

Comment capter les vibrations ?

4
Patrick Fayet
 01dB-Metrvib
 200, chemin des Ormeaux
 69760 Limonest
 E-mail : patrick.fayet@areva.com

Résumé

La description des vibrations donne les différentes grandeurs physiques permettant de les caractériser : accélération, vitesse et déplacement. Ainsi, trois familles de capteurs conduisent à la mesure des vibrations, et dans chaque famille, une revue des diverses technologies montre la variété des possibilités de captation. Le choix d'un capteur de vibration est fonction de nombreux critères métrologiques et doit tenir compte des conditions de mesure avec ses perturbations et son environnement physique. Les progrès scientifiques font évoluer sans cesse tous ces types de capteurs, leur intelligence, leur taille, leur coût... permettant ainsi de mettre la mesure des vibrations au service de l'amélioration de notre vie.

Abstract

Description of vibrations is based on three different physical quantities: acceleration, velocity and displacement. So, three families of sensors allow vibration measurements and for each of them, a technology review shows the different ways of collection. The choice of a vibration sensor is made according to a lot of metrological criteria and takes into account the measurement conditions considering their perturbation and their environment. Scientific progress leads to a continuous improvement for all these sensors, especially on their capabilities, their size, their cost ... bringing to the fact that vibrations measurement helps into the quality of life.

Les vibrations, comme les ondes acoustiques, peuvent être caractérisées par leurs fréquences et par leurs amplitudes. Il est donc nécessaire d'avoir un instrument permettant d'obtenir simultanément ces informations et de pouvoir les utiliser facilement, sous forme analogique ou sous forme numérique.

La norme internationale 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.

La norme ISO 2041 est devenue une norme française depuis juin 1993 (NF ISO 2041). Il existe plus de 500 normes françaises et européennes concernant les vibrations pour différents domaines.

La représentation temporelle du signal vibratoire doit être suffisamment complète et d'une durée assez longue pour obtenir les informations fréquence/amplitude que

l'analyse de ce signal permettra de révéler.

On peut « capter les vibrations » en mesurant :

- l'accélération de l'objet soumis à cette vibration,
- ou sa vitesse,
- ou son déplacement.

Ces trois grandeurs ont la particularité d'être liées entre elles par des relations simples.

Dans le cas d'une vibration périodique, la forme temporelle de l'onde est du type $y(t) = Y_{\max} \cdot \sin(\omega t)$ avec ω la fréquence angulaire égale à $2\pi f$ (f : fréquence en Hz). Prenant pour variable caractéristique le déplacement « d » par rapport à la position d'équilibre, la forme d'onde devient : $d(t) = D_{\max} \cdot \sin(\omega t)$ ou encore $d(t) = D_{\max} \cdot \sin(2\pi ft)$. Le déplacement s'exprime en m, ou plus couramment en mm, ou μm .

La vitesse « v » qui caractérise l'accroissement de position par unité de temps se décrit par la dérivée du déplacement $v = dx/dt$ ce qui donne la fonction de vitesse suivante : $v(t) = \omega X_{\max} \cdot \cos(\omega t) = V_{\max} \cdot \sin(\omega t + \pi/2)$. Cette équation montre que la vitesse est en avance de phase de 90° sur le déplacement. La vitesse s'exprime en m/s ou plus couramment en mm/s.

L'accélération « a » qui caractérise l'accroissement de vitesse par unité de temps se décrit par la dérivée de la vitesse ou la double dérivée du déplacement $a=dv/dt=d^2x/dt^2$, ce qui donne la fonction d'accélération suivante : $a(t)=-\omega^2X_{\max}\cdot\sin(\omega t)=A_{\max}\cdot\sin(\omega t+\pi)$. Cette équation montre que l'accélération est en avance de phase de 180° sur le déplacement et donc de 90° sur la vitesse. L'accélération s'exprime en m/s^2 ou en g ($1\text{g}=9.81 \text{ m/s}^2$).

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 est obtenue en divisant le signal accélération par un facteur proportionnel à la fréquence : $v=a/2\pi f$ ($=fa/dt$) et le déplacement par un facteur proportionnel au carré de la fréquence : $x=a/4\pi^2f^2$ ($=fv\cdot dt$).

Le graphe de la figure 1 montre les relations dans le domaine de fréquence pour un signal sinusoïdal.

