

II.1 LES VIBRATIONS DES MACHINES TOURNANTES

II.1.1 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 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.1.2 DEFINITION 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 [7]. Si l'on observe le mouvement d'une masse suspendue à un ressort (figure II.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 [7].

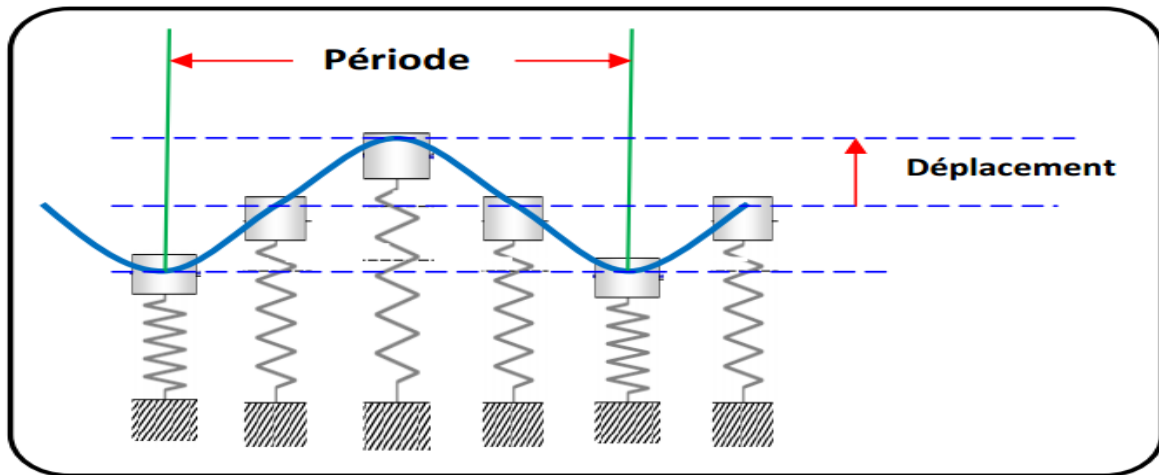


Figure II.1 : Mouvement d'une masse suspendue à un ressort [7]

II.1.3 CARACTERISTIQUES D'UNE VIBRATION

II.1.3.1 Fréquence :

La fréquence (f) est le nombre de cycles de vibration par unité de temps. L'unité de fréquence est l'hertz (Hz), soit un cycle par seconde. Comme la vitesse de rotation des machines tournantes est exprimée en tours par minute (T/M), la fréquence des vibrations auxquelles celles-ci sont soumises est communément exprimée en cycles par minute (C/M) et comme une minute compte 60 secondes, $1 \text{ Hz} = 60 \text{ C/M}$ [7].

- **Décibel :**

Les niveaux de vibrations dus à différents phénomènes sur une même machine étant extrêmement différents, on représente généralement ces valeurs sur une échelle logarithmique. C'est pourquoi on a introduit les valeurs en décibels [dB].

- **Fréquence d'excitation et fréquence propre**

La fréquence d'excitation est la fréquence à laquelle vibre un objet sous l'effet d'une force répétée. Une force d'excitation répétée appliquée sur un objet produit des vibrations ayant la même fréquence que cette force répétée. Les vibrations de ce type sont appelées vibrations forcées.

La fréquence propre est la fréquence à laquelle vibre un objet lorsque l'impulsion initiale est supprimée et qu'il peut osciller librement. Les vibrations de ce type sont appelées vibrations libres ou naturelles [8].

II.1.3.2 Amplitude :

L'amplitude (A) est le déplacement maximal par rapport à la position d'équilibre, ou encore la vitesse ou l'accélération maximale, selon le capteur de vibrations utilisé [8]. Pour simplifier, nous ne tiendrons compte que du déplacement. Dans ce cas, l'unité utilisée habituellement pour mesurer l'amplitude des vibrations est le micromètre (1 μ m) : 1 μ m = 10⁻⁶ m.

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 [6] ;
- l'amplitude efficace (**Aeff**), aussi appelée **RMS** (Root Mean Square) ou niveau efficace [6].

➤ Cas d'une vibration sinusoïdale

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

$$A_{\text{eff}} = A_c \frac{\sqrt{2}}{2} = 0.707 A_c \quad (\text{II.1})$$

➤ Cas d'une vibration quelconque

Dans le cas d'une vibration complexe quelconque, il n'existe pas de relation simple entre la valeur crête de l'amplitude (Ac) et la valeur efficace de l'amplitude (Aeff) qui se définit mathématiquement par la relation:

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

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

➤ 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 [8].

a) Déplacement :

On peut écrire l'équation de la variation du déplacement en fonction du temps, de la manière suivante : $X(t) = A \sin \omega t$ Où : x = déplacement t = temps ; A = amplitude ; ω = pulsation ou vitesse angulaire (rad/s).

La période de ce mouvement (ici égale à un tour du rotor) 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 (Hz). Nous vous rappelons que ω , T et f sont liés par les relations :

$$f = \frac{1}{T} \quad \omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T} \quad (\text{II. 3})$$

b) Vitesse :

La vitesse du mouvement vibratoire correspond à la variation de son déplacement pour une unité de temps. Mathématiquement, la vitesse notée v est la dérivée du déplacement par rapport au temps. Elle s'écrit :

$$v = \frac{dy}{dx} = d \frac{A \sin \omega t}{dt} = A \omega \cos(\omega t) \quad (\text{II. 4})$$

c) Accélération :

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 :

$$\gamma = \frac{dv}{dx} = \frac{d[\omega A \cos(\omega t)]}{dt} = -\omega x \omega A \sin \omega t \quad (\text{II. 5})$$

II.1.3.3 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 II.2 a) ou sinusoïdal complexe (figure II.2 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, ...) [9].

- Les vibrations périodiques de type impulsionnel (figure II.2 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 impulsionnel (figure II.2 d) peuvent, par exemple, être générées par un défaut de lubrification sur un roulement, la cavitation d'une pompe, ...

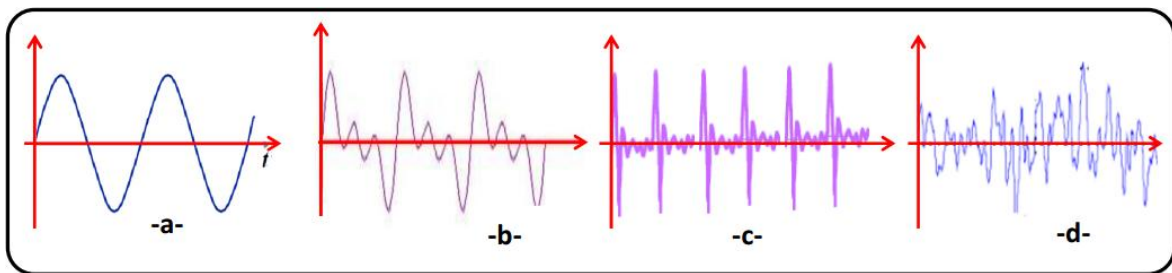


Figure II.2 : Nature d'une vibration [9]

II.1.4 IMPORTANCE DES VIBRATIONS

L'organigramme suivant indique l'importance des vibrations pour relever l'état de fonctionnement de la machine.

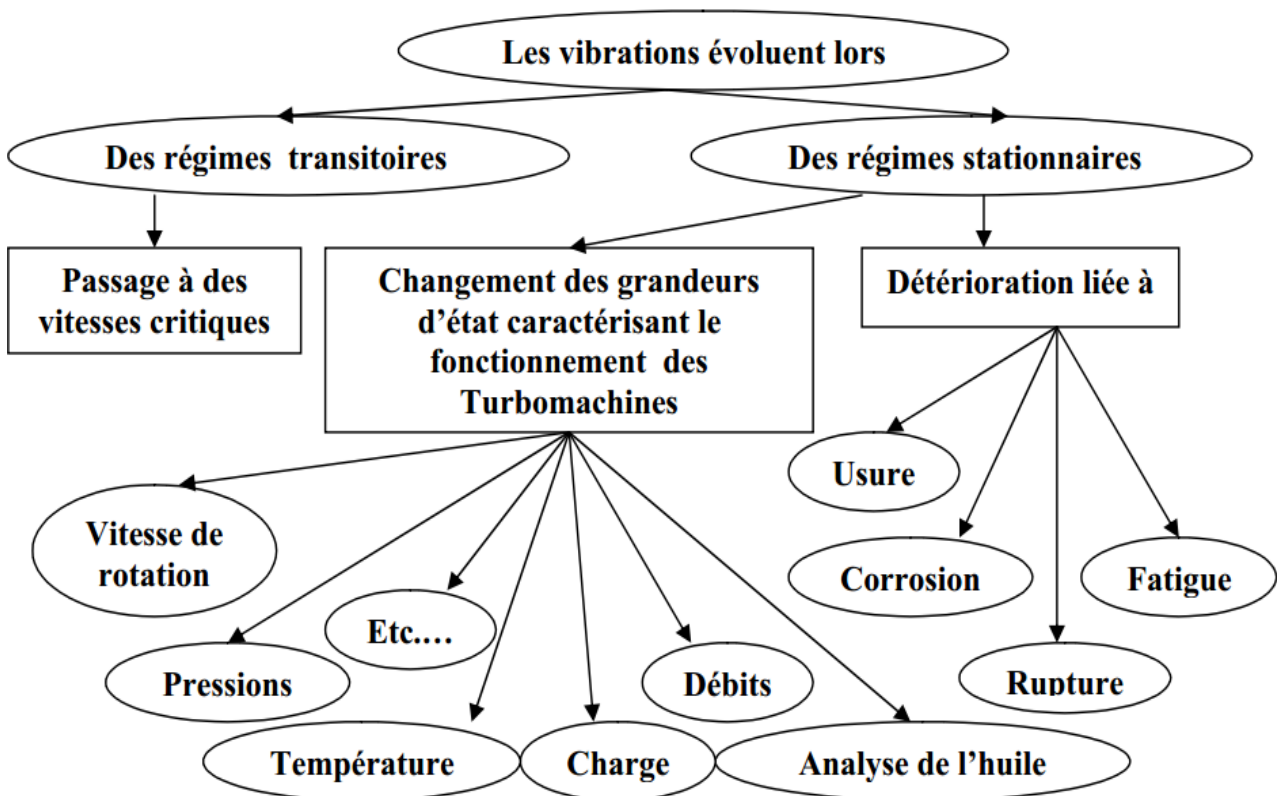


Figure II.3 : Importance des vibrations [10]

II.1.5 LES CAPTEURS DE VIBRATION

II.1.5.1 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 [10].

