

# DEBUTER LA MESURE VIBRATOIRE

Document réalisé par :

Jacky DUMAS  
01dB-STELL (Groupe MVI technologies)  
Directeur Marketing  
565 rue de sans souci  
69760 LIMONEST  
Tél : 04 72 20 91 00  
Fax : 04 72 20 91 01  
E-mail : jacky.dumas@01db-stell.com

&

Bruno BENNEVAULT  
01dB-STELL (Groupe MVI technologies)  
Support Produits Multivoies  
11 Allée des Mouettes  
33600 PESSAC  
Tél & Fax : 05 56 07 13 85  
E-mail : bruno.bennevault@01db-stell.com

1. DEFINITION THEORIQUE D'UNE VIBRATION.....	3
1.1. Vibration sinusoïdale .....	3
1.2. Fréquence / Amplitude .....	3
1.3. Vibrations périodiques .....	3
1.4. Vibrations aléatoires .....	4
2. DESCRIPTION DES VIBRATIONS .....	4
2.1. Logarithme.....	4
2.2. Niveau en décibel - dB.....	5
2.3. Niveau d'accélération .....	5
2.4. Niveau de vitesse .....	5
2.5. Niveau de déplacement.....	5
2.6. Calcul des niveaux.....	5
2.7. Application .....	6
3. ACCELERATION, VITESSE, DEPLACEMENT .....	6
4. RESONANCES liées aux vibrations mécaniques .....	7
5. APPLICATIONS des vibrations.....	8
5.1. Analyse structurelle .....	9
5.2. Test de vibration .....	9
5.3. Surveillance de l'état des machines et diagnostic des défauts .....	9
5.4. Mesure des vibrations appliquées à l'homme .....	9
6. INSTRUMENTATION .....	10
6.1. Les capteurs de vibration .....	10
6.1.1. Sonde de proximité à Courant de Foucault .....	10
6.1.2. Sonde capacitive.....	10
6.1.3. Potentiomètre de position .....	10
6.1.4. Bobine mobile .....	10
6.1.5. Vélocimètre Laser à effet Doppler .....	10
6.1.6. Capteur piézorésistif .....	10
6.1.7. L'accéléromètre piézo-électrique .....	11
6.1.8. L'accéléromètre à électronique intégrée.....	11
6.1.9. Fonctionnement des accéléromètres piézo-électriques avec ou sans électronique intégrée.....	12
6.1.10. Capteur de force et marteau de choc .....	15
6.2. Les conditionneurs .....	16
6.3. Les calibreurs .....	17
6.4. Le mesureur de vibrations .....	18
6.5. Les analyseurs de fréquence .....	18
6.5.1. Spectromètres.....	18
6.5.2. Analyseur analogique.....	19
6.5.3. Analyseur numérique .....	19
7. METROLOGIE .....	21
7.1. La mesure du niveau global .....	21
7.2. L'analyse spectrale.....	21
7.3. Le spectre.....	22

## 1. DEFINITION THEORIQUE D'UNE VIBRATION

La norme ISO 2041 « Vibrations et chocs - Vocabulaire (Août 1990) » définit la notion de vibration : Variation avec le temps de l'intensité d'une grandeur caractéristique du mouvement ou de la position d'un système mécanique, lorsque l'intensité est alternativement plus grande et plus petite qu'une certaine valeur moyenne ou de référence.

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

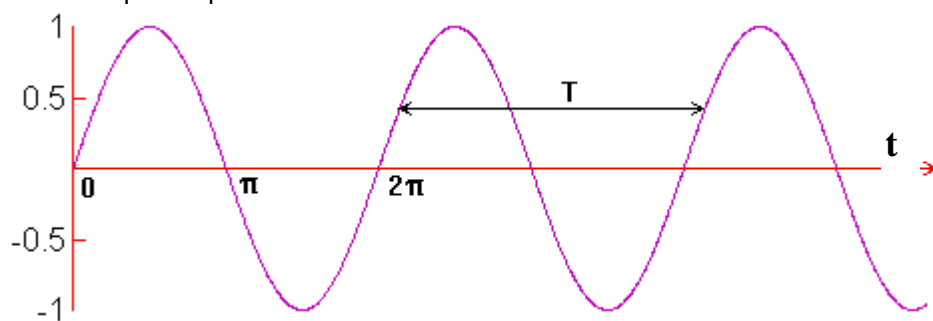
Les textes de normalisation AFNOR relatifs aux vibrations sont :

NF E 90-001, NF E 90 002, NF E 90-xxx.

### 1.1. Vibration sinusoïdale

La sinusoïde : C'est la forme d'onde la plus simple à caractériser. Cette forme d'onde particulière, peut se visualiser comme le mouvement de la projection verticale de l'extrémité d'une aiguille d'une horloge, ou le mouvement de translation d'un système masse – ressort non amorti. La période  $T$  correspond à un tour complet de l'aiguille ou au temps que met la masse pour faire un aller retour.

Une sinusoïde est une courbe alternative, de valeur moyenne nulle, représentée par une fonction mathématique simple.



### 1.2. Fréquence / Amplitude

Une vibration harmonique est caractérisée par :

sa **période  $T$** , durée correspondant à l'intervalle de temps entre deux positions successives identiques; l'unité s'exprime en secondes, dont le symbole est s .

sa **fréquence  $f$** , qui est le nombre de cycles par seconde, et qui est l'inverse de la période  $T$ : L'unité

est le Hertz (de symbole Hz, de dimension  $s^{-1}$ ).  $f = \frac{1}{T}$ ;

Son **amplitude** maximale ou valeur de crête, valeur absolue maximale de la vibration ;

La vibration instantanée  $V(t)$  peut s'écrire :  $V(t) = V_{\max} \sin(\omega t + \varphi)$  ; où :

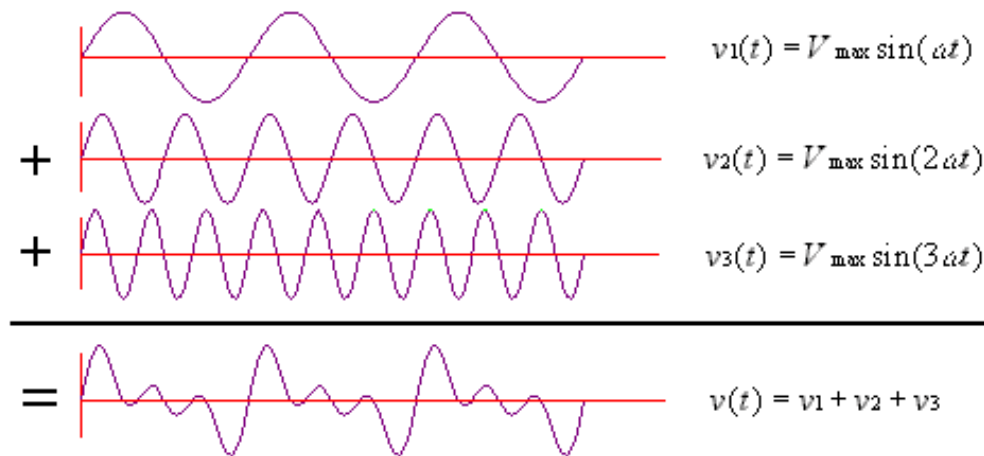
- $V_{\max}$  est la valeur maximale atteinte par la vibration appelée aussi valeur crête,
- $\omega$  est une grandeur liée à la fréquence du signal. On l'appelle la pulsation. On a :  $\omega = 2 \pi f$ .
- $\varphi$  est appelée la phase à l'origine des temps, elle caractérise l'amplitude du signal à l'instant  $t=0$ .

### 1.3. Vibrations périodiques

Le motif d'une vibration **périodique** consiste en la superposition, c'est-à-dire l'addition algébrique d'une vibration pure **fondamentale** et de vibrations pures **harmoniques**.

