



Capteurs utilisés pour la mesure de signaux dynamiques

ni.com/france



Nous trouvons les signaux dynamiques dans des domaines techniques très variés. L'acquisition et le traitement des signaux dynamiques ne sont pas exclusivement réservés aux domaines du son et de la vibration même s'ils sont historiquement les premiers utilisateurs.

Pour créer une application faisant appel à des signaux dynamiques, on utilise de nombreux éléments.

Nous nous proposons à travers cette présentation de faire le point sur les principaux capteurs utilisés, ainsi que sur les sources d'excitation.

En effet, avant d'effectuer une quelconque mesure, il est important de bien choisir ses capteurs et de s'assurer qu'ils seront adaptés à l'analyse que l'on souhaite effectuer.

Capteurs de signaux dynamiques

- Accéléromètres
- Microphones
- Tachymètres
- Sources d'excitation



ni.com/france

 NATIONAL
INSTRUMENTS

Les capteurs les plus couramment utilisés pour la mesure de signaux dynamiques sont les accéléromètres, les microphones et les tachymètres. On rencontre également des sondes de déplacement et de vitesse.

Dans les prochaines diapositives, nous allons vous présenter ces différents capteurs, leur principe de fonctionnement et leurs principales caractéristiques.

Nous intégrons à cette présentation les principales sources d'excitation car elles font partie de l'instrumentation utile à l'étalonnage de certains capteurs.

Accéléromètres

? Mesure

- Accélération
- Vitesse et déplacement (par intégration)



? Résultat exprimé en m/s^2 ou g

- $1g$: accélération à la surface de la Terre
- $1g = 9,81 \text{ m/s}^2$

? 1D ou 3D (tri axial) accéléromètres

? Étalonnage effectué à l'aide d'un pot vibrant

ni.com/france



Les accéléromètres permettent de mesurer l'accélération d'un point particulier dans un système en cours de test. Cependant, ce signal correctement intégré par rapport au temps permet également de quantifier une vitesse et un déplacement.

Les paramètres vibratoires sont généralement exprimés en Unités du Système International (m/s^2). La constante gravitationnelle " g " est souvent utilisée pour l'accélération, mais elle ne fait pas partie des Unités du Système International. Heureusement, la conversion en USI peut facilement s'effectuer avec une erreur inférieure à 2% puisque :

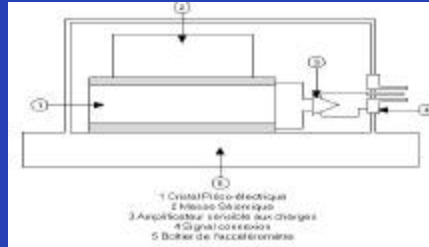
$$1,0 g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

Les accéléromètres simples (1D) mesurent la composante de l'accélération dans une direction particulière. Si trois de ces accéléromètres sont combinés dans un unique capteur (accéléromètre 3D), l'accélération peut être mesurée simultanément dans les trois directions orthogonales.

L'étalonnage d'un accéléromètre est typiquement réalisé à l'aide d'un pot vibrant générant une accélération constante et connue à une fréquence particulière.

Fonctionnement de l'accéléromètre

Accéléromètre à compression



- ? Repose généralement sur l'effet piézoélectrique
- ? Autre conception : par cisaillement (moins sensible à la température)
- ? Conditionnement : électronique intégrée (ICP) ou externe (sortie de charge)

ni.com/france



La plupart des accéléromètres se fondent sur l'utilisation de l'effet piézoélectrique. Dans le cas des accéléromètres à compression, l'accélération de la structure d'essai est transmise à une masse séismique qui produit une force proportionnelle sur le cristal piézoélectrique. Cet effort externe sur le cristal produit alors une charge électrique proportionnelle à la force appliquée et donc à l'accélération. Une autre conception répandue est le mode cisaillement, qui est moins sensible aux effets de la température (la charge est prise dans une direction perpendiculaire à la direction de polarisation).

L'accéléromètre piézoélectrique présente certaines caractéristiques importantes :

- Très large gamme de fréquences et d'accélération et bonne linéarité sur sa gamme de fonctionnement
- Robustesse et fiabilité dues à l'absence de pièces mobiles
- Stabilité dans le temps
- Alimentation externe inutile

Certains accéléromètres utilisent une électronique intégrée (ICP) et nécessitent une source de courant constant pour alimenter l'amplificateur de charge intégré au capteur.

