

# NORME INTERNATIONALE

ISO  
5347-0

Première édition  
1987-07-15



---

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION  
ORGANISATION INTERNATIONALE DE NORMALISATION  
МЕЖДУНАРОДНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ПО СТАНДАРТИЗАЦИИ

---

108

## Méthodes pour l'étalonnage des capteurs de vibrations et de chocs —

### Partie 0 : Concepts de base

*Methods for the calibration of vibration and shock pick-ups —*

*Part 0: Basic concepts*

## Avant-propos

L'ISO (Organisation internationale de normalisation) est une fédération mondiale d'organismes nationaux de normalisation (comités membres de l'ISO). L'élaboration des Normes internationales est normalement confiée aux comités techniques de l'ISO. Chaque comité membre intéressé par une étude a le droit de faire partie du comité technique créé à cet effet. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec l'ISO participent également aux travaux.

Les projets de Normes internationales adoptés par les comités techniques sont soumis aux comités membres pour approbation, avant leur acceptation comme Normes internationales par le Conseil de l'ISO. Les Normes internationales sont approuvées conformément aux procédures de l'ISO qui requièrent l'approbation de 75 % au moins des comités membres votants.

La Norme internationale ISO 5347-0 a été élaborée par le comité technique ISO/TC 108, *Vibrations et chocs mécaniques*.

L'attention des utilisateurs est attirée sur le fait que toutes les Normes internationales sont de temps en temps soumises à révision et que toute référence faite à une autre Norme internationale dans le présent document implique qu'il s'agit, sauf indication contraire, de la dernière édition.

# Méthodes pour l'étalonnage des capteurs de vibrations et de chocs —

## Partie 0 : Concepts de base

### 0 Introduction

L'étalonnage des capteurs de vibrations et de chocs est devenu de plus en plus important par suite de la nécessité croissante de mesures précises de chocs et de vibrations auxquels l'homme et des équipements de toute sorte sont soumis en service. Plusieurs méthodes ont été appliquées ou proposées pour ces étalonnages dont quelques-unes sont décrites dans la présente partie de l'ISO 5347. Le chapitre 6 donne une description de méthodes qui se sont révélées être des moyens fiables pour l'étalonnage absolu de capteurs de vibrations et de chocs.

Des méthodes d'étalonnage pour capteurs de vibrations et de chocs sont spécifiées dans la présente Norme internationale, étant donné qu'il s'avère peu pratique de faire une distinction entre les capteurs utilisés pour les mesures de vibrations et ceux utilisés pour les mesures de chocs.

La présente Norme internationale se limite aux méthodes d'étalonnage des capteurs d'accélération, de vitesse et de déplacement. Elle ne traite pas des capteurs utilisés pour les mesures de force, de pression ou de contraintes bien qu'il y en ait qui puissent être étalonnés par des méthodes similaires. De même, les capteurs destinés à mesurer le mouvement vibratoire en rotation sont exclus puisqu'il n'y en a pas beaucoup, et le matériel ainsi que les méthodes d'étalonnage diffèrent quelque peu du cas des capteurs rectilignes traités dans la présente Norme internationale.

La présente partie de l'ISO 5347 contient les définitions et décrit l'étalonnage de base absolu. En outre, elle décrit en termes généraux diverses méthodes pour l'étalonnage de capteurs de vibrations et de chocs ainsi que des méthodes de mesure des caractéristiques autres que la sensibilité. Afin de pouvoir effectuer un étalonnage avec l'exactitude donnée, il est nécessaire de fixer des spécifications détaillées concernant les instruments et les procédés. Les informations s'y rapportant pour chaque méthode d'étalonnage sont spécifiées dans les parties suivantes de l'ISO 5347 :

Partie 1: Étalonnage primaire en vibration par interférométrie laser.

Partie 2: Étalonnage primaire en choc par coupure de lumière.

Partie 3: Étalonnage secondaire en vibration.

Partie 4: Étalonnage secondaire en choc.

Partie 5: Étalonnage par gravitation tellurique.

Partie 6: Étalonnage primaire en vibration aux basses fréquences.

Partie 7: Étalonnage primaire par centrifugeuse.

Partie 8: Étalonnage primaire par centrifugeuse double.

Partie 9: Étalonnage primaire en vibration par comparaison des angles de phase.

Partie 10: Étalonnage primaire par chocs en impact de haute énergie.

Partie 11: Essai de sensibilité aux vibrations transversales.

Partie 12: Essai de sensibilité aux chocs transversaux.

Partie 13: Essai de sensibilité à la contrainte sur l'embase.

Partie 14: Essai de fréquence de résonance d'accéléromètres non amortis sur massif d'acier.

Partie 15: Essai de sensibilité acoustique.

Partie 16: Essai de sensibilité au couple de torsion.

Partie 17: Essai de sensibilité en température stabilisée.

Partie 18: Essai de sensibilité aux transitoires de température.

Partie 19: Essai de sensibilité au champ magnétique.

NOTE — D'autres parties sont à l'étude.

Le transducteur peut être étalonné comme une unité particulière, il peut inclure un câble de liaison et/ou un module de conditionnement. Le dispositif d'étalonnage doit toujours être décrit précisément.

Une bibliographie est également donnée et les numéros entre crochets s'y réfèrent.

### 1 Objet

La présente Norme internationale spécifie des méthodes pour l'étalonnage des capteurs de vibrations et de chocs. Elle comprend également des méthodes pour la mesure des caractéristiques autres que la sensibilité.

Une seule méthode pour l'étalonnage absolu a été choisie comme méthode privilégiée (voir 6.2.1). Des méthodes d'étalonnage par comparaison pour des vibrations et des chocs sont aussi spécifiées (voir 6.3). Des descriptions plus détaillées sont données dans les autres parties de la présente Norme internationale.

## 2 Domaine d'application

La présente Norme internationale s'applique à des capteurs rectilignes d'accélération, de vitesse et de déplacement à lecture continue et recommande une méthode privilégiée qui s'est révélée donner des résultats fiables et reproductibles.