Les trois grandeurs que l'on est amené à mesurer en technique vibratoire : le déplacement, la vitesse et l'accélération peuvent être appréhendées par des systèmes très différents les uns des autres. On distingue trois principes plus particulièrement utilisés :

- **Déplacement** : principe des courants de Foucault,
- **Vitesse** : principe électrodynamique,
- **Accélération** : principe piézo-électrique.

Ils ont tous les trois le même but : transformer une vibration mécanique en un signal électrique.

Les capteurs utilisant ces principes peuvent être actifs ou passifs. Les capteurs actifs ne nécessitent pas d'alimentation, alors que les capteurs passifs ne fonctionneraient pas sans source d'énergie auxiliaire

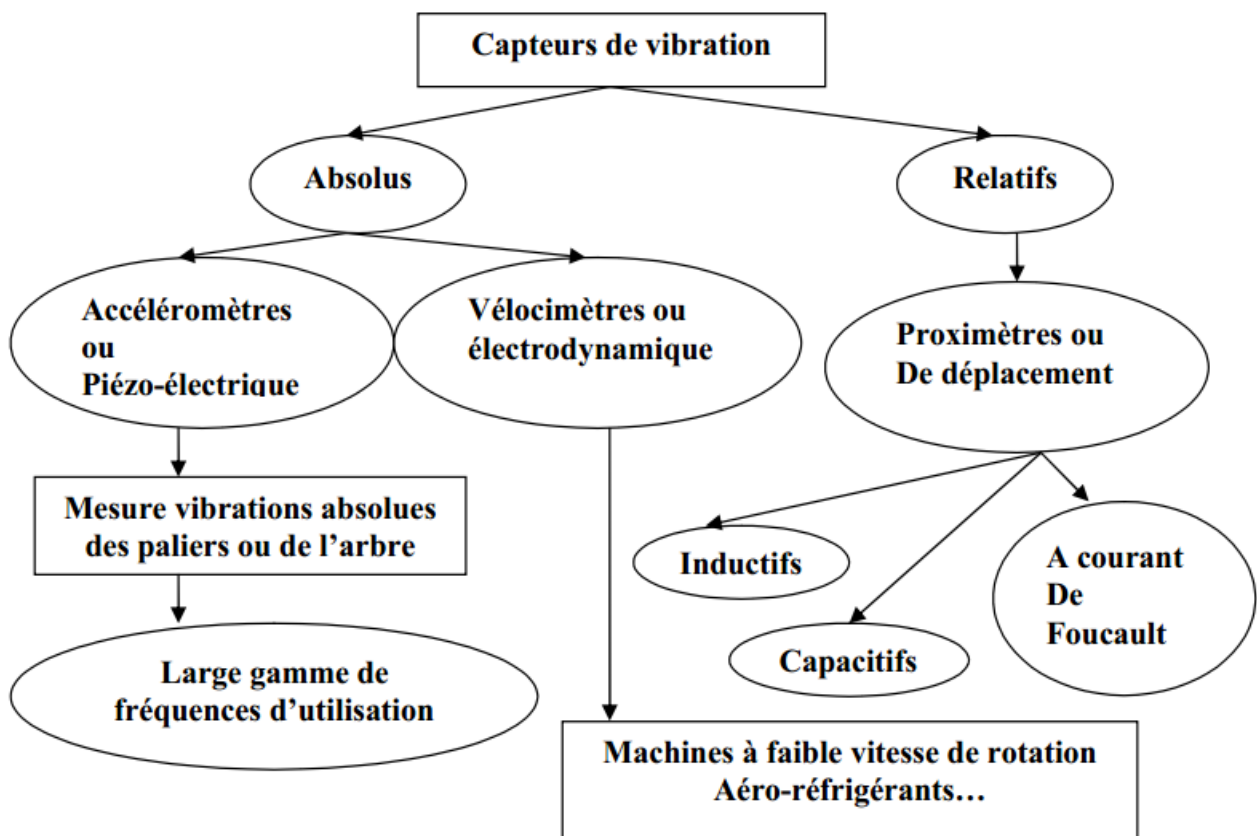


Figure II.4 : Capteurs de vibration [10]

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 +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 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.

II.1.5.2 Le capteurs de déplacement (proximètres)

Le proximètre, ou sonde de proximité (figure II.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 II.6) Aujourd'hui, le proximètre le plus utilisé pour la surveillance de machines est le capteur inductif à courants de Foucault. Ce capteur, représenté en figure II.6 est relié à un émetteur-démodulateur-conditionneur. Il est constitué d'une bobine parcourue par un courant électrique « hautes fréquences ». Le champ magnétique ainsi créé induit, à la surface de l'arbre, des courants appelés courants de Foucault qui modifient l'impédance de la bobine. Les mesures en déplacement ne sont pas quantifiables dans toutes les gammes de fréquence. Ces mesures seront limitées aux basses fréquences (< 100 Hz) [11].

Le capteur de déplacement est utilisé pour toutes les applications où la surveillance des jeux entre les arbres et les paliers s'avère essentielle [11]. 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.

Avantages

- mesure sans contact,
- mesure en continu (il existe un signal pour une fréquence nulle),
- mesure réelle du déplacement de l'axe dans son logement.

Inconvénients :

- sensible aux hautes fréquences,
- qualité de mesure dépendant de la qualité de la surface,
- phase relative des vibrations de l'arbre et du palier influençant la mesure,
- implantation difficile.

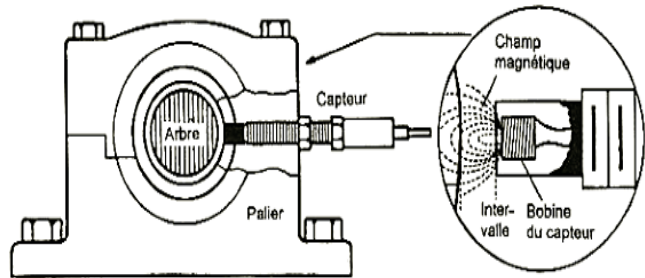


Figure II.5 : proximètres et leur driver [8]

Figure II.6 : proximètre monté sur un palier [12]

II.1.5.3 Le capteurs de vitesse (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 [11].

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 II.7).

La vibration du palier sur lequel est fixé le capteur, génère une tension proportionnelle à la vitesse de mouvement de la bobine. 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.

Avantage :

- pas d'amplificateur à haute impédance, ni d'électronique d'excitation,
- signal de sortie de haut niveau et de faible impédance.

Inconvénient :

- pièce métallique en mouvement (usure),
- sensibilité latérale,
- faible bande passante (10-1000hz).

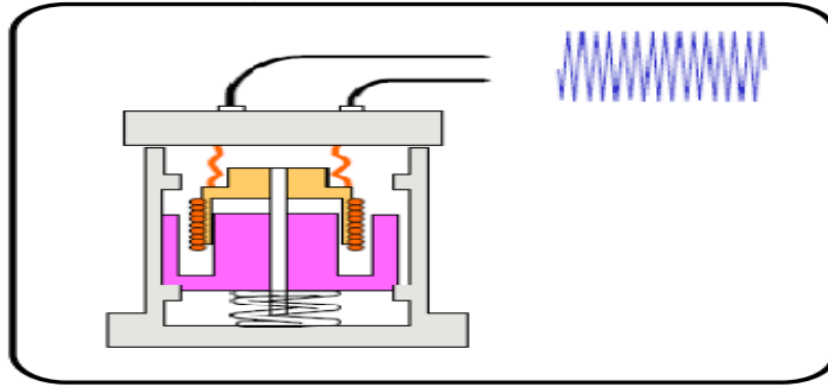


Figure II.7 : schéma de principe d'un vélocimètre [11]

II.1.5.4 Les capteurs d'accélération (accéléromètres)

Les accéléromètres piézoélectriques tendent à devenir les capteurs de vibrations absolues les plus utilisés pour la surveillance des machines tournantes.

a) Principe

Un accéléromètre piézoélectrique (figure II.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 :

- 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.