D'autres accéléromètres (sortie de charge) n'ont pas de

conditionnement de signaux intégré et exigent une amplification de

Accéléromètres ICP

? Avantages

- Simples et faciles à utiliser
- Électronique intégrée
- Conditionnement à l'aide d'une simple source de courant constant (18-30 VDC ; 2 à 4 mA)

? Limitations

- Gamme de température max. 120 °C (voire 160 °C)
- Sensibilité fixe

ni.com/france



Le conditionneur ICP fournit une source de courant constant à l'amplificateur de charge intégré au capteur.

ICP est une marque déposée de PCB Piezotronics et signifie : Integrated Circuit Piezoelectric.

Tous les principaux fournisseurs d'accéléromètres ont leur propre solution équivalente, telle qu'Isotron d'Endevco, DeltaTron de Brüel & Kjaer, et Piezotron de Kistler. L'avantage principal de l'accéléromètre ICP est qu'il est simple et facile d'utilisation car la microélectronique intégrée simplifie le conditionneur.

Attention toutefois : ces accéléromètres fonctionnent dans une gamme de températures limitée et présentent une sensibilité fixe directement liée au type de conditionnement.

Accéléromètres à sortie de charge

? Avantages

- Température : jusqu'à 540 °C
- Sensibilité réglable

? Limitations

- Conditionnement externe nécessaire
- Nécessitent un câblage présentant une bonne immunité au bruit
- Sensibles aux perturbations de l'environnement

ni.com/france



Les accéléromètres à sortie de charge sont utilisés essentiellement pour des mesures dans les environnements à hautes températures. Ils offrent également une sensibilité réglable.

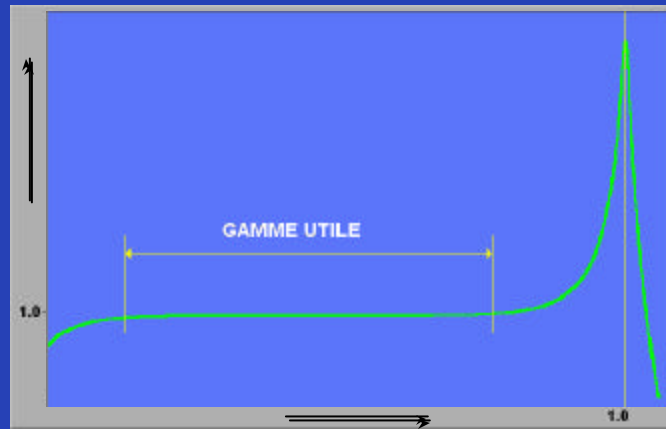
Cependant, comme ils n'ont pas de conditionnement de signaux intégré, ils exigent une amplification de charge et le conditionnement externe pour convertir la charge en tension.

$$V_{\text{out}} = q/C_f$$

Ils nécessitent également un câblage présentant une bonne immunité au bruit et sont sensibles aux perturbations de l'environnement. Ce type de capteur délivre une faible charge. L'effet capacitif du câblage nécessite donc d'effectuer leur étalonnage avec celui-ci.

Réponse fréquentielle classique

Accélération mesurée/accélération réelle de la structure



Fréquence/fréquence de résonance naturelle

ni.com/france

**NATIONAL
INSTRUMENTS**

La limite supérieure d'utilisation de l'accéléromètre est déterminée par la fréquence de résonance du système de masse-ressort de ce dernier. L'utilisation de n'importe quel accéléromètre, nécessite un filtrage pour retirer cette crête à la fréquence de résonance. L'absence de filtrage en sortie de l'accéléromètre peut générer une surcharge susceptible d'altérer les données et les mesures.

Cette courbe présente la réponse typique d'un accéléromètre. On aperçoit très clairement le pic dû à la fréquence de résonance du système masse-ressort auquel s'apparente l'accéléromètre. Pour éviter toute surcharge susceptible d'altérer les données et les mesures, il est donc nécessaire de filtrer le signal issu du capteur afin d'éliminer ce pic parasite. Le filtre qui sera employé sera donc un filtre passe-bas dont la fréquence de coupure délimitera la gamme utile du capteur.

