

Date de publication :  
**10 janvier 2001**

Réf. : **BM5145**

# Analyse vibratoire des machines tournantes

Cet article est issu de : **Environnement - Sécurité | Bruit et vibrations**

par **David AUGEIX**

**Pour toute question :**  
Service Relation clientèle -  
Techniques de l'Ingénieur  
Pleyad 1 - 39, bd Ornano  
93200 Saint-Denis

**Par mail :**  
[infos.clients@teching.com](mailto:infos.clients@teching.com)

**Par téléphone :**  
00 33 [0]1 53 35 20 20

Document téléchargé le : **20/01/2016**  
Pour le compte : **7200034507 - ustl // 193.49.225.10**

# Analyse vibratoire des machines tournantes

par **David AUGEIX**

Ingénieur de l'Institut national des sciences appliquées (INSA Toulouse)

<b>1. Principes fondamentaux .....</b>	<b>BM 5 145 - 3</b>
1.1 Matériel et prises de mesures .....	— 3
1.2 Indicateurs de surveillance : détection des défauts.....	— 3
1.3 Indicateurs de diagnostic : recherche de la cause des défauts.....	— 3
1.4 Organisation préconisée .....	— 4
<b>2. Préliminaires à la surveillance .....</b>	<b>5</b>
2.1 Classement « VIS » des machines.....	— 5
2.2 Cinématique .....	— 5
2.3 Points de mesure.....	— 5
2.4 Aspects pratiques. Pastilles à coller .....	— 6
<b>3. Outils de surveillance .....</b>	<b>6</b>
3.1 Niveaux globaux (NG).....	— 6
3.2 Spectre PBC (pourcentage de bande constant) .....	— 7
3.3 Synthèse.....	— 8
<b>4. Outils de diagnostic .....</b>	<b>8</b>
4.1 Spectre RC (résolution constante) ou FFT ( <i>fast Fourier transform</i> ) et le zoom .....	— 8
4.2 Cepstre.....	— 10
4.3 Analyse d'enveloppe .....	— 10
4.4 Synthèse.....	— 12
<b>5. Principaux défauts.....</b>	<b>12</b>
5.1 Balourd (ou défaut d'équilibrage) .....	— 12
5.2 Délignage (ou mauvais alignement) .....	— 12
5.3 Frottement, desserrage, fissuration et jeux.....	— 14
5.4 Défauts de courroies .....	— 14
5.5 Défauts de denture d'engrenages .....	— 14
5.6 Passages d'aubes .....	— 15
5.7 Cavitation .....	— 16
5.8 Défauts électriques .....	— 16
5.9 Roulements .....	— 18
<b>6. Itinéraires .....</b>	<b>18</b>
6.1 Itinéraires de surveillance .....	— 18
6.2 Itinéraires de diagnostic.....	— 18
<b>7. Surveillance d'une installation : directives .....</b>	<b>19</b>
7.1 Préparation des campagnes de relevés.....	— 19
7.2 Réalisation des campagnes de relevés.....	— 20
7.3 Analyse .....	— 21
7.4 Rédaction d'un rapport d'analyse .....	— 21
7.5 Évolution de l'itinéraire utilisé.....	— 21
7.6 Maîtrise des documents : pistes.....	— 21
<b>8. Déroulement d'une prestation : synthèse .....</b>	<b>22</b>
<b>Pour en savoir plus.....</b>	<b>Doc. BM 5 145</b>

**L**'analyse vibratoire est un des moyens utilisés pour suivre la santé des machines tournantes en fonctionnement. Cela s'inscrit dans le cadre d'une politique de maintenance prévisionnelle de l'outil de production industrielle.

Les objectifs d'une telle démarche sont de :

- réduire le nombre d'arrêts sur casse ;
- fiabiliser l'outil de production ;
- augmenter son taux de disponibilité ;
- mieux gérer le stock de pièces détachées, etc.

À partir des vibrations régulièrement recueillies sur une machine tournante, l'analyse vibratoire 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). Réalisées à l'aide de capteurs à courants de Foucault, ces mesures, leur interprétation et leurs applications ne sont pas traitées ici. La technologie mise en œuvre est lourde. Une application courante est la surveillance des machines à paliers hydrauliques (à coin d'huile). 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 ;

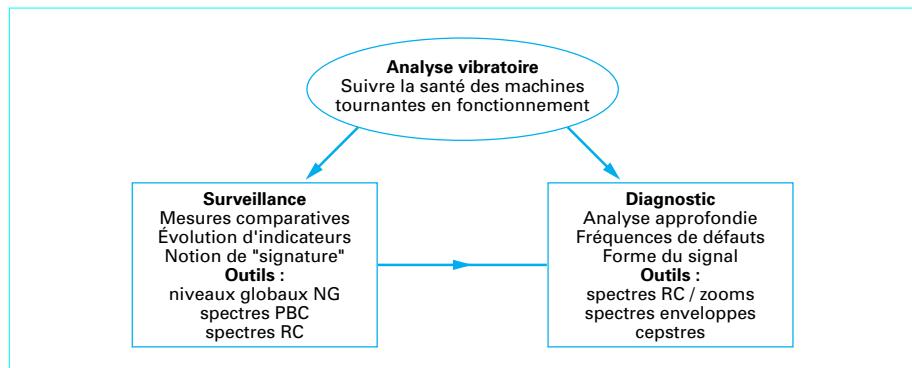
— **par mesure de l'accélération subie par les parties fixes de la machine** (carter). Les moyens mis en œuvre sont, dans ce cas, beaucoup plus accessibles aux petites structures. À l'aide d'un accéléromètre relié à un collecteur de données, le technicien recueille les vibrations subies par les carters 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.

L'industrie lourde, généralement utilisatrice de turbomachines, a souvent recours à l'ensemble des deux technologies afin de réaliser une surveillance vibratoire performante de son outil de production.

Cependant, si les arbres des machines surveillées sont montés sur roulements (c'est le cas pour la majorité d'entre elles), une surveillance périodique par mesure sur les parties fixes permet une analyse très fine de l'état des machines. Les objectifs énoncés plus hauts sont donc atteints dès l'instant où l'activité est confiée à du personnel compétent et expérimenté. D'autre part, les coûts de préparation et de mise en œuvre étant très largement inférieurs à ceux de la technologie utilisant les capteurs à courants de Foucault, la surveillance périodique séduit les PMI. Même si ces dernières ne possèdent pas les compétences internes, elles n'hésitent plus à sous-traiter la surveillance vibratoire de leur parc de machines tournantes.

L'objectif de cet article est triple :

- familiariser le lecteur avec l'analyse vibratoire par mesures sur les parties fixes 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 dans son usine,
  - 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),
  - instaurer une communication efficace entre les différents acteurs de la surveillance,
  - présenter des documents utiles au bon déroulement d'une surveillance.

**Figure A –**

*Le schéma de la figure A 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 permet de désigner l'élément de la machine défectueux suite à une évolution anormale des vibrations constatée lors de la surveillance.

*Le diagnostic n'est réalisé que lorsque la surveillance a permis de détecter une anomalie ou une évolution dangereuse du signal vibratoire. La surveillance peut être confiée à du personnel peu qualifié. Le diagnostic demande de solides connaissances mécaniques et une formation plus pointue en analyse du signal.*

## 1. Principes fondamentaux

### 1.1 Matériel et prises de mesures

Pour de plus amples détails, le lecteur se reportera au paragraphe « Moyens d'étude nécessaires » en [Doc. BM 5 145].

Idéalement, le matériel de mesure enregistre le signal vibratoire brut. En fonction des besoins de l'analyse, on définit ensuite des indicateurs calculés à partir de ce signal. L'évolution de ces indicateurs renseigne sur l'usure de la machine.

La mesure et le stockage du signal vibratoire brut ne sont malheureusement pas possibles avec les moyens matériels actuels. Cela oblige le technicien à prévoir, dès la conception de la ronde de surveillance, les différents indicateurs qui vont être nécessaires afin de répondre aux objectifs fixés.

Le soin apporté à la préparation de la ronde et au paramétrage du matériel de mesure conditionne donc, en grande partie, la qualité de l'analyse réalisée par la suite.

### 1.2 Indicateurs de surveillance : détection des défauts

Ce sont des indicateurs (grandes physiques) utilisés régulièrement pour surveiller les installations. Leurs évolutions permettent d'alerter le technicien d'une dégradation du fonctionnement sans pour autant désigner l'élément défectueux.

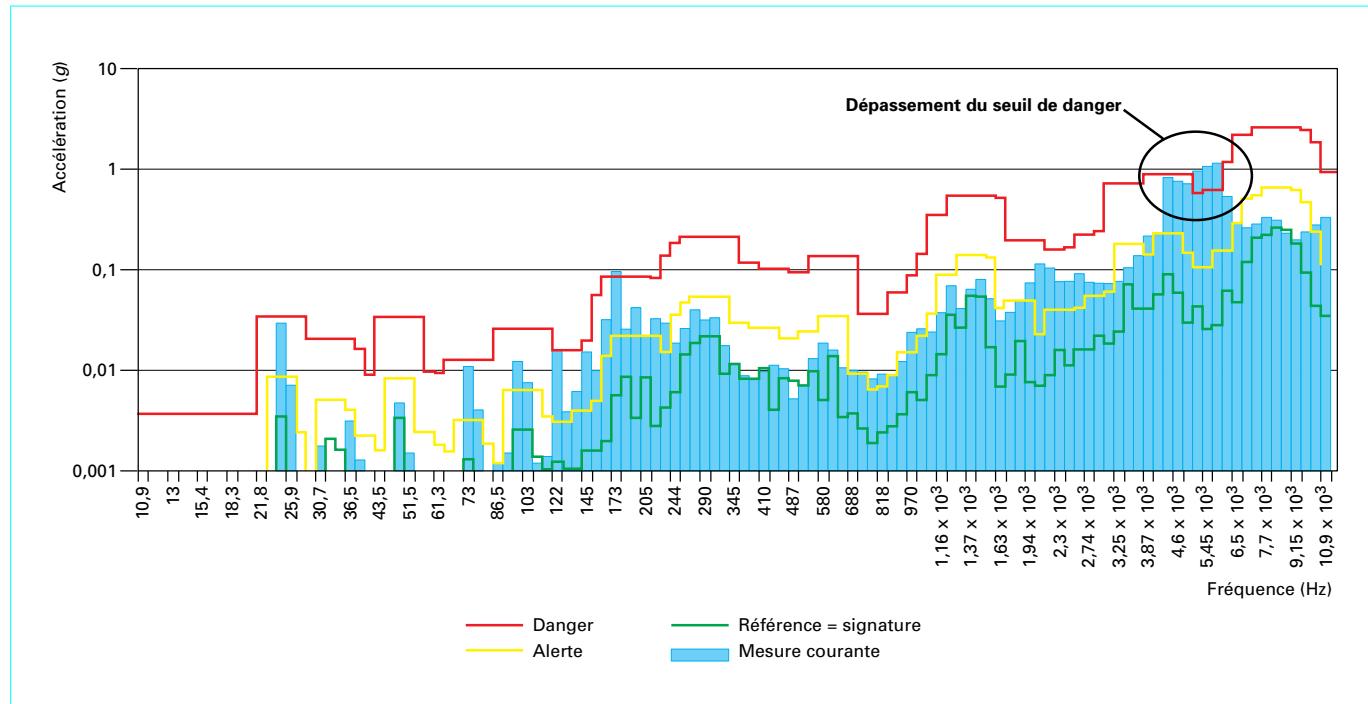
On distingue :

- les indicateurs scalaires ou niveaux globaux (NG) ;
- les indicateurs de forme ou spectres.

Ces indicateurs constituent, lors d'une première campagne de mesures réalisée sur la machine en bon état (ou supposée telle), la signature de la machine. Ils sont présentés en détail dans les paragraphes suivants.

### 1.3 Indicateurs de diagnostic : recherche de la cause des défauts

Ils sont utilisés lorsque l'on détecte une anomalie à l'aide des indicateurs de surveillance. Cette anomalie est souvent une évolution jugée importante par rapport à la signature.



**Figure 1 – Visualisation des mesures de surveillance effectuée par logiciel**

Le diagnostic du défaut détecté demande souvent une précision que ne peuvent donner les indicateurs de surveillance. Le technicien dispose pour cela des outils suivants :

- les indicateurs généraux (spectres) ;
- les indicateurs spécifiques.

Les spectres sont utilisés autant pour la surveillance que pour le diagnostic.

## 1.4 Organisation préconisée

Il est important de bien distinguer l'activité de surveillance de celle de diagnostic.

Les deux ne seront efficaces que si l'on connaît de façon précise la cinématique de la machine surveillée ainsi que son degré d'importance dans le procédé de fabrication.

### Surveillance

On établit une ronde type appelée « itinéraire de surveillance ». Elle contient toutes les informations utiles sur :

- les machines surveillées ;
- les points de mesure pour chaque machine ;
- les types d'indicateurs mesurés en chacun des points (indicateurs de surveillance).

Les deux derniers points ne peuvent être déterminés sans connaître avec précision la cinématique des machines.

Cet itinéraire est effectué avec le matériel adéquat (collecteur + accéléromètre, cf. paragraphe « Moyens d'étude nécessaires » [Doc. BM 5 145]) selon une périodicité déterminée qui dépend :

- du degré d'importance des machines ;
- des objectifs de la surveillance.

Un logiciel permet de visualiser les mesures et d'effectuer les comparaisons avec les valeurs de référence (la signature) qui permettent aussi d'établir (figure 1) :

- un seuil d'alerte au-dessus duquel on considère que l'état de la machine est préoccupant ;
- un seuil de danger au-dessus duquel une panne imminente est probable.

### Diagnostic

En cas d'anomalie (dépassement de seuil ou évolution inquiétante par rapport à la signature), on établit un itinéraire dit « itinéraire de diagnostic ». Cet itinéraire contient toutes les informations utiles sur :

- les machines surveillées à diagnostiquer ;
- les points de mesure concernés par les défauts précédemment détectés ;
- les types d'indicateurs mesurés en chacun des points (indicateurs de diagnostic).

Cet itinéraire est effectué avec le même matériel que celui utilisé pour la surveillance.

Les résultats des mesures sont visualisés sur PC avec le logiciel utilisé pour la surveillance. Ils sont utilisés pour le diagnostic des défauts. Ce diagnostic permet de statuer sur l'état de la machine et de décider ou non une intervention sur celle-ci.

- Des exemples d'itinéraires de surveillance et de diagnostic sont donnés dans le paragraphe 6 « Itinéraires ».
- Un prédiagnostic est souvent possible à partir des indicateurs de surveillance si ceux-ci ont été correctement définis en fonction de la cinématique de la machine.

## 2. Préliminaires à la surveillance

Avant de réaliser les mesures sur les machines, il est indispensable de préparer soigneusement son itinéraire en fonction de ses objectifs. Cela doit aboutir à :

- un choix des machines à surveiller ;
- la connaissance précise de ces machines ;
- un choix du nombre et de l'emplacement des mesures effectuées sur chaque machine.

### 2.1 Classement « VIS » des machines

Afin de ne pas surveiller inutilement des machines qui n'ont pas une importance capitale, les industriels établissent souvent le classement suivant :

- machines **Vitales** : machines non doublées dont la panne entraîne l'arrêt de la production. Les frais et les délais de remise en état sont importants. Les pertes de production sont inacceptables ;
- machines **Importantes** : machines doublées ou non dont la panne entraîne une baisse sensible de la production. Les frais et délais de remise en état sont importants, les pertes de production aussi ;
- machines **Secondaires** : machines doublées ou dont une panne ne remet pas en cause les capacités de production.

Les critères de classement dans l'une ou l'autre de ces catégories peuvent varier d'un site à l'autre.

En fonction de ce classement, d'un indice de vétusté, d'un indice de complexité des machines, on détermine les outils de surveillance à employer, leur paramétrage et la fréquence des campagnes de relevés (cf. exemple dans le tableau 1).

### 2.2 Cinématique

On ne peut surveiller correctement une machine que l'on ne connaît pas. Avant de recueillir quelque signal vibratoire que ce soit, il faut prendre connaissance de la cinématique de l'installation à surveiller (cf. Définition machines en [Doc. BM 5 145]).

Parmi les indications les plus importantes, le technicien doit connaître :

- la vitesse de rotation de chaque ligne d'arbre ;
- le nombre de pales ou d'aubages sur les ventilateurs et les pompes ;
- le nombre de dents des engrenages ;
- le diamètre des poulies et la longueur des courroies ;
- le type des roulements ;
- le nombre de barres de la cage d'écureuil du moteur, etc.

Tous ces renseignements sont indispensables pour déterminer les outils adéquats à une surveillance efficace. Ils permettent de

calculer les fréquences caractéristiques des défauts susceptibles d'apparaître sur les machines. Ces calculs sont détaillés dans le paragraphe suivant.

### 2.3 Points de mesure

L'implantation de l'accéléromètre sur les machines est, elle aussi, très importante. Chaque campagne de mesures doit être effectuée en des points précis et toujours les mêmes. En effet, un phénomène mécanique peut donner des images vibratoires sensiblement différentes en fonction du point de mesure.

On essaiera toujours de rapprocher le plus possible les points de mesure des paliers. Cela permet d'obtenir les images les plus fidèles des défauts mécaniques (bande passante de la chaîne d'acquisition maximale, amortissement minimisé).

Pour avoir une image complète des vibrations (en trois dimensions), il faut prendre les mesures selon trois directions perpendiculaires sur chaque palier de la machine surveillée : deux directions radiales (horizontale et verticale) et une direction axiale.

**Exemple :** pour l'ensemble présenté figure 2 (moteur + pompe) :

- le moteur a deux paliers : M1 et M2 ;
- la pompe a deux paliers : P1 et P2.

Chaque palier est surveillé selon trois directions orthogonales :

- radiale horizontale : M1H M2H P1H P2H
- radiale verticale : M1V M2V P1V P2V
- axiale : M1A M2A P1A P2A

- En pratique on se contentera d'une seule mesure axiale par machine. Celle-ci sera faite de préférence proche du palier servant de butée.

- Les directions horizontale et verticale peuvent, si nécessaire, être remplacées par deux directions obliques à 90°.

