

## CHAPITRE 4- Présentation de la surveillance vibratoire

L'objectif de ce chapitre est triple :

- se familiariser avec l'analyse vibratoire des machines :
  - savoir ce que l'on peut attendre d'une surveillance périodique,
  - connaître les moyens nécessaires à sa réalisation dans de bonnes conditions ;
  
- permettre une première approche de cette technique :
  - connaître le vocabulaire employé,
  - savoir adapter les moyens aux objectifs de la surveillance selon la machine
  - reconnaître quelques images caractéristiques des défauts les plus couramment rencontrés,
  - diagnostiquer leur gravité ;
  
- proposer un exemple d'organisation permettant de conduire au mieux la mission de surveillance :
  - insister sur la qualité de la préparation des rondes (prises de mesures),
  - présenter des documents utiles au bon déroulement d'une surveillance.

On étudiera aussi le type de matériel utilisé pour la surveillance et celui pour le diagnostic.

#### 4.1. Introduction

Surveiller une machine nécessite de procéder au choix préalable d'un certain nombre d'indicateurs. Un indicateur de surveillance est issu d'un paramètre ou d'une grandeur dont l'acquisition est faite le plus souvent possible en fonctionnement. Un indicateur doit, par définition, caractériser l'état ou les performances d'une machine. Son évolution dans le temps doit être significative de l'apparition ou de l'aggravation d'un défaut. La température d'un palier, le bruit, le spectre ou la forme du courant d'alimentation d'un moteur sont autant d'indicateurs susceptibles de représenter l'état d'une machine et d'en suivre l'évolution dans le temps.

De plus, toute machine en fonctionnement induit des vibrations. Ces dernières, sont des traductions directes des forces dynamiques engendrées par les pièces en mouvement et occupent de ce fait une place privilégiée parmi les grandeurs à prendre en considération pour assurer la surveillance d'une machine. L'analyse des vibrations consiste à détecter d'éventuels dysfonctionnements et à suivre leur évolution dans le but de planifier ou reporter une intervention mécanique.

Il existe deux technologies permettant de réaliser une surveillance vibratoire :

- par mesure directe du **déplacement** des parties tournantes (arbres de machines). Réalisée à l'aide de capteurs à courants de Foucault, la technologie mise en œuvre est lourde. Cette surveillance est presque toujours réalisée **on line** c'est-à-dire en temps réel. Les capteurs mesurent en permanence les déplacements des arbres et autorisent ainsi le déclenchement immédiat d'alarmes en cas de dysfonctionnement;
  
- par mesure de **l'accélération** subie par les parties fixes de la machine (carters). Les moyens mis en œuvre sont, dans ce cas, beaucoup plus accessibles. À l'aide d'un accéléromètre relié à un *collecteur de données*, on recueille les vibrations subies par les carters des machines. Cette technique se prête aussi bien à la surveillance on line qu'à la surveillance périodique effectuée lors de rondes selon un calendrier préétabli.

Si les arbres des machines surveillées sont montés sur roulements (c'est notre cas), une surveillance périodique par mesure sur les parties fixes permet une analyse très fine de l'état des machines. D'autre part, les coûts de préparation et de mise en œuvre sont très largement inférieurs à ceux de la technologie utilisant les capteurs à courants de Foucault. La surveillance périodique par mesure des accélérations subies par les parties fixes permet d'atteindre les objectifs fixés et a donc été choisie pour ce projet.

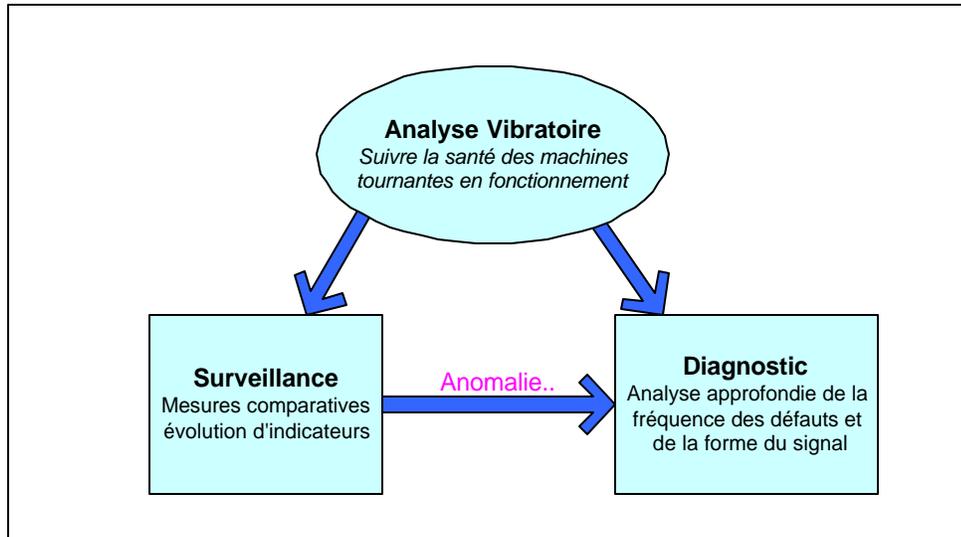


Figure 20 - déroulement d'une analyse vibratoire

Le schéma de la Figure 20 présente, de façon simplifiée, l'analyse vibratoire réalisée à partir de mesures effectuées sur les parties fixes des machines surveillées.

On distingue communément deux principales activités :

- La **surveillance** : le but est de suivre l'évolution d'une machine par comparaison des relevés successifs de ses vibrations. Une tendance à la hausse de certains indicateurs par rapport à des valeurs de référence, constituant la **signature**, alerte généralement le technicien sur un dysfonctionnement probable. Idéalement, la signature est établie à partir d'une première campagne de mesures sur la machine neuve ou révisée ;
- Le **diagnostic** : il met en œuvre des outils mathématiquement plus élaborés. Il fait suite à une évolution anormale des vibrations constatée lors de la surveillance et il permet de désigner l'élément de la machine défectueux. Le diagnostic n'est réalisé que lorsque la surveillance a permis de détecter une anomalie ou une évolution dangereuse du signal vibratoire. Le diagnostic fait appel à des connaissances approfondies en mécanique et une formation spécifique en analyse du signal.

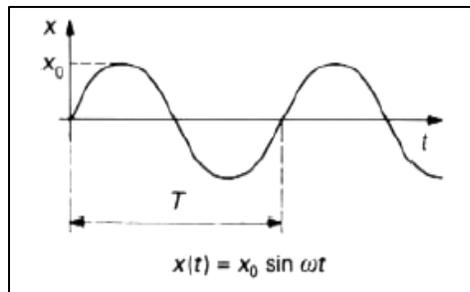
## 4.2. Généralités

### 4.2.1 Signaux

On désigne, sous ce vocable très général, toute grandeur pouvant avoir un effet sur une structure pour modifier son équilibre ou son comportement : force, tension, accélération, vitesse, pression acoustique, etc. En simplifiant, on peut classer les différents signaux dans l'une des catégories suivantes :

#### a) Signaux harmoniques

Une vibration harmonique est une vibration dont le diagramme *amplitude-temps* est représenté par une sinusoïde (Figure 21). Le meilleur exemple d'une vibration harmonique est celle générée par le balourd d'un rotor en mouvement.



Avec  $\omega = 2\pi f$  (pulsation)

$f = 1/T$  (fréquence)

Figure 21 - représentation d'un signal harmonique avec une pulsation  $\omega$  et une amplitude  $x$ .

#### b) Signaux périodiques non harmoniques

Un signal périodique non harmonique est une somme de signaux harmoniques de différentes amplitudes maximales (constantes) mais dont les pulsations sont multiples d'une pulsation dite fondamentale, comme l'illustre la Figure 22. Le signal est connu à l'instant  $t$  et se retrouve rigoureusement identique à l'instant  $t \pm nT$  ( $n$  étant un nombre entier).