Elle ne comprend pas de méthodes pour l'étalonnage de capteurs de rotation.

## 3 Références

ISO 1101, *Dessins techniques — Tolérancement géométrique — Tolérances de forme, orientation, position et battement — Généralités, définitions, symboles, indications sur les dessins.*

ISO 2041, *Vibrations et chocs — Vocabulaire.*

ISO 2954, *Vibrations mécaniques des machines tournantes ou alternatives — Spécifications des appareils de mesure de l'intensité vibratoire.*

## 4 Définitions

Dans le cadre de la présente partie de l'ISO 5347, les définitions données dans l'ISO 2041 ainsi que les définitions suivantes sont applicables.

**4.1 capteur :** Dispositif permettant de transformer le mouvement mécanique à mesurer, par exemple l'accélération dans une direction donnée, en une grandeur pouvant être mesurée et enregistrée commodément.

NOTE — Le capteur peut comprendre un appareillage auxiliaire destiné à amplifier, à produire la puissance nécessaire à l'utilisation, à fournir des éléments de circuit nécessaires, à indiquer ou à enregistrer son signal de sortie, etc.

**4.1.1 gamme d'utilisation :** Gamme en fréquence et en amplitude dans laquelle le capteur se comporte comme un capteur linéaire, dans des limites spécifiées de tolérance.

**4.1.2 capteur réciproque :** Capteur électromécanique réversible dans lequel le rapport entre le courant appliqué et la force produite (quand le capteur est contraint de telle sorte que la vitesse est nulle) est égal au rapport entre la vitesse appliquée et la tension produite (quand le capteur fonctionne en circuit ouvert, de telle sorte que le courant est nul). Des exemples de tels capteurs sont les capteurs électromagnétiques et les capteurs piézo-électriques.

**4.1.3 capteur non réversible :** Capteur qui utilise des jauges de contrainte comme éléments sensibles et pour lequel une excitation électrique ne cause pas d'effet mécanique perceptible dans le capteur.

**4.2 signal d'entrée :** Signal appliqué à l'entrée du capteur, par exemple l'atténuation appliquée à la surface de montage.

**4.3 signal de sortie :** Signal engendré par le capteur en réponse à un signal d'entrée donné.

**4.4 sensibilité :** Pour un capteur linéaire, rapport du signal de sortie au signal d'entrée pour une excitation sinusoïdale parallèle à un axe de sensibilité spécifié à la surface de montage. En général, la sensibilité inclut une information en amplitude et en phase et est, par conséquent, une grandeur complexe qui varie avec la fréquence. Le mouvement sinusoïdal d'entrée peut être exprimé par les équations suivantes :

$$\begin{aligned} d &= \hat{d} \exp[j(\omega t + \varphi_1)] \\ &= \hat{d} [\cos(\omega t + \varphi_1) + j \sin(\omega t + \varphi_1)] \quad \dots (1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} u &= j\omega d = \hat{u} \exp[j(\omega t + \varphi_1 + \pi/2)] \\ &= \hat{u} [\cos(\omega t + \varphi_1 + \pi/2) + j \sin(\omega t + \varphi_1 + \pi/2)] \quad \dots (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a &= j\omega u = \hat{a} \exp[j(\omega t + \varphi_1 + \pi)] \\ &= \hat{a} [\cos(\omega t + \varphi_1 + \pi) + j \sin(\omega t + \varphi_1 + \pi)] \quad \dots (3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} x &= \hat{x} \exp[j(\omega t + \varphi_2)] \\ &= \hat{x} [\cos(\omega t + \varphi_2) + j \sin(\omega t + \varphi_2)] \quad \dots (4) \end{aligned}$$

où

$d$  est le nombre complexe associé au déplacement;

$u$  est le nombre complexe associé à la vitesse;

$a$  est le nombre complexe associé à l'accélération;

$x$  est le nombre complexe associé à la sortie;

$\hat{d}$  est l'amplitude crête du déplacement sinusoïdal;

$\hat{u}$  est l'amplitude crête de la vitesse sinusoïdale;

$\hat{a}$  est l'amplitude crête de l'accélération sinusoïdale;

$\omega$  est la pulsation ou fréquence angulaire;

$\varphi_1$  et  $\varphi_2$  sont les angles de phase;

$t$  est le temps;

$j$  est le nombre imaginaire unitaire.

La sensibilité en déplacement,  $S_d$ , exprimée en unités du signal de sortie par mètre, est

$$S_d = \frac{x}{d} = \hat{S}_d \exp[-j(\varphi_1 - \varphi_2)] \quad \dots (5)$$

où

$\hat{S}_d = \frac{\hat{x}}{\hat{d}}$  est le module de la sensibilité en déplacement;

$(\varphi_1 - \varphi_2)$  est la différence de phase.

La sensibilité en vitesse,  $S_u$ , exprimée en unités de signal de sortie par mètre par seconde, est

$$S_u = \frac{x}{u} = \hat{S}_u \exp[-j(\varphi_1 + \pi/2 - \varphi_2)] \quad \dots (6)$$

où

$\hat{S}_u = \frac{\hat{x}}{\hat{u}}$  est le module de la sensibilité en vitesse;

$(\varphi_1 + \pi/2 - \varphi_2)$  est la différence de phase.

La sensibilité en accélération,  $S_a$ , exprimée en unités de signal de sortie par mètre par seconde carrée, est

$$S_a = \frac{x}{a} = \hat{S}_a \exp[-j(\varphi_1 + \pi - \varphi_2)] \quad \dots (7)$$

où

$\hat{S}_a = \frac{\hat{x}}{\hat{a}}$  est le module de la sensibilité en accélération;

$(\varphi_1 + \pi - \varphi_2)$  est la différence de phase.