Les fréquences des harmoniques sont des multiples entiers de celle du fondamental.

Par exemple, le mouvement d'un piston d'un moteur à combustion interne génère des oscillations harmoniques.



#### 1.4. Vibrations aléatoires

La forme d'onde des vibrations n'a pas toujours une structure aussi simple que celle des vibrations pures et des vibrations harmoniques. Très souvent, on ne peut plus y distinguer la répétition d'un motif. La forme du signal vibratoire évolue au contraire constamment de manière anarchique. Ce sont les **vibrations aléatoires**

## 2. DESCRIPTION DES VIBRATIONS

Décrire les vibrations, c'est donner les valeurs d'un certain nombre de paramètres caractéristiques, amplitude, fréquence, etc... L'important domaine de valeurs que peuvent prendre les grandeurs vibratoires justifie l'utilisation d'échelles et de grandeurs logarithmiques. Ces grandeurs logarithmiques correspondent au logarithme du rapport des valeurs de deux grandeurs de même espèce.

#### 2.1. Logarithme

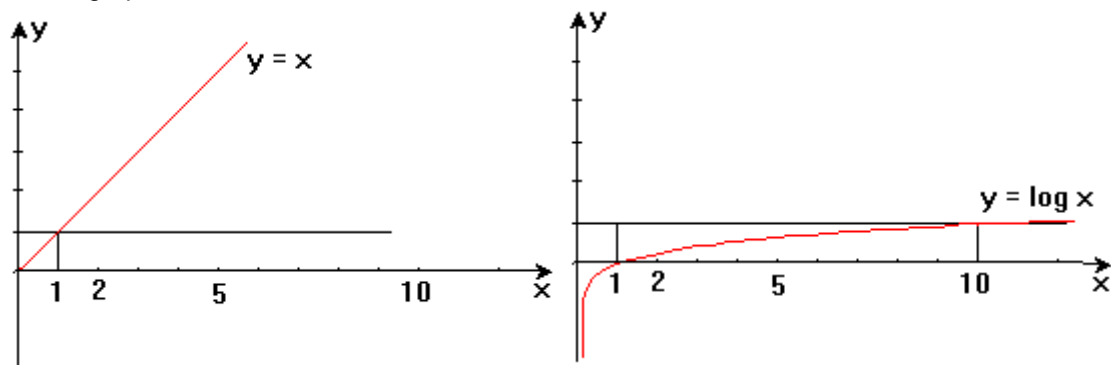
L'échelle logarithmique permet de compresser une gamme de valeurs souvent trop large pour que ces valeurs soit discernées entre elles ; ainsi elle peut être assimilée à une balance capable de peser avec la même échelle une mouche et un dinosaure ! Parmi les propriétés de la fonction logarithme, on peut noter que :

le logarithme d'une valeur positive peut être négatif;

le logarithme de la somme n'est pas égal à la somme des logarithmes.

La fonction logarithme transforme l'ECHELLE LINEAIRE en ECHELLE LOGARITHMIQUE, souvent plus pratique.

L'opérateur « logarithme » transforme une multiplication en addition et permet de représenter sur un même graphe de très fortes valeurs et de très faibles.



## 2.2. Niveau en décibel - dB

De manière générale, le **niveau  $L$**  en décibels (noté dB, dixième du Bel) d'une vibration  $V$ , est par définition dix fois le logarithme décimal du rapport de  $V$  à une valeur de référence  $V_{ref}$  :

$$Lv = 10 \log_{10} \frac{V}{V_{ref}}$$

Cette définition s'applique à toutes les grandeurs physiques proportionnelles à la puissance. La notation  $L$ , le plus souvent utilisée pour désigner un niveau, provient de l'anglais "level", traduction du mot "niveau". En France, on utilise aussi quelquefois la notation  $N$ .

## 2.3. Niveau d'accélération

Le niveau d'accélération en log se définit par :

$$La = 10 \log_{10} \frac{A}{A_{ref}} \text{ où } A_{ref} \text{ est une accélération de référence qui vaut } 1 \mu\text{m/s}^2 = 10^{-6} \text{ m/s}^2.$$

## 2.4. Niveau de vitesse

Le niveau de vitesse en log se définit par :

$$Lv = 10 \log_{10} \frac{V}{V_{ref}} \text{ où } V_{ref} \text{ est une vitesse de référence qui vaut } 1 \text{ nm/s} = 10^{-9} \text{ m/s}$$

## 2.5. Niveau de déplacement

Le niveau déplacement en log se définit par :

$$Ld = 10 \log_{10} \frac{D}{D_{ref}} \text{ où } D_{ref} \text{ est un déplacement de référence qui vaut } 1 \text{ pm} = 10^{-6} \mu\text{m}$$

## 2.6. Calcul des niveaux

Une des propriétés de la fonction logarithme est la suivante :

$$\log(x^n) = n \log(x)$$

En présence de vibrations aléatoires, ce sont les énergies vibratoires qui s'ajoutent. On n'a pas pour autant le droit d'additionner leurs niveaux en dB ! En effet, le logarithme d'une somme n'est pas égal à la somme des logarithmes (qui correspond au logarithme du produit !). Soit les vibrations  $v_1$  et  $v_2$ . En termes de niveaux énergétiques, on a par définition :

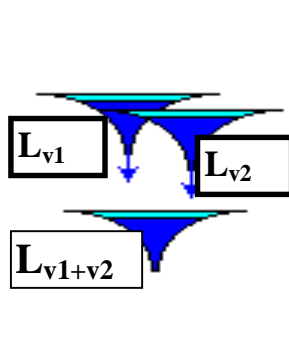
$$Lv_1 = 10 \log_{10} \frac{V_1^2}{V_{ref}^2}, \text{ et } Lv_2 = 10 \log_{10} \frac{V_2^2}{V_{ref}^2}$$

Soit  $V^2$  la somme énergétique des vibrations :  $V^2 = V_1^2 + V_2^2$

$$\text{on a alors le niveau énergétique : } Lv = 10 \log_{10} \frac{V^2}{V_{ref}^2} = 10 \log_{10} \left( \frac{V_1^2 + V_2^2}{V_{ref}^2} \right)$$

c'est à dire :  $Lv = 10 \log_{10} (10^{Lv_1/10} + 10^{Lv_2/10})$  Cette relation se généralise à un nombre quelconque de composantes.

## 2.7. Application



$L_{v1}$	$L_{v2}$	$L_{v1+v2}$
80	30	80.0
80	50	80.0
80	60	80.0
80	70	80.4
80	77	81.8
80	79	82.5
80	80	83.0

Le tableau ci-contre présente quelques paires de niveaux, avec le niveau résultant.

Dans le cas particulier de deux niveaux égaux, le niveau résultant vaut 3 dB de plus. Pour N niveaux égaux, le niveau résultant vaut  $10 \log_{10} N$  de plus.

En pratique, lorsque la différence des deux niveaux est égale ou supérieure à 10 dB, on ne tient plus compte du niveau le plus faible car usuellement les incertitudes sur les niveaux sont de l'ordre du demi-décibel.

L'échelle logarithmique est très employée en vibration même si la valeurs restent exprimées en unités physiques.

Les valeurs en dB sont principalement utilisées pour quantifier une isolation, un facteur de crête.

## 3. ACCELERATION, VITESSE, DEPLACEMENT

↳ Dans le cas d'une vibration périodique dont la forme d'onde est du type  $v(t) = V_{\max} \sin(\omega t)$ , et prenant pour variable caractéristique le déplacement  $x$  par rapport à la position d'équilibre, la forme d'onde devient :  $x(t) = X_{\max} \sin(\omega t)$  ou encore  $x(t) = X_{\max} \sin(2\pi f t)$ .  
Le déplacement s'exprime en m, ou plus couramment en mm, ou en  $\mu\text{m}$ .