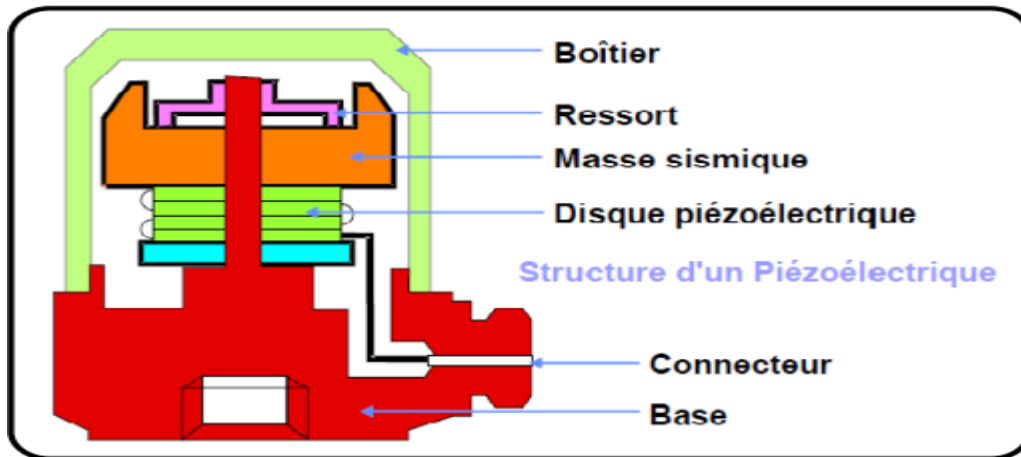


Figure II.8 : schéma de principe d'un accéléromètre [13]

b) Réponse d'un accéléromètre

L'examen de la courbe de réponse d'un accéléromètre piézoélectrique, illustrée sur la figure II.9, 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 faussée.

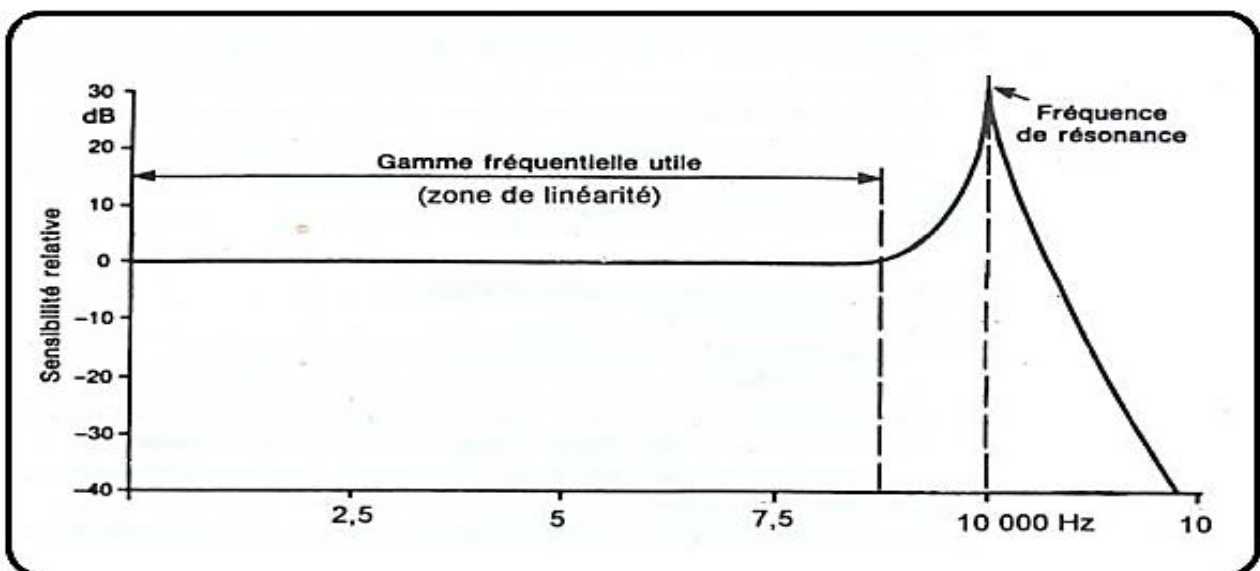


Figure II.9 : courbe de réponse d'un accéléromètre [13]

II.1.6 CHOIX DE L'EMPLACEMENT DE CAPTEURS

II.1.6.1 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 II.10 et II.11) [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 II.12), ou un par le contact d'un engrenage conique (effort directionnel axial).

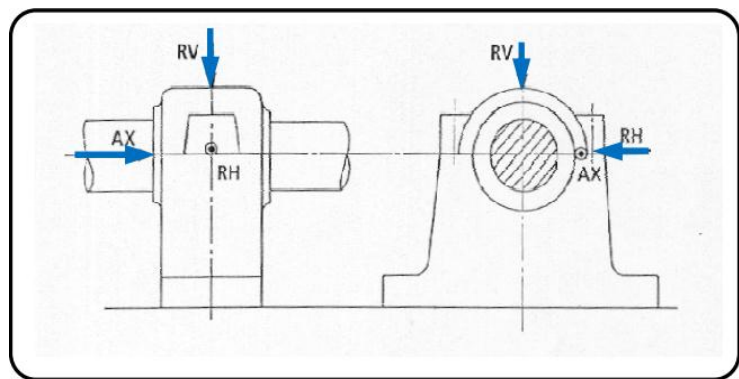
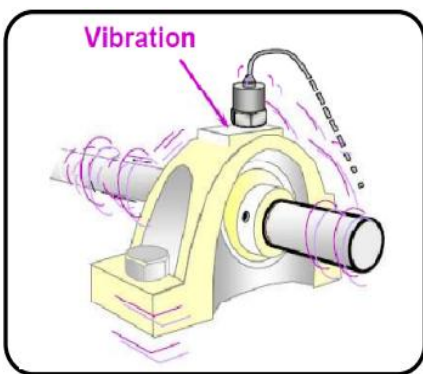


Figure II.10 : Fixation du capteur Figure II.11 : choix directionnel pour la prise de mesure [12]

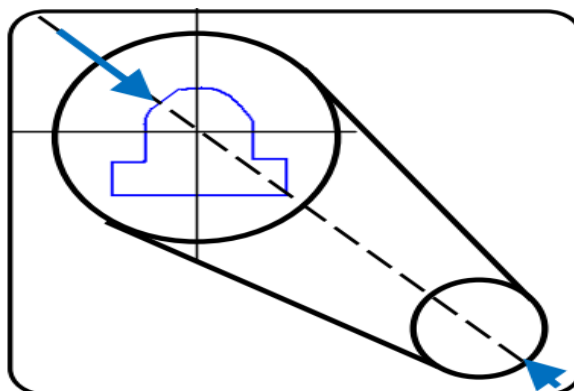


Figure II.12 : direction pour poulies courroies [9]

➤ 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.

II.1.6.2 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 II.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 II.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 II.15).
- Les mesures sont effectuées toujours au même endroit sur la machine. Les points de mesure sont repérés, soit par la peinture, soit place de goujons.

Lorsque le palier est difficilement accessible de façon directe, la prise de la mesure est effectuée par un capteur au point judicieusement choisi en figure II.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.

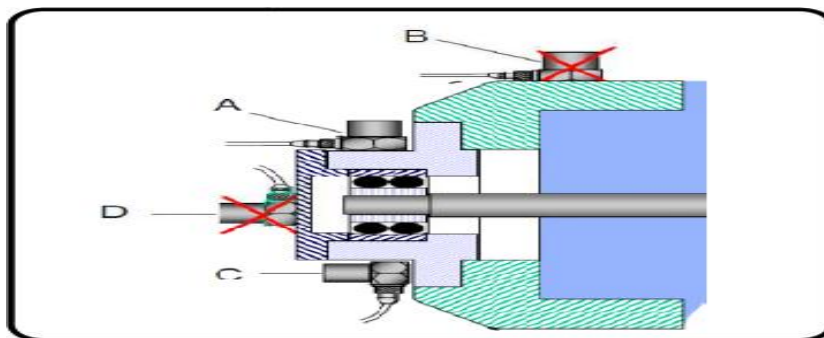


Figure II.13 : choix de l'emplacement du capteur [6]

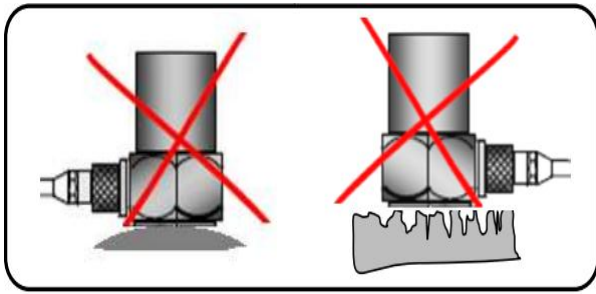


Figure II.14 : Les surfaces de contact avec capteurs doivent être lisses et planes [12]

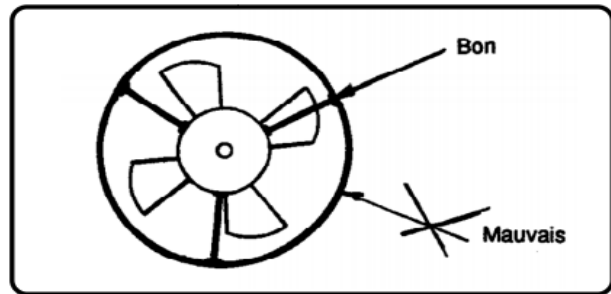


Figure II.15 : emplacement du capteur sur les un palier inaccessible directement [11]

II.1.6.3 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.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