Habituellement, la sensibilité en déplacement est destinée à un capteur de déplacement, la sensibilité en vitesse à un capteur de vitesse et la sensibilité en accélération à un capteur d'accélération. En général, les modules de sensibilité et les angles de phase sont des fonctions de la fréquence,  $f = \omega/2\pi$ .

NOTE — On dit d'un capteur de déplacement, de vitesse ou d'accélération dans lequel la sensibilité correspondante n'est pas nulle lorsque la fréquence s'approche de zéro, qu'il a une réponse à la fréquence zéro (réponse en continu). La sensibilité sous accélération constante correspond à  $\omega = 0$  et la différence de phase est nulle. Des exemples de capteurs à réponse à la fréquence zéro sont des capteurs d'accélération utilisant des jauges de contrainte, des potentiomètres, des transformateurs différentiels, des pendules asservis ou des circuits à reluctance variable comme éléments sensibles. Les capteurs sismiques auto-générateurs, ainsi que les capteurs piézo-électriques et les capteurs électrodynamiques sont des exemples de capteurs sans réponse à la fréquence zéro.

**4.5 rapport de sensibilité transversale :** Rapport du signal de sortie d'un capteur, orienté avec son axe de sensibilité en position transversale à la direction du signal d'entrée, au signal de sortie quand l'axe de sensibilité est aligné avec la direction du même signal d'entrée.

**4.6 générateur de vibrations :** Tout dispositif servant à appliquer un mouvement contrôlé à la surface de montage d'un capteur.

NOTE — Les générateurs de vibrations sont parfois appelés des excitateurs ou des pots vibrants.

## 5 Caractéristiques à mesurer

### 5.1 Généralités

L'objectif premier de l'étalonnage d'un capteur est de déterminer sa constante d'étalonnage dans la gamme d'amplitudes et de fréquences pour le degré de liberté pour lequel le capteur doit être utilisé. De plus, il peut être important de connaître sa réponse à des mouvements dans les cinq autres degrés de liberté; par exemple pour un capteur d'accélération rectiligne, la réponse à des mouvements perpendiculaires à la direction sensible et à des rotations doit être connue. D'autres facteurs importants comprennent l'amortissement, le déphasage, la non-linéarité ou la variation de réponse avec l'amplitude du mouvement, l'influence de la température et de la pression, ainsi que d'autres facteurs annexes comme le mouvement du câble de liaison électrique.

### 5.2 Réponse directe (au mesurande)

#### 5.2.1 Réponse en fréquence et réponse en phase

La sensibilité d'un capteur est obtenue, le capteur placé avec son axe de sensibilité parallèle à la direction du mouvement du générateur de vibrations en mesurant le mouvement ou le signal d'entrée appliqué par le générateur de vibrations et en mesurant le signal de sortie du capteur. Aussi bien des capteurs à lecture continue que des capteurs à lecture de crête peuvent être étalonnés avec une excitation transitoire contrôlée dont les composantes d'amplitude et de fréquence sont au-dedans de la gamme d'utilisation du capteur. Pour détecter des résonances quelconques, le signal de sortie du capteur devrait être observé pendant que la fréquence du générateur de vibrations varie lentement et de façon continue dans le domaine de fréquences. En général, seule l'information concernant l'étalonnage de sensibilité en amplitude est donnée en fonction de la fréquence. Cependant, pour l'utilisation de capteurs de vibrations dans les zones proches des fréquences limites supérieures ou inférieures ou pour des applications particulières, on peut avoir besoin de la réponse en phase. Cela est déterminé en mesurant la différence de phase entre le signal de sortie et l'excitation mécanique dans le domaine de fréquences considéré.

#### 5.2.2 Non-linéarité

Les écarts de linéarité de la sortie d'un capteur (distorsion d'amplitude) sont déterminés en mesurant son amplitude de sortie pour des amplitudes d'entrée variant de la valeur la plus petite à la valeur la plus grande pour laquelle le capteur est conçu. Quand on utilise un générateur de vibrations sinusoïdaux, il convient de répéter le mesurage pour plusieurs fréquences.

La non-linéarité peut prendre différentes formes. La sensibilité du capteur peut changer progressivement avec l'augmentation de l'amplitude, une modification permanente peut se produire conduisant à un déplacement du zéro après exposition du capteur à des vibrations ou des chocs, ou des butées internes peuvent exister limitant brusquement l'étendue du mouvement.

Le type et l'amplitude de la non-linéarité d'un capteur peuvent être indiqués par sa distorsion d'amplitude et en comparant sa courbe de résonance, son déphasage et son décrement

avec les caractéristiques correspondantes du capteur linéaire idéalisé. Les écarts de non-linéarité admissibles dépendront des mesures à effectuer. Il convient de s'attendre à une non-linéarité lorsque le capteur est utilisé à la limite supérieure de sa gamme dynamique utile.

### 5.3 Réponse aux grandeurs d'influence

#### 5.3.1 Influence de la température

La sensibilité, le rapport d'amortissement et la fréquence de résonance de beaucoup de capteurs changent en fonction de la température. Habituellement, les étalonnages de réponse en fonction de la température sont effectués en utilisant une méthode de comparaison. Le capteur étalon est monté axialement aligné avec le capteur en essai. Le capteur en essai est placé dans l'enceinte thermique. Le capteur étalon est placé hors de l'enceinte ou protégé d'une autre façon contre les fluctuations de température, de telle manière que sa sensibilité reste constante à  $\pm 2\%$  pour les températures ambiantes présentes pendant la totalité de l'étalonnage. Le générateur de vibrations n'est utilisé qu'à des fréquences où l'on sait que le mouvement transversal est inférieur à 25 % du mouvement axial. Le générateur de vibrations est sélectionné et un support de montage conçu de telle sorte qu'il y ait un mouvement relatif négligeable entre le capteur en essai et le capteur étalon aux fréquences auxquelles on doit effectuer l'étalonnage.