Les points M1H et M1V de la figure 2 peuvent ainsi devenir :

M1OG oblique gauche  
M1OD oblique droit

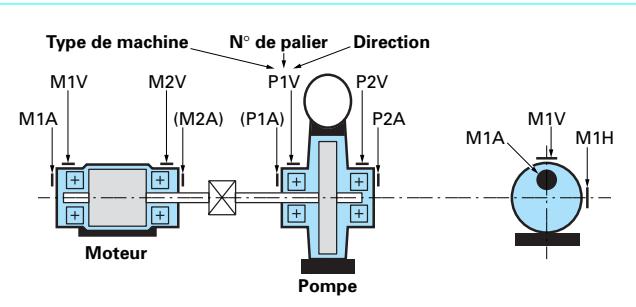


Figure 2 – Points de mesure pour un ensemble moteur + pompe

Tableau 1 – Exemple de surveillance à mettre en œuvre

Complexité de la machine	Machine		
	Vitale	Importante	Secondaire
Complex (Présence de réducteurs)	Surveillance spectrale	Surveillance spectrale	Surveillance par niveaux globaux
Simple (Une seule ligne d'arbre)	Surveillance spectrale	Surveillance par niveaux globaux	Surveillance par niveaux globaux

## 2.4 Aspects pratiques. Pastilles à coller

La reproductibilité des mesures d'une campagne sur l'autre étant un aspect essentiel de la surveillance vibratoire, on s'attachera à la respecter scrupuleusement. Pour cela, il est nécessaire de coller sur les machines des « pastilles filetées » aux emplacements définis ci-dessus (cf. paragraphe « Moyens d'étude nécessaires » en [Doc. BM 5 145]).

Afin de faciliter la mise en œuvre, on préférera employer de la colle à prise rapide. Elle devra offrir de bonnes caractéristiques mécaniques (dureté maximale) afin de ne pas trop altérer la bande passante de la chaîne d'acquisition.

Lors des relevés successifs, l'opérateur viendra visser l'accéléromètre sur ces pastilles. L'emplacement des mesures sera donc toujours le même : d'où une reproductibilité garantie.

## 3. Outils de surveillance

La compréhension des trois paragraphes suivants « Outils de surveillance », « Outils du diagnostic » et « Principaux défauts » nécessite de la part du lecteur quelques connaissances de base en mathématiques et théorie du signal. De brefs rappels exposant le minimum requis sont donc inclus en [Doc. BM 5 145].

### 3.1 Niveaux globaux (NG)

La surveillance par niveaux globaux offre des possibilités d'investigations limitées. Les niveaux globaux sont des indicateurs scalaires plus ou moins sensibles à un nombre important de phénomènes. Sur une machine dont le niveau vibratoire normal est relativement haut, 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.

#### Indicateurs basses fréquences (signal de grande énergie)

- Déplacement crête-crête entre 10 et 1 000 Hz :

$$D_{cc} [10-1000 \text{ Hz}] (\text{en } \mu\text{m})$$

C'est l'indicateur préconisé par l'API (American Petroleum Institute).

Il est utilisé par tout industriel intervenant dans la pétrochimie et est sensible aux phénomènes dits « basses fréquences ».

Le niveau acceptable maximal est donné, quelle que soit la machine, par la formule suivante :

$$D_{cc_{max}} = 25,4 \sqrt{\frac{12\,000}{N}}$$

avec  $N$  vitesse de rotation (tr/min),  
 $D_{cc}$  déplacement crête-crête ( $\mu\text{m}$ ).

- Vitesse efficace entre 10 et 1 000 Hz :

$$V_{eff} [10-1000 \text{ Hz}] (\text{en mm/s})$$

Cet indicateur est, lui aussi, révélateur des phénomènes dits « basses fréquences » (BF). Ces phénomènes sont les plus énergétiques, donc les plus destructeurs. Ils peuvent aussi être à l'origine de desserrages ou de fissures.

Une augmentation du balourd, un défaut de lignage, se traduiraient par une augmentation anormale de cet indicateur qui est pris comme référence dans la norme ISO 10816 (cf. [Doc. BM 5 145]).

#### Indicateur hautes fréquences (signal de faible énergie)

- Accélération efficace entre 1 et 10 kHz :

$$Acc_{eff} [1\,000-10\,000 \text{ Hz}] (\text{en } g \text{ ou } mg)$$

C'est un indicateur révélateur des phénomènes dits « hautes fréquences » (HF) tels que les défauts de roulement, de denture...

Une élévation anormale de l'accélération sera en général, sur une machine simple, révélatrice d'une dégradation avancée des roulements.

$g$  accélération due à la pesanteur ( $9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ) pris comme unité d'accélération avec son sous-multiple  $mg$  ( $10^{-3} g$ ).

#### Indicateurs spécifiques aux roulements (cf. Niveaux globaux spécifiques aux roulements en [Doc. BM 5 145])

- Facteur de crête entre 1 et 10 kHz :

$$FC [1\,000-10\,000 \text{ Hz}] (\text{sans unité})$$

$$FC = \frac{Acc_{crête}}{Acc_{eff}}$$

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, figure 3). Seule son évolution est significative. C'est, en revanche, un indicateur stable.

- Facteur K entre 1 et 10 kHz :

$$K [1\,000-10\,000 \text{ Hz}] (\text{en } g^2 \text{ ou } mg^2)$$

$$K = Acc_{crête} \cdot Acc_{eff}$$

Le facteur  $K$  est plus sûr pour effectuer une analyse ponctuelle (analyse « spot ») des roulements. Sa valeur est directement liée à l'état du ou des roulements (figure 4).

Du fait de son mode de calcul ( $g^2$ ) et contrairement au facteur de crête, le facteur  $K$  est un indicateur instable.

Nota :  $1 g^2 = 100 (\text{m} \cdot \text{s}^{-2})^2$

Les valeurs indiquées sur le graphe de la figure 4 ne sont que des ordres de grandeur pouvant varier dans des proportions non négligeables en fonction de la machine surveillée.

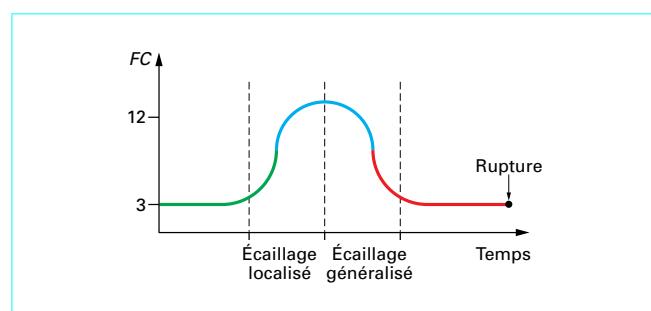


Figure 3 – Évolution du facteur de crête FC en fonction du temps

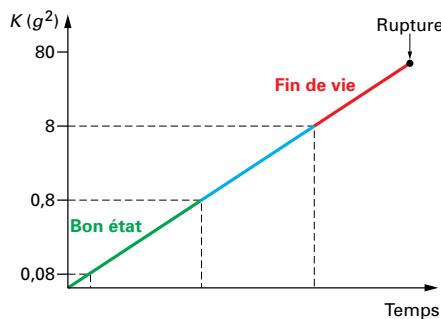


Figure 4 – Variation du facteur  $K$  en fonction du temps

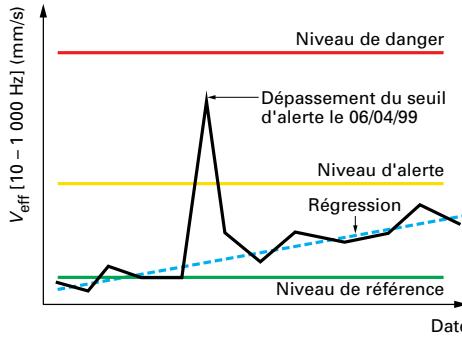


Figure 5 – Exemple d'utilisation d'un niveau global

#### ■ Exemple de l'utilisation d'un niveau global

On considère ici l'indicateur vitesse efficace  $V_{\text{eff}}[10-1000 \text{ Hz}]$  (figure 5).

Le dépassement repéré peut avoir plusieurs origines :

- balourd mécanique ou thermique ;
- desserrage de la machine ;
- délinéage ;
- frottement important, etc.

Le niveau global utilisé fait apparaître un problème. On se doute de sa gravité mais on n'en connaît pas l'origine. Dans le cas présenté, il s'agit d'un important délinéage. Une telle évolution peut cependant être due à l'apparition d'un balourd. Pour trancher, il est nécessaire de réaliser un diagnostic précis. Dans ce cas, il fera appel à une analyse effectuée sur un spectre RC (ou FFT) (cf. § 4) de moyennes fréquences (MF).

#### ■ Appréciation de la gravité d'une valeur de niveau global

- Pour  $D_{\text{cc}}[10-1000 \text{ Hz}]$ , se reporter aux recommandations de l'API.
- Pour les indicateurs  $V_{\text{eff}}[10-1000 \text{ Hz}]$  et  $Acc_{\text{eff}}[1-10 \text{ kHz}]$ , se reporter à la norme ISO 10816 et au paragraphe « Appréciation de la sévérité » en [Doc. BM 5 145].
  - Facteur de crête : il faut analyser l'évolution.
  - Si  $FC$  augmente  $\Rightarrow$  la situation n'est pas alarmante.
  - Si  $FC$  diminue  $\Rightarrow$  le roulement est en fin de vie.

- Facteur  $K$  : (échelle sujette à modifications suivant les machines).
  - Si  $K < 0,8 \text{ g}^2 \Rightarrow$  roulement en bon état.
  - Si  $K > 8 \text{ g}^2 \Rightarrow$  roulement dégradé.

Ces valeurs ne sont que des ordres de grandeur. L'expérience personnelle de l'analyste permet d'affiner le jugement.

## 3.2 Spectre PBC (pourcentage de bande constante)

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. Elle constitue un bon critère. Par contre, contrairement à la surveillance par spectres RC (résolution constante), elle ne donne que rarement des informations précises sur l'origine des évolutions.

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 normalement égal à 6, 23 ou 70 %. On représente le PBC sur des échelles logarithmiques en abscisses et ordonnées (figure 6).

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 (voir paragraphe 4).

Dans les hautes fréquences (HF), la résolution est faible mais suffisante pour détecter les défauts de roulements, l'usure des dentures d'engrenage, les problèmes de lubrification...

#### ■ Largeur de bande

Une largeur de bande relative de 6 % apporte une solution optimale à tous les problèmes courants sur les machines simples.

Sur la figure 6, par exemple :

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

#### ■ Niveaux de référence, alerte et danger

● Le **niveau de référence** (vert) représente la signature de la machine. Cette signature est établie lors des premières campagnes de mesures.

● Le **niveau d'alerte** (jaune) est déduit du niveau de référence de la façon suivante :

$$\text{Alerte} = \text{Référence} + X \text{dB}$$

● Le **niveau de danger** (rouge) est déduit du niveau de référence de la façon suivante :

$$\text{Danger} = \text{Référence} + Y \text{dB}$$

- $X$  et  $Y$  sont définis soit par le logiciel utilisé (il existe des « standards » tels que  $X = 6 \text{ dB}$  et  $Y = 20 \text{ dB}$ ), soit par l'analyste si celui-ci a suffisamment d'expérience.

Étant 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. En effet, il est d'usage de réserver, les grandeurs « vitesse » et « déplacement » à des indicateurs de basses fréquences (de 0 à 1 000 Hz).

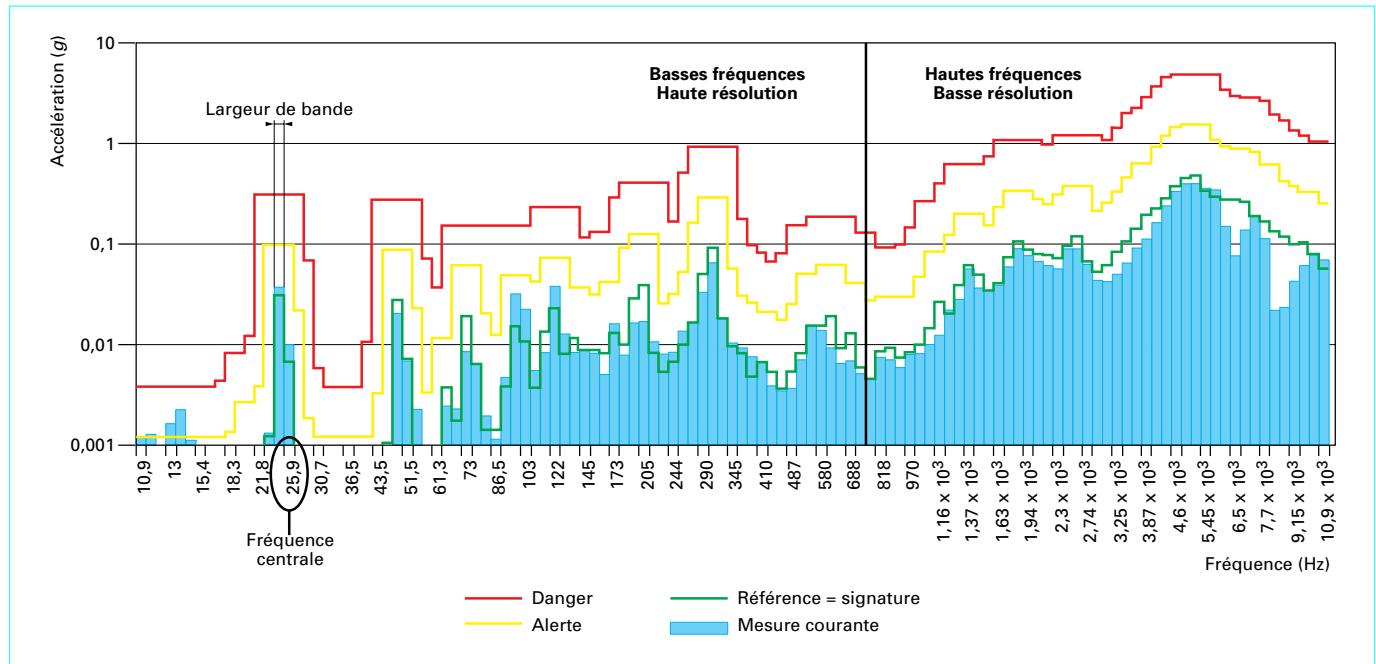


Figure 6 – Exemple de spectre PBC

### 3.3 Synthèse

On trouvera tableau 2 un récapitulatif des différents indicateurs de surveillance précédemment détaillés.

Tableau 2 – Indicateurs de surveillance		
Indicateur	Phénomènes surveillés	Observations
$D_{CC}$ [10-1 000 Hz]	Basses fréquences	Pétrochimie, API
$V_{eff}$ [10-1 000 Hz]	Basses fréquences	Norme ISO 10816
$Acc_{eff}$ [1 000-10 000 Hz]	Hautes fréquences	Indicateur général
$FC$ [1 000-10 000 Hz]	Roulements	Stabilité, analyse « spot » impossible
$K$ [1 000-10 000 Hz]	Roulements	Instabilité, analyse « spot »
$PBC$ [10-10 000 Hz]	Tout phénomène	Bon compromis entre simplicité et exhaustivité de l'information

## 4. Outils de diagnostic

### 4.1 Spectre RC (résolution constante) ou FFT (fast Fourier transform) et le zoom

C'est une représentation de l'amplitude vibratoire en accélération sur un axe linéaire des fréquences. Avec la technologie actuelle, sa résolution est généralement de 400 lignes. Le spectre

obtenu sera donc une courbe passant par 400 points régulièrement espacés en fréquence.

La bande de fréquences 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 zoom haute résolution [ $f_1-f_2$ ],  $f_1$  et  $f_2$  définissant la gamme de fréquences analysée.

#### ■ Définition de l'image

Le pas s'exprime par :

$$\text{Pas} = \Delta f / 400$$

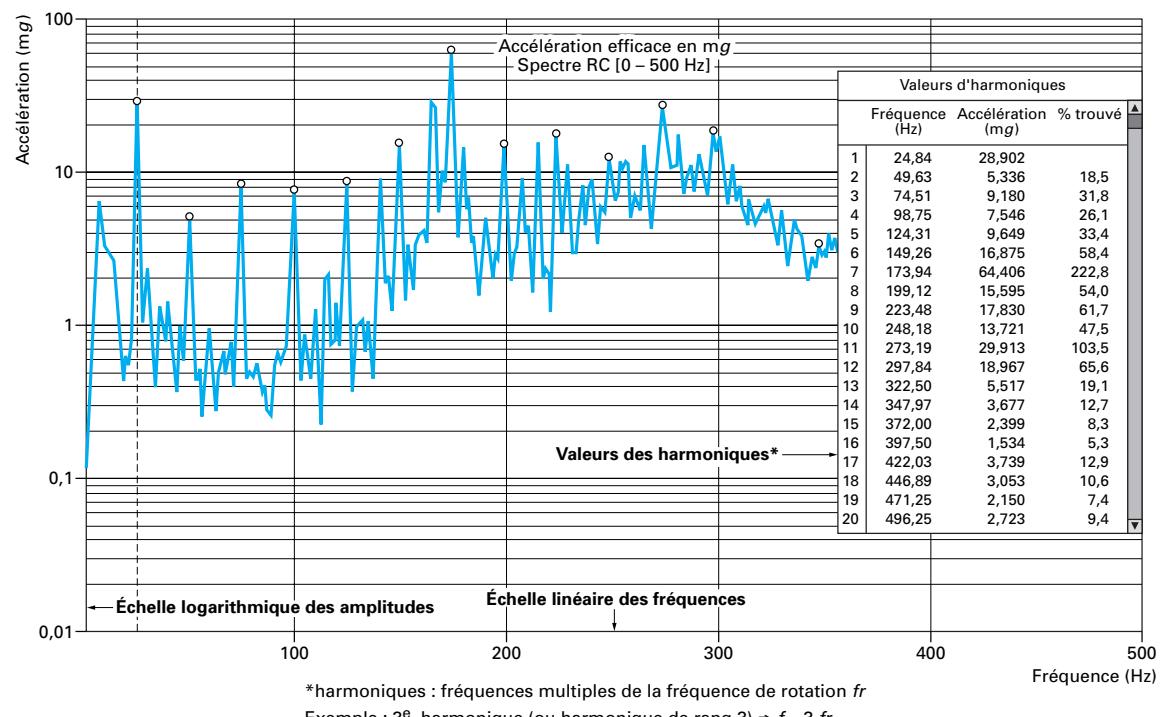
La définition de l'image sera d'autant meilleure que la bande de fréquences analysée sera étroite :

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

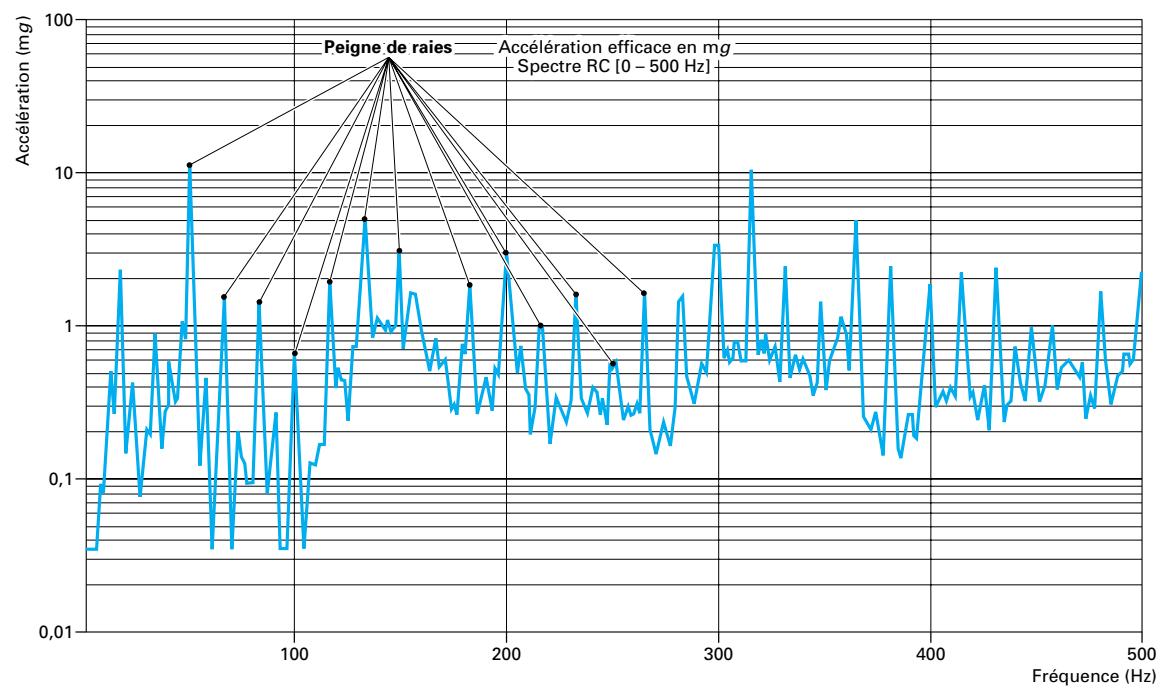
■ Par conséquent, un **spectre HF sera un outil de surveillance** sur lequel on pourra suivre l'évolution du niveau vibratoire de la machine. Si un phénomène anormal apparaît, on peut distinguer s'il s'agit d'un problème de roulement (hautes fréquences), d'engrenement (fréquences caractéristiques prédéfinies)... 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 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 **spectre BF** est un outil très puissant pour le diagnostic courant des défauts de grande énergie (basses fréquences) tels que le balourd, le défaut d'alignement, les jeux excessifs...