↳ La vitesse  $v$  qui caractérise l'accroissement de position par unité de temps se décrit par la dérivée du déplacement  $v = \frac{dx}{dt}$  ce qui donne la fonction de vitesse suivante :

$$v(t) = \omega X_{\max} \cos(\omega t) = V_{\max} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right).$$

Cette équation montre que la vitesse est en avance de phase de  $90^\circ$  sur le déplacement.

La vitesse s'exprime en m/s ou mm/s.

↳ L'accélération qui caractérise l'accroissement de vitesse par unité de temps se décrit par la dérivée de la vitesse ou la double dérivée du déplacement  $a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2}$ , ce qui donne la fonction d'accélération suivante :

$$a(t) = -\omega^2 X_{\max} \sin(\omega t) = A_{\max} \sin(\omega t + \pi).$$

Cette équation montre que l'accélération est en avance de phase de  $180^\circ$  sur le déplacement et donc de  $90^\circ$  sur la vitesse.

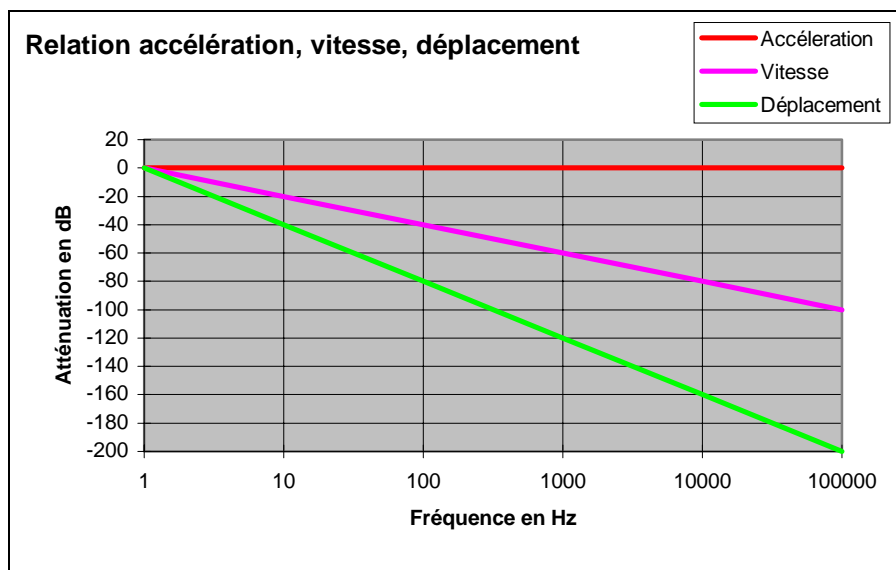
L'accélération s'exprime en  $\text{m/s}^2$  ou en g ( $1g = 9.81 \text{ m/s}^2$ ).

Donc pour les signaux sinusoïdaux, déplacement, vitesse et accélération sont reliés mathématiquement par une fonction de la fréquence et du temps. Sans tenir compte de la phase du signal, comme c'est le cas pour des intégrations dans le temps (le contraire de la dérivée), la vitesse peut être obtenue en divisant le signal accélération par un facteur proportionnel à la fréquence

$$v = \frac{a}{2\pi f} (= \int a \cdot dt) \text{ et le déplacement par un facteur proportionnel au carré de la fréquence}$$

$$d = \frac{a}{4\pi f^2} (= \int v \cdot dt) .$$

Le graphe ci-après montre les relations dans le domaine de fréquence pour un signal sinusoïdal.



On voit l'intérêt d'une échelle log-log pour passer d'un paramètre à un autre.

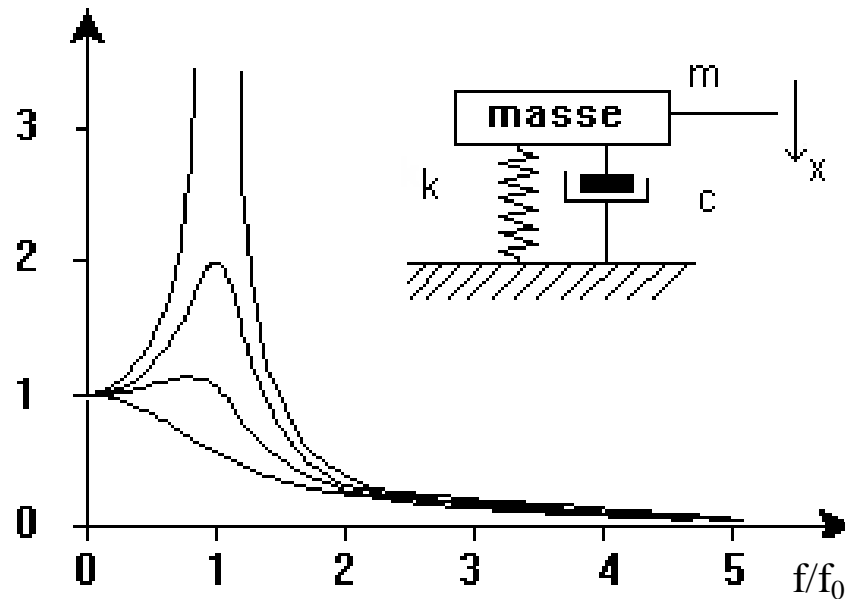
On constate que l'accélération sera prédominante aux fréquences élevées, et que le déplacement sera prépondérant aux très basses fréquences.

## 4. RESONANCES liées aux vibrations mécaniques

Les vibrations mécaniques sont à l'origine d'une grande part des problèmes industriels. Ces vibrations sont souvent symbolisées par un ensemble d'oscillateurs constitués de masses, de ressorts et d'amortisseurs.

La réponse d'un oscillateur est la somme d'oscillations amorties (réponse transitoire) et d'oscillations forcées (réponse permanente : sans amortissement). Lorsque la fréquence des oscillations amorties est égale à la fréquence des oscillations forcées, on assiste à des phénomènes de résonance. Le schéma représente le cas d'un oscillateur simple, avec une force directement appliquée sur la masse. L'amplitude des oscillations forcées est tracée en fonction du rapport entre la fréquence des oscillations amorties et celle des oscillations forcées.

En dessous de la résonance, le terme de raideur est prépondérant dans les forces en présence. Au-dessus, c'est la masse qui oppose la plus grande force à la force d'excitation. Les différentes courbes représentent plusieurs cas de rapport de l'amortissement sur la masse.



L'équation de mouvement libre prend la forme suivante :

$m \frac{d^2x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + kx = 0$  avec  $m$  = masse ;  $c$  = coefficient de frottement visqueux ;  $k$  = raideur et  $x$  le déplacement par rapport à la position d'équilibre.

On définit :

- la fréquence naturelle ou fréquence propre du système conservatif associé (sans amortissement) :

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

- L'amortissement critique :  $c_c = 2\sqrt{km}$

- Le facteur d'amortissement :  $\zeta = \frac{c}{c_c} = \frac{c}{2\sqrt{km}}$

- Le facteur d'amplification (à la résonance) : pour  $\zeta < 0.1$ ;  $Q \cong \frac{1}{2\zeta}$

- Le coefficient d'amortissement :  $\delta l = -\zeta \sqrt{\frac{k}{m}}$

- La fréquence propre amortie :  $f_a = f_0 \sqrt{1 - \zeta^2}$

Dans le cas d'une force harmonique appliquée sur la masse, l'équation de mouvement devient :

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + kx = f(t) = F \sin(\omega t)$$

- On définira donc en plus la fréquence de résonance :  $f_r = f_n \sqrt{1 - 2\zeta^2}$

Cela correspond à la fréquence pour laquelle le module  $X/F$  (déplacement/force) passe par un maximum.