Caractéristiques classiques

	Classique	Spécifique
Gamme de fréquence	0,2 Hz à 25 kHz	
Sensibilité	10 à 1000 mV/g	1 à 10 V/g (séismique)
Masse	5 à 40 g	200 g (séismique)
Gamme d'amplitude	500 g crête	100000 g (choc)

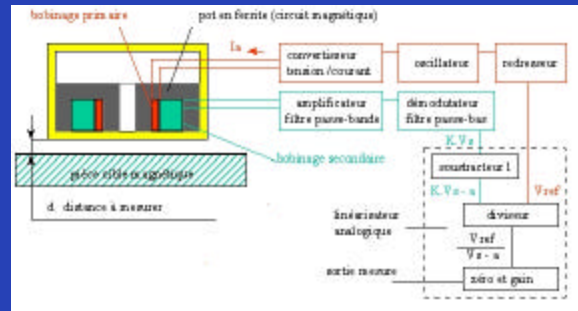
ni.com/france



Certaines caractéristiques classiques des accéléromètres sont données dans cette table. Les deux paramètres importants sont d'une part la gamme de fréquence, qui devrait être soigneusement choisie en fonction du problème étudié, d'autre part la masse du capteur qui pourrait affecter le comportement dynamique de la structure à l'essai, particulièrement pour les pièces légères. Aucun accéléromètre ne peut respecter l'ensemble des caractéristiques mentionnées ici. Le choix d'un capteur particulier est donc toujours affaire de compromis. Les caractéristiques spécifiques sont disponibles pour des mesures spéciales, comme l'analyse séismique ou de choc.

Sondes de déplacement et de vitesse

? Sondes de déplacement sans contact



? Capteurs de vitesse

- Déplacement d'une bobine dans un champ magnétique permanent
- Remplacés par des accéléromètres qui présentent les mêmes fonctionnalités sur une gamme de fréquence plus étendue

ni.com/france



La mesure de la réluctance d'un circuit magnétique permet de réaliser des capteurs de déplacement sans contact. Ces capteurs peuvent mesurer la position de pièces ferromagnétiques (aciers, fontes) ou de pièces simplement conductrices (alliages d'aluminium, alliages de cuivre). C'est la proximité de la pièce à mesurer, la variation de l'entrefer, qui modifie la réluctance du circuit magnétique.

Les variations de réluctance sont mesurées à l'aide d'un ou de deux bobinages montés sur le circuit magnétique. Le conditionneur est composé par exemple d'un oscillateur, d'un convertisseur tension/courant pour l'alimentation du circuit primaire du capteur, d'un amplificateur de filtres et d'un démodulateur pour mesurer la tension qui apparaît aux bornes du circuit secondaire. Les sondes de déplacement sont particulièrement utiles lorsque de faibles accélérations sont générées, comme c'est le cas pour les machines rotatives avec des roulements flexibles (par exemple, turbomachines).

Les capteurs de vitesse emploient une bobine mobile dans un champ magnétique permanent pour produire un signal qui est proportionnel à la vitesse de la vibration. Ce champ magnétique est produit par un aimant permanent monté sur ressorts de sorte que ce système de masse/ressort/amortisseur maintienne l'aimant en position (très basse fréquence de résonance). Ce type de capteur est maintenant souvent remplacé par des accéléromètres, qui offrent les mêmes

caractéristiques (par l'intermédiaire de l'intégration vue précédemment) mais avec un plus grand choix de fréquences

Microphones

? Mesure

- Niveau de pression sonore (SPL)
C'est une variation autour de la pression atmosphérique

? Résultat exprimé en dB (réf. 20 μ Pa)

- $SPL = 20 \log_{10}(p/p_0)$ avec $p_0=20 \mu Pa$
- Niveau typique : 30 dB (murmure) à 120 dB (douleur)
- Gamme de fréquence audible : 20 Hz à 20 kHz



? Étalonnage effectué avec une source de bruit de référence (94 dB classiquement)

ni.com/france

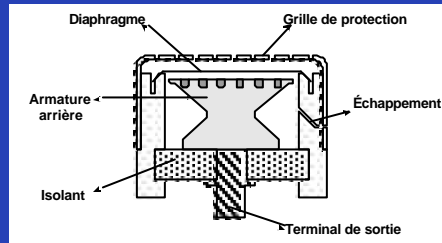


Les microphones sont fondamentalement des capteurs de pression, mais ils sont spécialisés dans la mesure des très faibles variations de pression autour de la pression atmosphérique. Le niveau de pression acoustique (Sound Pressure Level) mesuré par un microphone est exprimé en décibels (référence 20 μ Pa), comme indiqué dans la formule suivante :

$$SPL = 20 \log_{10}(p/p_0) \quad \text{avec} \quad p_0=20 \mu Pa$$

Cette valeur de référence (donnant 0 dB) correspond grossièrement à la sensibilité minimale de l'oreille humaine. En comparaison, une valeur autour de 120 dB correspond au seuil de la douleur. L'étalonnage d'un microphone est exécuté avec une source de bruit de référence produisant un niveau de pression acoustique constant et connu (en général 94 dB, qui correspond presque à 1 Pa).