(a) exemple 1



Ce spectre présente les images caractéristiques de défauts tels que jeux importants ou fissuration (cf. paragraphe 5)

(b) exemple 2

Figure 7 – Exemples de spectres RC [0-500 Hz]

Si les fréquences surveillées ne dépassent pas 500 Hz, on pourra, bien que cela ne soit pas conseillé, utiliser la vitesse pour unité d'amplitude du phénomène.

• Le **zoom** permet, quant à lui, de repérer les défauts de niveau d'énergie beaucoup plus faible comme les défauts de denture d'engrenages (moyennes et hautes fréquences).

Le tableau 3 donne quelques exemples de défauts courants visibles sur le spectre RC.

Les fréquences surveillées étant élevées, on utilisera systématiquement les représentations en accélération avec de tels outils.

**Tableau 3 – Défauts et fréquences caractéristiques**

Défauts (liste non exhaustive)	Fréquences caractéristiques (1)
Balourd mécanique ou thermique	$fr$
Désalignement	$2fr, 3fr$ et/ou $4fr$
Frottement, jeux, fissurations...	Peignes de raies d'un pas de $(1/2)fr$ et $fr$
Engrènement ( $z$ dents)	$z \cdot fr$ modulé par $fr$
Passages d'aubes ( $n$ aubes)	$n \cdot fr$

(1)  $fr = N/60$  fréquence de rotation (Hz),  
 $N$  vitesse de rotation (tr/min).

#### ■ Représentation type

La figure 7 (p. 9) donne deux exemples de spectres RC.

Le spectre RC (ou le spectre FFT) est très sensible aux variations de vitesse de rotation qui peuvent survenir entre deux campagnes de mesures. De ce fait, l'utilisation des niveaux d'alerte et de danger requiert une grande habileté afin de ne pas déclencher des alarmes intempestives.

#### Exemple : moteur actionnant une pompe.

■ Le 10 avril, ce moteur tourne à 1 492 tr/min soit  $1492/60 \approx 24,87$  Hz (figure 8a).

Le passage d'aubes sur cette pompe est visible à 7 fois la fréquence de rotation (cf. § 5) soit, ce jour-là :  $7 \times 24,87 = 174,07$  Hz.

Sur le spectre MF représentatif de la signature de la machine on distingue donc, entre autres, deux pics : l'un à 24,87 Hz et l'autre à 174,07 Hz.

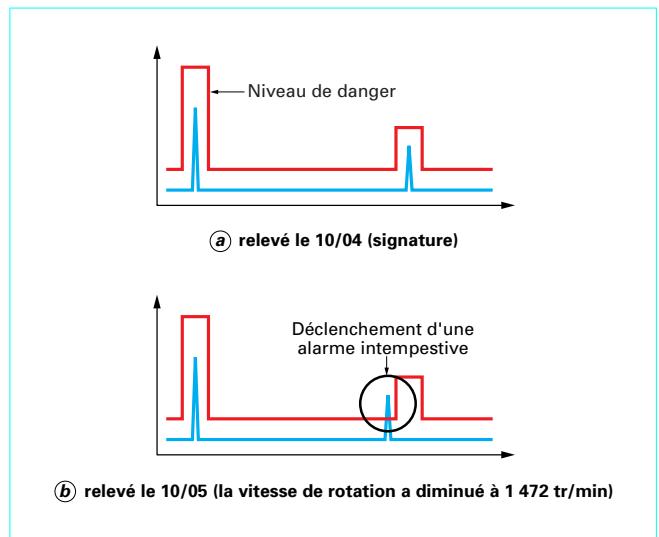
Si on cale des alarmes sans trop de précautions, il peut se produire un déclenchement intempestif comme sur la figure 8b.

■ Le 10 mai, une augmentation maîtrisée de pression et de viscosité du fluide véhiculé par la pompe entraîne une diminution de la vitesse de rotation : le moteur ne tourne qu'à 1 472 tr/min soit  $1472/60 \approx 24,53$  Hz.

Ce jour-là, le passage d'aubes se manifeste à  $7 \times 24,53 = 171,73$  Hz.

L'alarme (figure 8b) n'est pas due, comme on le souhaiterait, à une augmentation de l'amplitude vibratoire pouvant témoigner, dans ce cas précis, d'un encrassement de l'impulseur de pompe. C'est la baisse de régime qui, bien que parfaitement maîtrisée, déclenche une alarme qui ne devrait pas être.

Par sa nature (pourcentage de bande constant, échelle logarithmique), le PBC est beaucoup moins sensible aux variations de vitesse de fonctionnement. Il se prête, par conséquent, mieux à l'utilisation des niveaux d'alerte et de danger.



**Figure 8 – Déclenchement d'alarme intempestive sur un spectre RC**

## 4.2 Cepstre

C'est la représentation de la transformée de Fourier du spectre ; soit deux fois la transformée de Fourier du signal temporel de base. L'image obtenue est une courbe fonction du temps (fréquence) mesuré en secondes.

Le **cepstre** est au spectre ce que le spectre est à la représentation temporelle du signal. Un phénomène périodique dans le temps n'est représenté que par un seul pic sur un spectre (figure 9a). De la même façon, un phénomène représenté par un spectre périodique (modulation) ne donne qu'un seul pic sur un cepstre (cf. figure 9b).

C'est un outil de diagnostic utilisé pour distinguer des défauts qui donnent des images spectrales complexes dues à plusieurs modulations d'amplitude concomitantes. Les engrenages peuvent nécessiter ce type d'analyse. En effet, la fréquence d'engrenement est souvent modulée par les fréquences de rotation des roues menante et menée (cf. paragraphe 5).

Le cepstre permet de séparer et d'identifier sur une seule image toutes les fréquences de modulation (fréquences de rotation des arbres d'entrée, intermédiaire et de sortie dans un réducteur).

#### Exemple : engrenage (figure 10).

L'engrenage surveillé présente certainement un défaut de faux rond sur le pignon ou la roue tournant à 0,33 Hz soit  $0,33 \times 60 = 19,8$  tr/min. Il s'agit certainement d'un étage supérieur du réducteur surveillé (cf. § 5).

## 4.3 Analyse d'enveloppe

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 qui répond généralement entre 1 et 10 kHz.

Un spectre enveloppe (SE) doit se paramétrier 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

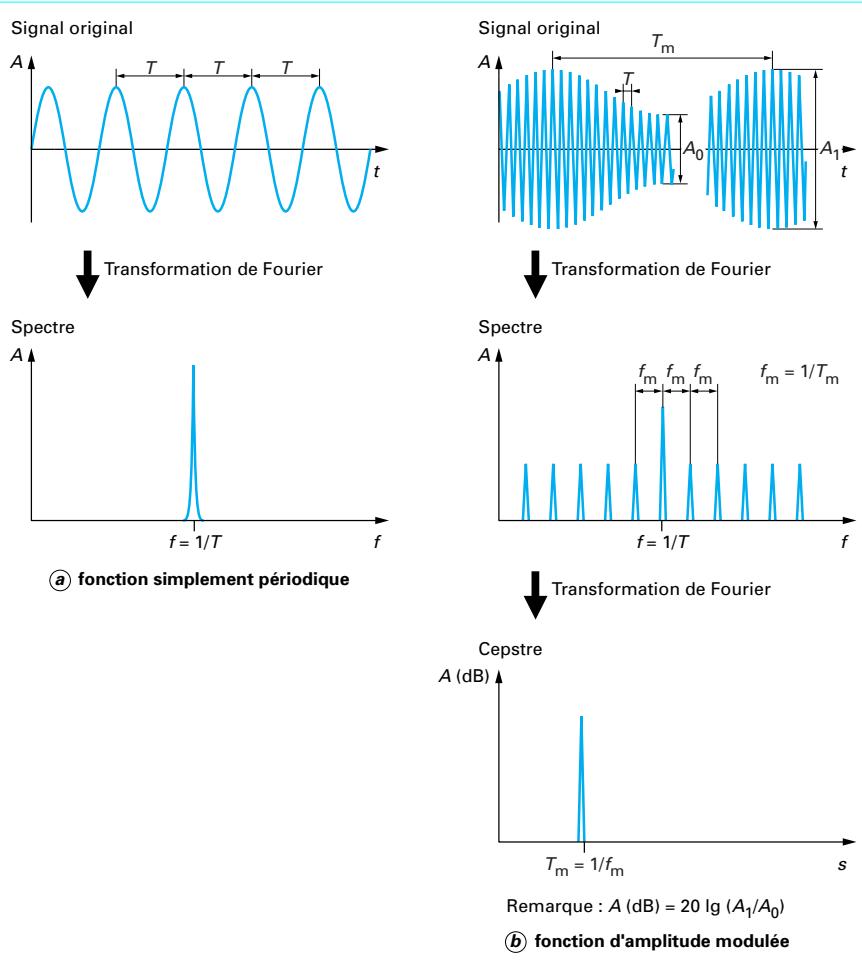


Figure 9 – Cepstre

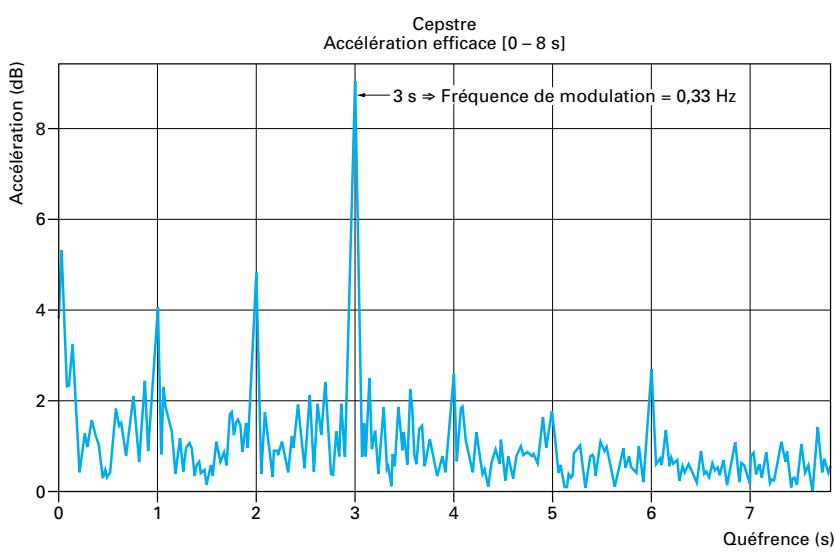


Figure 10 – Utilisation d'un cepstre pour la surveillance d'un engrenage

comprise entre 1 et 10 kHz. C'est la gamme dont les valeurs croissent en forme de « cloche » ou de « bosses de chameau » sur un spectre PBC ou RC HF ;

— 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) ;
- une bille ou un rouleau.

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 (cf. [Doc. BM 5 145]).

**Exemple** : un modèle d'utilisation d'un spectre enveloppe est montré sur la figure 11.

Ce roulement a un début d'écaillage sur la piste interne.

## 4.4 Synthèse

On trouvera tableau 4 un récapitulatif des différents outils de diagnostic précédemment détaillés.

Tableau 4 – Outils de diagnostic		
Outil	Phénomènes surveillés	Observations
Spectre RC (ou FFT)	Indicateur général	Nombreuses applications en fonction de la bande de fréquences choisie
Zoom	Indicateur général	Haute résolution possible, précision du diagnostic
Cepstre	Engrangements	Précision du diagnostic
Spectre enveloppe	Roulements	Précision du diagnostic mais paramétrage délicat (deux gammes de fréquences)

## 5. Principaux défauts

Le présent paragraphe donne un aperçu des principaux défauts et de leur manifestation vibratoire que l'on peut rencontrer sur les machines tournantes classiques.

### 5.1 Balourd (ou défaut d'équilibrage)

#### Manifestations :

- augmentation du niveau global choisi en basses fréquences :
  - soit  $D_{cc}[10-1\,000 \text{ Hz}]$ ,
  - soit  $V_{eff}[10-1\,000 \text{ Hz}]$  ;
- nette augmentation de l'amplitude de la fréquence fondamentale (fréquence de rotation,  $fr$ ) :

$$fr = N/60$$

avec  $N$  vitesse de rotation (tr/min).

**Exemple** : mise en évidence d'un défaut de balourd (figure 12).

Spectre bleu (machine en bon état de fonctionnement) : amplitude de la fréquence fondamentale 1,323 mg pour 16,25 Hz ;

Spectre rouge (machine en fonctionnement dégradé : défaut d'équilibrage) : amplitude de la fréquence fondamentale 14,199 mg pour 16,25 Hz.

Ce défaut n'est pas directionnel : on recueille la même image dans toutes les directions radiales (verticale, horizontale ou oblique).

#### Origine

Elle peut être :

- mécanique : dégradation des pales ou aubages (dépôts d'impuretés...);
- thermique : modification de la géométrie des parties tournantes en fonction de la température.

Dans la plupart des cas, on peut y remédier par un nettoyage ou, si nécessaire, un équilibrage.

### 5.2 Délinage (ou mauvais alignement)

L'arbre moteur et l'arbre récepteur ne sont pas parfaitement alignés.

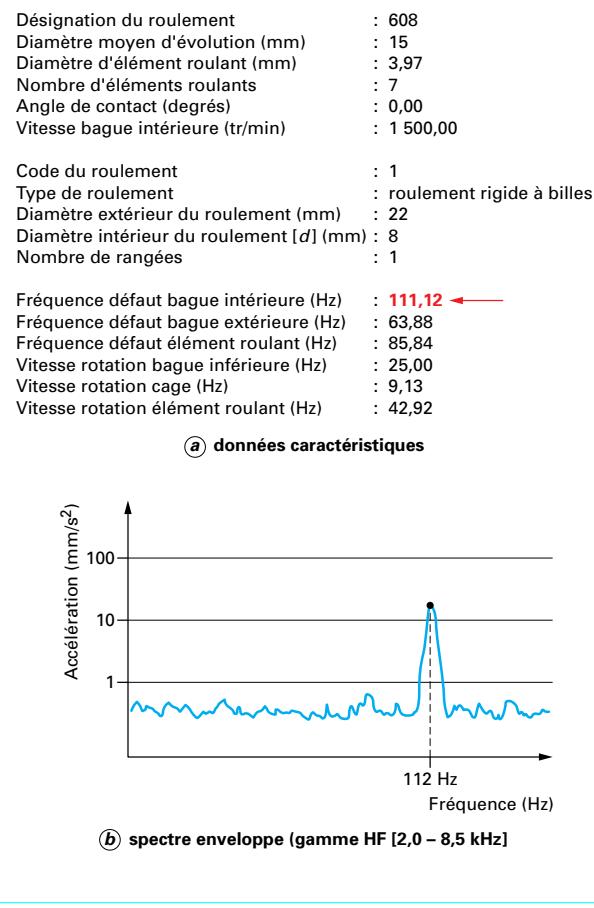
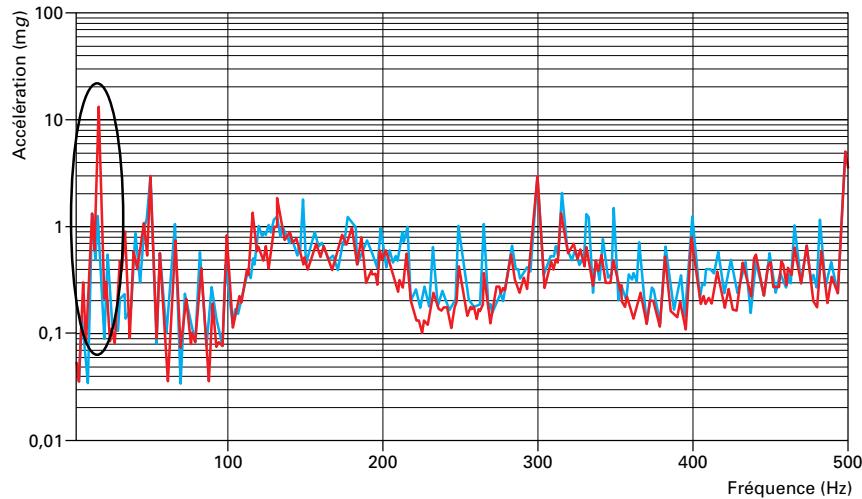
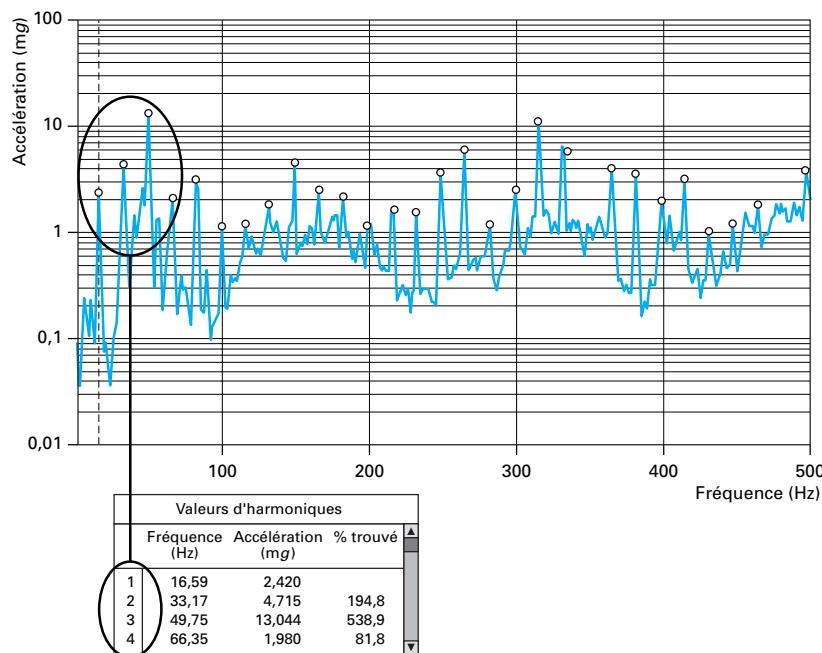


Figure 11 – Modèle d'utilisation d'un spectre enveloppe



**Figure 12 – Mise en évidence d'un défaut de balourd**



**Figure 13 – Mise en évidence d'un défaut de délinage**

#### Manifestations :

- augmentation du niveau global choisi en basses fréquences :
  - soit  $D_{cc}[10-1\ 000 \text{ Hz}]$ ,
  - soit  $V_{eff}[10-1\ 000 \text{ Hz}]$  ;
- augmentation des proches harmoniques de  $fr$ . Le plus souvent l'harmonique de rang 2 tend à s'élever au-delà de la fréquence fondamentale. Parfois le phénomène se transmet aux 3<sup>e</sup> et 4<sup>e</sup> harmoniques.