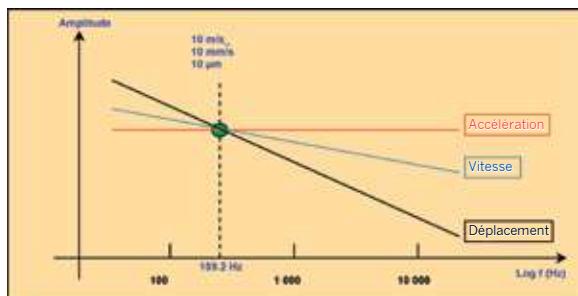


Fig. 1 : Relation fréquence/amplitude (Accélération/
Vitesse et déplacement)

L'échelle log-log du graphe de la figure 1 montre son intérêt pour passer d'une grandeur à une autre.

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

La tendance actuelle est d'utiliser des accéléromètres et de traiter le signal par intégration simple et double pour atteindre les descripteurs de vitesse et de déplacement. Cependant, une attention particulière est à porter sur la composante continue du signal qui peut se révéler utile pour connaître le positionnement de l'objet dans l'espace mais dévastatrice pour obtenir les trois descripteurs (Accélération, Vitesse et Déplacement) vibratoires en une seule mesure. Le filtrage passe-haut du signal est une solution mais très difficile à maîtriser lorsqu'une description très basse fréquence est demandée.

Les principales familles de capteurs de vibrations

Pour ces 3 grandeurs physiques à mesurer, les différentes familles de capteurs généralement utilisés sont :

- Les accéléromètres piézoélectriques

- Les accéléromètres piézorésistifs
- Les accéléromètres à fibre optique
- Les accéléromètres asservis :
 - à équilibre de couple
 - à équilibre de force
- Les accéléromètres à résonateur
- Les vélocimètres électrodynamiques
- Les vélocimètres (vibromètres) laser
- Les vélocimètres à ultrasons
- Les capteurs de déplacement inductifs
- Les capteurs de déplacement capacitifs
- Les capteurs de déplacement optiques :
 - type interférométrique
 - à triangulation laser
 - par réflexion
 - par transmission
- Les capteurs de déplacement à transformateur différentiel
- Les capteurs de déplacement à fil tendu :
 - type potentiomètre
 - type encodeur

Il existe des capteurs de toutes les formes, de toutes les tailles, pour des mesures sans contact ou en contact, à coller, à visser, mesurant de très faibles niveaux ou résistant à des chocs sévères, fonctionnant en froid cryogénique ou en ambiance nucléaire à 500°C , pouvant fonctionner sous pression, comportant ou non une électronique intégrée (actuellement limitée à 175°C) plus ou moins intelligente, à connecteur, à câble intégré, à transmission sans fil, à sortie radiale ou longitudinale, mono-axial ou triaxial, pour des fréquences élevées ou pour du quasi-statique...

Les types de vibration, c'est-à-dire les valeurs du couple amplitude-fréquence possibles, vont conditionner la plage de fonctionnement du capteur, c'est-à-dire sa sensibilité et sa bande passante.

Le type de capteur à utiliser est bien souvent déterminé par l'application à laquelle il est destiné et par son environnement : automobile, aéronautique, spatial, maintenance industrielle, laboratoires de recherche, nucléaire, pétrochimie, surveillance de bâtiment... Ces domaines d'activité ont souvent des contraintes ou des habitudes ou des normes qui définissent la connectique, les tensions utilisables, les câbles, les traitements des signaux, les durées de vie...

Les dernières générations de capteurs utilisent la technologie Silicium et ces capteurs ont atteint maintenant un niveau très bas de miniaturisation, ils peuvent ainsi être considérés comme des composants électroniques, prêts à être utilisés directement sur des cartes de circuit imprimé. Ils intègrent bien souvent une partie du conditionnement du capteur et du traitement des signaux. Ils sont du type capacitif (une des armatures du condensateur est constituée par une membrane mobile avec les vibrations) ou piézorésistif (une poutre en flexion est équipée de jauge piézorésistives). Leur utilisation en quantités importantes pour les marchés de grande diffusion ont permis de bais-

ser les prix de ces capteurs dans des proportions aussi très importantes. Ils ne sont plus un obstacle à la sophistication des produits et se retrouvent dans des applications aussi diverses que l'automobile, l'électroménager, la communication, les loisirs et jouets...