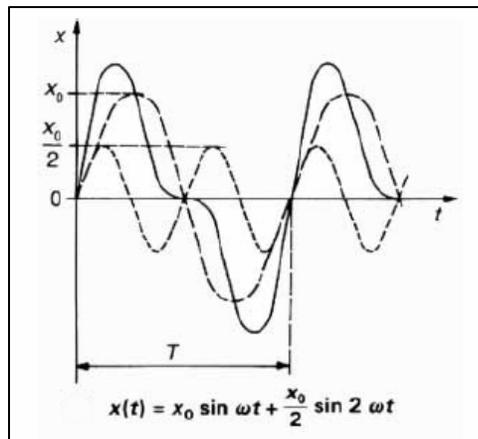


Figure 22 - Représentation d'un signal périodique non harmonique (en traits pleins). Les courbes en pointillés correspondent aux deux signaux harmoniques dont la somme donne le signal en trait plein.

c) *Signaux transitoires et aléatoires*

La Figure 23 montre deux exemples de signaux non périodiques. Un signal transitoire (à gauche) se produit pendant un intervalle de temps limité. Les signaux aléatoires ont leurs caractéristiques d'amplitude et de fréquences qui changent aléatoirement en fonction du temps.

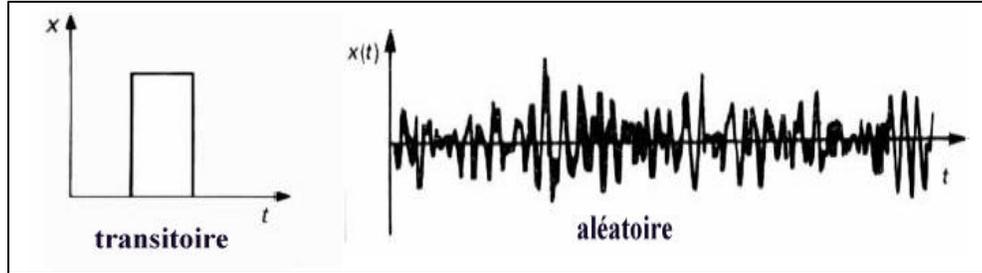


Figure 23 - exemples d'un signal transitoire et d'un signal aléatoire

**4.2.2 Représentations des signaux**

a) *Analyse harmonique, série de Fourier*

Physiquement, les signaux sont enregistrés sous la forme de la variation d'un paramètre (force, contrainte, amplitude, accélération, tension, pression, etc.) en fonction du temps. Or il est souvent plus facile de caractériser un signal dans le domaine fréquentiel. Cette représentation est obtenue grâce au théorème de Fourier qui démontre que toute fonction périodique  $f(t)$  de période  $T$ , peut se représenter par la somme d'une série de fonctions sinusoïdales de périodes  $T, T/2, \dots, T/k \dots$  que l'on appelle série de Fourier que l'on peut écrire sous la forme d'un développement :

$$f(t) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cos(2\pi kt/T) + b_k \sin(2\pi kt/T) \quad (27)$$

où les coefficients  $a_0, a_k$  et  $b_k$  ont les expressions suivantes :

$$a_0 = \int_{t_0}^{t_0+T} \frac{1}{T} f(t) dt \quad (28)$$

$$a_k = \int_{t_0}^{t_0+T} \frac{2}{T} f(t) \cos(2\pi kt/T) dt \quad (29)$$

$$b_k = \int_{t_0}^{t_0+T} \frac{2}{T} f(t) \sin(2\pi kt/T) dt \quad (30)$$

L'ensemble des valeurs des coefficients  $a_k$  et  $b_k$  forment le spectre de fréquences de la fonction  $f(t)$ . Un formalisme plus simple est possible en utilisant des fonctions exponentielles imaginaires :

$$f(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k \exp(2i\pi kt/T) \quad (31)$$

$$c_k = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} f(t) \exp(-2i\pi kt/T) dt \quad (32)$$

b) Transformée de Fourier

On peut étendre à des fonctions non périodiques la notion de transformée de Fourier. La fréquence  $1/T$  du terme fondamental tend alors vers 0, et les fréquences des différents harmoniques se rapprochent pour donner à la limite une fonction continue de la variable  $\omega=1/T$ . La fonction  $f(t)$  n'est plus représentée par une somme de composantes de fréquences discrètes, mais par une intégrale sur toutes les valeurs des fréquences  $\omega$  [4] :

$$f(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} F(u) \exp(2iput) du \tag{33}$$

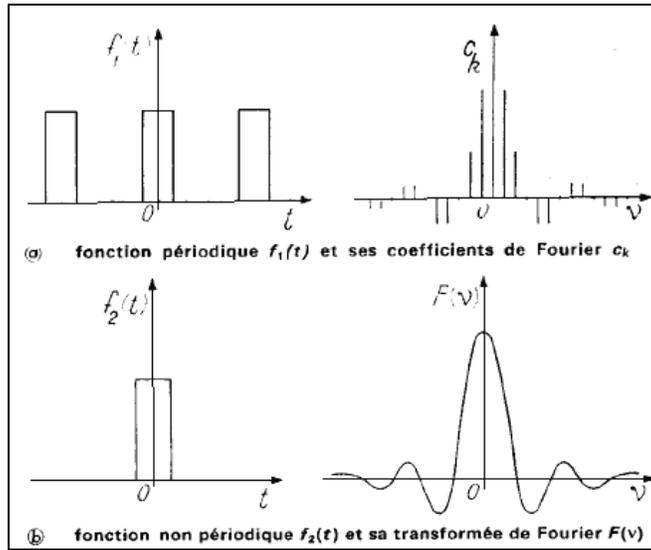


Figure 24 – (a)Représentation d'un signal périodique et son spectre de raies (série de Fourier) constitué par les coefficients  $C_k$ . (b) Pour un signal non périodique le spectre est continu (transformée de Fourier).

Remarques :

$F(\omega)$ , spectre de  $f(t)$ , est appelée **transformée de Fourier** de  $f(t)$ . L'énorme avantage est que  $F(\omega)$  peut se déduire de  $f(t)$  par une expression comparable et qui donne les valeurs de  $C_k$  lorsque  $f(t)$  est périodique

$$F(u) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \exp(-2iput) dt \tag{34}$$

On remarquera la symétrie des deux expressions et on appellera la fonction  $f(t)$ , la **transformée de Fourier inverse** de  $F(\omega)$ .

C'est entre autre grâce à cette propriété que les calculs de transformées de Fourier sont très utiles en traitement numérique d'un signal. Les appareils de mesures utilisés pour faire une analyse vibratoire utilisent ces propriétés pour déterminer les caractéristiques d'un signal mesuré.

### 4.3. Les analyseurs de spectres

Les analyseurs de spectres permettent la visualisation du signal en fonction de la fréquence. Les analyseurs réalisent la décomposition du signal en fonction de la fréquence en appliquant un traitement spécifique. Ils fonctionnent selon le principe suivant :

- Le signal électrique issu du capteur de vibrations est amplifié et filtré
- Le signal analogique est échantillonné et transformé en une suite de valeurs numériques représentatives (conversion analogique/numérique)
- Il réalise un calcul de transformée de Fourier rapide (en anglais Fast Fourier Transform, FFT)
- Un afficheur indique le résultat

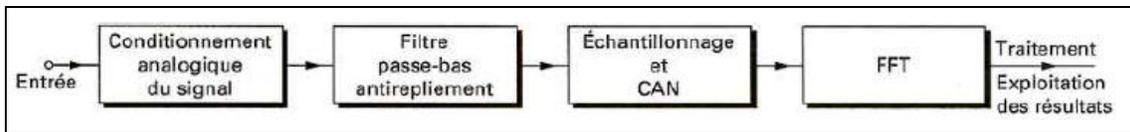


Figure 25 - schéma de principe d'un analyseur FFT

#### 4.3.1 Le filtre antirepliement

Soit  $x^*(t)$  le signal obtenu par échantillonnage à la fréquence  $F_e = 1/T_e$  du signal analogique d'entrée  $x(t)$ . Le spectre de  $x^*(t)$  est périodique de période  $F_e$ . L'échantillonnage de  $x(t)$  a engendré des répliques (alias en anglais) du spectre  $X(f)$  aux fréquences  $mF_e$  (multiples de  $F_e$ ,  $m$  entier relatif).

