de l'état vibratoire de la machine.

Certes, un niveau très important doit demander des investigations supplémentaires (diagnostic), mais il n'est pas forcement lie à une anomalie mécanique, alors qu'une forte et rapide augmentation des amplitudes est toujours liée à une dégradation si toutes les conditions de fonctionnement sont identiques. [3]

L'évolution dans le temps d'un indicateur vibratoire est représentée par une courbe (figure II. 25), appelée courbe de tendance. Le résultat de mesure est comparé aux mesures précédentes et a des seuils prédéfinis. La courbe de tendance est accompagnée parfois d'une courbe de tendance extrapolée qui indique la pente de la dégradation et permet, en théorie, d'estimer ainsi une date présumée de défaillance (figure II. 26)

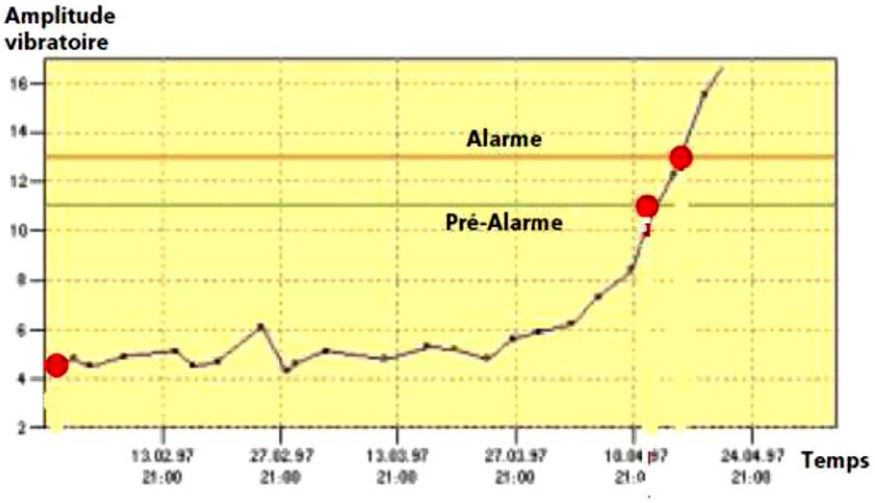


Fig. II. 25 : courbe de tendance.

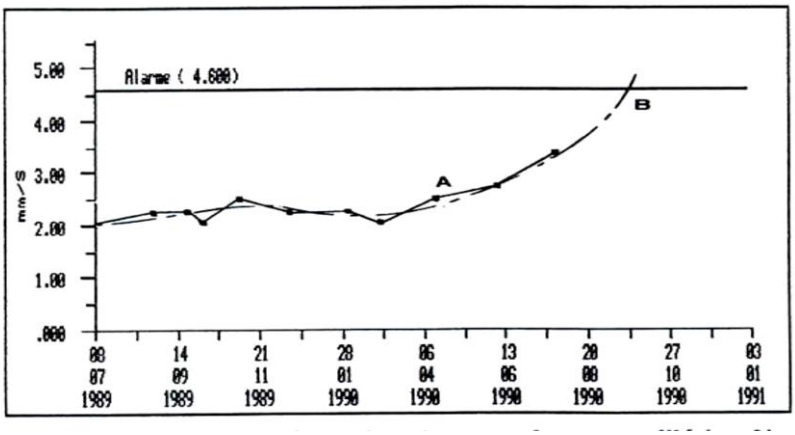


Fig. II. 26 : A : courbe de tendance. B : courbe extrapolée.

II. 8. 2. Analyse temporelle

L'analyse dans le domaine temporel est basée directement sur le signal temporel lui-même. La distribution d'amplitude du signal peut s'exprimer sous forme d'une fonction de densité de probabilité. Pour cela, on découpe en plage de mesures de *N* intervalles *Ij* de longueur égale.

On définit la probabilité *Pj(x)* pour que l'amplitude *x* de la vibration soit comprise entre les bornes de l'intervalle *Ij* par le rapport du temps pendant lequel l'amplitude instantanée du signal a été comprise entre ces deux valeurs sur le temps total de mesure (Figure II. 27). [2]

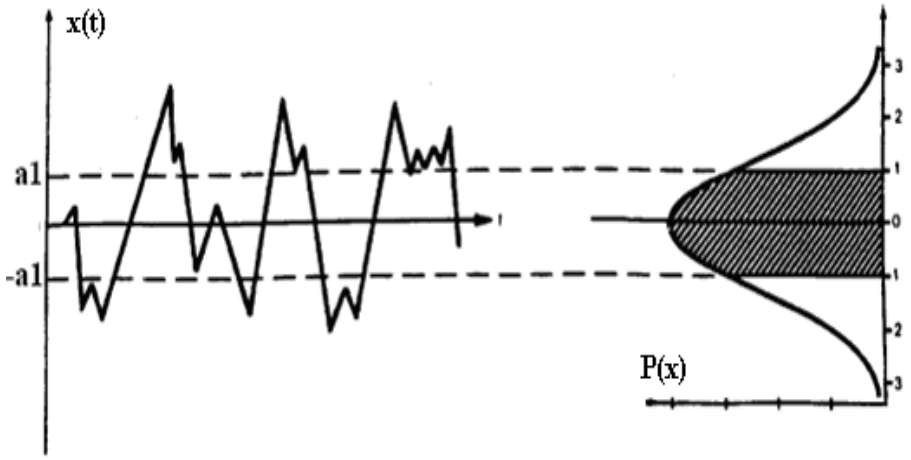


Fig. II. 27 : Établissement d'une courbe de densité de probabilité.
(a1: valeur efficace du signal).

Le graphe de la figure II. 27. montre que l'allure générale du signal vibratoire peut être analysée à travers sa densité de probabilité.

$$\boldsymbol{P_j\,(x) = \sum_{i=1}^{i=n_j} \Delta t_{ij}\ /\ T}$$

Pour obtenir des informations plus synthétiques sur la forme de la courbe de distribution des amplitudes du signal sans la tracer, les méthodes traditionnelles calculent les caractéristiques statistiques suivantes:

1. **La moyenne :** elle correspond au moment d'ordre1, elle est donnée par :

$$\boldsymbol{M_1 = \overline{x} = \int_{-\infty}^{+\infty} x\, p(x) dx}$$

2. La variance : elle correspond au moment d'ordre 2, et caractérise la dispersion des variables autour de la moyenne, elle est donnée par

$$\boldsymbol{M_2 = \sigma^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - \bar{x})^2 p(x) dx}$$

3. Le Skewness : c'est le moment d'ordre 3, il est donné par :

$$\boldsymbol{M_3 = S_k = 1 / \sigma^3 \int_{-\infty}^{+\infty} (x - \bar{x})^3 p(x) dx}$$

4. Le kurtosis : le moment d'ordre 4, représente le taux d'aplatissement de la distribution d'amplitude, il donne une évaluation de l'importance du pic du sommet de la courbe. Il est défini par :

$$\boldsymbol{M_4 = k = 1 / \sigma^4 \int_{-\infty}^{+\infty} (x - \bar{x})^4 p(x) dx}$$

Le kurtosis de la distribution normal est égale à 3, il est supérieur à 3 si la distribution devienne plus centrée ce qui indique la présence d'un défaut et il est inférieur à 3 si la distribution est aplatit. [16]