## 5. APPLICATIONS des vibrations



Les vibrations sont mesurées à des fins très diverses. En général, toute vibration non contrôlée est un phénomène indésirable qui augmente le bruit ou cause des défaillances mécaniques prématurées. Quatre grands domaines de mesure vibratoire peuvent être définis.

### **5.1. Analyse structurelle**

Il s'agit d'une méthode expérimentale performante se basant sur les mesures des vibrations pour déterminer le comportement dynamique d'une structure, allant des petites pales de turbine aux grands ponts. En utilisant un capteur de force et un accéléromètre, le signal d'excitation et la réponse vibratoire de la structure sont mesurés simultanément à l'aide d'un analyseur bicanal ou multivoie.

### **5.2. Test de vibration**

Pour valider la tenue réelle d'un produit à l'environnement et donc sa conception, le test de vibration est pratiqué en soumettant une structure (une caisse automobile par exemple) à de hauts niveaux vibratoires avec un excitateur vibratoire. Le niveau de vibrations est maintenu constant dans des gammes de fréquence définies. Les informations sur la réponse fréquentielle de la structure sont obtenues.

### **5.3. Surveillance de l'état des machines et diagnostic des défauts**

Dans sa forme la plus simple, une mesure du niveau global de vibration d'une machine est utilisée afin de signaler tout problème imminent. En effet, les forces internes d'une machine se caractérisent par des niveaux plus ou moins importants suivant son état (déséquilibre par exemple). Cependant, de plus amples informations sont souvent requises pour une détection fiable et précoce d'un grand nombre de défauts : Signatures fréquentielles de base et avancées. Cette technique (décrite plus loin) consiste en la mesure du spectre fréquentiel caractéristique des vibrations d'une machine en bon état, et de la surveillance de tout changement concernant les composantes spectrales. De tels changements sont le reflet d'une modification tant des éléments tournants que de la structure, et permettent le diagnostic de défauts.

### **5.4. Mesure des vibrations appliquées à l'homme**

Ce domaine concerne la mesure des vibrations transmises à l'homme. Ces vibrations peuvent provenir, par exemple de véhicules ou d'outils à main portatifs. Les niveaux de vibrations mesurées sont ainsi modifiés pour satisfaire au confort humain et aux critères de santé stipulés dans les normes internationales (ISO 2631, UIC 513).

## **6. INSTRUMENTATION**

### **6.1. Les capteurs de vibration**

Il existe plusieurs types de capteurs pour apprécier les mouvements vibratoires. La sensibilité des capteurs représente la proportionnalité de la sortie électrique exploitable (tension, charge, courant) par rapport au paramètre de vibration (accélération, vitesse, déplacement). Elle s'exprime en terme de : sortie électrique / paramètre de vibration.

#### **6.1.1. Sonde de proximité à Courant de Foucault**

Ce type de capteur ne mesure que les déplacements vibratoires relatifs. Cette sonde a une réponse aux déplacements quasi-statiques, mais a une dynamique limitée et elle nécessite souvent un calibrage sur site. De plus, la surface vibrante doit être électriquement conductrice. Une faible impédance de sortie derrière le démodulateur autorise l'emploi de grandes longueurs de câble. Ce type de capteurs est souvent monté d'origine sur les groupes turboalternateurs à paliers lisses.

#### **6.1.2. Sonde capacitive**

Ce capteur de petite dimension est libre de tout contact. Ce capteur sensible aux déplacements vibratoires relatifs a une grande sensibilité et est opérationnel sur une large gamme fréquentielle. Les inconvénients sont que la surface de vibration doit être électriquement conductrice, que la gamme dynamique de la sonde est très limitée et que la sonde est difficile à calibrer. Il faut appliquer une différence de potentiel entre la sonde et la pièce en mouvement.

#### **6.1.3. Potentiomètre de position**

Peu coûteux et de faible impédance, ce capteur est capable de mesurer les déplacements statiques. Cependant, les gammes dynamiques et fréquentielles sont très limitées et le capteur a une courte durée de vie et une faible résolution.

#### **6.1.4. Bobine mobile**

C'est un capteur de vitesse vibratoire de faible impédance électrique. Il est très limité dans ses gammes dynamique et fréquentielle (au dessus de la fréquence de résonance de suspension). Il est sensible aux champs magnétiques et est affecté par son orientation. Avec ses éléments mobiles, il est sujet à une dégradation de ses spécifications initiales. Sa plage fréquentielle va typiquement de # 10 Hz à 2 000 Hz.

#### **6.1.5. Vélocimètre Laser à effet Doppler**

C'est un capteur de vitesse relative s'appuyant sur un faisceau laser qui est envoyé vers la cible et dont la fréquence est modulée par la vibration de la surface atteinte.

Les avantages sont nombreux :

- pas de préparation de la surface
- pas de masse rajoutée
- possibilité de scruter plusieurs centaines ou milliers de points en des temps très réduits

Mais l'inconvénient majeur reste son prix ( > 130 kF) et une plage de mesure qui n'atteint encore pas celle offerte par une chaîne accélérométrique.

#### **6.1.6. Capteur piézorésistif**

Un capteur d'accélération vibratoire capable de mesurer les accélérations quasi-statiques. Les gammes de mesure, fréquentielle et dynamique, peuvent être larges. Sa résistance limitée contre les chocs en fait un capteur vulnérable. L'amortissement visqueux est nécessaire pour le protéger des chocs. Cependant, ceci amène à une compression de la gamme thermique de fonctionnement et altère les caractéristiques de phase.

De nouvelles technologies de micro-usinage améliorent les performances de tels capteurs.

### 6.1.7. L'accéléromètre piézo-électrique

Il est unanimement considéré comme le meilleur capteur disponible à ce jour pour les mesures de vibrations absolues. Il possède les propriétés suivantes :

- Utilisable sur de très grandes gammes fréquentielles
- Excellente linéarité sur une très grande gamme dynamique (typiquement 140 dB, soit 1 à  $10^8$ ).
- Le signal d'accélération peut être intégré électroniquement pour donner le déplacement et la vitesse
- Les mesures de vibration peuvent être faites sous large éventail de conditions environnementales tout en conservant une excellente précision (typiquement 250°C ; 400 °C à 700°C pour des modèles spéciaux).
- Etant lui-même générateur de charges, il est donc indépendant de toute alimentation externe.
- Nécessite malgré tout un conditionnement de sa sortie charge (appelé conditionneur de charge ou préamplificateur de charge) plus coûteux que pour les autres types de capteur.
- Aucun élément mobile, donc extrêmement durable.
- Extrêmement compact et d'un grand rapport qualité/prix.
- Ne passe pas la composante statique.

### 6.1.8. L'accéléromètre à électronique intégrée

Il est semblable à l'accéléromètre piézo-électrique à la différence qu'il possède de manière intégrée un conditionnement de charge représenté par un composant de type MOSFET. Il possède les mêmes propriétés que l'accéléromètre piézo-électrique à l'exception de :