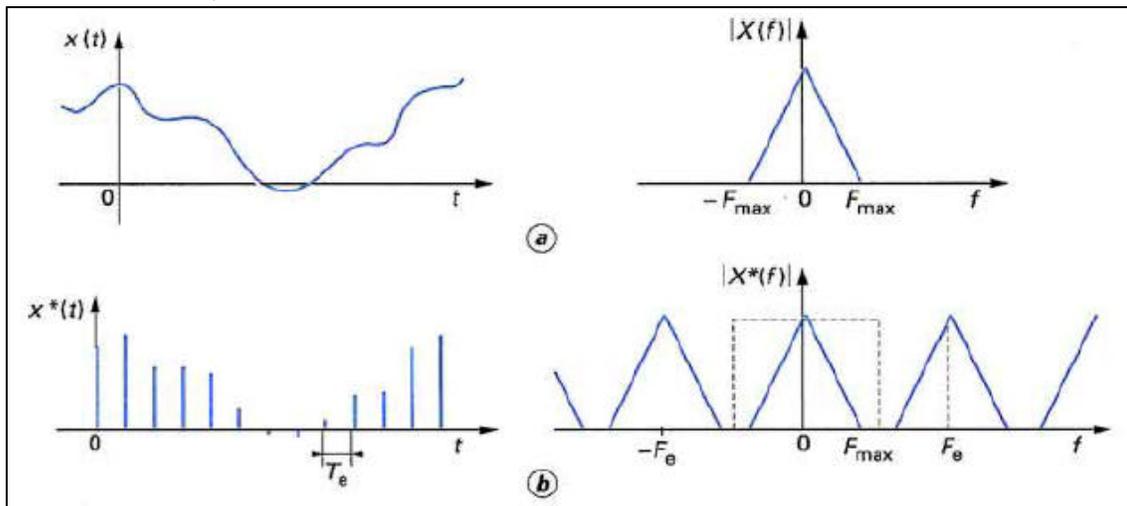


Figure 26 - (a) un signal quelconque et son spectre  $X(f)$ . En (b) le même signal mais à temps discret d'intervalle  $T_e$  qui engendre donc des répliques du spectre aux fréquences  $\pm mF_e$  ( $m$  entier relatif)

*a) Signal borné*

Si le spectre de  $x(t)$  est borné  $[-F_{\max} \cdot + F_{\max} ]$  (Figure 26a), la fréquence minimale d'échantillonnage autorisant une récupération ultérieure du signal  $x(t)$  sans déformation est donnée par le théorème de Shannon : c'est la fréquence de Nyquist :  $F_{e_{\min}} = 2F_{\max}$

Sur la Figure 26b, l'échantillonnage respecte le théorème de Shannon. Les répliques sont suffisamment espacées pour ne pas se mélanger au spectre initial  $X(f)$ , qui peut théoriquement être isolé sans altération par un filtrage passe-bas idéal (en pointillés sur la Figure 26b).

*b) Signaux physiques*

Les signaux physiques analysés, étant de durée limitée, ne peuvent être de spectre borné. De plus, ils sont superposés à du bruit, qui est généralement à large bande et dont le repliement provoquerait une dégradation importante du rapport signal à bruit. De façon à limiter la dégradation apportée au signal par l'échantillonnage, il est donc nécessaire de procéder, préalablement à l'opération d'échantillonnage, à un filtrage passe-bas des signaux d'entrée, appelé filtrage antirepliement

Le filtre doit être à fronts suffisamment raides pour assurer un bon compromis entre la transmission sans déformation de la bande utile et une atténuation suffisante de la bande coupée. La fréquence d'échantillonnage  $F_e$  est par ailleurs choisie légèrement supérieure à la fréquence de Nyquist ( $2F_{\max}$ ) afin de tenir compte du repliement de la bande de transition du filtre. Dans la pratique les constructeurs définissent un facteur compris entre 2,5 et 5 mais le plus couramment utilisé est 2,56 d'où  $F_{e_{\min}} = 2,56F_{\max}$  (c'est aussi ce facteur utilisé dans notre analyseur).

### **4.3.2 Résolution**

Il est absolument nécessaire de connaître les relations qui existent entre la fréquence d'échantillonnage, le nombre d'échantillons, la gamme de fréquence, le nombre de lignes de calcul et la résolution.

La gamme de fréquence commence théoriquement à 0Hz et dépend de la fréquence d'échantillonnage qui détermine la fréquence maximale d'analyse :

$$f_{\max} = \frac{f_e}{2,56} \quad (35)$$

Le nombre de lignes de calcul « n » dépend du nombre d'échantillons stockés « N » et respecte la

même règle que précédemment :

$$n = \frac{N}{2,56} \tag{36}$$

En fait il existe deux types de transformées de Fourier. La transformée de Fourier Discrète, et la transformée de Fourier Rapide. L'avantage de la seconde sur la première, est d'utiliser un algorithme particulier qui organise différemment le calcul et diminue très fortement le nombre d'opérations. N étant le nombre d'échantillons, le nombre de multiplications à effectuer est de N<sup>2</sup> dans le premier cas alors qu'il n'est plus que de N log<sub>2</sub> N dans le second. Pour 1024 échantillons, le facteur de gain est de 100. Toutefois, cet algorithme de FFT ne fonctionne que pour un nombre d'échantillons en puissance P de 2 : N=2<sup>P</sup> (par exemple pour P=10, N=1024).

Pour ce qui concerne la résolution, elle est définie par le rapport entre la fréquence d'échantillonnage et le nombre d'échantillons :

$$\Delta f = \frac{f_e}{N} = \frac{f_{\max}}{n} \tag{37}$$

Remarques : nous utilisons un collecteur de données permettant des analyses de Fourier avec un affichage de 400 lignes (raies spectrales). Il utilise donc 1024 échantillons. Le Tableau 7 résume la résolution dont nous disposerons en fonction de la gamme de mesure.

**Tableau 7- Résolution calculée pour 400 lignes en fonction de la gamme de fréquence d'analyse**

Gamme de fréquence	0 à 100 Hz	0 à 1000 Hz	0 à 10 000 Hz	0 à 20 000 Hz
Résolution	0,25 Hz	2,5 Hz	25 Hz	50 Hz

**4.4. Choix du descripteur**

Pour décrire une vibration, nous pouvons mesurer les trois grandeurs suivantes : déplacement, vitesse et accélération. Le déplacement s(t) d'une vibration harmonique est décrit par s(t)=S.sin(ωt+φ). Par dérivation de cette équation nous obtenons l'expression de la vitesse

$$v(t) = \frac{d(s)}{dt} = S.\omega.\cos(\omega t + \phi) = S.\omega.\sin\left(\omega t + \phi + \frac{\pi}{2}\right) \tag{38}$$

v(t) :

$$v(t) = V.\sin\left(\omega t + \phi + \frac{\pi}{2}\right) \tag{39}$$

il en est de même pour l'expression de l'accélération :

$$a(t) = \frac{d(v)}{dt} = V \cdot \omega \cdot \cos\left(\omega t + j + \frac{p}{2}\right) = A \cdot \sin(\omega t + j + p) \quad (40)$$

$$a(t) = -A \cdot \sin(\omega t + j) \quad (41)$$

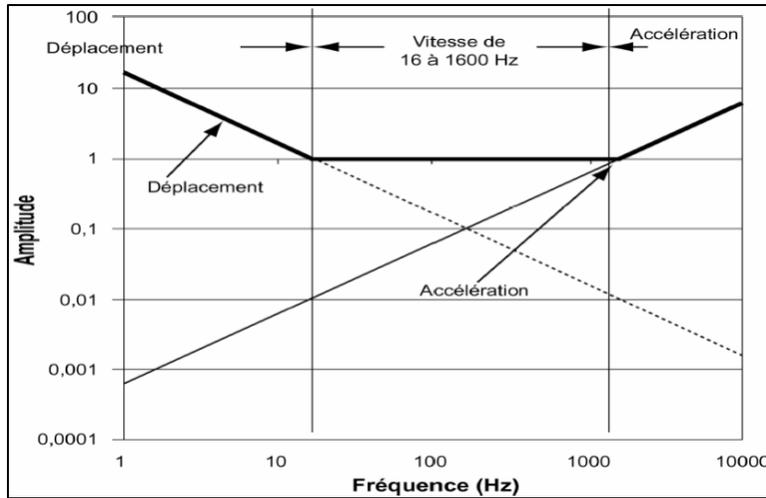
Il ressort des précédentes équations, les relations suivantes entre les modules :

$$|S| = \frac{|V|}{\omega} = \frac{|A|}{\omega^2} \quad (42)$$

$$|V| = |S| \cdot \omega = \frac{|A|}{\omega} \quad (43)$$

$$|A| = |V| \cdot \omega = |S| \cdot \omega^2 \quad (44)$$

On choisira donc préférentiellement la grandeur déplacement pour détecter des phénomènes basse fréquence ( $\omega=2\pi f$  petit) et la grandeur accélération pour les phénomènes haute fréquence ( $\omega=2\pi f$  grand).