■ **Exemple :** mise en évidence d'un défaut de délinage (figure 13).

Ce défaut est directionnel : *a priori*, on ne recueille pas le même signal sur les différentes directions radiales. Contrairement au balourd, ce défaut est souvent visible sur une direction axiale.

#### Origine

Elle peut être :

- mécanique : desserrage des pieds de fixation d'une des machines ;
- thermique : excroissance thermique des pieds en fonctionnement.

Dans la plupart des cas, on peut y remédier facilement par un lignage. Ce genre de prestation est maintenant réalisé à l'aide de matériels utilisant la technologie du laser. Pour la plupart des applications, un lignage effectué par du personnel qualifié et expérimenté n'immobilise la machine que quelques heures.

### 5.3 Frottement, desserrage, fissuration et jeux

#### Manifestations

Ce défaut peut présenter plusieurs images caractéristiques. Il fait ressortir la fréquence fondamentale  $fr$  et ses harmoniques. Contrairement au défaut d'alignement, les harmoniques peuvent ressortir sur une gamme très étendue de fréquences et pas seulement jusqu'au 4<sup>e</sup> ordre. Il peut aussi parfois faire apparaître la fréquence 1/2  $fr$  et ses harmoniques à un niveau toutefois moindre que les harmoniques de la fréquence fondamentale.

**Exemple :** mise en évidence d'un défaut de jeu ou de fissuration (cf. figure 7b).

Ce genre de défaut est, en général, directionnel (desserrage selon un axe, fissuration beaucoup plus apparente dans la direction de la charge que dans les autres directions...).

#### Origines

Elles peuvent être très diverses ainsi que les remèdes ; s'il s'agit d'un défaut de serrage, il est très facile d'y remédier. Une fissure sur un arbre de turbine demandera une intervention beaucoup plus lourde.

### 5.4 Défauts de courroies

#### Manifestation :

- pour une mesure effectuée sur le palier de la roue 1 (figure 14) : pics visibles à  $f_{c1}$  et  $2 f_{c1}$  sur un spectre RC ;
- pour une mesure effectuée sur le palier de la roue 2 (figure 14) : pics visibles à  $f_{c2}$  et  $2 f_{c2}$  sur un spectre RC.

**Exemple :** fréquences caractéristiques d'un défaut de courroie (figure 14).

Ce défaut est directionnel. Sa direction privilégiée est celle de la tension des courroies. Ainsi, sur la figure 14, le signal correspondant au défaut de courroies, s'il existe, sera plus fort dans la direction horizontale que dans la direction verticale. Inversement, pour une surveillance effectuée selon deux directions obliques, il y a de fortes chances pour que les signaux enregistrés soient équivalents.

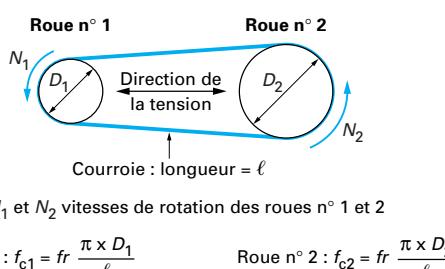


Figure 14 – Fréquences caractéristiques d'un défaut de courroie

#### Origine

Ce peut être la conséquence d'une mauvaise pose, d'une usure... En changeant la courroie, vérifier s'il n'y a pas de défaut d'alignement entre les deux poulies.

La gravité d'un défaut constaté sur le spectre est toujours délicate à apprécier. On ne saura être affirmatif que lorsque l'on aura acquis une certaine expérience sur la machine surveillée. Il existe néanmoins, pour les débutants, des repères assez fiables exposés dans le paragraphe « Appréciation de la sévérité », en [Doc. BM 5 145].

### 5.5 Défauts de denture d'engrenages

Un arbre tournant à une fréquence  $fr$  sur lequel est monté un pignon ou une roue comptant  $z$  dents sera soumis à  $z$  chocs par tour. La fréquence caractéristique de l'engrènement sera donc :

$$fe = z \cdot fr$$

#### Origine et manifestation

Si cet arbre ou le pignon présente un défaut d'excentricité, ou si une dent du pignon présente un défaut localisé, il va apparaître une modulation d'amplitude du signal par la fréquence de rotation  $fr$ . Cela se traduira, sur le spectre, par un peigne de raies centré sur la fréquence d'engrènement  $fe$  et de pas  $fr$ . Ce peigne n'est visible que sur un zoom centré lui aussi sur la fréquence d'engrènement  $fe$  (figure 15).

Si une même machine est le siège de plusieurs engrènements, les images caractéristiques de chacun peuvent se superposer de manière à ne plus être reconnaissables. Le seul outil permettant de dissocier les différents phénomènes est le cepstre. Il fait apparaître un pic caractéristique pour chaque fréquence de modulation. Cela permet de séparer les phénomènes de chaque ligne d'arbre (cf. figure 10).

**Exemple :** mise en évidence de défaut de denture d'engrenage (figure 15).

L'amplitude de la fréquence d'engrènement peut être modulée par les deux fréquences de rotation des deux arbres (le menant et le mené). Si ces deux fréquences de modulation ne sont pas proches, il peut être nécessaire de prévoir le relevé de deux zooms centrés sur  $fe$  mais de largeur de bande différente. Chaque bande doit, en effet, être adaptée à la fréquence de modulation à surveiller : étendue suffisante tout en gardant une résolution (un pas) adapté.

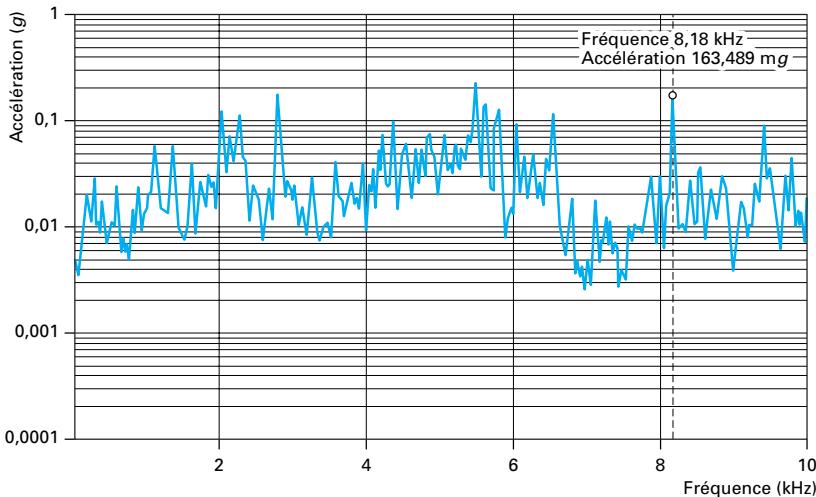
#### Gravité des défauts

La difficulté, concernant les engrenages, est de juger de la gravité des défauts. En effet, même sur une machine en bon état, on obtient ces images. Seule l'augmentation des amplitudes des raies décrites ci-dessus permet de diagnostiquer une dégradation de l'engrènement.

On peut néanmoins retenir deux règles toujours vérifiées :

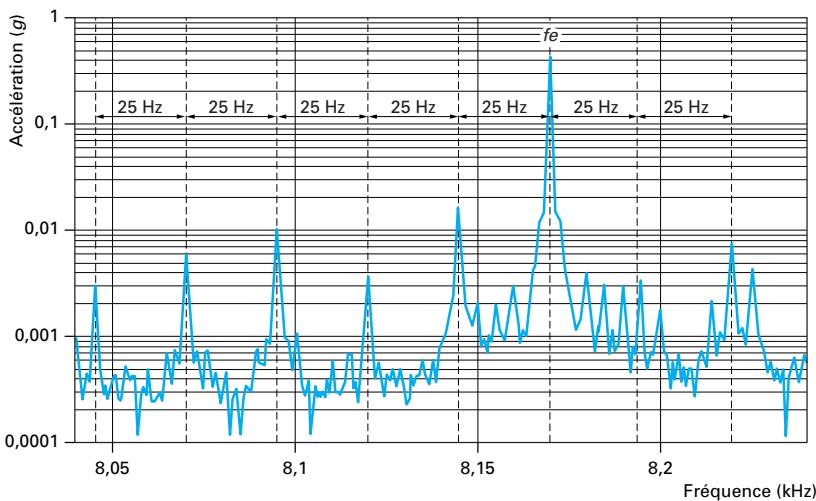
- si les amplitudes du peigne de raies ne dépassent pas celle de la fréquence centrale ( $fe$ ), l'engrènement peut être considéré comme en bon état ;

— un zoom présentant une image dissymétrique des modulations autour de la fréquence centrale est caractéristique d'un engrènement dégradé.



On y distingue nettement la fréquence d'engrenement préalablement calculée :  $f_e = 8\,175\text{ Hz}$

(a) spectre RC HF :  $\text{Acc}_{\text{eff}}$  [0 – 10 000 Hz]



Le peigne de raies apparaît. Son pas est de 25 Hz, soit la fréquence de rotation de l'arbre primaire

(b) zoom RC :  $\text{Acc}_{\text{eff}}$  [8 040 – 8 240 Hz]

Figure 15 – Mise en évidence d'un défaut de denture d'engrenage

## 5.6 Passages d'aubes

### Manifestation :

Le passage des aubes devant le bec de la volute d'une pompe provoque un pic à la fréquence  $f_{\text{aubes}}$  :

$$f_{\text{aubes}} = n \cdot f_r$$

Ce défaut n'est pas directionnel, il se repère aussi bien en radial qu'en axial.

### Origine

Elle peut être :

- mécanique : mauvais calage axial de l'impulseur ou jeu de bec de volute insuffisant ;
- hydraulique : débit trop bas ;
- encrassement des aubes qui peut aussi provoquer du balourd.

Si la machine est en bon état, cette fréquence ne se distingue en général pas des autres sur un spectre RC. Toutefois, afin de statuer de façon certaine sur un tel phénomène, on doit disposer d'un élément de comparaison fiable : la signature de la machine.

On peut aussi, lorsque l'on manque d'expérience ou de données sur la machine, se reporter aux abaques données dans le paragraphe « Appréciation de la sévérité » en [Doc. BM 5 145].

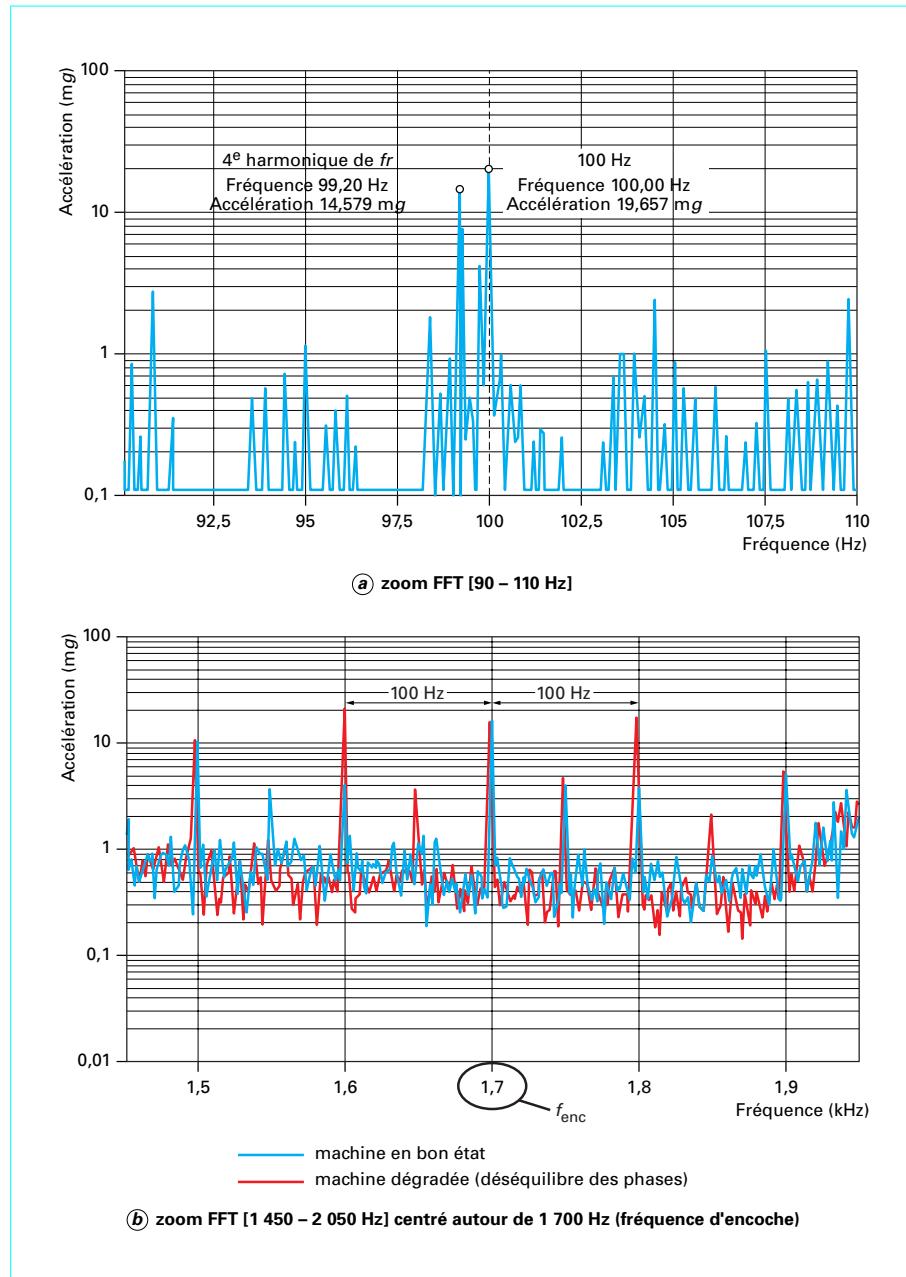


Figure 16 – Mise en évidence de défauts électriques

## 5.7 Cavitation

Le phénomène de cavitation se traduit, au niveau vibratoire, par une augmentation générale du bruit de fond. Il n'y a pas de raie caractéristique. Toutes les fréquences sont excitées de façon aléatoire.

Si la fréquence d'aubage ressort, ce n'est pas parce que la roue cavite mais plutôt parce que les aubes sont mal calées par rapport au corps de pompe, ou qu'alors le jeu de bec de volute est insuffisant.

## 5.8 Défauts électriques

### Manifestations

Plusieurs types d'images caractéristiques peuvent témoigner d'un défaut d'ordre électromagnétique dans un moteur :

- un pic important à deux fois la fréquence du courant d'alimentation (100 Hz). Afin de bien l'identifier il est parfois nécessaire de faire un zoom sur cette fréquence pour la différencier du 2<sup>e</sup> ou 4<sup>e</sup> harmonique de la fréquence fondamentale (en général proche de 50 ou 25 Hz) (figure 16a) ;

— une modulation de la fréquence de rotation ( $fr$ ) par  $2Pfg$ ,  
 $P$  et  $fg$  étant respectivement le nombre de paire(s) de pôles et la fréquence de glissement ( $fg$ ) du moteur (cf. tableau 5) :

$$fg = \frac{N_{\text{champ}} - N}{60}$$

avec  $N_{\text{champ}}$  vitesse du champ tournant du moteur,  
 $N$  vitesse de rotation réelle de son arbre ;

— un pic à la fréquence d'encoche ( $f_{\text{enc}}$ ) (figure 16b) éventuellement modulée par 2 fois la fréquence du courant d'alimentation (100 Hz) :

$$f_{\text{enc}} = n_{\text{enc}} \times fr$$

avec  $n_{\text{enc}}$  nombre d'encoches du moteur surveillé.