Fonctionnement d'un microphone



- ? Type le plus largement utilisé : condensateur (capacité)
- ? Charge produite par une tension de polarisation externe, ou issue des propriétés du matériau (prépolarisé)

ni.com/france

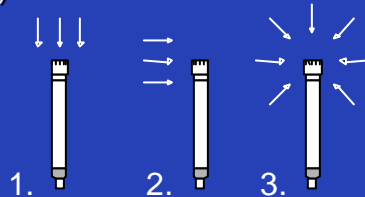


Les microphones à condensateur sont les plus répandus. Leur principe repose sur la variation de charge qui prend naissance entre les deux armatures d'une capacité lorsque la distance entre celles-ci varie. Dans les microphones, ce condensateur est constitué par l'armature arrière et un diaphragme léger qui se déplace en réponse aux variations de pression acoustique.

La charge de ce condensateur est produite soit par une tension de polarisation externe, soit par les propriétés du matériau lui-même dans le cas des microphones prépolarisés. Quelques microphones, appelés piézoélectriques, peuvent utiliser le même conditionnement de signaux que des accéléromètres. D'autres microphones se servent de l'ICP pour fournir la tension de polarisation. Beaucoup de microphones exigent que la tension de polarisation soit fournie extérieurement.

Microphones

? Les caractéristiques sont spécifiques au champ sonore étudié : champ libre (1,2) ou champ diffus (3)



Type de microphone :
1. Champ libre
2. Pression
3. Incidence aléatoire

? L'augmentation de la taille (diamètre) augmente la sensibilité mais affecte la gamme de fréquence et la directivité

ni.com/france



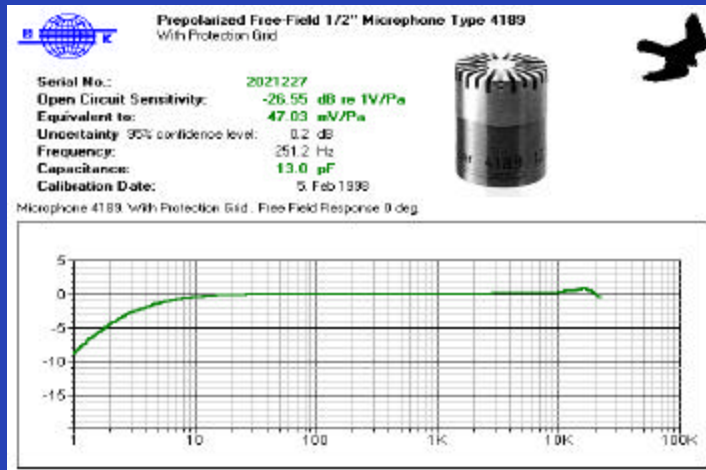
Les caractéristiques des microphones sont optimisées pour compenser les perturbations que provoque leur présence dans le champ sonore. Les microphones de champ libre sont utilisés pour des mesures dans un espace libre (extérieur, intérieur si la réflexion est faible) et doivent être dirigés dans la direction de la source de bruit.

Les microphones de pression peuvent également être utilisés dans un espace libre mais doivent être orientés perpendiculairement à la direction de la propagation du bruit.

Les microphones à incidence aléatoire sont conçus pour effectuer des mesures dans un domaine diffus (pièce fortement réfléchissante), où le son arrive de n'importe quelle direction.

L'augmentation de la taille d'un microphone améliore sa sensibilité, mais elle affecte sa réponse en fréquence et sa directivité. Plus un microphone est petit, moins il perturbera le champ sonore, particulièrement en haute fréquence où la longueur d'onde devient du même ordre de grandeur que la taille du microphone.

Réponse en fréquence typique



ni.com/france

**NATIONAL
INSTRUMENTS**

Une réponse en fréquence typique d'un microphone est présentée sur ce graphique. On observe, pour ce micro particulier, une très bonne linéarité entre 20 Hz et 10 kHz, ce qui correspond approximativement à la gamme des fréquences audibles.