Capteurs pour l'accélération

Les accéléromètres constituent la famille la plus importante de capteurs de vibration. L'unité d'accélération est le m/s^2 (ou le $g = 9,80665 \text{ m/s}^2$ par accord international) et il n'est pas facile d'effectuer des mesures directes en mesurant distance et temps des objets en mouvement, surtout à des fréquences élevées. Il est plus facile d'accéder à cette information par une mesure indirecte, comme la mesure de la force (F) appliquée à une masse (m) soumise à cette accélération (a). La relation $F=m.a$ permet de connaître plus simplement la valeur de l'accélération : $a=F/m$.

Cette masse dite sismique est suspendue par un ressort de raideur (k) au boîtier du capteur qui est fixé sur l'objet soumis aux vibrations. Il est également possible, en mesurant le déplacement (x) de cette masse, d'accéder à la mesure de force ($F=k.x$), ce qui donnera alors la mesure d'accélération : $a=k.x/m$

Les termes (k) et (m) étant constants, une mesure du déplacement (x) de la masse sismique donnera donc directement une mesure de l'accélération des vibrations. Le schéma de la figure 2 illustre le système masse-ressort du principe des accéléromètres.

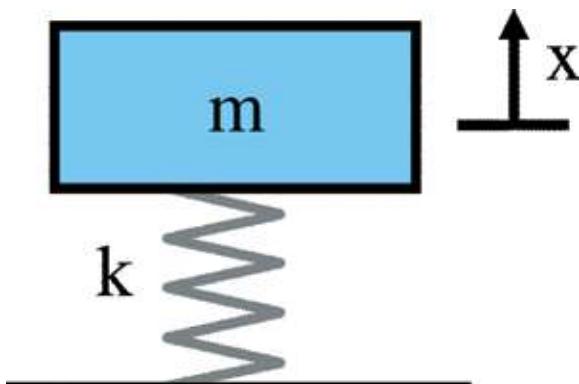


Fig. 2 : Système masse-ressort (Source Wikipedia)

Les accéléromètres piézoélectriques comportent une masse sismique qui comprime ou cisaille, suivant le type, une céramique ou un cristal piézoélectrique qui délivre des charges électriques proportionnellement à l'accélération à laquelle est soumise la masse. Le matériau piézoélectrique est à considérer comme le ressort (k) suspendant la masse (m). Ces capteurs peuvent fonctionner en ambiance sévère, dans une large gamme de fréquence et dans une vaste étendue de mesure. Toutefois, ils sont limités en basse fréquence et ne permettent pas de mesurer le continu.

Ils comportent parfois un circuit électronique miniature intégré qui peut être un amplificateur de charge sophistiqué ou un simple convertisseur de charge en tension.

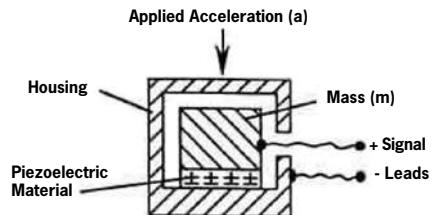


Fig. 3 : Principe de l'accéléromètre avec céramique en compression (Source : <http://www.pcb.com>)

La photo de la figure 4 montre un accéléromètre (A) avec des céramiques montées en compression utilisable dans une gamme étendue de température, à fixer avec un goujon et un accéléromètre miniature (B) ne pesant que 0,5 g avec une céramique fonctionnant en cisaillement annulaire qui est à fixer par collage. Ces 2 accéléromètres ne comportent pas d'électronique intégrée et nécessitent un amplificateur de charge pour conditionner les signaux recueillis.

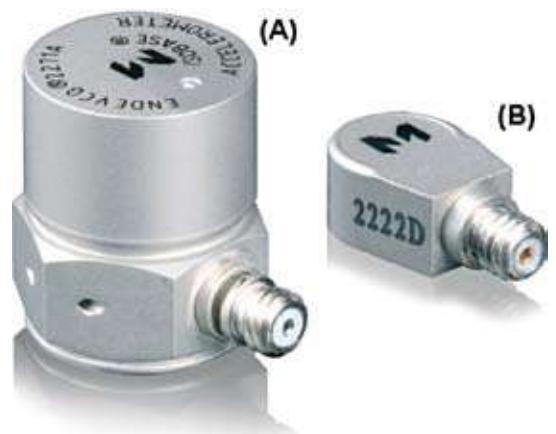


Fig. 4 : Accéléromètres (Source : Endevco)

Les accéléromètres piézorésistifs comportent une poutre souvent chargée avec une masse sismique et équipée de jauge de déformation dont la résistance varie avec la flexion de la poutre lorsqu'elle est soumise à des vibrations. Ces capteurs permettent de mesurer les faibles accélérations jusqu'à passer le continu. Ils doivent être alimentés électriquement en permanence et sont limités en température.