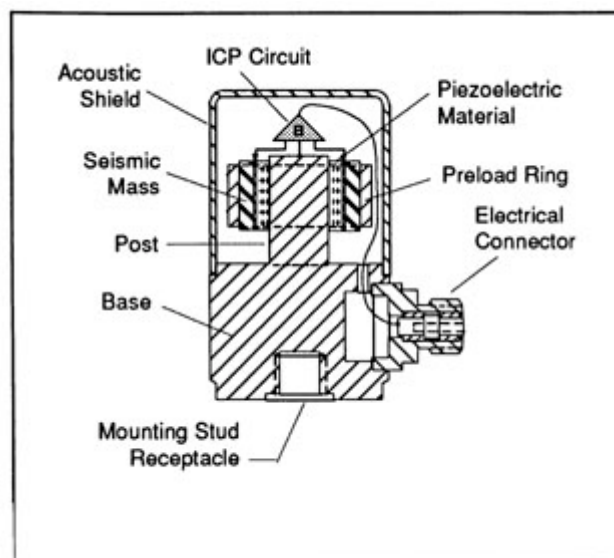
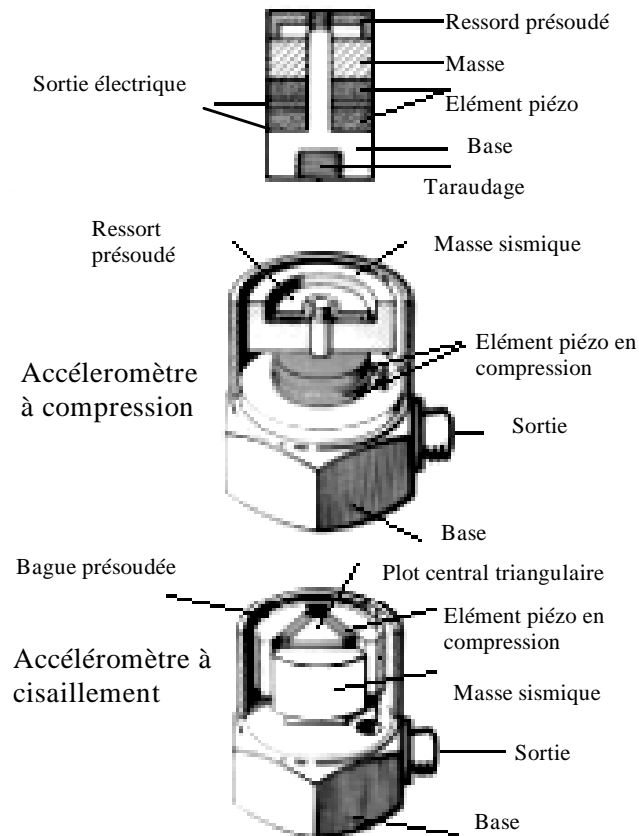
- Il est plus limité en température d'utilisation du fait de l'électronique intégrée (# 125°C)
- Il nécessite une alimentation à courant constant toutefois moins onéreuse qu'un conditionneur de charge. Le câble de liaison avec l'instrument de mesure possède deux fils comme le piézo pur. Le fil chaud transporte l'alimentation à courant constant et la modulation de tension proportionnelle à l'accélération de la surface vibrante. Une capacité sépare le signal continu de l'alimentation du signal dynamique reflet de la vibration.
- Il a une sortie à basse impédance qui autorise de plus grande longueur de câble
- Dynamique de l'électronique intégrée un peu plus faible que dans le cas d'une électronique déportée.
- Pas de réglages pour les filtres passe-haut et passe-bas.



Exemple d'accéléromètre à électronique intégrée

### 6.1.9. Fonctionnement des accéléromètres piézo-électriques avec ou sans électronique intégrée

La figure suivante montre différents modes de conception d'accéléromètres piézoélectriques



Vue en coupe

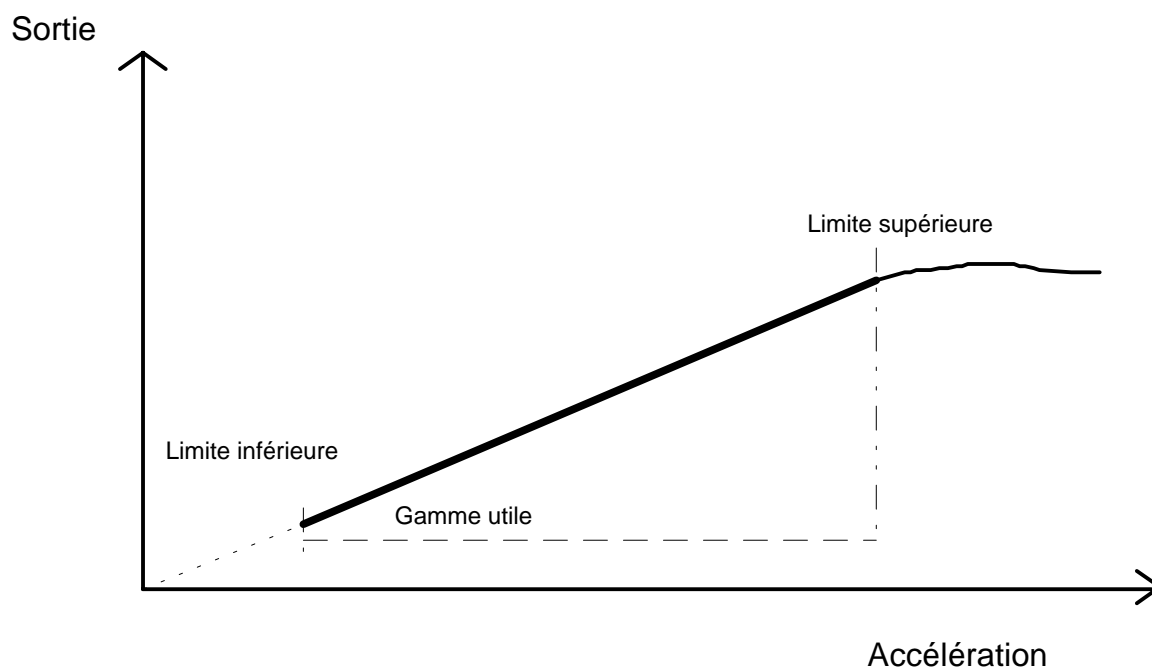
Le principe de fonctionnement est celui d'un système masse ressort amortisseur.

Sous la fréquence de résonance, la masse applique une force à l'élément piézo-électrique proportionnelle à l'accélération subie par l'embase du capteur. Le comportement est extrêmement linéaire sur une très grande plage de niveaux.

La gamme dynamique des accéléromètres piézo-électrique est limitée :

- ↳ Aux basses fréquences et aux faibles niveaux par la technologie du capteur (cisaillement ou compression et par le bruit de fond de l'électronique.) et
- ↳ Aux hautes fréquences et aux niveaux élevés par la masse de l'accéléromètre, par la non linéarité entre la sortie de charge ou de tension et l'accélération physique générée. Egalement, la limite supérieure est donnée par la solidité structurelle de l'accéléromètre. Le principe de fonctionnement est celui d'un système masse-ressort-amortisseur.

Sous la fréquence de résonance, la masse applique une force à l'élément piézo-électrique proportionnelle à l'accélération subie par l'embase du capteur. Le comportement est extrêmement linéaire sur une très grande plage de niveaux.



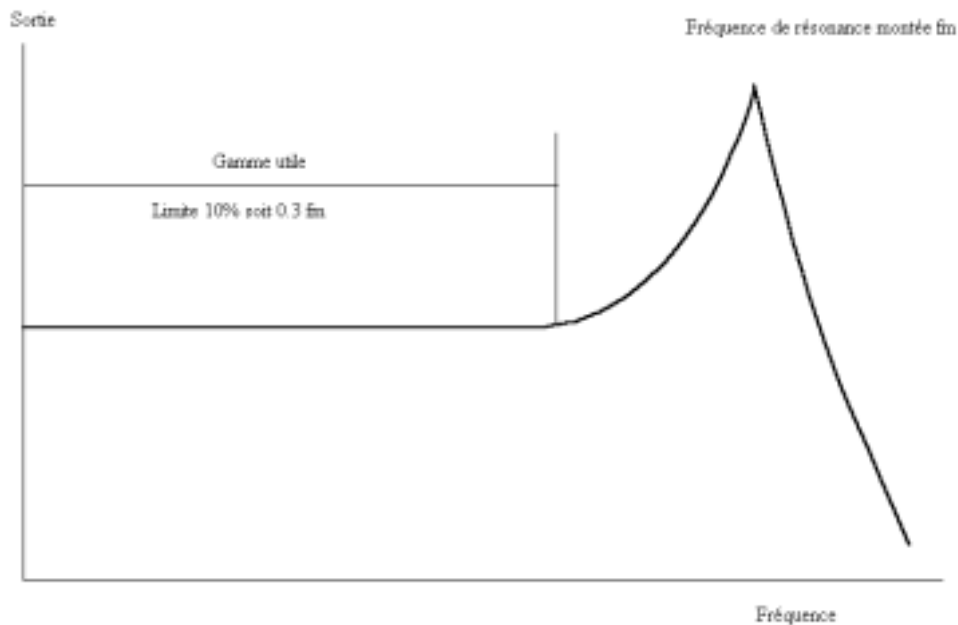
La sensibilité d'un accéléromètre piézo-électrique s'exprime en  $\text{pC/m/s}^2$  ou en  $\text{pC/g}$ , celle des accéléromètres à électronique intégrée en  $\text{mV/m/s}^2$  ou en  $\text{mV/g}$ .