**Tableau 5 – Nombre de paire(s) de pôles (moteurs asynchrones)**

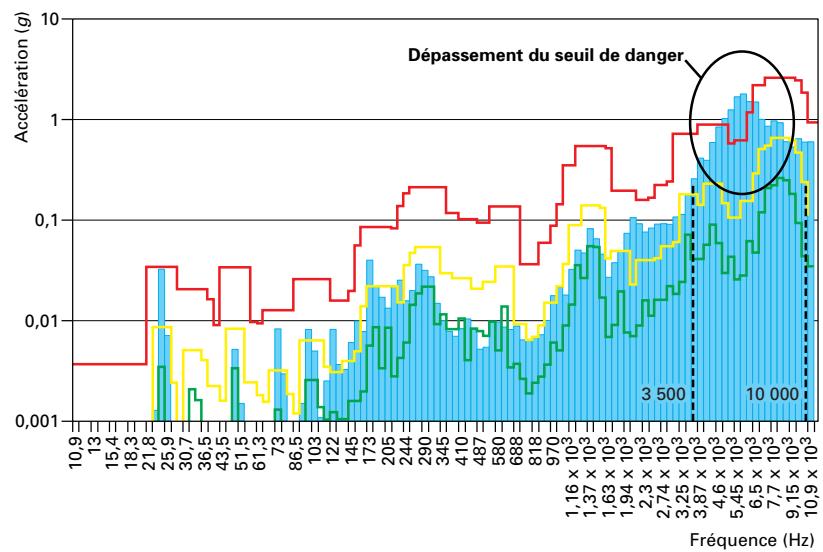
$N_{\text{champ}}$	500	750	1 000	1 500	3 000
$P$	6	4	3	2	1

L'analyse de tels spectres (modulation de  $fr$  par  $2Pfg$ , modulation de  $f_{\text{enc}}$  par 100 Hz) est en tous points comparable à l'analyse d'un défaut d'engrenement à l'aide d'un zoom approprié.

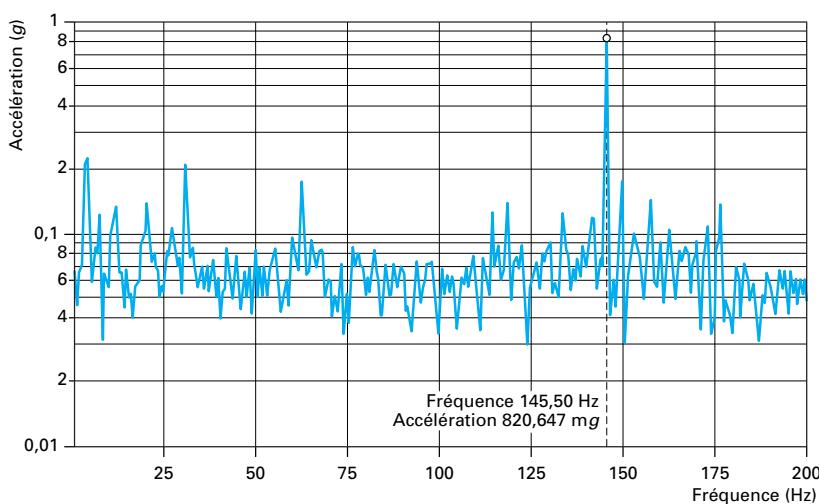
**Exemple :** mise en évidence de défauts électriques (figure 16).

Désignation du roulement	: 2 311
Diamètre moyen d'évolution [ $d_m$ ] (mm)	: 86
Diamètre d'élément roulant [ $DW$ ] (mm)	: 19,05
Nombre d'éléments roulants [z]	: 12
Angle de contact (degrés)	: 15,44
Vitesse bague intérieure (tr/min)	: 1 842
Code du roulement	: 2
Type de roulement	: roulement à rouleau sur billes
Diamètre extérieur du roulement [D] (mm)	: 120
Diamètre intérieur du roulement [d] (mm)	: 55
Nombre de rangées	: 2
Fréquence défaut bague intérieure (Hz)	: 223,48
Fréquence défaut bague extérieure (Hz)	: 144,93 ←
Fréquence défaut élément roulant (Hz)	: 132,49
Vitesse rotation bague intérieure (Hz)	: 30,70
Vitesse rotation cage (Hz)	: 12,08
Vitesse rotation élément roulant (Hz)	: 66,24

(a) logiciel appliqué au roulement surveillé



(b) 1<sup>er</sup> temps : spectre PBC 6 % ; accélération efficace [0 – 10 000 Hz]



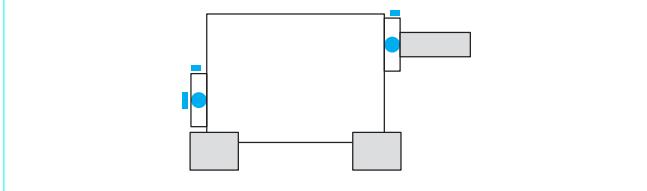
(c) 2<sup>e</sup> temps : spectre enveloppe ; accélération efficace ; gamme fréquentielle de filtre [3,5 – 10,0 kHz] ; gamme fréquentielle d'analyse [0 – 200 Hz]

**Figure 17 – Mise en évidence d'un défaut de roulement**

## ■ Origines

Elles peuvent être multiples :

- barre de rotor cassée ;
- entrefer inégal (excentricité statique ou dynamique) ;
- problèmes statoriques (fer qui bouge) ;
- déséquilibre des phases ;
- défaut géométrique du rotor qui peut aussi engendrer du balourd.



**Figure 18 – Schéma des points de mesure sur un motoréducteur électrique**

## 5.9 Roulements

### ■ Manifestation

Un tel défaut se traduit par une nette augmentation du niveau des fréquences supérieures à 1 000 Hz :

- l'ensemble des fréquences supérieures à 1 kHz augmente sur un PBC ou un spectre RC HF ;
- le facteur  $K$  augmente ;
- le facteur de crête  $FC$  diminue ;
- le niveau global  $Acc_{eff}[1\ 000-10\ 000\ Hz]$  augmente.

### ■ Origine

Ce peut être :

- un écaillement de la piste interne (sur l'arbre) ;
- un écaillement sur la piste externe (sur l'alésage) ;
- un défaut localisé sur un élément roulant (bille ou rouleau).

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, il est conseillé de réaliser une analyse d'enveloppe :

- 1<sup>er</sup> temps : on détecte la possibilité d'un tel défaut sur un indicateur tel qu'un PBC ou un spectre RC HF (figure 17b, p. 17) ;
- 2<sup>e</sup> temps : on paramètre une analyse d'enveloppe (figure 17c, p. 17), en fonction :
  - des fréquences dont le niveau a augmenté (forme de « bosse de chameau » ou « cloche »). On parle de « gamme fréquentielle de filtre » : c'est une gamme HF,
  - des fréquences caractéristiques du (ou des) roulement(s) suspect(s). On parle de « gamme fréquentielle d'analyse » : c'est une gamme BF ou MF ;
- 3<sup>e</sup> temps : analyse du spectre enveloppe obtenu.

**Exemple** : mise en évidence d'un défaut de roulement (figure 17, p. 17).

Le roulement surveillé présente toutes les caractéristiques d'un écaillement ou d'une fissuration sur la piste externe. Le défaut va rapidement contaminer les billes et, par suite, la piste interne.

## 6. Itinéraires

On peut tenter de différencier deux types distincts d'itinéraires :

- les itinéraires de surveillance ;
- les itinéraires de diagnostic.

### 6.1 Itinéraires de surveillance

Ce sont des itinéraires qui utilisent les outils de surveillance classiques :

- niveaux globaux ;
- PBC ;
- spectres RC MF ou HF.

**Exemple** : cas d'un motoréducteur électrique.

Pour chacun des 5 points figurant sur le schéma de la figure 18 on peut définir les mesures rassemblées dans le tableau 6.

**Tableau 6 – Itinéraire de surveillance d'un motoréducteur électrique**

Outil de surveillance	Objet
NG $V_{eff}[10-1000\ Hz]$	Être relié aux seules normes existantes (NF E 90-300 et ISO 10816)
NG $D_{cc}[10-1000\ Hz]$	Être relié aux normes de l'AIP dans la pétrochimie : à utiliser en lieu et place de $V_{eff}$ dans l'industrie chimique et pétrolière
NG $K[1-10\ kHz]$	Révélateur des dégradations de roulement. À utiliser dans le cas où l'on ne connaît pas le degré d'usure des roulements lors de la première campagne de relevés
NG $FC[1-10\ kHz]$	Révélateur des dégradations de roulement. À utiliser si l'on est sûr de commencer la surveillance avec des roulements en bon état
PBC 6 % $Acc_{eff}[10-10000\ Hz]$	Surveiller, sans prendre trop d'espace mémoire, l'évolution à la fois des phénomènes BF (balourd, lignage, problèmes électriques...) et des phénomènes HF (roulements)
Spectre RC $Acc_{eff}[0-500\ Hz]$	Surveiller l'évolution de l'engrènement et des phénomènes BF tels que le balourd, les jeux, frottements ou fissurations, les défauts électriques...

### 6.2 Itinéraires de diagnostic

Lors de la précédente campagne, on a détecté une anomalie à l'aide d'un des indicateurs de surveillance. Pour confirmer ou infirmer les hypothèses émises ainsi que pour diagnostiquer avec plus de précision le dysfonctionnement, on utilise un itinéraire de diagnostic. Celui-ci met en œuvre des indicateurs plus précis tels que :

- les spectres RC BF ;
- les zooms ;
- les cepstres ,
- les spectres enveloppes.

**Exemple** : sur le motoréducteur de la figure 18, on a détecté :

- une diminution de  $FC[1-10\ kHz]$  ;
- une augmentation de l'amplitude de la fréquence d'engrènement sur le FFT[0-500 Hz] ;
- une augmentation générale des HF entre 5 et 10 kHz sur le PBC 6 %.

On établit donc l'itinéraire de diagnostic du tableau 7 pour les points concernés par ces évolutions.

**Tableau 7 – Itinéraire de diagnostic du motoréducteur étudié**

Outil de diagnostic	Objet
Zoom $Acc_{eff}[f_1-f_2 \text{ Hz}]$	Centré sur la fréquence d'engrenement, on cherche d'éventuelles modulations d'amplitude (excentricité...)
Cepstre $Acc_{eff}[0-1\,000 \text{ Hz}]$	Séparation des différents étages dans le cas de plusieurs engrenements simultanés
Spectre enveloppe $Acc_{eff}$ [5-10 kHz] [0-500 Hz]	Confirmer ou infirmer l'existence d'un défaut de roulement suspecté par l'augmentation générale des HF et la diminution du FC [1-10 kHz]. Diagnostiquer l'élément incriminé : de quel roulement s'agit-il ?

## 7. Surveillance d'une installation : directives

Ce paragraphe propose un modèle d'organisation adaptée :

- aux prestataires de services réalisant une surveillance vibratoire pour le compte de différents clients industriels ;
- à un « service méthodes » intervenant pour le compte de différentes unités de production ou différents sites d'une même entité industrielle.

Les directives présentées ci-après ont été appliquées avec succès au sein d'un prestataire de services dans le courant de l'année 1999. On trouvera en [Doc. BM 5 145] la liste des moyens nécessaires à une telle organisation.

### 7.1 Préparation des campagnes de relevés

La qualité de la surveillance vibratoire d'une machine est entièrement conditionnée par le soin apporté à la préparation des campagnes de relevés.

#### 7.1.1 Élaboration des itinéraires de surveillance

Avant de se lancer dans le relevé des mesures vibratoires sur une machine, il est nécessaire de respecter toutes les étapes suivantes afin de préparer correctement les itinéraires.

##### ■ But de la surveillance à mettre en œuvre

Il s'agit de cerner les besoins auxquels doit répondre l'analyse vibratoire. Pour cela, on doit faire un bilan sur :

- le classement VIS ;
- les objectifs :
  - limiter le nombre d'arrêts sur casse (objectif minimaliste),
  - passer d'une politique de maintenance systématique à une politique de maintenance conditionnelle,
  - accroître le taux de disponibilité des machines (objectif ambitieux mais réalisable) ;
  - l'aspect financier : coût d'une surveillance par rapport au coût global et aux conséquences d'une panne.

En fonction de tous ces paramètres, on s'orientera vers une surveillance par niveaux globaux ou spectrale sur un nombre plus ou moins important de points de mesures.

On s'attachera toujours à bien définir le but de la surveillance mise en place et la fréquence des relevés (une fois par mois, six fois par an...).

##### ■ Complexité technique des machines : définition de la cinématique

Dans le cas d'une surveillance spectrale, il est nécessaire de cerner la totalité des défauts à surveiller et, pour chacun d'eux, de définir la ou les fréquences caractéristiques. Les paragraphes « Définition machine » et « Fréquences de défauts » proposés en [Doc. BM 5 145] permettent de préciser de façon formelle et à l'aide de fiches :

- les défauts à détecter ;
- les images spectrales caractéristiques de ces défauts ;
- les fréquences, les modulations, les quéfrences...

Ce bilan peut être réalisé avec le « client » ou le constructeur de la machine.

##### ■ Définition des points de surveillance

Procéder conformément à ce qui est proposé dans le paragraphe 2 « Préliminaires à la surveillance ».

On veillera à ne pas faire une surveillance surabondante :

- un seul point de mesure axial par ligne d'arbre et par machine ;
- si deux paliers sont assez proches dans un carter rigide (bonne transmission des vibrations), on n'effectuera les mesures radiales que sur le palier côté accouplement ;
- pose des pastilles, etc.

##### ■ Paramétrage du logiciel de surveillance

Une fois les défauts et leurs fréquences caractéristiques déterminés, les points de mesure définis, on paramètre le logiciel d'analyse du signal avec les outils adéquats.

Ces outils peuvent être :

- des outils de surveillance :
  - niveaux globaux (NG),
  - spectres PBC 6, 23, ou 70 %,
  - spectres RC (ou FFT) ;
- des outils de diagnostic :
  - spectres RC (ou FFT),
  - zoom RC (ou FFT),
  - cepstres ;
- des outils de diagnostic conditionnels :
  - cepstres,
  - spectres enveloppe.

Ces deux derniers sont utilisés dans le cas où une anomalie est détectée et où l'on désire affiner le diagnostic (confirmer ou infirmer les hypothèses émises).

#### 7.1.2 Rédaction d'un rapport « Surveillance vibratoire-Définition »

Ce rapport est destiné au « client ». Il définit le cadre dans lequel le prestataire ou le service méthodes va procéder à la surveillance vibratoire des machines.

On y trouve les renseignements suivants :

- référence (numéro de devis, numéro d'ordre...) ;
- objet et fréquence de la surveillance ;
- cinématique de l'installation ;
- emplacement des points de mesure (plan de la machine) ;
- défauts de fonctionnement recherchés ;
- types de mesures effectués (les outils mis en œuvre) ;
- références normatives ;
- observations diverses.

Ce rapport peut être formalisé sous forme de fiche dont un exemplaire se trouve en [Doc. BM 5 145].

### 7.1.3 Rédaction et classement du « Dossier d'intervention »

Ce dossier rassemble toutes les indications utiles à la réalisation des campagnes de relevés par les opérateurs. En effet, la personne effectuant les mesures sur site peut ne pas être toujours la même. Il est donc nécessaire de concevoir un document décrivant avec précision l'itinéraire à suivre. On y trouve :

- une arborescence décrivant la ronde à effectuer :
- usine,
  - secteur,
  - unité,
  - machine,
  - point de mesure ;
- le plan de chaque machine avec l'emplacement des points ;
- les photos des pastilles matérialisant ces points placées sur les machines.

Il est ensuite très facile d'imaginer un classeur regroupant tous les dossiers d'intervention de chaque site. Afin de réaliser les relevés, les opérateurs se munissent, outre du matériel nécessaire, du « Dossier d'intervention » du site. Un exemple de dossier est donné en [Doc. BM 5 145].

### 7.1.4 Exemple de surveillance mise en place

La machine à surveiller est composée d'un moteur, d'un multiplicateur et d'un compresseur centrifuge (2 impulsions).

Le client désire expérimenter l'analyse vibratoire à travers ce premier contrat.

#### Classement VIS : machine vitale non doublée

Objectifs :

- espacer, sans prendre de risque, les révisions périodiques du moteur. Ces révisions seront programmées en fonction de l'analyse vibratoire : on passe d'une politique de maintenance systématique à une politique de maintenance conditionnelle ;
- maîtriser les risques de panne sur l'ensemble multiplicateur / compresseur.

Il est déjà clair que, du moins pour le moteur, on s'oriente vers une surveillance spectrale. Il s'agit en effet de :

- détecter les défauts à un stade précoce de développement ;
- suivre leur évolution ;
- diagnostiquer leur gravité.

#### Définition de la cinématique

##### ● Fiches « Définition machine » :

- une fiche pour le moteur,
- une fiche pour le multiplicateur,
- une fiche pour le compresseur ;

##### ● Fiche « Fréquences de défauts » :

- fiche faisant la synthèse des trois précédentes et récapitulant toutes les fréquences caractéristiques à surveiller.

#### Définition des points de surveillance (figure 19)

Les codes utilisés font référence à la fiche « Type de machine » présentée en [Doc. BM 5 145] et au paragraphe 2 « Préliminaires à la surveillance ».

#### Paramétrage du logiciel de surveillance :

##### ● Points du moteur :

- niveau global  $V_{eff}[10-1000 Hz]$  pour se rattacher à la seule norme en vigueur, l'ISO 10816 ;
- niveau global  $FC[1000-10 000 Hz]$  pour surveiller l'évolution des roulements ;
- spectre PBC 6 %  $Acc_{eff}[10-10 000 Hz]$  pour détecter des anomalies HF dues aux roulements ;

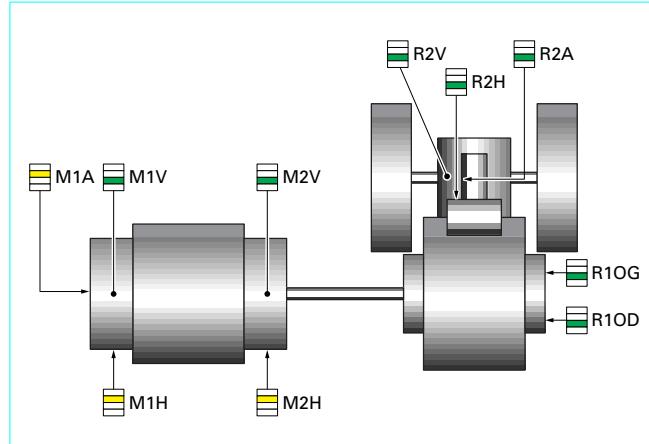


Figure 19 – Points de surveillance

- spectre RC  $Acc_{eff}[0-500 Hz]$  pour les défauts BF à grande énergie (balourd, lignage...) et les défauts électriques (100 Hz) ;
- zooms RC  $Acc_{eff}[15-35 Hz]$ ,  $Acc_{eff}[90-110 Hz]$  et  $Acc_{eff}[740-1740 Hz]$  pour détecter les défauts électriques.

##### ● Points du réducteur :

- niveau global  $V_{eff}[10-1000 Hz]$  pour se rattacher à la seule norme en vigueur, l'ISO 10816 ;
- spectre RC  $Acc_{eff}[0-10 000 Hz]$  pour les défauts HF d'engrenement et de passages d'aubes ;
- zoom RC  $Acc_{eff}[8 040-8 240 Hz]$  et  $Acc_{eff}[7 140-9 140]$  pour les modulations d'engrenement.

Toutes les mesures ne sont pas effectuées sur chaque point. Les indicateurs appliqués à la surveillance de défauts non directionnels (comme les défauts d'engrenage ou de roulement) ne sont appliqués qu'aux directions verticales.