Une procédure alternative pour exécuter des étalonnages de réponse en température est de montrer le capteur étalon et le capteur en essai sur un support convenable dans l'enceinte thermique. Cette méthode est limitée aux domaines de température pour lesquels la réponse du capteur étalon est connue.

Pour les transducteurs qui répondent à une accélération statique, le zéro de déséquilibre est mesuré aux températures maximale et minimale.

Il convient d'étalonner les transducteurs à amortissement interne supérieur à 10 % de l'amortissement critique à une amplitude de vibration unique pour un minimum de quatre fréquences, et à quatre températures en plus de la température ambiante. Cette méthode est également applicable aux capteurs qui, comme les capteurs électrodynamiques, utilisent une bobine conductrice dans leur fonctionnement. Les fréquences sont sélectionnées dans la gamme de fréquences à utiliser.

La capacité et la résistance internes des transducteurs piézo-électriques doivent être mesurées après stabilisation à la température d'étalonnage maximale.

Si la résistance mesurée d'un accéléromètre piézo-électrique à la température d'étalonnage maximale est si basse qu'elle influe sur la réponse en basse fréquence du type d'amplificateur à utiliser, il convient d'effectuer un étalonnage de la réponse en basse fréquence à cette température. Plusieurs fréquences doivent être sélectionnées pour décrire la réponse en fréquence d'une façon adéquate. Il convient d'effectuer l'étalonnage sur la chaîne complète, en utilisant l'amplificateur qui est employé avec l'accéléromètre.

NOTE — Une température élevée peut influencer sur la réponse en basse fréquence de l'accéléromètre aussi bien que le bruit et la stabilité de la combinaison accéléromètre/amplificateur. Les écarts de réponse en température sont calculés comme la variation de la constante d'étalon-

nage déterminée à la température d'essai, rapportée à la constante d'étalonnage à la température ambiante (20 °C) (mesurée à une fréquence choisie dans la gamme de fréquences pour laquelle la réponse du capteur est uniforme). Cette variation est exprimée en pourcentage de la constante d'étalonnage à la température ambiante. Habituellement, il est souhaitable de sélectionner des capteurs ayant des écarts de réponse en température qui ne dépassent pas  $\pm 15\%$  dans la gamme de température d'utilisation.

#### 5.3.2 Sensibilité aux transitoires de température dans des capteurs piézo-électriques

Des signaux de sortie pyroélectriques sont engendrés dans tous les capteurs piézo-électriques soumis à des transitoires de température. Cela vaut surtout pour des matériaux ferroélectriques. L'amplitude des signaux de sortie pyroélectriques dépend du matériau constituant la céramique et de la conception du capteur. Habituellement, la fréquence dominante du signal de sortie pyroélectrique est considérablement inférieure à 1 Hz. Aussi, le signal de sortie pyroélectrique du capteur est, en grande partie, filtré étant donné les caractéristiques en basse fréquence de la plupart des amplificateurs. En conséquence, le signal de sortie pyroélectrique dépend de la vitesse de la variation de température et des caractéristiques de l'amplificateur ainsi que des caractéristiques du capteur.

L'essai pyroélectrique est effectué en utilisant le modèle d'amplificateur employé généralement avec le capteur. Le capteur est fixé sur un bloc d'aluminium par les moyens de fixation habituels. Tous les deux sont rapidement plongés dans un bain d'eau glacée, ou dans un bain d'un autre liquide adéquat, à une température qui diffère d'environ 20 °C de la température ambiante. Il convient de décrire le liquide du bain. Il convient que la masse du bloc soit d'environ dix fois la masse du capteur. Il faut prendre des précautions pour empêcher une pénétration du liquide dans le capteur ou une réduction de la résistance de fuite causée par la présence de liquide au niveau du connecteur, etc. Le signal de sortie maximal de l'amplificateur et l'intervalle de temps entre le début du transitoire de température et l'instant où ce signal de sortie maximal est atteint, sont mesurés par un oscilloscope en courant continu ou par un enregistreur. Si le signal de sortie s'inverse au cours des deux premières secondes et atteint une crête de polarité inversée, l'amplitude et la durée de cette crête sont également enregistrées. Pour un accéléromètre, la sensibilité aux transitoires de température est exprimée en mètres équivalents par seconde carrée par degré Celsius  $[(m/s^2)/^{\circ}C]$ , en divisant le signal de sortie maximal par le produit de la différence entre la température du bain et la température ambiante et de la sensibilité de l'accéléromètre.

Pour des applications spéciales utilisant des amplificateurs qui possèdent des caractéristiques en basse fréquence considérablement différentes, l'essai pyroélectrique est effectué avec l'amplificateur spécifique à utiliser. De plus, pour des applications dans lesquelles la vitesse de température transitoire diffère beaucoup de ce qui est décrit dans les conditions susmentionnées, l'essai peut être effectué en simulant l'environnement de température particulier.

#### 5.3.3 Rapport de sensibilité transversale

Habituellement, le rapport de sensibilité transversale est déterminé à une fréquence unique inférieure à 500 Hz. La fréquence utilisée doit être notée. Un mouvement sinusoïdal est appliqué

à une fréquence pour laquelle le mouvement dans un plan perpendiculaire à l'axe sensible est connu pour être égal à au moins 100 fois le mouvement dans la direction de l'axe sensible. Pour des rapports de sensibilité transversale inférieurs à 1 %, les conditions de mouvement sont plus rigoureuses, et il faut une grande attention et beaucoup d'habileté pour obtenir la valeur du rapport de sensibilité transversale.

Le capteur est monté et mis en rotation autour de son axe sensible sur 360°, par paliers de 45° ou moins, pour déterminer la réponse transverse maximale.