**Attention** : la masse du capteur ne doit affecter le comportement dynamique de la pièce en vibration. Il ne faut pas que la masse du capteur dépasse le dixième de la masse dynamique de la structure.

Plus un accéléromètre est petit, moins il est sensible et inversement.

La gamme de fréquence est limitée en bas par l'adaptation d'impédance avec le conditionneur mais quelque soit le réglage, les accéléromètres de type piézo-électrique ne passent pas la composante continue. Aux hautes fréquences, il faudra se limiter à  $1/2$  ou  $1/3$  de la fréquence de résonance.

Plus un accéléromètre est petit, plus sa gamme de fréquence monte haut et inversement.

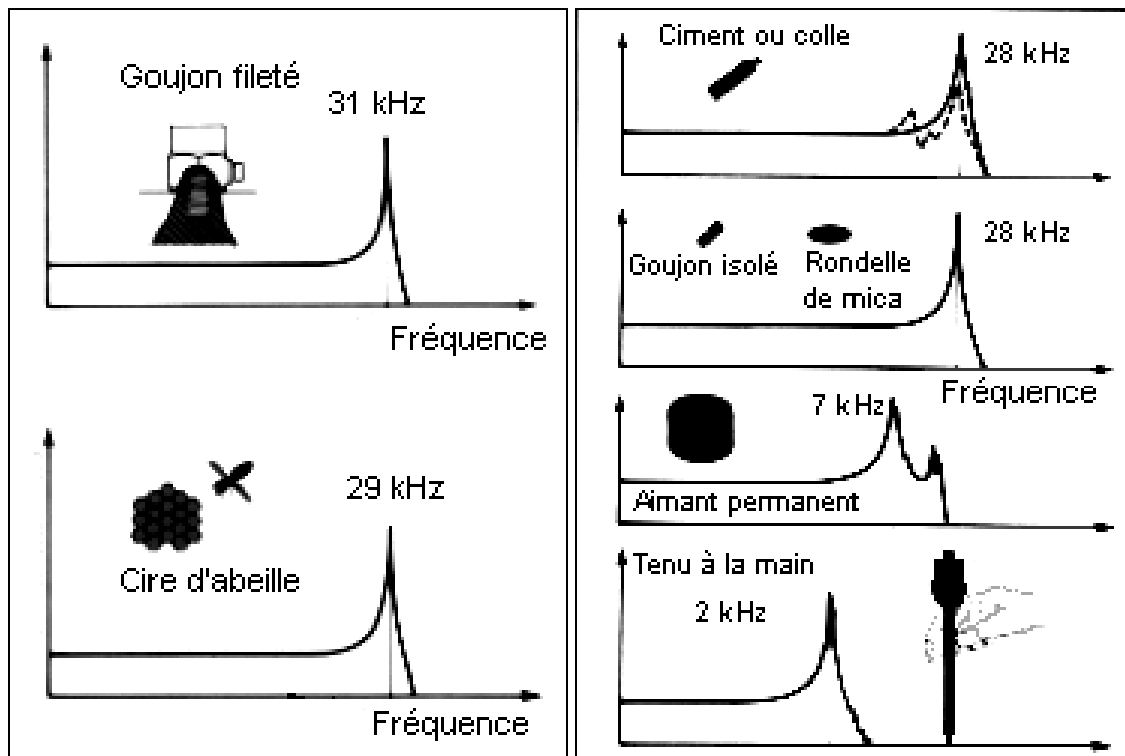


Le montage de l'accéléromètre doit se faire dans la direction principale de sensibilité du capteur. Il doit se faire au plus près de la zone vibrante d'intérêt.

L'interfaçage avec la surface doit se faire le mieux possible pour ne pas rajouter de résonance de montage.

Différents types de montage sont possibles. Les figures ci-après montrent les différentes performances.

On constate bien que pour un même accéléromètre, la plage réelle d'utilisation risque d'être sensiblement différente de celle figurant sur la fiche d'étalonnage si on ne prend pas soin du mode de montage.



Influence du mode de montage d'un accéléromètre

#### 6.1.10. Capteur de force et marteau de choc

Les capteurs de force font appel à un élément piezo-électrique tout comme les accéléromètres. L'électronique peut être intégrée. La sensibilité s'exprime soit en pC/N soit en mV/N. Couplés avec un accéléromètre, ils servent à la mesure de l'impédance mécanique ponctuelle ( $Z = \text{Force/Vitesse}$ ). Généralement ils permettent la mesure de l'effort injecté dans une structure soit à l'aide d'un marteau ou d'un exciteur.

La taille du marteau et la nature de l'embout permettent d'optimiser le contenu fréquentiel de l'effort injecté dans la structure.



Exemple de marteau de force

## 6.2. Les conditionneurs

Les conditionneurs d'accéléromètre piézo-électrique ou à électronique intégrée proposent soit une simple conversion charge/tension ou tension/tension. De plus, des gains d'amplification et d'atténuation sont souvent disponibles. Des intégrations simples et doubles permettent également d'obtenir en sortie les signaux de vitesse ou de déplacement. Enfin, des fonctions de pré-filtrage du signal permettent souvent d'optimiser le signal avant enregistrement et/ou analyse.



Exemple de conditionneur modulaire (charge, électronique intégrée, filtres, alarme, visualisation du niveau,...) en rack ou boîtier



Exemple de conditionneurs avec gains, intégration, et filtres



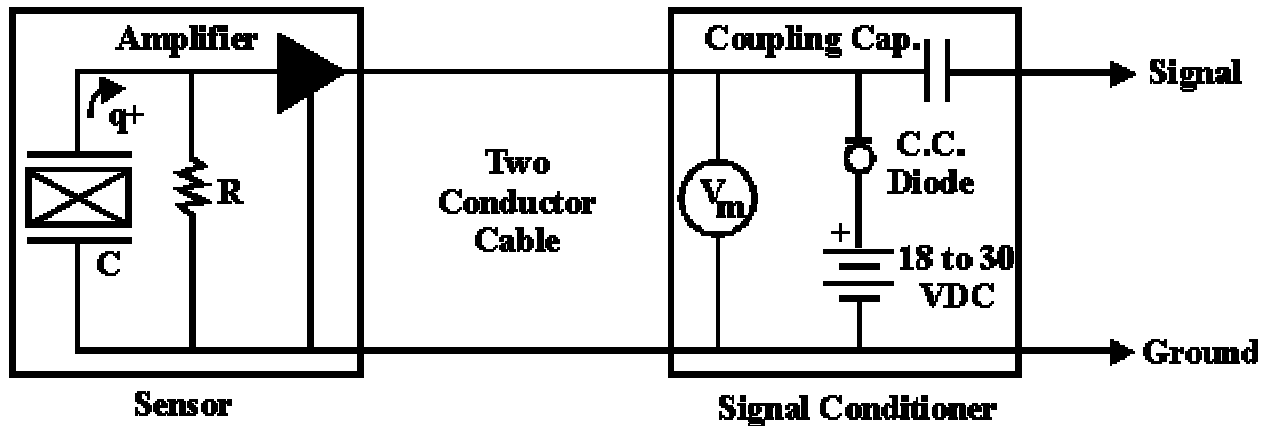


Schéma électrique

### 6.3. Les calibreurs

Généralement, la vérification de la sensibilité de l'accéléromètre s'effectue avec un calibre mono fréquence et mono niveau. La fréquence est généralement égale à 159,2 Hz ; elle correspond à 1000 rd/s, ce qui permet d'avoir des relations simples entre l'accélération, la vitesse et le déplacement.