**Figure 27 - On choisira la grandeur déplacement pour détecter les phénomènes basse fréquence et la grandeur accélération pour les phénomènes haute fréquence. Les valeurs indiquées sur la courbe représentent un ordre de grandeur des plages de fréquences.**

#### 4.4.1 Notations communément employées

Acc est l'accélération enregistrée par le capteur fixé sur la machine surveillée. Les principaux paramètres sont définis sur la Figure 28. On retrouve le même vocabulaire, abréviations et formules pour les grandeurs vitesse et déplacement. Ainsi  $Acc_{eff}[10-1000\text{ Hz}]$  désigne la grandeur accélération efficace – réduite aux phénomènes dont la fréquence est comprise entre 10 Hz et 1000 Hz (se produisant entre 10 et 1000 fois par seconde) – de la vibration enregistrée.

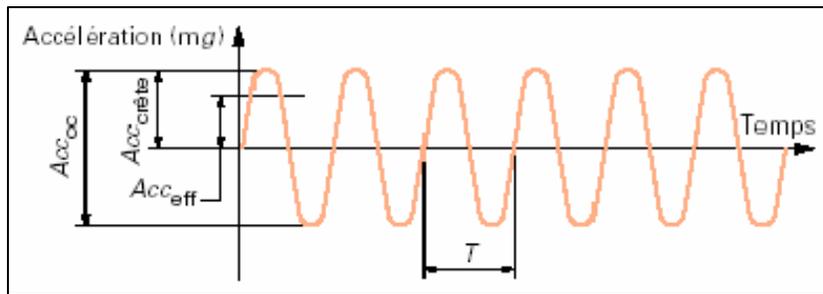


Figure 28 - Vocabulaire communément employé.

Pour un signal harmonique comme sur la Figure 28 l'accélération efficace notée  $Acc_{eff}$ , peut être

déduite par l'expression suivante :  $Acc_{eff} = \frac{Acc_{crête}}{\sqrt{2}}$  (45)

Pour un signal de vibration complexe, il n'y a pas de relation simple entre la valeur de crête et la valeur efficace.  $Acc_{eff}$  donnée par:

$$Acc_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a^2(t) dt} \quad (46)$$

où « a » représente l'amplitude instantanée et « T » la durée d'analyse du signal.

## **4.5. La surveillance**

### **4.5.1 Les défauts de roulements**

Le principal défaut rencontré sur le sélecteur mécanique concerne les roulements. De nombreux facteurs peuvent intervenir dans la détérioration des roulements mais c'est généralement par usure due à la fatigue de la matière (voir ANNEXE III : Les roulements).

Dans la plupart des modes d'usures, il y a augmentation des discontinuités sur les pistes ou sur un élément roulant. Les vibrations générées par un roulement neuf et en bon état sont faibles et ressemblent à un bruit aléatoire et lorsqu'un défaut commence à se développer, les vibrations produites par le roulement changent.

Chaque fois qu'un élément roulant rencontre une discontinuité sur son chemin, une impulsion apparaît. Ces impulsions se répètent périodiquement à un rythme déterminé par l'endroit de la discontinuité, par la géométrie du roulement et par la vitesse de rotation de l'arbre. Ces rythmes répétés sont appelés fréquences caractéristiques de roulement.

On constatera par exemple un défaut sur la piste extérieure du roulement grâce à la mesure de la fréquence de passage des éléments roulants sur celle-ci. Quatre fréquences caractéristiques sont à connaître : « $f_{ext}$  » pour un défaut sur la piste extérieure, « $f_{int}$  » pour la piste interne, « $f_{bille}$  » pour un défaut d'un élément roulant et « $f_{cage}$  » pour un défaut sur la cage du roulement. Ces fréquences peuvent être calculées à partir des formules données en annexe ou données par l'intermédiaire du logiciel «ATLAS » fournit par le constructeur de roulement «SKF ». Toutefois il faut remarquer qu'en réalité, il y a plus ou moins de glissement entre les éléments roulants et les pistes, donc ces fréquences doivent être considérées comme approchées.

Remarques :

En réalité, dans le spectre des vibrations du sélecteur mécanique, les composantes des roulements citées précédemment sont noyées parmi d'autres de niveau plus élevé, telles que celles provenant du déséquilibre du rotor. Ceci étant commun à bon nombre de machines tournantes. C'est donc pour cela que l'on observera les niveaux vibratoires dans une plage de hautes fréquences. Car lorsqu'un élément roulant rencontre une discontinuité, l'impact se reproduit sur la structure du roulement puis sur le bâti du sélecteur mécanique et provoque une résonance sur le châssis. Cette fréquence de résonance est une propriété de la structure et ne dépend pas du nombre d'impacts, ni de leur violence. Ces fréquences de résonances se situent généralement entre 1kHz et 20 kHz.

### 4.5.2 Niveau global de vibration

La méthode la plus simple est de mesurer régulièrement la valeur efficace globale des vibrations sur les paliers des roulements. Cette technique requiert la mesure de la valeur efficace de la vitesse de vibration sur une large bande de fréquence (typiquement 1 Hz à 1000 Hz). Ces mesures peuvent être réalisées en utilisant un accéléromètre piézoélectrique et un collecteur de données. Le fonctionnement du capteur piézoélectrique est décrit en annexe et celui du collecteur de données dans les chapitres suivants. Ces mesures sont comparées avec les valeurs limites figurant dans les recommandations internationales comme la norme ISO 10816, utilisée d'ailleurs lors de l'équilibrage du sélecteur mécanique par la société SKF. En reportant les résultats des mesures en fonction du temps, on peut apprécier l'évolution des vibrations et estimer la date de remplacement du roulement.

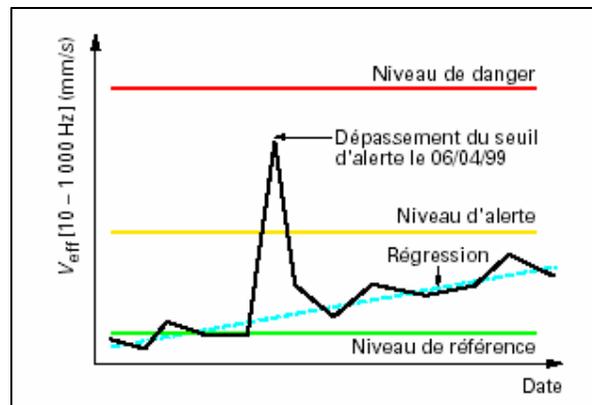


Figure 29 - Exemple d'utilisation d'un niveau global

La Figure 29 illustre l'utilisation d'un niveau global avec l'indicateur vitesse efficace [10-1000 Hz]. Le niveau global utilisé fait apparaître un problème. On évalue sa gravité mais on n'en connaît pas l'origine. Une telle évolution peut cependant être due à l'apparition d'un balourd ou d'un délignage. Pour trancher entre 2 causes, il est nécessaire de réaliser un diagnostic précis. On fera alors appel à d'autres outils (voir les paragraphes suivants).

Sur une machine comme notre sélecteur mécanique où le niveau vibratoire normal est relativement haut (voir mesures effectuées lors de l'équilibrage page 20), le développement d'un défaut mécanique peut être masqué par le « bruit de fond ». Le niveau global mesuré ne réagit alors pas à ce défaut, du moins pas à un stade précoce de son développement. La surveillance par

niveaux globaux ne peut donc convenir que dans le cadre d'une politique de sécurité. Elle permet de détecter un fonctionnement anormal et de déclencher un arrêt avant la panne des installations. En aucun cas on ne pourra identifier la cause de ce fonctionnement anormal ni optimiser la maintenance des machines avec un tel outil.