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

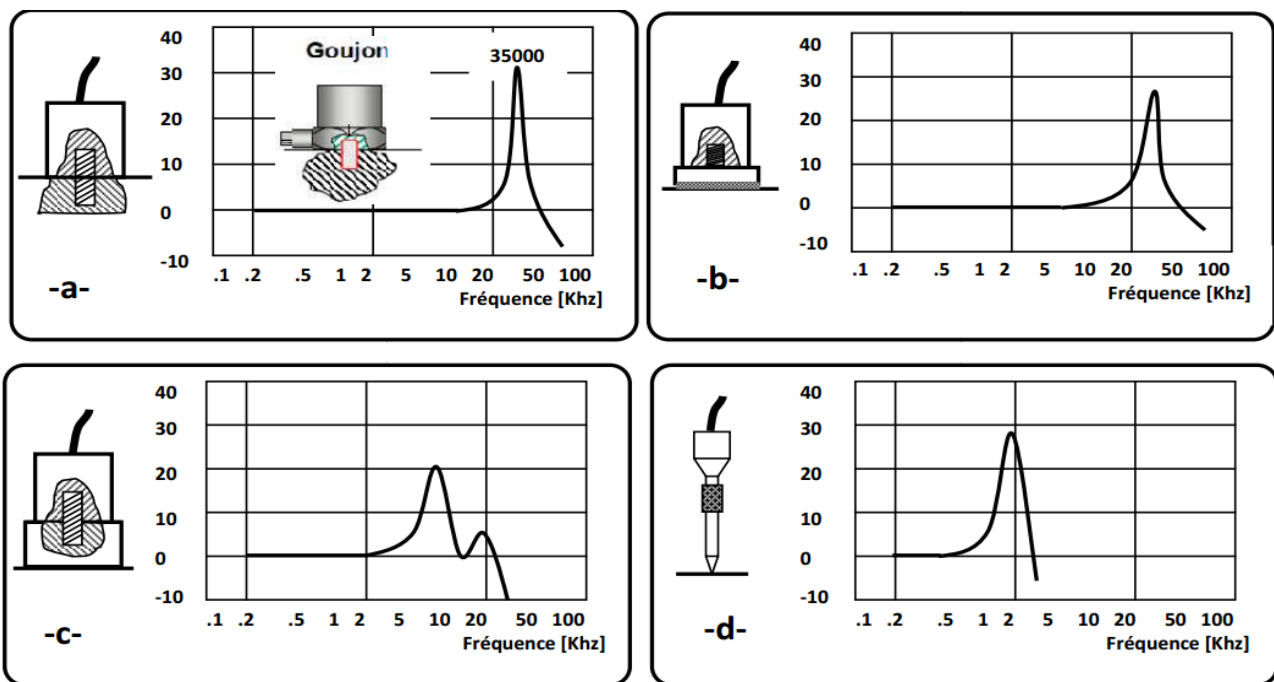


Figure II.16: réponse d'un accéléromètre en fonction de la fréquence [13]

II.1.7 STRATEGIES DE SURVEILLANCE VIBRATOIRE

La comparaison des mesures vibratoires effectuées à intervalles de temps déterminés dans des conditions si possible identiques permet de suivre l'évolution d'un défaut en exploitant le signal vibratoire [14]. 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 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.

Pour établir un diagnostic vibratoire, il est souvent nécessaire de faire appel à des outils mathématiques relativement élaborées. Ces outils doivent assister l'opérateur et lui permettre de remonter aux origines du ou des défauts.

❖ **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 [13].

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.

❖ **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 [13].

❖ **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.

II.2 MESURE VIBRATOIRE EN NIVEAU GLOBAL

II.2.1 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, monté sur le palier de la machine, qui convertit le signal mécanique en un signal électrique qui sera acheminé à un mesureur de vibrations pour l'analyser et afficher la valeur globale [14].

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 rapprochés.

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.

II.2.2 Choix de la grandeur à mesurer

Le choix de la grandeur à mesurer (déplacement, vitesse ou accélération) pour la surveillance d'une machine tournante dépend essentiellement du défaut recherché et la plage de fréquences dans laquelle il est susceptible de s'exprimer. La grandeur retenue est appelée paramètre ou indicateur de surveillance. Le tableau II.1 donne le domaine de surveillance pour chaque indicateur.

Indicateur (Niveau global)	Domaine de surveillance
Déplacement ($\mu\text{m c/c}$)	Phénomènes lents basses fréquences [2–100 Hz]: balourd, désalignement, instabilités de paliers etc.
Vitesse (mm/s eff)	Moyennes fréquences [1000 Hz] : balourd, lignage, instabilités de paliers, cavitation, passage d'aubes, engrènement etc.
Accélération (g eff)	Phénomènes très rapides Hautes fréquences [20000 Hz] : engrenages, roulements, passages d'ailettes, cavitation...)

Tableau II.1 : Domaine de surveillance des indicateurs vibratoires [14]

La figure II.17 montre les signaux vibratoires (spectres) pris sur une machine en mode déplacement, vitesse et accélération. Commenter les résultats de mesure.

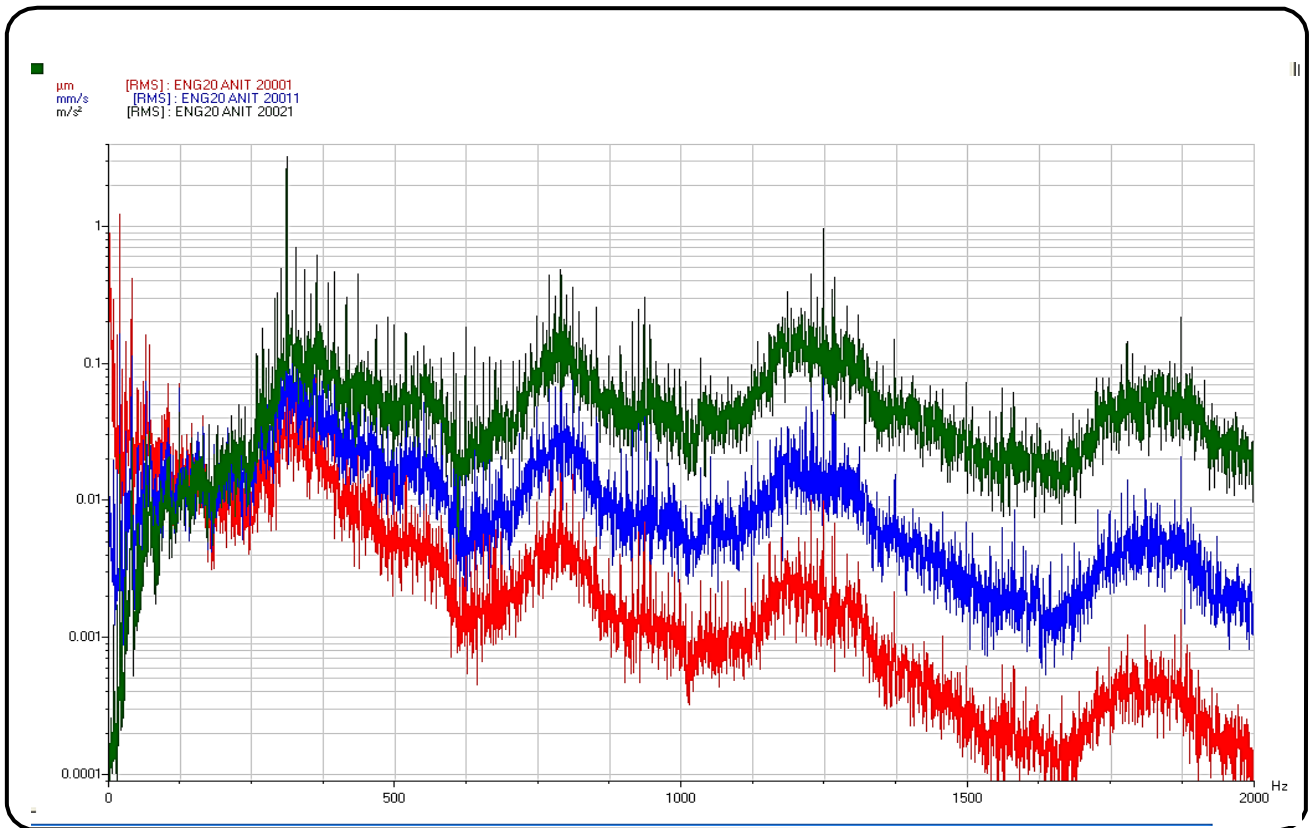


Figure II.17 : signaux vibratoires en mode déplacement, vitesse et accélération [15]

II.2.3 Prise de mesure

a) Matériel utilisé

Les appareils de mesure sont toujours constitués d'un minimum de deux éléments (figure II.18) :

- **Le capteur** : il transforme une vibration en signal électrique.
- **Mesureur ou contrôleur de vibration** : il donne l'amplitude de ce signal



Figure II.18 : exemple d'appareil de mesure [15]

b) Mesureur de vibration

Le mesureur de vibrations est l'instrument le plus simple utilisé 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 utilisé facilement par du personnel d'entretien pour qui la mesure des vibrations n'est qu'une tâche parmi d'autres [12].

Les caractéristiques les plus courantes communes aux différents mesureurs de vibrations sont :

- une construction robuste et compacte (il peut typiquement être tenu d'une seule main);
- un capteur de vibrations incorporé (le plus courant étant un accéléromètre piézoélectrique avec ou sans préamplificateur intégré);
- la mesure dans différentes gammes de fréquences comprises habituellement entre 10 Hz et 10 kHz;
- le choix du paramètre de vibration;
- une gamme de mesure d'amplitudes typiques de l'ordre de 1000/1 (60 dB);
- le choix dans l'affichage de la valeur efficace ou de la valeur de crête ou de la valeur de crête-à-crête (déplacement).

II.2.4 Exploitation des mesures

Une valeur de niveau global unique est souvent difficilement exploitable en valeur absolue, mais nous pourrions 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 forcément lié 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.