## 7.2 Réalisation des campagnes de relevés

Lorsque la préparation est achevée (environ une journée par machine complexe), on peut débuter les premières campagnes de relevés.

Il faut charger le collecteur de données à partir du micro-ordinateur sur lequel est installé le logiciel d'analyse du signal : le collecteur ainsi préparé va guider l'opérateur sur le site afin de réaliser dans le bon ordre les mesures constituant l'itinéraire paramétré.

#### Sur place

L'opérateur se conforme aux indications :

- de l'itinéraire chargé sur le collecteur ;
- fournies par le « Dossier d'intervention » précédemment établi (cf. § 7.1.3).

#### Fiche de « Compte rendu d'intervention » (cf. [Doc. BM 5 145])

Cette fiche constitue un outil de liaison entre la personne qui effectue les relevés et celle qui analyse le signal vibratoire. Les petites structures peuvent s'en passer mais elle devient indispensable dès que le nombre d'opérateurs, de sites d'intervention et de machines devient important.

Elle est remplie par l'opérateur et renvoyée à l'analyste avec le collecteur.

Dans la partie observation on notera toutes les anomalies rencontrées telles que :

- pastilles décollées ;
- machine à l'arrêt ;
- requêtes particulières du client, etc.

#### ■ Décharger les mesures dans l'ordinateur

Se conformer à la procédure décrite dans la documentation du constructeur.

## 7.3 Analyse

#### ■ Curseurs

- Afficher les images recueillies (spectres PBC, RC, cepstres...) par le collecteur lors de la campagne de mesures.

- Repérer les éventuels franchissements de seuils sur les PBC ou NG.

- Positionner les différents curseurs jugés utiles en fonction :
  - des fréquences de défauts préétablies (fiches « Définition machine » et « Fréquence de défauts ») en [Doc. BM 5 145] ;
  - des niveaux particulièrement élevés.
- Enregistrer toutes les images ainsi traitées.

#### ■ Rapports techniques du logiciel d'analyse

La procédure décrite ici fait référence au matériel utilisé : le logiciel d'analyse SENTINEL de Brüel et Kjaer.

L'organisation mise en place propose différents types de rapports techniques dans le logiciel. Chaque type de rapport correspond à un outil particulier. On trouve des rapports de :

- niveaux globaux ;
- spectres PBC 6, 23 et 70 % ;
- spectres RC et zooms ;
- cepstres ;
- spectres « enveloppes ».

Pour chaque machine, on sort donc chaque type de rapport technique présentant un outil de surveillance ou de diagnostic.

Chaque outil étant associé à un ou plusieurs défauts à surveiller, l'ensemble de ces rapports doit permettre de statuer sur l'état vibratoire de la machine.

Ces rapports constituent le dossier d'analyse de la machine surveillée.

#### ■ Remarque importante

L'analyse faite à partir des rapports précédemment décrits peut être sujette à caution. En effet, un spectre peut être interprété de plusieurs façons, non pas totalement différentes, mais pouvant présenter quelques variantes en fonction de l'expérience de l'analyste et de l'expérience acquise sur la machine.

Lors des premières campagnes de mesures, cette expérience fait défaut en ce qui concerne la machine. On reconnaît les fréquences caractéristiques du balourd, de l'engrènement, du passage des aubes d'une pompe... Mais qu'en est-il de leur amplitude ? Tel niveau est-il alarmant ou normal ? Et cette « bosse de chameau » sur tel PBC 6 % est-elle inquiétante ? Les HF sont-elles excitées par un défaut de roulement ? On ne peut pas conclure sur tous ces points avec une égale certitude.

Certains outils comme les spectres « enveloppes » permettent de répondre à des questions bien précises. Ne pas hésiter à les employer lors des prochaines campagnes de mesures.

Lors des premières campagnes, d'autres moyens sont à disposition quand on ne connaît pas très bien la machine surveillée. Ce sont la norme ISO 10816 et les abaques « Appréciation de la sévérité » (cf. [Doc. BM 5 145]) notamment, diffusés par les constructeurs de matériel de collecte.

D'autres questions ne peuvent trouver leur réponse que dans la comparaison des mesures successives. C'est alors l'évolution des images obtenues qui peut lever le doute :

- un niveau apparemment élevé n'évolue pas : pas de soucis ;
- une fréquence présentant une amplitude assez faible lors de la campagne *i* se retrouve multipliée par 10 lors de la campagne *i+1* : il se passe quelque chose d'anormal.

Dans ce cas, la notion de signature prend toute sa signification. La question est : sur quelle campagne établir la référence ? L'idéal est de débuter sur une machine neuve ou révisée. Mieux encore : débuter sur une machine juste avant révision et réaliser la deuxième campagne après révision. Ce dernier cas permet de comparer deux états de la machine :

- machine dégradée (ou supposée telle) ;
- machine en bon état.

## 7.4 Rédaction d'un rapport d'analyse

On classe les défauts repérés sur les rapports techniques du logiciel d'analyse en quatre catégories :

- les défauts sans incidence sur le bon fonctionnement (évolution à surveiller avec les mêmes outils) ;
- les défauts à surveiller de plus près (évolution à surveiller avec de nouveaux outils à déterminer et à paramétrier) ;
- les défauts à traiter (une intervention mécanique est à prévoir) ;
- les défauts qui mettent en péril le fonctionnement à court terme (l'arrêt immédiat de la machine s'impose).

Toutes ces informations sont synthétisées sur la fiche « Rapport d'analyse » présentée en [Doc. BM 5 145].

Le dossier remis au « client » peut alors être constitué de :

— la fiche « Rapport d'analyse » uniquement. Si elle est soigneusement rédigée, elle synthétise de façon claire l'état de la machine surveillée et les actions correctives éventuelles. L'utilisateur de ce rapport (client, responsable maintenance...) est libéré de toute la partie analyse proprement dite et n'a en main qu'un outil d'aide à la décision ;

— la fiche « Rapport d'analyse » et les rapports techniques du logiciel. Sur ces derniers apparaissent les évolutions des indicateurs choisis, les spectres... L'utilisateur peut, dans ce cas, vérifier les conclusions de l'analyste.

Le choix de l'une ou l'autre des solutions dépend de la politique du prestataire et de la nature de la demande.

## 7.5 Évolution de l'itinéraire utilisé

Dans le cas de défauts « possibles », les hypothèses restent à vérifier par une nouvelle campagne de mesures. Celle-ci devra, dans la plupart des cas, mettre en œuvre des outils d'investigation supplémentaires. Le paramétrage des points de mesure et donc l'itinéraire vont s'en trouver modifiés.

■ Ne pas oublier de mentionner sur le « Rapport d'analyse ».

■ Procéder immédiatement au nouveau paramétrage.

L'itinéraire ainsi paramétré évolue entre un itinéraire de surveillance type et un itinéraire de diagnostic type (cf. § 6) au gré des besoins de l'analyse.

## 7.6 Maîtrise des documents : pistes

#### ■ Classeur de suivi

Un classeur de suivi semble nécessaire pour chaque site sur lequel le service effectue une surveillance vibratoire. Il peut se présenter comme indiqué sur la figure 20.

Nous reprenons ci-dessous les sept points signalés en exemple sur cette figure.

Surveillance vibratoire SITE		1 2 3 4 5 6 7 8 9 10
Référence	<th data-kind="ghost"></th>	
Interlocuteur		
1 Définition de la surveillance		
2 Itinéraire appliqué		
3 Mesures sur la machine n° 1		
4 Mesures sur la machine n° 2		
5 Dossier "client" : définition		
6 Dossier "client" : rapports d'analyse		
7 Interventions réalisées suite aux diagnostics		
8		
9		
10		

Figure 20 – Modèle type de classeur de suivi

#### ■ Définition de la surveillance

Pour chaque machine surveillée, on trouve dans cette partie :

- des fiches « Définition machine » ; s'il s'agit d'une motopompe, on peut donc trouver une fiche pour le moteur électrique et une pour la pompe ;
- les listings sur les défauts de roulement ; ces listings sont issus du logiciel édité par le constructeur de roulements ;
- tout renseignement cinématique complémentaire fourni par le client ou le constructeur ;
- une fiche « Fréquences de défauts » qui synthétise toutes ces données.

Cela constitue la base sur laquelle l'analyste a élaboré sa surveillance.

#### ■ Itinéraire appliqué

L'itinéraire utilisé par le logiciel d'analyse pour effectuer les mesures se trouve listé ici. On s'attachera à toujours y faire figurer la dernière version.

#### ■ Mesures sur la machine n° x

- Une fiche « Suivi des interventions » (exemplaire en [Doc. BM 5 145]) récapitule les dates et les particularités de tous les relevés effectués sur la machine n° x.
- Les rapports techniques du logiciel des derniers relevés sont ensuite classés par type de mesure :
  - niveaux globaux ;
  - spectres PBC 6, 23 ou 70 % ;
  - spectres FFT ou RC de base (basses et hautes fréquences) et zooms ;
  - cepstres ;
  - spectres « enveloppes ».

#### ■ Dossier « client » : définition

Pour chaque machine on y trouve une fiche « Surveillance vibratoire-Définition ». Elle présente de façon synthétique au client la surveillance adoptée.

C'est une synthèse des onglets 1 et 2 du classeur de la figure 20.

#### ■ Dossier « client » : rapports d'analyse

On conserve, dans cette partie, les copies de toutes les fiches « Rapport d'analyse » rédigées pour chaque machine et remises au client.

#### ■ Interventions réalisées suite aux diagnostics

Le but de cette partie est de conserver la mémoire de toutes les interventions réalisées sur les machines à la suite d'un diagnostic vibratoire ayant révélé un défaut.

Cela constitue une base de données précieuse pour :

- faire évoluer l'analyse sur l'installation surveillée ;
- accroître sa connaissance de la machine surveillée en particulier ;
- développer son expérience en analyse vibratoire en général.

Tout cela peut avantageusement être complété par un dossier informatique.

## 8. Déroulement d'une prestation : synthèse

La synthèse de toutes les opérations à effectuer en vue de l'analyse vibratoire d'une machine tournante est indiquée dans le tableau 8.

Tableau 8 – Déroulement d'une prestation

1 <sup>re</sup> visite au « au client »
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Définition des objectifs</li> <li>■ Cinématique machine</li> <li>■ Photos machine</li> </ul>
<b>Devis</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Fréquence des relevés</li> <li>■ Équipement des machines (pastilles, carters, accessibilité en fonctionnement...)</li> </ul>
<b>PRÉPARATION</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Préparation des campagnes           <ul style="list-style-type: none"> <li>● Quels sont les défauts à surveiller ?</li> <li>• Définition des points de mesure</li> <li>• Définition des mesures effectuées sur chaque point</li> </ul> </li> <li>● Paramétrage du logiciel           <ul style="list-style-type: none"> <li>• Architecture du site</li> <li>• Plans machines</li> <li>• Paramétrage points et types de mesure</li> </ul> </li> <li>● Réalisation de l'itinéraire de mesures initiales et chargement dans le collecteur</li> <li>● Rédaction du dossier de définition de la surveillance destiné au client           <ul style="list-style-type: none"> <li>● Rédaction du dossier d'intervention destiné aux opérateurs               <ul style="list-style-type: none"> <li>• Itinéraire</li> <li>• Plan machines</li> <li>• Photos machines avec repérage pastilles</li> </ul> </li> </ul> </li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Préparation sur site           <ul style="list-style-type: none"> <li>● Mise en place des pastilles d'ancrage</li> </ul> </li> </ul>
<b>RELEVÉS/ANALYSE</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Relevés sur site par un opérateur formé</li> <li>■ Analyse           <ul style="list-style-type: none"> <li>● Déchargement des données collectées dans le PC</li> <li>● Analyse : repérage des éventuels défauts               <ul style="list-style-type: none"> <li>• Utilisation des curseurs</li> <li>• Édition des rapports techniques</li> <li>• Diagnostic des défauts</li> <li>• Modification éventuelle des prochaines mesures</li> <li>• Mise à jour de l'itinéraire en conséquence</li> </ul> </li> </ul> </li> <li>■ Rédaction d'un rapport d'analyse</li> <li>■ Remise de ce dernier au « client »</li> </ul>

# Analyse vibratoire des machines tournantes

par **David AUGEIX**

Ingénieur de l'Institut national des sciences appliquées (INSA Toulouse)

## Bibliographie

BRUËL et KJAER. – *Initiation aux mesures de vibration*.

PACHAUD (C.) et BOULENGER (A.). – *Surveillance et diagnostic par analyse de vibrations*. AIF (1997).

BIGRET (R.). – *Vibrations des machines tournantes et des structures* (4 volumes). Technique et Documentation (1980).

## Logiciels

Principaux logiciels d'analyse disponibles :  
**SENTINEL** (Bruël et Kjaer)  
**SURVAODIAG** (Steel Diagnostic)

## Normalisation

### International Organization for Standardization (ISO)

ISO 10816 1995 Vibrations mécaniques. Évaluation des vibrations des machines par mesurages sur les parties non tournantes.  
Partie 1 : Directives générales  
Partie 2 : Turboalternateurs installés sur fondation radier, excédant 50 MW  
Partie 3 : Machines industrielles de puissance nominale supérieure à 15 kW et de vitesse nominale entre 120 tr/min et 15 000 tr/min, lorsqu'elles sont mesurées *in situ*.  
Partie 4 : Ensembles de turbine à gaz, à l'exception des turbines dérivées de celles utilisées en aéronautique.

Partie 6 : Machines alternatives de puissance nominale supérieure à 100 kW.

Nous étudions en Annexe ci-après plus en détails les parties 1 et 3 de cette norme.

### Association française de Normalisation (AFNOR)

NF 90-300 5-1998 Vibrations mécaniques des machines ayant une fréquence de rotation comprise entre 10 et 200 par seconde. Base pour l'élaboration des normes d'évaluation (EQV ISO 2372).

## Annexe

### 1. Rappels mathématiques

#### 1.1. Vibrations : quantification, vocabulaire

##### Quantification

Comme tout mouvement, les vibrations enregistrées pendant les itinéraires peuvent être quantifiées par trois grandeurs fondamentales :

- le déplacement ;
- la vitesse de ce déplacement ;
- l'accélération subie pour effectuer ce déplacement.

Mathématiquement, la fonction « accélération » est la dérivée de la fonction « vitesse », elle-même dérivée de la fonction « déplacement ».

Le capteur de vibrations le plus couramment utilisé étant un accéléromètre, le signal enregistré est l'accélération de la structure de la machine. Les grandeurs vitesse et déplacement sont donc calculées respectivement par une ou deux intégration(s) à partir du signal brut.

##### Vocabulaire communément employé

Acc est l'accélération enregistrée par le capteur fixé sur la machine surveillée. Les principaux paramètres sont définis sur la figure A.

On retrouve les mêmes vocabulaire, abréviations et formules pour les grandeurs vitesse et déplacement.

Ainsi  $V_{eff}[10-1000 \text{ Hz}]$  désigne la grandeur vitesse 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.

#### 1.2 Signal périodique et transformée de Fourier : aspects pratiques

##### Signal périodique

La rotation de l'arbre d'une machine tournante est le phénomène excitateur qui donne naissance aux vibrations. Cette rotation étant, par nature, un mouvement périodique, les vibrations enregistrées le sont aussi. Hors, tout signal périodique peut, selon Fourier, se décomposer en une somme de sinusoïdes que l'on appelle série de Fourier.

## ANALYSE VIBRATOIRE DES MACHINES TOURNANTES

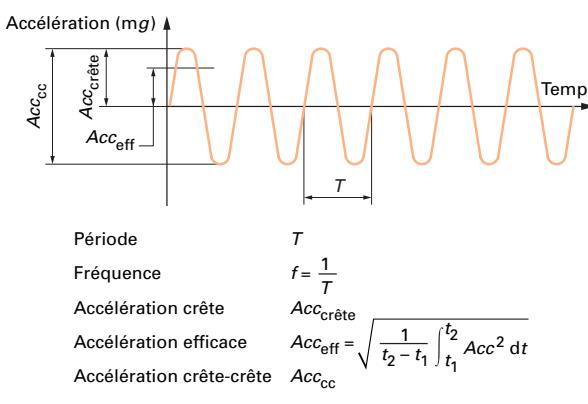


Figure A – Vocabulaire communément employé en phénomène vibratoire (ici accélération)

Si  $s$  ( $s$  peut désigner l'accélération, la vitesse ou le déplacement) est une fonction périodique du temps  $t$ , on peut donc écrire :

$$s(t) = \sum_{n=0}^{n=N} s_n \underbrace{\sin(\omega_n t + \varphi_n)}_{\text{terme d'ordre } n}$$

Dans le cas de vibrations, chaque terme est la représentation mathématique d'un mouvement élémentaire d'amplitude  $s_n$  et de fréquence  $f_n = \frac{\omega_n}{2\pi}$ .

La représentation graphique de la fonction  $s$  reste assez « illisible ». Elle ne permet pas l'analyse car tous les termes de la fonction sont « superposés ».

**Exemple :** représentation graphique (figure B<sub>a</sub>) de la fonction :

$$s(t) = 10 \sin(2\pi t) + 5 \sin(6\pi t) + 3 \sin(11\pi t)$$

Un simple examen visuel du graphe de la figure B<sub>a</sub> ne permet pas de distinguer les trois phénomènes qui composent le mouvement total. On a besoin d'un outil mathématique supplémentaire.

### Transformée de Fourier. Spectre

La transformée de Fourier, lorsqu'elle s'applique à une fonction du temps (comme l'accélération, la vitesse ou le déplacement), donne pour résultat une autre fonction dont la variable est la fréquence.

La représentation graphique de cette nouvelle fonction s'appelle « **spectre** ». Le spectre permet d'identifier rapidement tous les termes d'ordre  $n$  de la fonction du temps.

Autrement dit, appliquée aux vibrations recueillies par l'accéléromètre, il offre une image sur laquelle sont dissociés tous les mouvements élémentaires composant le mouvement total de la machine surveillée.

**Exemple :**  
fonction du temps :

$$s(t) = 10 \sin(2\pi t) + 5 \sin(6\pi t) + 3 \sin(11\pi t)$$

On applique la transformée de Fourier d'où :  
fonction de la fréquence :

$$S(1) = 10, \quad S(3) = 5 \text{ et } S(5,5) = 3$$

Le spectre (figure B<sub>b</sub>) désigne sans équivoque les trois phénomènes. Un d'amplitude 10 et de fréquence 1 Hz (1 fois par seconde), un autre d'amplitude 5 et fréquence 3 Hz (3 fois par seconde) et, enfin, un dernier d'amplitude 3 et de fréquence 5,5 Hz (5,5 fois par seconde).