Les accéléromètres à fibre optique sont utilisés en milieu très sévères (explosifs ou nucléaire). Les vibrations engendrent des différences de marche ou d'intensité dans la lumière parcourant les fibres. Des cellules photoélectriques transforment ensuite ces variations en signaux électriques. Ces systèmes permettent de déporter très loin le traitement des vibrations puisque les fibres transportent facilement les informations sur de longues distances.

Dans les accéléromètres asservis, la force de rappel de la masse sismique est créée électriquement par un électro-aimant dont on mesure le courant nécessaire pour immobiliser cette masse. Ces capteurs d'une grande résolution

sont encombrants, fragiles et coûteux, mais sont utilisés lorsqu'une précision importante est recherchée comme en navigation ou en sismologie.

Les accéléromètres à résonateur comportent une poutre en quartz vibrant à sa fréquence fondamentale de flexion. Sous l'effet d'une accélération, une masse sismique vient contraindre la poutre et modifier cette fréquence permettant de mesurer l'accélération avec une très grande précision.

Capteurs pour la vitesse

Pour les vélocimètres électrodynamiques, la masse sismique est une bobine suspendue qui se déplace aux abords d'un aimant, entraînant une variation du champ magnétique dans la bobine et générant un courant induit alternatif représentatif de la vitesse des vibrations. C'est l'effet inverse du haut-parleur électrodynamique où le courant électrique proportionnel aux signaux sonores déplace la bobine de la membrane dans le champ magnétique de l'aimant.

Les vibromètres laser comprennent un tube laser qui envoie sa lumière sur la surface de l'objet soumis aux vibrations. Ces capteurs utilisent l'effet Doppler (le même qu'en acoustique), c'est-à-dire le changement de fréquence du faisceau laser qui apparaît lorsque l'onde lumineuse se réfléchit sur un objet (De manière générale, le mot objet (du latin *objec-tum*, 1361) désigne une entité définie dans un espace à trois D) en mouvement par rapport à l'émetteur. Ces capteurs mesurent la vitesse des vibrations dans l'axe du faisceau laser et permettent des mesures à longue distance ou à travers des hublots pour des mesures en milieux hostiles. Ils peuvent également fournir la valeur de déplacement soit directement, soit par intégration de la vitesse. Ces systèmes sont onéreux et encombrants, mais permettent toutefois d'effectuer des mesures dans des endroits difficilement accessibles ou sur des objets de très faible masse (tympan de mouche !). Les vibromètres laser sont souvent confondus avec les vélocimètres laser qui mesurent la vitesse de défilement d'une surface ou d'un fluide. Les vélocimètres laser fonctionnent par exemple avec 2 faisceaux laser de fréquences différentes créant un motif de franges d'interférence sur la surface de l'objet à mesurer.

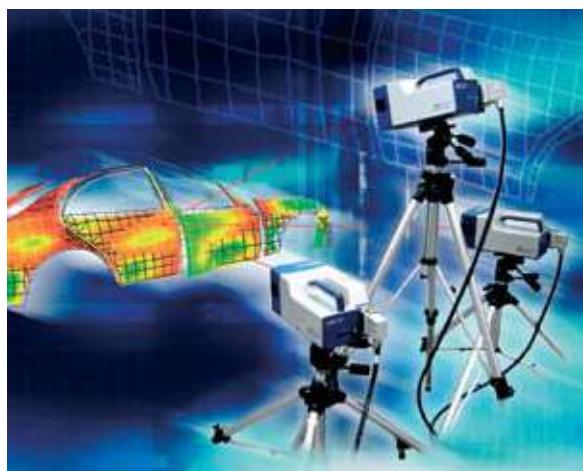


Fig. 5 : Vibromètres Laser 3D à balayage (Source : POLYTEC)

Les vélocimètres à ultrasons fonctionnent également par effet Doppler et utilisent des signaux ultrasonores ou micro-ondes comme ceux utilisés par la Gendarmerie au bord des routes.

Capteurs pour le déplacement

Les mesures de déplacement inductif, capacitif ou optique peuvent se faire sur la masse sismique située à l'intérieur d'un accéléromètre fixé sur l'objet soumis aux vibrations ou directement sur cet objet, ce qui permettra d'effectuer des mesures sans contact, ne perturbant pas le milieu soumis aux vibrations.