Nous verrons sur la Figure 31 la différence d'évolution entre l'accélération efficace et le facteur de crête. Elle montre bien que le niveau global de vibration (proportionnel à l'accélération efficace) augmente seulement peu de temps avant la défaillance.

### 4.5.3 Niveaux globaux spécifiques aux roulements

a) *Le Facteur de crête :*

On peut être averti plus tôt du défaut du roulement en utilisant le même matériel que précédemment, mais en mesurant le facteur de crête sur la bande de fréquence [1 à 10 kHz] :

$$FC = \frac{A_{crête}}{A_{eff}} \quad (47)$$

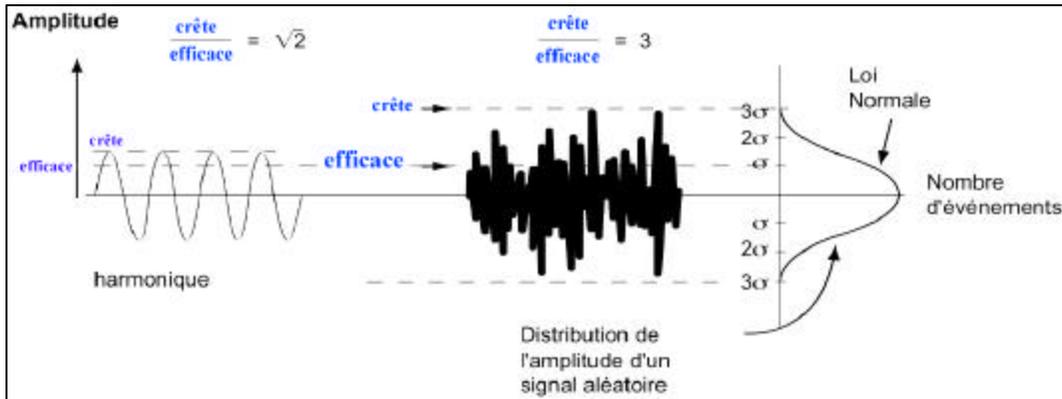


Figure 30 - Evolution du facteur de crête en fonction du type de signal

La Figure 30 rappelle que le facteur de crête est égal à  $\sqrt{2}$  pour un signal harmonique mais en revanche pour un signal aléatoire, la fonction de répartition des amplitudes suit une loi normale de moyenne nulle et d'écart type sigma. Le facteur de crête sera alors égal à 3.

La Figure 31 montre l'évolution typique du facteur de crête quand un roulement se dégrade. Au début ce rapport est sensiblement constant. Lorsqu'un défaut localisé se développe, les petits chocs résultants accroissent notablement le niveau de crête, mais ont une influence faible sur la valeur efficace. Le niveau de crête augmente ensuite jusqu'à un maximum. Au fur et à mesure que le roulement se détériore, il y a davantage d'impacts générés à chaque passage de

bille. Le niveau efficace augmente donc, tandis que le niveau de crête reste inchangé. Vers la fin de vie du roulement, le facteur de crête peut retomber à sa valeur initiale car la valeur efficace a augmenté à son tour.

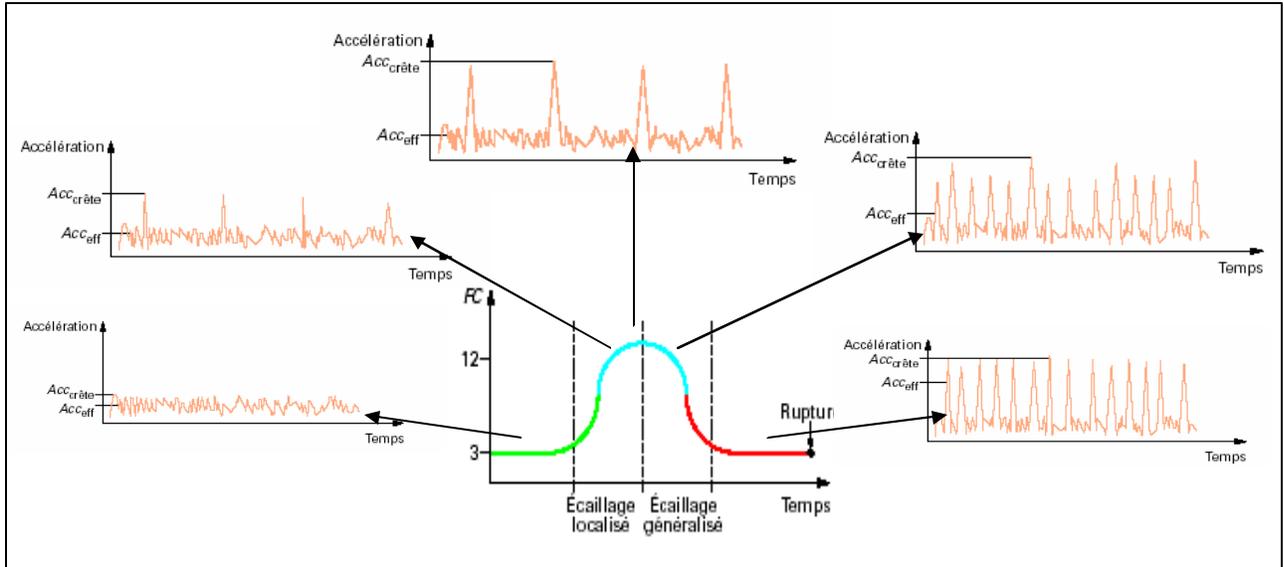


Figure 31 - Evolution du facteur de crête en fonction de l'évolution d'un défaut de roulement

Le défaut majeur de cet indicateur est de présenter environ les mêmes valeurs dans les deux cas extrêmes (état neuf et fin de vie du roulement). Seule son évolution est donc significative.

b) *Le Kurtosis :*

Les vibrations de types sinusoïdal ou impulsionnel génèrent des allures de courbes de densité différentes. Le kurtosis, qui quantifie cette différence, est donné par :

$$K = \int_{-x}^x \frac{(x - \bar{x})^4}{s^4} P(x) dx \quad (48)$$

Avec  $x$  : amplitude instantanée du signal  
 $\bar{x}$  : valeur moyenne de  $x$   
 $P(x)$  : probabilité d'apparition de  $x$   
 $s$  : l'écart-type

Concrètement, le kurtosis quantifie l'aplatissement de la courbe de densité de probabilité du signal enregistré. Il donne une grande importance aux amplitudes élevées tout en pondérant les événements isolés, contrairement au facteur de crête. La valeur du kurtosis est de 1.5 pour un signal harmonique et de 3 pour un signal aléatoire. Pour un roulement en bon état la valeur du kurtosis est de l'ordre de 3 alors qu'elle s'approche de 4 lorsque le roulement se détériore.

#### **4.5.4 Spectre PBC (pourcentage de bande constant)**

La technique de surveillance des installations à chaîne cinématique simple (une seule ligne d'arbre) par comparaison de spectres PBC est une technique fiable et rapide. Le spectre PBC se présente sous forme de « bandes » juxtaposées selon une échelle logarithmique de la fréquence. Le rapport « largeur de bande /valeur de fréquence centrale » reste constant. Il est généralement égal à 6%, 23% ou 70 %. Ces valeurs sont couramment utilisées dans l'industrie et proviennent de l'analyse sonore (voir en annexe I le détail concernant les filtres).

On représente le spectre PBC sur des échelles logarithmiques en abscisses et ordonnées (Figure 32). Le résultat est une image haute résolution aux basses fréquences (BF) afin de bien distinguer les composantes caractéristiques des défauts tels que le balourd, le désalignement, les instabilités des rotors. Dans les hautes fréquences (HF), la résolution est faible mais suffisante pour détecter les défauts de roulements.

##### *a) Largeur de bande*

Une largeur de bande relative de 6 % de la fréquence centrale apporte une solution optimale. Avec une telle largeur de bande relative on aura une haute résolution en basse fréquence pour détecter un défaut de balourd et une résolution suffisante en haute fréquence pour observer une augmentation d'une ou plusieurs bandes de fréquences lors d'un défaut de roulement. Sur la Figure 32, par exemple on voit que:

- ❖ la bande centrée sur 25,90 Hz a une largeur de :  $(6 /100) \times 25,90 = 1,55$  Hz
- ❖ la bande centrée sur 2 740 Hz a une largeur de :  $(6 /100) \times 2 740 = 164,40$  Hz

##### *b) Niveaux de référence, alerte et danger*

Le niveau de référence, en vert sur la courbe, représente la signature de la machine. Cette signature est établie lors des premières campagnes de mesures. Le niveau d'alerte, en jaune, est déduit du niveau de référence de la façon suivante : Alerte = Référence + 6 dB et le niveau de danger, en rouge, est déduit du niveau de référence par : Danger = Référence + 20 dB

Etant donné la grande largeur de bande fréquentielle d'un spectre PBC, il est impératif de travailler en accélération et non en vitesse avec ce type d'outil comme nous l'avons précisé dans les généralités.