En analyse vibratoire, le spectre est donc une représentation de l'amplitude d'une grandeur (quasiment toujours l'accélération) en fonction de la fréquence.

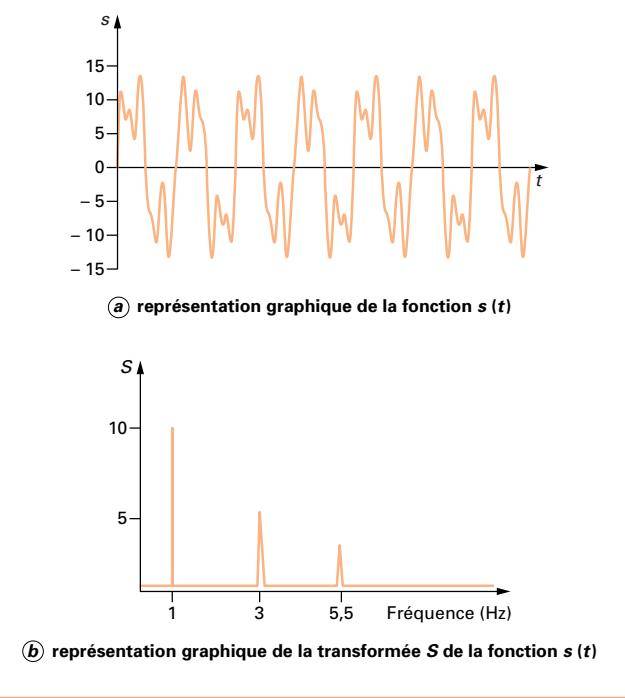


Figure B – Représentation graphique de la fonction  $s(t) = 10 \sin(2\pi t) + 5 \sin(6\pi t) + 3 \sin(11\pi t)$  et de sa transformée de Fourier

### 1.3 Décibels, niveaux de référence, alerte et danger

Soit  $A$  l'amplitude de l'accélération.  $A$  est une fonction de la fréquence (pour une mesure réalisée lors d'une campagne) et du temps (la valeur évolue d'une campagne de mesures à l'autre).

On nomme la première mesure de cette grandeur  $A_0$ . C'est celle qui fait référence. Elle constitue la signature (tableau A).

Tableau A – Accélération  $A(\text{dB}) = 20 \lg\left(\frac{A}{A_0}\right)$

Niveau	$A$ (dB)	$A/A_0$
<b>DANGER</b>	20	10,00
	10	3,16
	8	2,51
<b>ALERTE</b>	6	2,00
	3	1,41
	1	1,12
<b>RÉFÉRENCE</b>	0	1,00
	-1	0,89
	-3	0,71
	-6	0,50
	-8	0,40
	-10	0,32
	-20	0,10



Figure C – Moyens matériels

Ainsi, si une mesure dépasse le niveau d'alerte, cela signifie que l'accélération relevée est 2 fois plus importante que celle qui fait référence (cf. tableau A).

## 2. Moyens d'étude nécessaires

### Moyens matériels

- Un micro-ordinateur
- Un collecteur de données (figure Ca)
- Un accéléromètre (figure Ca)
- Des pastilles (figure Cb)

### Moyens logiciels

- Un logiciel d'analyse du signal.

### Moyens humains

- Un responsable commercial.
- Un ingénieur :
  - chargé du développement et de la veille technologique ;
  - capable de réaliser quelques analyses.
- Un ou plusieurs techniciens chargés des analyses.
- Quelques opérateurs formés au matériel pouvant effectuer les relevés.

Dans une petite structure, une même personne peut cumuler plusieurs de ces fonctions. Quoi qu'il en soit, il est souhaitable que des passerelles soient régulièrement jetées entre les différents acteurs afin que chacun prenne la mesure des prestations dans leur globalité.

## 3. Évolution d'un niveau global

Les mesures représentées sur la figure D ont été réalisées sur banc d'essais. Une telle expérience met en évidence l'utilité et les limites d'un indicateur scalaire (niveau global).

Il permet de détecter un dysfonctionnement mais pas de l'identifier. En effet, le niveau global réagit indifféremment à plusieurs types de défauts. Sur le graphe de la figure D, rien ne distingue :

- un desserrage des pieds (5) d'un balourd de 34 g (8 et 9) ;
- un délinage (4) d'un balourd de 50 g (10) ;
- un balourd de 130 g + un délinage (3) d'un balourd de 168 g (12).

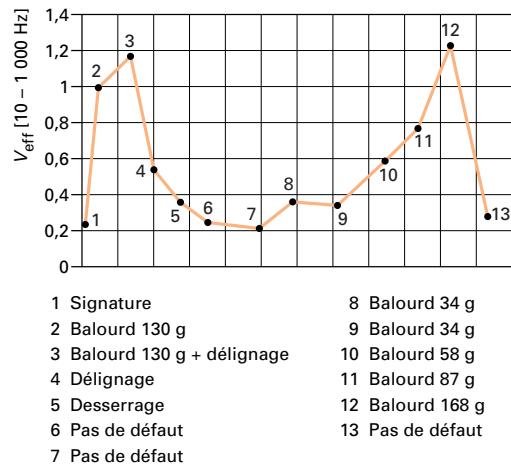


Figure D – Évolution d'un niveau global

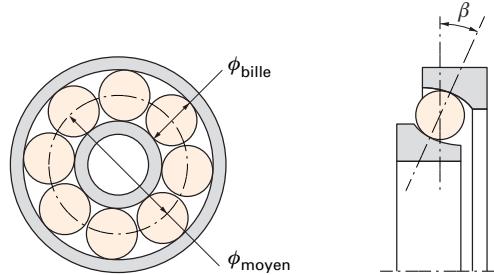


Figure E – Caractéristiques d'un roulement

Si un défaut important apparaît, le niveau global évolue de façon significative. Il peut donc alerter le technicien et permettre ainsi d'éviter un arrêt sur casse. Il ne renseignera toutefois pas avec précision sur la nature du défaut.

## 4. Fréquences caractéristiques des défauts de roulement

Les logiciels édités par les constructeurs de roulements permettent de déterminer rapidement et sans calcul les fréquences de défauts des roulements de la machine surveillée (figure E).

On peut cependant les déterminer à l'aide des formules suivantes :

— un défaut sur la piste externe se repère sur un spectre « enveloppe » à :

$$f_{\text{ext}} = \frac{n}{2} f_r \left( 1 - \frac{\phi_{\text{bille}}}{\phi_{\text{moyen}}} \cos \beta \right)$$

## ANALYSE VIBRATOIRE DES MACHINES TOURNANTES

— un défaut sur la piste interne se repère sur un spectre « enveloppe » à :

$$f_{\text{int}} = \frac{n}{2} f_r \left( 1 + \frac{\phi_{\text{bille}}}{\phi_{\text{moyen}}} \cos \beta \right)$$

— un défaut sur une bille, un rouleau ou une aiguille (élément roulant) se repère sur un spectre « enveloppe » à :

$$f_{\text{bille}} = \frac{\phi_{\text{moyen}}}{\phi_{\text{bille}}} f_r \left[ 1 - \left( \frac{\phi_{\text{bille}}}{\phi_{\text{moyen}}} \cos \beta \right)^2 \right]$$

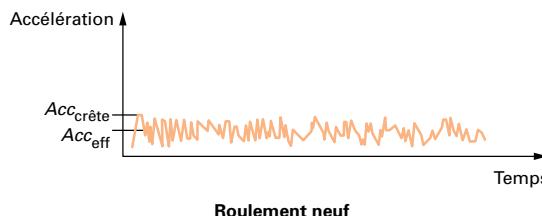
avec  $n$  nombre d'éléments roulants (billes, rouleaux, aiguilles),  
 $f_r$  fréquence de rotation de l'arbre,  
 $\phi_{\text{bille}}$  diamètre des éléments roulants,  
 $\phi_{\text{moyen}}$  diamètre moyen d'évolution des éléments roulants,  
 $\beta$  angle de contact.

Cela suppose que l'on connaisse les dimensions internes de chaque roulement monté dans la machine ainsi que leur nombre de billes.

Ces renseignements ne sont pas toujours très faciles à obtenir.

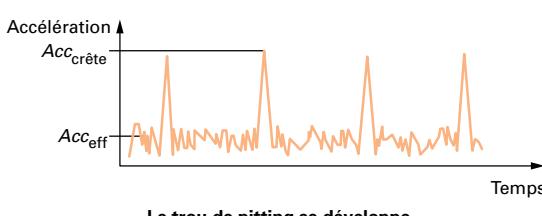
## 5. Niveaux globaux spécifiques aux roulements

■ Un roulement neuf et bien lubrifié n'émet, en théorie, aucun signal.

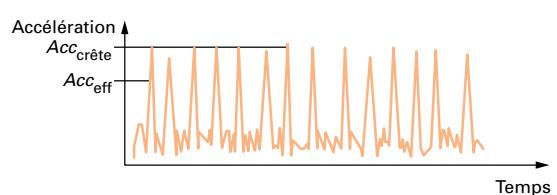
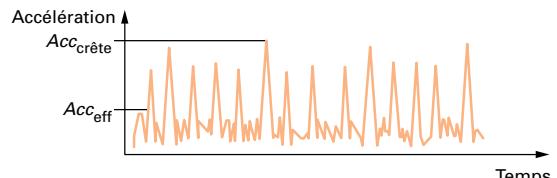


■ Lorsqu'un roulement se dégrade, cela commence très souvent par un trou (dit **trou de pitting**) à la surface de la piste interne. Le passage des billes sur cette irrégularité provoque un choc de faible amplitude à la fréquence  $f_{\text{int}}$ .

Le signal émis peut être représenté par les deux schémas suivants :



■ En **fin de vie**, les trous de pitting se sont développés partout sur les pistes de roulement. Le signal émis ressemble alors à ces graphes :



En résumé, l'évolution du roulement dans le temps peut être représentée par le graphe de la figure F, ce qui correspond bien à l'évolution étudiée au paragraphe 3 de l'article [BM 5 145] corroborée par les schémas de la figure G.

## 6. Itinéraire

La figure H donne un exemple d'itinéraire établi sur le site « USINE » pour deux machines : « compresseur » et « ventilateur » (cf. aussi type de schéma plus simplifié figure J).

## 7. Rapport technique du logiciel d'analyse

Un rapport technique se compose de x pages telles que celle de la figure I. Ces pages présentent :

- les graphes correspondants aux mesures effectuées ;
- les amplitudes des fréquences repérées par les curseurs préalablement placés ;
- les valeurs obtenues lors de la campagne précédente, etc.

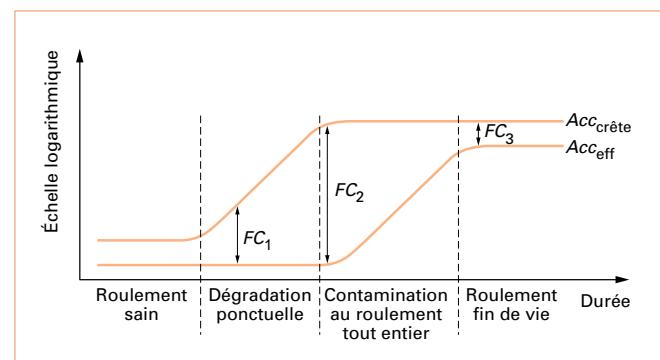
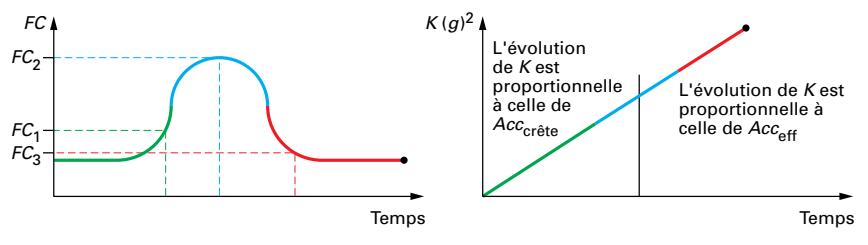
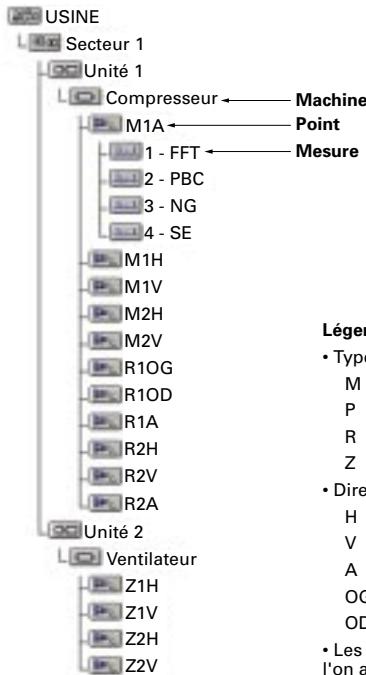


Figure F – Roulement : graphe de synthèse



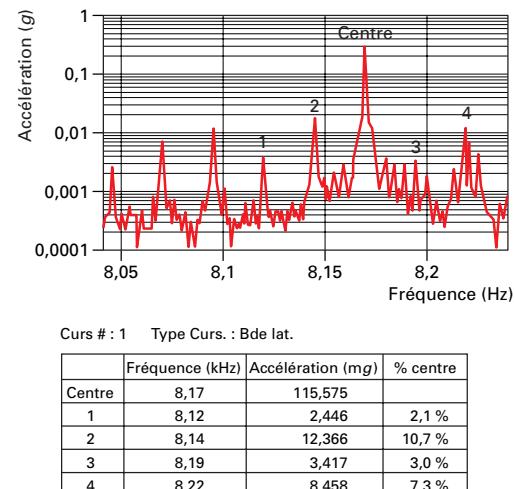
**Figure G – Évolution du facteur de crête et du facteur  $K$  au cours de la vie d'un roulement**



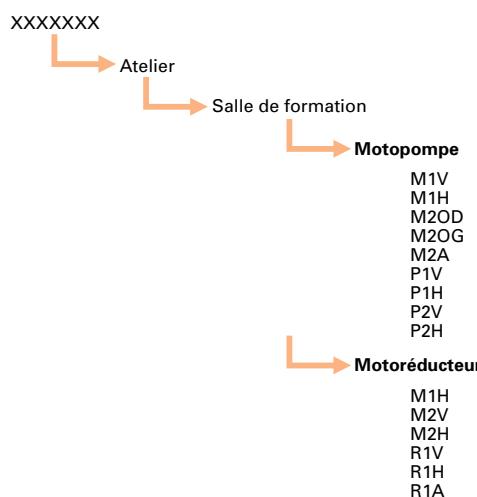
Parution : janvier 2001 - Ce document a été délivré pour le compte de 7200034507 - usl // 193.49.225.10

**Figure H – Exemple d'itinéraire**

Secteur : A      Unité : 1  
Machine : compresseur      Point : R10D  
Mesure : zoom FFT      Date : 02/11/1999      Heure : 16:15:43



**Figure I – Modèle de rapport technique du logiciel d'analyse**



**Figure J – Itinéraire pour les deux machines à surveiller**

## 8. Fiches de travail

### 8.1 Liste « Type de machine »

Elles sont sur le modèle suivant.

SERVICE METHODES	SURVEILLANCE VIBRATOIRE	
	TYPES DE MACHINES	
CODE	MACHINE	
A	ALTERNATEUR	
C	COMPRESSEUR	
M	MOTEUR	
P	POMPE	
R	REDUCTEUR OU MULTIPLICATEUR	
T	TURBINE	
V	VENTILATEUR	
Z	PALIER ISOLE	

### 8.2 Fiche « Fréquences de défauts »

Cette fiche dresse le bilan de toutes les fréquences, quéfrences, modulations... caractéristiques des défauts que l'on recherche sur l'installation surveillée. Cette installation est ici composée d'un moteur, d'un réducteur et d'une pompe.

SERVICE METHODES	SURVEILLANCE VIBRATOIRE	
	FREQUENCES DE DEFAUTS	
CLIENT/SITE :	ITINERAIRE/MACHINE :	
DEFAUTS :	FREQUENCES, Δ FREQUENCES, QUEFRANCES :	
	ENSEMBLE	
Balourd	fr	
Lignage	2fr, 3fr, 4fr	
1 MOTEUR		
Défauts électriques	100Hz, fenc + modulations 100Hz	
Roulement n°1	fext, fint, fbille	
Roulement n°2	fext, fint, fbille	
2 REDUCTEUR		
Engrenages	$z_1 \cdot fr$ , modulation à fr (prim) ou $(z_2/z_1) \cdot fr$ (sec)	
Roulement n° 1	fext, fint, fbille	
Roulement n° 2	fext, fint, fbille	
3 POMPE		
Aubage	$n \cdot (z_2/z_1) \cdot fr$	
Roulement n° 1	fext, fint, fbille	
Roulement n° 2	fext, fint, fbille	
Balourd	$(z_2/z_1) \cdot fr$	
4		

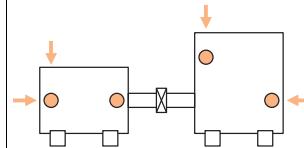
### 8.3 Fiche « Définition de machine »

On peut imaginer une fiche « Définition de machine » pour chaque machine figurant sur la liste « Types de machines »

SERVICE METHODES	POMPE CENTRIFUGE	
	SURVEILLANCE VIBRATOIRE DEFINITION MACHINE	
Constructeur/Modèle :	SALMSOM / Type 31 B A0-MS	
Vitesse de rotation :	995 tr/min	$fr = 16,6\text{Hz}$
Nombre d'aubes :	$6 \Rightarrow f_{\text{aubage}} = 99,5\text{Hz}$	
PALIERS		
TYPE	SKF 6304	SKF 6304
$f_{\text{ext}}$	42,68	42,68
$f_{\text{int}}$	73,40	73,40
$f_{\text{bille}}$	58,29	58,29

### 8.4 Dossier « Surveillance vibratoire - Définition »

Il est présenté selon le modèle suivant.