Caractéristiques classiques

	Classique
Gamme de fréquence	0,1 Hz à 140 kHz
Sensibilité	1 à 100 mV/Pa
Tension de polarisation	28 V ; 200 V 0 V (prépolarisé)
Gamme de donnée dynamique	10 à 187 dB
Diamètre	1/8" à 1"

ni.com/france



Les caractéristiques classiques des microphones sont données dans le tableau ci-dessus. Comme pour les accéléromètres, aucun microphone ne peut respecter l'ensemble des caractéristiques mentionnées ici. Le choix d'un capteur particulier est donc encore et toujours affaire de compromis.

Tachymètres

? Mesure

- Position angulaire
- Vitesse angulaire (tr/min)

? Utilisés pour

- Analyse d'ordre
- Intensification (moyenne angulaire)



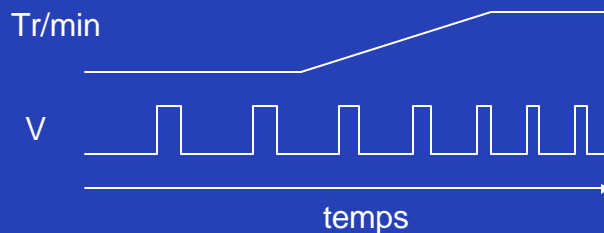
ni.com/france



Concernant l'étude des machines rotatives, il est important de pouvoir associer la mesure d'un accéléromètre ou d'un microphone à la vitesse de rotation réelle de la machine à l'essai.

Un tachymètre détecte la position angulaire d'un axe en fonction du temps et fournit ainsi sa vitesse angulaire (généralement exprimée en tr/min). En plus de ces informations de vitesses angulaires, le signal du tachymètre est nécessaire à l'exécution d'analyses avancées telles que l'analyse d'ordre et l'intensification sur lesquelles nous reviendrons ultérieurement.

Fonctionnement d'un tachymètre



- ? Utilise une roue à N dents (N impulsions/tour)
- ? Détecte la présence d'une dent à l'aide d'un capteur optique (réflexion) ou d'un capteur magnétique (proximité)

ni.com/france



Pour mesurer la position angulaire, une roue avec N dents est généralement montée sur un axe. Le tachymètre détecte alors la présence des dents par l'intermédiaire d'un capteur optique (transition d'une surface réfléchissante à non réfléchive) ou d'un capteur magnétique (proximité de la dent).

Dans certains cas, une petite raie de bande réfléchissante est simplement fixée à l'axe moteur, produisant une impulsion par révolution. Le signal de sortie du tachymètre est un train d'impulsion. Le temps entre deux impulsions consécutives est directement lié à la vitesse angulaire de l'axe.

Si la connaissance de la position angulaire absolue est nécessaire, une roue spéciale avec une dent manquante peut être utilisée. Un exemple typique serait une roue avec 59 dents uniformément réparties tous les 6° ($360^\circ/60$), la soixantième dent manquante étant liée à une position connue de l'axe (tel que le point mort haut pour le vilebrequin dans un moteur).

Sources d'excitation

? Marteau de choc

- Qualification d'impact
- Excitation sur une large bande de fréquence
- Principale utilisation : l'analyse modale



? Pot vibrant

? Haut-parleurs

ni.com/france



Les marteaux permettent de produire, par des impacts mesurables, une excitation sur une large gamme de fréquence. Par conséquent, ils sont principalement utilisés dans l'analyse modale pour exciter des accéléromètres placés sur la structure d'essai.

Les autres sources d'excitation sont les dispositifs trembleurs (pots vibrants) et les haut-parleurs. Celles-ci peuvent être employées pour produire des excitations parfaitement définies (sinus, bruit blanc, grésillement, etc.) ou pour reproduire dans un environnement contrôlé les conditions d'utilisation réelle de la pièce à tester (comme des conditions de route pour une pièce spécifique de voiture).

Conclusion

- S'assurer de la qualité des signaux générés
- Conditionner
- Traiter/analyser
- Visualiser



ni.com/france



Les capteurs détaillés précédemment sont essentiellement utilisés pour la mesure de signaux dynamiques. Chacun d'eux sera utilisé au sein d'applications bien spécifiques.

Bien entendu, une fois les signaux générés, il faut les conditionner, les analyser et les visualiser.

Le conditionnement de signaux est une étape essentielle car il est indispensable de s'assurer de la qualité du signal acquis avant d'effectuer le moindre traitement des données.