II.2.4.1 Courbes d'évolution ou de tendance

a) Définition

L'évolution dans le temps d'un indicateur vibratoire est représentée par une courbe (figure II.19), appelée courbe de tendance. Le résultat de mesure est comparé aux mesures précédentes et à 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.20).

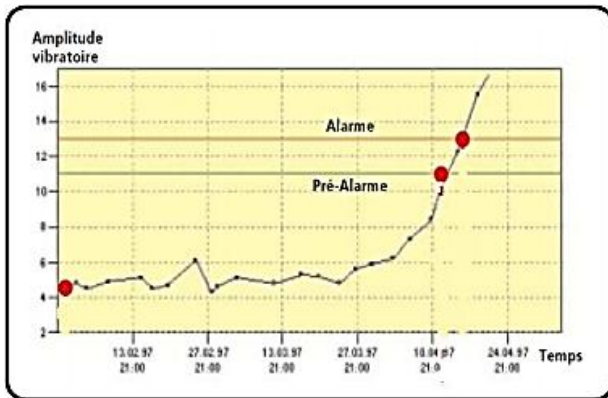


Figure II.19: courbe de tendance [15]

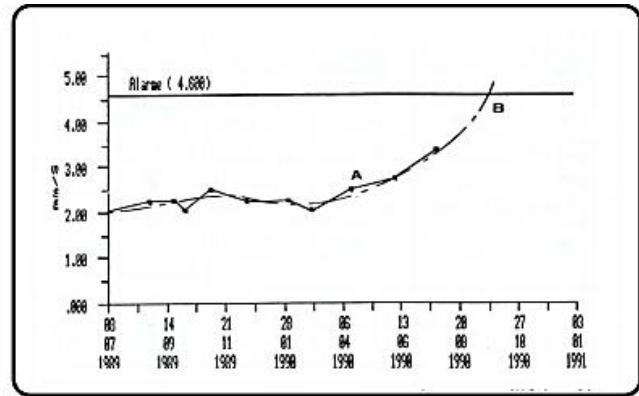


Figure II.20 : A tendance. B extrapolée [15]

b) Définition des seuils d'intervention

Le tracé des courbes d'évolution des amplitudes vibratoires doit être complété par une comparaison des mesures à des seuils d'alarme et de danger.

- **Seuil d'alarme** : déclenche systématiquement une procédure de diagnostic afin de localiser voir de déterminer l'origine exacte de l'anomalie. Selon la nature et la gravité du défaut, les modalités de surveillance seront modifiées pour mieux suivre son évolution ou procéder à un arrêt pour inspection [10].
- **Seuil de danger** : nécessité de procéder à un diagnostic immédiat de l'état de l'installation. Arrêt suivi d'une action corrective [10]. La quantification de ces seuils est très délicate et dépend de nombreux paramètres, tels que montage (fondations, châssis, paliers...), tolérance du constructeur, vécu de la machine, besoins de l'utilisateur...

CHAPITRE II Surveillance des machines par analyse vibratoire

Cependant, des ordres de grandeurs de niveaux acceptables, alarmants ou dangereux, sont indiqués dans les normes (NF, ISO, VDI, API...). Ces normes ne doivent être pris que comme des suggestions et non comme une référence absolue. En début de suivi les seuils peuvent se référer aux normes, mais les seuils ne seront fixés qu'après retour à l'expérience [10].

II.2.4.2 Choix des seuils vibratoires :

a) Seuils de vitesse vibratoire :

Selon la norme française AFNOR E90-300 l'intensité vibratoire est la plus grande des mesures en vitesse vibratoire efficace dans la gamme de fréquences (10-1000 Hz) sur chaque palier, support et bride dans les trois directions perpendiculaires entre elles (horizontales, verticales et axiales).

Cette norme, qui présente une large concordance avec la norme internationale ISO 2372 (International Organization for Standardization) et la norme allemande VDI 2056 (Verein Deutscher Ingenieure), distingue six groupes de machines. Ces critères de distinction sont la puissance et les fondations...

La norme propose pour chacun des quatre premiers groupes des seuils de jugement qui déterminent les domaines suivants : bon, admissible, encore admissible, inadmissible

28	inadmissible			
18	inadmissible		inadmissible	
11.2	inadmissible		Encore admissible	
7.1	Encore admissible		Encore admissible	
4.5	Encore admissible		Admissible	
2.8	Encore admissible		Admissible	
1.8	Admissible		Bon	
1.12	Admissible		Bon	
0.71	Bon		Bon	
0.45	Bon		Bon	
0.28	Bon		Bon	
Intensité vibratoire V _{eff} [mm/s]	Groupe K petites machines	Groupe M machines moyennes	Groupe G grosses machines	Groupe T turbo-générateurs

Figure II.21: exemple de limites vibratoires proposées par les normes AFNOR E 90-300 [16]

b) Seuils d'accélération :

En haute fréquence, l'unité appropriée est l'accélération et la norme ISO n'est pas adaptée à cette unité. Le tableau ci-dessous est une proposition de niveaux, en fonction de la vitesse de rotation et du diamètre de l'arbre (ou du type de roulement).

Seuils d'alarme en accélération (g crête) pour les paramètres hautes fréquences.								
Vitesse	300 RPM		1000 RPM		2000 RPM		4000 RPM	
Diamètre de l'arbre en [mm]	Alerte	Alarme	Alerte	Alarme	Alerte	Alarme	Alerte	Alarme
Ø25	0.06	0.21	0.35	1.1	0.77	2.5	2.1	6.6
Ø100	0.17	0.5	0.9	2.8	2.1	6.4	5.6	17
Ø200	0.3	0.9	1.6	5.0	3.4	10.0	/	/
Ø400	0.45	1.4	2.4	7.6	/	/	/	/

Tableau II.2 : Seuils d'accélération [17]

II.2.4.3 Suivi de l'évolution des trois indicateurs

Le suivi d'un seul niveau global ne permet pas d'établir un quelconque diagnostic, mais en comparant l'évolution des différents indicateurs classiques, on peut avec des moyens simples se faire une première idée des types de défauts qui affectent la machine.

Par exemple si la mesure effectuée, au même endroit, sur un même palier montre une évolution importante des indicateurs de déplacement et de vitesse, alors que l'indicateur d'accélération reste stable ; on peut donc supposer que l'anomalie se situe en basses fréquences et que le défaut est dû à un balourd, un désalignement ou un desserrage du palier.

II.2.5 différents types de suivi

II.2.5.1 Suivi en mode global « large bande »

Pour ce type de suivi les capteurs mesurent l'amplitude sur une plage de fréquences très large, généralement la bande passante de l'appareil de mesure.

Le niveau global mesuré NG est tel que: $NG = (a^2 + b^2 + c^2 + \dots)^{1/2}$ avec a, b, c, ...les amplitudes respectives des composantes A, B, C, ... dues aux différents défauts présents dans la machine. Compte tenu de cette élévation au carré, il est certain que cette valeur de NG est essentiellement sensible à l'évolution de défauts induisant des vibrations d'amplitude élevée et qu'une évolution importante d'un défaut induisant des vibrations d'amplitude moindre (mais pas forcément de gravité moindre) risque d'être complètement masquée. Ce phénomène, nommé l'effet de masque, est l'écueil le plus sérieux de ce type de suivi et en limite considérablement le domaine d'utilisation et la fiabilité [17].

II.2.5.2 Suivi en mode global par bande de fréquence

Pour minimiser le danger d'effet de masque, certains appareils offrent la possibilité de mesurer les indicateurs à l'intérieur de plusieurs bandes de fréquences définies par l'utilisateur et de suivre l'évolution du niveau global à l'intérieur de chacune de ces bandes.

Cette technique est aisée à mettre en place et à exploiter lorsqu'il est possible de :

- définir des bandes de fréquences bien dissociées en fonction des principaux défauts redoutés sur la machine à surveiller;
- fixer, pour chacune de ces bandes, un seuil d'intervention.

Sur la moto-soufflante (figure II.22), nous pouvons définir:

- une bande « basses fréquences » pour suivre les défauts de déséquilibre et désalignement
- une bande « moyennes fréquences » pour suivre les défauts d'engrènement;
- une bande « hautes fréquences » pour suivre les défauts de roulement.

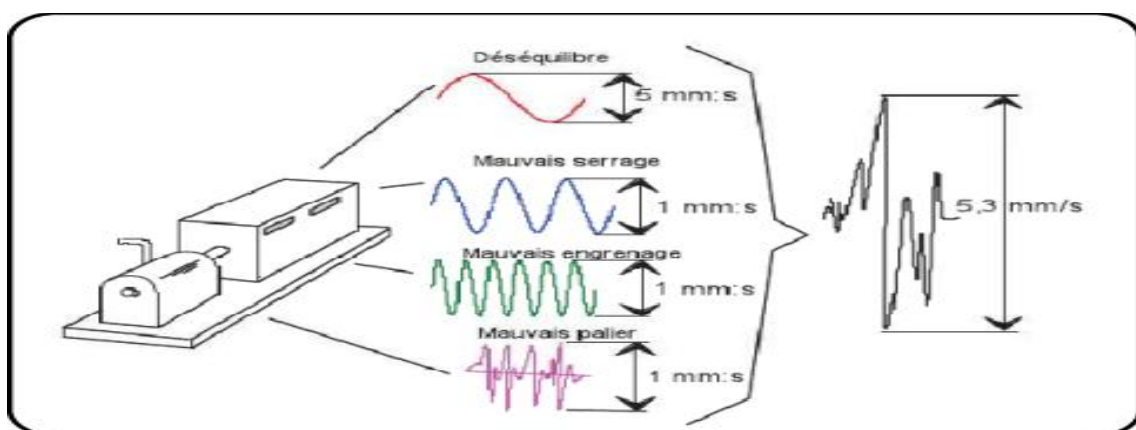


Figure II.22 : Moto-soufflante [17]

II.2.6 Limites du suivi en mode global

Le suivi en mode global permet d'appréhender l'état de la machine par une évolution significative d'une dégradation ou par la comparaison à des seuils d'alarme et de danger, mais ne permet pas d'établir un diagnostic précis. C'est l'analyse spectrale qui le permettra.