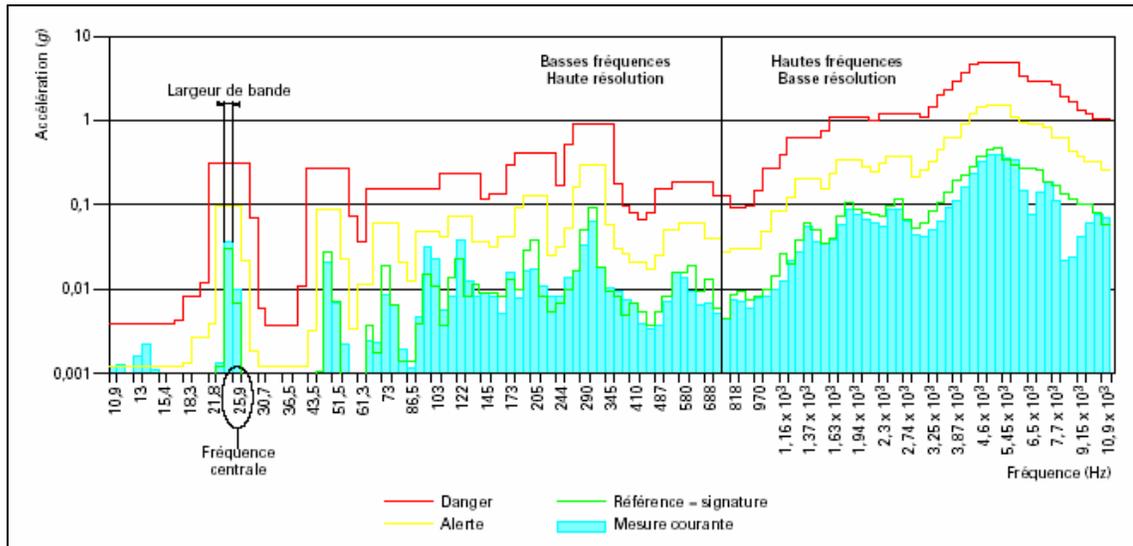


Figure 32 - Exemple de spectre PBC

#### 4.6. Le diagnostic

Toutes les méthodes précédentes permettent d'estimer à peu près la date à laquelle il faudra réviser la machine, mais mieux on connaît la nature du défaut, plus sûre est la prévision. Les paragraphes suivants décrivent les techniques de « zoom » ou « analyse d'enveloppe » qui permettent d'en savoir davantage sur les défauts.

##### 4.6.1 Introduction

###### a) Principes

La *surveillance* a pour finalité, tout au moins sous sa forme primaire, de détecter à un stade le plus précoce possible, l'existence d'une anomalie et d'en suivre l'évolution à partir d'indicateurs préalablement définis. Comme nous l'avons précisé précédemment, un indicateur de surveillance ne peut être sensible à l'ensemble des défauts susceptibles d'affecter une machine. Le *diagnostic*, au contraire, doit permettre de statuer sur l'existence d'anomalies, d'en identifier la nature et d'en préciser la gravité. Le diagnostic par analyse de vibration est non seulement l'outil de base de la maintenance prévisionnelle, mais aussi du contrôle qualité dans le cas d'un relevé vibratoire d'une installation neuve ou après remise en état.

*b) Définition*

Pour mieux cerner le concept de diagnostic, il est important de se reporter au sens premier de ce mot couramment utilisé dans le monde médical :

*Diagnostic* (du grec diagnosis : connaissance) : action d'identifier une maladie (un défaut, une anomalie) à partir d'une analyse méthodique des symptômes présentés par le malade (la machine).

Formuler un diagnostic, c'est identifier des symptômes caractérisés par des indicateurs qualitatifs ou quantitatifs et les relier à des causes. Un diagnostic est en général engagé lorsque des signes jugés anormaux se manifestent. La finalité première de la surveillance est la détection la plus précoce possible de ces signes anormaux. Mais un diagnostic peut aussi être demandé :

- pour confirmer un comportement normal et justifier, par exemple, le report d'une révision systématique ou d'un échange standard d'un organe, ou pour s'assurer du bon état vibratoire d'un équipement neuf ou révisé.
- pour connaître le comportement vibratoire d'une machine pour des conditions d'exploitations nouvelles (augmentation des vitesses de rotation...).

*c) Fiabilité du diagnostic*

Le diagnostic sera souvent grandement facilité si l'on dispose :

- de la fiche cinématique de la machine, d'un historique des pannes et des modifications apportées à la machine depuis sa mise en service,
- de l'ensemble des valeurs des indicateurs et spectres de base constituant la signature vibratoire initiale de l'installation considérée en bon état.

Ces éléments apportent une aide appréciable dans la formulation d'un diagnostic. Comme la fiabilité du diagnostic repose avant tout sur l'identification de toutes les images vibratoires contenues dans les signaux délivrés par les capteurs, **le traitement du signal** joue un rôle essentiel. La fiabilisation de la phase d'identification systématique de toutes les images vibratoires nécessite de suivre une démarche rigoureuse en méthodologie.

### 4.6.2 Spectre RC (résolution constante) et le zoom

C'est une représentation de l'amplitude de l'accélération reportée sur un axe linéaire en fréquence. Notre appareil possède une résolution de 400 lignes, mais pourrait être de 800 ou 1200 lignes sur d'autres appareils. Le spectre obtenu sera donc une courbe passant par 400 points régulièrement espacés en fréquence.

La bande de fréquences  $\Delta f$  se définit avant de procéder aux mesures sur site. On distingue :

- les spectres BF (basses fréquences [0-50 Hz]) ;
- les spectres MF (moyennes fréquences [0-500 Hz]) ;
- les spectres HF (hautes fréquences [0-10 000 Hz]) ;
- les zooms haute résolution

#### ➤ Définition de l'image, résolution

Comme nous l'avons indiqué dans les généralités, la résolution est définie par le pas dont l'expression est :

$$\text{Pas} = \Delta f / 400 \quad (49)$$

où  $\Delta f$  est la bande de fréquences analysée.

La définition de l'image sera d'autant meilleure que la bande de fréquences analysée sera étroite.

On aura par exemple :

- un spectre HF [0-10 000 Hz] aura un pas de  $10\,000 / 400 = 25$  Hz.
- un spectre BF [0-50 Hz] aura un pas de  $50 / 400 = 0,125$  Hz ;
- un zoom [152-158 Hz] aura un pas de  $6 / 400 = 0,015$  Hz ;

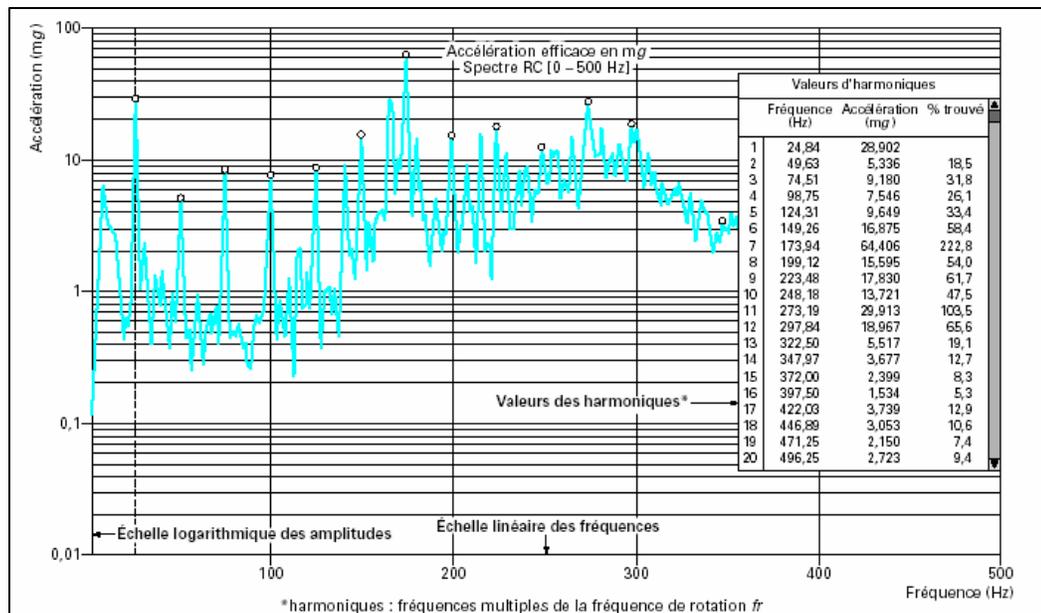


Figure 33 - Exemple de spectre à résolution constante. Le spectre est représenté sur une bande de fréquence de 500Hz grâce à 400 points, donc avec une résolution de 1,25Hz.