Le niveau est généralement égal à 10 m/s<sup>2</sup> en valeur efficace (RMS) soit 1,02 g. Il est donc égal par les relations de fréquence à 10 mm/s pour la vitesse ou 10µm pour le déplacement. L'incertitude est de l'ordre de 3 à 4 %



Exemple de calibreur de terrain

La méthode absolue de vibration s'appuie sur l'interférométrie laser.

La sensibilité à la (ou à quelques fréquences discrètes) est donnée avec une incertitude de 0.5% environ.

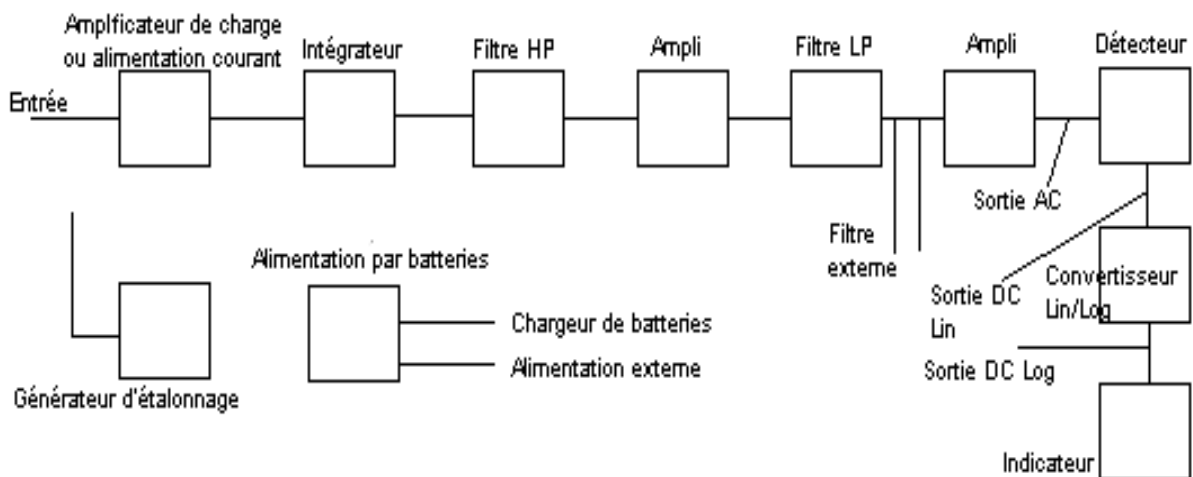
D'autres méthodes utilisant un excitateur de vibration et un générateur avec une boucle de contre réaction asservie par un capteur de référence sont pratiquées. Un signal sinusoïdal balayé est utilisé. Cette méthode de laboratoire permet un étalonnage avec une incertitude de 1 à 1.2%

## 6.4. Le mesureur de vibrations

Il s'apparente à un sonomètre comme dans la mesure acoustique. Il mesure généralement les niveaux globaux. Il permet de sortir les niveaux d'accélération, de vitesse et de déplacement.

Le schéma bloc montre les différentes fonctions possibles d'un mesureur de vibration.

L'entrée est connectée à la sortie de l'accéléromètre. L'intégrateur permet d'obtenir la vitesse ou le déplacement. Des filtres passe-haut et passe-bas peuvent être ajustés pour limiter la gamme de fréquence de mesure du niveau global. Les amplificateurs permettent de garder la justesse métrologique après filtrage. Le détecteur est un circuit de détection des valeurs efficace, crête ou crête-crête. Le convertisseur Lin-Log permet d'afficher le niveau sur une échelle Logarithmique. Enfin, un filtre externe peut être connecté pour obtenir une analyse en fréquence du signal.



## 6.5. Les analyseurs de fréquence

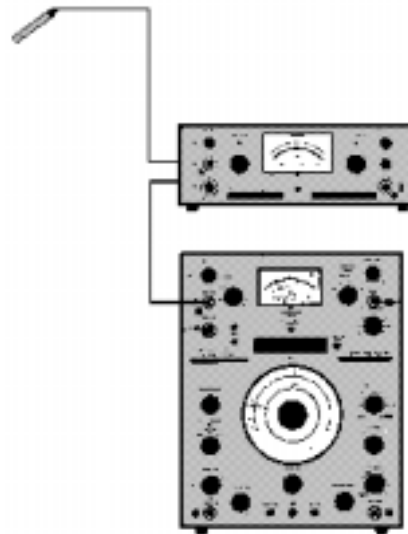
### 6.5.1. Spectromètres

Un spectromètre est un appareil possédant un ensemble de filtres d'octave ou de tiers d'octave ou de bandes de fréquence fines



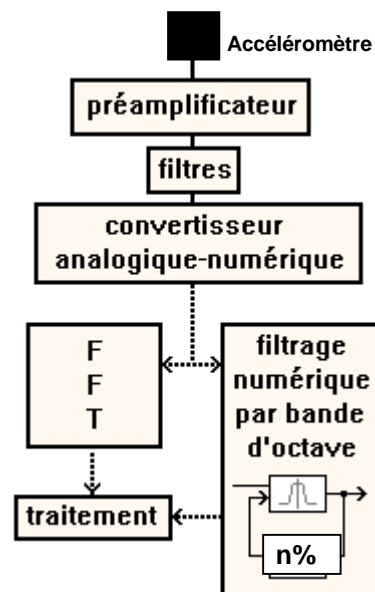
### 6.5.2. Analyseur analogique

En vibration appliquée, un analyseur ou chaîne de mesure analogique comprend les organes suivants : un accéléromètre de mesure avec son préamplificateur d'adaptation d'impédance ; un amplificateur calibré - incluant un atténuateur par pas de 10 dB pour adapter la sensibilité ; un spectromètre; un second amplificateur calibré - également avec atténuateur -; un détecteur de valeur efficace, c'est-à-dire un dispositif électronique effectuant le calcul de cette valeur selon sa définition; un dispositif d'affichage des résultats d'analyse.



### 6.5.3. Analyseur numérique

Un analyseur numérique comprend toujours un accéléromètre et un amplificateur analogique, mais le signal en sortie de ce dernier est converti sous forme numérique et toutes les opérations d'analyse se font numériquement. On dispose ainsi d'analyseurs de Fourier, dont les résultats sont comparables à un ensemble de filtres à bande étroite étagés régulièrement en fréquence. Le plus souvent, on applique un algorithme dit Transformée Rapide de Fourier. On dispose aussi de filtres numériques récurrents normalisés permettant l'analyse par fraction d'octave.