NOTE — Des mesurages de sensibilité transversale expérimentaux sur des accéléromètres n'indiquent aucune dépendance de fréquence démontrable jusqu'à environ 2 000 Hz. Il n'existe actuellement que des données limitées sur la réponse transverse dans la gamme des fréquences allant de 2 000 à 10 000 Hz. Plusieurs expérimentateurs ont déclaré que leurs résultats de mesurage indiquent habituellement que la réponse transverse en hautes fréquences (c'est-à-dire entre 2 000 et 10 000 Hz) est du même ordre de grandeur que celle en basses fréquences (c'est-à-dire moins de 500 Hz). En général, on considère que, pour des accéléromètres dont la fréquence de résonance axiale est plus grande que 30 kHz, les fréquences de résonance transversale principales sont supérieures à 10 kHz et, par conséquent, au-delà de la gamme d'utilisation normale du capteur. Pour d'autres modèles de capteurs de vibrations, il existe actuellement encore peu d'information. Si possible, il convient de déterminer la plus basse fréquence de résonance transverse.

### 5.3.4 Sensibilité à la rotation

Certains capteurs de vibrations rectilignes sont sensibles à des signaux d'entrée de rotation. Citons, par exemple, les accéléromètres piézo-électriques et piézo-résistifs du type flexion, et les accéléromètres à pendule asservis. Par manque de connaissance sur les essais appropriés, on n'est pas en état de donner actuellement des prescriptions spécifiques, ni des méthodes d'essai. L'attention est attirée, toutefois, sur l'existence d'une sensibilité à la rotation et des précautions peuvent devoir être prises lors d'autres essais afin d'empêcher une erreur de mesurage due à cet effet.

### 5.3.5 Sensibilité à la contrainte

La technique décrite ci-dessous est la méthode préférentielle pour déterminer l'erreur produite à la sortie d'un capteur due à la flexion de sa base.

Le capteur est monté sur un corbeau simple qui produit un rayon de courbure de 2 500 cm et une contrainte de  $250 \times 10^{-6}$ .

Un corbeau en acier est fixé sur un support rigide. Le corbeau a 76 mm de largeur et 12,5 mm d'épaisseur avec une longueur libre de 1 450 mm.

La fréquence naturelle est très près de 5 Hz. La contrainte est mesurée par jauges de contrainte liées au corbeau près du point de fixation du capteur, à environ 40 mm de l'extrémité fixée. Le mouvement au point de fixation peut être contrôlé par un capteur fixé en utilisant une isolation supplémentaire contre la flexion de base. Habituellement, un capteur ayant une constante d'étalonnage 10 fois plus élevée que les capteurs en essai est adéquat. Les signaux de sortie des jauges de contrainte et du capteur en essai sont enregistrés.

Le système est excité par une flexion manuelle de l'extrémité libre du corbeau en lui permettant de vibrer librement. Le signal de sortie du capteur est relevé sur l'enregistrement de l'oscillo-

graphe en un point où la contrainte de la surface du corbeau est de  $250 \times 10^{-6}$ . (Ceci est équivalent à un rayon de courbure de 25 m.) L'erreur est la différence entre le mouvement du corbeau au point de fixation et le mouvement indiqué par le capteur. La sensibilité à la contrainte, pour une contrainte de  $10^{-6}$ , est déterminée en divisant la différence susmentionnée par 250.

Il convient de mesurer la sensibilité à la contrainte à plusieurs amplitudes de contrainte, dans des directions différentes. La sensibilité à la contrainte maximale de quelques capteurs peut produire des erreurs considérables dans certaines applications et conditions de montage. Par exemple, quelques accéléromètres piézo-électriques produisent des signaux d'erreur d'un pourcentage élevé à certaines fréquences où des contraintes sont produites dans des générateurs de vibrations destinés à l'étalonnage.

### 5.3.6 Sensibilité magnétique

Le capteur est monté sur un cylindre de 5 kg en matière non magnétique, du plomb de préférence. Le capteur monté est placé dans un champ magnétique connu à 50, 60, et 400 Hz, ou à d'autres fréquences disponibles, et ensuite mis en rotation. Le signal de sortie électrique maximal du capteur est enregistré. Pour des accéléromètres, la sensibilité est exprimée en mètres par seconde carrée par tesla. Pour des capteurs de vitesse, la sensibilité est exprimée en mètres par seconde par tesla dans la gamme de fréquences utile, enregistrée comme équivalent. Les vibrations mécaniques induites et le bruit électrique parasite doivent être éliminés dans le montage d'essai.

### 5.3.7 Sensibilité au couple de torsion de montage

La variation de la constante d'étalonnage due au couple de torsion de montage de capteur est déterminée en appliquant des couples de torsion de valeur égale à la moitié, à la valeur entière et au double de la valeur, du couple de torsion maximal de montage spécifié. Cet essai n'est valable que pour des capteurs montés à l'aide de vis, de boulons ou d'autres moyens de fixation filetés. Dans le cas où plus d'un moyen de fixation est utilisé pour un montage normal, les couples de torsion devraient être appliqués à chaque moyen de fixation.

Il faudrait prendre garde de s'assurer que la surface de montage du capteur ne présente pas d'inégalités ou d'autres défauts de surface qui pourraient empêcher un montage plat. Il convient que la surface d'essai sur laquelle le capteur est à monter soit plate, lisse et faite en acier. Des valeurs de planéité et de rugosité recommandées sont des courbures de plus de 5  $\mu\text{m}$  et un finissage de fond de 2  $\mu\text{m}$  de valeur moyenne quadratique ou mieux.

Il convient que la surface d'essai sur laquelle le transducteur est à monter soit percée et taraudée à angle droit de la surface de montage avec une perpendicularité de 0,05 mm ou meilleure (voir ISO 1101). Le graissage de la surface de contact normalement recommandé devrait être utilisé et indiqué. Le couple de torsion devrait toujours être appliqué à partir de la position «non monté», c'est-à-dire à partir du couple de torsion nul pour chacun des trois couples de torsion d'essai. La sensibilité en torsion est donnée par la variation de la constante d'étalonnage du capteur pour la moitié de et pour deux fois la valeur du couple de torsion spécifié. Elle doit être rapportée à la valeur du couple de torsion spécifié. Il convient que l'incertitude sur le couple de torsion appliqué ne dépasse pas  $\pm 15 \%$ .