SERVICE METHODES	SURVEILLANCE VIBRATOIRE	
	DEFINITION	
Machine :	Motoréducteur MR A4	Référence :
Site :	XXXXX	Secteur : A Unité :
	Objet et fréquence de la surveillance Espacer au maximum les révisions / Prévenir une panne mécanique 1 relevé par mois	
	Cinématique de l'installation	Emplacement des points de mesure
	Puissance = 75000 W Rotor électrique (64 encoches) : Vitesse = 1480 tours/min Roulements : 61806 et 7206BE Arbre primaire : Vitesse = 1480 tours/min Roue menante = 23 dents Roulements : 61806 et 1206E Arbre secondaire : Vitesse = 508 tours/min Roue menée = 67 dents Roulements : 61807 et 1207E	
	Défauts de fonctionnement recherchés	Types de mesures effectuées
	Balourd Délignage Défauts de denture Vieillissement des roulements	$V_{\text{eff}}$ [10-1 000Hz] $K$ [1 000-10 000Hz]  FFT [10-1 000Hz] FFT [0-10 000Hz] FFT [ $f_1-f_2$ ] (zoom)
		Si nécessaire : Cepstre Spectre enveloppe
	Observations :	
	Références normatives : ISO 10816 (Décembre 1995)	
Rédigé par : XXXXXXXX		Vérifié par : XXXXXXXX
VISA :		

## 8.5 Dossier d'intervention

Le dossier d'intervention ci-après est un de ceux qui ont été utilisés pour la formation d'opérateurs et de techniciens. Les mêmes principes ont été appliqués avec succès à des itinéraires beaucoup plus importants chez des clients industriels variés (aéronautique, chimie, alimentaire...).

### 8.5.1 Itinéraire

Il est conçu selon le modèle de la figure **H** et schématisé figure **J** (p. 5).

### 8.5.2 Localisation des points de mesure sur chaque machine

Elle est mentionnée sur la figure **K** (p. 8).

## 8.6. Fiche « Compte rendu d'intervention »

SERVICE METHODES		RELEVES VIBRATOIRES	
		COMPTE RENDU D'INTERVENTION	
CLIENT/SITE : XXXXXXXXXXXXXX		DATE : 10/01/2000	
MACHINE : Moto-réducteur MR A4	UNITE : A	SECTEUR :	
<b>OBSERVATIONS</b>			
<input checked="" type="checkbox"/> <b>RAS</b> Phénomènes(s) observé(s) <input type="checkbox"/> Vibrations importantes - <input type="checkbox"/> Bruit aigu - <input type="checkbox"/> Bruit grave - <input type="checkbox"/> Modulation ..... Localisation(s) <input type="checkbox"/> Alternateur - <input type="checkbox"/> Compresseur - <input type="checkbox"/> Moteur - <input type="checkbox"/> Réducteur - <input type="checkbox"/> Pompe/Turbine - <input type="checkbox"/> Ventilateur <input type="checkbox"/> Châssis - .....			
<input type="checkbox"/> <b>POINTS NON MESURES</b> Repères :			
<input type="checkbox"/> <b>MACHINE ARRETEE</b> <input type="checkbox"/> <b>PROBLEME COLLECTEUR</b> Description :			
<b>OBSERVATIONS DIVERSES</b>			
OPERATEUR : XXXXXXXXXX	VISA : 		

## 8.7 Fiche « Suivi des interventions »

SERVICE METHODES		SURVEILLANCE VIBRATOIRE	
		SUIVI DES INTERVENTIONS	
CLIENT/SITE : XXXXXXXXXXXXXX	ITINERAIRE/MACHINE : XXXXXXXXXXXXXX		
DATE :	OBSERVATIONS :		
16/07/1999	Mesures juste avant révision.		
23/09/1999	Mesures après révision et changement du moteur : Mauvais lignage.		
06/10/1999	Mesures de contrôle après lignage de la ligne d'arbre.		
02/11/1999	Atténuation générale des niveaux : Rodage fini ou charge en baisse.		
06/01/2000	Peut être un début de dégradation du palier moteur côté accouplement. Sinon, R.A.S.		

## 8.8 Fiche « Rapport d'analyse »

SERVICE METHODES		SURVEILLANCE VIBRATOIRE RAPPORT D'ANALYSE			
Machine : <b>Ventilateur VT 3608</b>		INDICE : 7/12		DATE : 04/06/2000	
Site : XXXXXXXX		Secteur : Ensachage		Unité : B6	
<b>Défauts surveillés</b>					
TYPES	RAS	Sans incidence	A surveiller	A traiter	Périlleux
Balourd	X				
Lignage		X			
Jeux / Frottements / Fissuration		X			
Transmission	X				
Passage d'aubes		X			
Roulements				X	
Défauts électriques	X				
<b>Descriptif de l'analyse</b>					
Synthétiser ici l'analyse réalisée sur la machine désignée plus haut. On donnera plus ou moins de détails selon la demande du « client ».					
<b>Actions correctives à prévoir</b>					
CHANGER LES DEUX ROULEMENTS					
Commentaires :					
Rédigé par : XXXXXXXX			Vérifié par : XXXXXXXX		
VISA :			VISA :		

## 9. Norme ISO 10816 (1995). Résumé

### ■ Libellé

Vibrations mécaniques. Évaluation des vibrations des machines par mesurage sur les parties non tournantes.

Directives générales – Machines industrielles ( $P > 15 \text{ kW}$  et  $120 < N < 15\,000 \text{ tr/min}$ ).

### ■ Objet

Lignes directrices pour le diagnostic de fonctionnement et les essais de réception à partir de mesures des vibrations à large bande.

**Nota :** pour les mesures sur les parties tournantes (sondes à courants de Foucault...) se reporter à la norme ISO 7919.

### ■ Mesure de référence

Valeur moyenne quadratique (valeur efficace) de la vitesse de vibration ( $v$ ) :

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

avec  $T$  période du phénomène.

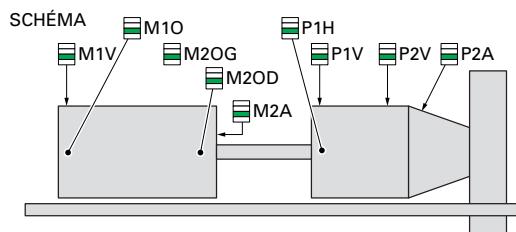
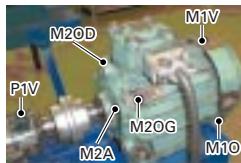
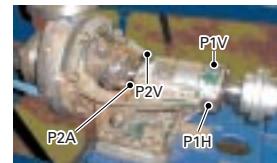
### ■ Emplacement des points de mesure

Les mesures peuvent être effectuées dans les 3 directions orthogonales classiques (axiale, radiale horizontale et radiale verticale) (cf. figure **L**, p. 9).

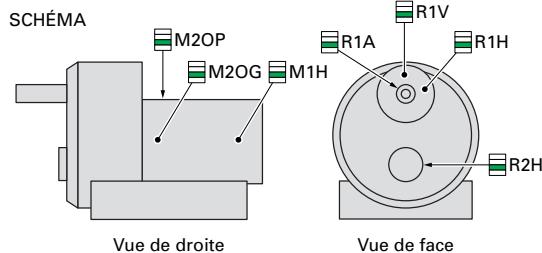
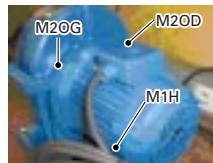
**Remarque :** la mesure axiale peut être unique mais, dans ce cas, elle doit être effectuée sur le palier qui sert de butée.

## ANALYSE VIBRATOIRE DES MACHINES TOURNANTES

**LOCALISATION**  
Site : XXXXXXX  
Secteur : Atelier  
Unité : Salle de formation  
Machine : Motopompe

**LOCALISATION DES POINTS****MOTEUR****a) motopompe****POMPE**

**LOCALISATION**  
Site : XXXXXXX  
Secteur : Atelier  
Unité : Salle de formation  
Machine : Motoréducteur

**LOCALISATION DES POINTS****ARRIÈRE****AVANT****b) motoréducteur****Figure K – Localisation des points de mesure pour la motopompe et le motoréducteur****Structure de support**

Les comparaisons entre machines de même type ne sont valables que si elles sont montées sur des supports semblables.

**Conditions de fonctionnement**

Les essais de vibration devront être faits après que les conditions normales de fonctionnement ont été atteintes. On peut disposer pour cela d'indicateurs de :

- vitesse de rotation ;
- température ;
- pression...

**Critères d'évaluation de la sévérité vibratoire**

- A Bon
- B Acceptable pour un service de longue durée sans restriction
- C À peine tolérable pour un fonctionnement de courte durée
- D Vibrations suffisamment importantes pour endommager la machine à court terme.
- Critère 1 : amplitude des vibrations (cf. tableau B)
- Critère 2 : Variation d'amplitude

Ce critère fournit une évaluation de la variation d'amplitude des vibrations à partir d'une valeur de référence préalablement établie.

**Tableau B – Amplitude des vibrations selon ISO 10816**

$V_{eff}$ (mm/s)	Types de machines							
	15 < $P$ < 300 kW (1) 160 < $H$ < 315 mm (2)		0,3 < $P$ < 50 MW (1) $H$ > 315 mm (2)		Pompes $P$ > 15 kW		Motopompes $P$ > 15 kW	
	Rigide	Souple	Rigide	Souple	Rigide	Souple	Rigide	Souple
0,0 à 1,4	A	A	A	A	A	A	A	A
1,4 à 2,3	B	A	A	A	A	A	B	A
2,3 à 2,8	B	B	B	A	B	A	B	B
2,8 à 3,5	C	B	B	A	B	A	C	B
3,5 à 4,5	C	B	B	B	B	B	C	B
4,5 à 7,1	D	C	C	B	C	B	D	C
7,1 à 11,0	D	D	D	C	D	C	D	D
11,0 à $\infty$	D	D	D	D	D	D	D	D

(1)  $P$  puissance des machines industrielles autres que les pompes ou motopompes

(2)  $H$  hauteur d'arbre des moteurs électriques

**Conditions d'application :**

- emplacement des points de mesure strictement identique entre les mesures ;
- mêmes conditions de fonctionnement (vitesse de rotation, charge...).

**Niveau d'alarme ou d'alerte**

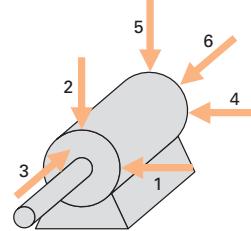
Lorsque la variation d'amplitude des vibrations est supérieure à 25 % de la valeur maximale de la zone B comme définie dans le tableau **B**, cette variation est considérée comme significative. Il y a lieu d'effectuer une analyse diagnostique.

**Niveau de déclenchement ou de danger**

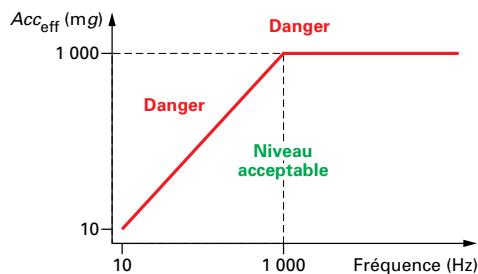
Lorsque la variation d'amplitude est telle que sa valeur atteint 1,25 fois la valeur maximale de la zone C comme définie dans le tableau **B**, cette variation est considérée comme présentant un danger réel de dommage de l'installation. Il convient alors d'intervenir immédiatement pour réduire les vibrations ou arrêter la machine.

**10. Appréciation de la sévérité**

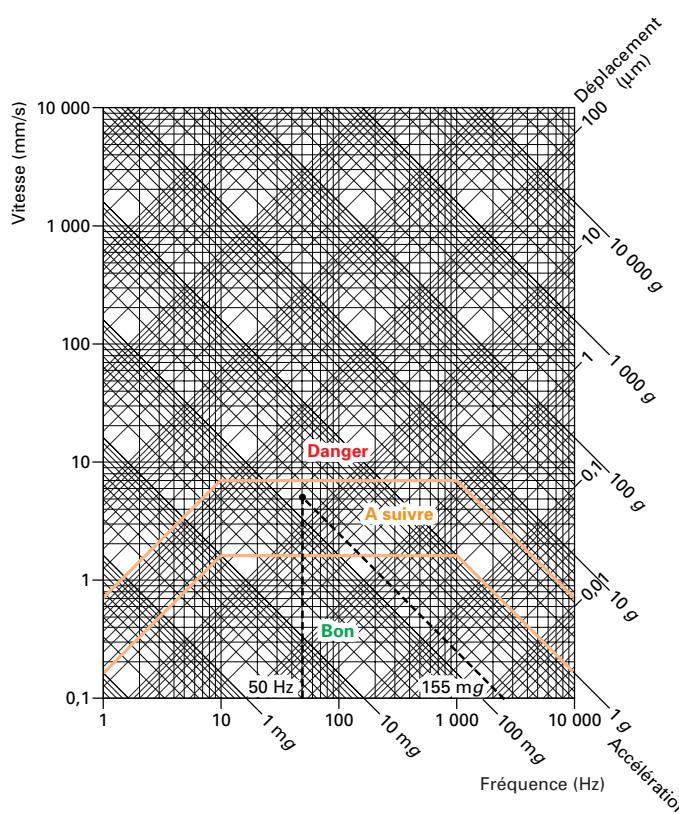
L'abaque de la figure **M** définit la zone de danger d'une manière simplifiée. Il correspond à l'exemple de la figure **N**, où il apparaît qu'une amplitude vibratoire de 155 mg en accélération efficace relevée à 50 Hz sur un spectre RC (ou FFT) est un pic à surveiller de près (catégorie « à suivre » en orangé).



**Figure L – Emplacement des points de mesure selon la norme ISO 10816**



**Figure M – Abaque simplifié (échelle unique en accélération efficace)**



**Figure N – Schéma d'appréciation de la sévérité**



# L'expertise technique et scientifique de référence

**Techniques de l'Ingénieur** vous apporte une information précise et fiable pour l'étude et la réalisation de vos projets.

Actualisées en permanence, les **ressources documentaires** profitent aujourd'hui à plus de **300 000 utilisateurs** et sont la référence pour tout ingénieur, bureau d'études, direction technique et centre de documentation.

Depuis près de 70 ans, **3 500 experts** contribuent quotidiennement à développer, enrichir et mettre à jour cette documentation professionnelle unique en son genre.

L'intégralité de ces ressources représente plus de **9 000 articles**, répartis dans plus de **430 bases documentaires**, accessibles sur internet, en téléchargement PDF, et sur tablette.

## 4 BONNES RAISONS DE CHOISIR TECHNIQUES DE L'INGÉNIEUR

- Une **actualisation permanente** du fonds documentaire
- Un **comité d'experts** scientifiques et techniques reconnus
- Une **collection scientifique et technique incontournable** sur le marché francophone
- L'espace actualité pour suivre les **tendances et innovations** de vos secteurs



## DES SERVICES ASSOCIÉS À CHAQUE ABONNEMENT

- **Service de questions-réponses** <sup>(1)(2)</sup> : interrogez les plus grands spécialistes des domaines couverts par vos bases documentaires. Votre abonnement vous permet en effet de poser des questions techniques ou scientifiques.
- **Les articles Découverte** : un article vous intéresse, mais ne fait pas partie de votre abonnement ? Techniques de l'Ingénieur vous offre la possibilité de l'ajouter.
- **Le Dictionnaire technique multilingue** : 45 000 termes scientifiques et techniques – avec illustrations et légendes – en français, anglais, espagnol, allemand.
- **Les Archives** : vos bases documentaires s'enrichissent et sont mises à jour en ligne en permanence. Les Archives conservent la mémoire de ces évolutions et vous permettent d'accéder aux versions antérieures de vos articles, ainsi qu'à ceux qui traitent des technologies plus anciennes.

Profitez également de l'impression à la demande <sup>(1)</sup>, pour commander une ou plusieurs éditions papier supplémentaires de vos bases documentaires (sur devis).

(1) Disponible pour la France, le Luxembourg, la Belgique, la Suisse et Monaco.

(2) Non disponible pour les établissements scolaires, écoles, universités et autres organismes de formation.

ILS NOUS FONT CONFIANCE :

Sagemcom

edf

SAFRAN  
AEROSPACE DEFENCE SECURITY

l'X  
ÉCOLE  
POLYTECHNIQUE

ARKEMA

AgroParisTech

3M

SIEMENS

GE

CDS<sup>®</sup>  
A division of the American Chemical Society

DASSAULT  
AVIATION

EADS

L'ORÉAL

SAINT-GOBAIN

Schneider  
Electric

THALES

TOTAL



Pour disposer d'un panorama complet sur une thématique  
**DÉCOUVREZ**  
les offres de packs !

## LES + DES OFFRES PACK

- Un large choix de **+ de 60 thématiques** pour des besoins de contenu plus larges
- Des **tarifs préférentiels sur mesure** adaptés à vos besoins

## LES UNIVERS DOCUMENTAIRES

- Plus de 430 bases documentaires et plus de 9 000 articles en 14 univers

	Sciences fondamentales
	Environnement - Sécurité
	Énergies
	Technologies de l'information
	Mécanique
	Innovations
	Génie industriel
	Biomédical - Pharma
	Procédés Chimie - Bio - Agro
	Matériaux
	Mesures - Analyses
	Électronique - automatique
	Construction
	Transports



## POUR EN SAVOIR PLUS SUR LES OFFRES DE PACKS...

... contactez le service Relation Clientèle  
qui se chargera de vous rediriger vers un chargé d'affaires :

Tél : **+33 (0)1 53 35 20 20**

Email : [infos.clients@teching.com](mailto:infos.clients@teching.com)  
[www.techniques-ingénieur.fr](http://www.techniques-ingénieur.fr)

## LES AVANTAGES TECHNIQUES DE L'INGÉNIEUR

Le droit d'accès, annuel ou pluriannuel, permet une consultation illimitée des ressources documentaires sélectionnées, ainsi que le téléchargement des versions PDF des articles de référence ou fiches pratiques inclus dans ces ressources. Les droits d'accès sont proposés en monoposte ou multiposte.

### ■ ACTUALISATION PERMANENTE

Mises à jour permanentes, publication de **nouveaux articles** de références et fiches pratique : un contenu complet sur le sujet qui vous intéresse, des alertes par email.

### ■ DES SERVICES INCLUS

En plus de l'accès aux ressources documentaires, chaque souscription offre un **accès privilégié** à un ensemble de services.

### ■ MOBILITÉ

Votre abonnement étant **100 %** web, vous pouvez le consulter à tout moment, sur n'importe quel ordinateur ou sur nos versions iPad et Android.



Pour accompagner vos équipes et projets,  
**CHOISISSEZ**  
les offres de formation et conseil

## MONTEZ EN COMPETENCE

- Des formations personnalisées, réalisées au sein de votre établissement et à vos dates
- Un accompagnement à la mise en conformité réglementaire
- Des missions d'audit et de recommandations techniques

## LES ENGAGEMENTS **TECHNIQUES DE L'INGÉNIEUR**

- Un réseau d'experts reconnus pour vous conseiller
- Une veille scientifique et technique pour mieux décider
- Les dernières obligations HSE pour être en règle
- Les clés en management des hommes et des projets pour gagner en efficacité

Consultez l'intégralité  
des programmes sur le site  
de Techniques de l'Ingénieur,  
espaces **FORMATION** et **CONSEIL**

[www.techniques-ingenieur.fr](http://www.techniques-ingenieur.fr)



RESSOURCES  
DOCUMENTAIRES



FORMATION



CONSEIL