II.3 L'ANALYSE SPECTRALE

II.3.1 Introduction

Les mesures des niveaux globaux mettent en évidence l'existence d'une anomalie à un stade précoce mais ne permettant pas d'accéder au diagnostic, c'est à dire, d'identifier avec précision la nature de l'anomalie et si possible en préciser la gravité [16].

L'analyse spectrale repose sur une analyse systématique du signal vibratoire pour rechercher la présence d'images vibratoires de l'ensemble des défauts susceptibles d'affecter l'installation considérée. Cela demande une connaissance des caractéristiques cinématiques des différents organes constitutifs, de leur vitesse de rotation ou mieux encore de leur fréquence de mouvement.

II.3.2 Etude préalable du fonctionnement de l'installation

Avant d'entamer la procédure de diagnostic, il faut une étude permettant :

- une bonne compréhension du fonctionnement de la machine et de ses organes ;
- l'établissement d'une fiche cinématique de la machine : calcul des fréquences de rotation de toutes les lignes d'arbres, des fréquences de défauts de balourds, d'engrènement, de roulements, ... etc.

II.3.3 Représentation temporelle du signal vibratoire

La première façon de représentation du signal vibratoire délivré par un capteur, est la représentation en fonction du temps (représentation temporelle). Cette représentation est utilisée pour suivre le comportement vibratoire d'une machine en fonction de ces paramètres de fonctionnement (étude de la vibration d'une turbine lors de sa décélération). Ce type de représentation, aisé à exploiter lorsque le signal est simple (vibration sinusoïdale induite par un balourd) (figure II.23), devient vite inexploitable lorsque le signal a pour origine des sollicitations multiples (figure II.24).

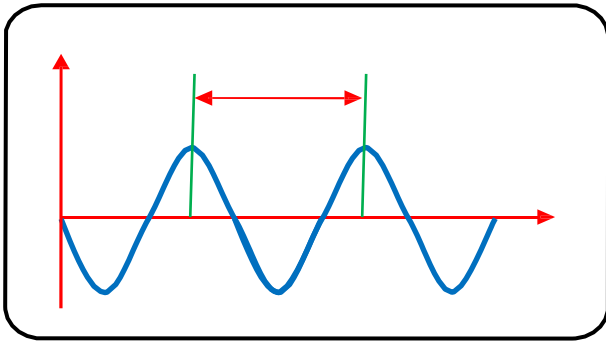


Figure II.23 : Signal vibratoire sinusoïdal [12]

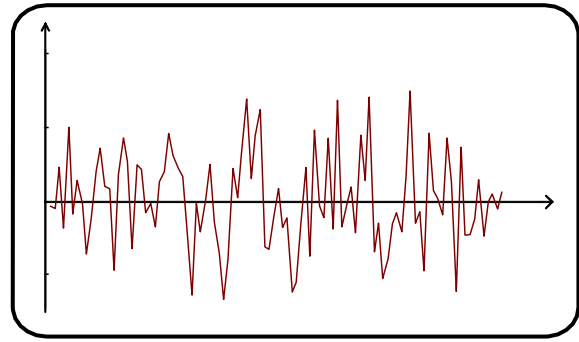


Figure II.24 : Signal vibratoire complexe [12]

II.3.4 Représentation spectrale

a) Principe

Le deuxième type de représentation est la représentation en fonction de la fréquence dans un diagramme amplitude–fréquence appelé spectre: représentation spectrale. Le signal complexe $F(t)$ (figure II.25), difficile à interpréter, est décomposé en une série de composantes sinusoïdales élémentaires définies par leurs amplitudes et leurs fréquences. L’outil mathématique utilisé est la décomposition en série de Fourier (figure II.26) .

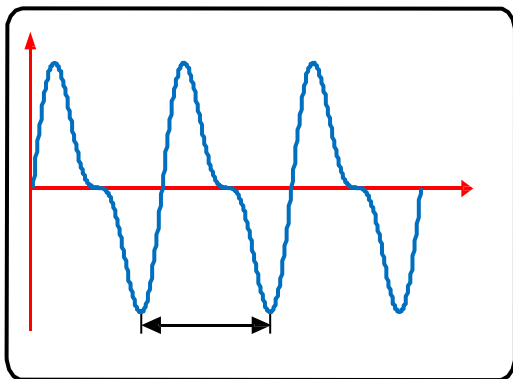


Figure II.25 : signal périodique complexe

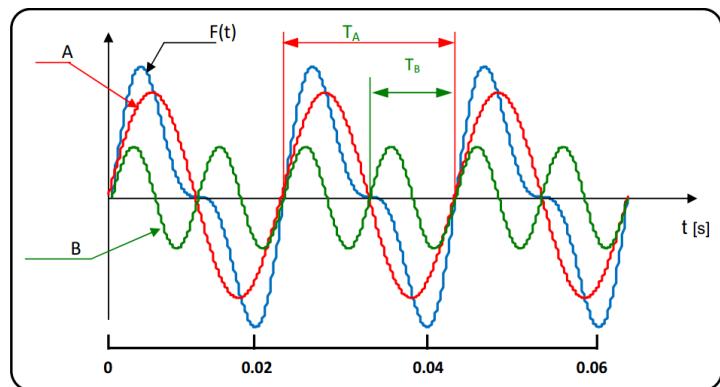


Figure II.26 : Décomposition en série de Fourier de la fonction $F(t)$ [15]

Si cette décomposition est possible, sa représentation dans le domaine temporel est encore inexploitable. On cherche à le représenter dans un diagramme amplitude–fréquence appelé spectre (figure II.27). Avec ce type de représentation, chaque composante sinusoïdale est définie par son amplitude et sa fréquence. La représentation spectrale devient ainsi plus claire et exploitable. Les ordinateurs utilisent un algorithme qui permet de réaliser rapidement cette transformation sur des données numériques, c’est la Fast Fourier Transformation (FFT).

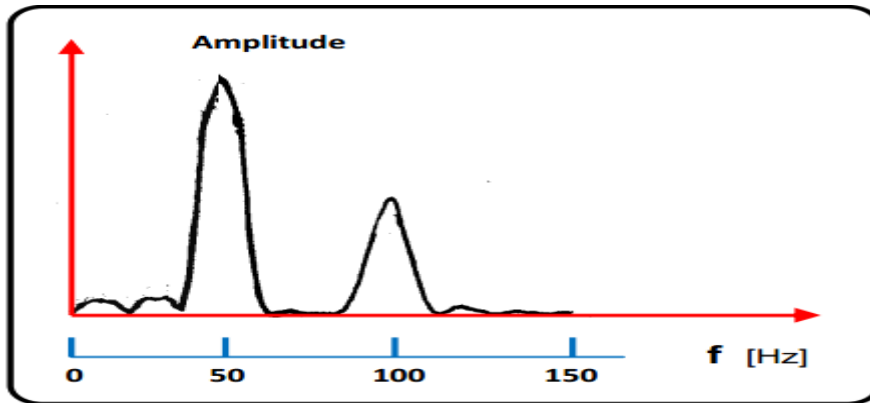


Figure II.27 : Spectre correspondant à la fonction $F(t)$ [18]

b) Généralisation

Les vibrations réelles sont infiniment complexes, constituées d'un grand nombre de composantes d'origines multiples et modulées par un grand nombre de paramètres. Néanmoins, ces vibrations complexes peuvent se ramener à la superposition de composantes élémentaires purement sinusoïdales représentées chacune par leur amplitude A_i et leur fréquence F_i . La transformée de Fourier est un des outils utilisés à cet effet. Cette fonction mathématique réalise une transposition du signal de l'espace temporel vers l'espace fréquentiel. La représentation du signal obtenue est appelée un spectre en fréquences. La Transformée de Fourier est implémentée dans les analyseurs de spectres sous une forme appelée FFT (Fast Fourier Transform). Le spectre final contient l'ensemble des fréquences sinusoïdales (raies discrètes) constituant le signal vibratoire d'origine (figure II.28).