### 5.3.8 Environnements particuliers

Le fonctionnement de certains capteurs peut être affecté défavorablement dans certains environnements particuliers comme des champs électrostatiques forts, des champs magnétiques ou de radio-fréquences variables, des champs acoustiques, dans le cas d'effets de câble, et d'irradiation nucléaire. Actuellement, il n'existe aucune technique généralement acceptée pour le mesurage de l'effet de tels environnements particuliers sur un capteur, bien que des essais spéciaux aient été développés dans des cas où l'on pouvait attendre des effets défavorables. (Voir ISO 2954.)

## 6 Méthodes d'étalonnage

### 6.1 Généralités

Pour effectuer l'étalonnage direct d'un capteur, il est nécessaire d'utiliser un générateur de vibrations qui applique un signal d'entrée contrôlable et mesurable au capteur et de fournir les moyens nécessaires pour enregistrer et mesurer la sortie du capteur. Le capteur doit être fixé au générateur de vibrations (ou placé près de celui-ci dans le cas de capteurs dont la sortie dépend du mouvement relatif entre le capteur et l'objet vibrant).

La fixation doit être assez rigide pour transmettre le mouvement du générateur de vibrations au capteur dans la gamme de fréquences du capteur. Cela exige que la fréquence naturelle du système, constitué du capteur considéré comme la masse, et la fixation considérée comme le ressort, d'un système à un seul degré de liberté, soit élevée par rapport à la composante fréquentielle la plus élevée du mouvement du générateur de vibrations. Le générateur de vibrations peut être une référence pour l'inclinaison du capteur par rapport à l'action de la pesanteur, à une centrifugeuse, à un générateur de vibration électrodynamique ou à l'enclume d'un pendule balistique. Le support d'inclinaison et la centrifugeuse sont utilisés pour l'étalonnage à la fréquence zéro. L'étalonnage en rotation est utilisé pour l'étalonnage en basse fréquence du champ gravitationnel. Le générateur de vibrations électrodynamique est utilisé, en général, pour des étalonnages sinusoïdaux entretenus. Les pendules balistiques, qui appliquent des excitations transitoires, peuvent être utilisés comme des instruments complémentaires du générateur de vibrations électrodynamique, pour donner la réponse en fréquence naturelle et permettre un étalonnage à accélérations et vitesses élevées. De plus, l'excitation par choc peut être utilisée pour vérifier le rendement du capteur exposé à des accélérations élevées et à des variations de vitesse, et pour contrôler que les instruments auxiliaires reliés au capteur fonctionnent correctement dans des conditions transitoires.

Quelques méthodes d'étalonnage sont décrites dans la présente Norme internationale, et elles peuvent être utilisées dans des cas particuliers. Cependant, l'utilisation d'un interféromètre laser est recommandée pour obtenir un étalonnage absolu. Autant que possible, il est recommandé d'étalonner des capteurs de référence par cette méthode, et dans le cas où seulement une fréquence est utilisée, celle-ci devrait être de préférence de 160, 80 ou 16 Hz selon l'application envisagée. Une réponse en fréquence peut être obtenue par étalonnage à des fréquences discrètes dans la gamme de fréquences considérée ou par la réponse en fréquence rapportée à la sensibilité à la fréquence de référence avec une moins grande précision. La plu-

part des autres étalonnages nécessaires peuvent être effectués par comparaison avec un capteur de référence étalonné de façon absolue. L'étalonnage se réfère toujours à la base mobile du capteur, et, en ce qui concerne les étalonnages avec montage en opposition, à la base du montage pour le capteur inconnu.

### 6.2 Méthodes d'étalonnage absolu

#### 6.2.1 Étalonnage par mesurage d'amplitude de déplacement et de fréquence

##### 6.2.1.1 Généralités

Beaucoup de méthodes d'étalonnage dynamique dépendent du mesurage précis de l'amplitude de déplacement de la vibration à laquelle le capteur est soumis. Cette méthode est utilisée, en général, pour des capteurs à lecture continue. Le mouvement sinusoïdal appliqué par le générateur de vibrations devrait être le long d'une ligne droite bien définie; il convient que les mouvements latéraux soient négligeables.

Les déplacements mesurés peuvent servir à calculer des vitesses,  $u$ , et des accélérations,  $a$ , à l'aide des formules  $u = 2\pi f d$  et  $a = (2\pi f)^2 d$  qui sont dérivées par différenciation simple et double respectivement pour le déplacement sinusoïdal,  $d$ , et la fréquence,  $f$ . Ces formules supposent que les contenus harmonique et de bruit du mouvement restent négligeables même après la différenciation. Elles soulignent le besoin de minimisation de la distorsion due aux sources de puissance électrique ou due à d'autres causes comme par exemple la résonance mécanique. Les harmoniques sont également inacceptables parce qu'elles peuvent exciter une résonance du capteur.

Une fois l'amplitude de déplacement connue, la sensibilité du capteur peut être calculée comme le rapport de la sortie de capteur mesurée à l'amplitude de vitesse ou d'accélération.

L'amplitude de déplacement doit être mesurée par interféromètre laser. La méthode est bien décrite dans [1], [2], [3], [4], [5] et [6].

En général, les méthodes de calcul utilisées dans l'interférométrie laser donnent une bonne précision jusqu'à 600 Hz à 1 000 m/s<sup>2</sup> (ce qui correspond à une amplitude de déplacement de 70  $\mu$ m); 1 % d'incertitude a été rapporté à 600 Hz, 0,5 % a été rapporté dans la gamme de 80 à 160 Hz. Des erreurs considérables dans le mesurage de déplacement se produiront si le miroir de référence est perturbé à la fréquence à laquelle l'accéléromètre est excité (ou à une fréquence harmonique). Une erreur peut aussi être le résultat d'une perturbation du diviseur de faisceau. Il est à conseiller de surveiller de telles perturbations en utilisant un accéléromètre très sensible.