Les capteurs de déplacement inductifs mesurent les déplacements vibratoires relatifs et sans contact, quasi-statiques, mais avec une dynamique limitée. Ils génèrent un champ magnétique oscillant en bout de capteur. Si un objet électriquement conducteur vibre dans ce champ, celui-ci se trouve modifié et la variation est exploitée par un démodulateur/amplificateur qui délivre un signal de sortie. Ce type de capteur est très utilisé dans l'industrie, dans des ambiances sévères, avec possibilité de grandes longueurs de câble, mais nécessite souvent un calibrage sur site.

Les capteurs de déplacement capacitifs sans contact mesurent la variation de l'entrefer d'un condensateur dont les 2 armatures peuvent se trouver sur le capteur. Ils peuvent alors fonctionner face à des matériaux isolants et en température. Ils ont une grande sensibilité et une bonne linéarité. Toutefois, ils nécessitent une ambiance propre et leur gamme dynamique est limitée.

Les autres types de capteurs de déplacement sans contact constituent la famille des capteurs optiques maintenant très répandus. Les plus précis sont les capteurs interférométriques qui sont plutôt utilisés en laboratoire et servent aussi d'étalement pour les chaînes de mesure de déplacement ou d'accélération. L'objet en mouvement ou le capteur à étalement est muni d'un réflecteur qui est inclus dans un interféromètre (type Michelson ou Mach-Zender). Le déplacement de l'objet est donc transformé en déplacement de franges d'interférence, et en fonction de la longueur d'onde lumineuse utilisée, un compteur de franges permet de connaître le déplacement des vibrations avec une très grande résolution.

Beaucoup plus courants sont les capteurs à triangulation laser dans lesquels se trouve un petit émetteur laser qui envoie un rayon très fin sur l'objet en mouvement. Le faisceau réfléchi est renvoyé vers le capteur qui comporte un détecteur comme montré sur la figure 6. Lorsque le réflecteur en mouvement se déplace dans la zone permettant d'effectuer des mesures, le faisceau renvoyé se déplace face à l'objectif qui le concentre sur le récepteur optique. Ce détecteur de position convertit la lumière en retour en tension électrique analogique. Ces capteurs permettent des mesures sur de très petites pièces, à distance, avec une grande précision et sur une étendue de mesure importante. Avec l'utilisation de hublots et de miroirs, il est possible d'effectuer des mesures de vibration sur des objets difficilement accessibles ou dans des environnements sévères.

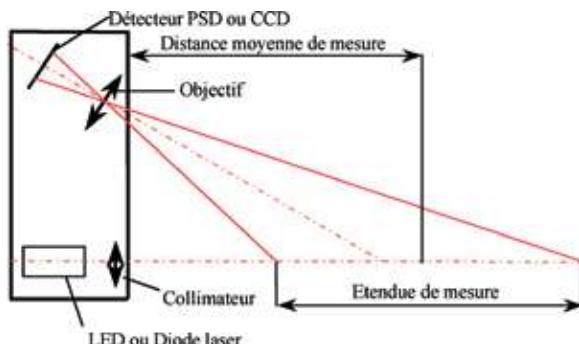


Fig. 6 : Trajets lumineux d'un capteur à triangulation laser

Plus rares et plus coûteux sont les capteurs de déplacement par réflexion : un faisceau de fibres optiques envoie une quantité de lumière sur un objet, la lumière diffusée est recueillie par d'autres fibres faisant partie de ce faisceau. Si l'objet s'éloigne ou se rapproche de cet ensemble de fibres, la quantité de lumière en retour diminuera ou augmentera en fonction de la distance. Le récepteur est assez simple, puisqu'il mesure l'intensité lumineuse en retour. Ce système est très intéressant car le seul faisceau (qui peut être fin) peut s'introduire dans des endroits éloignés et difficilement accessibles. Toutefois, il nécessite un environnement stable en lumière ambiante, une surface diffusante de qualité constante et un étalonnage sur place qui tient compte de la réflectivité de l'objet. Ils ont une étendue de mesure assez faible et le faisceau doit être proche de l'objet en mouvement.

Les capteurs optiques fonctionnant sur le principe de la transmission de lumière comportent une partie émettrice indépendante de la partie réceptrice. Une des parties est fixe et l'autre partie, solidaire de la pièce soumise aux vibrations, est placée en face. En cas de mouvement, les faisceaux se désalignent et la quantité de lumière mesurée en retour est fonction du déplacement de la fibre en mouvement.