On utilisera un spectre HF (haute fréquence) pour suivre l'évolution du niveau vibratoire de la machine. Si un phénomène anormal apparaît, on peut distinguer s'il s'agit d'un problème de roulement (hautes fréquences), d'engrènement (fréquences caractéristiques prédéfinies)... Son utilisation est comparable à celle d'un spectre PBC. Il reste plus précis que celui-ci pour certains phénomènes mais nécessite plus d'espace mémoire.

Le diagnostic de précision nécessite le recours au spectre BF (basse fréquence) ou au zoom centré sur une fréquence particulière. En effet, certains défauts tels que des défauts de denture ou de « faux rond » sur les engrenages ne s'identifient avec précision que sur des images dont le pas est souvent inférieur à 0,5 Hz.

?

Le Tableau 8 donne quelques exemples de défauts courants visibles sur un spectre RC. Les fréquences surveillées étant élevées, on utilisera systématiquement les représentations en accélération avec de tels outils.

**Tableau 8 - Défauts et fréquences caractéristiques**

Défauts	Fréquences caractéristiques
Balourd mécanique	$Fr^7$
Désalignement	2Fr, 3Fr, et/ou 4Fr
Frottement, jeux	Peignes de raies d'un pas de $(1/2)Fr$ et Fr
Engrènement (z dents)	z.fr modulé par Fr
passages d'aubes (n aubes)	n.Fr

#### **4.6.3 Analyse d'enveloppe ou signature BCU (Bearing Condition Unit)**

Cette technique est très utilisée pour la détection des défauts se manifestant dans les hautes fréquences. Ces défauts sont forcément de faible énergie. Ils n'émergent en général pas du bruit de fond sur un spectre RC dans les hautes fréquences. Ils peuvent s'apparenter à de petits chocs qui excitent la structure de la machine laquelle répond généralement entre 1 et 10 kHz.

Le but du spectre enveloppe est d'extraire les signaux périodiques de très faible amplitude se trouvant à haute fréquence.

<sup>7</sup>Fr = N/60 : fréquence de rotation en hertz, avec N= vitesse de rotation en tr/min

Un spectre enveloppe doit donc se paramétrer de façon précise sur deux gammes de fréquences différentes :

- la gamme HF ; c'est la gamme de fréquences excitée par les défauts sur laquelle réagit la structure. Elle est généralement comprise entre 1 et 10 kHz.
- la gamme de fréquences des défauts « excitateurs » possibles.

Ces défauts sont ceux des roulements. L'élément fautif peut être la piste interne (sur l'arbre), la piste externe (sur l'alésage) ou une bille.

Des logiciels édités par les constructeurs de roulements permettent de déterminer, en fonction du type de roulement et de la vitesse de rotation de l'arbre, toutes les fréquences des défauts possibles dans un roulement ainsi que le paramétrage d'une analyse enveloppe. Pour notre cas il existe le logiciel ATLAS de chez S.K.F.

Le spectre enveloppe peut aussi se paramétrer sans connaître les caractéristiques du roulement :

- On effectue une observation sur une large bande [0-10 kHz]
- A partir du signal résiduel, certains constructeurs utilisent pour leurs diagnostics une valeur représentative qui tient compte de l'amplitude, de la fréquence de l'impulsion et de son contenu énergétique ; cette valeur est exprimée dans une unité appelée BCU (Bearing Condition Unit).

La Figure 34 montre le principe de cette méthode.

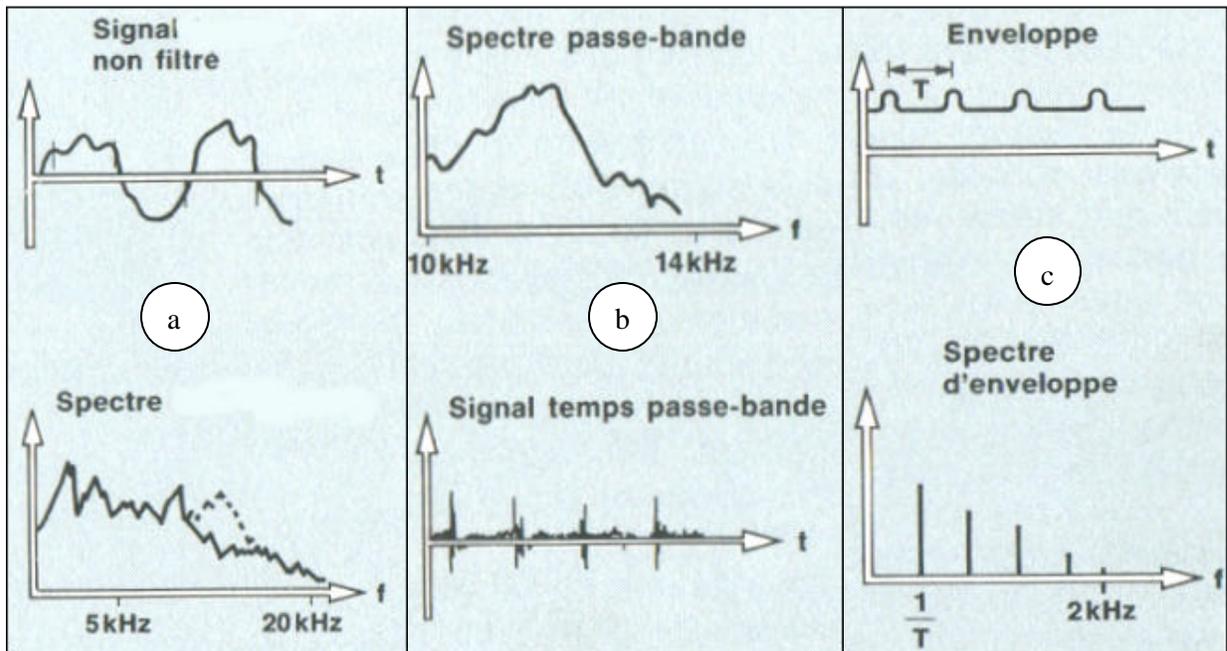


Figure 34 - Chronologie pour établir un spectre enveloppe (voir texte)

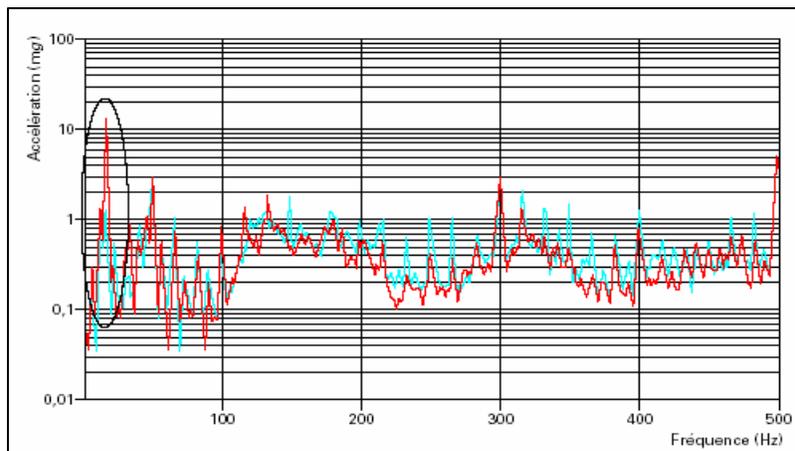
Pour détecter l'enveloppe, il faut d'abord déterminer la zone où se produit l'augmentation du niveau global de vibration, zone en pointillés sur le spectre de la Figure 34a. On règle alors un filtre passe bande au centre de celle-ci. La détection des valeurs crêtes sur la signal temporel donne l'enveloppe en fonction du temps. Ce signal possède alors les informations en fréquence et en amplitude (Figure 34c), la transformée de Fourier concrétise ces informations en affichant les raies correspondantes aux fréquences des défauts recherchés. Les composantes fréquentielles peuvent ensuite être comparées aux fréquences de roulements calculées pour établir avec certitude le type de défaut présent.