##### 6.2.1.2 Théorie de l'interféromètre idéal

Le principe est montré à la figure 1, où  $E_0$ ,  $E_1$  et  $E_2$  représentent les vecteurs de champ électrique, et  $l_1$  et  $l_2$  représentent les longueurs de parcours réelles que les rayons doivent parcourir après le diviseur de faisceau. Le déplacement à mesurer est représenté par  $d$  (miroir 2).

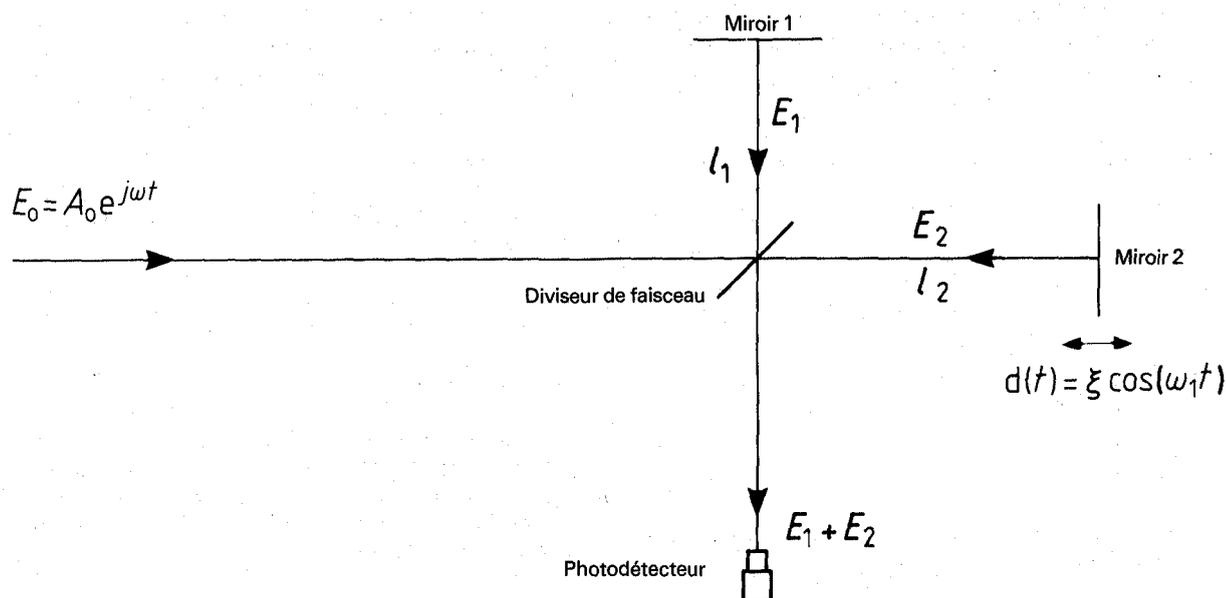


Figure 1 — Principe de l'interféromètre idéal

Les vecteurs de champ électrique  $E_1$  et  $E_2$  peuvent être représentés par les formules

$$E_1 = A_1 \exp \left[ j \left( \omega t + \frac{4\pi}{\lambda} l_1 \right) \right]$$

$$E_2 = A_2 \exp \left\{ j \left[ \omega t + \frac{4\pi}{\lambda} (l_2 + d) \right] \right\}$$

où  $\lambda$  est la longueur d'onde de la lumière laser.

L'intensité du photo-détecteur  $I(t)$  est déterminée à l'aide de la formule

$$I(t) \approx |E_1 + E_2|^2 = A + B \cos \left[ \frac{4\pi}{\lambda} (L + d) \right]$$

où

$A$  et  $B$  sont des constantes.

$$L = l_2 - l_1$$

À partir de l'expression de l'intensité on peut voir que les maxima se produiront quand

$$\frac{4\pi}{\lambda} (l_2 - l_1 + d) = 2n\pi$$

et, par conséquent, le déplacement qui correspond à la distance entre deux maxima d'intensité est donné par  $d = \lambda/2$ . Le nombre de maxima,  $R_f$ , pour un cycle de vibration est alors

$$R_f = 4\xi / (\lambda/2) = 8\xi/\lambda$$

Ce nombre est appelé « rapport de fréquence » car il peut être calculé en divisant le nombre de franges comptées pendant 1 s par la fréquence de vibration.

L'amplitude de déplacement,  $\xi$ , est alors donnée par la formule

$$\xi = R_f \cdot \lambda / 8$$

Si la fréquence de vibration est mesurée, en plus du rapport de fréquence, on peut aussi calculer la vitesse et l'accélération.

Le même système peut être utilisé pour mesurer l'amplitude de déplacement à des fréquences qui n'entrent pas dans la gamme recommandée ci-dessus pour la méthode de calcul par franges. Plusieurs autres méthodes peuvent être définies en considérant le spectre de fréquence de l'intensité  $I(t)$ . Comme il est indiqué en [1], le développement de la formule donne :

$$I(t) = A + B \cos \left\{ \frac{4\pi L}{\lambda} \left[ J_0 \left( \frac{4\pi \xi}{\lambda} \right) - 2J_2 \left( \frac{4\pi \xi}{\lambda} \right) \cos(2\omega_1 t) + 2J_4 \left( \frac{4\pi \xi}{\lambda} \right) \cos(4\omega_1 t) - \dots \right] \right\} - B \sin \left\{ \frac{4\pi L}{\lambda} \left[ 2J_1 \left( \frac{4\pi \xi}{\lambda} \right) \cos(\omega_1 t) - 2J_3 \left( \frac{4\pi \xi}{\lambda} \right) \cos(3\omega_1 t) + \dots \right] \right\}$$

Les deux exemples suivants illustrent le type de traitement de signal exigé ici.

a) En ajustant l'amplitude de vibration à un niveau tel que la  $n^{\text{ième}}$  composante harmonique soit égale à zéro, on peut résoudre l'équation  $J_n\left(\frac{4\pi}{\lambda}\xi\right) = 0$  pour obtenir  $\xi$ .

b) S'il est impossible ou peu pratique d'étalonner à des niveaux d'amplitude exigés par la méthode de  $J_n\left(\frac{4\pi}{\lambda}\xi\right) = 0$ , on peut extraire la valeur de  $\xi$  du rapport de deux composantes harmoniques, par exemple en résolvant l'équation suivante :

$$\frac{J_1\left(\frac{4\pi}{\lambda}\xi\right)}{J_3\left(\frac{4\pi}{\lambda}\xi\right)} = \frac{V_1}{V_3}$$

où  $V_1$  et  $V_3$  sont les grandeurs mesurées de la première et de la troisième harmonique.