## ANALYSEURS NUMERIQUES



Système multivoie OROS - OR25

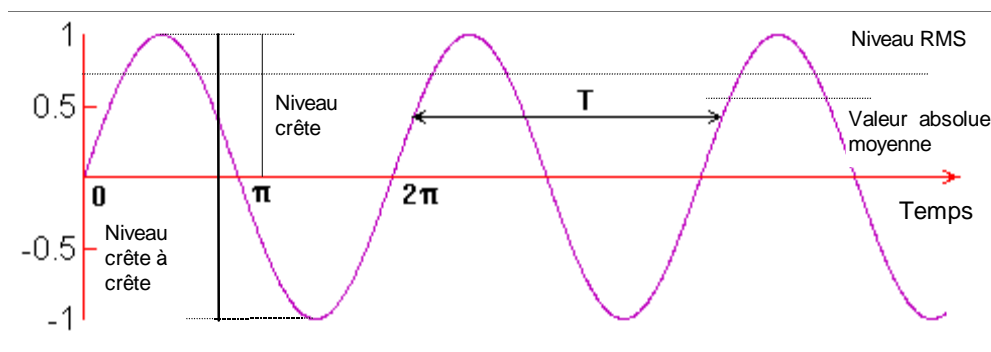


Système bivoie 01dB - Symphonie

## 7. METROLOGIE

### 7.1. La mesure du niveau global

L'amplitude d'une vibration qui est le paramètre décrivant l'importance de la vibration peut être évaluée de différentes façons. Sur le graphe ci-après, sont indiquées les relations entre la valeur crête à crête, la valeur crête, les valeurs moyenne et efficace pour une vibration pure.



La valeur efficace se détermine par la formule suivante :  $V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt}$

Elle correspond à une moyenne énergétique.

La valeur absolue moyenne se détermine par :  $V_m = \frac{1}{T} \int_0^T |x| dt$

La valeur moyenne correspond à la composante continue

**Pour un signal sinusoïdal**, les relations entre les différents paramètres sont les suivants :

- $V_{rms} = 0.707 V_c$
- $V_{rms} = 1.11 V_m$
- $V_{cc} = 2 V_c$

avec  $V_c$  comme vibration crête et  $V_{cc}$  comme vibration crête à crête.

Il est évident que pour une vibration aléatoire ou harmonique ces relations ne sont plus aussi évidentes. Le rôle des détecteurs dans un système de mesure est alors important car il doit qualifier tout type de signal.

Le facteur de crête est défini par la relation :  $F_c = V_c/V_{rms}$   
C'est un indicateur sans dimension. Il peut s'exprimer en dB.

### 7.2. L'analyse spectrale

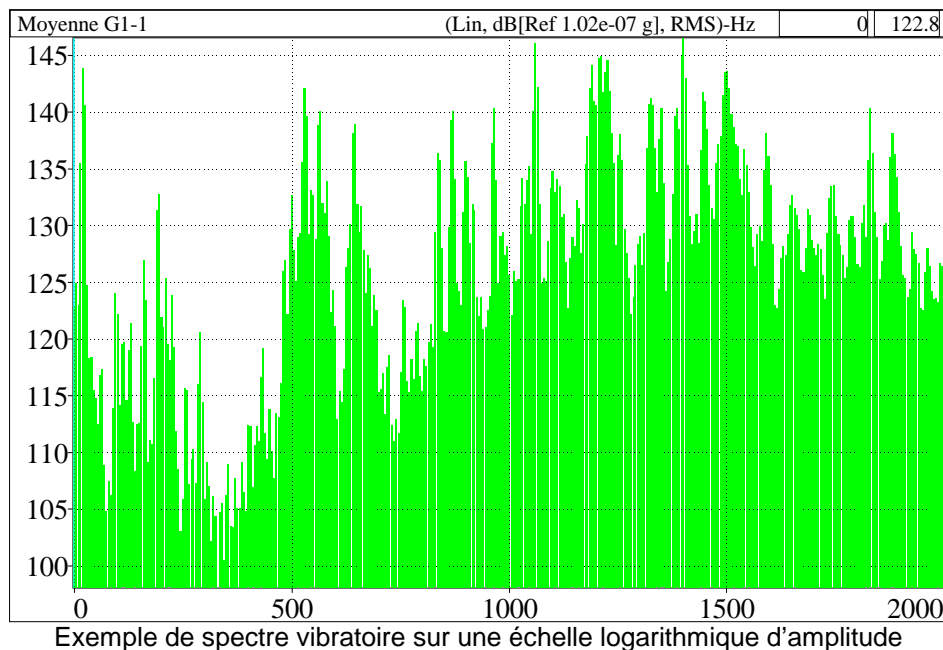
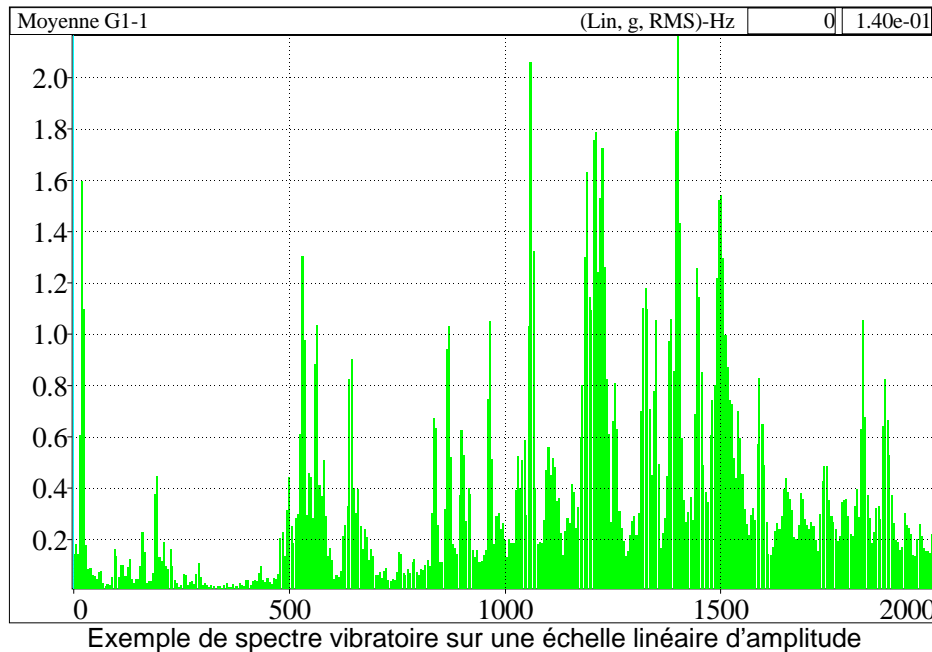
Une vibration harmonique est composée d'une composante fondamentale et d'un cortège d'harmoniques. Pour décrire complètement une telle vibration, il faut spécifier le niveau et la fréquence de chaque composante. L'**analyse spectrale** est la technique de détermination de ces valeurs, par calculs ou mesures. On doit à Fourier une méthode analytique de décomposition d'une vibration périodique en ses composantes : c'est la série de Fourier. Plus généralement, on peut démontrer que tout phénomène périodique, par exemple une vibration, est décomposable en vibrations pures. Ainsi une vibration non périodique est considérée comme une vibration périodique dont la période devient infiniment grande. Il peut être alors décrit sous forme d'une somme infinie de composantes fréquentielles infiniment proches. C'est la transformation de Fourier qui permet ce calcul. Les travaux mathématiques de Fourier (1768-1830) ont permis le développement des sciences, en particulier du traitement de signal.

### 7.3. Le spectre

Le spectre d'une vibration est l'ensemble des données de niveaux et de fréquences des vibrations pures le composant. Il est habituellement représenté sous la forme d'un graphique. Un spectre est obtenu par analyse spectrale, par exemple en utilisant les algorithmes de Fourier.

Pourquoi le spectre d'une vibration pure ne comporte-t-il qu'une raie ? Quelle est l'allure caractéristique d'un spectre d'une vibration harmonique ?

Par définition une vibration pure ne comporte qu'une seule fréquence, donc une seule raie. Une vibration harmonique est une somme de vibrations pures, donc l'allure du spectre associé est un ensemble de raies, celles des vibrations pures sommées.



L'intérêt de l'échelle logarithmique est de concentrer les informations de forte amplitude tout en permettant l'observation des composantes de faible niveau sur un même graphe.