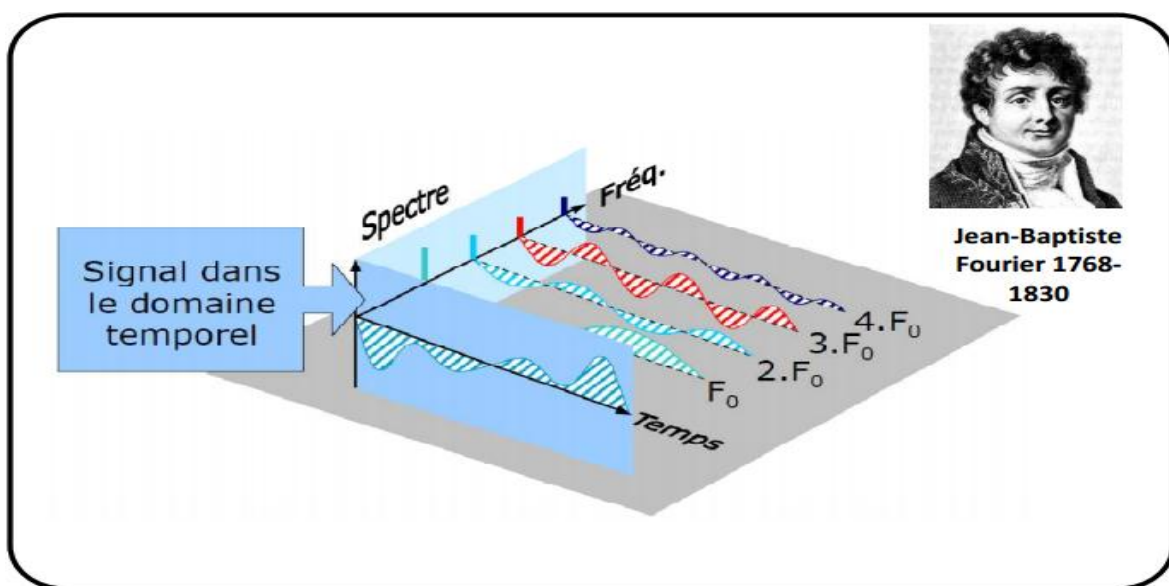


Figure II.28 : Signal temporel et transformation [18]

c) Définition d'un spectre

Un spectre est un graphe dans lequel sont représentées les amplitudes et les fréquences de toutes les composantes vibratoires élémentaires induites par le fonctionnement d'une machine. Chaque composante est représentée par un segment vertical appelé raie dont l'abscisse représente la fréquence et l'ordonnée, l'amplitude. Notons que dans certains cas (raies confondues et dépassant largement du signal, ...) nous ne parlons plus de raie, mais de pic [19].

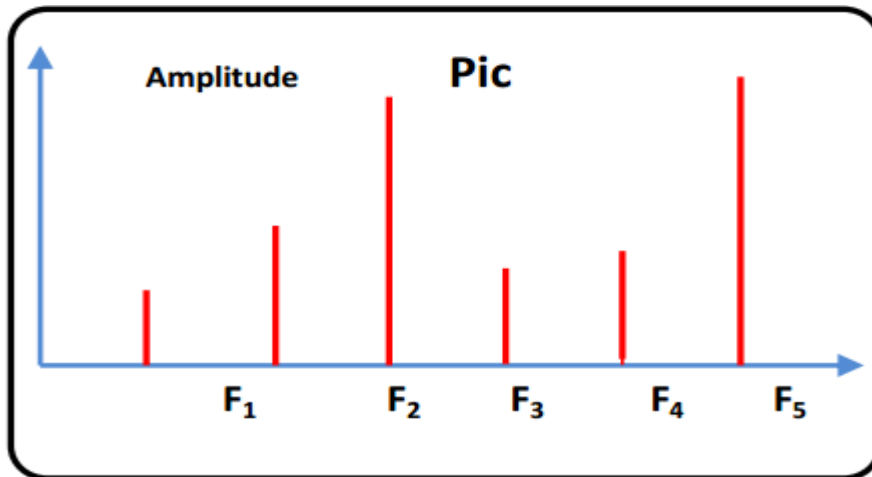


Figure II.29 : Exemple de spectre [8]

d) Représentation graphique d'un spectre

Les spectres issus de signaux vibratoires réels sont très riches en raison du grand nombre de sources vibratoires présentes dans une machine. Par suite, les informations intéressantes dans le spectre ne correspondent pas forcément aux fréquences présentant des maxima d'amplitude. Des raies spectrales d'amplitude faibles au regard des autres peuvent être d'un intérêt de premier plan pour le diagnostic. Afin de pouvoir les visualiser, on utilise pour la représentation des spectres en fréquences une échelle logarithmique des amplitudes du signal.

Ce type de représentation présente l'avantage de favoriser l'affichage des petites amplitudes et est donc recommandé. La figure II.30 présente un spectre avec deux représentations en échelle linéaire et en échelle logarithmique de l'amplitude d'un signal vibratoire.

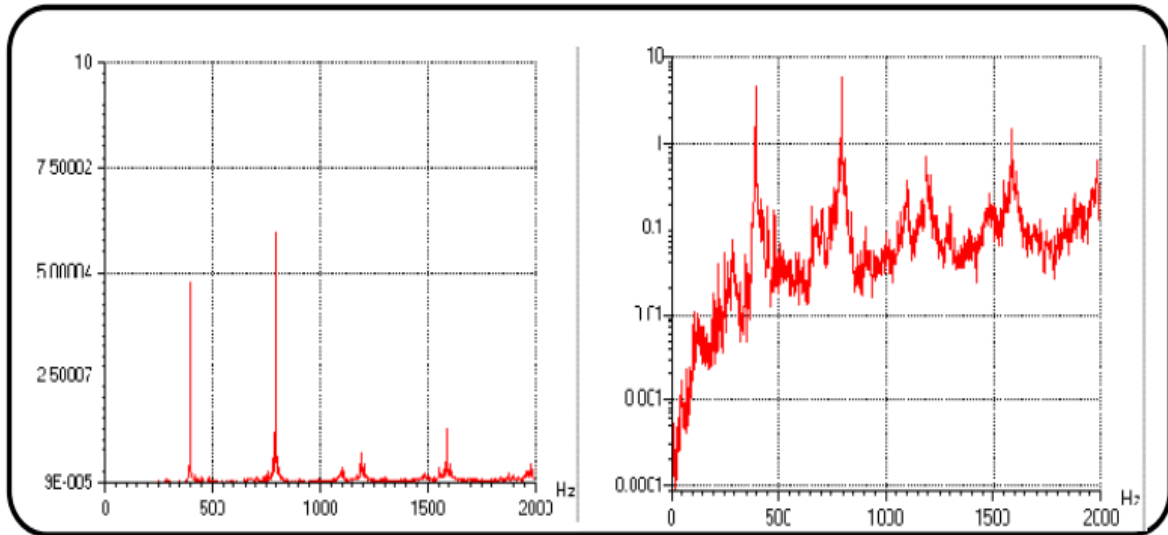


Figure II.30 : Représentation en échelle linéaire et en échelle logarithmique de l’amplitude d’un signal vibratoire [9]

L’ordonnée en décibel montre des composantes de rapport d'amplitude très élevé.

$$L \text{ (en dB)} = 10 \log (A/A_0) \quad 2= 20 \log A/A_0 \quad \text{(II.6)}$$

avec :

- L est la valeur de la variation de la grandeur mesurée (A, V, D).
- A est la valeur de la grandeur mesurée en unité physique ;
- AR est une valeur de référence dans la même unité, qui peut être fixée conventionnellement par des normes.

Accélération (ISO R1683)	Vitesse vibratoire (ISO R1683)	Déplacement
$AR=10^{-6} \text{ m.s}^{-2}$	$VR=10^{-9} \text{ m.s}^{-1}$	$DR=10^{-6} \mu\text{m}$

II.3.5 Transformées de signaux particuliers

a) Cas d’un signal sinusoïdal pur

Le spectre relatif à un signal sinusoïdal pur de période T présente une raie à la fréquence $F=1/T$ (figure II.31).

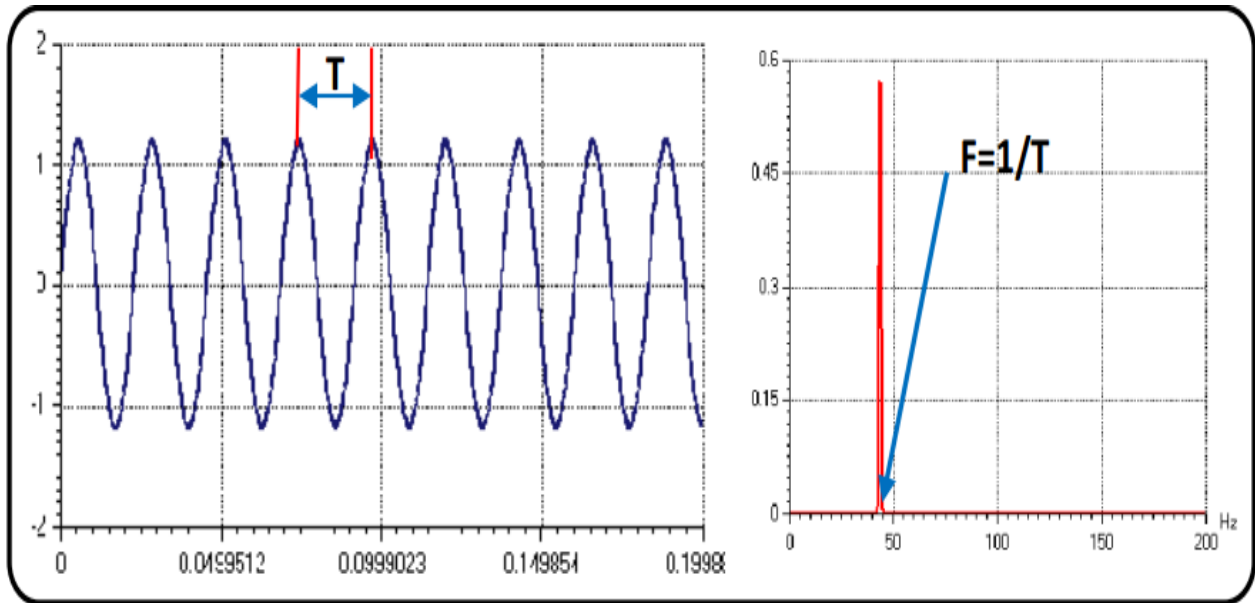


Figure II.31 : Signal sinusoidal pur et spectre correspondant [20]

b) Spectre de chocs périodiques

Le spectre relatif à un choc périodique présente un peigne de raies à la fréquence du choc (figure II.32).