### 6.2.1.3 Dispositif de mesurage

Un exemple de dispositif de mesurage est montré à la figure 2. Le capteur est un capteur appelé capteur de référence et la sensibilité doit être déterminée pour la surface supérieure (surface de montage de référence). Le laser a une puissance de sortie de 1 mW, et le détecteur est un phototransistor de silicium normal. Le générateur d'impulsion est utilisé pour obtenir un signal bien défini à l'entrée du compteur à la place de l'oscillateur interne à quartz. L'analyseur de fréquence est utilisé pour sélectionner la fréquence appropriée lorsque la méthode du point zéro est employée. Il convient que les systèmes laser-interféromètre et la table vibrante soient montés sur des blocs massifs indépendants isolés des vibrations (par exemple chacun ayant une masse de plus de 400 kg) pour éviter la perturbation du miroir de référence et du diviseur de faisceau par la réaction de la structure de support de la table vibrante.

### 6.2.2 Étalonnage par la méthode de réciprocité (voir [4], [6], [7] et [8])

Des étalonnages primaires peuvent aussi être effectués en utilisant la technique d'étalonnage par réciprocité. La théorie de réciprocité est applicable à l'étalonnage des capteurs étalons de vibrations dans la gamme d'amplitude où la sortie électrique du transducteur est linéairement proportionnelle au mouvement du générateur de vibrations sur lequel il est étalonné. La théorie montre une relation de réciprocité pour la bobine d'excitation du générateur de vibrations et l'égalité des rapports de force/courant et de tension/vitesse.

*englobée par l'accéléromètre*  
Lorsque la bobine conductrice du calibre est mise sous tension, à une fréquence spécifiée, la sensibilité,  $S_{uc}$ , est définie comme le rapport de la tension,  $E_{13}$ , en volts, ~~à la bobine sensible à la vitesse~~, à l'accélération  $a$ , en mètres par seconde carrée, à la surface de la table de montage, c'est-à-dire

$$S_{uc} = \frac{E_{13}}{a} \quad \dots (8)$$

L'objet de la méthode de réciprocité est de déterminer la sensibilité  $S_{uc}$  de sorte qu'en mesurant la tension,  $E_{13}$ , l'accélération  $a$  puisse être calculée à l'aide de l'équation (8).  $S_{uc}$  est déterminée à l'aide de l'équation suivante :

$$S_{uc} = S_0 + s_z Z_m \quad \dots (9)$$

où  $Z_m$  est l'impédance mécanique, en kilogrammes par seconde ~~par mètre~~, du capteur. ✓

Les grandeurs  $S_0$  et  $s_z$  sont déterminées par les deux expériences suivantes et les calculs suivants.

#### Expérience 1

Plusieurs poids sont attachés à la table de montage. Pour chaque poids, et sans aucun poids, l'admittance de transfert  $Y_e$ , en ampères par volt, est mesurée entre la bobine d'excitation et l'accéléromètre. La grandeur  $Y_e$  est déterminée à l'aide de l'équation suivante :

$$Y_e = \frac{I}{E_{13}} \quad \dots (10)$$

où

$I$  est le courant électrique, en ampères, dans la bobine d'excitation;

$E_{13}$  est la tension, en volts, engendrée par l'accéléromètre.

#### Expérience 2

Les parties mobiles du calibre sont soumises à des vibrations sinusoïdales en connectant la table de montage du calibre à un générateur de vibrations, puis en mettant sous tension le générateur de vibrations<sup>1)</sup>. Le rapport,  $E_{13}/E_{15}$ , de la tension,  $E_{13}$ , engendrée dans l'accéléromètre à la tension en circuit ouvert,  $E_{15}$ , engendrée dans la bobine d'excitation, est mesuré.

#### Calculs

Déterminer l'ordonnée à l'origine,  $J$ , et la pente,  $Q$ , de la fonction  $W/(Y_{eW} - Y_{e0})$  quand celle-ci est tracée en fonction de la masse  $W$  du poids attaché à la table de montage dans l'expérience 1, où  $Y_{eW}$  est la valeur de  $Y_e$  avec un poids de masse  $W$  attaché et  $Y_{e0}$  est la valeur pour  $W = 0$ . Ce tracé est effectué en séparant  $W/(Y_{eW} - Y_{e0})$  en parties réelles et imaginaires à partir desquelles sont déterminées les parties réelles et imaginaires de  $J$  et  $Q$ . Les grandeurs  $S_0$  et  $s_z$  dans l'équation (9) sont alors données par :

$$S_0 = \sqrt{j\omega E_{13}/E_{15}} \quad \dots (11)$$

$$s_z = \sqrt{(E_{13}/E_{15})/(j\omega J)} \quad \dots (12)$$

où

$\omega$  est la fréquence angulaire, en radians par seconde;

$j$  est le nombre imaginaire unitaire.

1) On a construit quelques générateurs de vibrations électrodynamiques qui ont deux bobines d'excitation mécaniquement jointes à l'armature du générateur de vibrations et à la table de montage. Dans ce cas, il n'est pas nécessaire d'utiliser un générateur de vibrations séparé.