#### 4.7. Exemples de surveillance et de diagnostic

Le présent paragraphe illustre la détection des deux principaux défauts que l'on peut rencontrer sur les sélecteurs mécaniques ainsi que leur manifestation vibratoire.

##### 4.7.1 Défaut de balourd (ou défaut d'équilibrage)

Cet exemple nous montre la manifestation d'un défaut de balourd. L'origine d'un tel défaut peut être mécanique, elle est alors due à une dégradation des pales ou aubages (dépôts d'impuretés...) ou thermique, créée par la modification de la géométrie des parties tournantes en fonction de la température. Cela se traduira par une augmentation du niveau global en basses fréquences, soit  $D_{cc}[10-1\ 000\ \text{Hz}]$ , soit  $V_{eff}[10-1\ 000\ \text{Hz}]$  et une nette augmentation de l'amplitude de la fréquence fondamentale qui est la fréquence de rotation  $f_r=N/60$  avec N la vitesse de rotation (tr/min). Sur la Figure 35, le spectre bleu a été relevé sur la machine en bon état de fonctionnement ; l'amplitude de la fréquence fondamentale est de 1,323 mg pour 16,25 Hz. En revanche le spectre rouge met en évidence un fonctionnement dégradé car l'amplitude de la fréquence fondamentale est passée à 14,199 mg pour 16,25 Hz.



**Figure 35 - Mise en évidence d'un défaut de balourd. La signature vibratoire initiale est en bleu et en rouge on constate une augmentation de l'amplitude de la fréquence fondamentale correspondant à un défaut de balourd.**

### **4.7.2 Défaut de roulement**

L'exemple suivant montre le processus de détection et de diagnostic d'un tel défaut en utilisant un spectre PBC et un spectre enveloppe.

Le roulement surveillé présente toutes les caractéristiques d'un défaut dont l'origine peut être d'un écaillage de la piste interne (sur l'arbre) ou externe (sur l'alésage). Dans tous les cas, il s'agit d'un choc périodique de faible énergie qui excite la structure de la machine. Cette structure répond dans une gamme de fréquences qui lui est propre. Afin de statuer de façon définitive sur un tel défaut, on réalise une analyse dite d'enveloppe :

- 1er temps : on détecte la possibilité d'un tel défaut sur un indicateur tel qu'un PBC (Figure 36b) ;
- 2e temps : on paramètre une analyse d'enveloppe (Figure 36), en fonction des fréquences dont le niveau a augmenté (bande de fréquence délimitée par les pointillés sur la Figure 36a).
- 3e temps : on analyse le spectre enveloppe obtenu.

Compte tenu des caractéristiques du roulement considéré (Figure 36a) et au vu du spectre enveloppe (Figure 36c) on peut conclure que c'est un défaut de piste externe qui a excité des résonances dans les hautes fréquences du spectres PBC.

La fréquence caractéristique relevée dans le spectre enveloppe peut être légèrement différente de la fréquence calculée à cause du glissement qu'il peut y avoir au niveau des billes.

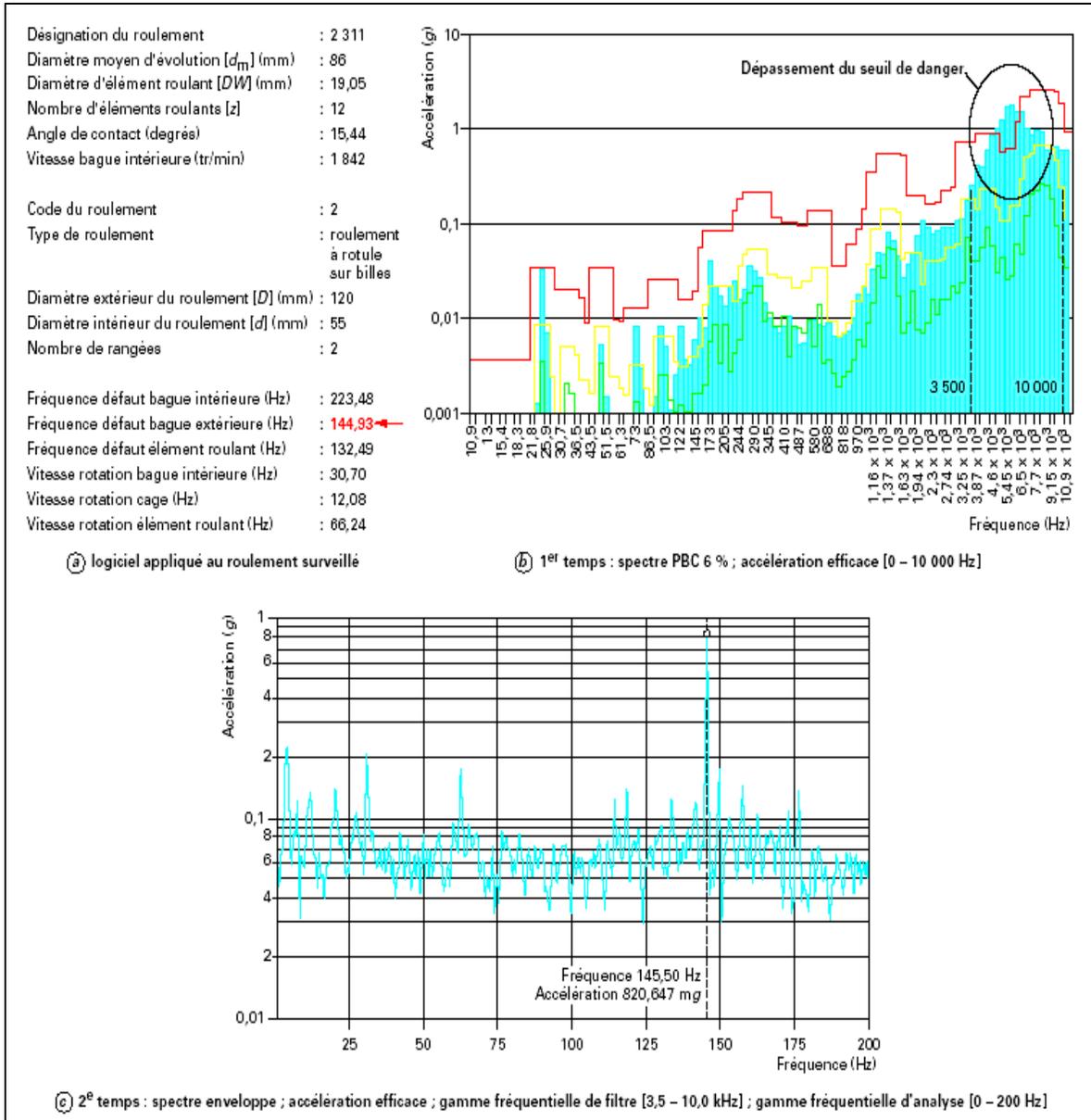


Figure 36 - Mise en évidence d'un défaut de roulement[1]

Cet exemple montre bien les étapes nécessaires à un bon diagnostic. Dans un premier temps il est important de connaître les fréquences caractéristiques des défauts possibles en fonction de la vitesse de rotation. Ici lors de l'analyse du spectre PBC comparé à une signature initiale (en vert sur la figure), on constate une augmentation des niveaux vibratoires en hautes fréquences, caractérisant ainsi un défaut de roulement. L'augmentation dépasse même le seuil de danger (en rouge). Cet en effectuant une analyse d'enveloppe que l'on peut conclure sur l'origine précise du défaut comme ici la bague extérieure.