Les deux faisceaux peuvent être fixes si la lumière transite par un miroir ou un prisme soumis aux vibrations. Les avantages et inconvénients sont identiques à ceux des capteurs optiques par réflexion, ce système permettant en plus d'accepter un objet avec une surface sale ou irrégulière.



Fig. 7 : Capteurs de déplacement à transformateurs différentiels (Source : Sensorex)

Les capteurs de déplacement à transformateurs différentiels sont également sans contact mécanique, puisque c'est un noyau monté sur l'objet en mouvement qui plonge dans le corps du capteur fixé en face. Le déplacement mécanique de ce noyau face aux bobines des enroulements primaire et secondaire d'un transformateur entraîne une variation du signal induit dans le secondaire, ce qui permet de transformer le déplacement en signal électrique.

Ces capteurs ont une bonne résolution, ils sont robustes, insensibles aux parasites et à l'environnement, peuvent fonctionner en huile, en atmosphère chaude et humide...

Les capteurs de déplacement à fil tendu du type potentiométrique sont de conception simple : un fil est relié d'un côté à l'objet en mouvement et s'enroule de l'autre côté sur un potentiomètre multi tours. En cas de mouvement, le potentiomètre tourne et fait varier sa valeur ohmique. Ces capteurs permettent de très grandes étendues de mesure (plusieurs mètres), de déporter la mesure, et sont peu coûteux. Leur bande passante commence au continu mais est toutefois réduite aux basses fréquences. Ces mesures sont réservées aux grosses structures, car le fil provoque une tension de quelques Newtons qui pourrait modifier les vibrations sur une structure légère.

Les capteurs de déplacement à fil tendu du type encodeur sont identiques, mais l'enrouleur est constitué d'un codeur incrémental ou d'un codeur absolu, ce qui peut favoriser le traitement postérieur de l'information.



Fig. 8 : Capteur de déplacement à fil tendu du type encodeur (Source : Meiri)

Prendre en compte les perturbations potentielles

Le choix du type de capteur à utiliser devra toujours se faire en tenant compte des phénomènes qui pourraient venir perturber les mesures, comme les quelques exemples suivants :

- La variation de lumière ambiante pour les capteurs optiques
- La variation des propriétés magnétiques des objets face aux capteurs inductifs
- Les champs magnétiques rayonnant aux environs des machines
- Les variations de température affectant les parties sensibles des capteurs
- Les effets des dilatations thermiques pour les capteurs de déplacement
- Le vent pour les capteurs à fil tendu
- Les saletés, l'eau ou les huiles pour les capteurs optiques ou capacitifs
- ...

Conclusions et perspectives

La mesure des vibrations implique un choix de capteurs adaptés à l'application finale. L'environnement de mesure doit être également pris en compte. Les différentes tech-

nologies possèdent leurs avantages et inconvénients. Il n'y a pas de capteur « idéal et passe-partout ». Les tendances pour les capteurs du futur sont la miniaturisation notamment par la technologie M/NEMS (Micro et Nano Electro-Mechanical Systems – Voir article : Capteurs résonants M/NEMS et phénomènes non linéaires dans ce même numéro d'Acoustique & Techniques), l'intelligence embarquée permettant des calculs directs des niveaux vibratoires ou des alertes sur les machines, la transmission sans fil pour ne plus gérer des câbles encombrants, l'amélioration de la tenue aux températures notamment pour les capteurs à électronique intégrée, la diminution de la consommation d'énergie, la réduction des prix pour des utilisations grand public ou industrielles à grande échelle.

Références bibliographiques

- [1] Asch G. et collaborateurs, *Les capteurs en instrumentation industrielle*, Dunod, 5ème édition.
- [2] Techniques de l'Ingénieur (l'encyclopédie technique)
- [3] Paratte PA., Robert P., *Systèmes de mesure*, PPUR presses polytechniques, 1996
- [4] Piccirillo J., *Accelerometers*, Texas Instruments Incorporated - Sensors & Controls Division

Le groupe VIBRATEC



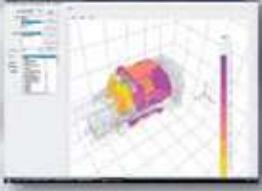








Vibration
Acoustique
Fiabilité









3 sociétés • 100 personnes • Une offre globale

R&D - Ingénierie - Simulation - Essais - Diagnostics - Logiciels - Moyens

+33 [0]4 72 86 65 65 www.vibratec.fr www.vibrateam.fr www.microdb.fr