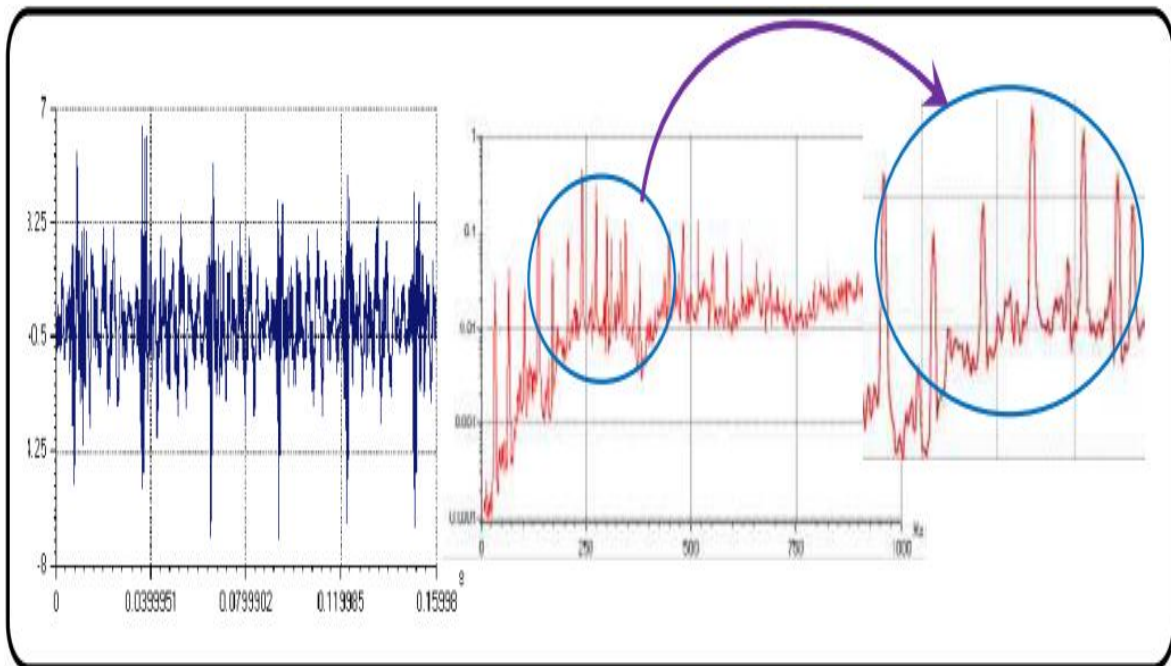


Figure II.32 : Signal de type choc et spectre correspondant [20]

c) Signal modulé en amplitude.

Sur les machines tournantes bien de défauts se traduisent par une modulation de l'amplitude du signal vibratoire (engrènement, roulements etc...). Le spectre présente un pic à la fréquence modulée (porteuse) avec des raies latérales espacées de la fréquence de modulation (figure II.33).

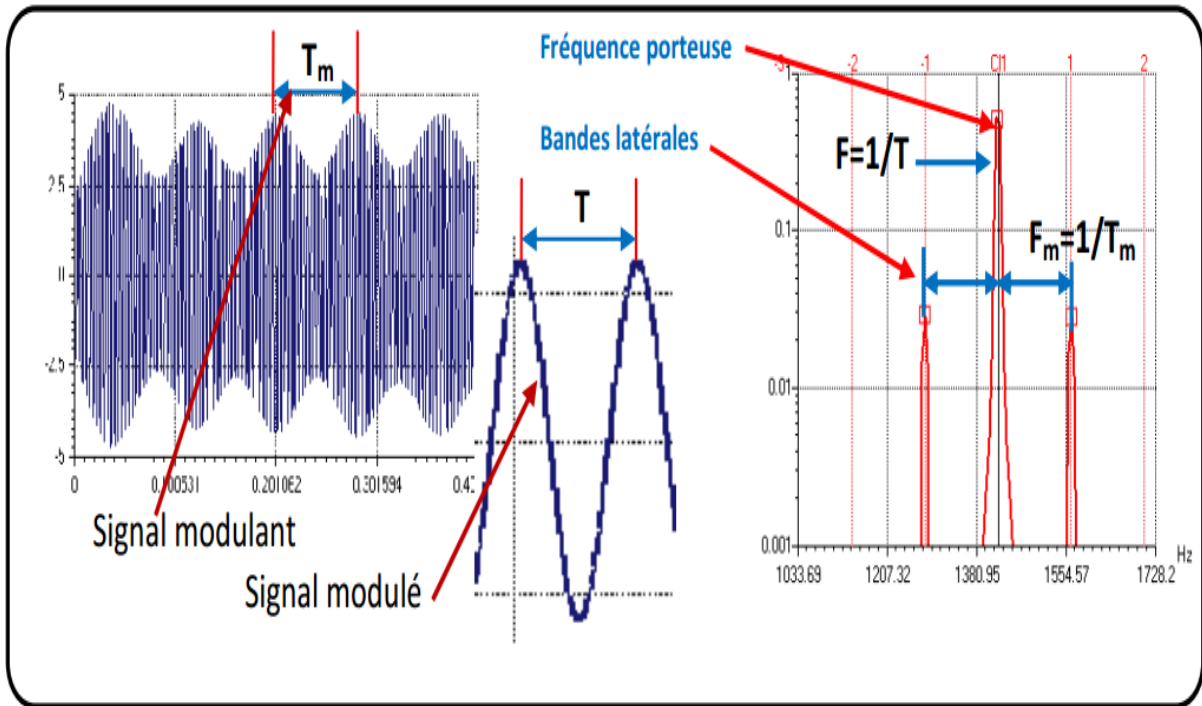


Figure II.33 : Spectre correspondant à une modulation d'amplitude [21]

II.3.6 Le cepstre

Le Cepstre est un outil mathématique qui permet la mise en évidence des périodicités dans un spectre en fréquence. Il résulte de la transformée de Fourier inverse d'un spectre de puissance. Le cepstre associe à une famille de raies harmoniques ou un ensemble de bandes latérales une raie unique dans sa représentation graphique. Il est utilisé pour le diagnostic des phénomènes de chocs périodiques (desserrages, défauts de dentures, écaillage de roulements) et des phénomènes modulation en fréquence ou en amplitude. La figure II.34 montre le spectre d'un choc du à une usure d'accouplement et le cepstre correspondant [21].

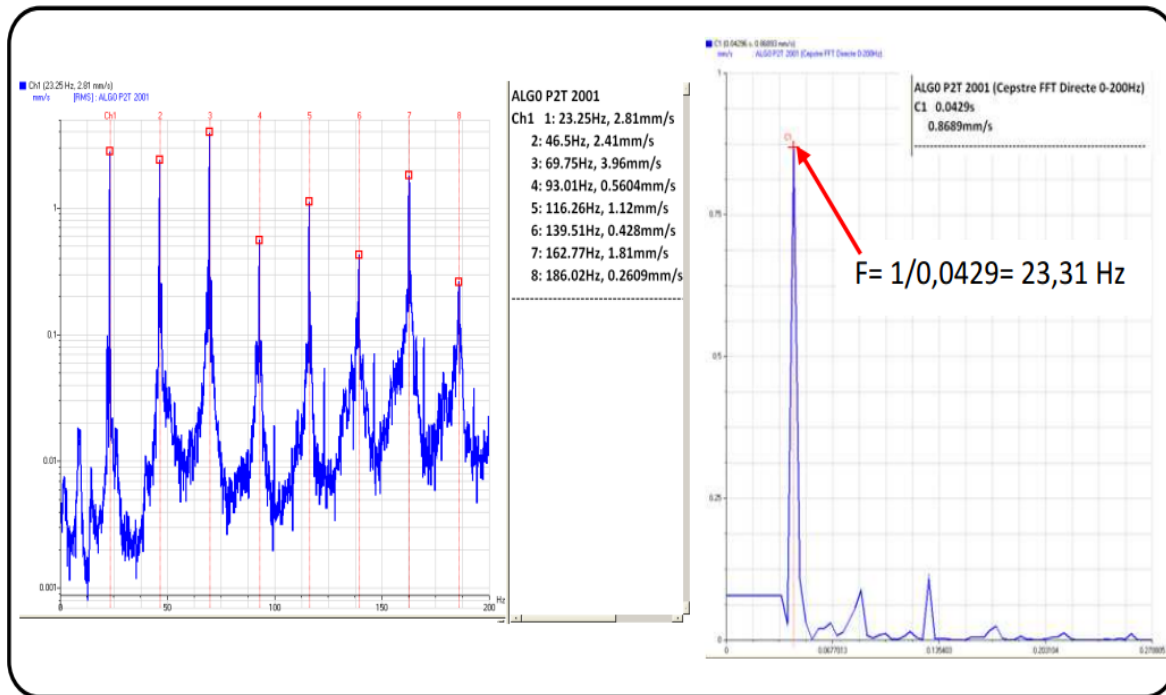


Figure II.34 : spectre d'un choc du à une usure d'accouplement et le cepstre correspondant [21]

CONCLUSION

Les vibrations sont le résultat de forces dynamiques à l'intérieur des machines qui comprennent des éléments roulants et à l'intérieur des structures qui sont connectées à la machine, les différents éléments vibreront à des fréquences et des amplitudes différentes.

Les vibrations créent de la fatigue et de l'usure et elles sont souvent à l'origine de la rupture de la machine. Le bon choix de l'indicateur de vibration joue un rôle très important pour réaliser un diagnostic.